

УДК 535.214, 535.4

ОПТИЧЕСКИЕ СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ДИМЕР НАНОЧАСТИЦ В СТРУКТУРИРОВАННОМ ПОЛЕ»

С.В. Сухов^{a, b}, А.С. Шалин^{b, c}

^a Университет центральной Флориды, Орландо, Флорида, FL 32816, Соединенные Штаты Америки

^b Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, 432011, Российская Федерация

^c Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

Адрес для переписки: alexandesh@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 17.10.14, принята к печати 05.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-1-5

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Сухов С.В., Шалин А.С. Оптические силы притяжения в системе «димер наночастиц в структурированном поле» // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 1–5

Аннотация. Предметом исследования работы являются оптические силы притяжения как одно из проявлений механического воздействия оптического излучения на материальные объекты. В частности, рассмотрены оптические силы, действующие на димер, составленный из наночастиц с малым по отношению к длине волны радиусом. Вычисление оптических сил (сил Лоренца) осуществлено на основе электромагнитных полей, полученных в результате решения самосогласованной системы полевых уравнений. Выведена аналитическая формула, показывающая зависимость оптической силы, действующей на димер, от параметров димерной системы и структурированной волны, составленной из двух скрещивающихся плоских волн. Впервые показано, что на димер из одинаковых дипольных частиц в структурированном оптическом поле может действовать сила притяжения к источнику, так называемое «отрицательное радиационное давление». Показано, что силы притяжения обусловлены увеличением импульса фотонов (вернее, проекции импульса фотонов на направление распространения структурированной волны) в результате рассеяния. Соответствующая диаграмма рассеяния димерной системы показала усиленное рассеяние вперед, что подтверждает указанный механизм возникновения сил притяжения. Результаты исследования будут полезны для расширения возможностей оптического манипулирования нано- и микрочастицами.

Ключевые слова: оптическое манипулирование, оптические силы, силы притяжения, наночастица, димер

Благодарности. Работа поддержана грантами РФФИ №13-02-00623, № 15-02-01344. Расчет и исследование диаграммы направленности димеров произведен при поддержке гранта Российского научного фонда №14-12-01227.

OPTICAL PULLING FORCES IN “NANOPARTICLES DIMER IN THE STRUCTURED FIELD” SYSTEM

S.V. Sukhov^{a, b}, A.S. Shalin^{b, c}

^a University of Central Florida, Orlando, Florida, FL 32816, USA

^b Kotel'nikov's Institution of Radioengineering and Electronics RAS (Ulianovsk branch), Ulianovsk, 432011, Russian Federation

^c ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: alexadesh@gmail.com

Article info

Received 17.10.14, accepted 05.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-1-5

Article in Russian

Reference for citation: Sukhov S.V., Shalin A.S. Optical pulling forces in “Nanoparticles dimer in the structured field” system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 1–5 (in Russian)

Abstract. The subject area of this research is optical pulling forces as one of the manifestations of light mechanical action on material objects. In particular, we investigated optical forces acting on a dimer composed of nanoparticles with a small radius as compared to wavelength. The calculation of Lorentz optical forces was carried out by solving self-consistent system of equations, which made it possible to calculate electromagnetic fields in every point of the structure. We worked out analytic formula, representing the dependence of optical force on the parameters of dimer system and structured radiation made up of two crossing plane waves. For the first time we showed that dimer consisting of two equal dipolar particles can experience an optical pulling force (“negative radiation pressure”) in the field of two crossing plane waves. It is shown that the increase of photons momentum (the projection of photons momentum on the direction of structured light propagation) after scattering is

responsible for this negative radiation pressure. The corresponding scattering diagram showed the increase of forward scattering, that is the conformation of the considered mechanism of pulling forces origination. Our findings would be very useful for increasing capabilities of optical manipulation of nano- and micro-particles.

Keywords: optical manipulation, optical forces, pulling forces, nanoparticle, dimer.

Acknowledgements. This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the project No.13-02-00623. The calculation and investigation of dimers scattering diagram was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 14-12-01227.

Введение

Недавно нами было продемонстрировано, что при облучении произвольного рассеивающего объекта структурированной оптической волной можно создать оптические силы, действующие на данный объект в направлении, обратном распространению волны [1]. Появление оптических сил притяжения удивительно потому, что обычное радиационное давление всегда действует в направлении распространения электромагнитной волны [2]. Принцип возникновения сил притяжения основан на увеличении импульсов рассеянных фотонов по отношению к импульсам падающих. В действительности увеличиваются не сами импульсы, а их проекции относительно выделенной оси [1]. В отличие от градиентных сил оптических оптических ловушек [3–5], непотенциальные силы притяжения могут действовать на сравнительно протяженных участках. Это открывает новые возможности оптического манипулирования нано- и микрочастицами [6].

Простейшим объектом, для которого возможно создание сил притяжения, является однородный объект в виде сферы с субволновыми размерами [7–9]. Экспериментальная проверка существования оптических сил притяжения для таких частиц в поле структурированных лучей была произведена в работе [10]. В настоящей работе мы рассмотрим простейшие неоднородные рассеивающие объекты, каковыми являются димеры, состоящие из двух микроскопических сфер, и определим параметры, при которых возможно возбуждение сил притяжения в данной системе. Преимуществом таких систем является то, что они допускают простой аналитический анализ зависимости оптических сил от параметров системы. Отметим, что в работе [6] было экспериментально показано, что силы притяжения для цепочек микроскопических сфер могут быть намного больше, чем для одиночных сфер, и условия возбуждения этих сил могут быть более подходящими для практических применений, но анализ зависимости сил от параметров цепочек не был проведен.

Силы притяжения в системе дипольных димеров

Рассмотрим две одинаковые жестко связанные сферы, расположенные вблизи друг друга (рис. 1). Данный димер освещается некой структурированной волной \mathbf{E}_{0l} (параметры этой волны будут представлены ниже по тексту), распространяющейся вдоль оси димера.

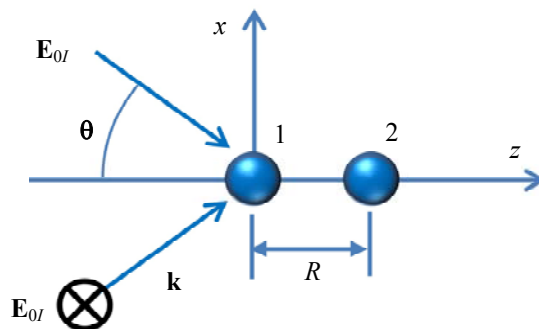


Рис. 1. Геометрия системы. Диполи 1 и 2, расположенные вдоль оси z , взаимодействуют со структурированной волной, составленной из двух плоских волн, распространяющихся под углом θ к оси димера

Предполагая, что размеры частиц намного меньше длины волны λ структурированного пучка, оптический отклик частиц может быть охарактеризован единственным параметром – поляризуемостью α . Учитывая многократное рассеивание света наносферами, уравнения для определения электромагнитного поля $\mathbf{E}_{1,2}$ в месте расположения наночастиц $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ записываются в следующем виде [11, 12]:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1(\mathbf{r}_1) = \mathbf{E}_{0l}(\mathbf{r}_1) + \mathbf{G}(R)\alpha\mathbf{E}_2(\mathbf{r}_2) \\ \mathbf{E}_2(\mathbf{r}_2) = \mathbf{E}_{0l}(\mathbf{r}_2) + \mathbf{G}(R)\alpha\mathbf{E}_1(\mathbf{r}_1) \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{G}(R)$ – тензор функции Грина [7, 13]:

$$\mathbf{G}(R) = \begin{pmatrix} G_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & G_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\parallel} \end{pmatrix},$$

$G_{\parallel} = G_{zz} = \frac{2}{R^3} \exp(ikR)(-ikR+1)$, $G_{\perp} = G_{yy} = G_{xx} = \frac{1}{R^3} \exp(ikR)(k^2R^2 + ikR - 1)$, $R = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$ – расстояние между двумя наносферами (рис. 1), $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Поляризуемость α может быть выражена через показатель преломления частиц следующим образом:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{2i}{3} k^3 \alpha_0 \right)^{-1},$$

где α_0 – статическая поляризуемость,

$$\alpha_0 = a^3 \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2},$$

n – относительный показатель преломления частиц, a – радиус частиц.

Для получения сил притяжения и превосходства проекции импульса рассеянных фотонов на ось, соединяющую димер, над соответствующей проекцией падающих фотонов внешнее поле \mathbf{E}_{0l} должно содержать компоненты, распространяющиеся под углом к оси димера [1, 4, 5]. Такому условию удовлетворяют бездифракционные пучки, которые поддерживают свою структуру на значительных расстояниях. Условием бездифракционности является наличие одинаковой тангенциальной компоненты для всех Фурье-компонент пучка [14]:

$$\mathbf{E}_{0l}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}(x, y) \exp(ik_z z), \quad \mathbf{E}(x, y) = \int_0^{2\pi} \mathbf{A}(\varphi) \exp[ik_t(x \cos \varphi + y \sin \varphi)] d\varphi.$$

В этом выражении $k_z = k \cos \theta$, $k_z^2 + k_t^2 = k^2$, $\mathbf{A}(\varphi)$ – произвольная функция азимутального угла φ .

Чтобы упростить дальнейшие расчеты, выберем амплитуду Фурье-гармоник в виде $\mathbf{A}(\varphi) = \mathbf{A}_0 (\delta_{\varphi,0} + \delta_{\varphi,\pi})$, где δ_{φ} – дельта-функция Дирака. Простейшим примером бездифракционной волны, таким образом, будет служить интерференция двух плоских волн, распространяющихся под углом θ к оси димера. Ниже будет показано, что выбранного таким образом структурированного пучка достаточно для создания сил притяжения. Выберем поляризацию волн, составляющих структурированный пучок, в направлении, перпендикулярном оси димера $\mathbf{A}_0 = E_{0l} \hat{y}$ (рис. 1):

$$\mathbf{E}_{0l}(\mathbf{r}) = 2E_{0l} \cos(kx \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta). \quad (2)$$

Такой выбор поляризации обусловлен тем, что диполи наиболее эффективно рассеивают в направлении, перпендикулярном направлению дипольного момента. Следовательно, при данном направлении поляризации диполи будут наиболее эффективно взаимодействовать друг с другом. Кроме того, при таком выборе поляризации у результирующего поля отсутствуют x и z компоненты даже в непараксиальном случае схождения волн ($\theta \gg 0$), что позволяет свести систему уравнений (1) к системе двух скалярных уравнений.

Энергия рассматриваемого структурированного пучка распространяется вдоль оси z . Таким образом, для того чтобы показать наличие оптических сил, действующих в направлении, противоположном распространению энергии, необходимо удостовериться, что z -компонента оптических сил может принимать отрицательные значения. Оптические силы, действующие на димер вдоль его оси, можно определить, зная поля $\mathbf{E}_{1,2}$ в системе [15, 16]:

$$F_z = \frac{1}{2} \sum_{j=1,2} \operatorname{Re} \left(\alpha \mathbf{E}_j \frac{\partial \mathbf{E}_j^*}{\partial z} \right). \quad (3)$$

Решая систему (1) относительно полей $\mathbf{E}_{1,2}$ и вычисляя производные (3), получаем следующее выражение для оптической силы F_z :

$$F_z \approx \alpha_0^2 E_{0l}^2 k^4 \left(\frac{2}{3} t + \frac{1}{k^4} \operatorname{Im} \left(\frac{\partial G_{\perp}}{\partial R} \right) \sin(xt) + \frac{t \cos(xt)}{k^3} \operatorname{Im} G_{\perp} \right), \quad (4)$$

где $t = \cos \theta$, $x = kR$. При выводе выражения (4) мы предположили, что частицы не поглощают (показатель преломления частиц n – действительная величина) и что рассеяние частиц достаточно мало, так что можно пренебречь слагаемыми порядка $|\alpha \mathbf{G}|^3$ и выше.

Выражение (4) должно быть оптимизировано относительно переменных x и t для получения минимально возможного значения F_z . Данная оптимизация была проведена численно и дала результат $-0,018$

для выражения, стоящего в круглых скобках, для межчастичного расстояния $R = 0,46\lambda$ и угла схождения волн $\theta \approx 77,4^\circ$. Интересно отметить, что с учетом вышеуказанных предположений оптимальные межчастичное расстояние и угол схождения не зависят от показателей преломления частиц. Следует также отметить, что, согласно формуле (4), найденное значение силы не зависит от абсолютного значения координаты z положения димера. Это свойство F_z обусловлено выбором распределения поля в виде (2) с интенсивностью, неизменной вдоль оси z . Отсутствие градиентов интенсивности вдоль оси z также позволяет нам говорить о том, что оптические силы, действующие на димер, являются неградиентными и, следовательно, непотенциальными.

Найденный оптимальный угол схождения волн $\theta \approx 77,4^\circ$ достаточно велик и требует наличия сильно непараксиального пучка, но стоит отметить, что для одиночного диполя силы притяжения не достигаются ни при каких значениях угла θ [17].

Как упоминалось ранее, возникновение сил притяжения обусловлено перераспределением рассеяния пучка со сходящимися волнами вдоль направления распространения пучка. Для иллюстрации этого механизма мы представляем на рис. 2 диаграмму рассеяния димера. Горизонтальная ось диаграммы совпадает с осью димера. Положительное направление оси соответствует рассеянию вперед. Из диаграммы видно, что присутствие второго диполя устраняет обычную симметрию дипольного рассеяния и приводит к тому, что дипольная система начинает рассеивать свет преимущественно вперед. Отметим, что оптическая сила притяжения в рассматриваемой системе может принимать большие значения в случае плазмонных димеров, исследованию которых в настоящее время посвящено большое количество работ [18–20].

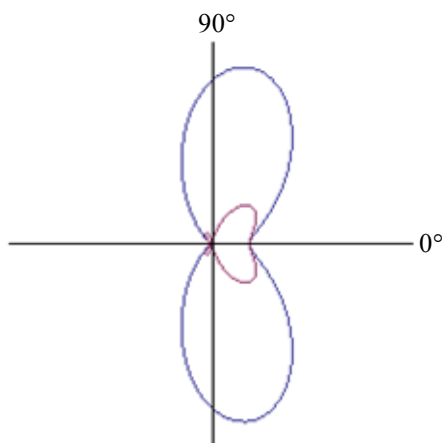


Рис. 2. Диаграмма рассеяния дипольного димера при оптимальном межчастичном расстоянии и угле схождения волн (см. основной текст для пояснения). Показаны сечения рассеяния вдоль двух перпендикулярных плоскостей. Направление 0° соответствует рассеянию вдоль оси z (рис. 1). Направление 90° соответствует рассеянию перпендикулярно оси димера

Заключение

В данной работе детально исследованы оптические силы, действующие на димер из одинаковых наночастиц в поле структурированного излучения, представляющего собой две скрещивающиеся плоские волны. Впервые исследованы условия возникновения оптических сил притяжения, так называемого «отрицательного радиационного давления», а также показано, что диаграмма рассеяния димера в рассмотренном случае допускает большие значения проекции импульса рассеянных фотонов на выделенную ось, нежели соответствующая проекция импульса падающих фотонов (преимущественное рассеяние вперед). В связи с этим движение димера в поле указанного структурированного излучения происходит по направлению к источнику.

Полученные результаты обладают существенной значимостью для развития методов оптической манипуляции нанообъектами, разработки новых типов оптических пинцетов и создания «лучей притяжения», которым в настоящее время уделяется обширное внимание. Описанные эффекты должны проявляться особенно сильно для плазмонных наночастиц, поляризуемость которых при оптически малых размерах имеет резонанс в видимой области спектра.

Литература

1. Sukhov S., Dogariu A. Negative nonconservative forces: optical 'tractor beams' for arbitrary objects // Physical Review Letters. 2011. V. 107. N 20. Art. 203602. doi: 10.1103/PhysRevLett.107.203602
2. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М: Мир, 1965. 703 с.

3. Нелепец А.В., Тарлыков В.А. Транспортировка и деформация диэлектрических частиц градиентными силами светового давления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 58. С. 59–65.
4. Шалин А.С., Сухов С.В. Оптические силы в плазмонных наноантеннах // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 4. С. 355–360.
5. Shalin A.S., Sukhov S.V. Plasmonic nanostructures as accelerators for nanoparticles: optical nanocannon // Plasmonics. 2013. V. 8. N 2. P. 625–629. doi: 10.1007/s11468-012-9447-0
6. Dogariu A., Sukhov S., Saenz J. Optically induced 'negative forces' // Nature Photonics. 2013. V. 7. N 1. P. 24–27. doi: 10.1038/nphoton.2012.315
7. Chen J., Ng J., Lin Z., Chan C.T. Optical pulling force // Nature Photonics. 2011. V. 5. N 9. P. 531–534. doi: 10.1038/nphoton.2011.153
8. Novitsky A., Qiu C.-W., Wang H. Single gradientless light beam drags particles as tractor beams // Physical Review Letters. 2011. V. 107. N 20. Art. 203601. doi: 10.1103/PhysRevLett.107.203601
9. Novitsky A., Qiu C.-W., Lavrinenko A. Material-independent and size-independent tractor beams for dipole objects // Physical Review Letters. 2012. V. 109. N 2. Art. 023902. doi: 10.1103/PhysRevLett.109.023902
10. Brzobohatý O., Karásek V., Šiler M., Chvátal L., Čižmár T., Zemánek P. Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a 'tractor beam' // Nature Photonics. 2013. V. 7. N 2. P. 123–127. doi: 10.1038/nphoton.2012.332
11. Depasse F., Vigoureux J.-M. Optical binding force between two Rayleigh particles // Journal of Physics D: Applied Physics. 1994. V. 27. N 5. P. 914–919. doi: 10.1088/0022-3727/27/5/006
12. Gadomsky O.N., Sukhov S.V., Voronov Yu.Yu. Near-field effect in two-atom system // European Physical Journal D. 2000. V. 11. N 2. P. 185–190.
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Мир, 1974. 719 с.
14. Tervo J., Vahimaa P., Turunen J. On propagation-invariant and self-imaging intensity distributions of electromagnetic fields // Journal of Modern Optics. 2002. V. 49. N 9. P. 1537–1543. doi: 10.1080/09500340110107504
15. Ashkin A., Gordon J.P. Stability of radiation-pressure particle traps: an optical Earnshaw theorem // Optics Letters. 1983. V. 8. N 10. P. 511–513.
16. Chaumet P.C., Nieto-Vesperinas M. Time-averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field // Optics Letters. 2000. V. 25. N 15. P. 1065–1067.
17. Dogariu A., Sukhov S. On the concept of 'tractor beams' // Optics Letters. 2010. V. 35. N 22. P. 3847–3849. doi: 10.1364/OL.35.003847
18. Tsai C.-Y., Lin J.-W., Wu C.-Y., Lin P.-T., Lu T.-W., Lee P.-T. Plasmonic coupling in gold nanoring dimers: observation of coupled bonding mode // Nano Letters. 2012. V. 12. N 3. P. 1648–1654. doi: 10.1021/nl300012m
19. Mertens J., Eiden A.L., Sigle D.O., Huang F., Lombardo A., Sun Z., Sundaram R.S., Colli A., Tserkezis C., Aizpurua J., Milana S., Ferrari A.C., Baumberg J.J. Controlling subnanometer gaps in plasmonic dimers using graphene // Nano Letters. 2013. V. 13. N 11. P. 5033–5038. doi: 10.1021/nl4018463
20. Theiss J., Aykol M., Pavaskar P., Cronin S.B. Plasmonic mode mixing in nanoparticle dimers with nm-separations via substrate-mediated coupling // Nano Research. 2014. V. 7. N 9. P. 1344–1354. doi: 10.1007/s12274-014-0499-7

- Сухов Сергей Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет центральной Флориды, Орlando, Флорида, FL 32816, Соединенные Штаты Америки; старший научный сотрудник, Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, 432011, Российская Федерация, s_sukhov@hotmail.com
- Шалин Александр Сергеевич** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; старший научный сотрудник, Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, 432011, Российская Федерация, alexandesh@gmail.com
- Sergei V. Sukhov** – PhD, senior scientific researcher, CREOL, University of Central Florida, Orlando, Florida, FL 32816, USA; senior scientific researcher, Kotelnikov's Institution of Radioengineering and Electronics RAS (Ulianovsk branch), Ulianovsk, 432011, Russian Federation, s_sukhov@hotmail.com
- Alexander S. Shalin** – PhD, senior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, senior scientific researcher, Kotelnikov's Institution of Radioengineering and Electronics RAS (Ulianovsk branch), Ulianovsk, 432011, Russian Federation, alexandesh@gmail.com

УДК 535.4

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОСТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Н.Д. Зорич^а, И.Л. Лившиц^а, Е.А. Соколова^б

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

^б РиверД Интернационал, Роттердам, 3029 АК, Нидерланды

Адрес для переписки: nenadnex@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.10.14, принята к печати 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Зорич Н.Д., Лившиц И.Л., Соколова Е.А. Преимущества использования дифракционных оптических элементов в простых оптических изображающих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 6–13

Аннотация. Исследовано влияние дифракционных оптических элементов на оптические aberrации. Их преимуществом является способность генерировать произвольные сложные волновые фронты в плоском слое оптического материала. Рассмотрены вопросы коррекции aberrаций в простых оптических системах с одной и двумя линзами (синглет и дублет). Оптические системы со стандартными поверхностями были разработаны и оптимизированы с использованием одних и тех же исходных параметров. На этой базе спроектированы и оптимизированы гибридные оптические системы с дифракционными и асферическими поверхностями. На первом этапе для сравнения уровня сложности проектирования оптических систем с узким и широким полем отдельно исследована оптическая система с узкими полями. Аналогичным образом проанализирована система с широким полем. Оптические системы были разработаны с помощью специализированного программного обеспечения для проектирования оптических систем. Характеристики проектируемых дифракционных поверхностей контролировались с использованием программного обеспечения DIFSYS 2.30. Применение дифракционных оптических элементов обеспечило снижение продольной хроматической aberrаций почти в 5 раз по оси (узкие поля). Абсолютное значение коэффициента Зейделя, соответствующего сферической aberrации, снижено до диапазона 0,03. В связи с тем, что дифракционные оптические элементы имеют известные недостатки (возможность присутствия паразитарных порядков дифракции и вероятное снижение пропускающей способности), нами проанализированы и разработаны оптические системы с комбинированными асферическими и дифракционными поверхностями. Сочетание дифракционных и асферических поверхностей в оптической системе объектива, считывающего информацию с оптического диска, обеспечило снижение продольных хроматических aberrаций по оси почти в 15 раз по сравнению с объективом, содержащим только асферические и стандартные сферические поверхности. Все рассчитанные дифракционные оптические элементы могут быть изготовлены с применением имеющегося оборудования.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, бинарная поверхность, aberrации, линзы, моделирование оптических систем

Благодарности. Работа выполнена при поддержке People Programme (Marie Curie Actions) Седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP7/2007-2013), грант REA, соглашение № PITN-GA-2013-608082 «ADOPSYS».

ADVANTAGES OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS APPLICATION IN SIMPLE OPTICAL IMAGING SYSTEMS

Nenad Dj. Zoric^а, Irina L. Livshits^а, Elena A. Sokolova^б

^а ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

^б RiverD, International B.V., Rotterdam, 3029 AK, The Netherlands

Corresponding author: nenadnex@gmail.com

Article info

Received 01.10.14, accepted 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13

Article in Russian

Reference for citation: Zoric N.Dj., Livshits I.L., Sokolova E.A. Advantages of diffractive optical elements application in simple optical imaging systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 6–13 (in Russian)

Abstract. The paper deals with the influence of diffractive optical elements on the optical aberrations. The correction of optical aberrations was investigated in the simple optical systems with one and two lenses (singlet and doublet). The advantages of diffractive optical elements are their ability to generate arbitrary complex wave fronts from a piece of optical material that

is essentially flat. The optical systems consisting of the standard surfaces were designed and optimized by using the same starting points. Further, the diffractive and aspheric surfaces were introduced into the developed systems. The resulting hybrid systems were optimized. To compare the complicity of the development of narrow field systems and wide field optical systems, the optimization has been done separately for these two types of the instruments. The optical systems were designed by using special Optical Design Software. The characteristics of designed diffractive surfaces were controlled in Software DIFSYS 2.30. Due to the application of diffractive optical elements the longitudinal chromatic aberration was 5 times reduced for the narrow field systems. The absolute value of Seidel coefficient related to the spherical aberration was reduced in the range of 0.03. Considering that diffractive optical elements have the known disadvantages, like possible parasitic diffraction orders and probable decrease of the transmission, we also developed and analyzed the optical systems with combined aspheric and diffractive surfaces. A combination of the aspheric and diffractive surfaces in the optical disk system of the disk reading lens, gave cutting down of the longitudinal color aberrations almost 15 times on-axis, comparing to the lens consisting of the aspherical and standard surfaces. All of the designed diffractive optical elements possess the parameters within the fabrication limits.

Keywords: diffractive optical elements, binary surface, aberrations, lens, optical systems design.

Acknowledgements. The research leading to these results has received funding from the People Programme (Marie Curie Actions) of the European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under REA grant agreement no. PITN-GA-2013-608082 'ADOPSYs'.

Введение

Дифракционные линзы могут быть использованы для уменьшения числа элементов в обычных линзовых системах и для альтернативного подхода к коррекции хроматических aberrаций. Дифракционные линзы представляют собой решетки с переменным периодом, который обуславливает их хроматические aberrации. При использовании дифракционных свойств поверхности становится возможным спроектировать гибридный элемент для получения ахроматического скорректированного элемента за счет того, что дифракционная поверхность вносит дополнительные параметры (коэффициенты бинарной поверхности типа 2) в оптическую схему. Сферическая aberrация для точки на оси, как правило, является одной из самых важных первичных aberrаций, поскольку без ее удовлетворительной коррекции не удастся получить хорошее качество изображения и по всему полю объектива. Альтернативный метод уменьшения сферической aberrации также заключается в использовании дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1].

Дифракционные линзы представляют собой очень тонкие элементы [2] с общей толщиной, равной $\lambda/(n-1)$, где λ – рабочая длина волны и n – показатель преломления (рис. 1). Дифракционная линза состоит из серии зон, толщина которых становится тоньше по направлению к краю линзы. Бинарные элементы достигают эффективности около 80% (без учета потерь на поверхностях) и часто могут быть экономичными в производстве, особенно если их размеры невелики и если требуемый рисунок имеет центральную симметрию. Основным свойством дифракционной линзы является то, что она использует интерференцию и дифракцию. В результате спектральные свойства дифракционной линзы совершенно отличны от свойств обычной преломляющей линзы. Дифракционные и рефракционные элементы могут быть объединены в одном элементе (гибридные элементы), чтобы устранить или, по крайней мере, значительно снизить хроматическую aberrацию. Эти так называемые гибридные ахроматы используют тот факт, что дисперсия преломляющих элементов противоположна по знаку дисперсии дифракционных элементов, так что они могут компенсировать друг друга [3–5]. Дисперсия дифракционной линзы примерно в 7 раз больше, чем дисперсия самого сильного стекла типа флинт, имеющегося в настоящее время. Замена рефракционной линзы на дифракционную обычно обеспечивает существенное снижение веса и количества оптических элементов, необходимых для достижения заданного уровня разрешающей способности.

Программное обеспечение (ПО) для автоматического расчета оптических систем существенно экономит время разработчика. Исторически такое ПО создавалось в первую очередь для проектирования линзовых объективов, и уже позже добавлялись возможности моделирования других оптических систем, например, использующих дифракцию. При этом разработчики ПО не всегда были знакомы со всеми технологическими тонкостями изготовления дифракционных элементов. В связи с этим в описаниях ПО часто отсутствует полная информация о том, каким образом параметры оптимизации связаны с aberrационными свойствами и с параметрами изготовления [6].

В ряде публикаций рассматривается использование ДОЭ в сложных многокомпонентных системах, содержащих не только дифракционные оптические элементы, но также и асферическую и градиентную оптику [7]. Из таких примеров трудно выделить влияние именно ДОЭ на качество изображения, а также оценить целесообразность такого усложнения оптической системы и связанного с ним увеличения стоимости ее изготовления. В работе [8] рассмотрен ряд примеров оптических схем, содержащих два и даже три дифракционных элемента в одной системе. В связи с физической природой дифракционной оптики такие примеры имеют чисто академический интерес и не могут быть рекомендованы для производства. Кривая эффективности дифракционной линзы имеет довольно узкий спектральный максимум. При использовании в системе двух и более дифракционных линз значения эффективности для каждой длины волны перемножаются, и кривая становится еще более узкой. Кроме того, если теоретический

максимум такой кривой составляет почти 100%, практически он всегда ниже из-за погрешностей формы дифракционного профиля.

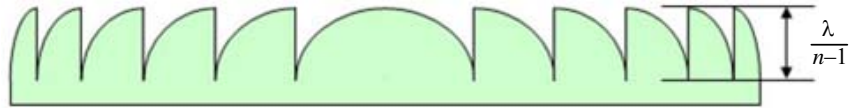


Рис. 1. Дифракционная поверхность

Таким образом, включение каждого дополнительного дифракционного элемента снижает пропускание системы. В связи с технологическими ограничениями на минимальный размер структуры дифракционного элемента область практического использования дифракционной оптики в основном ограничена средней и дальней инфракрасной (ИК) областью [9]. Однако с развитием микро- и нанотехнологий представляется перспективным расширение применения дифракционной оптики на ближнюю ИК [10], а также на видимую и даже ультрафиолетовую области спектра. Последнее может быть особенно актуально для современных систем микрофотографии.

В связи с вышесказанным авторами считают практически важным и актуальным рассмотреть преимущества использования ДОЭ на примерах простых оптических систем с использованием ПО автоматического проектирования, доступных широкому кругу расчетчиков оптических систем. Данная работа является началом систематического изучения широкого круга вопросов, связанных со спецификой использования ДОЭ в системах различного назначения. Многие поверхности в ПО ZEMAX 9.1 [11] могут быть заданы как дифракционные в дополнение к преломляющим. Сила дифракционной поверхности не зависит от показателя преломления и стрелки прогиба поверхности и изменяет фазу лучей. Бинарная поверхность типа 2 часто используется для ахроматизации, как можно заметить на примере простого синглета (рис. 2), где показано, что длины волны большей длины фокусируются на большем расстоянии Z (ось Z) от объектива, чем для коротких длин волн [11]. Бинарная поверхность заменяет гладкие грани Френеля ступенчатым контуром, который может быть изготовлен с помощью процесса фотолитографии высокого разрешения. Рельеф поверхности создается путем воздействия серии масок. Число уровней, полученных таким образом, равно $2m$, где m – число масок, отсюда и название «бинарная поверхность». Эффективность (т.е. процент света, который проходит в нужном направлении) бинарной поверхности ограничена количеством уровней, которые используются для аппроксимации идеально гладкого контура Френеля [12–14]. ДОЭ с круговой симметрией, например, бинарная поверхность типа 2, может использоваться для коррекции продольного хроматизма.

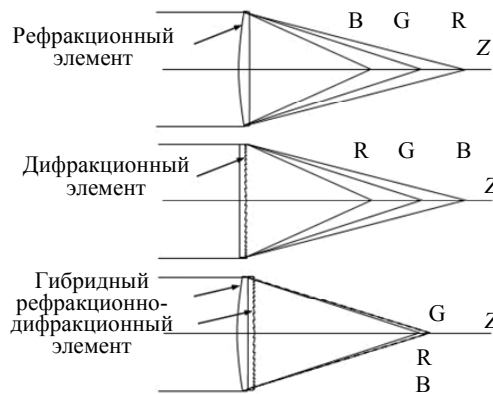


Рис. 2. Оптическая система, рассчитанная с применением ДОЭ (R – лучи красного спектрального диапазона, G – лучи зеленого спектрального диапазона, B – лучи синего спектрального диапазона)

В настоящей работе была проведена оптимизация простых оптических систем с использованием бинарной поверхности типа 2, заданной в ПО ZEMAX 9.1. Далее мы подробно объясним преимущества использования ДОЭ в синглете и дублете соответственно. В заключение будут приведены результаты расчетов в системах с применением ДОЭ и без них.

Преимущества использования ДОЭ при проектировании гибридного синглета

В работе были отдельно исследованы синглеты с малым полем (на оптической оси) и синглеты с увеличенным угловым полем, что позволило проследить влияние поля. Для оптимизации стартовой точки синглета (одиночной линзы) по методу минимизации квадратичного отклонения радиуса пятна рассеяния была использована оценочная функции «по умолчанию» из ПО ZEMAX 9.1. В качестве стартовой точки для расчета синглета была выбрана линза номер 10.0255 Rolyn Optics из каталога ZEMAX. В табл. 1 представлены технические характеристики стартовой точки. Результаты, полученные после оп-

тимизации одной и той же стартовой точки с использованием ДОЭ и без него, представлены далее. Мы начали наш подход к проектированию на примере преобразования плосковыпуклого синглета в ахромат (ахроматизованная линза). Используя бинарную поверхность типа 2, в ПО ZEMAX 9.1 провели оптимизацию синглета с малым полем и синглета с широким полем.

Наименование	Значение
Фокусное расстояние	100 мм
Апертурное число	2,8
Основная длина волны	$\lambda = 0,587$ мкм

Таблица 1. Технические характеристики стартовой точки

Для оптимизации стартовой точки синглета по методу минимизации квадратичного отклонения радиуса пятна рассеяния была использована оценочная функция «по умолчанию» центриод РА 18×18. Плоская поверхность линзы номер 10.0255 (рис. 4) была выбрана и определена как бинарная поверхность типа 2 и рассчитывалась для высоты 20 мм.

Полученные в редакторе данных коэффициенты были использованы для контроля рассчитанной бинарной поверхности типа 2 в ПО DIFFSYS Ver.2.30. Коэффициенты Dn – коэффициенты фазы в радианах, нормированные по высоте апертурного луча линзы. Эти коэффициенты равны бинарным коэффициентам в ZEMAX для случая, когда радиус нормализации равен половине высоты светового диаметра дифракционной (бинарной) поверхности, что изменяет фазу луча. Коэффициенты Dn синглета с малым полем равны $D2 = -1723,762988$; $D4 = 462,802191$; $D6 = -22,896256$; $D8 = 6,289262$. Рассчитанная нами дифракционная поверхность имеет 203 зоны с минимальной шириной 0,0340 мм между двумя зонами (рис. 3, а). Дифракционная поверхность имеет кривой профиль, разделенный на зоны. Полученные коэффициенты Dn синглета с широким полем составляют $D2 = -2081,843288$; $D4 = 1450,300445$; $D6 = 1835,981640$; $D8 = 1078,19394$. Смоделированная таким образом дифракционная поверхность имеет 221 зону с минимальной шириной 0,029051 мм между двумя зонами (рис. 3, б). Дифракционная поверхность может быть изготовлена, поскольку минимальная ширина между зонами больше 10 мкм. На рис. 4 проведено сравнение продольной сферической aberrации полученной оптимизированной линзы номер 10.0255 с аналогичными характеристиками стандартной линзы, и ясно видно значительное снижение продольного хроматизма (рис. 4, в) синглета с ДОЭ. Сферическая и продольные aberrации снижаются в случае гибридного синглета, но оптимизация менее эффективна в случае продольной хроматической aberrации, которая имеет место для синглета с увеличенным угловым полем.

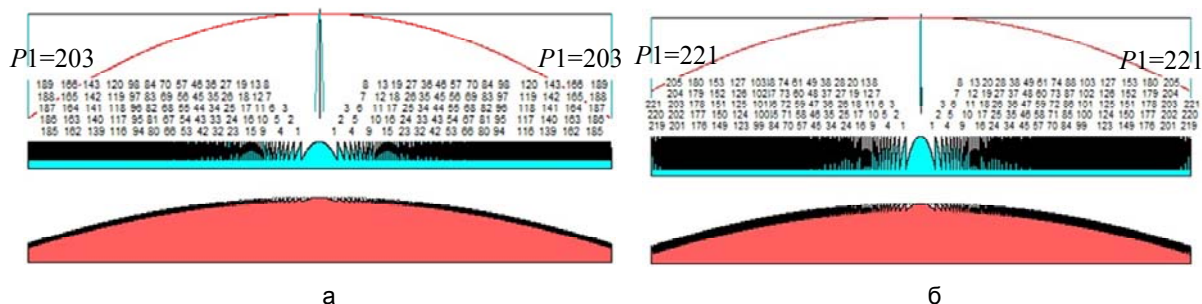


Рис. 3. Бинарная поверхность типа 2: синглет с малым полем (а); синглет с увеличенным угловым полем (б). P – число зон профиля

Можем заключить, что ДОЭ лучше подходит для оптической системы с малым полем. Коэффициенты Зейделя для продольной сферической aberrации, также как и значения aberrаций, представленные в табл. 2, показывают улучшения в синглете с простым использованием одной дифракционной поверхности. Оптические aberrации – кому, астигматизм и дисторсию – мы в этом случае не рассматривали.

Коэффициенты Зейделя	Синглет с малым полем	Синглет с широким полем
SPHE без ДОЭ	0,20677	0,20688
LSPH без ДОЭ	3,19456	3,19627
SPHE с использованием ДОЭ	0,17291	0,16993
LSPH с использованием ДОЭ	2,66836	2,62255

Таблица 2. Коэффициенты Зейделя для синглета с малым и широким полем. SPHE – коэффициент сферической aberrации, LSPH – коэффициент латеральной сферической aberrации

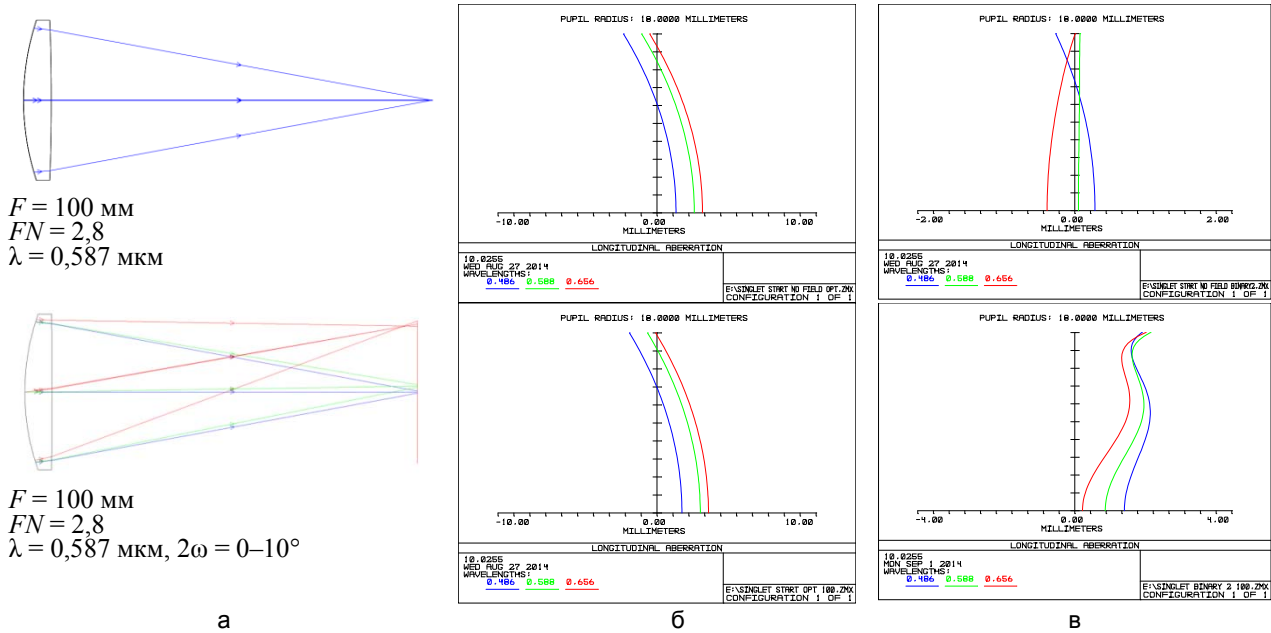


Рис. 4. Сравнение продольной сферической aberrации синглета с использованием ДОЭ и без него: оптическая схема синглета (а); без использования ДОЭ (б); с использованием ДОЭ (в). F – фокусное расстояние, FN – апертурное число, 2ω – угловое поле

Преимущества использования ДОЭ при проектировании гибридного дублета

В работе были отдельно исследованы дублеты с малым полем (на оптической оси) (рис. 5, а) и дублеты с увеличенным угловым полем (рис. 5, б), что позволило проследить влияние поля. Линза номер 22.0120 Rolyn Optics была выбрана из каталога ZEMAX в качестве стартовой точки для расчета дублета. Расчеты и оптимизация параметров дублета проведены по методике, аналогичной предыдущей (синглету), результаты представлены на рис. 6.

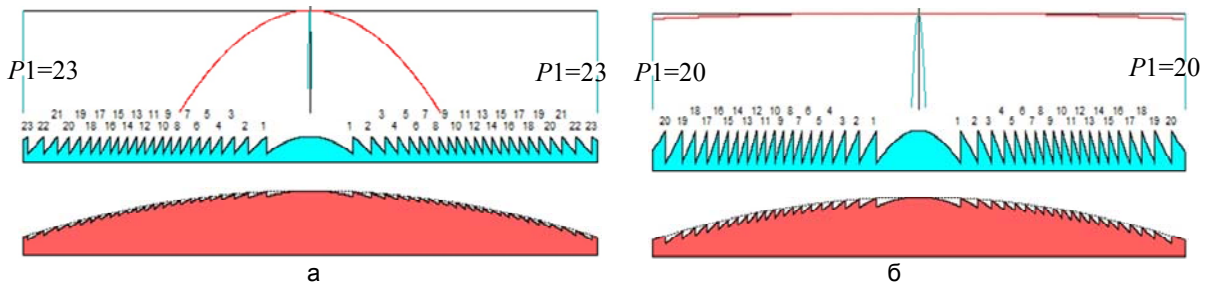


Рис. 5. Бинарная поверхность типа 2: дублет с малым полем (а) и дублет с увеличенным угловым полем (б)

Полученные коэффициенты D_n дублета с малым полем, $D_2 = -283,170392$, $D_4 = 173,132979$, $D_6 = -34,885398$, $D_8 = -0,051832$, $D_{10} = -1,057353$, были использованы для контроля рассчитанной бинарной поверхности типа 2 в ПО DIFFSYS Ver. 2.30. Дифракционная поверхность имеет 23 зоны с минимальной шириной 0,151698 мм между двумя зонами (рис. 5, а). Коэффициенты D_n дублета с широким полем равны $D_2 = -261,538817$, $D_4 = 168,731802$, $D_6 = -36,731802$, а дифракционная поверхность имеет 20 зон с минимальной шириной 0,16838 мм между двумя зонами (рис. 5, б).

Преимущества использования ДОЭ в объективах для считывания информации с оптических дисков

Оптические системы широко применяются в системах записи и считывания информации, например, музыка, компьютерных играх и т.д. К таким устройствам предъявляются требования как по качеству изображения, так и по весо-габаритным характеристикам. При проектировании таких систем также необходимо учитывать технологичность, обеспечивающую возможность их массового производства.

В дифракционно-ограниченных системах оптических дисков должен выполняться критерий Маршалла [15], согласно которому aberrация волнового фронта не может превышать $0,07\lambda$. В процессе изготовления и тестирования ДОЭ были обнаружены такие эффекты, как распространение паразитных порядков дифракции, снижение пропускания. Если выбрать в качестве стартовой точки простой синглет,

то очевидно, что число его параметров ограничено пятью: оба радиуса, толщина, а также параметры оптического материала – показатель преломления и коэффициент дисперсии. Следует заметить, что материал для производства системы для считывания с оптического диска определяется особенностями его изготовления и не может быть изменен. Оставшееся количество параметров является недостаточным для обеспечения технических характеристик и разрешающей способности объектива. Увеличение количества параметров достигается изменением формы синглета – использованием асферических поверхностей, а также нанесением дифракционной структуры на одну из его поверхностей. В этом случае дополнительными параметрами станут коэффициенты уравнения асферики и коэффициенты ДОЭ.

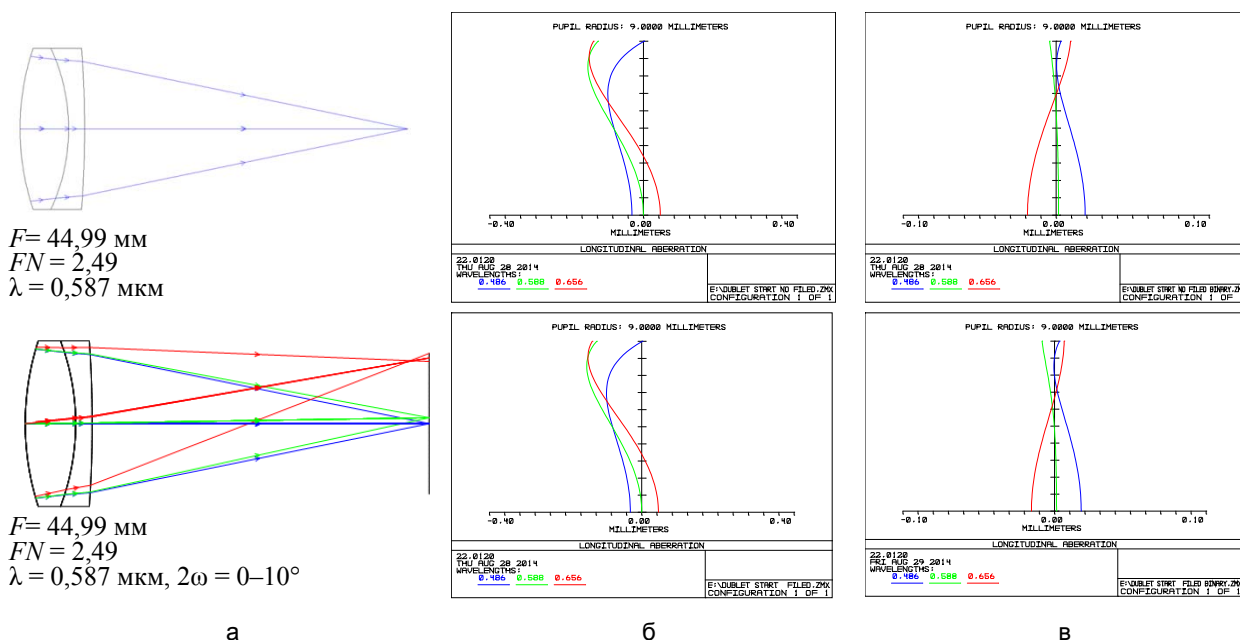


Рис. 6. Сравнение продольной сферической aberrации дублета с использованием ДОЭ и без него: оптическая схема дублета (а); без использования ДОЭ (б); с использованием ДОЭ (в)

В табл. 3 представлены технические характеристики типичного объектива, который обычно изготавливается из материала РММА (полиметилметакрилат) и используется для считывания информации с оптического диска. Толщина линзы, которая также могла бы быть параметром, была зафиксирована по конструктивным соображениям. Используя для оптимизации стартовой систем ПО ZEMAX и оценочную функцию «по умолчанию», где оптимизировался радиус пятна рассеяния за счет изменения дополнительных параметров стартовой системы синглета – двух эксцентриситетов поверхностей и трех коэффициентов асферик высших порядков на каждой поверхности, мы значительно улучшили показатели стартовой системы. Следующий шаг – добавление дифракционной структуры на первую поверхность линзы, что было нами выполнено в редакторе данных.

Наименование	Обозначение	Значение
Основная длина волн	λ	405 нм
Рабочий диапазон длин волн	$\lambda_1-\lambda_2$	400–410 нм
Фокусное расстояние	F	2 мм
Апертурное число	FN	1
Качество изображения	Q	Дифракционно-ограниченное
Угловое поле	2ω	0,001°
Положение апертурной диафрагмы	PAPS	Вблизи первой поверхности

Таблица 3. Технические характеристики объектива для считывания информации с оптического диска

Дифракционная бинарная поверхность типа 2 имеет 5 дополнительных параметров – коэффициентов. Для оптимизации использовалась аналогичная оценочная функция. На рис. 7 представлены графики остаточных продольных aberrаций и частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) объектива с двумя асферическими поверхностями и ДОЭ на первой поверхности, а на рис. 8 – параметры профиля полученной линзы.

Хроматическая aberrация лежит в пределах 0,0002 мм для заданного спектрального диапазона и 0 мм для основной длины волн. В данном случае преимущества дифракционной поверхности очевидны. Графики ЧКХ показывают, что объектив является дифракционно-ограниченным – идеальная ЧКХ не

отличается от реальной. Смоделированная таким образом дифракционная поверхность имеет 71 зону с минимальным расстоянием 0,00289 мм между двумя зонами (рис. 8). Дифракционная поверхность реализована на пределе возможностей производства, поскольку минимальное расстояние между областями находится в диапазоне 1–10 мкм. Полученные дополнительные параметры (9 параметров!) представлены в табл. 4, именно они позволяют обеспечить дифракционно-ограниченное качество изображения.

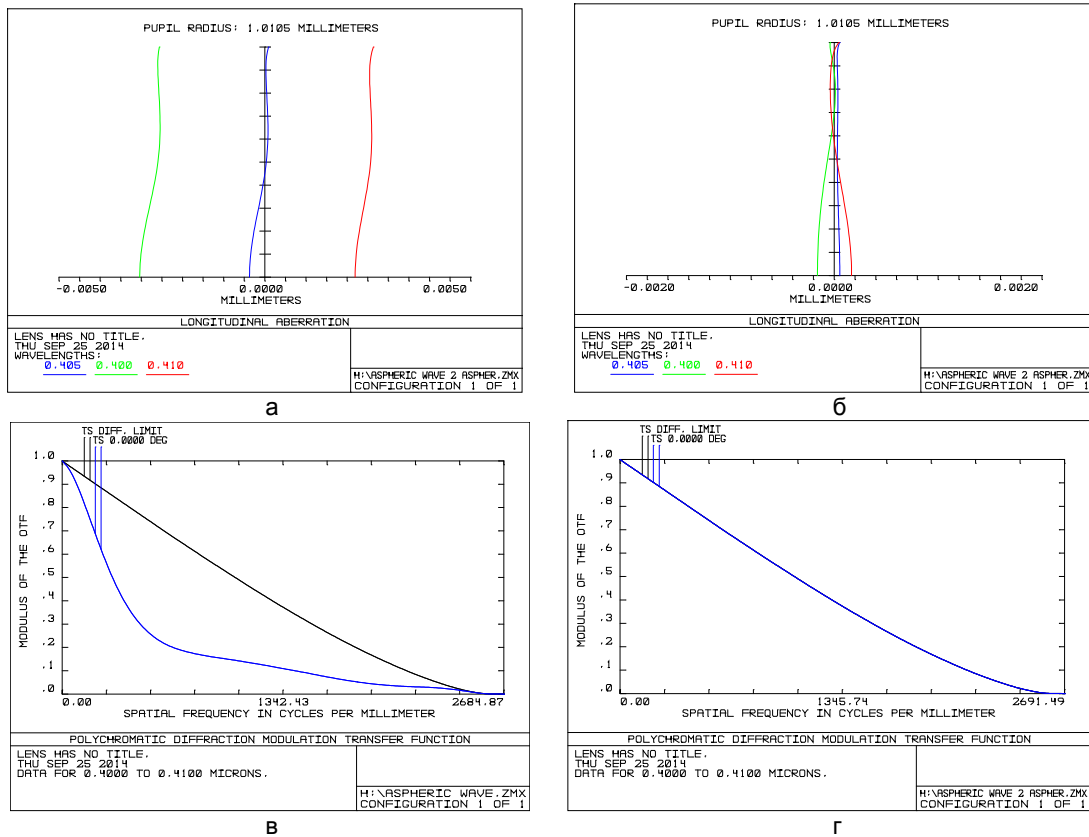


Рис. 7. Сравнение качества изображения вариантов объектива для чтения оптических дисков: графики остаточных продольных aberrаций и ЧКХ объектива с двумя асферическими поверхностями (а), (в); графики остаточных продольных aberrаций и ЧКХ объектива с двумя асфериками и ДОО на первой поверхности (б), (г)

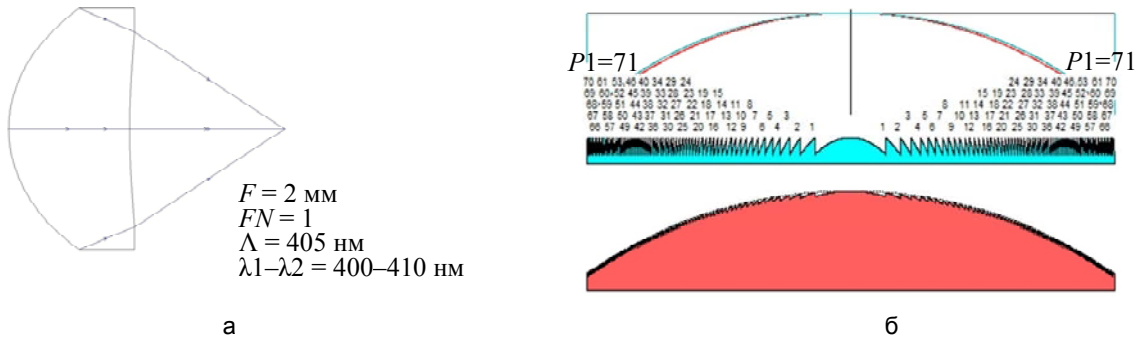


Рис. 8. Асферико-дифракционная линза для оптического диска: оптическая схема (а); бинарная поверхность типа 2 (б)

Коэффициент ДОО поверхности 1	Коэффициент асферической поверхности 1	Коэффициент асферической поверхности 2
$D2 = -350,914577$	$A2 = -0,018781$	$A2 = 0,035240$
$D4 = -95,357615$	$A4 = -0,003510$	$A4 = 7,64E-004$
$D6 = -1,571301$	$A6 = 0,01284$	$A6 = -0,01585$
$D8 = 0,117387$	$CC = -0,537862$	$CC = 276,9996$
$D10 = -3,43724$	—	—

Таблица 4. Дополнительные параметры – коэффициенты ДОО и асферики

Заключение

Показаны преимущества применения ДОЭ при оптимизации простейших оптических систем. Введение одной дифракционной поверхности в синглет и дублет (с использованием ПО ZEMAX) позволило значительно сократить aberrации, особенно продольные хроматические aberrации. В работе уделено особое внимание плоско-выпуклым линзам. Такие линзы особенно выгодны, потому что они относительно просты, и ДОЭ проще наносить на плоскую поверхность. Кроме того, исследовано влияние увеличения поля на оптическую систему с ДОЭ и без ДОЭ, и показано, что увеличение поля существенно меняет результаты оптимизации. Мы контролировали возможность изготовления дифракционной поверхности в программном обеспечении DIFFSYS и показали, что ДОЭ, которые мы разработали, могут быть изготовлены. В работе не рассматривалось влияние такого материала, как стекло, а также положение и количество бинарных поверхностей в оптической системе, что может быть сделано дополнительно. При проведении настоящего исследования мы хотели продемонстрировать замечательные возможности дифракционной оптики, которые еще полностью не реализованы и применение которых в сочетании с другими эффективными средствами aberrационной коррекции позволит создать много простых оптических систем различного назначения.

Литература

1. Garcia-Lievanos O., Vazquez-Montiel S., Hernandez-Cruz J.A. Spherical aberration correction using refractive-diffractive lenses with an analytic-numerical method // *Advances in Optical Technologies*. 2010. Art. 783206. doi: 10.1155/2010/783206
2. Diffractive Optical Elements [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.rpcphotonics.com/optical.asp, свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.12.2014).
3. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 987 p.
4. Davidson N., Friesem A.A., Hasman E. Analytical design of hybrid diffractive-refractive achromats // *Applied Optics*. 1993. V. 32. N 25. P. 4770–4774.
5. Liping Z., Loy L.Y., Yan Z., Zhisheng Y. Achromatic design strategies with diffractive optical elements // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 1999. V. 3897. P. 624–631.
6. Kalikmanov V.I., Sokolova E.A. Ill-posed inverse problem in diffractive optics. Tolerance analysis of diffractive lenses and gratings // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 2006. V. 23. N 2. P. 497–503. doi: 10.1364/JOSAA.23.000497
7. Грейсух Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Дифракционные элементы в оптических системах оптоэлектроники // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 7. С. 25–30.
8. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. *Оптика дифракционных элементов и систем*. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
9. Бармичева Г.В., Ган М.А., Старков А.А. Анализ эффективности применения асферико-дифракционных элементов в оптических системах для ИК области // Сборник трудов 9 Международной конференции "Прикладная оптика-2010". СПб., 2010. С. 227–230.
10. Васильев В.Н., Лившиц И.Л., Сергеев М.Б., Соколова Е.А. Гибридный микрообъектив для оптико-информационных систем комбинационного рассеяния // *Информационно-управляющие системы*. 2012. № 5 (60). С. 2–6.
11. ZEMAX 9.1 Optical Design Program User's Manual, 2010. P. 259–301.
12. Smith W.J. *Modern Optical Engineering*. 3rd ed. NY: McGraw-Hill, 2000. 617 p.
13. Soifer V.A. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*. NY: John Wiley & Sons, 2002. 784 p.
14. Laikin M. *Lens Design*. 4th ed. NY: Marcel Dekker Inc., 1995. 446 p.
15. Kojima T. Progress of Lenses for Optical Disk System // *Konica Technical Report*. 2002. V. 15. P. 5–12.

- Зорич Нэнад Джуро** — магистр, аспирант, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nenadnex@gmail.com
- Лившиц Ирина Леонидовна** — кандидат технических наук, профессор, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ecenter-optical10@yandex.ru
- Соколова Елена Алексеевна** — доктор технических наук, профессор, оптический дизайнер, РиверД Интернационал, Роттердам, 3029 АК, Нидерланды, Elena@scarlet.nl
- Nenad Dj. Zoric** — postgraduate, junior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nenadnex@gmail.com
- Irina L. Livshits** — PhD, Professor, senior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ecenter-optical10@yandex.ru
- Elena A. Sokolova** — D.Sc., Professor, RiverD, International B.V., Rotterdam, 3029 AK, The Netherlands, Elena@scarlet.nl

УДК 535.41; 535.417

СРАВНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ И ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО ОБЪЕКТА

И.А. Шевкунов^а, Н.В. Петров^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

Адрес для переписки: Shevkunov_igor@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.09.14, принята к печати 10.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-14-21

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шевкунов И.А., Петров Н.В. Сравнение голографических и итерационных методов при восстановлении изображения амплитудного объекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 14–21

Аннотация. Представлено экспериментальное сравнение четырех методов восстановления волнового фронта. Рассмотрены два итерационных и два голографических метода, отличающихся математической моделью и алгоритмами восстановления. Первые два из рассматриваемых методов не используют опорную волну в схеме записи, что снижает требования к стабильности установки. Основную роль в восстановлении информации о фазе такими методами играют наборы пространственных распределений интенсивности, которые записываются по мере перемещения регистрирующей матрицы вдоль оптической оси. Полученные данные последовательно используются для восстановления волнового фронта с помощью итерационной процедуры, в ходе которой численно моделируется распространение волнового фронта между плоскостями, где производилась регистрация данных. При этом информация о фазе волнового фронта везде сохраняется, а рассчитанные распределения амплитуды заменяются на измеренные в этих плоскостях. В первом из сравниваемых методов в качестве математической модели используется двумерное преобразование Френеля и итерационный расчет в плоскости объекта. Во втором методе для численного моделирования распространения волнового фронта применяется метод углового спектра, и итерационный расчет производится только между близко расположенными плоскостями регистрации данных. Сравнимые с ними два метода цифровой голографии основаны на использовании опорной волны в схеме записи и различаются между собой численным алгоритмом восстановления цифровых голограмм. В результате сравнения установлено, что итерационный метод на основе 2D-преобразования Френеля дает результат, сравнимый с результатом распространенного голографического метода, использующего Фурье-фильтрацию. Показано, что голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля при восстановлении амплитудного объекта является лучшим среди рассмотренных.

Ключевые слова: фазовая проблема, восстановление волнового фронта, цифровая голография

Благодарности. Авторы благодарят за поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

COMPARISON OF HOLOGRAPHIC AND ITERATIVE METHODS FOR AMPLITUDE OBJECT RECONSTRUCTION

I.A. Shevkunov^a, N.V. Petrov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Shevkunov_igor@mail.ru

Article info

Received 11.09.14, accepted 10.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-14-21

Article in Russian

Reference for citation: Shevkunov I.A., Petrov N.V. Comparison of holographic and iterative methods for amplitude object reconstruction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 14–21 (in Russian)

Abstract. Experimental comparison of four methods for the wavefront reconstruction is presented. We considered two iterative and two holographic methods with different mathematical models and algorithms for recovery. The first two of these methods do not use a reference wave recording scheme that reduces requirements for stability of the installation. A major role in phase information reconstruction by such methods is played by a set of spatial intensity distributions, which are recorded as the recording matrix is being moved along the optical axis. The obtained data are used consistently for wavefront reconstruction using an iterative procedure. In the course of this procedure numerical distribution of the wavefront between the planes is performed. Thus, phase information of the wavefront is stored in every plane and calculated amplitude

distributions are replaced for the measured ones in these planes. In the first of the compared methods, a two-dimensional Fresnel transform and iterative calculation in the object plane are used as a mathematical model. In the second approach, an angular spectrum method is used for numerical wavefront propagation, and the iterative calculation is carried out only between closely located planes of data registration. Two digital holography methods, based on the usage of the reference wave in the recording scheme and differing from each other by numerical reconstruction algorithm of digital holograms, are compared with the first two methods. The comparison proved that the iterative method based on 2D Fresnel transform gives results comparable with the result of common holographic method with the Fourier-filtering. It is shown that holographic method for reconstructing of the object complex amplitude in the process of the object amplitude reduction is the best among considered ones.

Keywords: phase retrieval problem, wavefront reconstruction, digital holography.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for support, project #2014/190 for government projects in the area of scientific activities within the basic part of the government task.

Введение

Задача полного восстановления волнового фронта из распределений интенсивности в последнее время привлекает большое внимание. Связано это с тем, что методы ее решения предъявляют значительно меньшие требования к реализации, чем традиционные голографические методы, несмотря на использование более сложных вычислительных алгоритмов. Первыми итерационный алгоритм восстановления полного поля предложили Гершберг и Сакстон [1]. Авторы использовали пространственные амплитудные распределения волнового поля, зарегистрированные в плоскости объекта и в Фурье-плоскости. Однако предложенный ими алгоритм в ряде случаев демонстрировал такие проблемы, как стагнация и чувствительность к шумам и ошибкам. Впоследствии эти сложности удалось преодолеть при помощи использования дополнительных наборов данных в итерационном алгоритме [2]. Наиболее простым способом получения таких наборов данных является регистрация распределений интенсивностей в различных плоскостях [3–5], однако не исключены и другие подходы, такие как вариация длины волны [6, 7] или использование канонических преобразований [8].

Как видно, существует множество путей решения фазовой проблемы. Порой не всегда легко разобраться, каким методом и при каких условиях лучше воспользоваться, поэтому в последнее время все чаще стали появляться работы, посвященные сравнению существующих методов восстановления волнового фронта [9–14]. Например, работы [9, 10] посвящены сравнению методов, основанных на использовании априорной информации о фазе объекта, а работа [11] рассматривает методы, применимые в электромагнитной дозиметрии. В [12] производится сравнение методов цифровой голографии, использующих Фурье-фильтрацию, с новым, предложенным авторами настоящей работы методом, основанным на концепции пространственных фазовых шагов. В [13] рассматривают модифицированные итерационные методы, а работа [14] посвящена сравнению эффективности методов восстановления фазы, использующих уравнение переноса излучения в зависимости от равномерности распределения плоскостей регистрации и граничных условий.

Целью данной работы является сравнение двух итерационных безопорных методов восстановления фазы, нового метода восстановления комплексной амплитуды поля из внеосевых цифровых голограмм и традиционного голографического метода, использующего Фурье-фильтрацию. Выбор методов для сравнения обусловлен следующими факторами: итерационный метод SBMIR (Single Beam Multiple Intensity Reconstruction) показал хорошую сходимость при использовании большого количества плоскостей регистрации [15]; FRIM (FResnel Iterative Method) – метод, предложенный научной группой Университета ИТМО [5] – использует меньший набор данных для восстановления и позволяет учесть распределения интенсивности, записанные при вариации не только расстояния между плоскостями, но и (или) длины волны используемого излучения; DHCWR (Digital Holography Complex Wave Retrieval) – голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля – обеспечивает отсутствие мнимого изображения за счет использования процедуры восстановления, основанной на решении переопределенной системы уравнения для каждого пикселя [16]; DHFF (Digital Holography Fourier Filtration) – устоявшийся метод обработки голограмм – выбран в качестве референтного [17].

Методы

Рассмотрим кратко основные принципы исследуемых в данной работе методов.

FRIM – итерационный метод, использующий в математической модели 2D-преобразование Френеля:

$$U(x, y, l) = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda l} \iint \exp\left(\frac{ik}{2l}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right) u(x', y') dx' dy',$$

где $U(x, y, l)$ – комплексное поле объекта на расстоянии l ; x, y – координаты в плоскости изображения; $u(x', y')$ – комплексное поле в плоскости объекта; x', y' – координаты в плоскости объекта; λ – длина волны; $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор, i – мнимая единица. Порядок использования измеренных итерационных изо-

бражений в FRIM следующий: $I_1 \rightarrow O \rightarrow I_2 \rightarrow O \rightarrow I_3 \rightarrow O \rightarrow \dots \rightarrow O \rightarrow I_n \rightarrow O \rightarrow I_1 \dots$. Здесь I_n – пространственные распределения интенсивности, записанные в плоскостях на различных расстояниях от объекта; стрелками обозначено распространение волнового фронта в свободном пространстве; $O = v(x', y')$ аппроксимированная объектная функция в плоскости объекта. При наступлении сходимости эта функция совпадает с $u(x', y')$ [5].

SBMIR – однолучевой итерационный восстановительный метод с использованием большого количества плоскостей регистрации. Здесь в качестве математической модели используется метод распространения углового спектра плоских волн [15], который позволяет рассчитывать распространение волнового поля между двумя близко расположенными плоскостями:

$$U(x, y, l) = u \iint_{\mathbb{R}^2} \hat{u}(f_x, f_y) \exp\left(\frac{i2\pi \cdot l}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] \cdot df_x df_y,$$

где $U(x, y, l)$ – комплексная функция, описывающая волновое поле выходной плоскости; $\hat{u}(f_x, f_y)$ – Фурье-преобразование волнового поля начальной плоскости $u(x', y')$; x, y – координаты в плоскости регистрации; x', y' – координаты в плоскости объекта; f_x, f_y – пространственные частоты в плоскости регистрации; l – переменная распространения; λ – длина волны. Первая итерация включает в себя последовательный расчет волнового фронта с первой до последней плоскости регистрации в прямом направлении. Перед началом следующей итерации волновой фронт, полученный на последней итерационной плоскости, распространяется в первую: $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n \rightarrow I_1 \dots$. При наступлении сходимости восстановленный волновой фронт распространяется в плоскость объекта.

DHCWR – голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля [16]. В данном методе информация о волновом фронте объекта получается в результате двух независимых процедур.

1. Восстановление амплитуды и фазы объектной волны в плоскости измерения в соответствии с концепцией пространственных фазовых шагов. Однако, в отличие от самого метода фазовых шагов, для вычисления фазы в каждом пикселе значения интенсивности берутся не из нескольких независимых интерферограмм в полосах бесконечной ширины, а из соседних пикселей вокруг искомого, которые расположены на одной голограмме.
2. Численное распространение восстановленного волнового фронта в плоскость изображения. Для осуществления первого этапа восстановления необходимо знать фазу опорной волны, и в случае использования плоского волнового фронта в качестве опорного достаточно знать только угол, под которым фронт падает на регистрирующую матрицу. Угол определяется из любой записанной голограммы по ширине интерференционных полос участка, где фаза объектной волны постоянна. Ключевая же идея алгоритма заключается в том, что интенсивность голограммы $I(x, y)$ и фаза опорной волны $\Phi(x, y)$ в плоскости голограммы меняются намного быстрее, чем неизвестные величины – восстанавливаемая комплексная волна $U(x, y)$ и амплитуда опорной волны $A(x, y)$. Таким образом, объектная волна $U(x, y)$ и амплитуда опорной волны $A(x, y)$ – константы в некоторой области пикселя $p(x, y)$. Для определения $U(x, y)$ и $A(x, y)$ необходимо решать в каждой области пикселя $p(x, y)$ систему из M нелинейных уравнений, где M – количество рассматриваемых точек в окрестности данного пикселя:

$$I(p + p_m) = |U(p) + A(p) \exp[i\Phi(p + p_m)]|^2, \tag{1}$$

где $I(p)$ – полученная голограмма; $p + p_m$ ($m = 1, \dots, M$) – позиция m -го пикселя в окрестности p . Величина M выбирается исходя из требования, что используемые при решении системы уравнений соседние пиксели должны попадать как минимум под одну интерференционную полосу. Это необходимо для успешного применения концепции пространственных фазовых шагов. Система (1) переопределена и сводится к решению системы линейных уравнений для каждого пикселя:

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^* \\ \alpha & \beta & 1 \\ \alpha^* & 1 & \beta^* \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Psi \\ Z \\ Z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_m w_m I_m \\ \sum_m w_m V_m I_m \\ \sum_m w_m V_m^* I_m \end{pmatrix},$$

где $\alpha = \sum_m w_m V_m$; $\beta = \sum_m w_m V_m^2$; V_m – нормированная комплексная опорная волна; w_m – весовой множитель, необходимый для выполнения условия о постоянстве $U(x, y)$ и $A(x, y)$ в окрестности точки p , чем дальше расположен рассматриваемый пиксель от p , тем меньше весовой множитель; $\Psi = |Z|^2 / A^2 + A^2$ и $Z = U^* A$ – вспомогательные переменные («*» означает комплексное сопряжение).

DHFF – цифровая голография с использованием Фурье-фильтрации. В данном методе для восстановления поля объектной волны применяется 2D-Фурье-преобразование для пространственной фильтрации в Фурье-плоскости полезного сигнала. Таким образом, удается избавиться от дифракционного слагаемого нулевого порядка и мнимого изображения [17]. Выражение для формируемой на регистрирующей матрице голограммы имеет вид:

$$I(x, y) = |A(x, y)|^2 + |U(x, y)|^2 + U(x, y)A^*(x, y) + U^*(x, y)A(x, y),$$

где $I(x, y)$ – голограмма; $*$ – оператор комплексного сопряжения, $A(x, y)$ – опорная волна, $U(x, y)$ – объектная волна. Фазу опорной волны $\Phi(x, y)$ можно представить в виде пространственной модуляции по координатам: $\Phi(x, y) = -2\pi(f_x x + f_y y)$, где f_x и f_y – пространственные частоты по соответствующим координатам. Для осуществления фильтрации производится вычисление преобразования Фурье полученной голограммы:

$$F[I(x, y)] = F[|A(x, y)|^2 + |U(x, y)|^2] + F[U(x, y)]|A(x, y)| \otimes \delta(f_x - f_{0,x}, f_y - f_{0,y}) + F[U^*(x, y)]|A(x, y)| \otimes \delta(f_x + f_{0,x}, f_y + f_{0,y}),$$

где $F[\dots]$ – обозначение преобразования Фурье; \otimes – оператор свертки; $(f_x \pm f_{0,x}, f_y \pm f_{0,y})$ – член частотного сдвига, обусловленного поведением фазы опорной волны. Первый член данного выражения представляет собой Фурье-образ нулевого порядка, второй – объекта, третий – мнимого изображения. Избавляясь от первого и третьего слагаемых в Фурье-пространстве, информация о фазе можно получать только из второго. Применяя обратное преобразование Фурье, осуществляется переход из Фурье-плоскости в плоскость регистрации. Далее восстановленное поле переносится в плоскость изображения с помощью преобразования Френеля.

Эксперимент

Для сравнения представленных выше методов была разработана универсальная экспериментальная установка, позволяющая записывать как внеосевые цифровые голограммы, так и наборы пространственных распределений интенсивностей, необходимые для восстановления волнового фронта итерационными методами. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. За ее основу взят интерферометр Маха–Цендера за исключением того, что в нашем случае опорный пучок проходит больший оптический путь, чем предметный, но не более длины когерентности используемого лазера. Также для регистрации распределений интенсивностей в нескольких отстоящих друг от друга плоскостях, необходимых для использования в итерационных методах восстановления фазы волнового фронта, система была расширена добавлением моторизированной микрометрической подвижки. На подвижке располагались регистрирующая матрица 6, светоделитель 5 и зеркало 9. В качестве источника излучения использовался одномодовый лазер Lasos RLD F-638-50-рvc, $\lambda = 634,9$ нм. Для регистрации распределений интенсивности была использована КМОП-матрица «VEI-830» 2048×1536 , с размером пикселя $\Delta x = 2,8$ мкм.

В режиме записи голограммы плоский волновой фронт после коллиматора 1 делился светоделителем 2 на объектный и опорный пучки, далее в объектном плече располагался нейтральный фильтр 3 для выравнивания интенсивностей световых полей обоих плеч системы, после фильтра ослабленное излучение попадало на исследуемый объект 4, где формировалось спекл-поле, которое после прохождения светоделителя 5 регистрировалось КМОП-матрицей 6. Опорный волновой фронт, в свою очередь, приходил на матрицу под небольшим углом θ (регулируемым зеркалом 9), необходимым для наблюдения и регистрации интерференции полос конечной ширины при взаимодействии с объектной волной. Размер окна M в методе ДНСWR был выбран равным 11, что обусловлено шириной наблюдаемых интерференционных полос.

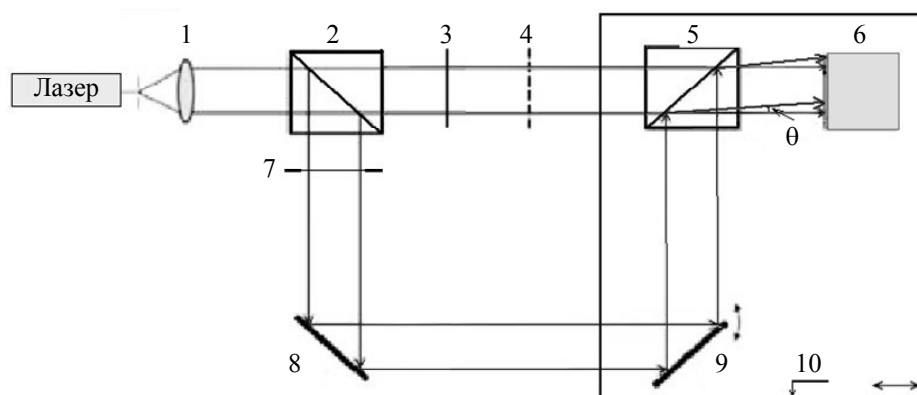


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – коллиматор; 2, 5 – светоделитель; 3 – светофильтр; 4 – исследуемый объект; 6 – КМОП-матрица; 7 – диафрагма; 8, 9 – зеркала; 10 – подвижка

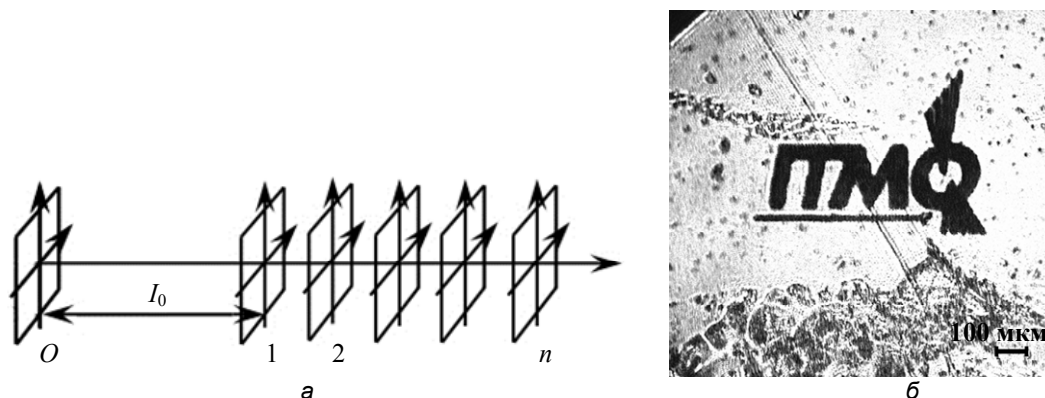


Рис. 2. Схема для измерения набора данных для пространственного распределения интенсивностей (а); изображение объекта, снятое при помощи 4F-системы (б)

Во время реализации итерационных методов опорная часть из зеркал 8, 9 отсекалась диафрагмой 7, и в регистрации изображения была задействована только объектная часть установки. При перемещении моторизированной подвижки 10 осуществлялась запись набора распределений интенсивностей, необходимых для восстановления волнового фронта. Начальное расстояние $l_0 = 26$ мм для первой плоскости регистрации было обусловлено физическими размерами светоделителя 5. Всего было использовано три распределения интенсивности, расстояния между которыми были выбраны по 1 мм в соответствии с критерием, дающим наилучшее качество восстановления, описанным в работе [18]. На рис. 2, а схематично изображены объектная плоскость (О) и плоскости измерения интенсивностей. Тест-объект (логотип «ITMO») был изготовлен на пленке для микрофильмирования. На рис. 3, б, представлено изображение объекта, снятое при использовании 4F-системы. Размеры объекта $0,5 \times 0,6$ мм², высота букв 0,2 мм.

Полученные результаты и обсуждение

На рис. 3 изображены изображения объекта «ITMO», восстановленные четырьмя различными методами: итерационными – FRIM (рис. 3, а) и SBMIR (рис. 3, б); голографическими – DHCWR (рис. 3, в) и DHFF (рис. 3, г). Из представленных результатов видно, что все методы обеспечивают удовлетворительные результаты восстановления изображения, хотя и проявляют незначительные различия в деталях. Из-за особенностей итерационного подхода метода FRIM, связанного с чередующимся вычислением распространения волнового фронта от плоскостей регистрации к плоскости объекта и обратно, имеют место дифракционные артефакты, возникающие по краям восстановленного изображения. Для численного сравнения полученных результатов был проведен расчет граничного контраста и наименьшего среднеквадратичного отклонения (НСКО) полученных амплитуд от амплитуды 4F-системы. НСКО вычисляется по формуле [19]

$$E_s = \sqrt{\frac{\sum (|V_s| - |U_s|)^2}{\sum |U_s|^2}},$$

где V_s – значение амплитуды оцениваемого изображения пикселя s ; U_s – значение амплитуды пикселя s амплитуды 4F-системы. Граничный контраст представляет собой отношение разности интенсивностей снаружи границы (I_{out}) объекта и внутри (I_{in}) [20]:

$$K = \frac{I_{out} - I_{in}}{I_{out}}.$$

В таблице приведены значения НСКО и граничного контраста для полученных изображений. Высокие значения граничного контраста говорят о том, что все рассмотренные методы приемлемы для восстановления изображений, но наибольший контраст достигается при восстановлении цифровых голограмм методом DHCWR. Метод DHFF показывает наибольшие значения НСКО, что характеризует его как худший из представленных методов: изображение, восстановленное данным методом, темнее на периферии. Это связано с потерями полезной информации при осуществлении фильтрации нулевого порядка и мнимого изображения. Нюансы сравнения наглядно раскрываются на рис. 4, где представлены распределения амплитуды восстановленного изображения вдоль сечения, проходящего через буквы «IT» (красные линии на увеличенных фрагментах рис. 3). Помимо результатов восстановления, полученных четырьмя рассматриваемыми методами, для сравнения на рис. 4 также представлено сечение амплитуды поля, полученное из зарегистрированного распределения интенсивности с использованием 4F-системы и нормированное по максимальному для рассматриваемых методов значению восстановленной амплитуды. Необходимость нормировки обусловлена большей мощностью лазера при записи распределения интенсивности в конфигурации 4F.

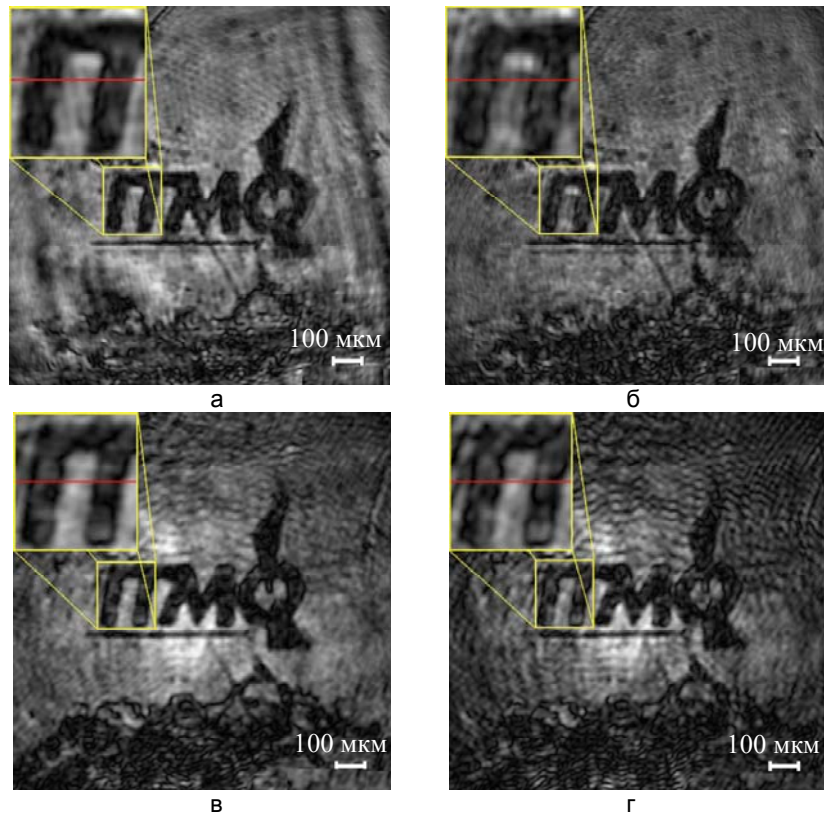


Рис. 3. Восстановленные изображения объекта: FRIM (а); SBMIR (б); DHCWR (в); DHFF (г)

	FRIM	SBMIR	DHCWR	DHFF
E_s	0,50	0,60	0,54	0,62
K	0,92	0,87	0,93	0,91

Таблица. Значения НСКО и граничного контраста

Сравнивая результаты, полученные с помощью итерационных методов, с результатами восстановления голограмм, можно заметить, что итерационные методы дают более резкие изображения: так, на рис. 3, а, б, отчетливо видны изображения пылинок, в то время как на рис. 3, в, г, присутствуют только искаженные изображения фона. На рис. 4 также можно заметить, что профиль символов «IT» более сглажен в случае восстановления голографическими методами.

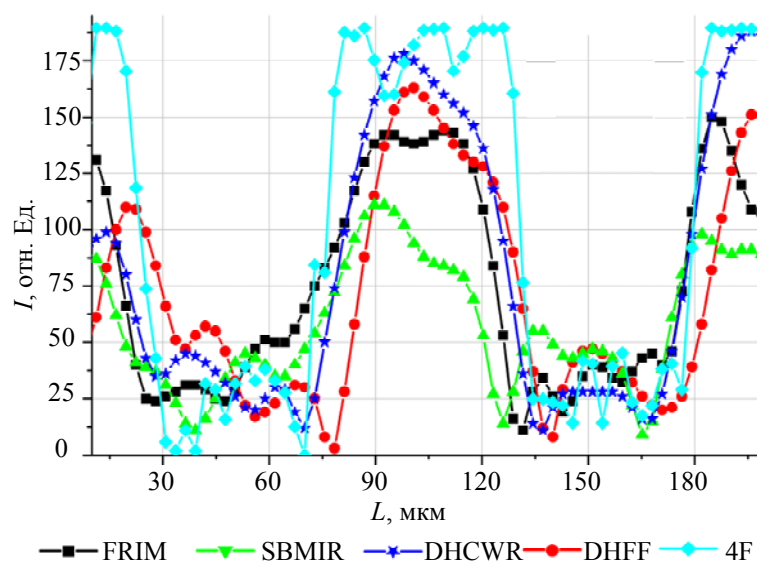


Рис. 4. Сечения распределений амплитуд восстановленных изображений различными методами: FRIM, SBMIR, DHCWR, DHFF, 4F-система. L – расстояние вдоль красной линии увеличенных фрагментов рис. 3

Данное наблюдение можно объяснить следующим образом.

В методе DHCWR производится решение системы M уравнений в окрестности каждого пикселя. Из-за ограничений, накладываемых на M , происходит снижение разрешения до размеров, определяемых толщиной интерференционных полос. Таким образом, разрешение данного метода ограничено несколькими пикселями, что соответствует величине 6–12 мкм в условиях данного эксперимента. В методе DHFF использование пространственной фильтрации в Фурье-плоскости приводит к фактическому уменьшению разрешения. Применение же процедуры заполнения фильтруемого изображения нулями лишь позволяет увеличить сетку на восстановленном изображении, в то время как фактически количество информации не увеличивается. Стоит также обратить особое внимание на поведение итерационных методов FRIM и SBMIR. Сравнивая полученные данными методами результаты, можно сделать вывод, что границы символов на восстановленных методом FRIM изображениях более резкие, а само изображение более контрастное. Аналогичный результат был продемонстрирован нами в работе [21], посвященной сравнению трех итерационных методов. Однако в [21] метод SBMIR обеспечил лучшее качество восстановления, чем в настоящей работе. Вероятно, это связано с тем, что, в отличие от голографических, итерационные методы крайне чувствительны к юстировке. Погрешности в определении различных параметров, такие как расстояния между зарегистрированными распределениями интенсивностей, смещения плоскостей регистраций по координатам x и y , в итерационном расчете многократно усиливаются. Метод SBMIR, обычно использующий более 10 распределений интенсивности, должен быть более устойчивым к помехам такого рода. Оценка подобного рода ошибок была произведена в статьях [8, 22], где с помощью методов численного моделирования было показано, что отклонение расстояния между плоскостями регистрации на 0,1 мм от реального значения приводит к росту среднеквадратической ошибки более чем в 1,5 раза, а отклонение в поперечном направлении на 0,5 мкм – более чем в 10 раз. Совместно с другими факторами, увеличивающими ошибки, такими как вибрации или несовпадение оптической оси с направлением движения моторизированной подвижки, это приводит к заметному ухудшению качества восстановленного изображения. Однако ввиду таких преимуществ итерационных методов, как отсутствие опорного пучка, светоделителей и линз, достигается максимальная простота оптической системы. В связи с этим необходимо найти возможность исключить из результата вклад ошибок, связанных с перемещением регистрирующей матрицы. Это можно реализовать в методе FRIM, варьируя длину волны вместо расстояния в процессе записи данных. Другим вариантом является полное исключение движущихся частей из системы регистрации за счет использования пространственно-временного модулятора света [23].

Подводя итог всему вышесказанному, можно сделать вывод о дальнейшей перспективности развития итерационных методов восстановления фазы волнового фронта.

Заключение

Было произведено сравнение итерационных и голографических методов восстановления волнового фронта. Голографический метод восстановления комплексной амплитуды поля (DHCWR) показал наибольший контраст восстановленного объекта среди рассмотренных методов. Итерационный метод FRIM на основе 2D-преобразования Френеля дал результат, по контрасту близкий к лучшему, и наименьшее среднеквадратическое отклонение, но с наличием дифракционных артефактов по краям восстанавливаемого изображения, проявление которых вероятно можно уменьшить при использовании аподизирующих функций. Метод SBMIR был разработан для большего количества зарегистрированных плоскостей, и, вероятно, поэтому восстановленные им изображения обладали меньшим контрастом и наибольшим среднеквадратичным отклонением. Голографический метод с применением Фурье-фильтрации (DHFF) показал контраст, сравнимый с методом FRIM, но большие величины НСКО ввиду потерь информации при фильтрации нулевого порядка и мнимого изображения в Фурье-плоскости.

Литература

1. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // *Optics*. 1972. V. 35. P. 237–246.
2. Petrov N.V., Volkov M.V., Bepalov V.G. Iterative phase retrieval based on the use of additional intensities measurements // *Frontiers in Optics*. San Jose, USA, 2011.
3. Almoró P., Pedrini G., Osten W. Complete wavefront reconstruction using sequential intensity measurements of a volume speckle field // *Applied Optics*. 2006. V. 45. N 34. P. 8596–8605.
4. Almoró P., Maalo A.M.S., Hanson S.G. Fast-convergent algorithm for speckle-based phase retrieval and a design for dynamic wavefront sensing // *Applied Optics*. 2009. V. 48. N 8. P. 1485–1493. doi: 10.1364/AO.48.001485
5. Petrov N.V., Volkov M.V., Gorodetsky A.A., Bepalov V.G. Image reconstruction using measurements in volume speckle fields formed by different wavelengths // *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7907. Art. 790718. doi: 10.1117/12.876151

6. Bao P., Zhang F., Pedrini G., Osten W. Phase retrieval using multiple illumination wavelengths // *Optics Letters*. 2008. V. 33. N 4. P. 309–311. doi: 10.1364/OL.33.000309
7. Bao P., Situ G., Pedrini G., Osten W. Lensless phase microscopy using phase retrieval with multiple illumination wavelengths // *Applied Optics*. 2012. V. 51. N 22. P. 5486–5494. doi: 10.1364/AO.51.005486
8. Налегает С.С., Петров Н.В., Беспалов В.Г. Итерационные методы решения фазовой проблемы в оптике и их особенности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 6 (82). С. 30–35.
9. Kim W. Comparison among iterative algorithms for phase retrieval // *Proc. Int. Conf. on Signal Processing and Multimedia Applications (SIGMAP 2010)*. Athens, Greece, 2010. P. 112–117.
10. Osherovich E., Zibulevsky M., Yavneh I. Algorithms for phase retrieval with a (rough) phase estimate available: a comparison. Technical Report CS-2010-22. 2010.
11. Johansson M., Fhager A., Lui H.-S., Persson M. Comparison between two phase retrieval methods for electromagnetic source modeling // *Progress in Electromagnetics Research B*. 2011. N 30. P. 239–253.
12. Kim D., Magnusson R., Jin M., Lee J., Chegal W. Complex object wave direct extraction method in off-axis digital holography // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 3. P. 3658–3668. doi: 10.1364/OE.21.003658
13. Falaggis K. Reduction of the stagnation effect by combined iterative and deterministic single beam phase retrieval techniques // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2014. V. 9203. P. 92030U. doi: 10.1117/12.2061995
14. Martinez-Carranza J., Falaggis K., Jozwick M., Kozacki T. Comparison of phase retrieval techniques based on the transport of intensity equation using equally and unequally spaced plane separation criteria // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2014. V. 9204. P. 92040G. doi: 10.1117/12.2061976
15. Pedrini G., Osten W., Zhang Y. Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes // *Optics Letters*. 2005. V. 30. N 8. P. 833–835. doi: 10.1364/OL.30.000833
16. Liebling M., Blu T., Unser M. Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 2004. V. 21. N 3. P. 367–377.
17. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 1982. V. 72. N 1. P. 156.
18. Petrov N.V., Galiaskarov A.N., Nikolaeva T.Yu., Bespalov V.G. The features of optimization of a phase retrieval technique in THz frequency range // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2012. V. 8413. Art. 84131T. doi: 10.1117/12.978688
19. Fienup J.R., Kowalczyk A.M. Phase retrieval for a complex-valued object by using a low-resolution image // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 1990. V. 7. N 3. P. 450–458. doi: 10.1364/JOSAA.7.000450
20. Демин В.В., Каменев Д.В. Критерии качества изображений в цифровой голографии частиц // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 4. С. 17–21.
21. Shevkunov I.A., Petrov N.V. Experimental comparison of phase retrieval methods which use intensity distribution at different planes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V. 536. Art. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/536/1/012028
22. Zhang Y., Zhang X. Reconstruction of a complex object from two in-line holograms // *Optics Express*. 2003. V. 11. N 6. P. 572–578.
23. Dudley A., Milione G., Alfano R.R., Forbes A. All-digital wavefront sensing for structured light beams // *Optics Express*. 2014. V. 22. N 11. P. 14031–14040. doi: 10.1364/OE.22.014031

Шевкунов Игорь Александрович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Shevkunov_igor@mail.ru, N.Petrov@phoi.ifmo.ru

Петров Николай Владимирович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, доцент, N.Petrov@phoi.ifmo.ru

Igor A. Shevkunov — PhD, scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Shevkunov_igor@mail.ru

Nikolai V. Petrov — PhD, senior scientific researcher, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, N.Petrov@phoi.ifmo.ru

УДК 528.5

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗВЕЗД ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ КООРДИНАТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ЗЕНИТНЫМ ТЕЛЕСКОПОМ

С.В. Гайворонский^a, Е.В. Русин^{a, b}, В.В. Цодокова^a

^a ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: com.rev@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.07.14, принята к печати 22.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гайворонский С.В., Русин Е.В., Цодокова В.В. Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 22–29

Аннотация.

Предмет исследования. Рассмотрены два подхода к решению задачи идентификации – алгоритмы подобных треугольников и межзвездных угловых расстояний.

Метод. Применительно к задаче определения астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом проведен сравнительный анализ этих алгоритмов с использованием экспериментальных данных, полученных с помощью макета зенитного телескопа.

Основные результаты. В результате проведенного анализа определено, что метод идентификации звезд по межзвездным угловым расстояниям позволяет верно распознавать большее количество звезд и в несколько раз быстрее, чем алгоритм подобных треугольников. В связи с зависимостью алгоритма межзвездных угловых расстояний от фокуса объектива предложен комбинированный метод идентификации звезд. Идея метода заключается в совмещении двух упомянутых выше алгоритмов с целью решения следующих задач: расчета фокусного расстояния объектива и непосредственно распознавания звезд.

Практическая значимость. Предложенный метод позволяет при сравнительно малом времени обработки распознавать видимые в поле зрения астроориентиры независимо от наличия информации о фокусном расстоянии объектива.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, астрономические координаты, зенитный телескоп, идентификация звезд

STARS IDENTIFICATION AT THE ASTRONOMICAL COORDINATES DETERMINATION BY MEANS OF AN AUTOMATED ZENITH TELESCOPE

S.V. Gayvoronskiy^a, E.V. Rusin^{a, b}, V.V. Tsodokova^a

^a Concern CSRI “Elektropryor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: com.rev@mail.ru

Article info

Received 01.07.14, accepted 22.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29

Article in Russian

Reference for citation: Gayvoronskiy S.V., Rusin E.V., Tsodokova V.V. Stars identification at the astronomical coordinates determination by means of an automated zenith telescope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 22–29 (in Russian)

Abstract.

Scope of research. The paper deals with two approaches to the stars identification: an algorithm of similar triangles and an algorithm of interstellar angular distances.

Method. Comparative analysis of the considered algorithms is performed using experimental data obtained by the prototype of zenith telescope as applied to the problem of coordinates determination by automated zenith telescope.

Main results. The analysis has revealed that identification method based on the interstellar angular distances provides star identification with higher reliability and several times faster than the algorithm of similar triangles. However, the algorithm of interstellar angular distances is sensitive to the lens focal length, so a combined stars identification method is proposed. The idea of this method is to integrate the two above algorithms in order to calculate the lens focal length and to identify directly the stars.

Practical significance. The combined method gives the possibility for valid identification of the stars visible in the field of view with comparatively short processing time whether the lens focal length is available or not.

Keywords: optoelectronic device, astronomical coordinates, zenith telescope, stars identification.

Введение

Автоматизированный зенитный телескоп предназначен для высокоточного определения астрономических координат по результатам наблюдений околозенитного участка звездного неба и представляет собой оптико-электронный прибор (рис. 1), в котором объектив 1, соединенный с телекамерой 2, и датчики горизонта 3 установлены на платформе, имеющей возможность разворота вокруг вертикальной оси. Также предусмотрен механизм автоматического горизонтирования 4. Оптическая ось объектива направлена вертикально.

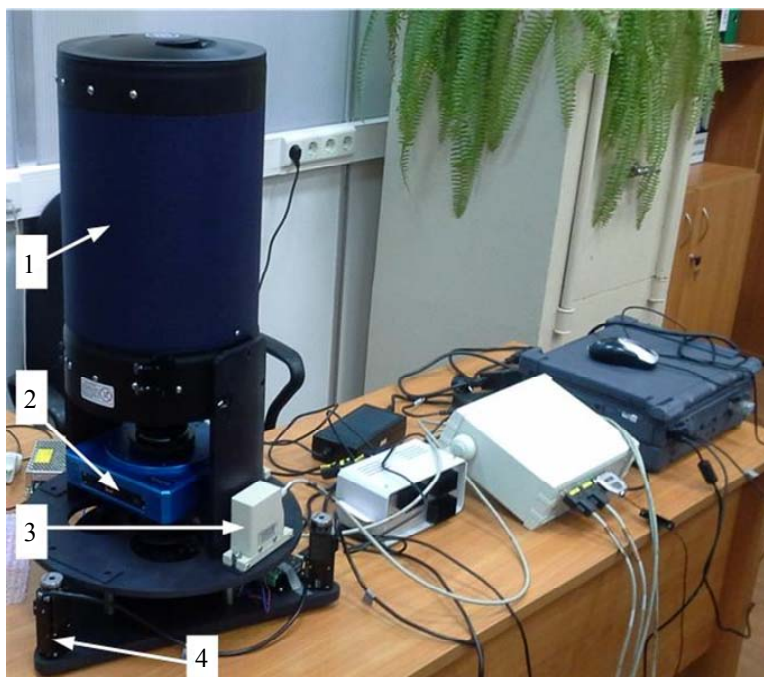


Рис. 1. Макет зенитного телескопа: 1 – объектив; 2 – телекамера; 3 – датчики горизонта; 4 – механизм горизонтирования. Характеристики макета: фокусное расстояние 1900 мм, диаметр входного зрачка 200 мм, размер фотоприемного устройства (ФПУ) 4872×3248 пикселей, размер пикселя 0,0074 мм



Рис. 2. Эквивалентность астрономических и экваториальных координат

Астрономические координаты определяются посредством измерения направления на небесные объекты (звезды) с известными экваториальными координатами (прямое восхождение α и склонение δ), при этом используют эквивалентность астрономических координат (φ, λ) точки наблюдения и экваториальных координат для звезд, расположенных непосредственно в зените (рис. 2):

$$\varphi = \delta;$$

$$\lambda = \alpha - \theta,$$

где θ – гринвичское звездное время [1–3].

Однако на практике наблюдение звезд непосредственно в точке зенита затруднительно. В связи с этим измерения производятся в следующем порядке:

1. регистрация при помощи телевизионной аппаратуры последовательности кадров, содержащих изображения астроориентиров, находящихся в зоне зенита (в пределах поля зрения);
2. определение в каждом кадре координат энергетических центров изображений всех звезд [4–6];
3. идентификация звезд;
4. интерполяция точки зенита и определение ее экваториальных координат.

Одновременно фиксируется время регистрации кадра (для расчета θ). Блок-схема алгоритма определения астрономических координат представлена на рис. 3.

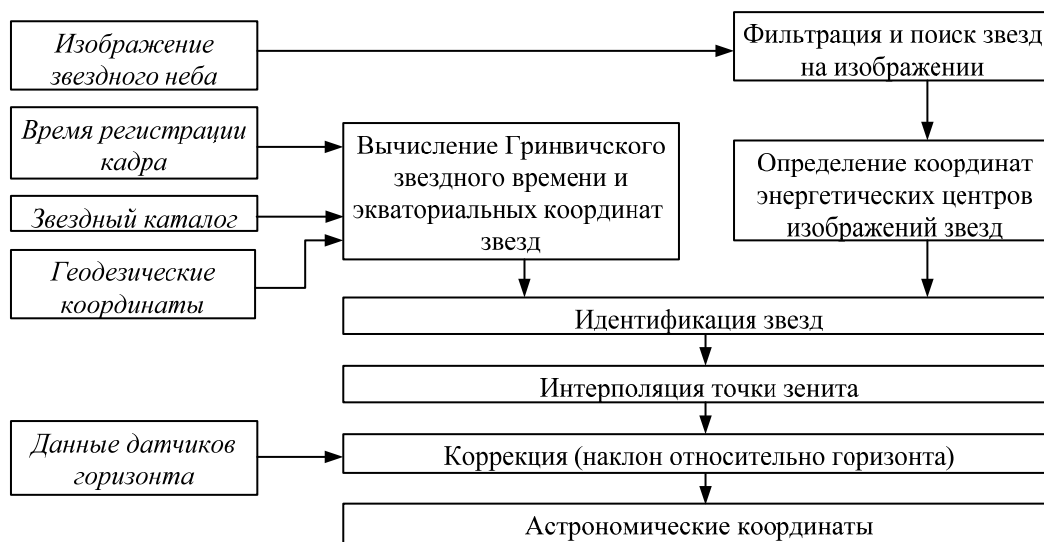


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения астрономических координат

Важным этапом алгоритма определения астрономических координат является идентификация звезд. От количества верно опознанных астроориентиров зависит точность окончательного результата, а от скорости обработки – быстродействие всей системы.

В настоящей работе представлены исследования различных подходов к решению задачи идентификации с целью синтеза алгоритма, позволяющего наиболее оперативно и достоверно распознавать звезды.

Идентификация звезд

Исходными данными для алгоритма идентификации служат измеренные координаты энергетических центров изображений звезд в плоскости ФПУ (x, y) и их экваториальные координаты (α, δ) из каталога [7].

Для решения задачи идентификации необходимо сопоставить объекты, содержащиеся в двух областях – на изображении звездного неба и в рабочем каталоге, который представляет собой часть общего звездного каталога, выделенную по ряду признаков для текущего момента регистрации кадра с целью уменьшения объема вычислений. Следует отметить, что эти две области развернуты друг относительно друга и отмасштабированы произвольным образом. Кроме того, количество объектов в обеих областях не совпадает.

Из всего многообразия алгоритмов идентификации целесообразно использовать наиболее быстродействующие, например, геометрические. Идея геометрических алгоритмов заключается в составлении из звезд, попавших в поле зрения объектива, различных геометрических фигур, в которых в качестве базовых характеристик для распознавания используются межзвездные угловые расстояния, сферические углы, образуемые звездами на небесной сфере, отношения сторон, периметры, площади и прочие характеристики, с последующим сравнением их с таковыми же, но вычисленными для звезд из каталога, заранее записанными в память компьютера [8–11].

Для решения задачи идентификации звезд, зарегистрированных зенитным телескопом, рассматривались следующие геометрические алгоритмы: подобных треугольников и межзвездных угловых расстояний.

Алгоритм сравнения подобных треугольников

Вследствие того, что небесная сфера проецируется на плоскость, необходимо использовать преобразование касательной проекции, т.е. перевести сферические координаты звезд (α , δ) в прямоугольные (идеальные) координаты с использованием следующих выражений [12]:

$$\xi = \frac{\operatorname{ctg} \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 + \operatorname{ctg} \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\cos \delta_0 - \operatorname{ctg} \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 + \operatorname{ctg} \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)},$$

где (α_0, δ_0) – начальные экваториальные координаты:

$$\delta_0 = \varphi_0;$$

$$\alpha_0 = \lambda_0 + \theta,$$

где (φ_0, λ_0) – геодезические координаты точки размещения зенитного телескопа.

По координатам изображений звезд на ФПУ (x, y) и идеальным координатам (ξ, η) строятся всевозможные треугольники. Далее осуществляется процесс перебора, в котором каждый треугольник на изображении сравнивается со всеми треугольниками из рабочего каталога с целью определения подобия. Признаком, с помощью которого возможно определить подобие треугольников, является отношения сторон:

$$p = \frac{b}{c}; \quad q = \frac{a}{c},$$

где a, b, c – стороны треугольника ($c \geq b \geq a$).

Разницы отношения сторон треугольников, составленных из звезд на изображении (p_1, q_1) и из объектов в каталоге (p_2, q_2) , должны удовлетворять следующему условию:

$$\begin{cases} |p_1 - p_2| < \varepsilon; \\ |q_1 - q_2| < \varepsilon, \end{cases} \quad (2)$$

где ε – допустимое расхождение, обусловленное погрешностью вычисления сторон a, b, c в каждой из областей и зависящее от точности определения координат звезд на изображении и экваториальных координат в звездном каталоге.

Из звезд, находящихся в соответствующих вершинах подобных треугольников, формируются пары (из двух треугольников – три пары), которые заносятся в табл. 1. Размер таблицы соответствий – N_1, N_2 , где N_1 – количество звезд в каталоге, N_2 – количество звезд на снимке.

		Звезды на снимке									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Звезды в каталоге	1	3	5	1	0	1	2	2	0	0	0
	2	13	56	1	0	0	0	0	2	1	0
	3	46	13	0	1	1	1	0	0	0	0
	4	2	6	1	5	0	2	4	0	0	0
	5	2	2	61	3	0	0	3	0	0	1
	6	2	4	1	2	0	2	0	0	0	1
	7	1	0	0	1	2	0	3	0	0	0
	8	5	1	1	0	2	1	0	0	0	1
	9	1	2	0	59	0	2	2	0	0	0
	10	1	1	1	0	0	0	2	1	0	0
	11	4	2	2	1	65	0	0	0	0	0
	12	0	3	0	4	0	55	3	2	1	0

Таблица 1. Фрагмент таблицы соответствий

Каждый раз, когда выполняется условие (2), звездной паре прибавляется 1 «голос». Пары звезд, набравшие наибольшее количество «голосов» после завершения процесса перебора, считаются соответствующими друг другу [13].

Алгоритм сравнения межзвездных угловых расстояний

Идея данного алгоритма распознавания звезд основывается на вычислении угловых расстояний между звездами в наблюдаемой группе и сравнении этих расстояний с таковыми же, но вычисленными для звезд из каталога (рис. 4). По измерениям абсцисс x и ординат y энергетических центров изображе-

ний звезд рассчитываются косинусы углов β_{ij} между направлениями на каждую пару отобразившихся звезд по формулам

$$\cos \beta_{ij} = l_i l_j + m_i m_j + n_i n_j,$$

$$l = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, m = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, n = \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}},$$

где f – фокусное расстояние объектива зенитного телескопа; i, j – порядковые номера звезд на изображении. Следует отметить, что при расчете косинусов углов β_{ij} координаты (x, y) приводятся к центру ФПУ (x_0, y_0) (рис. 4).

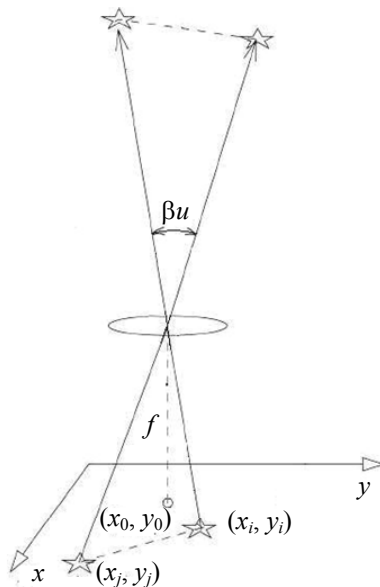


Рис. 4. Межзвездное угловое расстояние

По данным каталога определяются угловые расстояния между парами звезд в виде косинусов этих расстояний, вычисленных по следующим формулам:

$$\cos \beta_{ij} = l_i l_j + m_i m_j + n_i n_j,$$

$$l = \cos \delta \cos \alpha, m = \cos \delta \sin \alpha, n = \sin \delta,$$

где i, j – порядковые номера звезд в каталоге; δ – склонение звезды; α – прямое восхождение звезды.

При работе алгоритма идентификации происходит сравнение измеренных косинусов углов β_{ij} для всех пар отобразившихся звезд с косинусами пар звезд β_{kl} из каталога и выбор звезд, для которых выполняется условие

$$|\cos \beta_{ij} - \cos \beta_{kl}| < \varepsilon, \tag{3}$$

где ε – допустимое расхождение между значениями косинусов, полученных по данным из каталога, и измеренными косинусами, обусловленное ошибками определения углов β_{ij} и β_{kl} [14–16]. Если выполняется условие (3), то звездная пара заносится в таблицу соответствий, аналогичную табл. 1, по результатам заполнения которой определяются звезды, соответствующие друг другу.

Сравнительный анализ алгоритмов идентификации

С целью выбора алгоритма, позволяющего идентифицировать звезды с большей достоверностью и за более короткое время, был проведен сравнительный анализ. Для этого с помощью макета зенитного телескопа (рис. 1) были получены изображения звездного неба и произведена идентификация звезд с использованием рассмотренных алгоритмов. При проведении сравнительного анализа оценивались количество верно идентифицированных звезд и время, затраченное на работу каждого алгоритма. Результаты представлены в табл. 2.

Параметр	Алгоритм подобных треугольников	Алгоритм межзвездных угловых расстояний
Количество верно опознанных звезд, %	99,00	99,15
Время обработки данных, с	4,60	0,54
Априорное знание фокусного расстояния	не требуется	требуется

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа алгоритмов идентификации

По представленным в табл. 2 результатам очевидно преимущество идентификации звезд с помощью алгоритма межзвездных угловых расстояний, так как он позволяет верно распознавать большее количество звезд и в несколько раз быстрее, чем алгоритм подобных треугольников. Однако особенностью алгоритма идентификации по межзвездным углам является зависимость от фокусного расстояния объектива, которое может изменяться вследствие влияния различных факторов, например, перепадов температур. Учитывая указанные причины, было принято решение о создании комбинированного метода, позволяющего оперативно распознавать звезды независимо от фокусного расстояния объектива.

Комбинированный метод идентификации звезд

Идея комбинированного метода идентификации звезд заключается в совмещении двух рассмотренных выше алгоритмов с целью решения следующих задач: расчета фокусного расстояния объектива и непосредственно распознавания звезд. На первом шаге регистрируется пробный кадр, с использованием которого производится первичная идентификация методом подобных треугольников с целью расчета фокусного расстояния объектива с использованием следующего выражения:

$$f = \frac{\gamma'}{\operatorname{tg}(m)}, \quad (4)$$

где γ' – размер пикселя ФПУ; m – масштабный коэффициент (угл.с/пиксель). Масштабный коэффициент может быть найден на основе параметров аффинного преобразования прямоугольных координат в идеальные (A_0, A_1, A_2) [17]:

$$\xi = A_0 + A_1x + A_2y.$$

Параметры аффинного преобразования определяются методом наименьших квадратов [18]:

$$A = (H^T H)^{-1} H^T \cdot \xi, \quad (5)$$

где

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_i \\ \vdots \\ \xi_n \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i & y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix},$$

x_i, y_i – координаты энергетического центра изображения i -ой звезды; i – номер идентифицированной звезды; n – количество идентифицированных звезд. Масштабный коэффициент определяется как

$$m = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}. \quad (6)$$

Далее идентификация звезд производится по алгоритму межзвездных угловых расстояний.

По изображению звездного неба, полученного с помощью макета зенитного телескопа, была произведена идентификация звезд с использованием комбинированного метода. В результате обработки пробного кадра было идентифицировано 15 звезд. Координаты энергетических центров их изображений, а также идеальные координаты, рассчитанные в соответствии с (1), представлены в табл. 3.

i	x , пиксель	y , пиксель	α	δ	ξ	η
1	4419,75	1865,50	17° 19' 12,04"	60° 13' 07,79"	0,001009	-0,00774
2	3622,87	668,91	16° 46' 37,33"	60° 23' 38,18"	-0,00368	-0,00467
3	2977,96	481,79	16° 41' 16,02"	60° 32' 14,39"	-0,00443	-0,00216
4	3814,37	664,93	16° 46' 35,32"	60° 21' 04,14"	-0,00369	-0,00542
5	4276,84	2284,48	17° 30' 29,31"	60° 15' 04,28"	0,002637	-0,00717
6	2049,16	572,09	16° 43' 20,24"	60° 44' 41,81"	-0,00411	0,001457
7	2557,68	1723,61	17° 15' 00,41"	60° 38' 03,75"	0,000397	-0,00049
8	2124,38	1226,62	17° 01' 17,99"	60° 43' 48,25"	-0,00155	0,001184
9	1555,59	534,35	16° 42' 05,93"	60° 51' 18,29"	-0,00427	0,003379
10	790,99	1375,71	17° 05' 02,07"	61° 01' 41,02"	-0,00101	0,006384
11	1243,65	828,52	16° 50' 04,55"	60° 55' 32,25"	-0,00313	0,004603
12	818,51	483,50	16° 40' 22,89"	61° 01' 09,87"	-0,00449	0,006249
13	2931,37	2798,28	17° 44' 22,10"	60° 33' 06,45"	0,004596	-0,00191
14	2524,97	2344,74	17° 31' 58,37"	60° 38' 32,59"	0,002816	-0,00034
15	2219,92	2383,27	17° 33' 00,48"	60° 42' 37,85"	0,002957	0,000847

Таблица 3. Данные для расчета фокусного расстояния объектива

С использованием данных, представленных в табл. 3, в соответствии с (5) были определены параметры аффинного преобразования прямоугольных координат в идеальные:

$$A_0 = -0,006398; A_1 = 3,092363 \cdot 10^{-8}; A_2 = 3,896791 \cdot 10^{-6}.$$

С использованием выражения (6) был рассчитан масштабный коэффициент: $m = 0,804''$.

В соответствии с выражением (4) было определено фокусное расстояние объектива: $f = 1898,94$ мм.

Рассчитанное фокусное расстояние незначительно отличается от указанного в документации объектива ($f = 1900$ мм), используемого в макете зенитного телескопа. Таким образом, можно сделать вывод о работоспособности алгоритма расчета фокусного расстояния.

Далее идентификация звезд была произведена методом межзвездных углов с использованием полученного фокусного расстояния. Количество верно опознанных звезд в этом кадре составило 100%, время обработки первого кадра для расчета фокусного расстояния – 4,6 с, время, затраченное на идентификацию последующих снимков – 0,54 с на кадр. Таким образом, комбинированный метод позволяет при сравнительно малом времени обработки идентифицировать видимые в поле зрения астроориентиры независимо от наличия информации о фокусном расстоянии объектива.

Заключение

В работе рассмотрены два подхода к решению задачи идентификации звезд: алгоритм подобных треугольников и межзвездных угловых расстояний.

Применительно к задаче определения астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом проведен сравнительный анализ рассмотренных алгоритмов с использованием экспериментальных данных. В результате проведенного анализа определено, что метод идентификации звезд по межзвездным угловым расстояниям позволяет верно распознавать большее количество звезд и в несколько раз быстрее, чем алгоритм подобных треугольников. В связи с зависимостью алгоритма межзвездных угловых расстояний от фокуса объектива предложен комбинированный метод идентификации звезд, идея которого заключается в совмещении двух упомянутых выше алгоритмов с целью решения следующих задач: расчета фокусного расстояния объектива и непосредственно распознавания звезд. Комбинированный метод позволяет при сравнительно малом времени обработки распознавать видимые в поле зрения астроориентиры независимо от наличия информации о фокусном расстоянии объектива.

Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Людомирский М.Б., Каютин И.С., Ямщиков Н.Е. Автономные бесплатформенные астроинерциальные навигационные системы: принципы построения, режимы работы и опыт эксплуатации // Гироскопия и навигация. 2013. № 3. С. 91–110.
2. Абакумов В.М. Особенности измерения угловых координат звезд прецизионными оптико-электронными системами // Оптический журнал. 1996. № 7. С. 43–47.
3. Брумберг В.А., Глебова Н.И., Лукашова М.В., Малков А.А., Питьева Е.В., Румянцева Л.И., Свешников М.Л., Фурсенко М.А. Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику» // Труды ИПА РАН. 2004. № 10. С. 62–67.
4. Березин В.Б., Березин В.В., Соколов А.В., Цыцулин А.К. Адаптивное считывание изображения в астрономической системе на матричном приборе с зарядовой связью // Изв. Вузov России. Радиоэлектроника. 2004. № 4. С. 36–45.
5. Манцетов А.А., Соколов А.В., Умников Д.В., Цыцулин А.К. Измерение координат специально формируемых оптических сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2006. № 2. С. 90–94.
6. Gayvoronsky S., Rusin V., Tsodokova V. A comparative analysis of methods for determining star image coordinates in the photodetector plane // Automation and Control: Proc. Int. Conf. of Young Scientists. St. Petersburg, 2013. P. 54–58.
7. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Tycho-2. СПб., 2005. 132 с.
8. Аккардо Д., Руфино Дж. Новое решение задачи получения начальных данных об ориентации при помощи астрономического датчика: алгоритм, реализация, испытания // Гироскопия и навигация. 2001. № 1. С. 87–100.
9. Osipik V.A., Fedoseev V.I. Algorithms for automatically recognizing star groups from on board a spacecraft // Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal). 1998. V. 65. N 8. P. 629–635.
10. Кружилов И.С. Методы и программные средства повышения эффективности распознавания групп звезд в автономной астронавигации. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2010. 141 с.
11. Ezhov O.M. Comparative analysis of star-detection algorithms for orientation devices with CCD arrays // Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal). 1998. V. 65. N 8. P. 649–652.
12. Блажко С.Н. Курс практической астрономии. М.: Наука, 1979. 432 с.

13. Bratt S.P. Analysis of Star Identification Algorithms due to Uncompensated Spatial Distortion. Master of Science Thesis [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://digitalcommons.usu.edu/etd/1714/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.11.2013).
14. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. Новосибирск: Наука, 2005. 256 с.
15. Малинин В.В., Фалеев В.И. Оптико-электронные системы ориентации по звездному полю // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 10. С. 28–31.
16. Осипик В.А., Федосеев В.И. Математическое моделирование алгоритмов опознавания групп звезд // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 7. С. 10–14.
17. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии. М.: Наука, 1989. 264 с.
18. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 440 с.

- Гайворонский Станислав Викторович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, gaivoronsky@mail.ru
- Русин Евгений Вадимович* – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, com.rev@mail.ru
- Цодокова Вероника Владимировна* – инженер, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, tsodokova.vv@gmail.com
- Stanislav V. Gayvoronskiy* – PhD, senior scientific researcher, Concern CSRI “Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, gaivoronsky@mail.ru
- Evgeniy V. Rusin* – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, Concern CSRI “Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, com.rev@mail.ru
- Veronika V. Tsodokova* – engineer, Concern CSRI “Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, tsodokova.vv@gmail.com

УДК 004.021

АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВСЕНАПРАВЛЕННЫМИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

В.П. Лазаренко^a, Т.С. Джамийков^b, В.В. Коротаев^c, С.Н. Ярышев^c

^a ООО «ЭВС», Санкт-Петербург, 195253, Российская Федерация

^b Технический университет, София, 1000, Болгария

^c Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: saiberbest@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.05.14, принята к печати 30.09.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-30-39

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лазаренко В.П., Джамийков Т.С., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 30–39

Аннотация. Всенаправленные оптико-электронные системы находят применение в тех сферах, где критичен большой угол обзора. Однако всенаправленные оптико-электронные системы имеют большую дисторсию, что затрудняет их повсеместное использование. В работе приведено сравнение проекционных функций перспективных объективов и всенаправленных сверхширокоугольных объективов типа «рыбий глаз» с углом обзора не менее 180°, из которого следует, что такие объективы не могут быть описаны с помощью отклонения от перспективной модели. Для решения этой проблемы был предложен алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными оптическими системами, к классическому перспективному виду с использованием процедуры калибровки всенаправленной оптико-электронной системы. Приведено краткое сравнение четырех методов калибровки всенаправленных оптико-электронных систем, доступных в виде инструментариев с открытым исходным кодом. Приведена геометрическая проекционная модель, используемая для калибровки всенаправленной оптической системы. Алгоритм состоит из нескольких этапов. Сначала производится калибровка всенаправленной оптической системы, результатом работы которой является проекционная функция оптической системы, которая задает связь трехмерных координат точки в пространстве предметов и координат ее изображения в плоскости фотоприемника. Затем рассчитывается массив трехмерных точек, описывающий плоскость в пространстве предметов и характеризующий таким образом поле зрения виртуальной камеры. Потом с помощью проекционной функции, полученной в результате калибровки, производится расчет массива координат изображений трехмерных точек в плоскости фотоприемника. На последнем этапе результирующее изображение формируется путем приравнивания яркости пикселей этого изображения и яркостей соответствующих им пикселей исходного всенаправленного. Разработанный алгоритм позволяет получить изображение части поля зрения всенаправленной оптико-электронной системы с исправленной дисторсией из исходного всенаправленного изображения. Алгоритм предназначен для работы с всенаправленными оптико-электронными системами, как с зеркально-линзовыми оптическими системами, так и со сверхширокоугольными объективами типа «рыбий глаз». Представлены экспериментальные результаты работы алгоритма.

Ключевые слова: всенаправленные камеры, объективы типа «рыбий глаз», катадиоптрические камеры, преобразование изображений

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

TRANSFORMATION ALGORITHM FOR IMAGES OBTAINED BY OMNIDIRECTIONAL CAMERAS

V.P. Lazarenko^a, T.S. Djamiykov^b, V.V. Korotaev^c, S.N. Yaryshev^c

^a «EVS» Ltd., Saint Petersburg, 195253, Russian Federation

^b Technical University of Sofia, Sofia, 1000, Bulgaria

^c ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: saiberbest@gmail.com

Article info

Received 13.05.14, accepted 30.09.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-30-39

Article in Russian

Reference for citation: Lazarenko V.P., Djamiykov T.S., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. Transformation algorithm for images obtained by omnidirectional cameras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 30–39 (in Russian)

Abstract. Omnidirectional optoelectronic systems find their application in areas where a wide viewing angle is critical. However, omnidirectional optoelectronic systems have a large distortion that makes their application more difficult. The paper compares the projection functions of traditional perspective lenses and omnidirectional wide angle fish-eye lenses with a viewing angle not less than 180° . This comparison proves that distortion models of omnidirectional cameras cannot be described as a deviation from the classic model of pinhole camera. To solve this problem, an algorithm for transforming omnidirectional images has been developed. The paper provides a brief comparison of the four calibration methods available in open source toolkits for omnidirectional optoelectronic systems. Geometrical projection model is given used for calibration of omnidirectional optical system. The algorithm consists of three basic steps. At the first step, we calculate the field of view of a virtual pinhole PTZ camera. This field of view is characterized by an array of 3D points in the object space. At the second step the array of corresponding pixels for these three-dimensional points is calculated. Then we make a calculation of the projection function that expresses the relation between a given 3D point in the object space and a corresponding pixel point. In this paper we use calibration procedure providing the projection function for calibrated instance of the camera. At the last step final image is formed pixel-by-pixel from the original omnidirectional image using calculated array of 3D points and projection function. The developed algorithm gives the possibility for obtaining an image for a part of the field of view of an omnidirectional optoelectronic system with the corrected distortion from the original omnidirectional image. The algorithm is designed for operation with the omnidirectional optoelectronic systems with both catadioptric and fish-eye lenses. Experimental results are presented.

Keywords: omnidirectional cameras, fish-eye lenses, catadioptric cameras, image transformation.

Acknowledgements. The work has been partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01).

Введение

Всенаправленные оптико-электронные системы находят применение в тех сферах, где критичен большой угол обзора. Однако всенаправленные оптико-электронные системы имеют большую дисторсию, что затрудняет их использование в измерительных и наблюдательных телевизионных системах [1–3].

Большинство современных оптических систем могут приближенно быть описаны перспективной геометрической моделью (рис. 1, а), при этом дисторсией будет считаться отклонение от этой модели. Проекционная функция таких объективов может быть выражена следующим образом:

$$\tan \theta = \frac{r}{-f'}, \quad (1)$$

где r – высота изображения; f' – фокусное расстояние; θ – угол падения луча. Из выражения (1) легко заметить, что при угле падения луча, равном 90° , мы получим бесконечный радиус изображения (так как радиус изображения пропорционален тангенсу угла падения луча). Из этого следует, что сверхширокоугольные объективы типа «рыбий глаз» с углом обзора не менее 180° не могут быть описаны с помощью отклонения от этой модели. М.М. Русинов в работе [4] предложил проекционную функцию для сверхширокоугольных объективов типа «рыбий глаз», в которой радиус изображения пропорционален углу падений луча (рис. 1, б):

$$\theta = \frac{r}{f'}.$$

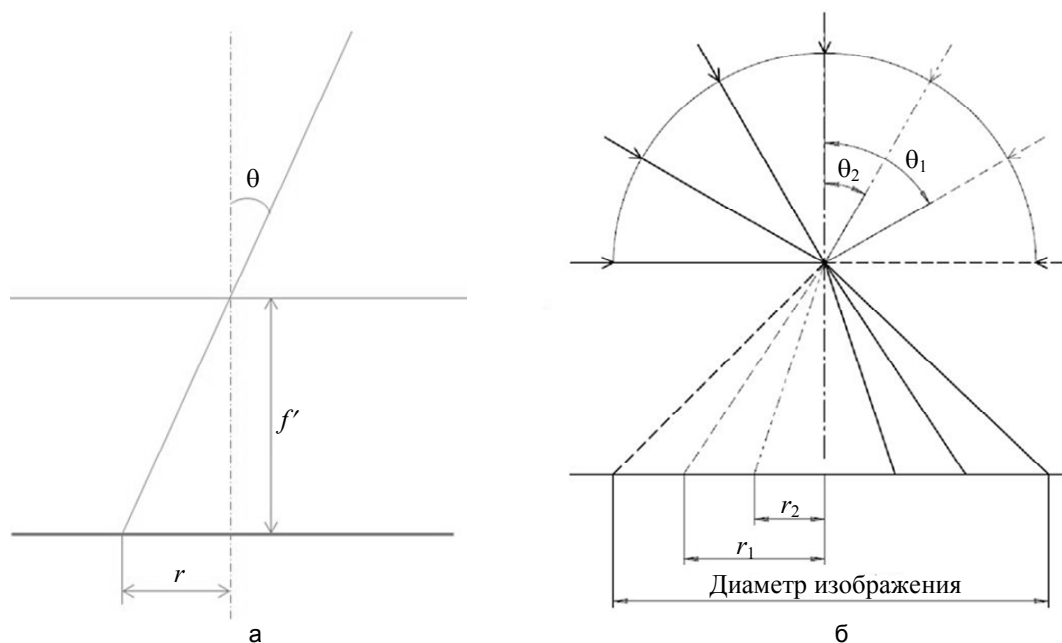


Рис. 1. Перспективная геометрическая модель объектива (а); геометрическая модель сверхширокоугольного объектива типа «рыбий глаз» (б)

В предыдущих работах [5, 6] мы, как и некоторые другие авторы [7, 8], использовали для алгоритма данную функцию, однако стало очевидно, что на практике функция передачи меняется в зависимости от конкретной модели объектива и, в общем случае, заранее неизвестна. Чтобы решить эту проблему, был разработан алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными камерами, в изображения с исправленной дисторсией, соответствующие классической перспективной модели с использованием процедуры калибровки.

Под всенаправленными оптико-электронными системами (всенаправленными камерами) мы подразумеваем оптико-электронные системы, поле зрения которых хотя бы в одной из плоскостей достигает 360° . Существует три наиболее часто встречающихся вида всенаправленных оптических систем:

1. оптические системы со сверхширокоугольными объективами типа «рыбий глаз» с углом обзора не менее 180° , способные захватывать не менее полусферы окружающего пространства;
2. зеркально-линзовые (катадиоптрические) оптические системы, представляющие собой камеры с обычным объективом с установленной на него насадкой в виде зеркала, обладающего вращательной симметрией. Форма поверхности зеркала может варьироваться от конуса до эллипса;
3. многокамерные системы, большое поле зрения которых достигается за счет использования нескольких камер с перекрывающимися полями зрения.

В работе мы ограничимся рассмотрением однокамерных оптико-электронных систем, т.е. камер с объективами типа «рыбий глаз» и катадиоптрических камер.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма преобразования изображений, полученных камерами с всенаправленными объективами, к классическим изображениям перспективного вида с исправленной дисторсией. Конечной целью являлась разработка модуля для программы оптико-электронной системы наблюдения (ОЭСН) «Тайфун», реализующего на основе всенаправленной камеры функции немеханической поворотной камеры, работающей по детектору движения. В связи с этим к алгоритму предъявлялись дополнительные требования:

- алгоритм должен быть универсальным, т.е. работать как с всенаправленными камерами с объективом типа «рыбий глаз», так и с катадиоптрическими оптическими системами;
- процесс калибровки должен быть доступен для неквалифицированных пользователей системы и не должен требовать применения специальных технических средств.

Алгоритм может найти применение в системах видеонаблюдения, в которых могут быть использованы различные модели камер и объективов к ним, при этом алгоритм должен быть универсален, для работы потребуется предварительно провести несложную процедуру калибровки. Кроме того, алгоритм может найти применение в различных сферах робототехники, где важен широкий угол обзора, но при этом есть необходимость устранения дисторсии, свойственной всенаправленным камерам.

Существующие методы калибровки всенаправленных оптических систем

Поиск функции передачи объектива, связывающей трехмерные координаты точки в пространстве предметов с координатами ее изображения в плоскости приемника, является ключевым моментом для алгоритма преобразования изображений. Решается задача поиска функции передачи с помощью калибровки всенаправленной оптической системы.

Существует множество методов калибровки всенаправленных оптических систем. Одно из наиболее подробных сравнений этих методов приведено в работе [9]. Среди множества рассмотренных методов калибровки авторами отдельно выделена группа из четырех методов, доступных в виде инструментариев с открытым исходным кодом.

1. Mei и River [10]. Авторами используется сферическая модель камеры, для калибровки требуются несколько изображений съемки двумерного тест-объекта.
2. Puig и соавторы [11]. Также используется сферическая модель камеры. Для калибровки используется трехмерный тест-объект, состоящий из трех перпендикулярных тест-объектов в виде шахматной доски.
3. Barreto и Агаццо [12]. Также используется сферическая модель камеры. Для калибровки используется одно изображение съемки камерой, содержащее минимум 3 линии.
4. Scaramuzza [13]. Всенаправленные изображения рассматриваются как искаженные, параметры искажения должны быть рассчитаны. Для калибровки используются изображения съемки двумерных тест-объектов в виде шахматной доски.

При этом третья методика не работает со сверхширокоугольными объективами типа «рыбий глаз». Оставшиеся три методики имеют примерно одинаковые показатели по точности калибровки, достаточные для решения поставленной задачи.

Из оставшихся трех методик мы стремились выбрать такую методику, которая не требовала бы специальных технических средств, а также могла быть выполнена неквалифицированным работником (или пользователем системы). Исходя из этого, была выбрана методика Scaramuzza как наиболее простая и удобная для практического применения. Методика реализована в виде инструментария «OCamCalib» для среды MATLAB. Данный инструментарий используется такими организациями, как NASA, PHILIPS,

BOSCH, DAIMLER. Для осуществления калибровки требуется сделать с помощью калибруемой оптической системы несколько снимков тест-объекта в виде шахматной доски. Дальнейший процесс калибровки практически полностью автоматизирован. Результатом калибровки являются рассчитанные параметры (такие как координаты центра и коэффициенты полинома) для двух функций, задающих прямую $((u', v') = world2cam(x, y, z))$ и обратную $((x, y, z) = cam2world(u', v'))$ связь трехмерных координат точки в пространстве предметов и координат ее изображения в системе координат фотоприемника. Процесс калибровки и его математический аппарат подробно описаны в работах [13, 14].

Геометрическая проекционная модель, используемая для калибровки всенаправленной оптической системы

Геометрическая проекционная модель всенаправленной камеры, используемая для калибровки, изображена на рис. 2.

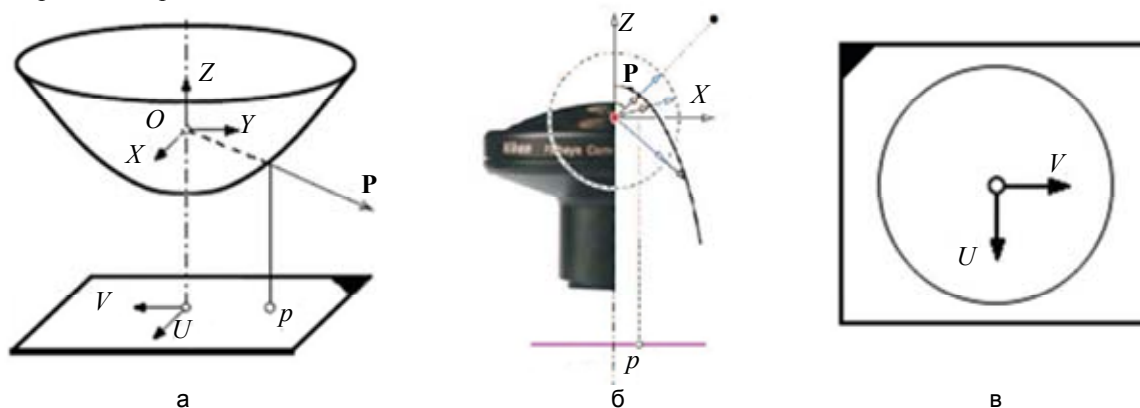


Рис. 2. Геометрическая проекционная модель катадиоптрической всенаправленной камеры (а); геометрическая проекционная модель камеры с объективом типа «рыбий глаз» (б); координаты в плоскости приемника камеры (в)

Здесь XYZ – система координат в пространстве объектов; UV – система координат в плоскости фотоприемника; $[x, y, z]$ – координаты точки в пространстве объектов; p – изображение точки; $[u, v]$ – координаты изображения этой точки в плоскости фотоприемника; \mathbf{P} – вектор, исходящий из начала координат и направленный на точку в пространстве объектов.

Модель предполагает следующие допущения:

- катадиоптрическая камера является центрированной оптической системой, а следовательно, существует точка, в которой пересекаются все отраженные лучи. Эта точка является началом системы координат XYZ ;
- фокальная плоскость оптической системы должна совпадать с плоскостью фотоприемника, допустимы только незначительные отклонения;
- зеркало имеет вращательную симметрию относительно оптической оси;
- дисторсия объектива в модели не учитывается, так как использование зеркала во всенаправленных камерах требует от объектива большого фокусного расстояния. Благодаря этому дисторсией объектива действительно можно пренебречь. Однако в случае использования объектива типа «рыбий глаз» его дисторсия уже будет включена в вычисляемую проекционную функцию.

Так как мы полагаем, что фокальная плоскость оптической системы совпадает с плоскостью фотоприемника, из этого следует, что x и y пропорциональны u и v соответственно:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

где α – коэффициент масштабирования, $\alpha > 0$.

Целью калибровки является нахождение функции, которая установит соответствие между точкой изображения p и трехмерным вектором \mathbf{P} . Таким образом,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot u \\ \alpha \cdot v \\ f(u, v) \end{bmatrix}.$$

Включим α в функцию f , тогда

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ f(u, v) \end{bmatrix}.$$

Вследствие того, что вектор \mathbf{P} не является точкой, а лишь направлением к ней, последнее упрощение допустимо. Более того, благодаря тому, что зеркало вращательно-симметрично (как и дисторсия объ-

ектива «рыбий глаз»), функция $f(u, v)$ зависит только расстояния от изображения точки до центра изображения:

$$P \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{bmatrix},$$

где $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$.

Таким образом, результатом калибровки является нахождение функции $f(\rho)$, которая может быть описана полиномом n -ой степени:

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + \dots + a_n\rho^n \cdot \rho$$

Однако, получив коэффициенты полинома $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$, нам необходимо учесть искажения, вызванные процессом дискретизации фотоприемника, а также тем, что пиксели не всегда имеют квадратную форму. Из-за этого граница кругового изображения принимает форму эллипса (рис. 3). Чтобы учесть эти искажения, дополним нашу модель аффинными преобразованиями:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ e & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_c' \\ y_c' \end{bmatrix},$$

где u', v' – истинные координаты в системе координат фотоприемника; u, v – координаты без учета дисторсии; x_c', y_c' – координаты центра кругового изображения.

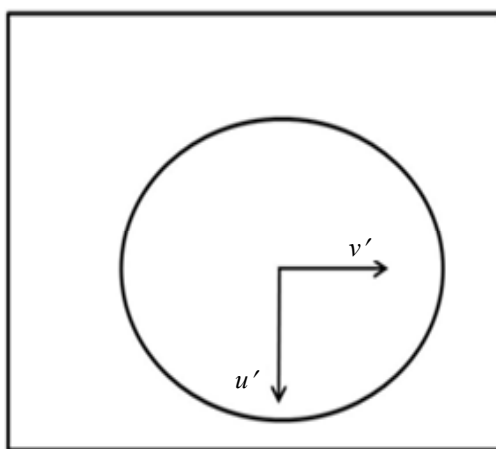


Рис. 3. Искажения, вызванные процессом дискретизации (при использовании прямоугольных элементов матрицы) и смещением осей камеры и зеркала (объектива)

Таким образом, в результате калибровки рассчитаны все необходимые параметры для функций [14], задающих прямую и обратную связь трехмерных координат точки в пространстве предметов и координат ее изображения в системе координат фотоприемника (далее мы будем считать, что внутри этих функции уже содержатся рассчитанные параметры):

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = f(x, y, z, a_0, a_1, a_2 \dots a_n, x_c', y_c', c, d, e) = world2cam \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right), \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = f(u', v', a_0, a_1, a_2 \dots a_n, x_c', y_c', c, d, e) = cam2world \left(\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} \right).$$

Алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами

Алгоритм состоит из трех базовых частей. Первый этап – формирование облака трехмерных точек в пространстве предметов, соответствующих полю зрения виртуальной камеры с перспективной геометрической моделью. Второй этап – нахождение координат изображений этих точек в плоскости фотоприемника. При этом используется передаточная функция всенаправленной оптико-электронной системы, найденная с помощью процедуры калибровки всенаправленных камер. Третий этап – поэлементное (попиксельное) формирование выходного изображения из исходного всенаправленного изображения с использованием координат, полученных на втором этапе.

Первый этап – формирование облака точек, характеризующих поле зрения виртуальной перспективной камеры. Чтобы сформировать облако точек, характеризующих поле зрения виртуальной перспективной камеры, нам необходимо задать характеристики этой камеры: H_{res} – горизонтальное разрешение; K_{res} – соотношение сторон (например, 4/3 или 16/9); $V_{res} = H_{res} / K_{res}$ – вертикальное разрешение; α – угол поля зрения виртуальной камеры; φ – угол поворота виртуальной камеры вокруг оси Z ; θ – угол наклона виртуальной камеры от оси Z .

Ось Z совпадает с оптической осью всенаправленной камеры. Сначала произведем расчет поля зрения виртуальной камеры с $\varphi = 0, \theta = 0$ (рис. 4). Так как при прохождении через объектив мы теряем информацию о дальности до объекта, то плоскость поля зрения виртуальной камеры мы можем разместить на произвольном расстоянии. Для упрощения расчетов поместим ее на расстоянии в 1 м.

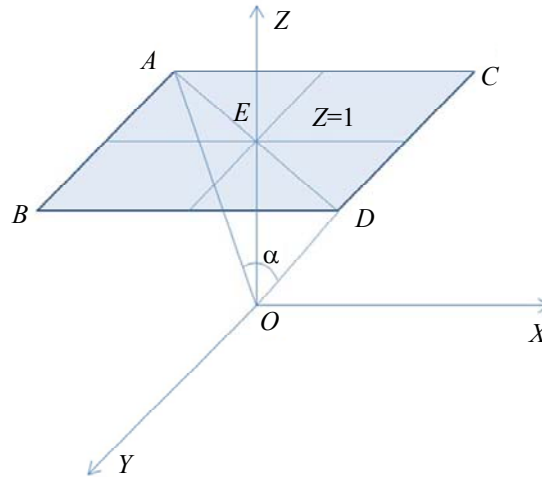


Рис. 4. Поле зрения виртуальной камеры с $\varphi = 0, \theta = 0$

Таким образом, поле зрения виртуальной камеры будет представлять собой прямоугольную область $ABCD$, расположенную параллельно плоскости YOX на единичном расстоянии. Прямоугольная область представляет собой массив M координат трехмерных точек $P_{i,j}$ размером H_{res} на V_{res} элементов:

$$M = \begin{bmatrix} P_{0,0} & \dots & P_{H_{res}-1,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{0,V_{res}-1} & \dots & P_{H_{res}-1,V_{res}-1} \end{bmatrix},$$

$$P_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, точке A будет соответствовать $P_{0,0}$; $B - P_{H_{res}-1,0}$; $C - P_{0,V_{res}-1}$; $D - P_{H_{res}-1,V_{res}-1}$. Произведем расчет геометрических размеров области $ABCD$:

$$AD = 2 \cdot tg\left(\frac{\alpha}{2}\right),$$

$$AC = \sqrt{AD^2 - AB^2} = \sqrt{\frac{(2tg\alpha)^2 \cdot K_{res}^2}{K_{res}^2 + 1}},$$

$$AB = AC/K_{res} = \sqrt{\frac{(2tg\alpha)^2 \cdot K_{res}^2}{K_{res}^2 + 1}}.$$

Найдем координаты вершин A, B, C, D :

$$A = P_{0,0} = \begin{bmatrix} x_{0,0} \\ y_{0,0} \\ z_{0,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -AC/2 \\ -AB/2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$B = P_{0,V_{res}-1} = \begin{bmatrix} x_{0,V_{res}-1} \\ y_{0,V_{res}-1} \\ z_{0,V_{res}-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -AC/2 \\ AB/2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C = P_{H_{res}-1,0} = \begin{bmatrix} x_{H_{res}-1,0} \\ y_{H_{res}-1,0} \\ z_{H_{res}-1,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AC/2 \\ -AB/2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$D = P_{H_{res}-1,V_{res}-1} = \begin{bmatrix} x_{H_{res}-1,V_{res}-1} \\ y_{H_{res}-1,V_{res}-1} \\ z_{H_{res}-1,V_{res}-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AC/2 \\ AB/2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Отметив, что для всех строк $x_{i,0} = x_{i,1} = \dots = x_{i,V_{res}-1}$, для всех столбцов $y_{0,j} = y_{1,j} = \dots = y_{H_{res}-1,j}$, а для всех точек $z = 1$, получим:

$$x_i = -\frac{AC}{2} + \frac{AC}{H_{res}-1} \cdot i,$$

$$y_j = -\frac{AB}{2} + \frac{AB}{V_{res}-1} \cdot j,$$

$$P_{i,j} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Далее необходимо рассчитать поле зрения M в соответствии с углами поворота φ и наклона θ (рис. 5). Произведем наклон поля зрения на угол θ , при этом x_i останется неизменным:

$$P'_{i,j} = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_j \\ z'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ -z \sin \theta + y_j \cos \theta \\ z \cos \theta + y_j \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \cos \theta - \sin \theta \\ y_j \sin \theta + \cos \theta \end{bmatrix}.$$

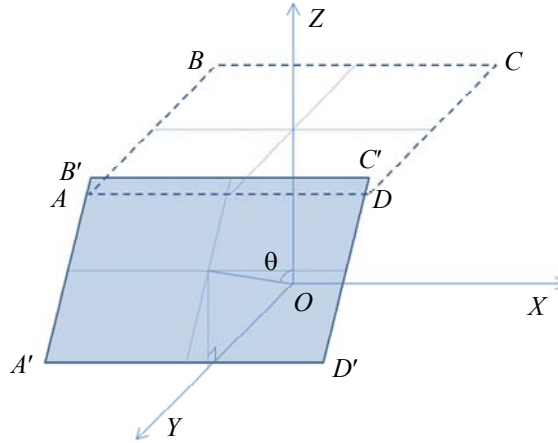


Рис. 5. Наклон поля зрения виртуальной камеры на угол θ

Далее повернем поле зрения M относительно оси Z на угол φ (рис. 6), при этом z'_j останется неизменным:

$$P''_{i,j} = \begin{bmatrix} x''_{i,j} \\ y''_{i,j} \\ z''_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_i \cos \varphi + y'_j \sin \varphi \\ -x'_i \sin \varphi + y'_j \cos \varphi \\ z'_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

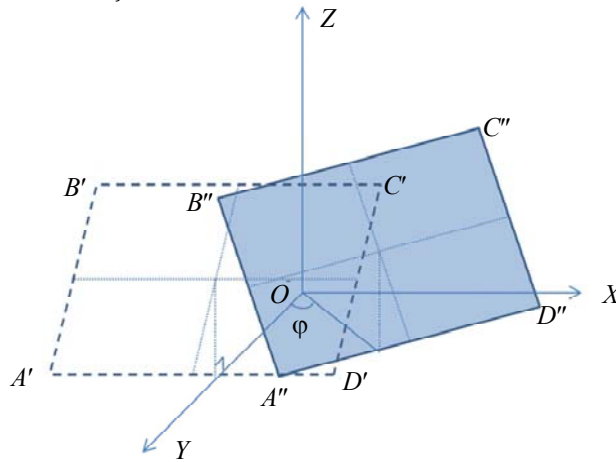


Рис. 6. Поворот поля зрения виртуальной камеры на угол φ относительно оси Z

Второй этап – поиск координат изображений точек. Чтобы получить соответствие между пространственными координатами точки $P''_{i,j}$, полученными в выражении (3), и пиксельными координатами p' ее изображения в системе координат фотоприемника, применим функцию прямой связи координат (2), с параметрами, рассчитанными в результате калибровки:

$$p'_{i,j} = \begin{bmatrix} u'_{i,j} \\ v'_{i,j} \end{bmatrix} = \text{world2cam}(P''_{i,j}) = \text{world2cam} \left(\begin{bmatrix} x''_{i,j} \\ y''_{i,j} \\ z''_j \end{bmatrix} \right).$$

Таким образом, мы получим массив M' , содержащий пиксельные координаты изображений точек для рассчитанного поля зрения:

$$M' = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_{0,0} \\ v'_{0,0} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} u'_{H_{res-1},0} \\ v'_{H_{res-1},0} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \begin{bmatrix} u'_{0,V_{res-1}} \\ v'_{0,V_{res-1}} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} u'_{H_{res-1},V_{res-1}} \\ v'_{H_{res-1},V_{res-1}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

Третий этап – формирование исправленного изображения. Теперь нам осталось только сформировать результирующее изображение попиксельно из исходного всенаправленного изображения:

$$I' = \begin{bmatrix} L(u'_{0,0}, v'_{0,0}) & \dots & L(u'_{H_{res-1},0}, v'_{H_{res-1},0}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L(u'_{0,V_{res-1}}, v'_{0,V_{res-1}}) & \dots & L(u'_{H_{res-1},V_{res-1}}, v'_{H_{res-1},V_{res-1}}) \end{bmatrix},$$

где L – величина сигнала в данном пикселе фотоприемника (или исходного всенаправленного изображения) с координатами $u'_{i,j}, v'_{i,j}$. При этом повысить качество результирующего изображения можно с помощью алгоритмов интерполяции, так как мы имеем дело с дробными значениями координат.

Экспериментальные результаты

Была произведена калибровка всенаправленной камеры с помощью инструментария «OSCamCalib». Для этого было сделано 9 снимков тест-объекта в виде шахматной доски на калибруемую камеру. Нами была использована двухмегапиксельная IP-камера с установленным на нее сверхширокоугольным объективом типа «рыбий глаз» (Fujinon FE185C046HA-1).

Калибровка была произведена со следующими результатами:

- координаты центра кругового изображения (пиксель): $x'_c = 580,718, y'_c = 770,693$;
- среднеквадратическая ошибка перепроецирования (пиксель): 0,794;
- аффинные коэффициенты: $c = 0,999779217318396, d = 0,0000913037, e = -0,00037467188$;
- коэффициенты полинома: $a_0 = -338,2953325845469, a_1 = 0, a_2 = 0,00000010675995669, a_3 = -0,0000000007556347, a_4 = -0,0000000000015930$.

Как видно из результатов, среднеквадратическая ошибка перепроецирования (другими словами, ошибка функции прямой связи координат *world2cam*) оказалась менее одного пикселя, в чем можно убедиться на рис. 7, б. Такой точности достаточно как для задач наблюдения, так и для большинства измерительных задач.

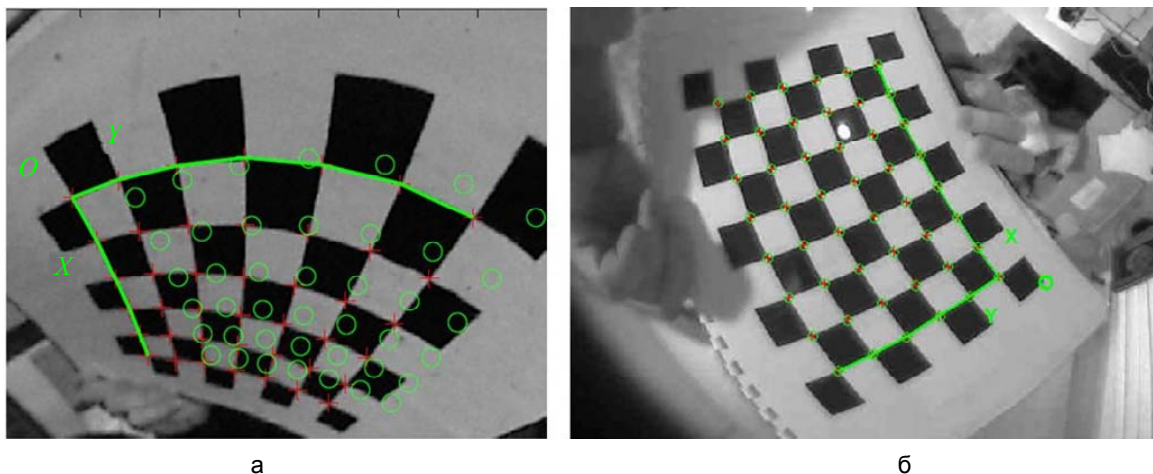


Рис. 7. Результаты калибровки с помощью инструментария «OSCamCalib». Пример неверного определения калибровочных параметров [13] (а); результат экспериментальной калибровки – положение калибровочных точек и перепроецированных точек совпадает, что подтверждает верное определение калибровочных параметров (б). Кресты – найденные калибровочные точки тест-объекта, кружки – результат проецирования рассчитанных в процессе калибровки трехмерных координат калибровочных точек обратно на изображение. Размер каждого квадрата тест-объекта – 20 мм

Далее параметры, найденные в результате калибровки, были использованы в алгоритме, реализованном в модуле для ОЭСН «Тайфун» [15]. Модуль реализует на основе всенаправленной камеры функции немеханической поворотной камеры, поворачивающейся вслед за движущимися объектами. На рис. 8 приведен пример работы программы.

Таким образом, с помощью разработанного алгоритма нами реализована немеханическая поворотная камера на основе всенаправленной камеры, при этом среднеквадратическая ошибка перепроецирования точек из исходного всенаправленного изображения на изображение с исправленной дисторсией составила менее одного пикселя.



Рис. 8. Реализация алгоритма в ОЭСН «Тайфун»: исходное изображение (а); виртуальная PTZ-камера, направляемая детектором движения (б)

Заключение

Разработан алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными камерами, в изображения с исправленной дисторсией, соответствующие классической проекционной геометрической модели. Разработанный алгоритм позволяет получить изображение части поля зрения всенаправленной камеры с исправленной дисторсией. Алгоритм подходит для работы с всенаправленными камерами, как с катадиоптрическими оптическими системами, так и с объективами типа «рыбий глаз».

Алгоритм был успешно применен в программном модуле для оптико-электронной системы наблюдения «Тайфун», реализующем на основе всенаправленной камеры функции немеханической поворотной камеры, поворачивающейся вслед за движущимися объектами [15].

Алгоритм может найти применение в системах видеонаблюдения, в которых могут быть использованы различные модели камер и объективов к ним, при этом алгоритм универсален, для работы потребуется предварительно провести несложную процедуру калибровки. Кроме того, алгоритм может найти применение в различных сферах робототехники, где важен широкий угол обзора, но при этом есть необходимость устранения дисторсии, свойственной всенаправленным камерам.

Литература

1. Yarishev S., Konyahin I.A., Timofeev A.N. Universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2009. V. 7133. Art. 71333Y. doi: 10.1117/12.821251
2. Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S.N. High precision angular and linear measurements using universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems // *Key Engineering Materials*. 2010. V. 437. P. 160–164. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.160
3. Korotaev V.V., Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S.N. High precision multimatrix opto-electronic modules for distributed measuring systems // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. V. 7544. Art. 75441E. doi: 10.1117/12.886294
4. Русинов М. *Техническая оптика: Учебное пособие*. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
5. Lazarenko V., Yarishev S. The algorithm for transforming a hemispherical field-of-view image // *Proc. 3rd Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (OSAV'2012)*. St. Petersburg, Russia, 2012. P. 35–38.
6. Лазаренко В.П., Ярышев С.Н. Алгоритм трансформации изображений с полусферическим полем зрения // *Актуальные теоретические и практические вопросы современного оптико-электронного приборостроения. Сборник трудов молодых ученых / Под ред. В.В. Коротаева*. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. С. 103–105.
7. Schwalbe E. Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems // *Panoramic Photogrammetry Workshop*. 2005. V. 36. Part 5/W8.
8. Цудиков М.Б. Приведение изображения из камеры типа «рыбий глаз» к стандартному телевизионному // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2011. № 5–1. С. 232–237.
9. Paniagua C., Puig L., Guerrero J.J. Omnidirectional structured light in a flexible configuration // *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2013. V. 13. N 10. P. 13903–13916.

10. Mei C., Rives P. Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'07). Rome, Italy, 2007. Art. 4209702. P. 3945–3950. doi: 10.1109/ROBOT.2007.364084
11. Puig L., Bastanlar Y., Sturm P., Guerrero J.J., Barreto J. Calibration of central catadioptric cameras using a DLT-like approach // International Journal of Computer Vision. 2011. V. 93. N 1. P. 101–114. doi: 10.1007/s11263-010-0411-1
12. Barreto J.P., Araujo H. Geometric properties of central catadioptric line images and their application in calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005. V. 27. N 8. P. 1327–1333. doi: 10.1109/TPAMI.2005.163
13. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion // Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Computer Vision Systems (ICVS'06). NY, USA, 2006. V. 2006. Art. 1578733. P. 45. doi: 10.1109/ICVS.2006.3
14. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras // Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006). Beijing, China, 2006. Art. 4059340. P. 5695–5701. doi: 10.1109/IROS.2006.282372
15. Голушко М.Н., Ярышев С.Н. Оптико-электронная система наблюдения «Тайфун» // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2014. № 1. С. 38–42.

<i>Лазаренко Василий Петрович</i>	– инженер-программист, ООО «ЭВС», Санкт-Петербург, 195253, Российская Федерация, saiberbest@gmail.com
<i>Джамийков Тодор Стоянов</i>	– доцент, Технический университет, София, 1000, Болгария, tsd@tu-sofia.bg
<i>Коротаев Валерий Викторович</i>	– доктор технических наук, профессор, декан факультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, korotaev@grv.ifmo.ru
<i>Ярышев Сергей Николаевич</i>	– кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ysn63@mail.ru
<i>Vasily P. Lazarenko</i>	– engineer, «EVS» Ltd., Saint Petersburg, 195253, Russian Federation, saiberbest@gmail.com
<i>Todor S. Djamiykov</i>	– Associate professor, Technical University of Sofia, Sofia, 1000, Bulgaria, tsd@tu-sofia.bg
<i>Valery V. Korotaev</i>	– D.Sc., Professor, Dean, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, korotaev@grv.ifmo.ru
<i>Sergei N. Yaryshev</i>	– PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ysn63@mail.ru

УДК 681.51

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА ДЛЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А.А. Бобцов^а, А.А. Пыркин^а, Р. Ортега^б

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

^б Национальный центр научных исследований, 75016, Париж, Франция

Адрес для переписки: a.pyrkin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 23.10.14, принята к печати 18.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-40-45

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бобцов А.А., Пыркин А.А., Ортега Р. Адаптивный наблюдатель магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 40–45

Аннотация. Рассматривается задача синтеза адаптивного наблюдателя магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами. Допускается, что некоторые электрические параметры, такие как сопротивление и индуктивность, являются известными постоянными числами, но сам магнитный поток, скорость вращения ротора и угол его положения не измеряются. Предлагается новый робастный подход к синтезу адаптивного наблюдателя магнитного потока, обеспечивающий глобальную ограниченность всех сигналов, а также экспоненциальную сходимость к нулю ошибки между потоком и его оценкой, вырабатываемой адаптивным наблюдателем. Задача синтеза адаптивного наблюдателя потока была решена с использованием тригонометрических свойств и линейной фильтрации, обеспечивающей парирование неизвестных членов, полученных в результате математических преобразований. Ключевая идея заключается в новом способе параметризации динамической модели магнитного потока. На первом шаге сформирована математическая модель, содержащая неизвестные параметры и зависящая от измеряемых сигналов силы тока и напряжения в обмотках двигателя. С использованием основного тригонометрического тождества найдено линейное уравнение, из которого исключены функции, зависящие от неизмеряемых величин угла и угловой скорости вращения ротора. Применяя динамические фильтры первого порядка, получена стандартная регрессионная модель, состоящая из измеряемых функций времени и неизвестных параметров. Далее построен градиентный алгоритм оценивания неизвестных параметров, гарантирующий ограниченность всех сигналов в системе. Доказано утверждение о том, что при выполнении условия исчезающего возбуждения, означающего наличие достаточного количества гармоник в регрессоре, гарантирована экспоненциальная сходимость к нулю всех ошибок оценивания неизвестных параметров. Показано, что ошибка наблюдения за магнитным потоком явно зависит от ошибок оценивания неизвестных параметров. Экспоненциальная сходимость к нулю ошибок оценивания обеспечивает экспоненциальную сходимость к нулю ошибки наблюдения за потоком. Приведен пример численного моделирования.

Ключевые слова: синхронный двигатель, магнитный поток, адаптивный наблюдатель, робастность

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01, Проект 14.Z50.31.0031).

ADAPTIVE FLUX OBSERVER FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

A.A. Bobtsov^a, A.A. Pyrkin^a, R. Ortega^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia

^b Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 75016, France

Corresponding author: a.pyrkin@gmail.com

Article info

Received 23.10.14, accepted 18.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-40-45

Article in Russian

Reference for citation: Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Ortega R. Adaptive flux observer for permanent magnet synchronous motors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 40–45 (in Russian)

Abstract. The paper deals with the observer design problem for a flux in permanent magnet synchronous motors. It is assumed that some electrical parameters such as resistance and inductance are known numbers. But the flux, the angle and the speed of the rotor are unmeasurable. The new robust approach to design an adaptive flux observer is proposed that guarantees globally boundedness of all signals and, moreover, exponential convergence to zero of observer error between the true flux value and an estimate obtained from the adaptive observer. The problem of an adaptive flux observer design has been solved with using the trigonometrical properties and linear filtering which ensures cancellation of unknown terms arisen after mathematical calculations. The key idea is the new parameterization of the dynamical model containing unknown parameters and depending

on measurable current and voltage in the motor. By applying the Pythagorean trigonometric identity the linear equation has found that does not contain any functions depending on angle or angular velocity of the rotor. Using dynamical first-order filters the standard regression model is obtained that consists of unknown constant parameters and measurable functions of time. Then the gradient-like estimator is designed to reconstruct unknown parameters, and it guarantees boundedness of all signals in the system. The proposition is proved that if the regressor satisfies the persistent excitation condition, meaning the “frequency-rich” signal, then all errors in observer exponentially converges to zero. It is shown that observer error for the flux explicitly depends on estimator errors. Exponential convergence of parameter estimation errors to zero yields exponential convergence of the flux observer error to zero. The numerical example is considered.

Keywords: synchronous motor, flux, adaptive observer, robustness.

Acknowledgements. The work is partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01, Project 14.Z50.31.0031).

Введение. Постановка задачи

В работе рассматривается новый подход к синтезу адаптивного наблюдателя магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами в предположении, что отсутствует датчик измерения положения угла ротора. Решение данной задачи представляет большой теоретический и практический интерес, поскольку для ряда технических систем (например, вакуумные насосы, краны и лифты) установка датчиков положения вызывает существенные трудности. Также следует отметить, что использование бессенсорных технологий в других технических приложениях может быть экономически выгодным, поскольку затраты на измерительные устройства будут минимальными.

Вышеуказанные проблемы естественным образом мотивируют развитие бессенсорных алгоритмов для синхронных двигателей и представлены в многочисленных работах специалистов в области электрических машин, а также систем управления (см., например, [1–8]). В настоящей работе мы будем развивать подход, опубликованный в [7].

В [7] предложена стандартная градиентная процедура оценивания магнитного потока. Анализ, сделанный для полной нелинейной модели, гарантирует глобальную (при некоторых условиях даже экспоненциальную) сходимости оценок в ограниченную область. Показаны простые и робастные алгоритмы оценивания (см. также [9]). Для более простого анализа устойчивости и доказательства глобальной сходимости использовано свойство неисчезающего возбуждения. В [5] этот подход в задаче синтеза наблюдателя совмещен со специальным способом оценивания линейной скорости и стандартным регулятором, который часто используется в приложениях, обеспечивая удовлетворительные экспериментальные результаты. Такой наблюдатель также использован в [2, 3, 10].

В отличие от [7], в данной работе будем допускать, что значение потока от постоянного магнита неизвестно. Более того, улучшая [7], покажем, что предлагаемый в рамках настоящей работы адаптивный наблюдатель потока обеспечивает не только ограниченность всех сигналов и экспоненциальную сходимости ошибки между потоком и его оценкой в некоторую область, но и экспоненциальную сходимости ошибки к нулю.

Следуя [7], рассмотрим динамическую модель магнитного потока для синхронного двигателя следующего вида:

$$\dot{\lambda} = \mathbf{v} - R\mathbf{i}, \quad (1)$$

$$\lambda = L\mathbf{i} + \mathbf{x}, \quad (2)$$

где $\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T$ – вектор неизвестного магнитного потока; $\mathbf{i} = [i_1 \quad i_2]^T$ и $\mathbf{v} = [v_1 \quad v_2]^T$ – соответственно

векторы тока и напряжения в обмотках двигателя; неизвестный вектор $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \lambda_m \begin{bmatrix} \cos(n_p \theta) \\ \sin(n_p \theta) \end{bmatrix}$ содержит

неизмеряемые гармоники с неизвестным значением потока от постоянного магнита λ_m ; L и R – соответственно известные индуктивность и сопротивление. Ставится задача синтеза наблюдающего устройства вектора неизвестного магнитного потока λ , обеспечивающего глобальную ограниченность всех сигналов, а также экспоненциальную сходимости к нулю ошибки между потоком и его оценкой, вырабатываемой адаптивным наблюдателем.

Основной результат

Продифференцируем уравнение (2), тогда

$$\dot{\lambda} = L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \dot{\mathbf{x}}. \quad (3)$$

Приравнявая (1) и (3), имеем

$$\mathbf{v} - R\mathbf{i} = L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \dot{\mathbf{x}},$$

откуда

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} - L \frac{d\mathbf{i}}{dt} - R\mathbf{i}. \quad (4)$$

Интегрируя (4), получаем уравнение для вектора \mathbf{x}

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(0) + \mathbf{z}_1(t) - \mathbf{z}_1(0) - L\mathbf{i}(t) + L\mathbf{i}(0) - R\mathbf{z}_2(t) + R\mathbf{z}_2(0), \quad (5)$$

где

$$\dot{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{v}(t),$$

$$\dot{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{i}(t).$$

Перепишем (5) следующим образом:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{q}(t) + \mathbf{f}_0, \quad (6)$$

где были использованы обозначения

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{z}_1(t) - L\mathbf{i}(t) - R\mathbf{z}_2(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{x}(0) - \mathbf{z}_1(0) + L\mathbf{i}(0) + R\mathbf{z}_2(0). \quad (8)$$

Заметим, что в (7) и (8) вектор $\mathbf{q}(t)$ может быть рассчитан или измерен, но вектор \mathbf{f}_0 содержит неизвестные постоянные компоненты. Представим (6) в следующей форме:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{01} \\ f_{02} \end{bmatrix}.$$

Из последней системы имеем

$$x_1^2 + x_2^2 = q_1^2 + q_2^2 + f_{01}^2 + f_{02}^2 + 2(q_1 f_{01} + q_2 f_{02}),$$

$$\lambda_m^2 = q_1^2 + q_2^2 + f_{01}^2 + f_{02}^2 + 2(q_1 f_{01} + q_2 f_{02}),$$

что может быть записано в виде стандартной регрессионной модели вида

$$y = 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 + C, \quad (9)$$

где $y = -(q_1^2 + q_2^2)$ и $C = -\lambda_m^2 + f_{01}^2 + f_{02}^2$.

Для получения стандартной регрессионной модели без неизмеряемых сигналов введем в рассмотрение следующие линейные фильтры [11]:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1 = -\chi_1 + y, \\ \bar{y} = y - \chi_1, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{\chi}_2 = -\chi_2 + \mathbf{q}, \\ \bar{\mathbf{q}} = \mathbf{q} - \chi_2, \end{cases} \quad (11)$$

где $\chi_1 \in R$, $\chi_2 \in R^2$, $\chi_1(0) = 0$ и $\chi_2(0) = 0$.

Из (9) и (10) имеем

$$\bar{y} = y - \chi_1 = 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 + C - e^{-t} \int_0^t e^{\tau} 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 d\tau - e^{-t} \int_0^t e^{\tau} C d\tau = 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 - 2e^{-t} \int_0^t e^{\tau} \mathbf{q}^T d\tau \mathbf{f}_0 - Ce^{-t}. \quad (12)$$

Из (11) после аналогичных вычислений получаем

$$\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{q} - \chi_2 = \mathbf{q} - e^{-t} \int_0^t e^{\tau} \mathbf{q} d\tau. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получаем стандартную линейную регрессионную модель

$$\bar{y} = 2\bar{\mathbf{q}}^T \mathbf{f}_0 + Ce^{-t}, \quad (14)$$

состоящую из измеряемых функций времени \bar{y} и $\bar{\mathbf{q}}$, а также вектора неизвестных постоянных параметров \mathbf{f}_0 .

Пренебрегая затухающим слагаемым Ce^{-t} , для идентификации вектора неизвестных параметров \mathbf{f}_0 воспользуемся следующей типовой процедурой [12, 13]:

$$\hat{\mathbf{f}}_0 = \Gamma \left(\frac{1}{2} \bar{\mathbf{q}} \bar{y} - \bar{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}}^T \hat{\mathbf{f}}_0 \right), \quad (15)$$

где $\hat{\mathbf{f}}_0$ – оценка \mathbf{f}_0 ; Γ – положительно определенная матрица второго порядка.

Для восстановления магнитного потока используем уравнение

$$\hat{\lambda}(t) = L\mathbf{i}(t) + \mathbf{q}(t) + \hat{\mathbf{f}}_0(t), \quad (16)$$

где $\hat{\lambda}$ – оценка λ ; $\hat{\mathbf{f}}_0$ является решением дифференциального уравнения (15).

Утверждение. Адаптивный наблюдатель магнитного потока (15), (16) гарантирует:

1. ограниченность всех сигналов в наблюдателе;
2. если регрессор $\bar{\mathbf{q}}(t)$ является «частотно богатым», то экспоненциальную сходимость к нулю ошибки наблюдения $\tilde{\boldsymbol{\lambda}} = \boldsymbol{\lambda} - \hat{\boldsymbol{\lambda}}$.

Доказательство. Легко проверить, что алгоритм идентификации (15) обеспечивает глобальную ограниченность $\hat{\mathbf{f}}_0$, а также в случае выполнения условий незатухающего возбуждения регрессора $\bar{\mathbf{q}}$ (подробнее см., например, в [12, 13]) экспоненциальную сходимость к нулю ошибки $\tilde{\mathbf{f}}_0 = \mathbf{f}_0 - \hat{\mathbf{f}}_0$.

Рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = \frac{\tilde{\mathbf{f}}_0^T \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_0}{2}. \quad (17)$$

Из (15) и (14) имеем модель ошибки

$$\dot{\tilde{\mathbf{f}}}_0 = -\boldsymbol{\Gamma} \bar{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}}^T \tilde{\mathbf{f}}_0 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\Gamma} C \bar{\mathbf{q}} e^{-t}. \quad (18)$$

Дифференцируя по времени (17) с учетом (18), имеем

$$\dot{V} = -\tilde{\mathbf{f}}_0^T \bar{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}}^T \tilde{\mathbf{f}}_0 + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{f}}_0^T \bar{\mathbf{q}} C e^{-t} \leq -\frac{1}{2} (\tilde{\mathbf{f}}_0^T \bar{\mathbf{q}})^2 + \frac{1}{2} C^2 e^{-2t}. \quad (19)$$

Интегрируя неравенство $\dot{V} \leq \frac{1}{2} C^2 e^{-2t}$, получим

$$V(t) \leq V(0) + \frac{1}{4} C^2 (1 - e^{-2t}) \leq V(0) + \frac{1}{4} C^2,$$

откуда следует ограниченность функции $V(t)$ и, как следствие, ошибки оценивания $\tilde{\mathbf{f}}_0$.

Из (16) нетрудно видеть соотношение для ошибки наблюдения за магнитным потоком:

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}}(t) = \tilde{\mathbf{f}}_0(t). \quad (20)$$

Соотношение (20) говорит о том, что ошибка наблюдения за магнитным потоком определяется характером поведения функции $\tilde{\mathbf{f}}_0(t)$. Следовательно, $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}(t)$ также ограничена.

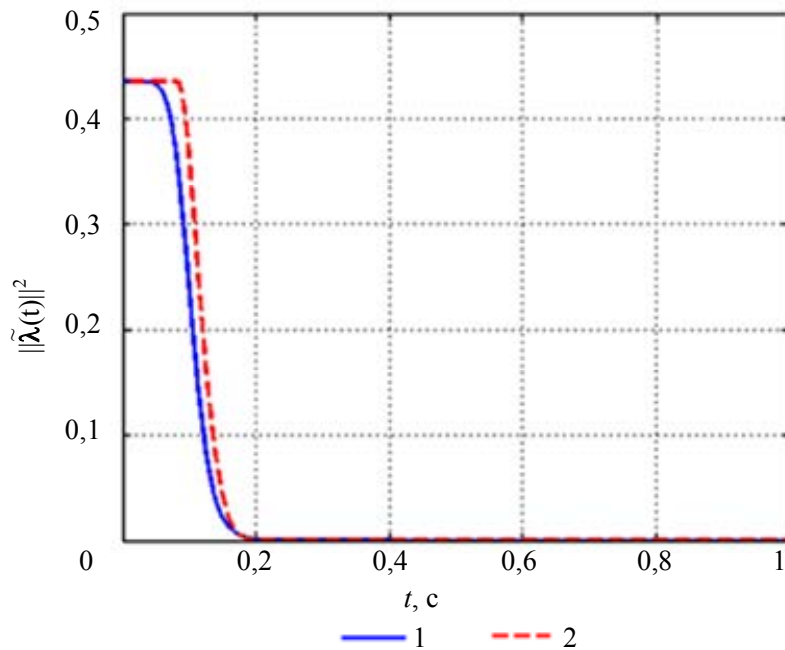


Рисунок. Переходные процессы для ошибок наблюдения по магнитному потоку $\|\tilde{\boldsymbol{\lambda}}(t)\|^2 = \tilde{\lambda}_1^2 + \tilde{\lambda}_2^2$:
 1 – алгоритм (16), (15), (10), (11), (7); 2 – алгоритм [7]

Если регрессор $\bar{\mathbf{q}}(t)$ удовлетворяет условию неисчезающего возбуждения, то из неравенства (19) при отсутствии экспоненциально затухающего члена можно показать экспоненциальную сходимость $\tilde{\mathbf{f}}_0(t)$ к нулю. Подробное доказательство приведено в [13, Теорема 4.3.2]. При наличии экспоненциально затухающего члена, как в (19), можно использовать то же самое доказательство, которое с учетом принципа сравнения [14, Лемма 3.4] гарантирует экспоненциальную сходимость к нулю функции $V(t)$, и, как

следствие, экспоненциальную сходимость к нулю ошибок оценивания $\tilde{\mathbf{f}}_0(t)$ и наблюдения $\tilde{\lambda}(t)$, что и требовалось доказать.

На рисунке представлены переходные процессы для нормы ошибки наблюдения за магнитным потоком. Приведено сравнение алгоритма [7] и алгоритма (16), (15), (10), (11), (7), предлагаемого в настоящей работе.

Заключение

В работе рассмотрена задача синтеза наблюдающего устройства вектора неизвестного магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами. На базе динамической модели магнитного потока вида (1), (2) был построен адаптивный наблюдатель, включающий в свою структуру уравнение (16), а также алгоритм настройки вектора неизвестных постоянных параметров вида (15). В сравнении с [7], предлагаемый подход обладает робастными свойствами, так как обеспечивает экспоненциальную сходимость к нулю ошибки между потоком λ и его оценкой (16) при условии, что значение потока от постоянного магнита λ_m является неизвестной константой.

Развитие предлагаемых исследований видится в решении задачи синтеза адаптивного наблюдателя магнитного потока для неизвестных параметров L и R [15, 16]. Более сложной задачей является рассмотрение двигателя с неизотропным ротором (неидеальной цилиндрической формы) [17].

Литература

1. Acarnley P.P., Watson J.F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. V. 53. N 2. P. 352–362. doi: 10.1109/TIE.2006.870868
2. Shah D., Espinosa-Perez G., Ortega R., Hilairet M. An asymptotically stable sensorless speed controller for non-salient permanent magnet synchronous motors // International Journal on Robust and Nonlinear Control. 2014. V. 24. P. 644–668. doi: 10.1002/rnc.2910
3. Dib W., Ortega R., Malaize J., Sensorless control of permanent-magnet synchronous motor in automotive applications: estimation of the angular position // IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). 2011. Art. 6119400. P. 728–733. doi: 10.1109/IECON.2011.6119400
4. Ortega R., Nam K., Praly L., Astolfi A., Hong J., Lee J. Sensorless control method and system for SPMSM using nonlinear observer. Korean Patent N 10-1091970. 2009.
5. Lee J., Hong J., Nam K., Ortega R., Praly L., Astolfi A. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer // IEEE Transaction on Power Electronics. 2010. V. 25. N 2. P. 290–297. doi: 10.1109/TPEL.2009.2025276
6. Nam K.H. AC Motor Control and Electric Vehicle Applications. CRC Press, 2010. 449 p.
7. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability // IEEE Transaction on Control Systems Technology. 2011. V. 19. N 3. P. 601–614.
8. Pillai H., Ortega R., Hernandez M., Devos T., Malrait F. Robustness analysis of a position observer for surface-mount permanent magnet synchronous motors vis-a-vis rotor saliency // Proc. 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2013). Toulouse, France, 2013. V. 9. Part 1. P. 353–358. doi: 10.3182/20130904-3-FR-2041.00074
9. Malaize J., Praly L., Henwood N. Globally convergent nonlinear observer for the sensorless control of surface-mount permanent magnet synchronous machines // Proc. 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2012). Maui, USA, 2012. P. 5900–5905. doi: 10.1109/CDC.2012.6426415
10. Tomei P., Verrelli C. Observer-based speed tracking control for sensorless permanent magnet synchronous motors with unknown torque // IEEE Transactions on Automatic Control. 2011. V. 56. N 6. P. 1484–1488. doi: 10.1109/TAC.2011.2121330
11. Middleton R.H., Goodwin G.C. Adaptive computed torque control for rigid link manipulations // Systems and Control Letters. 1988. V. 10. N 1. P. 9–16. doi: 10.1016/0167-6911(88)90033-3
12. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
13. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 825 p.
14. Khalil H. Nonlinear Systems. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 750 p.
15. Ichikawa S., Tomita M., Doki S., Okuma S. Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. V. 53. N 2. P. 363–372. doi: 10.1109/TIE.2006.870875
16. Piippo A., Hinkkanen M., Luomi J. Adaptation of motor parameters in sensorless PMSM drives // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. V. 45. N 1. P. 203–212. doi: 10.1109/TIA.2008.2009614
17. Hinkkanen M., Tuovinen T., Harnefors L., Luomi J. A combined position and stator-resistance observer for salient PMSM drives: design and stability analysis // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. V. 27. N 2. P. 601–609. doi: 10.1109/TPEL.2011.2118232

- Бобцов Алексей Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, декан факультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, bobtsov@mail.ru
- Пыркин Антон Александрович*** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация, a.pyrkin@gmail.com
- Ортега Ромео*** – PhD, директор по исследованиям, Национальный центр научных исследований, 75016, Париж, Франция, ortega@lss.supelec.fr
- Alexei A. Bobtsov*** – D.Sc., Professor, Dean, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, bobtsov@mail.ru
- Anton A. Pyrkin*** – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.pyrkin@gmail.com
- Romeo Ortega*** – PhD, Directeur de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris, 75016, France, ortega@lss.supelec.fr

УДК 621.382.038

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ДЕГРАДАЦИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ТРЕТЬЕЙ ГРУППЫ

Н.М. Шмидт^a, А.С. Усиков^{b, c}, Е.И. Шабунина^a, А.Е. Черняков^a, С.Ю. Курин^d, Ю.Н. Макаров^{b, d},
Х.И. Хелава^b, Б.П. Папченко^c

^a ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^b Нитридные кристаллы Inc-DP, Дир Парк, NY 11729, США

^c Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

^d ООО «Группа компаний «Нитридные кристаллы», Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация

Адрес для переписки: Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.12.14, принята к печати 20.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-46-53

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шмидт Н.М., Усиков А.С., Шабунина Е.И., Черняков А.Е., Курин С.Ю., Макаров Ю.Н., Хелава Н.И., Папченко Б.П. Изучение механизмов, ответственных за деградацию эффективности светодиодов на основе нитридов третьей группы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 46–53

Аннотация. Приведены результаты исследования деградации внешней квантовой эффективности двух типов светодиодов, ультрафиолетового и синего диапазонов, на основе полупроводниковых нитридов третьей группы. Кратко рассмотрены известные механизмы, приводящие к деградации внешней квантовой эффективности светодиодов при старении. Применение комплекса методов для изучения светодиодов после разных временных стадий старения позволило впервые выяснить возможность участия механизма многофононной рекомбинации носителей в дефектообразовании под действием инжекционного тока в системе протяженных дефектов и в локальных областях с флуктуациями состава твердого раствора. Этот комплекс включает: анализ вольтамперных характеристик, в том числе при напряжениях менее 2 В; методики низкочастотного шума; инфракрасную микроскопию. Многофононная рекомбинация носителей сопровождается генерацией собственных дефектов, в том числе атомов индия и галлия в междоузлиях, и их миграцией. Эти процессы приводят к изменению свойств системы протяженных дефектов и локальных областей твердого раствора, уменьшая концентрацию неравновесных носителей, участвующих в излучательной рекомбинации, что приводит к деградации внешней квантовой эффективности. Показано, что этот механизм может участвовать в деградации внешней квантовой эффективности светодиодов как ультрафиолетового, так и синего диапазона. В рамках этого механизма находит объяснение немонотонный характер развития процесса деградации и катастрофические отказы этих светодиодов, а также низкие сроки службы ультрафиолетовых светодиодов.

Ключевые слова: светодиоды на основе нитридов третьей группы, система протяженных дефектов, механизмы дефектообразования, деградация.

Благодарности. Работа проводится Университетом ИТМО при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 14.575.21.0054 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0054) о предоставлении субсидии по теме: «Исследование новых технических возможностей для создания экологически чистого генератора водорода с использованием фотоэлектрохимического элемента на основе наноструктур полупроводниковых нитридов третьей группы».

STUDY OF MECHANISMS RESPONSIBLE FOR THE EFFICIENCY DEGRADATION OF THE III-NITRIDES LIGHT EMITTING DIODES

N.M. Shmidt^a, A.S. Usikov^{b, c}, E.I. Shabunina^a, A.E. Chernyakov^a, S.Yu. Kurin^d, Yu. N. Makarov^{b, d},
H. Helava^b, B.P. Papchenko^c

^a Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^b Nitride Crystals Inc-DP, Deer Park, NY 11729, USA

^c ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^d Nitride Crystals Group Ltd., Saint Petersburg, 194156, Russian Federation

Corresponding author: Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru

Article info

Received 04.12.14, accepted 20.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-46-53

Article in Russian

Reference for citation: Shmidt N.M., Usikov A.S., Shabunina E.I., Chernyakov A.E., Kurin S.Yu., Makarov Yu. N., Helava H., Papchenko B.P. Study of mechanisms responsible for the efficiency degradation of the III-nitrides light emitting diodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 46–53 (in Russian)

Abstract. The results for external quantum efficiency degradation of two types of light emitting diodes based on III-nitrides: blue and ultraviolet ones are presented. Existing mechanisms proposed for the degradation are considered briefly. Applying several techniques for studying the light emitting diodes at various stages of the aging test gives the possibility to reveal a new mechanism of defects formations with a help of multi-phonon recombination of carriers in an extended defects system and in local regions of random alloy fluctuations. These techniques include analysis of current voltage characteristics evolution at $V < 2V$, the low frequency noise methods, and infrared microscopy. The multi-phonon recombination of carriers is accomplished by generation of native defects, in particular, In- or Ga-atoms and their migration. These processes lead to modification of the extended defects system properties and local composition of InGaN alloys in several regions that result in decreasing of the carriers participating in a radiative recombination and degradation of the external quantum efficiency. It was demonstrated that this mechanism of the defects formation can be responsible for the degradation of the blue and ultraviolet light emitting diodes. The mechanism can explain non monotonic dependence of the degradation process during the aging test, catastrophic failures of the light emitting diodes and low lifetime of the ultraviolet light emitting diodes.

Key words: light emitting diodes based on III-nitrides, system of extended defects, mechanisms of defects generation, degradation.

Acknowledgements. The work is performed by Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the grant agreement #14.575.21.0054 (unique identifier of research activities RFMEFI57514X0054) on the topic: «Study of new technical possibilities for the creation of clean hydrogen generator using a photoelectrochemical cell based on III nitride group semiconductor nanostructures».

Введение

Светодиоды на основе нитридов третьей группы, таких как InGaN/GaN и AlGaIn/GaN – гетероструктуры, работающие в синем и ультрафиолетовом (УФ) спектральных диапазонах соответственно, находят обширное применение в различных областях человеческой деятельности. Наиболее впечатляющие успехи достигнуты в индустрии синих InGaN/GaN светодиодов, а ученые I. Akasaki, H. Amano и S. Nakamura, заложившие научные основы этого направления, отмечены Нобелевской премией по физике за 2014 год. Однако очевидно, что далеко не все фундаментальные проблемы, препятствующие наиболее полной реализации потенциальных возможностей светодиодов на этих материалах, решены на сегодняшний день [1]. Многолетняя практика позволила на отдельных фирмах повысить срок службы синих InGaN/GaN светодиодов до 50000 часов, но катастрофические отказы по-прежнему повышают стоимость готового изделия (светодиодных ламп) и препятствуют полному переходу на энергосберегающее твердотельное освещение. Срок службы лучших УФ AlGaIn/GaN светодиодов не превышает 2000 часов, что препятствует их применению в медицине для дезинфекции и стерилизации, для биотехнологий, в спектроскопии, в банковском деле для выявления фальшивых купюр, для полной замены ртутных ламп на экологически чистые твердотельные источники [2]. Особенностью деградации внешней квантовой эффективности (ВКЭ) синих светодиодов, установленной многими исследователями, является тот факт, что увеличение плотности тока больше 10 A/cm^2 при проведении экспериментов по старению, а также повышение температуры окружающей среды увеличивают скорость деградации оптической мощности [1]. Основным процессом, ответственным за катастрофическую деградацию светодиодов, некоторые авторы считали [3] электромиграцию ионов металла из контактов по протяженным дефектам в активную область. Однако такой вывод противоречит результатам исследований температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (ВАХ) до и после деградации [4], что генерируемые при деградации дефекты, характеризуются теми же уровнями, что и до деградации. Эти авторы отметили нестабильное и частично обратимое поведение тока и оптической мощности перед катастрофической деградацией. Следует отметить, что эти особенности наблюдаются и на современных высокоэффективных синих и УФ светодиодах. Авторы ряда работ связывали деградацию оптической мощности InGaN/GaN светодиодов в первую очередь с изменением сопротивления p -области, индуцированным процессами интердиффузии и межфазных химических реакций [5], механическими напряжениями [6]. Важная роль во многих работах отводится трансформации водородосодержащих комплексов под действием длительного протекания инжекционного тока [1, 6]. В [7] предложена модель дополнительной активации магния в результате разрыва связи магний-водород в p -области горячими носителями, инжектированными в квантовую яму и дрейфующими в p -область в поле компенсированного слоя, между активной и p -областями. Этот процесс, происходящий на первой стадии старения при временах 100–800 ч, сопровождается ростом заряженных акцепторных центров в p -области, а при больших временах старения из-за дефектообразования вакансий азота в результате разрыва связей галлий-азот в активной области горячими носителями начинается уменьшение значений ВКЭ. Эта модель до сих пор пользуется популярностью. Однако она не объясняет немонотонного, волнообразного течения процесса деградации ВКЭ светодиодов на разных временных стадиях старения. Снижение ВКЭ в УФ светодиодах объяснено активацией прорастающих дислокаций вакансиями азота, усилением проводимости этих дислокаций и потерей части носителей [2], или миграцией алюминия [8]. Общим мнением можно считать, что деградация оптической мощности светодиодов развивается в результате генерации точечных дефектов в активной области под действием инжекционного тока, усиливающей безызлучательную рекомбинацию [1, 9]. Однако усиление генерации точечных дефектов

должно было бы приводить на финальной стадии, также как в светодиодах на основе традиционных AlGaIn материалов, к скоплению, переползанию и мультипликации дислокаций с образованием дислокационной сетки в активной области светодиодов. Эти процессы не наблюдаются в светодиодах на основе нитридов третьей группы [10]. Более того, наблюдается влияние токов утечки, шунтирующих *p-n*-переход, на распределение электролюминесценции по площади светодиода [6] и появление локальных областей перегрева на финальной стадии деградации [11, 12], а также миграция галлия и индия вдоль дислокаций [11] с выделением металлической фазы на поверхности [12]. В связи с этим был сделан вывод о диффузии точечных дефектов и примесей вдоль прорастающих дислокаций в активной области светодиодной структуры [10]. В недавнем обзоре [1] отмечалось, что единого общепринятого механизма (или сочетания нескольких механизмов), способного описать наблюдаемые особенности развития деградации ВКЭ светодиодов при старении и катастрофический выход из строя светодиодов, на сегодняшний день не предложено. Более того, не выяснено, в каких областях преимущественно развивается дефектообразование под действием инжекционного тока, какова роль флуктуаций состава твердого раствора в этом процессе, есть ли общие механизмы, ответственные за деградацию ВКЭ в синих и УФ светодиодах, в чем причина такой сильной разницы в сроках службы этих двух типов светодиодов.

Целью работы является выяснение общих и отличающихся механизмов, приводящих при старении этих двух типов светодиодов к деградации ВКЭ, а также причин низкого срока службы УФ AlGaIn/GaN светодиодов.

Образцы и экспериментальные методики

УФ светодиоды на основе AlGaIn/GaN структур были выращены на сапфировых подложках диаметром 50,8 мм методом хлоридно-гидридной газофазной эпитаксии в реакторе горизонтального типа. Особенности эпитаксиального роста и дизайн структур были описаны ранее [13]. После выращивания структур методами стандартной фотолитографии формировались омические контакты, травилась мезодиода заданной геометрии, проводилась резка структур на чипы и сборка светодиодов. Собранные светодиоды с размерами светоизлучающей площади 850 мкм×850 мкм имели максимум электролюминесценции на длине волны 350–360 нм и ВКЭ 1,5% при токе 20 мА. В качестве второго типа светодиодов были использованы коммерческие InGaIn/GaN светодиоды с размерами светоизлучающей площади 950 мкм×950 мкм. Они имели максимум электролюминесценции на длине волны 450–460 нм и ВКЭ 40–45% при токе 20 мА. Эксперименты по старению синих светодиодов проводились при плотности тока 35 А/см² при температуре 100 °С. Условия исследования деградации УФ светодиодов были более мягкими (30 А/см² и 45 °С) по сравнению с таковыми для синих светодиодов, но все же более жесткими по сравнению с режимами, обычно используемыми для такого типа светодиодов (3–4 А/см² и комнатная температура).

Большая часть исследований проводилась после финальной стадии деградации, когда величина ВКЭ светодиодов уменьшалась на 30% относительно значений до старения. На этой стадии исследовалось изменение ВАХ зависимостей ВКЭ и дифференциального сопротивления светодиодов от плотности тока по сравнению с этими же характеристиками и зависимостями до старения. Кроме того, применялись методы исследования низкочастотного шума, которые, как известно, позволяют получить интегральную информацию не только о точечных дефектах, но и о флуктуациях зарядов и высоты барьеров, о степени однородности протекания тока, о присутствии областей локального перегрева [14]. Анализ низкочастотного шума проводился в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц. Спектральная плотность шума измерялась при плотностях тока 10⁻⁴–50 А/см² для всех светодиодов. Следует отметить, что наиболее полные результаты получены на InGaIn/GaN светодиодах.

Результаты и обсуждение

Вид ВАХ синих и УФ светодиодов (прямые и обратные ветви приведены в одном квадранте, значения тока *I* и напряжения *U* в вольтах приведены по абсолютной величине) при напряжении менее 2 В (рис. 1) свидетельствует, согласно [15], о шунтировании *p-n*-перехода. Причем для того и другого типа светодиодов на финальной стадии наблюдается рост проводимости шунтов на порядки, относительно значений до старения.

При этом коммерческие светодиоды от разных производителей могут отличаться по величине проводимости шунтов более чем на порядок до старения. Ранее было показано, что проводимость шунтов или ток утечки, измеренный при напряжении менее 2 В, отражает интегрально свойства системы протяженных дефектов InGaIn/GaN светодиодов [16]. При этом, чем меньше величина токов утечки, тем меньше разупорядоченность наноматериала и менее развита система протяженных дефектов. Причем не обнаружено явной зависимости между проводимостью шунтов и общей плотностью дислокаций. Этот вывод находит подтверждение в работах других авторов. Выяснено, что только часть протяженных дефектов являются проводящими. Это *V*-дефекты (ограниченные поры, формирующиеся на дислокациях или скоплениях примесей, каплях металлической фазы), дефекты упаковки, прорастающие дислокации с ядром, содержащим металлические связи [17]. При этом, как показали исследования зависимостей спек-

тральной плотности низкочастотного шума от плотности тока InGaN/GaN светодиодов, свойства шунтов изменяются нелинейно с ростом плотности тока [18]. В области плотностей тока больше 5 A/cm^2 наблюдается рост уровня низкочастотного шума, и характер роста указывает на ухудшение свойств шунтов [18]. Если бы проводимость шунтов была омической, то наблюдаемый рост проводимости этих шунтов при напряжении менее 2 В после старения не должен был проявляться при больших плотностях тока, в силу малости их величины по сравнению с рабочими токами. Однако сравнение зависимостей ВКЭ от плотности тока светодиодов до и после старения выявляет рост проводимости шунтов при больших плотностях тока, что проявляется в сдвиге максимума этих зависимостей после старения (рис. 2) в сторону больших плотностей тока.

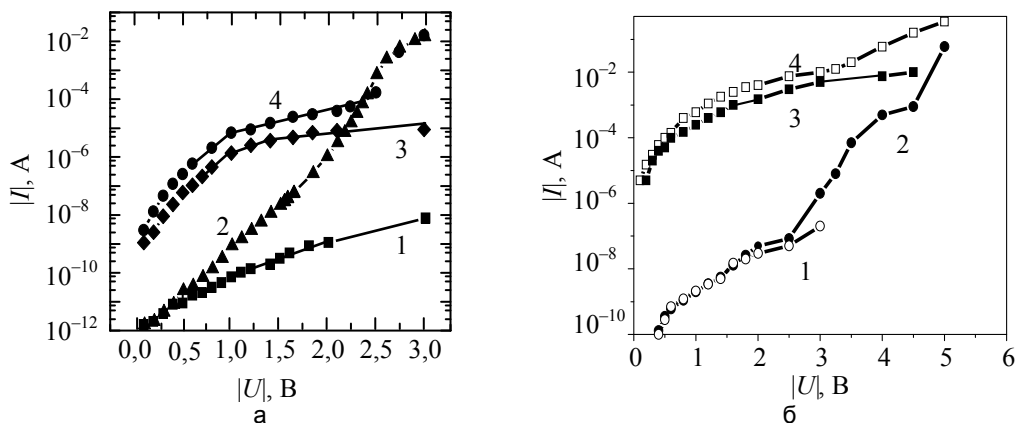


Рис. 1. Экспериментальные ВАХ светодиодов: InGaN/GaN (а) и AlGaIn/GaN (б) до (кривые 1, 2) и после (кривые 3, 4) деградации. Обратные ветви ВАХ (кривые 1, 3), прямые ветви – (кривые 2, 4)

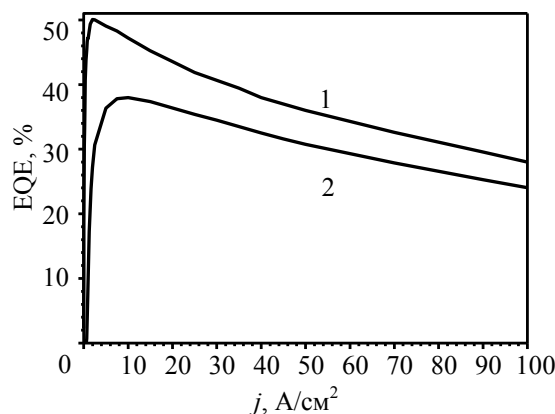


Рис. 2. Экспериментальные зависимости ВКЭ (EQE) от плотности тока j InGaN/GaN светодиодов до (кривая 1) и после (кривая 2) финальной стадии старения

Наблюдаемый эффект свидетельствует об изменении проводимости шунтов под действием инжекционного тока. Этот эффект наиболее ярко проявляется на коммерческих InGaN/GaN светодиодах. Рост проводимости шунтов приводит к уходу носителей и к уменьшению максимума ВКЭ, что наблюдается для обоих типов исследуемых светодиодов. Аналогичные результаты для AlGaIn/GaN светодиодов приведены в [2]. Увеличение проводимости шунтов после финальной стадии старения усиливает неоднородное протекание тока, что выявляется по отклонению зависимостей плотности флуктуации напряжений S_V от плотности тока j (рис. 3) для тех и других светодиодов от зависимости $S_V \sim j^{-1}$, типичной для $p-n$ -структур с однородным распределением тока [8]. Причем неоднородность протекания тока как до, так и после старения наиболее ярко выражена для AlGaIn/GaN светодиодов (рис. 3, а).

Усиление неоднородности протекания тока приводит к перегреву локальных областей, которые выявляются методами инфракрасной микроскопии. Пример выявления таких областей в InGaN/GaN светодиодах приведен на рис. 4. Оценка плотности тока, протекающего через шунты, дает величину, близкую к 1000 A/cm^2 . Как известно, высокая плотность тока является одним из условий возникновения многофоновой рекомбинации носителей на глубоком возбужденном центре [19]. В качестве таких возбужденных центров в исследованных светодиодах могут выступать слабо связанные атомы индия и галлия, присутствующие в таких протяженных дефектах, как V -дефекты, дефекты упаковки, часть винтовых дислокаций с ядром, обогащенным атомами Ga или In.

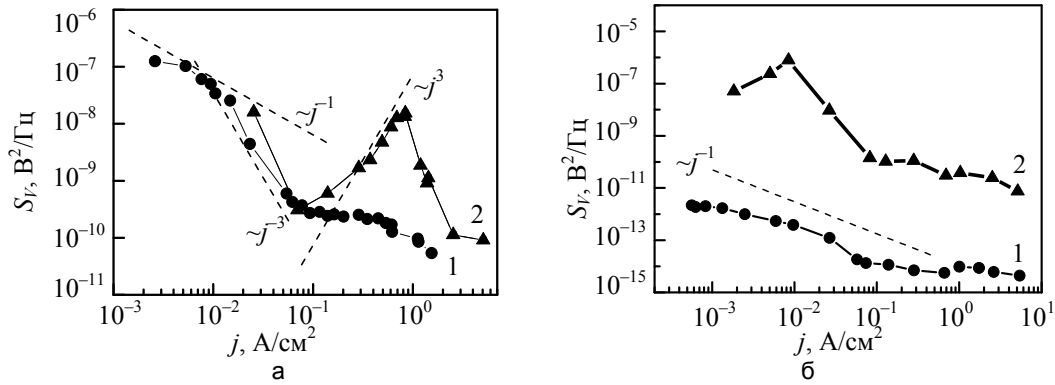


Рис. 3. Экспериментальные зависимости плотности флуктуации напряжений S_V от плотности тока j для светодиодов: AlGaIn/GaN (а) и InGaIn/GaN (б), до (кривые 1) и после (кривые 2) финальной стадии старения. Пунктирные линии представляют аппроксимацию экспериментальных данных степенными зависимостями $S_V \sim j^{-n}$ ($n = 1, 3, -3$), выявляющими различные механизмы протекания тока. Расчетная зависимость $S_V \sim j^{-1}$ – характерная для однородного распределения тока по площади светодиода

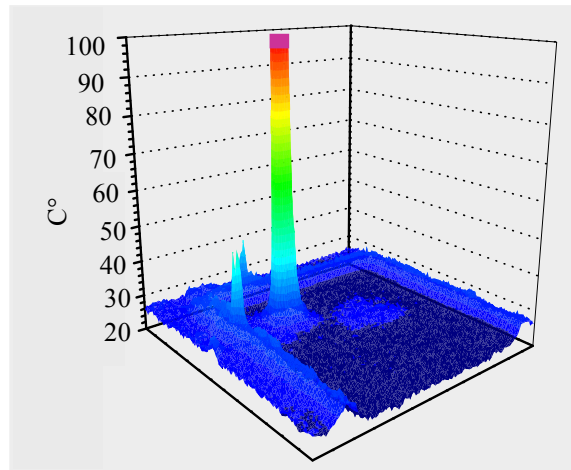


Рис. 4. Области локального перегрева в синих InGaIn/GaN светодиодах, выявленные методом инфракрасной микроскопии. Размер светоизлучающей площади 980×980 мкм

Захват дырок на такие центры, согласно [19], сопровождается локальным разогревом и смещением центра. Этот процесс вызывает образование дефектов по Френкелю и их миграцию. Подтверждением возможности развития этого процесса являются экспериментальные данные, полученные как в этой работе, так и другими исследователями на InGaIn/GaN светодиодах, по выявлению миграции индия вдоль прорастающих дислокаций методами просвечивающей микроскопии [11] и по выделению индия и галлия в локальных областях на поверхности светодиодов [12] после финальной стадии старения.

Таким образом, процесс дефектообразования под действием инжекционного тока, изменяющий свойства шунтов, развивается локально в некоторых типах протяженных дефектов. Общность в изменении проводимости шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов двух типов светодиодов после финальной стадии деградации, позволяет предполагать аналогичный механизм дефектообразования и в AlGaIn/GaN светодиодах. Кроме этого канала дефектообразования, в InGaIn/GaN светодиодах был выявлен еще один канал. Присутствие этого канала было обнаружено впервые на светодиодах с катастрофическим выходом из строя (т.е. полным отсутствием излучения) при временах старения на порядки ниже типичных для финальной стадии [20]. Выяснено, что для таких светодиодов типичными являются искаженные прямые ветви ВАХ, примеры таких ветвей светодиодов из одной партии (кривые 2–5), но с близкой обратной ветвью (кривая 1) приведены на рис. 5. Причем искаженные ветви наблюдаются на небольшой части светодиодов до старения или появляются после коротких времен старения 100–500 ч. Согласно [15], вид искаженной ветви ВАХ свидетельствует о присутствии локальных областей с пониженной высотой потенциальных барьеров из-за обогащения твердого раствора атомами индия. Причем площадь этих областей на 4–5 порядков меньше всей излучающей площади светодиода.

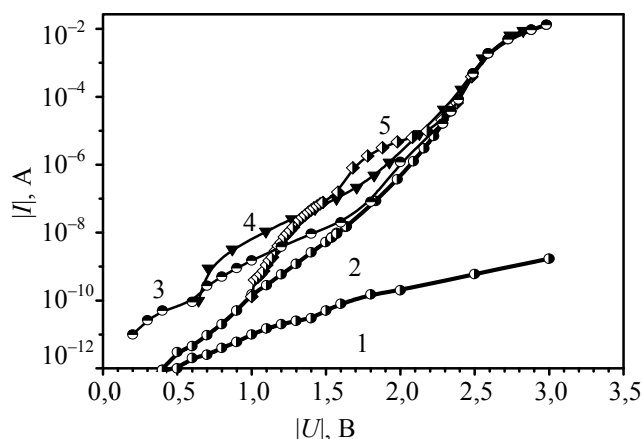


Рис. 5. Экспериментальные ветви ВАХ светодиодов: кривая 1 – обратная, одинаковая для всех светодиодов; прямые ветви – кривые 2–5. Для светодиодов с большим сроком службы прямые ветви близки к кривой 2. Примеры искаженных прямых ВАХ светодиодов с катастрофическим выходом из строя – кривые 2–5

Исследование зависимостей спектральной плотности низкочастотного токового шума (S_I) светодиодов от плотности тока j показало, что в светодиодах с локальными пониженными барьерами (с искаженной прямой ветвью ВАХ) появляется участок сильной зависимости $S_I \sim j^4$ при малых токах 0,1–1 мА, что указывает на возникновение областей локального перегрева [20]. Однако площадь областей с пониженными барьерами на порядки меньше всей площади светодиода, а это означает, что плотности тока в этих областях близки к 1000 А/см^2 . Следовательно, в этих областях возможно развитие многофоновой рекомбинации носителей со всеми сопутствующими явлениями, такими как миграция атомов индия и галлия между локальными областями твердого раствора и перераспределение состава твердого раствора в них. Наиболее эффективно этот процесс может происходить в локальных областях с нерегулярным составом твердого раствора и приводить к небольшим изменениям значений ВКЭ как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Такое поведение хорошо согласуется с немонотонным изменением значений ВКЭ при старении светодиодов, а также с изменениями длинноволновой полосы с максимумом при 600 нм в спектрах электролюминесценции таких светодиодов [20].

На разных временных стадиях старения наблюдается чередование дефектообразования в системе протяженных дефектов и в локальных областях твердого раствора с пониженными барьерами (механизм один, области разные), и только в финальной стадии дефектообразования оба канала, как правило, участвуют одновременно, что видно по изменению прямой и обратной ветвей ВАХ при напряжениях менее 2 В. Типичным также является изменение только прямой ветви на ранних стадиях старения для светодиодов с катастрофическими отказами. В AlGaIn/GaN светодиодах искажение ВАХ является характерным для всех светодиодов до старения (рис. 1, кривая 2), что позволяет предполагать участие этого канала в дефектообразовании на всех стадиях старения. Однако более высокая проводимость шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов, чем в InGaIn/GaN светодиодах, осложняет разделение вклада этих двух каналов дефектообразования и изучение процессов, происходящих в локальных областях твердого раствора.

Заключение

Полученные результаты по изучению деградации внешней квантовой эффективности в двух типах светодиодов на основе нитридов третьей группы при их старении позволили предположить развитие многофоновой рекомбинации носителей в части протяженных дефектов, обогащенных металлической фазой, и в локальных областях нерегулярного состава твердого раствора. Этот механизм приводит к локальному дефектообразованию собственных дефектов и позволяет объяснить единообразие дефектов, появляющихся на разных временных стадиях старения. Для этого механизма характерно волнообразное развитие дефектообразования во времени из-за возможности частичного залечивания ранее существовавших дефектов мигрирующими атомами Ga или In. Волнообразное развитие дефектообразования изменяет свойства шунтов и число инжектированных носителей, участвующих в излучательной рекомбинации, и, как следствие, величину внешней квантовой эффективности. Кроме общности этого механизма для синих InGaIn/GaN и ультрафиолетовых AlGaIn/GaN светодиодов, выяснено, что проводимость шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов, на несколько порядков выше на ультрафиолетовых AlGaIn/GaN светодиодах до старения, что и может являться одной из причин низких сроков службы этих светодиодов. Более сильные искажения прямых ветвей вольтамперной характеристики ультрафиолетовых AlGaIn/GaN светодиодов, чем синих InGaIn/GaN, позволяют предполагать большую вероятность катастрофических отказов и требуют более детального изучения свойств AlGaIn твердых растворов.

Литература

1. Meneghesso G., Meneghini M., Zanoni E. Recent results on the degradation of white LEDs for lighting // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010. V. 43. N. 35. Art. 354007. doi: 10.1088/0022-3727/43/35/354007
2. Pinos A., Marcinkevicius S., Shur M.S. High current-induced degradation of AlGaIn ultraviolet light emitting diodes // *Journal of Applied Physics*. 2011. V. 109. N 10. Art. 103108. doi: 10.1063/1.3590149
3. Meneghini M., Trevisanello L., Sanna C., Mura G., Vanzi M., Meneghesso G., Zanoni E. High temperature electro-optical degradation of InGaIn/GaN HBLEDs // *Microelectronics Reliability*. 2007. V. 47. N 9–11. P. 1625–1629. doi: 10.1016/j.microrel.2007.07.081
4. Бочкарева Н.И., Ефремов А.А., Ребане Ю.Т., Горбунов Р.И., Клочков А.В., Шретер Ю.Г. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградации голубых светодиодов // *Физика и техника полупроводников*. 2006. Т. 40. № 1. С. 122–127.
5. Hibbard D.L., Jung S.P., Wang C., Ullery D., Zhao Y.S., Lee H.P., So W., Liu H. Low resistance high reflectance contacts to p-GaN using oxidized Ni/Au and Al or Ag // *Applied Physics Letters*. 2003. V. 83. N 2. P. 311–313. doi: 10.1063/1.1591233
6. Fischer P., Christen J., Zacharias M., Schwegler V., Kirchner C., Kamp M. Spatially resolved imaging of the spectral emission characteristic of an InGaIn/GaN-multi quantum well-light-emitting diode by scanning electroluminescence microscopy // *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*. 2000. V. 39. N 4 B. P. 2414–2416.
7. Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Изменение люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN при длительной работе // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33. № 2. С. 224–232.
8. Sawyer S., Romyantsev S.L., Shur M.S., Pala N., Bilenko Yu., Zhang J.P., Hu X., Lunev A., Deng J., Gaska R. Current and optical noise of GaIn/AlGaIn light emitting diodes // *Journal of Applied Physics*. 2006. V. 100. N 3. Art. 034504. doi: 10.1063/1.2204355
9. Cao X.A., Sandvik P.M., LeBoeuf S.F., Arthur S.D. Defect generation in InGaIn/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses // *Microelectronics Reliability*. 2003. V. 43. N 12. P. 1987–1991. doi: 10.1016/j.microrel.2003.06.001
10. Takeya M., Mizuno T., Sasaki T., Ikeda S., Fujimoto T., Ohfuji Y., Oikawa K., Yabuki Y., Uchida S., Ikeda M. Degradation in AlGaInN lasers // *Physica Status Solidi C: Conferences*. 2003. N 7. P. 2292–2295. doi: 10.1002/pssc.200303324
11. Leung K.K., Fong W.K., Chan P.K.L., Surya C. Physical mechanisms for hot-electron degradations in GaIn light-emitting diodes // *Journal of Applied Physics*. 2010. V. 107. N 7. Art. 073103. doi: 10.1063/1.3357312
12. Kamanin A.V., Kolmakov A.G., Kop'ev P.S., Onushkin G.A., Sakharov A.V., Shmidt N.M., Sizov D.S., Sitnikova A.A., Zakgeim A.L., Zolotareva R.V., Usikov A.S. Degradation of blue LEDs related to structural disorder // *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*. 2006. V. 3. P. 2129–2132. doi: 10.1002/pssc.200565162
13. Kurin S., Antipov A., Barash I., Roenkov A., Usikov A., Helava H., Ratnikov V., Shmidt N., Sakharov A., Tarasov S., Menkovich E., Lamkin I., Papchenko B., Makarov Y. Characterization of HVPE-grown UV LED heterostructures // *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*. 2014. V. 11. N 3–4. P. 813–816. doi: 10.1002/pssc.201300459
14. Chernyakov A.E., Levinshtein M.E., Talnishnikh N.A., Shabunina E.I., Shmidt N.M. Low-frequency noise in diagnostics of power blue InGaIn/GaN LEDs // *Journal of Crystal Growth*. 2014. V. 401. P. 302–304.
15. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
16. Averkiev N.S., Chernyakov A.E., Levinshtein M.E., Petrov P.V., Yakimov E.B., Shmidt N.M., Shabunina E.I. Two channels of non-radiative recombination in InGaIn/GaN LEDs // *Physica B: Condensed Matter*. 2009. V. 404. N 23–24. P. 4896–4898. doi: 10.1016/j.physb.2009.08.252
17. Cao X.A., Teetsov J.M., D'Evelyn M.P., Merfeld D.W., Yan C.H. Electrical characteristics of InGaIn/GaN light-emitting diodes grown on GaIn and sapphire substrates // *Applied Physics Letters*. 2004. V. 85. N 1. P. 7–9. doi: 10.1063/1.1767280
18. Shabunina E., Averkiev N., Chernyakov A., Levinshtein M., Petrov P., Shmidt N. Extended defect system as a main source of non-radiative recombination in InGaIn/GaN LEDs // *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*. 2013. V. 10. P. 335–337. doi: 10.1002/pssc.201200656
19. Yassievich I.N. Recombination-induced defect heating and related phenomena // *Semiconductor Science and Technology*. 1994. V. 9. N 8. P. 1433–1453.
20. Chernyakov A.E., Levinshtein M.E., Petrov P.V., Shmidt N.M., Shabunina E.I., Zakgeim A.L. Failure mechanisms in blue InGaIn/GaN LEDs for high power operation // *Microelectronics Reliability*. 2012. V. 52. N 9–10. P. 2180–2183. doi: 10.1016/j.microrel.2012.06.051

- Шмидт Наталия Михайловна** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru
- Усиков Александр Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, технический директор, Нитридные кристаллы Inc-DP, Дир Парк, NY 11729, США; соруководитель лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alexander.usikov@nitride-crystals.com
- Шабунина Евгения Игоревна** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Jenni-85@mail.ru
- Черняков Антон Евгеньевич** – научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, chernyakov.anton@yandex.ru
- Курин Сергей Юрьевич** – ведущий специалист, ООО «Группа компаний «Нитридные кристаллы», Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация, sergey.kurin@nitride-crystals.com
- Макаров Юрий Николаевич** – кандидат физико-математических наук, президент, Нитридные кристаллы Inc-DP, Дип Парк, NY 11729, США; генеральный директор, ООО «Группа компаний «Нитридные кристаллы», Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация, yuri.makarov@nitride-crystals.com
- Хелава Хейкки Илмари** – PhD, вице-президент, Нитридные кристаллы Inc-DP, Дип Парк, 11729, NY, США, heikki.helava@nitride-crystals.com
- Панченко Борис Петрович** – начальник научно-технического отдела, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, b.p.papchenko@gmail.com
- Natalia M. Shmidt** – D.Sc., senior scientific researcher, Head researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru
- Alexander S. Usikov** – PhD, Chief technical officer, Nitride Crystals Inc-DP, Deer Park, NY 11729, USA; Co-director of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alexander.usikov@nitride-crystals.com
- Evgeniya I. Shabunina** – PhD, scientific researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Jenni-85@mail.ru
- Anton E. Chernyakov** – scientific researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, chernyakov.anton@yandex.ru
- Sergei Yu. Kurin** – Principal specialist, Nitride Crystals Group Ltd., Saint Petersburg, 194156, Russian Federation, sergey.kurin@nitride-crystals.com
- Yuri N. Makarov** – PhD, President, Nitride Crystals Inc-DP, Deer Park, NY 11729, USA; Director General, Nitride Crystals Group Ltd, Saint Petersburg, 194156, Russian Federation, yuri.makarov@nitride-crystals.com
- Heikki I. Helava** – PhD, Vice-president, Nitride Crystals Inc-DP, Deer Park, NY 11729, USA, heikki.helava@nitride-crystals.com
- Boris P. Papchenko** – Head of Scientific and Technical Department, ITMO University, , Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, b.p.papchenko@gmail.com

УДК 535.399

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ ПРИ ВВОДЕ ИОНОВ МЕДИ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА

И.А. Дёмичев^а, А.И. Сидоров^а, Н.В. Никоноров^а, Т.А. Шахвердов^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: demichevia@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 06.10.14, принята к печати 17.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-54-59

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Дёмичев И.А., Сидоров А.И., Никоноров Н.В., Шахвердов Т.А. Формирование люминесцентных оптических волноводов в силикатном стекле при вводе ионов меди методом ионного обмена // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 54–59

Аннотация. Представлены спектры поглощения и люминесценции щелочно-силикатных стекол с ионами меди, введенными в приповерхностные слои стекла методом ионного обмена, для разных режимов ионного обмена. Показано, что при вводе в стекло ионов меди из расплава соли двухвалентной меди при температурах 550–600 °С восстановительные процессы в приповерхностном слое стекла приводят к переходу части двухвалентной меди в одновалентное и нейтральное состояние, и непосредственно в ионообменном процессе участвуют ионы Cu^+ и Na^+ . Появление в приповерхностном слое стекла нейтральных атомов меди способствует формированию субнаноразмерных молекулярных кластеров меди Cu_n . Показано, что волноводный слой, возникший в приповерхностном слое стекла в результате ионного обмена, обладает люминесценцией в видимой области спектра при возбуждении люминесценции ультрафиолетовым излучением. При этом вклад в люминесценцию вносят ионы Cu^+ , молекулярные кластеры Cu_n и димеры Cu^+-Cu^+ . В процессе высокотемпературного ионного обмена (600 °С) наблюдается смещение равновесия процессов формирования и разрушения молекулярных кластеров меди Cu_n . Так, при длительности 1 ч имеет место разрушение, а при длительности около 18 ч, а также менее 30 мин – формирование. Ионный обмен длительностью 18,5 ч приводит к образованию в матрице значительного количества ионов двухвалентной меди Cu^{2+} .

Ключевые слова: ионный обмен, медь, щелочно-силикатное стекло, люминесценция, люминесцентный волновод.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14-23-00136).

FORMATION OF LUMINESCENT OPTICAL WAVEGUIDES IN SILICATE GLASS MATRIX BY THE ION-EXCHANGE TECHNIQUE

I.A. Demichev^а, A.I. Sidorov^а, N.V. Nikonorov^а, T.A. Shahverdov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: demichevia@yandex.ru

Article info

Received 06.10.14, accepted 17.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-54-59

Article in Russian

Reference for citation: Demichev I.A., Sidorov A.I., Nikonorov N.V., Shahverdov T.A. Formation of luminescent optical waveguides in silicate glass matrix by the ion-exchange technique. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 54–59 (in Russian)

Abstract. We present spectra of the alkali-silicate glasses with copper ions in near-surface area, introduced by ion exchange of different temperature and duration. It is shown that the reduction of Cu^{2+} in the near-surface area causes existence of Cu^+ and neutral atoms in glass after the ion-exchange in divalent salt. The ion-exchange itself involves only Cu^+ and Na^+ ions. The formation of subnanometer clusters Cu_n is due to neutral copper atoms staying in near-surface zone. We have shown that the waveguide layer in near-surface area, made by ion-exchange, has a visible luminescence with the excitation by UV-radiation. At the same time, the contribution to luminescence is made by Cu^+ ions, molecular clusters Cu_n and by dimers Cu^+-Cu^+ . During the high-temperature ion-exchange at 600 °C the formation and destruction equilibrium shift of molecular clusters Cu_n can be seen. An hour ion-exchange leads to molecular clusters Cu_n destruction, while at time periods less than 30 min and around 18 hours it leads to the formation of Cu_n . The sample turns green after 18,5 hours ion-exchange showing formation of a considerable amount of divalent copper ions Cu^{2+} therein.

Keywords: ion-exchange, copper, alkali-silicate glass, luminescence, luminescent waveguide.

Acknowledgements. This work was financially supported by the Russian Scientific Foundation (Agreement #14-23-00136).

Введение

Люминесцентные оптические волноводы и волокна представляют практический интерес при разработке волоконных датчиков, например, для датчиков температуры, искрения, ультрафиолетового (УФ) излучения [1–3], а также при разработке волноводных концентраторов солнечного излучения для солнечных элементов [4]. Так, в работах [1, 2, 5] описаны люминесцентные стекла и стеклянные волокна, содержащие атомы и нейтральные молекулярные кластеры (МК) серебра, перспективные для создания чувствительных элементов волоконных датчиков. При этом серебро может вводиться в стекло как непосредственно при синтезе стекла, так и методом ионного обмена (ИО) [6]. В стеклах, содержащих нейтральные МК серебра и ионы редкоземельных металлов, может быть получена высокая температурная чувствительность интенсивности люминесценции [7]. В работах [3, 8] описаны люминесцентные волокна из стекол с квантовыми точками халькогенидов кадмия, которые могут быть использованы в волоконных датчиках искрения и дозиметрах УФ излучения. В работе [9] показано, что использование люминесцентных волокон в качестве чувствительных элементов в датчиках искрения позволяет существенно увеличить чувствительность такого датчика. В работе [10] представлены спектральные характеристики люминесцентных стекол для спектрального преобразования солнечного УФ излучения в видимую область спектра.

Достоинством люминесцентных стекол с ионами одновалентной меди Cu^+ является то, что в них может быть получен высокий квантовый выход люминесценции. Так, согласно [11], квантовый выход люминесценции ионов Cu^+ в стекле при комнатной температуре может достигать 78%. Кроме того, благодаря высокой поляризуемости ионов Cu^+ увеличивается модуляция показателя преломления стекла при вводе ионов меди методом ИО, что увеличивает эффективность каналирования волноводных мод в волноводном слое. По этой причине исследование особенностей формирования люминесцентного волновода при вводе ионов меди методом ИО представляет не только научный, но и практический интерес.

Целью настоящей работы было исследование влияния условий ИО на поглощение и люминесценцию ионов меди в силикатных стеклах.

Методика экспериментов

В качестве исходных образцов использовалось оптическое стекло К8 следующей системы: $\text{SiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-BaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O}$. Стекло К8 содержит малую добавку оксида As_2O_3 , который проявляет восстановительные свойства при температуре выше 500 °С.

Образцы представляли собой полированные стеклянные пластины толщиной 0,5–1,5 мм. Перед проведением ИО проводилась ультразвуковая очистка образцов в органических растворителях, в водном растворе КОН и промывка в дистиллированной воде. ИО проводился в керамическом тигле, в воздушной атмосфере, в расплаве смеси CuSO_4 (46 мол.%) + Na_2SO_4 (54 мол.%) вблизи температурной точки эвтектики расплава солей. При проведении ИО часть ионов Na выходит из стекла, и их место занимают ионы Cu. Для изготовления волноводных слоев были использованы различные температуры ИО: 550, 560, 585 и 600 °С. Длительность ИО варьировалась от 2 мин до 21 ч. Толщина волноводного слоя после ИО, которая определялась методом послойного удаления приповерхностных слоев стекла механической полировкой и измерения показателя преломления стекла, составила около 10 мкм для ИО при температуре 550 °С в течение 18,5 час.

Для измерения спектров поглощения использовался спектрофотометр Lambda 650 (Perkin Elmer). Измерение спектров поглощения проводилось перпендикулярно поверхности планарного волновода, образованного ионами меди. Для измерения спектров люминесценции и возбуждения люминесценции использовался спектрофлуориметр LS-55 (Perkin Elmer). Измерения спектров люминесценции и поглощения осуществлялись при комнатной температуре. Полученные спектры люминесценции корректировались с учетом спектральной чувствительности фотоприемников спектрофлуориметра.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны спектры оптической плотности образцов после ИО. Из рисунка видно, что у образцов после ИО появляются полосы поглощения в спектральной области 300–500 нм и широкая полоса поглощения вблизи 800 нм. Полоса поглощения ионов Cu^+ лежит в спектральном интервале 250–360 нм [12] и перекрывается с фундаментальной полосой поглощения матрицы стекла. Полосы поглощения в спектральном интервале 300–500 нм могут быть связаны с образованием при ИО в стекле нейтральных субнаноразмерных МК меди. Так, в ряде работ показано, что нейтральные МК Cu_n ($n \leq 8\text{--}14$) в жидких средах имеют характерные полосы поглощения 212, 231, 285, 290, 364 и 443 нм [13–15]. Образование нейтральных МК меди в калиево-алюмообратном стекле было отмечено в работе [16]. Необходимо отметить, что образование МК меди, как нейтральных, так и заряженных, возможно лишь в случае присутствия в стекле некоторого количества нейтральных атомов меди, так как ионы меди не могут формировать МК из-за кулоновского отталкивания. Исключением является димер $\text{Cu}^+\text{-Cu}^+$ [17].

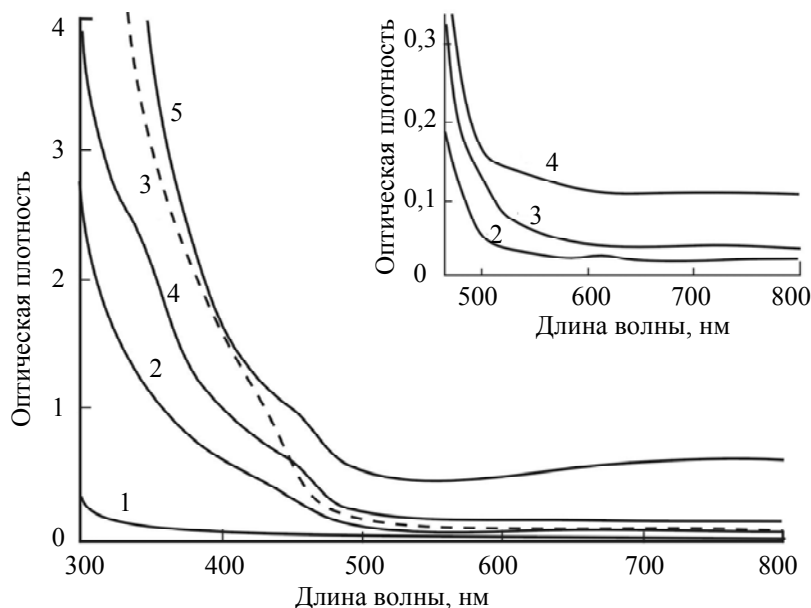


Рис. 1. Спектры оптической плотности образцов до ИО (1) и после ИО (2–5): 2 – $t = 550^\circ\text{C}$ в течение 1 ч; 3 – 585°C , 1 ч; 4 – 600°C , 1 ч; 5 – 600°C , 18,5 ч. На вставке – спектры оптической плотности для кривых 2, 3 и 4 в увеличенном масштабе

Поглощение в области 800 нм указывает на присутствие в стекле ионов двухвалентной меди Cu^{2+} [18]. Из рис. 1 видно, что полоса поглощения Cu^{2+} структурирована. Максимум может иметь сдвиг более чем на 80 нм, крайние полосы обнаружены на длинах волн 635 и 840 нм. При ИО длительностью 18 ч при $t = 600^\circ\text{C}$ наблюдается значительный рост содержания двухвалентной меди в образце. Это связано с термической диффузией ионов кислорода и серы в приповерхностные слои стекла, что сопровождается окислением ионов одновалентной меди. Образец при этом приобретает зеленую окраску, а прирост интенсивности полосы поглощения Cu^{2+} в таком образце по сравнению с ИО длительностью 5–60 мин достигает двух порядков. ИО при температуре 600°C в течение 1 ч приводит к уменьшению поглощения в спектральном интервале 300–450 нм (кривая 4 на рис. 1) по сравнению с ИО при температуре 585°C (кривая 3 на рис. 1). Причиной этого может быть термическое разрушение МК меди. В то же время ИО при температуре 600°C в течение 18,5 ч сопровождается ростом поглощения в указанном спектральном интервале (кривая 5 на рис. 1). Данный эффект может быть связан с тем, что увеличение продолжительности ИО приводит к увеличению концентрации меди в приповерхностном слое стекла. Однако соотношение концентраций $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ значительно падает. Происходит смещение равновесия в сторону образования ионов Cu^{2+} .

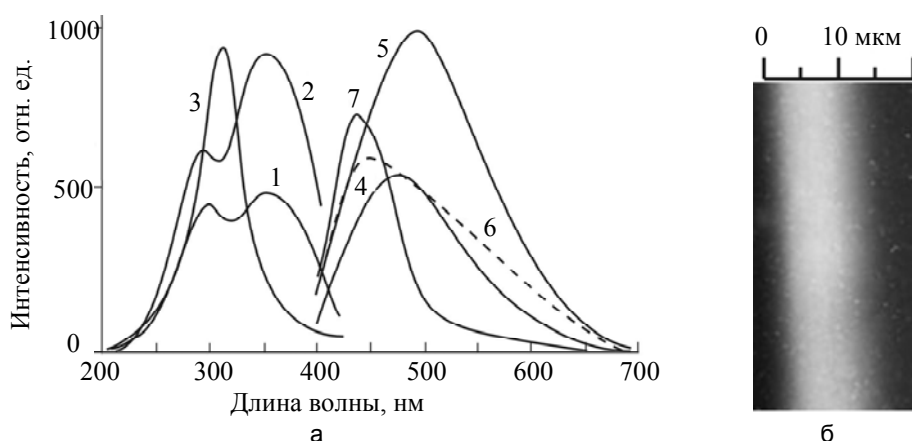


Рис. 2. Спектры возбуждения люминесценции (1–3) и люминесценции (4–7) образца после ИО при температуре 550°C в течение 1 ч. Длина волны люминесценции: 1 – 450 нм; 2 – 500 нм; 3 – 540 нм. Длина волны возбуждения: 4 – 280 нм; 5 – 300 нм; 6 – 330 нм; 7 – 370 нм (а). Фотография торца люминесцентного волновода, образовавшегося после ИО при $t = 585^\circ\text{C}$ длительностью 1 ч. Возбуждение производится ртутной лампой в диапазоне 300–400 нм. Снимок сделан на оптическом микроскопе (б)

В случае добавления меди в шихту стекла формирование окружения ионов меди начинается еще в расплаве стекла при его синтезе [19]. В случае ИО, несмотря на то, что расплав солей содержит ионы Cu^{2+} , ИО происходит преимущественно между одновалентными ионами $\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$, так как подвижность ионов Cu^{2+} в стекле существенно меньше, чем подвижность ионов Cu^+ [20]. Профили концентрации ионов меди, введенной методом ИО, описанные в [21, 22], подтверждают увеличение концентрации одновалентных катионов меди и уменьшение концентрации натрия в поверхностных слоях образцов. Ионы двухвалентной меди образуют тонкий слой на поверхности стекла в результате ИО $\text{Cu}^{2+} \leftrightarrow 2\text{Na}^+$. Толщина такого слоя по данным измеренных нами послонных спектров поглощения не превышает 2 мкм. Появление одновалентных ионов меди в стекле связано с процессом восстановления $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}^+$ в приповерхностном слое стекла. Известно [23], что в приповерхностном трещиноватом слое стекла, возникающем при его механической полировке, может содержаться до 50 монослоев связанных молекул воды, которые могут быть удалены только при длительном прогреве стекла в вакууме при температуре выше 500 °С. Известно также [24–26], что молекулы воды и радикалы ОН могут приводить в стекле к восстановлению ионов металлов, например, ионов серебра. Аналогичные процессы могут приводить и к появлению в стекле нейтральных атомов меди. Указанные выше процессы способствуют образованию в приповерхностном слое стекла ионов одновалентной меди Cu^+ , способной диффундировать в стекле и замещать ионы натрия Na^+ . Однако ограничивающим фактором для ИО $\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ является слой невосстановленной двухвалентной меди вблизи поверхности с положительным зарядом. Методом послонных спектров поглощения обнаружено, что слой образца после ИО, содержащий одновалентную медь, погружен в стекло на глубину 2–5 мкм и может достигать толщины 50–70 мкм. Образующийся в результате такого распределения планарный люминесцентный волновод градиентного типа показан на рис. 2, б. Стекло К8 содержит также ионы калия, однако эти ионы имеют значительно меньшую подвижность, чем ионы натрия, поэтому ИО $\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ в нашем случае можно пренебречь [6, 27].

Эксперименты показали, что после ИО в приповерхностном слое стекла возникает люминесценция в видимой области спектра при возбуждении УФ излучением спектрального интервала 250–400 нм (рис. 2, а). Спектры возбуждения люминесценции структурированы и могут содержать, по крайней мере, три спектральные полосы с максимумами на длинах волн 250, 300 и 360 нм. Спектры люминесценции также структурированы и содержат две полосы – одну с максимумом вблизи 430 нм и вторую, более широкую, с максимумом вблизи 510 нм. В люминесценцию в спектральном интервале 460–550 нм вносят вклад, в основном, ионы Cu^+ [28, 29]. Данным люминесцентным центрам соответствует полоса возбуждения с максимумом на длине волны 300 нм. Коротковолновая полоса люминесценции связана с присутствием в стекле МК меди [14, 30, 31]. Этой полосе люминесценции также соответствует полоса возбуждения с максимумом на длине волны 300 нм. Люминесценция в спектральном интервале 550–600 нм вызвана димерами Cu^+-Cu^+ с соответствующей полосой возбуждения, имеющей максимум на длине волны 360 нм [17]. В образцах после ИО при температурах 585 и 600 °С при возбуждении в области спектра вблизи 250 нм образуется также полоса люминесценции на длине волны 350 нм. Ионы двухвалентной меди Cu^{2+} не имеют полос люминесценции в видимой области спектра. Увеличение продолжительности и температуры ИО приводит к уменьшению интенсивности люминесценции. Это вызвано в первую очередь ростом поглощения, который приводит к потерям как возбуждающего излучения, так и излучения люминесценции. Кроме того, в этом случае увеличивается концентрация в стекле ионов двухвалентной меди и, соответственно, уменьшается концентрация ионов одновалентной меди, которая является основным люминесцентным центром.

Заключение

Представленные результаты показывают, что при вводе в щелочно-силикатное стекло ионов меди из расплава соли двухвалентной меди, восстановительные процессы в приповерхностном слое стекла приводят к переходу части двухвалентной меди в одновалентное и нейтральное состояние. В результате этого непосредственно в ионообменном процессе участвуют ионы Cu^+ и Na^+ . Появление в приповерхностном слое стекла нейтральных атомов меди способствует формированию молекулярных кластеров меди Cu_n . Волноводный слой, возникший в приповерхностном слое стекла в результате ионного обмена, обладает люминесценцией в видимой области спектра, причем вклад в люминесценцию вносят ионы Cu^+ , молекулярные кластеры Cu_n и димеры Cu^+-Cu^+ .

Литература

1. Игнатьев А.И., Сгибнев Е.М., Дёмичев И.А., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Хрущева Т.А., Шахвердов Т.А. Особенности люминесценции силикатных стекол с серебром, введенным методом ионного обмена // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 4. С. 631–637.
2. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // Optical Materials. 2014. V. 36. N 4. P. 753–759. doi: 10.1016/j.optmat.2013.11.018

3. Agafonova D.S., Sidorov A.I., Kolobkova E.V., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Luminescent optical fibers with silver molecular clusters and semiconductor quantum dots for detection of ultraviolet and visible radiation // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2014. V. 9141. Art. 91411T. doi: 10.1117/12.2052259
4. Rowan B.C., Wilson L.R., Richards B.S. Advanced material concepts for luminescent solar concentrators // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2008. V. 14. N 5. P. 1312–1322. doi: 10.1109/JSTQE.2008.920282
5. Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Шахвердов Т.А. Люминесценция молекулярных кластеров серебра в оксифторидных стеклах // *Оптика и спектроскопия*. 2013. Т. 114. № 2. С. 260–264. doi: 10.7868/S0030403413020128
6. Tervonen A., West B.R., Honkanen S. Ion-exchanged glass waveguide technology: a review // *Optical Engineering*. 2011. V. 50. N 7. Art. 071107. doi: 10.1117/1.3559213
7. Агафонова Д.С., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Влияние ионов редкоземельных металлов на температурную зависимость люминесценции молекулярных кластеров серебра в оксифторидных стеклах // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81. № 7. С. 59–66.
8. Агафонова Д.С., Колобкова Е.В., Сидоров А.И. Температурные зависимости интенсивности люминесценции оптических волокон из оксифторидного стекла с квантовыми точками CdS и CdS_xSe_{1-x} // *Письма в журнал технической физики*. 2013. Т. 39. № 14. С. 8–15.
9. Агафонова Д.С., Сидоров А.И. Волоконно-оптический датчик искры и дуги со спектральным преобразованием детектируемого излучения // *Оптический журнал*. 2011. Т. 78. № 11. С. 60–65.
10. Афанасьев В.П., Васильев В.Н., Игнатьев А.И., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А. Новые люминесцентные стекла и стеклокерамики и перспективы их использования в тонкопленочной солнечной энергетике // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80. № 10. С. 69–79.
11. Fujimoto Y., Nakatsuka M. Spectroscopic properties and quantum yield of Cu-doped SiO₂ glass // *Journal of Luminescence*. 1997. V. 75. N 3. P. 213–219.
12. Guo H., Wei R.F., Liu X.Y. Tunable white luminescence and energy transfer in (Cu⁺)₂, Eu³⁺ codoped sodium silicate glasses // *Optics Letters*. 2012. V. 37. N 10. P. 1670–1672. doi: 10.1364/OL.37.001670
13. Wei W., Lu Y., Chen W., Chen S. One-pot synthesis, photoluminescence, and electrocatalytic properties of subnanometer-sized copper clusters // *Journal of the American Chemical Society*. 2011. V. 133. N 7. P. 2060–2063. doi: 10.1021/ja109303z
14. Vilar-Vidal N., Blanco M.C., Lopez-Quintela M.A., Rivas J., Serra C. Electrochemical synthesis of very stable photoluminescent copper clusters // *Journal of Physical Chemistry C*. 2010. V. 114. N 38. P. 15924–15930. doi: 10.1021/jp911380s
15. Vazquez-Vazquez C., Vanobre-Lopez M., Mitra A., Lopez-Quintela M.A., Rivas, J. Synthesis of small atomic copper clusters in microemulsions // *Langmuir*. 2009. V. 25. N 14. P. 8208–8216. doi: 10.1021/la900100w
16. Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А., Шахвердов Т.А. Широкополосная люминесценция меди в калиево-алюмообратных стеклах // *Оптика и спектроскопия*. 2013. Т. 114. № 3. С. 417–421. doi: 10.7868/S0030403413030215
17. Srikumar T., Kityk I.V., Srinivasa Rao C., Gandhi Y., Piasecki M., Bragiel P., Ravi Kumar V., Veeraia N. Photostimulated optical effects and some related features of CuO mixed Li₂O–Nb₂O₅–ZrO₂–SiO₂ glass ceramics // *Ceramics International*. 2011. V. 37. N 7. P. 2763–2779. doi: 10.1016/j.ceramint.2011.04.031
18. Gonella F. Characterization of Cu–Na ion-exchanged glass waveguides // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 69. N 3. P. 314–315.
19. Bogomolova L.D., Gan'shin V.A., Jachkin V.A., Kubrinskaya M.E., Petrova V.Z. EPR and optical study of copper diffusion layers // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1981. V. 45. N 2. P. 249–255. doi: 10.1016/0022-3093(81)90191-5
20. Karlsson S., Jonson B., Reibstein S., Wondraczek L. Surface ruby colouring of float glass by sodium-copper ion exchange // *Glass Technology European Journal of Glass Science and Technology Part A*. 2013. V. 54. N 3. P. 100–107.
21. Gonella F., Quaranta A., Padovani S., Sada C., D'Acapito F., Mauricio C., Battaglin G., Cattaruzza E. Copper diffusion in ion-exchanged soda-lime glass // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2005. V. 81. N 5. P. 1065–1071. doi: 10.1007/s00339-004-2949-7
22. Yoko T., Nishiwaki T., Kamiya K., Sakka S. Copper-alkali ion exchange of alkali aluminosilicate glasses in copper-containing molten salt: II, divalent copper salts, CuCl₂ and CuSO₄ // *Journal of the American Ceramic Society*. 1991. V. 74. N 5. P. 1112–1116. doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb04350.x
23. Фролова Е.С., Минайчева В.Е. Вакуумная техника. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.
24. Кaganovskii Yu., Mogilko E., Lipovskii A.A., Rosenbluh M. Formation of nanoclusters in silver-doped glasses in wet atmosphere // *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. V. 61. N 1. P. 508–512. doi: 10.1088/1742-6596/61/1/103

25. Егоров В.И., Нащекин А.В., Образцов П.А., Сидоров А.И., Брунков П.Н. Исследование морфологических особенностей наночастиц серебра в приповерхностных слоях стекла при их синтезе методом термообработки в парах воды // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 61–67.
26. Образцов П.А., Нащекин А.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Панфилова А.В., Брунков П.Н. Формирование наночастиц серебра на поверхности силикатных стекол после ионного обмена // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 6. С. 1180–1186.
27. Sgibnev E.M., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Efimov A.M., Postnikov E.S. Effects of silver ion exchange and subsequent treatments on the UV–VIS spectra of silicate glasses. I. Undoped, CeO₂-doped, and (CeO₂ + Sb₂O₃)-codoped photo-thermo-refractive matrix glasses // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 378. P. 213–226. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.010
28. Feng Q., Yunqiang T., Jian Z., Yinghui C., Jie Z., Pengfei W., Farrell G. Photoluminescence of copper ion-exchanged planar waveguides in commercial soda-lime glass // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2008. V. 7134. Art. 71343J.
29. Nebolova P., Spirikova J., Perina V., Jirka I., Mach K., Kuncova G. A study of the preparation and properties of copper-containing optical planar glass waveguides // Solid State Ionics. 2001. V. 141–142. P. 609–615. doi: 10.1016/S0167-2738(01)00776-7
30. Kawasaki H., Kosaka Y., Myoujin Y., Narushima T., Yonezawa T., Arakawa R. Microwave-assisted polyol synthesis of copper nanocrystals without using additional protective agents // Chemical Communications. 2011. V. 47. N 27. P. 7740–7742. doi: 10.1039/c1cc12346g
31. Lu Y.Z., Wei W.T., Chen W. Copper nanoclusters: synthesis, characterization and properties // Chinese Science Bull. 2012. V. 57. N 1. P. 41–47. doi: 10.1007/s11434-011-4896-y

<i>Дёмичев Иван Алексеевич</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, demichevia@yandex.ru
<i>Сидоров Александр Иванович</i>	– доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, aisidorov@qip.ru
<i>Никоноров Николай Валентинович</i>	– доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nikonorov@oi.ifmo.ru
<i>Шахвердов Теймур Азимович</i>	– кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, teimur@list.ru
<i>Ivan A. Demichev</i>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, demichevia@yandex.ru
<i>Alexander I. Sidorov</i>	– D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, aisidorov@qip.ru
<i>Nicolai V. Nikonorov</i>	– D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nikonorov@oi.ifmo.ru
<i>Teimur A. Shakhverdov</i>	– PhD, leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, teimur@list.ru

УДК 538.911

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР 3C-SiC/15R-SiC

А.А. Лебедев^а, С.П. Лебедев^а, И.П. Никитина^а, В.А. Школдин^а, Д.Б. Шустов^а

^а ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

Адрес для переписки: lebedev.sergey@mail.ioffe.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.12.14, принята к печати 17.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-60-64

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лебедев А.А., Лебедев С.П., Никитина И.П., Школдин В.А., Шустов Д.Б. Исследование гетероструктур 3C-SiC/ 15R-SiC // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 60–64

Аннотация.

Предмет исследования. Приведены результаты исследований слоев 3C-SiC, полученных на монокристаллических подложках 15R-SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме.

Материалы и методы. В качестве подложки использовались кристаллы Лэли политипа 15R, рост производился на полярных C (000 $\bar{1}$) и Si (0001) гранях подложки. Температура роста составляла 1950–2000 °С, а время роста – 10 мин. В качестве источника использовался коммерческий мелкозернистый порошок карбида кремния с диаметром зерна 10–20 мкм. Для характеристики выращенных эпитаксиальных слоев применялись следующие методы: катодолуминесценция, оптическая микроскопия и двухкристалльная рентгеновская дифрактометрия.

Основные результаты. Продемонстрирована возможность получения эпитаксиальных пленок 3C-SiC на подложке 15R-SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме. Показано, что, как и в случае использования подложки 6H-SiC, грань C является предпочтительной для гетерополитипного роста, поскольку на ней наблюдается более равномерный рост кубического политипа с малым процентом паразитных включений политипа подложки.

Практическая значимость. Сравнение результатов гетерополитипного роста 3C-SiC на подложках других политипов (6H-SiC, 15R-SiC, 4H-SiC) позволит наиболее полно понять механизм трансформации кристаллической решетки во время эпитаксиального роста и разработать теоретическую модель данного процесса.

Ключевые слова: карбид кремния, сублимационная эпитаксия, катодолуминесценция, рентгеновская дифрактометрия.

Благодарности. Работа частично выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и гранта РФФИ 14-02-00552.

INVESTIGATION OF HETEROSTRUCTURES 3C-SiC/15R-SiC

A.A. Lebedev^a, S.P. Lebedev^a, I.P. Nikitina^a, V.A. Shkoldin^a, D.B. Shustov^a

^a Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

Corresponding author: lebedev.sergey@mail.ioffe.ru

Article info

Received 04.12.14, accepted 17.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-60-64

Article in Russian

Reference for citation: Lebedev A.A., Lebedev S.P., Nikitina I.P., Shkoldin V.A., Shustov D.B. Investigation of heterostructures 3C-SiC/15R-SiC. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 60–64 (in Russian)

Abstract.

The subject of study. Investigation results for 3C-SiC layers, obtained on single-crystal 15R-SiC substrates by sublimation epitaxy in vacuum are presented.

Materials and methods. 15R polytype Lely crystals were used as a substrate; the growth was carried out on polar C (000 $\bar{1}$) and Si (0001) substrate faces. The growth temperature was 1950–2000 °C, and growth time was equal to 10 min. Commercial silicon carbide powder with a grain diameter equal to 10–20 μm was used as a growth source. The following methods were applied for the characterization of grown epitaxial layers: cathodoluminescence, optical microscopy and two-crystal X-ray diffraction.

Main results. The possibility of obtaining epitaxial 3C-SiC on 15R-SiC substrate by sublimation epitaxy in vacuum was demonstrated. It is shown that, C-face is preferable for heteropolytype growth, since more uniform growth of cubic polytype is observed on it with a small percentage of spurious substrate polytype inclusions; the same situation appears in the case of 6H-SiC substrate application.

Practical significance. Comparison of the results of heteropolytype growth for 3C-SiC on substrates of other polytypes (6H-SiC, 15R-SiC, 4H-SiC) will give the possibility to understand more completely the transformation mechanism of the crystal

lattice during epitaxial growth and to develop a theoretical model of the process.

Keywords: silicon carbide, sublimation epitaxy, cathodoluminescence, X-ray diffractometry.

Acknowledgements. This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01) and RFBR grant 14-02-00552.

Введение

Известно, что кубический карбид кремния (3C-SiC) отличается от других политипов SiC наибольшей подвижностью электронов ($1200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) [1, 2], которая не зависит от кристаллографического направления. Остальные параметры 3C (критическое электрическое поле, максимальные рабочие температуры, скорость насыщения электронов, теплопроводность) незначительно отличаются от параметров гексагональных политипов [3, 4]. Таким образом, 3C-SiC является весьма перспективным материалом для создания различных типов полупроводниковых приборов [5–7]. В настоящее время технология выращивания объемных кристаллов 3C-SiC еще не разработана, и основным методом получения пленок 3C-SiC является гетероэпитаксия на подложках других материалов, в том числе гексагональном SiC [8–10].

В предыдущих работах [11, 12] нами сообщалось о получении эпитаксиальных слоев 3C-SiC методом сублимации в вакууме на основе подложек 6H-SiC. Однако в работе [13] было показано, что эпитаксиальные слои 3C-SiC, выращенные на подложках 15R-SiC, обладают меньшей плотностью двойников, чем слои, выращенные на подложках 6H-SiC в тех же технологических условиях. Авторы [14] объясняли это различной кинетикой механизма роста террас для 15R-SiC и 6H-SiC.

Целью настоящей работы было получение методом сублимации в вакууме и исследование гетероэпитаксиальных структур 3C-SiC/15R-SiC и сравнение полученных результатов с результатами роста на подложках 6H-SiC.

Материалы и методы

Рост эпитаксиальных слоев 3C-SiC осуществлялся методом сублимационной эпитаксии в вакууме. В качестве подложки использовались кристаллы Лэли политипа 15R, рост производился на полярных C (000 $\bar{1}$) и Si (0001) гранях подложки. Температура роста составляла 1950–2000 °С, а время роста – 10 мин. В качестве источника использовался коммерческий мелкозернистый порошок карбида кремния с диаметром зерна 10–20 мкм. Для характеристики выращенных эпитаксиальных слоев применялись следующие методы: катодолуминесценция (КЛ) (рентгеноспектральный микроанализатор «Самебах» с оригинальной конструкцией КЛ спектрометра), оптическая микроскопия (Биолам-М) и двухкристалльная рентгеновская дифрактометрия (Дрон-2).

Спектры катодолуминесценции

Метод КЛ применялся для определения политипного состава эпитаксиального слоя. Исследования выращенных эпитаксиальных пленок методом КЛ показали, что на обеих гранях подложки в эпитаксиальном слое преобладал политип 3C-SiC. Помимо кубического политипа, в эпитаксиальном слое наблюдались включения 15R-SiC. Появление этих включений свидетельствует о том, что во время начальной стадии роста в данной области не произошло трансформации политипа 15R→3C, и впоследствии шел рост политипа подложки. Плотность включений 15R-SiC в эпитаксиальном слое, выращенном на C-границе (2–3% от общей площади эпислея), на порядок меньше плотности включений у образца, выращенного на Si-границе (10–15% от общей площади эпислея). Разница относительной плотности этих включений говорит о том, что пленка 3C-SiC на C-границе росла более равномерно и содержит меньше структурных дефектов. Спектры КЛ поверхности 3C-слоя для образцов, выращенных на C-границе (рис. 1, а) и Si-границе (рис. 1, б), показывают характерную для 3C-SiC люминесценцию. Широкая полоса 1,8–2,2 эВ с тремя максимумами – 1,95, 2,04 и 2,13 эВ – это характерная люминесценция излучательных переходов с участием глубоких акцепторных примесей Al [15–20]. Разница между спектрами, полученными на слоях, выращенных на Si- и C-гранях, состоит в наличии пика с центром на 2,3 эВ, который относится к переходам с донорного уровня *N*, называемым краевой люминесценцией. Наличие и относительная интенсивность этой полосы в спектре зависит от структурного качества кристалла: при большом количестве дефектов интенсивные излучательные переходы, связанные с этими дефектами, и безызлучательные переходы подавляют краевую люминесценцию. Сравнение интенсивностей люминесценции также показывает, что на образце со слоем, выращенном на Si-границе, люминесценция слабее, т.е. подавлена большим количеством структурных дефектов в кристалле. Таким образом, можно заключить, что слой, выращенный на C-границе, имеет меньше дефектов, чем слой, выращенный на Si-границе.

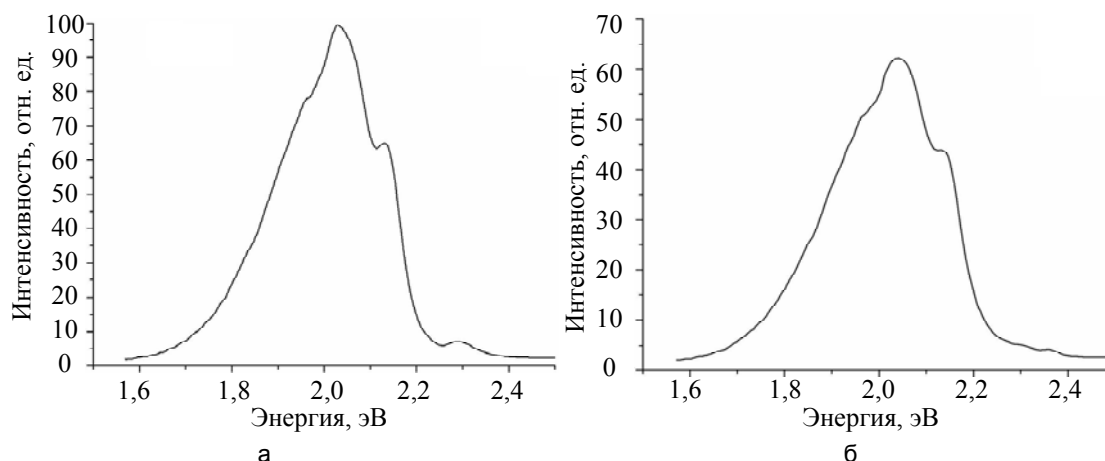


Рис. 1. Спектр катодолюминесценции слоя 3C-SiC, выращенного на: C-грани (а); Si-грани (б)

Структурные исследования

В случае гетерополитипного роста пленка 3C-SiC имеет кристаллографическую ориентацию, отличную от использовавшейся для роста подложки 15R-SiC. При использовании подложки с поверхностью (0001) рост кубического политипа проходит в направлении $\langle 111 \rangle$. При зарождении кубического эпитаксиального слоя одновременно в разных точках (местах) гексагональной подложки ориентация отдельных доменов 3C-SiC вдоль поверхности роста может иметь два кристаллографических положения, которые отличаются друг от друга разворотом на 60° . На границе двух доменов (двойников) из-за несовпадения кристаллографической ориентации наблюдается значительное увеличение плотности дефектов упаковки. Такие двойниковые границы легко различимы в оптическом микроскопе. В настоящее время одной из основных проблем в гетероэпитаксии 3C-SiC является увеличение площади отдельных доменов 3C-SiC.

На рис. 2 представлены оптические фотографии эпитаксиальных слоев 3C-SiC, выращенных на полярных гранях. У обоих образцов наблюдается достаточно высокая плотность двойниковых границ, однако на C-грани распределение этих границ имеет более равномерный характер (рис. 2, а). Помимо этого, отдельные домены 3C-SiC, заключенные между двойниковыми границами, в среднем имеют большую площадь по сравнению с Si-гранью (рис. 2, б).

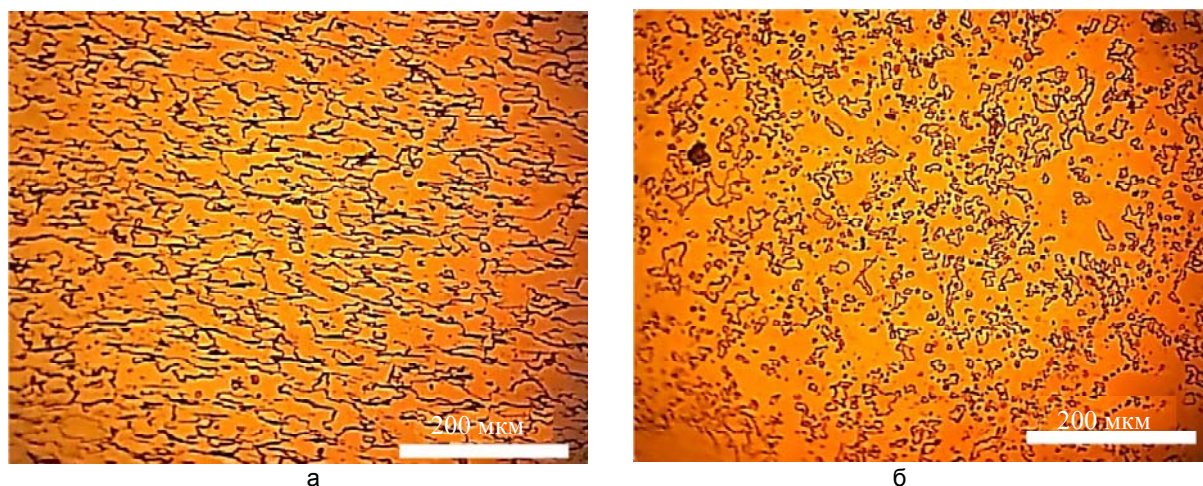


Рис. 2. Оптическое изображение поверхности эпитаксиального слоя 3C-SiC: рост на C-грани (а); рост на Si-грани (б)

Для определения структурного совершенства эпитаксиального слоя применялся метод рентгеновской дифрактометрии. На рис. 3 представлены рентгеновские кривые качания образцов, выращенных на C- и Si-гранях подложки 15R-SiC.

Как видно из рис. 3, на кривой качания от слоя, выращенного на Si-грани (рис. 3, б), наблюдаются два ярко выраженных пика от эпитаксиального слоя, в то время как на кривой качания (рис. 3, а) множественные пики от слоя отсутствуют. Положение пиков на кривой качания рис. 3, б, позволяет предположить, что в эпитаксиальном слое, выращенном на Si-грани, присутствуют области гомо- и гетероэпитаксиального роста, что подтверждает выводы, полученные из анализа спектров КЛ. Большая разница в значениях полуширины кривой качания для 3C-SiC для разных граней может объясняться тем, что при рент-

геновском исследовании захватывается не только эпитаксиальный слой, но переходная область между подложкой и эпислоем. По-видимому, при гетерополиитипном росте на С-границе возникают напряжения на границе слой–подложка, что влечет за собой образование переходного слоя с увеличенной плотностью дефектов. КЛ захватывает только эпитаксиальный слой 3C-SiC, поэтому при исследовании данным методом на характер спектра оказывают влияние только дефекты, присутствующие в эпитаксиальном слое.

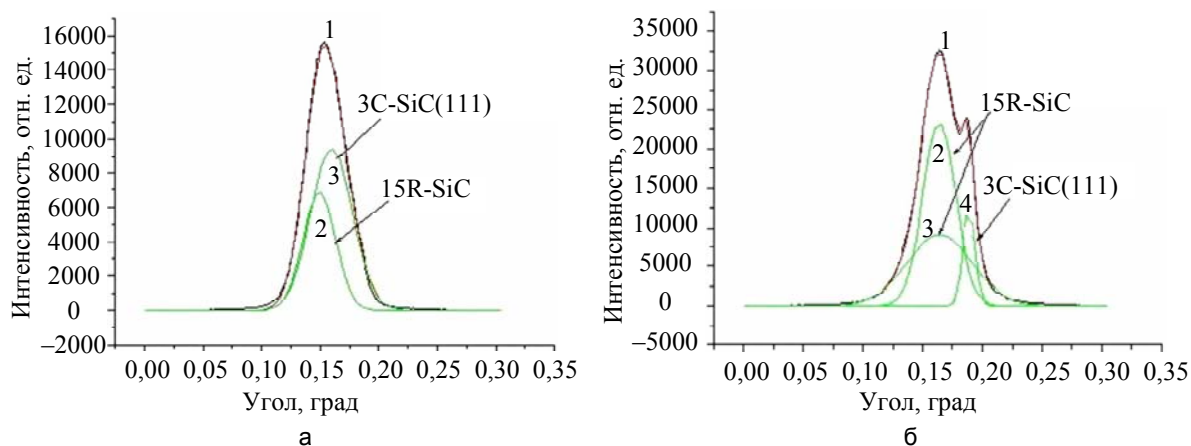


Рис. 3. Рентгеновская кривая качания образца 3C-SiC/15R-SiC.

- (а) Рост на С-границе. Общая кривая качания (1). Результат разложения по Гауссу: подложка 15R-SiC, полуширина пика - 100 arcsec (2); слой 3C-SiC, полуширина пика - 127 arcsec (3)
 (б) Рост на Si-границе. Общая кривая качания (1). Результат разложения по Гауссу: подложка 15R-SiC, полуширина пика - 98 arcsec (2); область включения политипа 15R-SiC в эпитаксиальном слое, полуширина пика - 197 arcsec (3); слой 3C-SiC, полуширина пика — 36 arcsec (4)

Заключение

Проведенные исследования показали возможность получения эпитаксиальных слоев 3C-SiC на подложках 15R-SiC. При этом, как и в случае использования подложки 6H-SiC, С(000 $\bar{1}$)-грань является предпочтительной для гетерополиитипного роста, поскольку на ней наблюдается более равномерный рост кубического политипа с малым процентом паразитных включений политипа подложки.

В выполненных экспериментах не наблюдалось обнаруженного в работе [5] уменьшения средней плотности двойников в слое 3C-SiC по сравнению с ростом на подложках 6H-SiC. Возможно, это связано с тем, что в работе [5] использовался метод газотранспортной эпитаксии, и рост происходил при более низких температурах (1500 °C вместо 2000 °C в настоящей работе).

Литература

1. Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. Eds. M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. NY: John Wiley & Sons, 2001. 226 p.
2. Gorin S.N., Ivanova L.M. Cubic silicon carbide (3C-SiC): structure and properties of single crystals grown by thermal decomposition of methyl trichlorosilane in hydrogen // *Physica Status Solidi (B) Basic Research*. 1997. V. 202. N 1. P. 221–245.
3. Nishino S., Powell J.A., Will H.A. Production of large area single-crystal wafers of cubic SiC for semiconductor devices // *Applied Physics Letters*. 1983. V. 42. N 5. P. 460–462. doi: 10.1063/1.93970
4. Nilsson H.-E., Englund U., Hjelm M., Bellotti E., Brennan K. Full band Monte Carlo study of high field transport in cubic silicon carbide // *Journal of Applied Physics*. 2003. V. 93. N 6. P. 3389–3394. doi: 10.1063/1.1554472
5. Spry D.J., Trunek A.J., Neudeck P.G. High breakdown field P-type 3C-SiC schottky diodes grown on step-free 4H-SiC mesas // *Materials Science Forum*. 2004. V. 457–460. P. 1061–1064.
6. Eriksson J., Weng M.H., Roccaforte F., Giannazzo F., Leone S., Raineri V. Toward an ideal Schottky barrier on 3C-SiC // *Applied Physics Letters*. 2009. V. 95. N 8. Art. 081907. doi: 10.1063/1.3211965
7. Eriksson J., Weng M.-H., Roccaforte F., Giannazzo F., Leone S., Raineri V. Demonstration of defect-induced limitation on the properties of Au/3C-SiC Schottky barrier diodes // *Solid State Phenomena*. 2009. V. 156–158. P. 331–336. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.156-158.331
8. Steckl A.J., Devrajan J., Tlali S., Jackson H.E., Tran C., Gorin S.N., Ivanova L.M. Characterisation of 3C-SiC crystals grown by thermal decomposition of methyltrichlorosilane // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 69. N 25. P. 3824–3826.
9. Bayazitov R.M., Khaibullin I.B., Batalov R.I., Nurutdinov R.M., Antonova L.Kh., Aksenov V.P., Mikhailova G.N. Structure and photoluminescent properties of SiC layers on Si, synthesized by pulsed ion-beam

- treatment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2003. V. 206. P. 984–988. doi: 10.1016/S0168-583X(03)00907-8
10. Yamanaka M., Daimon H., Sakuma E., Misawa S., Yoshida S. Temperature dependence of electrical properties of n- and p-type 3C-SiC // Journal of Applied Physics. 1987. V. 61. N 2. P. 599–603. doi: 10.1063/1.338211
 11. Lebedev A.A. Heterojunctions and superlattices based on silicon carbide // Semiconductor Science and Technology. 2006. V. 21. N 6. P. R17–R34. doi: 10.1088/0268-1242/21/6/R01
 12. Lebedev A.A., Zamoryanskaya M.V., Davydov S.Yu., Kirilenko D.A., Lebedev S.P., Sorokin L.M., Shustov D.B., Scheglov M.P. A study of the intermediate layer in 3C-SiC/6H-SiC heterostructures // Journal of Crystal Growth. 2014. V. 396. P. 100–103. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2014.03.030
 13. Булат П.В., Лебедев А.А., Макаров Ю.Н. Исследование возможности выращивания объемных кристаллов карбида кремния политипа 3C для силовых приборов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 64–69.
 14. Chien F.R., Nutt S.R., Yoo W.S., Kimoto T., Matsunami H. Terrace growth and polytype development in epitaxial β -SiC films on α -SiC (6H and 15R) substrates // Journal of Materials Research. 1994. V. 9. N 4. P. 940–954.
 15. Ikeda M., Matsunami H., Tanaka T. Site effect on the impurity levels in 4H, 6H and 15R SiC // Physical Review B. 1980. V. 22. N 6. P. 2842–2854. doi: 10.1103/PhysRevB.22.2842
 16. Suzuki A., Matsunami H., Tanaka T. Photoluminescence due to Al, Ga, and B acceptors in 4H-, 6H-, and 3C-SiC grown from Si Melt // Journal of the Electrochemical Society. 1997. V. 124. N 2. P. 241–246.
 17. Clemen L.L., Devaty R.P., MacMillan M.F., Yoganathan M., Choyke W.J., Larkin D.J., Powel J.A., Edmond J.A., Kong H.S. Aluminium acceptor four particle bound exciton complex in 4H, 6H, and 3C SiC // Applied Physics Letters. 1993. V. 62. N 23. P. 2953–2955. doi: 10.1063/1.109627
 18. Yoganathan M., Choyke W.J., Devaty R.P., Neudeck P.G. Free to bound transition-related electroluminescence in 3C and 6H SiC p^+-n junctions at room temperature // Journal of Applied Physics. 1996. V. 80. N 3. P. 1763–1767.
 19. Choyke W.J., Patrick L. Luminescence of donor-acceptor pairs in cubic SiC // Physical Review B. 1970. V. 2. N 12. P. 4959–4965. doi: 10.1103/PhysRevB.2.4959
 20. Алтайский Ю.М., Авраменко С.Ф., Гусева О.А., Киселёв В.С. Краевая фотолюминесценция кубического карбида кремния // Физика и техника полупроводников. 1987. Т. 21. С. 2072.

<i>Лебедев Александр Александрович</i>	– доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отделения, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Shura.lebe@mail.ioffe.ru
<i>Лебедев Сергей Павлович</i>	– научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, lebedev.sergey@mail.ioffe.ru
<i>Никитина Ирина Петровна</i>	– ведущий инженер, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Irina.nikitina45@gmail.com
<i>Школдин Виталий Алексеевич</i>	– лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, mail@al404.spb.ru
<i>Шустов Денис Борисович</i>	– научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, daka.df@gmail.com
<i>Alexander A. Lebedev</i>	– D.Sc., Professor, Divisional head, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Shura.lebe@mail.ioffe.ru
<i>Sergei P. Lebedev</i>	– scientific researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, lebedev.sergey@mail.ioffe.ru
<i>Irina P. Nikitina</i>	– leading engineer, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Irina.nikitina45@gmail.com
<i>Vitaliy A. Shkoldin</i>	– laboratory assistant, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, mail@al404.spb.ru
<i>Denis B. Shustov</i>	– scientific researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, daka.df@gmail.com

УДК 535.92

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ОБРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ НА МОЩНОСТЬ И СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДИОДОВ

А.Б. Мухтубаев^а, С.М. Аксарин^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: mukhtubaev.ab@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.06.14, принята к печати 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-65-69

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М. Влияние величины ортогонально поляризованных обратных отражений на мощность и спектр излучения суперлюминесцентных диодов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 65–69

Аннотация. Исследовано влияние величины ортогонально поляризованных обратных отражений на спектр источника оптического излучения типа суперлюминесцентный диод, а также представлены оптимальные режимы работы источника излучения. Особенностью метода исследования является использование волоконного контроллера поляризации и оптического зеркала, нанесенного на торец оптического волокна. Исследования проводились с двумя источниками оптического излучения: суперлюминесцентный диод фирмы ThorLabs серии S5FC1005SXL и светодиодный модуль ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW. Выявлено, что при величине обратных отражений, равной –13 дБ по отношению к выходной мощности источника, начинает проявляться негативное влияние на мощностные и спектральные характеристики источника с оптической мощностью 2,3 мВт. Также подтверждено, что при увеличении мощности излучения за счет увеличения тока накачки источника влияние обратных отражений начинает проявляться при более низком уровне обратных отражений. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании волоконно-оптических датчиков для устранения влияния обратных отражений на источники оптического излучения, исследованных в данной работе.

Ключевые слова: обратные отражения, суперлюминесцентный диод, спектр, поляризация.

INFLUENCE OF THE ORTHOGONALLY POLARIZED BACK REFLECTIONS ON THE POWER AND RADIATION SPECTRUM OF SUPERLUMINESCENT DIODES

A.B. Mukhtubayev^а, S.M. Aksarin^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: mukhtubaev.ab@gmail.com

Article info

Received 30.06.14, accepted 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-65-69

Article in Russian

Reference for citation: Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M. Influence of the orthogonally polarized back reflections on the power and radiation spectrum of superluminescent diodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 65–69 (in Russian)

Abstract. We have investigated the back reflections influence on the spectrum for optical radiation source of superluminescent diode type and have provided optimal operating conditions of the radiation source. The feature of the research method is the usage of a fiber polarization controller and an optical mirror coated on the end of an optical fiber. The studies were conducted with two sources of optical radiation: ThorLabs superluminescent diode series S5FC1005SXL and LED module ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW. It was revealed that at the value of back reflections equal to -13 dB relative to the output power source, a negative impact on power and spectral characteristics of the source with an optical power of 2.3 μ W is beginning to appear. It was also confirmed that at the increase of the radiation power by increasing the source pumping current, back reflection influence is exhibiting at a lower level of back reflections. The results obtained need to be considered when designing fiber optic sensors in order to eliminate the effect of back reflections on the sources of optical radiation having been studied in this paper.

Keywords: back reflections, superluminescent diode, spectrum, polarization.

Введение

Источники оптического излучения, в зависимости от их принципа работы и конструкции, в разной степени чувствительны к обратным отражениям [1–14]. Обратные отражения имеют место в схемах, где используется оптическое зеркало, также они могут возникать в местах стыков элементов. В зависимости от величины обратных отражений может наблюдаться ухудшение параметров источника оптического излучения: падение уровня оптической мощности, изменение формы спектра, что приводит к быстрой деградации источника и его выходу из строя [6]. Влияние уровня обратных отражений, введенных в ось к исходящему излучению, на источники оптического излучения было исследовано в работах [1–3]. В настоящей работе проведено исследование влияния обратных отражений, введенных с ортогональной поляризацией по отношению к исходящему излучению, на источники оптического излучения типа суперлюминесцентный диод (СЛД), определение порога чувствительности к величине обратным отражениям и выявление оптимальных режимов работы источника.

Целью работы является исследование влияния обратных отражений, введенных с ортогональной поляризацией, на спектр оптического излучения суперлюминесцентного диода двух типов: СЛД фирмы ThorLabs серии S5FC1005SXL и светодиодный модуль ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW, а также определение порога чувствительности к величине обратных отражений.

Экспериментальная установка по исследованию влияния обратных отражений на источник излучения

Экспериментальная установка по исследованию влияния обратных отражений на источники оптического излучения СЛД фирмы ThorLabs серии S5FC1005SXL и светодиодный модуль ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW представлена на рис. 1. Оптическое излучение СЛД имеет высокий коэффициент экстинкции, и на его излучение влияет не только уровень обратных отражений, но и его состояние поляризации. Для этого состояние поляризации подстраивается волоконным контроллером поляризации [15] таким образом, чтобы уровень обратных отражений был максимальным [16]. Таким образом, можно говорить об ортогональности между обратным излучением и исходным, поскольку в случае параллельного состояния поляризации обратных отражений мощность излучения снижается [1–3]. Для создания обратных отражений на торец оптического волокна (ОВ) было нанесено металлическое зеркало. Уровень обратных отражений контролировался изменением количества витков ОВ с зеркалом: при уменьшении числа витков мощность обратных отражений увеличивается. Диаметр витков составлял 19 мм, количество витков – 14.

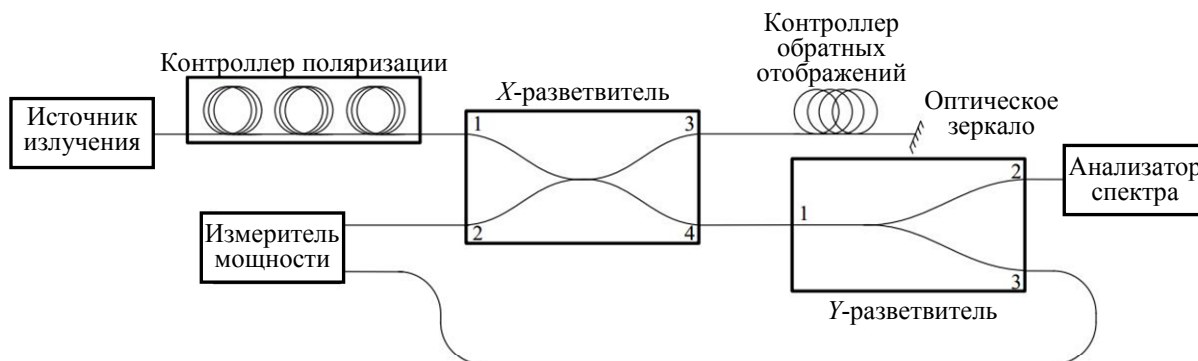


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию влияния обратных отражений на источник излучения

В ходе экспериментов использовался двухканальный измеритель мощности ThorLabs PM320E, первый канал которого был соединен с третьим выходом волоконного Y-разветвителя для контроля уровня мощности источника. Ко второму каналу был подключен второй выход волоконного X-разветвителя для измерения величины обратных отражений. Для контроля влияния обратных отражений на спектр источника использовался анализатор спектра IMAQ6370C-01EN_030 фирмы Yokogawa. Все соединения элементов установки были выполнены разъемами типа FC/APC, чтобы исключить обратные отражения, возникающие в местах стыковки элементов экспериментальной установки.

Исследование обратных отражений, введенных с ортогональной поляризацией

В результате исследования светодиодного модуля ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW были получены спектральные характеристики, представленные на рис. 2. Исходная мощность излучения источника составила 2,3 мВт.

СЛД фирмы ThorLabs S5FC1005SXL исследовался в четырех режимах при различных токах накачки источника. Исследуемый СЛД имеет нелинейную ватт-амперную характеристику, которая представлена на рис. 3. Для анализа влияния обратных отражений необходимо учитывать также и коэффициент экс-

тинкции. Для этого было проведено измерение коэффициента экстинкции от тока накачки лазера, которая представлена на рис. 4. Результаты исследований влияния обратных отражений представлены на рис. 5 для токов накачки 187,7 мА и 237,5 мА; на рис. 6 для токов накачки 378 мА и 600 мА. При данных значениях токов накачки СЛД мощность излучения источника составила: 1,2 мВт (рис. 5, а); 2,3 мВт (рис. 5, б); 8,0 мВт (рис. 6, а) и 19,0 мВт (рис. 6, б).

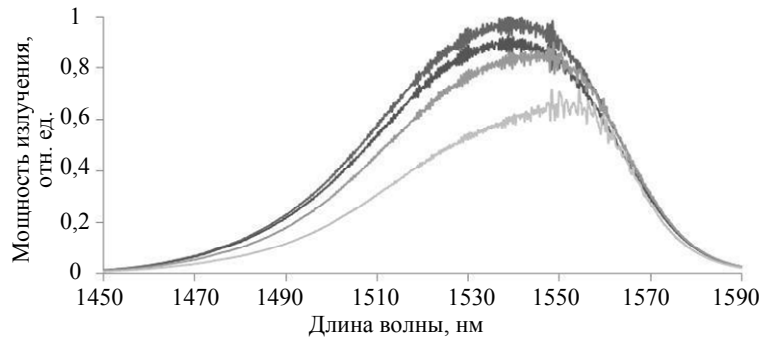


Рис. 2. Спектр светодиодного модуля ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: -29 дБ; -16,8 дБ; -13,7 дБ)

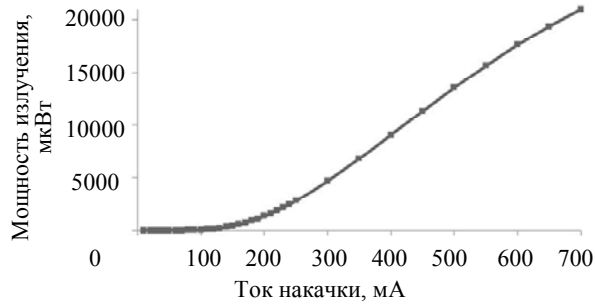


Рис. 3. Ватт-амперная характеристика СЛД фирмы ThorLabs S5FC1005SXL

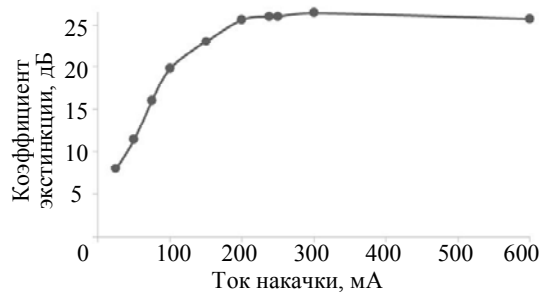


Рис. 4. График зависимости коэффициента экстинкции от тока накачки СЛД фирмы ThorLabs S5FC1005SXL

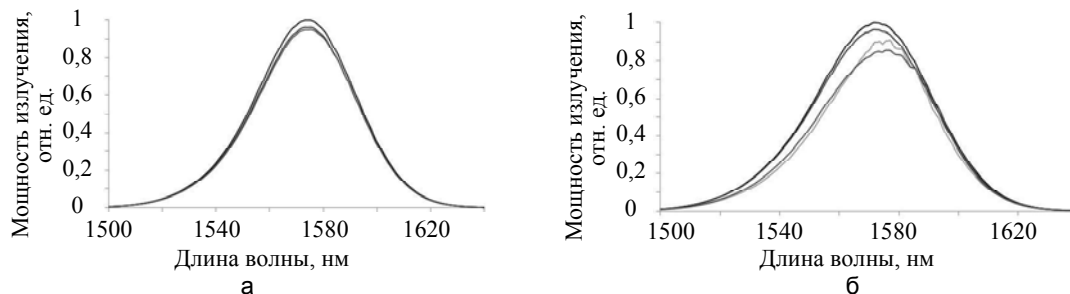


Рис. 5. Спектр СЛД при токе накачки: 187,7 мА в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: -26,6 дБ; -9,1 дБ) (а); 237,5 мА в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: -29,1 дБ; -12,8 дБ; -8,7 дБ) (б)

В результате исследований было подтверждено, что источники оптического излучения, такие как СЛД, в достаточной степени чувствительны к ортогонально поляризованным обратным отражениям, которые возникают в оптической схеме. Причем при снижении тока накачки, и, как следствие, уменьшении мощности источника зависимость от величины обратных отражений становится более слабая: форма

спектра изменяется при меньших соотношениях мощности обратных отражений к мощности источника (рис. 5, 6). Также это подтверждается зависимостью коэффициента экстинкции от тока накачки: при увеличении мощности оптического излучения увеличивается степень поляризации, что влечет за собой более сильное влияние уровня обратных отражений (рис. 4).

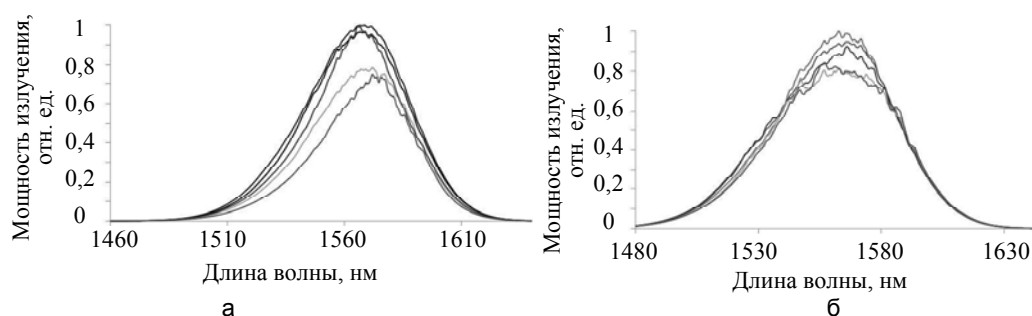


Рис. 6. Спектр СЛД при токе накачки: 378 мА в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: $-21,3$ дБ; $-12,9$ дБ; $-10,7$ дБ; $-9,7$ дБ) (а); 600 мА в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: $-30,8$ дБ; $-19,9$ дБ; $-18,2$ дБ; $-16,1$ дБ) (б)

Исследование обратных отражений, введенных с соосной поляризацией

В зависимости от степени поляризации обратных отражений деградация источников оптического излучения проявляется в разной степени. Для сравнения режимов обратных отражений было проведено исследование, в котором поляризация обратных отражений имела одну ось с поляризацией источника. В данной конфигурации состояние поляризации подстраивается волоконным контроллером поляризации таким образом, чтобы уровень обратных отражений был минимальным.

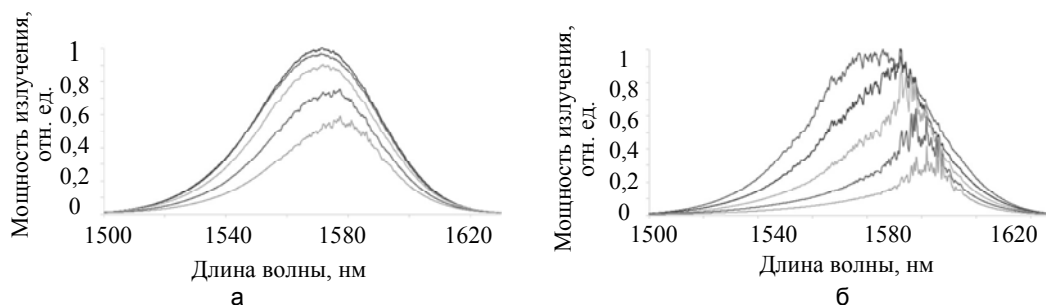


Рис. 7. Спектр СЛД при токе накачки: 237,5 мА в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: $-29,5$ дБ; $-24,7$ дБ; $-19,9$ дБ; $-16,2$ дБ) (а); 600,0 мА в зависимости от коэффициента обратных отражений (сверху вниз без обратных отражений: $-27,7$ дБ; $-25,0$ дБ; $-22,0$ дБ; $-19,2$ дБ) (б)

Результаты исследований влияния обратных отражений, введенных в ось к источнику излучения, представлены на рис. 7, а, б, для токов накачки 237,5 мА и 600 мА соответственно. При данных значениях токов накачки СЛД мощность излучения источника составила 2,3 мВт и 19,0 мВт соответственно. Из полученных результатов видно, что при введении обратных отражений с поляризацией, совпадающей с поляризацией источника оптического излучения, искажение спектра происходит быстрее, следовательно, деградация источника более существенна, чем в режиме, где обратные отражения вводятся ортогонально (рис. 5, б и рис. 6, б). Также наблюдается значительное снижение мощности оптического излучения источника при увеличении уровня обратных отражений.

Заключение

Проведено исследование влияния уровня обратных отражений на источники оптического излучения типа суперлюминесцентный диод. Подтверждено, что эти источники в достаточной степени чувствительны к обратным отражениям, которые возникают в оптической схеме. Выявлено, что влияние на источники зависит от типа поляризации обратных отражений: при вводе обратных отражений в ось с источником излучения искажение спектра происходит быстрее, чем при ортогональном вводе, причем при увеличении мощности оптического излучения источника искажение спектра происходит сильнее. Сравнивая оба источника оптического излучения при одинаковых мощностях излучения (рис. 2 и рис. 5, б), можно сделать вывод, что искажение спектра и соответственно деградация источника в первом приближении наступают при одинаковых значениях коэффициента обратных отражений: $-13,7$ дБ для светодиодного модуля ELED-1550-1-E-9-SM1-FA-CW и $-12,8$ дБ для суперлюминесцентного диода фирмы ThorLabs.

Для устранения чувствительности к обратным отражениям необходимо на выходе источника оптического излучения устанавливать изолятор с соответствующим коэффициентом изоляции, который бы предотвращал процесс деградации источника из-за обратных отражений. Также для уменьшения чувствительности к обратным отражениям возможно использование источников с меньшей мощностью. Это видно на рис. 5, а: при мощности 1,2 мВт суперлюминесцентного диода фирмы ThorLabs обратные отражения на спектр источника практически не влияют.

Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании оптической схемы волоконно-оптических датчиков. Необходимо проводить численный расчет величины обратных отражений, возникающих в оптическом тракте. При превышении допустимого значения рекомендуется устанавливать оптический изолятор необходимого номинала.

Литература

1. Shidlovski V.R. Superluminescent Diodes. Short Overview of Device Operation Principles and Performance Parameters [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.superlumdiodes.com/pdf/sld_overview.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 11.06.2014).
2. Shidlovski V.R. Superluminescent Diodes. Application Notes. SLD Sensitivity to Optical Feedback [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.superlumdiodes.com/pdf/sld_feedback.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 11.06.2014).
3. Superluminescent Light Emitting Diodes: Device Fundamentals and Reliability [Электронный ресурс]. InPhenix Inc. Режим доступа: http://www.inphenix.com/pdfdoc/Application_Notes_for_SLEDs.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 11.06.2014).
4. Sheu F.-W., Luo P.-L. Temporal coherence characteristics of a superluminescent diode system with an optical feedback mechanism // Proc. Education and Training in Optics and Photonics (ETOP 2007). Ottawa, Canada, 2007. P. EMB6.
5. Fukuda M. Optical Semiconductor Devices. John Wiley & Sons, 1999. 440 p.
6. Ab-Rahman M.S., Hassan M.R. Theory of shutdown of semiconductor laser source remotely // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. 2010. V. 27. N 8. P. 1626–1633. doi: 10.1364/JOSAB.27.001626
7. Ab-Rahman M.S., Hassan R.M. The combined effect of temperature of operation and external optical feedback on the turn-on time delay of semiconductor laser diodes // Optik. 2011. V. 122. N 3. P. 266–272. doi: 10.1016/j.ijleo.2010.01.002
8. Osmundsen J.H., Gade N. Influence of optical feedback on laser frequency spectrum and threshold conditions // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1985. V. QE-19. N 3. P. 465–469.
9. Lo B.S.K., Ghafouri-Shiraz H. Spectral characteristics of distributed feedback laser diodes with distributed coupling coefficient // Journal of Lightwave Technology. 1995. V. 13. N 2. P. 200–212. doi: 10.1109/50.365207
10. Tkach R.W., Chraplyvy A.R. Regimes of feedback effects in 1.5- μm distributed feedback lasers // Journal of Lightwave Technology. 1985. V. LT-4. N 11. P. 1655–1661.
11. Wu H.-J., Chang H.-C. Turn-on jitter in semiconductor lasers with moderate reflecting feedback // IEEE Photonics Technology Letters. 1992. V. 4. N 4. P. 339–342. doi: 10.1109/68.127206
12. Langley L.N., Shore K.A. The effect of external optical feedback on the turn-on delay statistics of laser diodes under pseudorandom modulation // IEEE Photonics Technology Letters. 1992. V. 4. N 11. P. 1207–1209. doi: 10.1109/68.166944
13. Langley L.N., Shore K.A. Effect of external optical feedback on timing jitter in modulated laser diodes // Journal of Lightwave Technology. 1993. V. 11. N 3. P. 434–441. doi: 10.1109/50.219577
14. Homar M.V., Mirasso C.R. Effect of optical feedback on fast modulated semiconductor lasers // IEE Proceedings: Optoelectronics. 1997. V. 144. N 1. P. 30–33.
15. Koehler B.G., Bowers J.E. In-line single-mode fiber polarization controllers at 1.55, 1.30, and 0.63 μm // Applied Optics. 1985. V. 24. N 3. P. 349–353.
16. Drexler W., Fujimoto J.G. Optical Coherence Tomography. Technology and Applications. NY: Springer, 2008. 1346 p.

- Мухтубаев Азамат Булатович* – инженер, аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mukhtubaev.ab@gmail.com
- Аксарин Станислав Михайлович* – младший научный сотрудник, аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, staksar@gmail.com
- Azamat B. Mukhtubayev* – engineer, student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mukhtubaev.ab@gmail.com
- Stanislav M. Aksarin* – junior scientific researcher, postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, staksar@gmail.com

УДК 621.391.037.372

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИКТОРОВ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ СТАТИСТИК ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ФОНЕМ

Е.В. Булгакова^a, А.В. Шолохов^b, Н.А. Томашенко^{a,c}

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Университет Восточной Финляндии, Йоэнсуу, FI-80101, Финляндия

^c ООО «Центр речевых технологий», Санкт-Петербург, 196084, Российская Федерация

Адрес для переписки: bulgakova@speechpro.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.11.14, принята к печати 05.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-70-77

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Булгакова Е.В., Шолохов А.В., Томашенко Н.А. Метод идентификации дикторов на основе сравнения статистик длительностей фонем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 70–77

Аннотация.

Предмет исследования. Представлен полуавтоматический метод идентификации диктора по речи на основе сравнения просодических признаков – статистик длительностей звуков. В последнее время благодаря развитию речевых технологий наблюдается значительный интерес к поиску экспертных методов идентификации диктора по голосу, дополняющих с целью повышения надежности идентификации известные методы, а также обладающих низкой трудоемкостью. Эффективное решение данной проблемы необходимо для принятия надежного решения о тождестве либо различии голосов дикторов, представленных на фонограммах.

Описание метода. Впервые представлен алгоритм расчета оценки различия голосов дикторов на основе сравнения статистик длительностей фонем и аллофонов. Характерной особенностью предложенного метода является возможность его применения в комплексе с другими полуавтоматическими методами (акустическими, аудитивно-лингвистическими) в связи с отсутствием ярко выраженной корреляции между анализируемыми признаками. Преимуществом метода является возможность проведения экспресс-исследования фонограмм большой длительности за счет автоматизации процесса подготовки данных для анализа. Описываются принципы работы автоматического сегментатора речи, используемого для расчета статистик длительностей звуков по акустико-фонетической разметке. Программное обеспечение разработано в качестве инструмента подготовки данных для экспертного анализа.

Апробация метода. Метод апробирован на базе 130 речевых записей, включающей русскую речь дикторов-мужчин и дикторов-женщин, и показал надежность 71,7% на базе, содержащей записи женской речи, и 78,4% на базе, содержащей записи мужской речи. Также было экспериментально установлено, что из всех используемых признаков наиболее информативными являются статистики длительностей фонем гласных и сонорных согласных.

Практическая значимость. Результаты эксперимента показали применимость предложенного метода для решения задачи распознавания диктора по голосу и речи в рамках проведения фоноскопической экспертизы.

Ключевые слова: фоноскопическая экспертиза, распознавание диктора, полуавтоматические методы идентификации, статистика длительностей фонем, фонемная сегментация.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

SPEAKERS' IDENTIFICATION METHOD BASED ON COMPARISON OF PHONEME LENGTHS STATISTICS

E.V. Bulgakova^a, A.V. Sholokhov^b, N.A. Tomashenko^{a,c}

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b University of Eastern Finland, Joensuu, FI-80101, Finland

^c "Speech Technology Center", LLC, Saint Petersburg, 196084, Russian Federation

Corresponding author: bulgakova@speechpro.com

Article info

Received 27.11.14, accepted 05.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-70-77

Article in Russian

Reference for citation: Bulgakova E.V., Sholokhov A.V., Tomashenko N.A. Speakers' identification method based on comparison of phoneme lengths statistics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 70–77 (in Russian)

Abstract.

Subject of research. The paper presents a semi-automatic method of speaker identification based on prosodic features comparison - statistics of phone lengths. Due to the development of speech technologies in recent times, there is an increased interest in searching of expert methods for speaker's voice identification, which supplement existing methods to increase identification reliability and also have low labour intensity. An efficient solution for this problem is necessary for making the reliable decision whether the voices of the speakers in the audio recordings are identical or different.

Method description. We present a novel algorithm for calculating the difference of speakers' voices based on comparing of statistics for phone and allophone lengths. Characteristic feature of the proposed method is the possibility of its application along with the other semi-automatic methods (acoustic, auditive and linguistic) due to the lack of a strong correlation between analyzed features. The advantage of the method is the possibility to carry out rapid analysis of long-duration recordings because of preprocessing automation for data being analyzed. We describe the operation principles of an automatic speech segmentation module used for statistics calculation of sound lengths by acoustic-phonetic labeling. The software has been developed as an instrument of speech data preprocessing for expert analysis.

Method approbation. This method was approved on the speech database of 130 speech records, including the Russian speech of the male speakers and female speakers, and showed reliability equal to 71.7% on the database containing female speech records, and 78.4% on the database containing male speech records. Also it was experimentally established that the most informative of all used features are statistics of phone lengths of vowels and sonorant sounds.

Practical relevance. Experimental results have shown applicability of the proposed method for the speaker recognition task in the course of phonoscopic examination.

Keywords: phonoscopic examination, speaker recognition, semi-automatic speaker identification methods, statistics of phone lengths, phone segmentation.

Acknowledgements. The work is partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01).

Введение

Информация, содержащаяся в речевом сигнале, позволяет решать одну из наиболее актуальных проблем современных речевых технологий – задачу распознавания диктора. Данная задача заключается в установлении тождества личности по совокупности общих и частных признаков его голоса и речи [1] и объединяет подзадачи идентификации и верификации дикторов. В первом случае спорная фонограмма сравнивается с набором образцов голоса для составления списка наиболее похожих голосов. Во втором случае спорная фонограмма сравнивается с образцом голоса с целью подтверждения идентичности голосов дикторов на представленных фонограммах. Представленный в настоящей работе метод может быть применим для обеих подзадач.

В настоящее время для решения задачи распознавания диктора широко применяются как автоматические (объективные), так и экспертные (субъективные) методы. Использование экспертных методов в процессе проведения фоноскопических исследований с целью идентификации говорящего дает возможность уточнить и скорректировать работу автоматических средств анализа и сравнения речевых сигналов. Кроме того, экспертные методы идентификации диктора применяются в случаях, когда работа автоматических методов оказывается затрудненной – например, в условиях сильной зашумленности фонограмм. Среди применяемых экспертных методов можно выделить акустические, лингвистические и аудитивные [2–8]. Данные методы предъявляют высокие требования к уровню квалификации эксперта и обладают значительной трудоемкостью. Предложенный полуавтоматический метод идентификации дикторов, основанный на сравнении статистик длительностей аллофонов фонем, позволяет эксперту работать с большим объемом данных в условиях проведения экспресс-анализа фонограмм.

Полуавтоматические методы идентификации дикторов по голосу

Подавляющее большинство современных методов идентификации дикторов по голосу и речи основаны на статистическом анализе распределения аудитивно-лингвистических или акустических признаков. Анализ современной методической и научной литературы по проблеме идентификации дикторов показал, что в современной экспертной практике применяются различные полуавтоматические акустические и аудитивно-лингвистические методы. Метод анализа мелодического контура, метод формантного выравнивания и микроанализ спектров гласных можно условно назвать акустическими.

Метод мелодического контура [5, 6] позволяет эксперту анализировать и сравнивать основные характеристики мелодических структур, представленные в виде наборов значений параметров основного тона для сопоставимых участков мелодического контура (опорных фрагментов). Возможность сравнения мелодического оформления различных фрагментов речевого сигнала обеспечивается их относительной реализационной стабильностью в сопоставимых контекстах, т.е. типичностью и повторяемостью в речи конкретного диктора с поправкой на характерную для него специфику контекстной и иной внутридикторской вариативности. Реализованный в настоящее время метод обладает точностью идентификации около 70% [6], но требует настройки под конкретный язык.

Метод формантного выравнивания [3, 4] и микроанализ спектров гласных [8, 9] являются модификацией распространенного за рубежом метода «voiserprint», который подвергся серьезной критике в кругу ученых по причине низкой точности идентификации [10]. В качестве недостатка данного метода можно

отметить высокую трудоемкость. Метод микроанализа спектров гласных носит текстозависимый и языкозависимый характер.

К аудитивно-лингвистическим методам относятся лингвистический [7] и аудитивный методы [2] идентификации дикторов. Реализованный в настоящее время лингвистический метод состоит из выявления и сравнения признаков как сегментного уровня, касающихся специфики произношения отдельных звуков (гласных и согласных) и их сочетаний в сопоставимых фонетических контекстах, так и признаков супrasegmentного уровня, связанных с особенностями проявления фразовой интонации, ударения конкретного языка. Хотя данный вид анализа можно назвать универсальным, набор гласных и согласных фонем, типы фонетических процессов, так же как и мелодические особенности, сильно зависят от языка. Это значит, что лингвистический анализ речи в случае проведения фоноскопических исследований на незнакомом языке невозможен без ознакомления с данным языком даже для квалифицированного эксперта.

Аудитивный метод идентификации диктора [2] представляет собой способ формализации слухового впечатления от голоса и речи на основании сравнения фиксированного набора слуховых характеристик. Данный метод заключается в прослушивании подготовленным экспертом звукозаписей образца речи идентифицируемого диктора и спорной фонограммы, анализе звукового материала и выделении индивидуализирующих дикторских характеристик, подтверждающих или опровергающих факт принадлежности речи, записанной на образцовой и спорной фонограммах, одному и тому же диктору.

Проведение полного аудитивного анализа предполагает исследование полного набора аудитивных признаков [8], что требует значительных трудозатрат эксперта. Данный факт можно отнести к недостаткам метода.

Таким образом, каждый из перечисленных выше методов имеет ряд существенных недостатков:

- метод сравнения мелодического контура является языкозависимым и предъявляет высокие требования к сопоставимости материала по эмоциональному состоянию диктора;
- применение лингвистического метода затруднено в условиях анализа иноязычной речи диктора, записанного на фонограмме;
- аудитивный метод и метод формантного выравнивания требуют значительных трудозатрат эксперта (2–4 ч для обработки двух фонограмм длительностью 5 мин каждая);
- метод микроанализа спектров гласных является языкозависимым и текстозависимым.

Предлагаемый в настоящей работе альтернативный метод идентификации диктора, основанный на сравнении просодических признаков – статистик длительностей аллофонов фонем, дополняет работу описанных выше методов благодаря анализу признаков, не обладающих ярко выраженной корреляцией с признаками, применяемыми в других методах. Преимуществом данного метода является возможность его использования для экспресс-анализа фонограмм большой длительности. Время исследования двух фонограмм длительностью 30 мин каждая составляет от нескольких секунд до 10 мин (с учетом проверки и корректировки экспертом границ аллофонов фонем). К числу возможных достоинств этого метода предположительно относится его применимость в условиях анализа фонограмм, содержащих речь диктора на иностранных языках, в связи с тем, что существует некоторый универсальный набор фонем, присутствующий в различных языках мира [11]. Статистики длительностей данных фонем также могут быть использованы для идентификационного исследования фонограмм. Данная гипотеза, выдвинутая на основе предварительных результатов экспериментов, будет проверяться в последующих исследованиях.

Описание принципов работы метода

На первой стадии эксперимента с помощью автоматического сегментатора речи на основе звуковых файлов и заранее подготовленных текстовых расшифровок, соответствующих этим файлам, речевой массив данных был отсегментирован на фонемы. Далее с помощью специально созданного программного обеспечения был осуществлен расчет статистик длительностей аллофонов фонем. Мы рассматриваем аллофон как реализованный в речи вариант фонемы, обусловленный конкретным фонетическим окружением. На заключительной стадии эксперимента проводилось сравнение статистик идентичных аллофонов, присутствующих в речи дикторов. Основные этапы работы алгоритма представлены на рис. 1.

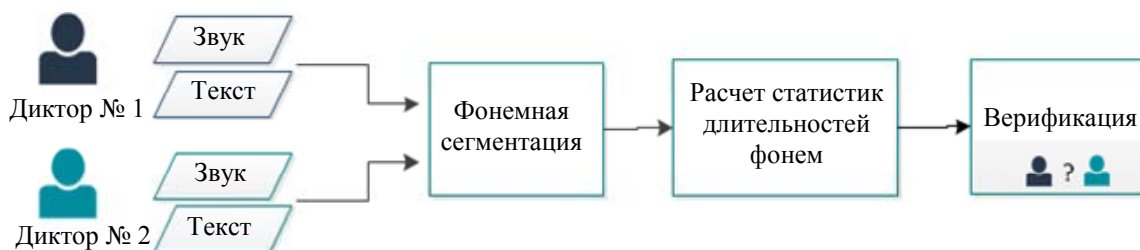


Рис. 1. Этапы работы алгоритма верификации на основе сравнения статистик длительности фонем

1. **Фонемная сегментация фонограмм, содержащих речь диктора № 1 и диктора № 2.** В процессе сегментации определяются временные границы каждого аллофона. После проведения автоматической сегментации в случае необходимости эксперт может откорректировать границы выделенных аллофонов.
2. **Вычисление средних длительностей для каждого аллофона по полученной сегментации.** При этом предполагается, что на фонограммах присутствует полный набор рассматриваемого множества аллофонов. В противном случае для недостающих аллофонов используются средние значения их длительностей, рассчитанные на дополнительной базе записей речи, принадлежащих многим различным дикторам, так называемой базе развития.
3. **Вычисление параметрической оценки различия голосов дикторов и принятие решения.** Параметры этой оценки вычисляются по базе развития. Кроме этого, оценивается пороговое значение оценки различия, которое используется для принятия решения о тождестве или различии голосов двух дикторов (верификация), присутствующих на паре фонограмм.

Описание фонемного сегментатора

Признаки для идентификации были получены с помощью фонемного автосегментатора [12]. При сегментации использовалась акустическая модель (АМ), параметры которой оценивались на базе объемом около 150 ч звучащей речи, состоящей из новостных передач, чтения и спонтанной речи на русском языке. АМ для сегментации представляет собой статистическую модель, построенную на основе скрытых марковских моделей (Hidden Markov Models, HMM) [13], в которых состояния моделей фонем или контекстных трифонов (фонем с определенным левым и правым контекстом) моделируются с помощью смеси гауссовых распределений (Gaussian Mixture Models, GMM) [13]. Каждое состояние трифона содержит три состояния. По типу извлекаемых акустических признаков данная АМ относится к классу тандемных акустических моделей, что означает, что в качестве акустических признаков используются контекстные признаки (Left Context – Right Context, LC-RC) [14]. Используется базовое множество из 54 фонетических классов, соответствующих фонемам русского языка и паузе. Из этого множества с применением процедуры связывания трифонов по фонетическому дереву находятся связанные состояния трифонов. Построенная таким образом АМ содержит всего 13700 связанных состояний. Каждое состояние трифона в АМ моделируется с помощью смеси гауссовых распределений, содержащей в среднем 14 гауссоид – это оптимальное количество для данной выборки, найденное с помощью алгоритма кросс-валидационного контроля состояний, описанного в работах [15, 16].

Фонемная сегментация выполняется автоматически с помощью модулей системы распознавания речи (Automatic Speech Recognition, ASR) с АМ, параметры которой описаны выше. Сегментация проводится на основе выравнивания (force alignment) транскрипции и звукового сигнала. Здесь под выравниванием подразумевается нахождение в звуковом файле моментов времени, соответствующих началам и концам произнесенных слов и фонем.

Качество сигнала исследуемых фонограмм может быть недостаточно высоким для надежной работы классического алгоритма выравнивания Витерби [13], например, содержать шумы, неречевые фрагменты. Также сами фонограммы могут иметь большую длительность, а текстовки к ним – содержать неточности и ошибки. Все эти факторы могут приводить к сбою работы алгоритма Витерби. В связи с этим в описанной системе используется алгоритм выравнивания на основе метода опорных фрагментов [17]. Основная идея метода заключается в нахождении так называемых «островков надежности» – участков фонограммы, которые задают разбиение исходной фонограммы на более короткие опорные фрагменты, для каждого из которых известна текстовка и транскрипция. Поиск «островков надежности» осуществляется путем запуска системы ASR на имеющейся фонограмме и последующего сравнения результата распознавания с имеющейся текстовой расшифровкой. Сравнение текстов проводится методом динамического программирования на основе расстояния Левенштейна [18]. Далее на этих более коротких фрагментах можно либо запускать выравнивание по алгоритму Витерби, либо повторять процедуру рекурсивно, как это делается в [17]. В данной схеме также целесообразно использовать алгоритм, описанный в [12].

Расчет оценки различия голосов дикторов

Для принятия решения о тождестве или различии голосов дикторов на двух фонограммах необходимо ввести некоторую скалярную величину – оценку различия. Она будет определять, насколько близки речевые характеристики, извлеченные из пары записей речи.

Предположим, что \mathbf{x} и \mathbf{y} – вектора, содержащие средние длительности для каждого аллофона. Размерность этих векторов тогда будет равна общему количеству рассматриваемых аллофонов. Далее определим оценку различия для двух таких векторов, которую здесь и далее будем называть евклидовой:

$$s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^d w_i (x_i - y_i)^2}, \quad (1)$$

где w_i – весовые коэффициенты; d – общее число аллофонов. Из формулы (1) видно, что для частного случая $w_i = 1$ для всех i , эта оценка превращается в евклидову метрику. В общем же случае мы имеем взвешенную евклидову метрику $s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{W} \mathbf{y}^T}$, которая определяется диагональной матрицей неотрицательных весов $\mathbf{W} = \text{diag}[w_1, w_2, \dots, w_d]$. Таким образом, чем меньше значение $s(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, тем более вероятно, что личности дикторов, говорящих на фонограммах, представленных векторами \mathbf{x} и \mathbf{y} , совпадают.

Экспериментальные результаты

Эксперименты проводились на базе речевых записей, включающей русскую речь 26 дикторов (6 мужчин и 20 женщин), каждый из которых был записан в 5 подходах. Иными словами, общее количество записей мужской речи было равно 30, женской – 100.

Предложенный алгоритм идентификации диктора был реализован на языке Python. Для оценки эффективности метода идентификации диктора использовалось значение равенства ошибок I и II рода – равновероятная ошибка (Equal Error Rate, EER, %) [1]. Для вычисления EER было сформировано два типа сравнений: свой-свой и свой-чужой – отдельно для каждого пола дикторов.

Нами было рассмотрено два способа назначения весовых коэффициентов в оценке различия. В первом случае все веса были равны 1. Другими словами, ни один из признаков не имел преимущества в значимости перед остальными. Во втором случае веса вычислялись по формуле:

$$w_i = \left(\frac{D_i^{between}}{D_i^{total}} \right)^\alpha, \tag{2}$$

где $D_i^{between}$ – межклассовая дисперсия i -ой координаты вектора признаков; D_i^{total} – дисперсия i -ой координаты вектора признаков; α – эмпирический степенной коэффициент, значение которого подбирается экспериментально. $D_i^{between}$ – дисперсия средних значений векторов-признаков, рассчитанных отдельно для каждого класса (под классом понимается совокупность всех векторов, соответствующих речи одного диктора).

Выбор такого вида весовых коэффициентов можно обосновать тем, что признаки с большей межклассовой дисперсией обладают большей дискриминирующей способностью. Иначе говоря, значение коэффициента должно быть пропорционально значению $D_i^{between}$. Однако в этом случае признаки с большой дисперсией могут стать более значимыми, вне зависимости от их информативности для классификации. В связи с этим значение межклассовой дисперсии нормируется на значение общей дисперсии D_i^{total} .

По формуле (2) были найдены 10 аллофонов, имеющих наибольший вес (от меньшего к большему), – [y_{1-й п/уд}], [н], [п'], [м], [н'], [а_{уд}], [л'], [у_{уд}], [и_{3/уд}], [а_{1-й п/уд}], а также 10 аллофонов, имеющих наименьший вес (от меньшего к большему), – [с], [э_{уд}], [т], [ш], [х'], [б'], [г'], [г'], [к'], [к], где апостроф обозначает мягкость согласного, а сокращения уд, п/уд, з/уд используются для обозначения положения гласного в зависимости от места ударения. Например, [а_{уд}] – гласный /а/ в ударной позиции, [y_{1-й п/уд}] – гласный /y/ в первом предударном слоге, [и_{3/уд}] – гласный /и/ в заударной позиции.

Приведенные результаты, несмотря на малый размер выборки, используемой для проведения исследования, позволяют сделать некоторые выводы:

1. большинство найденных аллофонов, имеющих наибольший вес, представляют собой гласные либо сонорные согласные (сонанты);
2. к числу аллофонов, имеющих наименьший вес, принадлежат глухие согласные.

Это свидетельствует о том, что наиболее информативными с точки зрения идентификации являются речевые участки, соответствующие гласным либо наиболее близким к ним по акустическим характеристикам сонорным согласным.

В таблице приведены значения EER для двух вариантов выбора оценки: евклидова метрика – равные веса, взвешенная евклидова метрика – веса, полученные из формулы (2). Как видно из таблицы, использование весов (2) повышает точность метода от 2,6% до 4%.

Пол	Оценка различия	EER, %
Мужчины	Евклидова метрика	25,56
	Взвешенная евклидова метрика	21,66
Женщины	Евклидова метрика	30,84
	Взвешенная евклидова метрика	28,29

Таблица. Показатели EER-идентификации по речи для двух полов дикторов

Кроме того, по полученным оценкам были построены ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic) [19] (рис. 2), которые показывают зависимости доли верных положительных ответов от

общего числа положительных ответов True Positive Rate (TPR) и доли ошибочных положительных ответов (тождество дикторов) от общего числа отрицательных ответов (различие дикторов) False Positive Rate (FPR). Также была исследована зависимость эффективности системы от значения степенного коэффициента. На рис. 3 приведены графики, показывающие наличие явного минимума (в области значений α , равных 5–6).

Обсуждение результатов и дальнейшие перспективы

Как показывают результаты проведенного эксперимента, разработанный метод статистик длительностей аллофонов фонем может быть применим для решения задачи идентификации диктора по речи в связи с тем, что ошибка идентификации данного метода сопоставима с уровнем EER других полуавтоматических методов [6]. Метод был апробирован на записях, содержащих русскоязычный материал. Также был предложен способ расчета весовых коэффициентов, который позволяет улучшить производительность метода.

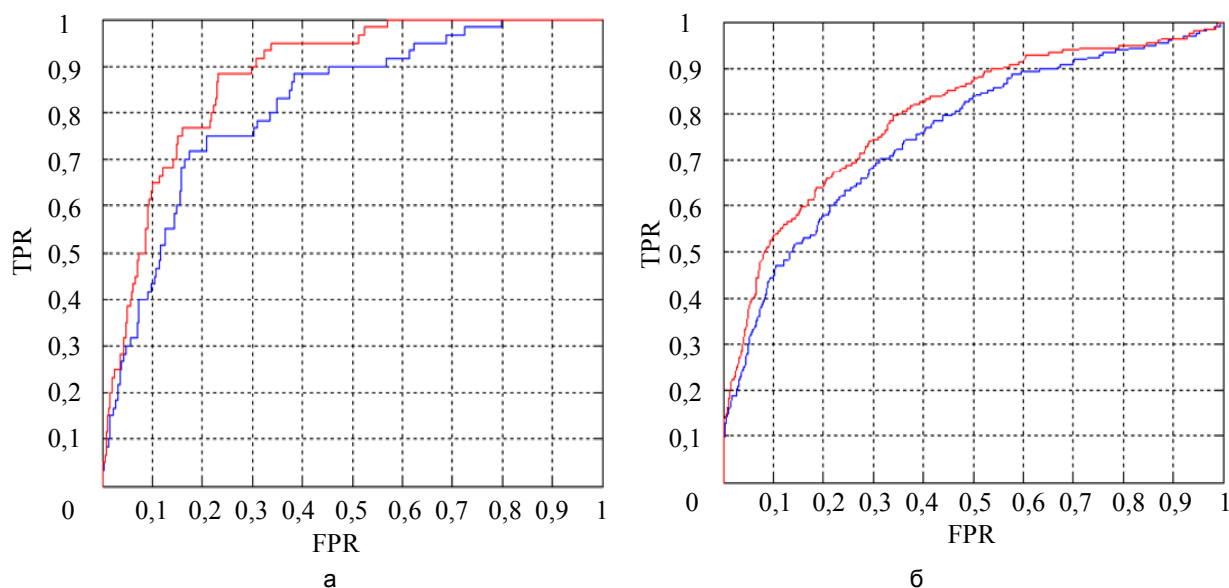


Рис. 2. ROC-кривые для мужчин (а) и женщин (б). Синий – евклидова метрика, красный – взвешенная евклидова метрика

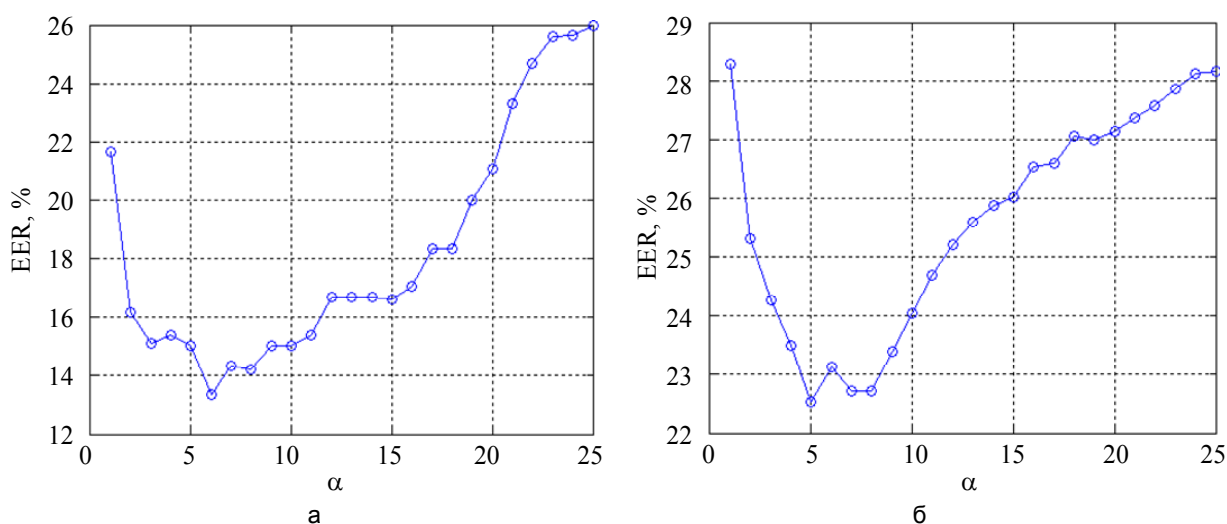


Рис. 3. Зависимость EER от значения коэффициента α для: мужчин (а); женщин (б)

Полученные данные подтверждают экспериментально установленный вывод [1] о том, что при верификации женских голосов алгоритмы, как правило, показывают худшую эффективность, чем в случае с мужскими голосами.

Следует отметить, что в представленном способе вычисления оценки никак не принимаются во внимание статистические зависимости между признаками – длинами аллофонов. В дальнейшем планируется расширить данную модель таким образом, чтобы она учитывала эти зависимости.

Другим недостатком описанной модели является невозможность работы в условиях пропущенных данных, т.е. когда один из аллофонов ни разу не встретился в записанном произнесении. В связи с этим планируется разработка вероятностной формулировки этой модели, которая позволит обрабатывать входные данные с пропусками. В дальнейшем планируется исследование эффективности работы данного метода с использованием больших объемов данных, при анализе фонограмм, содержащих иноязычную речь, а также в условиях повышенной зашумленности.

Заключение

В работе впервые предложен метод идентификации на основе сравнения статистик длительностей фонем, характерных для речи конкретного диктора. Рассмотрены особенности метода среди остальных полуавтоматических методов, проведены эксперименты, сделаны выводы и обозначены перспективы применения метода. Преимуществом метода является возможность его использования для проведения экспресс-анализа фонограмм большой длительности. Надежность метода составляет 71,7% на базе, содержащей записи женской речи, и 78,4% на базе, содержащей записи мужской речи. Также были выявлены наиболее информативные признаки по результатам ранжирования статистик длительностей русских фонем.

Литература

1. Kozlov A., Kudashev O., Matveev Y., Pekhovsky T., Simonchik K., Shulipa A. SVID speaker recognition system for the NIST SRE 2012 // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. V. 8113 LNAI. P. 278–285. doi: 10.1007/978-3-319-01931-4_37
2. Продан А.И., Таланов А.О. Использование набора слуховых характеристик речи при идентификации по голосу // *Материалы 14 международной конференции «Speech and Computer»*. SPECOM'2011. Казань, 2011. С. 338–344.
3. Коваль С.Л., Хитров М.В. Идентификация дикторов при анализе разноязычных фонограмм на основе сравнения формантных спектров [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://zhenilo.narod.ru/new_main/ips/2003_speech.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 7.11.2014).
4. Koval S. Formants matching as a robust method for forensic speaker identification // *Proc. 11th Int. Conf. on Speech and Computer*. St. Petersburg, 2006. P. 125–128.
5. Smirnova N., Starshinov A., Oparin I., Goloshchapova T. Using parameters of identical pitch contour elements for speaker discrimination // *Proc. 12th Int. Conf. on Speech and Computer (SPECOM 2007)*. Moscow, Russia, 2007. P. 361–366.
6. Смирнова Н.С. Идентификация дикторов на основе сравнения параметров реализации мелодических контуров высказываний [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2007/materials/html/77.htm>/ свободный. Яз. рус. (дата обращения 7.11.2014).
7. Коваль С.Л., Лабутин П.В., Пеховский Т.С., Прошина Е.А., Смирнова Е.А., Таланов А.О. Методика идентификации дикторов по голосу и речи на основе комплексного анализа фонограмм [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2007/materials/html/39.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 7.11.2014).
8. Попов Н.Ф., Линьков А.Н., Кураченкова Н.Б., Байчаров Н.В. Идентификация лиц по фонограммам русской речи на автоматизированной системе "Диалект". М.: Войсковая часть 34435, 1996. 102 с.
9. Rose P. Speaker verification under realistic forensic conditions // *Proc. 6th Australian Int. Conf. on Speech Science and Technology*. Adelaide, South Australia, 1996. P. 109–114.
10. Hollien H. *Forensic Voice Identification*. New York: Academic Press, 2001. 240 p.
11. Ladefoged P. *Preliminaries to Linguistic Phonetics*. Chicago: University of Chicago Press, 1971. 122 p.
12. Tomashenko N., Khokhlov Y. Fast algorithm for automatic alignment of speech and imperfect text data // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. V. 8113 LNAI. P. 146–153. doi: 10.1007/978-3-319-01931-4_20
13. Young S., Kershaw D., Odel J., Ollason D., Valtchev V., Woodland P. *The HTK Book*. Cambridge University Engineering Department, 2002. 271 p.
14. Schwarz P. *Phoneme Recognition Based on Long Temporal Context*. Ph.D. thesis. Brno University of Technology, 2008. 75 p.
15. Chernykh G., Korenevsky M., Levin K., Ponomareva I., Tomashenko N. State level control for acoustic model training // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014. V. 8773. P. 435–442.
16. Черных Г.А., Корневский М.Л., Левин К.Е., Пономарева И.А., Томашенко Н.А. Кроссвалидационный контроль состояний при обучении акустических моделей систем автоматического распознавания речи // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57. № 2. С. 23–28.
17. Moreno P., Joerg C., Van Thong J.-M., Glickman O. A recursive algorithm for the forced alignment of very long audio segments // *Proc. Int. Conf. on Spoken Language Processing (ICSLP 1998)*. Sydney, Australia, 1998. P. 2711–2714.

18. Khokhlov Y., Tomashenko N. Speech recognition performance evaluation for LVCSR system // Proc. 14th Int. Conf. on Speech and Computer (SPECOM 2011). Kazan', Russia, 2011. P. 129–135.
19. Fawcett T. An introduction to ROC analysis // Pattern Recognition Letters. 2006. V. 27. N 8. P. 861–874. doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010

- Булгакова Елена Владимировна*** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, bulgakova@speechpro.com
- Шолохов Алексей Владимирович*** – аспирант, Университет Восточной Финляндии, Йоэнсуу, FI-80101, Финляндия, sholohov@speechpro.com
- Томашенко Наталья Александровна*** – младший научный сотрудник, ООО «Центр речевых технологий», Санкт-Петербург, 196084, Российская Федерация; инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, tomashenko-n@speechpro.com
- Elena V. Bulgakova*** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, bulgakova@speechpro.com
- Alexei V. Sholokhov*** – postgraduate, University of Eastern Finland, Joensuu, FI-80101, Finland, sholohov@speechpro.com
- Natalia A. Tomashenko*** – junior scientific researcher, "Speech Technology Center", LLC, Saint Petersburg, 196084, Russian Federation; engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, tomashenko-n@speechpro.com

УДК 004.8

МАТРИЧНО-ВЕКТОРНЫЕ АЛГОРИТМЫ НОРМИРОВКИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО АПОСТЕРИОРНОГО ВЫВОДА В АЛГЕБРАИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЯХ

А.А. Золотин^a, А.Л. Тулупьев^{a, b}, А.В. Сироткин^b

^a Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504, Российская Федерация

^b СПИИРАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

Адрес для переписки: Alexander.tulupyev@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.12.14, принята к печати 15.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-78-85

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Золотин А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Матрично-векторные алгоритмы нормировки для локального апостериорного вывода алгебраических байесовских сетях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 78–85

Аннотация. Рассматривается задача описания локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях, являющихся одним из классов вероятностных графических моделей, с помощью матрично-векторных уравнений. Такие уравнения, в основном, были описаны в предыдущих работах, однако содержали нормирующие множители, вычисления которых использовали алгоритмическую компоненту, не получившую исковой интерпретации на матрично-векторном языке. Для устранения указанного недостатка нормирующие множители сначала были представлены в форме скалярного произведения. Удалось показать, что одна из компонент в каждом скалярном произведении выражается как степень Кронекера фиксированного вектора размерности два. За счет переноса транспонированной матрицы-оператора ненормированного апостериорного вывода внутри скалярного произведения было получено разложение одного из множителей в виде последовательности тензорных произведений векторов размерности два, причем такие векторы могут принимать лишь два значения в одном случае и три – в другом. Выбор указанных значений определяется структурой поступившего свидетельства. Второй компонентой скалярного произведения становятся векторы с исходными данными. Вычислительные эксперименты позволили построить соответствующие векторы, примеры некоторых из них приведены в работе. Описание в виде матрично-векторных уравнений локального апостериорного вывода упрощает разработку спецификации алгоритмов локального апостериорного вывода, обоснование их корректности и последующую реализацию с применением уже существующих библиотек. Также такие уравнения позволяют применить классические математические техники для анализа полученных результатов. Полученные результаты делают возможным использование метода отложенных вычислений: не формировать для проведения вычислений векторы большой размерности, а вычислять их компоненты за счет применения побитовых операций по мере надобности.

Ключевые слова: байесовские сети, апостериорный вывод, алгоритмы вывода, отложенные вычисления, побитовые операции.

Благодарности. Часть результатов, представленных в статье, была получена в рамках исследовательского проекта, поддержанного грантами РФФИ №№ 12-01-00945-а, 15-01-09001-а.

MATRIX-VECTOR ALGORITHMS FOR NORMALIZING FACTORS IN ALGEBRAIC BAYESIAN NETWORKS LOCAL POSTERIORI INFERENCE

A.A. Zolotin^a, A.L. Tulupyev^{a, b}, A.V. Sirotkin^b

^a Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation

^b SPIIRAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Alexander.tulupyev@gmail.com

Article info

Received 05.12.14, accepted 15.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-78-85

Article in Russian

Reference for citation: Zolotin A.A., Tulupyev A.L., Sirotkin A.V. Matrix-vector algorithms for normalizing factors in algebraic Bayesian networks local posteriori inference. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 78–85 (in Russian)

Abstract. We consider a task of local posteriori inference description by means of matrix-vector equations in algebraic Bayesian networks that represent a class of probabilistic graphical models. Such equations were generally presented in previous publications, however containing normalizing factors that were provided with algorithmic descriptions of their

calculations instead of the desired matrix-vector interpretation. To eliminate this gap, the normalized factors were firstly represented as scalar products. Then, it was successfully shown that one of the components in each scalar product can be expressed as a Kronecker degree of a constant two-dimensional vector. Later on, non-normalized posteriori inference matrix-operator transplantation and further transfer within each scalar product yielded a representation of one of the scalar product components as a sequence of tensor products of two-dimensional vectors. The latter vectors have only two possible values in one case and three values in the other. The choice among those values is determined by the structure of input evidence. The second component of each scalar products is the vector with original data. The calculations performed gave the possibility for constructing corresponding vectors; the paper contains a table with proper examples for some of them. Local posteriori inference representation for matrix-vector equations simplify the development of local posteriori inference algorithms, their verification and further implementation based on available libraries. These equations also give the possibility for application of classical mathematical techniques to the obtained results analysis. Finally, the results obtained make it possible to apply the method of postponed calculations. This method helps avoiding construction of big-size vectors; instead, the vectors components can be calculated just in time they are needed by means of bitwise operations.

Keywords: Bayesian networks, posteriori inference, inference algorithms, postponed calculations, bitwise operations.

Acknowledgements. The research was partially supported by RFBR Grants No. 12-01-00945-a, 15-01-09001-a.

Введение

Алгебраические байесовские сети (АБС) [1–3] являются одним из классов вероятностных графических моделей (ВГМ) [4], все более широко применяющихся в интеллектуальных системах поддержки принятия решений и рекомендательных системах [5–9], системах анализа безопасности, рисков и обнаружения отказов [10–13], интеллектуального анализа текстов для составления маркетинговых прогнозов [14], системах моделирования отклика экологических систем на различные изменения и воздействия [15] и др. Все классы ВГМ фактически являются представлением баз фрагментов знаний с неопределенностью, причем предполагается, что предметная область допускает декомпозицию на небольшие фрагменты знаний – совокупности локально тесно связанных объектов (например, утверждений или переменных), а фрагменты знаний на глобальном уровне имеют разреженные связи между собой [4, 16]. Такое разделение на локальный и глобальный уровни влечет потребность в обеспечении двух видов вывода над ВГМ – локального и глобального. Преимущество ВГМ состоит в том, что алгоритмы, реализующие локальный вид вывода, могут быть вычислительно сложными, что, однако, компенсируется малыми объемами данных, к которым такие алгоритмы применяются.

Одной из отличительных особенностей теории АБС [3, 4] является то, что в качестве математической модели фрагмента знаний в ней выступает идеал конъюнктов с оценками вероятности истинности его элементов, причем оценки истинности могут быть как скалярными, так и интервальными, что, в свою очередь, обеспечивается привлечением подхода Н. Нильссона [17] к введению вероятности истинности на пропозициональных формулах. Возможность систематического использования интервальных оценок вероятностей в ВГМ существенна для таких актуальных открытых вопросов их теории, как, например, обработка изначально несогласованных сведений [3, 4, 18], алгоритмизация автоматического обучения [4, 19, 20].

Хотя ряду видов локального логико-вероятностного вывода в АБС (проверки непротиворечивости, поддержания непротиворечивости, априорного вывода, вывода оценок чувствительности) было сопоставлено алгоритмическое описание, допускавшее дальнейшую реализацию [3, 4, 16, 21], сказывалось отсутствие их математического описания в рамках единого формализма, что либо затрудняло, либо делало невозможным изучение свойств получающихся результатов. В одном из опубликованных материалов [22] был предложен подход к формированию уравнений апостериорного вывода во фрагментах знаний АБС на матрично-векторном языке, однако ограничением полученного результата являлось то, что предложить соответствующие уравнения для нормирующих множителей не удалось.

В настоящей работе ставится цель устранить этот недостаток, для чего решаются задачи построения матрично-векторных уравнений для нормирующих множителей в локальном апостериорном выводе, а также указать способ использовать эти уравнения при алгоритмизации соответствующих вычислений.

Определения, обозначения и базовые результаты

Определим используемые далее математические объекты, более подробное описание которых доступно в [3, 4, 22].

Зафиксируем конечное множество атомарных пропозициональных формул (атомов) – упорядоченный алфавит $V = \{v_i\}_{i=0}^{n-1}$. Определим над указанными атомами два набора «базовых» пропозициональных формул. Первый набор – идеал конъюнктов,

$$\{v_{i_1} v_{i_2} \dots v_{i_k} \mid 0 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n - 1, 0 \leq k \leq n\},$$

где $v_{i_1} v_{i_2} \dots v_{i_k}$ – означает конъюнкцию соответствующих переменных; сам знак конъюнкции мы для удобства опустим. С учетом заданного алфавита каждому из конъюнктов вида $v_{i_2} \dots v_{i_k}$ можно сопоставить характеристический вектор, а ему, в свою очередь, двоичное число, которое рассматривается как номер конъюнкта [3, 4]. Для определения второго набора формул – множества квантов – будет полезным следующее

обозначение. Литерал \tilde{v}_i означает, что на его месте в пропозициональной формуле может стоять либо v_i , либо его отрицание \bar{v}_i . Тогда множество квантов над алфавитом $V = \{v_i\}_{i=0}^{n-1} - Q = \{\tilde{v}_0 \tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_{n-1}\}$. Иными словами, квант – это конъюнкция, которая для любой переменной из алфавита содержит либо ее саму, либо ее отрицание.

Векторы $\mathbf{P}_c = \begin{pmatrix} 1 \\ p(c_1) \\ \vdots \\ p(c_{2^n-1}) \end{pmatrix}$ и $\mathbf{P}_q = \begin{pmatrix} p(q_0) \\ p(q_1) \\ \vdots \\ p(q_{2^n-1}) \end{pmatrix}$ содержат вероятности конъюнктов и квантов соот-

ветственно. При анализе процессов локального логико-вероятностного вывода вектор \mathbf{P}_c рассматривается как представление фрагмента знаний с оценками вероятности истинности его элементов, а вектор \mathbf{P}_q оказывается необходим как в математических выкладках, так и при последующей алгоритмической реализации. Эти векторы выражаются друг через друга с помощью соотношений $\mathbf{P}_q = \mathbf{I}_n \mathbf{P}_c$, $\mathbf{P}_c = \mathbf{J}_n \mathbf{P}_q$, где $\mathbf{I}_n = \mathbf{I}_1^{[n]}$, $\mathbf{I}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{J}_n = \mathbf{J}_1^{[n]}$, $\mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Показатель $[n]$ используется для обозначения степени Кронекера матриц, а ниже символ \otimes – для обозначения тензорного (прямого) произведения матриц [23].

В теории АБС под свидетельством понимаются новые «обуславливающие» данные, которые поступили во фрагмент знаний и с учетом которых нам требуется пересмотреть все (или некоторые) оценки. В настоящей работе мы рассмотрим только детерминированное свидетельство; другие случаи сводятся к его рассмотрению в [4]. Мы говорим, что на вход системы поступило детерминированное свидетельство, если новые сведения представимы в виде конъюнкции атомарных переменных и их отрицаний. Примерами таких свидетельств могут быть $\langle v_0 \rangle$, $\langle \bar{v}_2 v_1 v_0 \rangle$. Заметим, что такое свидетельство можно разбить на «положительный» и «отрицательный» конъюнкты. В первый входят все положительно означенные атомарные переменные свидетельства, а во второй – отрицательно. При этом и положительной, и отрицательной части можно сопоставить индекс, соответствующий десятичному представлению двоичного числа, являющегося характеристическим вектором положительного (или отрицательного) свидетельства, и наши свидетельства можно будет записать следующими эквивалентными обозначениями:

$$\langle \bar{v}_2 v_1 v_0 \rangle = \langle v_0 v_1, \bar{v}_2 \rangle = \langle 3, 4 \rangle = \langle 011_2, 100_2 \rangle.$$

Далее, мы полагаем, что нам поступило свидетельство $\langle i; j \rangle$. Обратим наше внимание к вектору вероятностей квантов и попробуем вычислить условные вероятности квантов и конъюнктов при условии поступившего детерминированного свидетельства. Для этого понадобятся матрицы $\mathbf{H}^{(i,j)} = \tilde{\mathbf{H}}_{n-1}^{(i,j)} \otimes \tilde{\mathbf{H}}_{n-2}^{(i,j)} \otimes \dots \otimes \tilde{\mathbf{H}}_0^{(i,j)}$, где

$$\tilde{\mathbf{H}}_k^{(i,j)} = \begin{cases} \mathbf{H}^+, & \text{если } v_k \text{ входит в } c_i, \\ \mathbf{H}^-, & \text{если } v_k \text{ входит в } c_j, \\ \mathbf{H}^\circ, & \text{иначе;} \end{cases}$$

причем $\mathbf{H}^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$; $\mathbf{H}^- = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$; $\mathbf{H}^\circ = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$; $\mathbf{T}^{(i,j)} = \tilde{\mathbf{T}}_{n-1}^{(i,j)} \otimes \tilde{\mathbf{T}}_{n-2}^{(i,j)} \otimes \dots \otimes \tilde{\mathbf{T}}_0^{(i,j)}$, где

$$\tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)} = \begin{cases} \mathbf{T}^+, & \text{если } v_k \text{ входит в } c_i, \\ \mathbf{T}^-, & \text{если } v_k \text{ входит в } c_j, \\ \mathbf{T}^\circ, & \text{иначе;} \end{cases}$$

причем $\mathbf{T}^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$; $\mathbf{T}^- = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$; $\mathbf{T}^\circ = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Заметим, что $\mathbf{T}^{(i,j)} = \mathbf{J}_n \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{I}_n$.

В принятых обозначениях уравнения апостериорного вывода примут следующий вид [22]:

$$\mathbf{P}_q^{(i,j)} = \frac{1}{(1, \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{P}_q)} \cdot \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{P}_q; \quad \mathbf{P}_c^{(i,j)} = \frac{1}{(\mathbf{T}^{(i,j)} \mathbf{P}_c)[0]} \cdot \mathbf{T}^{(i,j)} \times \mathbf{P}_c,$$

где в левой части равенств стоят апостериорные вероятности квантов и конъюнктов соответственно при поступившем детерминированном свидетельстве $\langle i; j \rangle$, а $[0]$ указывает на верхний компонент вектора, получающегося в результате произведения $\mathbf{T}^{(i,j)} \mathbf{P}_c$.

Анализ структуры нормирующих множителей

Существенным недостатком этих уравнений является незавершенный анализ структуры выражений, стоящих в знаменателях и, таким образом, являющихся нормирующими множителями. Чтобы преодолеть указанный недостаток, докажем следующую теорему.

Теорема. $(\mathbf{T}^{(i,j)} \mathbf{P}_c)[0] = (\mathbf{r}^{(i,j)}, \mathbf{P}_c)$, $(1, \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{P}_q) = (\mathbf{s}^{(i,j)}, \mathbf{P}_q)$,

где $\mathbf{r}^{(i,j)} = \otimes_{k=0}^{n-1} \tilde{\mathbf{r}}_k^{(i,j)}$, $\tilde{\mathbf{r}}_k^{(i,j)} = \begin{cases} \mathbf{r}^+, & \text{если } v_k \text{ входит в } c_i, \\ \mathbf{r}^-, & \text{если } v_k \text{ входит в } c_j, \\ \mathbf{r}^\circ, & \text{иначе;} \end{cases}$

причем $\mathbf{r}^+ = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{r}^- = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{r}^\circ = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$,

и где $\mathbf{s}^{(i,j)} = \otimes_{k=0}^{k=n-1} \tilde{\mathbf{s}}_k^{(i,j)}$, $\tilde{\mathbf{s}}_k^{(i,j)} = \begin{cases} \mathbf{s}^+, & \text{если } v_k \text{ входит в } C_i, \\ \mathbf{s}^-, & \text{если } v_k \text{ входит в } C_j, \\ \mathbf{s}^\circ, & \text{иначе;} \end{cases}$

причем $\mathbf{s}^+ = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{s}^- = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $\mathbf{s}^\circ = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Доказательство. Выполним ряд преобразований

$$(\mathbf{T}^{(i,j)} \mathbf{P}_c)[0] = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{T}^{(i,j)} \mathbf{P}_c \right) = \left(\mathbf{T}^{(i,j)T} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{P}_c \right).$$

Вспользуемся тем, что $\mathbf{T}^{(i,j)} = \tilde{\mathbf{T}}_{n-1}^{(i,j)} \otimes \tilde{\mathbf{T}}_{n-2}^{(i,j)} \otimes \dots \otimes \tilde{\mathbf{T}}_0^{(i,j)}$, причем матрица $\tilde{\mathbf{T}}$, в свою очередь, может принимать одно из трех возможных значений:

$$\mathbf{T}^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{T}^- = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{T}^\circ = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Подставим полученное нами ранее разложение матрицы $\mathbf{T}^{(i,j)}$ в нормирующий множитель и перегруппируем:

$$\begin{aligned} \left(\mathbf{T}^{(i,j)T} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{P}_c \right) &= \left(\left(\tilde{\mathbf{T}}_{n-1}^{(i,j)T} \otimes \tilde{\mathbf{T}}_{n-2}^{(i,j)T} \otimes \dots \otimes \tilde{\mathbf{T}}_0^{(i,j)T} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{P}_c \right) = \\ &= \left(\left(\tilde{\mathbf{T}}_{n-1}^{(i,j)T} \otimes \tilde{\mathbf{T}}_{n-2}^{(i,j)T} \otimes \dots \otimes \tilde{\mathbf{T}}_0^{(i,j)T} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{P}_c \right) = \left(\left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{P}_c \right) \\ &= \left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \left(\tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right), \mathbf{P}_c \right). \end{aligned}$$

Матрица $\tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)}$ принимает лишь три возможных значения; значит, будет существовать всего три возможных варианта вектора $\tilde{\mathbf{r}}_k^{(i,j)}$: $\tilde{\mathbf{r}}_k^{(i,j)} = \tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. Рассмотрим эти варианты: $\mathbf{r}^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{r}^- = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{r}^\circ = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Таким образом, принимая во внимание $\mathbf{r}^{(i,j)} = \otimes_{k=0}^{k=n-1} \tilde{\mathbf{r}}_k^{(i,j)}$, приходим к выводу

$$\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{T}^{(i,j)} \mathbf{P}_c \right) = (\mathbf{r}^{(i,j)}, \mathbf{P}_c).$$

Теперь обратимся к скалярному произведению $(\mathbf{1}, \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{P}_q)$. Перенесем матрицу $\mathbf{H}^{(i,j)}$ в левую часть скалярного произведения и произведем перегруппировку:

$$(\mathbf{1}, \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{P}_q) = (\mathbf{H}^{(i,j)T} \mathbf{1}, \mathbf{P}_q) = \left(\left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \tilde{\mathbf{H}}_k^{(i,j)T} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}^{[n]}, \mathbf{P}_q \right) = \left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \left(\tilde{\mathbf{H}}_k^{(i,j)T} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right), \mathbf{P}_q \right).$$

Вспользуемся тем, что $\mathbf{T}^{(i,j)T} = \mathbf{I}_1^{[n]T} \mathbf{H}^{(i,j)T} \mathbf{J}_1^{[n]T} = \mathbf{I}_1^{[n]T} \mathbf{H}^{(i,j)T} \mathbf{J}_1^{[n]T}$ и выразим $\tilde{\mathbf{H}}_k^{(i,j)T}$ через $\mathbf{T}^{(i,j)T}$: $\tilde{\mathbf{H}}_k^{(i,j)T} = \mathbf{J}_1^{[n]T} \mathbf{T}^{(i,j)T} \mathbf{I}_1^{[n]T}$. Подставим полученный результат в скалярное произведение, получим:

$$\left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \left(\tilde{\mathbf{H}}_k^{(i,j)T} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right), \mathbf{P}_q \right) = \left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \left(\mathbf{J}_1^{[n]T} \tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T} \mathbf{I}_1^{[n]T} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right), \mathbf{P}_q \right).$$

Заметим, что $\tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T}$ имеет всего 3 означивания. Рассмотрим все три:

$$\mathbf{T}^{+T} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{T}^{-T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}; \mathbf{T}^{\circ T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Принимая во внимание все сказанное ранее, рассмотрим вектор $\tilde{\mathbf{s}}_k^{(i,j)}$:

$$\tilde{\mathbf{s}}_k^{(i,j)} = \mathbf{J}_1^{[k]T} \tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T} \mathbf{I}_1^{[k]T} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Из определения вектора $\tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T}$ следует, что и вектор $\tilde{\mathbf{s}}_k^{(i,j)}$ имеет всего 3 означивания. Распишем каждый из случаев подробнее:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}^+ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{s}^- &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{s}^\circ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Наконец, выстроим окончательную цепочку равенств:

$$(\mathbf{1}, \mathbf{H}^{(i,j)} \mathbf{P}_q) = \left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \left(\mathbf{J}_1^{[k]T} \times \tilde{\mathbf{T}}_k^{(i,j)T} \times \mathbf{I}_1^{[k]T} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right), \mathbf{P}_q \right) = \left(\otimes_{k=0}^{k=n-1} \tilde{\mathbf{s}}_k^{(i,j)}, \mathbf{P}_q \right) = (\mathbf{s}^{(i,j)}, \mathbf{P}_q) \blacksquare.$$

В таблице приведено несколько примеров, иллюстрирующих объекты, которые строятся в утверждении доказанной теоремы.

	Фрагмент знаний	Свидетельство	Вектор-селектор $\mathbf{s}^{(i,j)}$	Вектор-редистрибьютор $\mathbf{r}^{(i,j)}$
1.	$V_1 = \{v_0, v_1\}$	$V_2 = \{v_1\}$ $\langle v_1 \rangle = \langle 2, 0 \rangle$ $= \langle 10; 00 \rangle$	$\mathbf{s}^{(2,0)}$ $= s^\circ$ $\otimes s^+$ $\mathbf{s}^{(2,0)T} = (0\ 0\ 1\ 1)$	$\mathbf{r}^{(2,0)} = r^\circ$ $\otimes r^+$ $\mathbf{r}^{(2,0)T} = (0\ 0\ 1\ 0)$
2.	$V_1 = \{v_0, v_1\}$	$V_2 = \{v_1\}$ $\langle \bar{v}_1 \rangle = \langle 0, 2 \rangle$ $= \langle 00; 10 \rangle$	$\mathbf{s}^{(0,2)}$ $= s^\circ$ $\otimes s^-$ $\mathbf{s}^{(0,2)T} = (1\ 1\ 0\ 0)$	$\mathbf{r}^{(0,2)} = r^\circ$ $\otimes r^-$ $\mathbf{r}^{(0,2)T} = (1\ 0\ \bar{1}\ 0)$
3.	$V_1 = \{v_0, v_1, v_2\}$	$V_2 = \{v_0, v_1\}$ $\langle \bar{v}_0 \bar{v}_1 \rangle = \langle 0; 3 \rangle$ $= \langle 000; 011 \rangle$	$\mathbf{s}^{(0,3)}$ $= s^-$ $\otimes s^-$ $\otimes s^\circ$ $\mathbf{s}^{(0,3)T} = (1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0)$	$\mathbf{r}^{(0,3)} = r^-$ $\otimes r^-$ $\otimes r^\circ$ $\mathbf{r}^{(0,3)T} = (1\ \bar{1}\ \bar{1}\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$
4.	$V_1 = \{v_0, v_1, v_2\}$	$V_2 = \{v_0, v_1\}$ $\langle v_0 v_1 \rangle = \langle 3; 0 \rangle$ $= \langle 011; 000 \rangle$	$\mathbf{s}^{(3,0)}$ $= s^+$ $\otimes s^+$ $\otimes s^\circ$ $\mathbf{s}^{(3,0)T} = (0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1)$	$\mathbf{r}^{(3,0)} = r^+$ $\otimes r^+$ $\otimes r^\circ$ $\mathbf{r}^{(3,0)T} = (0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$
5.	$V_1 = \{v_0, v_1, v_2\}$	$V_2 = \{v_0, v_1\}$ $\langle \bar{v}_0 \bar{v}_1 \rangle = \langle 2; 1 \rangle$ $= \langle 010; 001 \rangle$	$\mathbf{s}^{(2,1)}$ $= s^-$ $\otimes s^+$ $\otimes s^\circ$ $\mathbf{s}^{(2,1)T} = (0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0)$	$\mathbf{r}^{(2,1)} = r^-$ $\otimes r^+$ $\otimes r^\circ$ $\mathbf{r}^{(2,1)T} = (0\ 0\ 1\ \bar{1}\ 0\ 0\ 0\ 0)$
6.	$V_1 = \{v_0, v_1, v_2\}$	$V_2 = \{v_0, v_1\}$ $\langle v_0 \bar{v}_1 \rangle = \langle 1; 2 \rangle$ $= \langle 001; 010 \rangle$	$\mathbf{s}^{(1,2)}$ $= s^+$ $\otimes s^-$ $\otimes s^\circ$ $\mathbf{s}^{(1,2)T} = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0)$	$\mathbf{r}^{(1,2)} = r^+$ $\otimes r^-$ $\otimes r^\circ$ $\mathbf{r}^{(1,2)T} = (0\ 1\ 0\ \bar{1}\ 0\ 0\ 0\ 0)$
7.	$V_1 = \{v_0, v_1, v_2\}$	$V_2 = \{v_0, v_2\}$ $\langle v_0 v_2 \rangle = \langle 5; 0 \rangle$ $= \langle 101; 000 \rangle$	$\mathbf{s}^{(5,0)}$ $= s^+$ $\otimes s^\circ$ $\otimes s^+$ $\mathbf{s}^{(5,0)T} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1)$	$\mathbf{r}^{(5,0)} = r^+$ $\otimes r^\circ$ $\otimes r^+$ $\mathbf{r}^{(5,0)T} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0)$
8.	$V_1 = \{v_0, v_1, v_2\}$	$V_2 = \{v_0, v_2\}$ $\langle v_0 \bar{v}_2 \rangle = \langle 1; 4 \rangle$ $= \langle 001; 100 \rangle$	$\mathbf{s}^{(1,4)}$ $= s^+$ $\otimes s^\circ$ $\otimes s^-$ $\mathbf{s}^{(1,4)T} = (0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$\mathbf{r}^{(1,4)} = r^+$ $\otimes r^\circ$ $\otimes r^-$ $\mathbf{r}^{(1,4)T} = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ \bar{1}\ 0\ 0)$

Примечание. В таблице число -1 заменено символом $\bar{1}$

Таблица. Векторы-селекторы и векторы-редистрибьюторы

Технологическое применение результата

По построению вектор-селектор состоит из 0 и 1 и может интерпретироваться как характеристический вектор, соответствующий заданному свидетельству: этот характеристический вектор позволяет отобрать те кванты, которые не противоречат поступившему детерминированному свидетельству $\langle i, j \rangle$. С вычислительной точки зрения интересно то, что с помощью побитовых операций, которые поддерживаются значительным числом современных языков программирования, в том числе T-SQL, каждый компонент вектора-селектора $\mathbf{s}^{(i,j)}$ может быть выражен непосредственно через индексы $\langle i, j \rangle$, задающие свидетельство. Это позволяет не формировать сразу весь вектор-селектор размерности 2^n в памяти ЭВМ, а отложить его вычисление до тех пор, пока не потребуется конкретная его компонента. Для дальнейших рассуждений нам потребуется небольшое число новых обозначений и определений.

Мы говорим, что квант q_m согласован со свидетельством $\langle c_i, c_j \rangle$, если все атомы конъюнкта c_i положительно означены в q_m , а все атомы конъюнкта c_j означены отрицательно. Точка над знаками логических операций означает, что они выполняются побитово. Функция bitscount выдает число ненулевых бит в двоичном представлении своего целочисленного аргумента.

Рассмотрим структуру вектора-селектора $\mathbf{s}^{(i,j)}$. Заметим, что на позиции m вектора-селектора единица будет стоять тогда и только тогда, когда квант q_m согласован со свидетельством $\langle c_i, c_j \rangle$. Это, в частности, значит, что на всех позициях, где в двоичном представлении i стоит единица в m , также должна быть единица. В частности, это значит, что $(m \& i = i)$. С другой стороны, на всех позициях, в которых j содержит единичные биты, m должно содержать нули. В противном случае квант q_m не будет согласован с отрицательным свидетельством. Это значит, что $(\bar{m} \& j = j)$.

Таким образом, любой элемент вектора-селектора $\mathbf{s}^{(i,j)}$ можно выразить, воспользовавшись следующей формулой:

$$\mathbf{s}^{(i,j)}[m] = \begin{cases} 1, & \text{если } (m \& i = i) \text{ и } (\bar{m} \& j = j), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где i и j – это числа, двоичное представление которых является характеристическими векторами конъюнктов, представляющих положительно и отрицательно означенные свидетельства соответственно в означенном алфавите.

Следует заметить [4, 24], что $\mathbf{s}^{(i,j)}[m] = \mathbf{H}^{(i,j)}[m, m]$.

Аналогичный прием в отношении операций с битами в двоичном представлении индексов i, j, m может использоваться для выражения компонент вектора $\mathbf{r}^{(i,j)}$:

$$\mathbf{r}^{(i,j)}[m] = \begin{cases} 0, & m \& i \neq i, \\ 0, & (\bar{i} \vee j) \& m \neq 0 \\ (-1)^{\text{bitcount}(j \& m)}, & \text{иначе.} \end{cases}$$

В случае вектора-редистрибьютора нам будет удобнее не рассуждать о совместности свидетельств, а напрямую обратиться к полученной выше форме представления через тензорное произведение. Рассмотрим все места, где в тензорном произведении встречается $\mathbf{r}^+ = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Заметим, что позиции \mathbf{r}^+ определяются положительным свидетельством, а именно – единичными битами в индексе положительного свидетельства. Если в позиции, где i содержит единичный бит, m будет содержать нуль, то в определении значения m -го элемента вектора $\mathbf{r}^{(i,j)}$ будет участвовать верхний (нулевой) элемент вектора \mathbf{r}^+ , что заведомо обращает указанный элемент в нуль. Таким образом, мы получаем первую строку указанного выше равенства.

Теперь рассмотрим позиции, где встречается $\mathbf{r}^\circ = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. Рассуждения будут аналогичны предыдущему случаю. Вектор \mathbf{r}° встречается там, где одновременно индексы положительного отрицательного свидетельства имеют нулевой бит, т.е. позиции, где выражение $(\bar{i} \vee j)$ имеет единицу в двоичной записи. Заметим, что если в такой позиции у m в двоичной записи будет единица, то при вычислениях будет использоваться нижний (равный нулю) элемент вектора \mathbf{r}° . Иначе говоря, если у $(\bar{i} \vee j)$ и m будет единица в одной и той же позиции двоичной записи, то m -й элемент вектора $\mathbf{r}^{(i,j)}$ заведомо будет нулем. Эта ситуация в точности соответствует второй строке приведенного выше равенства. Следует заметить, что первое и второе условие не являются взаимоисключающими и могут выполняться одновременно, но так как в обоих случаях соответствующий элемент вектора $\mathbf{r}^{(i,j)}$ равен нулю, то мы можем написать их и по отдельности.

Выше мы разобрали все ситуации, когда $\mathbf{r}^{(i,j)}[m]$ равно нулю. Рассмотрим оставшиеся значения. Так как \mathbf{r}^+ и \mathbf{r}° либо обращают значение в нуль, либо не меняют его (умножают на единицу), а ситуации с нулем мы разобрали, то они не будут оказывать влияния на оставшуюся ситуацию. Остается определиться со вкладом $\mathbf{r}^- = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ в итоговое значение. Если в соответствующей позиции двоичной записи m стоит нуль, то в вычислении используется верхний (равный единице) элемент вектора \mathbf{r}^- , который не оказывает влияния на результат. Остается ситуация, когда в соответствующей позиции двоичной записи m стоит единица, при этом происходит умножение на минус один. Но таких мест, где единица встречается в двоичной записи m и двоичной записи j одновременно, ровно столько, сколько ненулевых бит в числе $j \& m$. Это в точности приводит нас к последней строке указанного выше равенства.

Заметим, что такая возможность по вычислению коэффициентов позволяет в расчетах воспользоваться концепцией отложенных вычислений. Нам не требуется строить сразу весь вектор $\mathbf{s}^{(i,j)}$ или вектор $\mathbf{r}^{(i,j)}$. Наоборот, в программной реализации мы сможем вычислить любую их компоненту по мере необходимости, избегая хранения вспомогательных объектов значительной размерности.

Заключение

В настоящей работе завершена разработка описания локального логико-вероятностного вывода с помощью матрично-векторных уравнений, которые существенно опираются на использование тензорного

произведения матриц, степени Кронекера и свойств этих операций. Наличие такого описания, с одной стороны, упрощает разработку спецификации алгоритмов и делает возможным ее обоснование, а с другой стороны, открывает путь к применению классических математических техник для анализа полученных результатов. Особенности структуры векторов, которые участвуют в вычислении нормирующих коэффициентов, позволяют не строить их в процессе вычислений целиком, а генерировать их компоненты по мере их потребности в вычислениях. Наконец, воплощение алгоритмов апостериорного вывода в коде программ облегчается за счет возможности применить уже существующие библиотеки, эффективно реализующие матрично-векторные объекты и операции.

Литература

1. Городецкий В.И. Алгебраические байесовские сети – новая парадигма экспертных систем // Юбилейный сборник трудов отделения информатики, вычислительной техники и автоматизации РАН. Т. 2. М.: РАН, 1993. С. 120–141.
2. Городецкий В.И., Тулупьев А.Л. Формирование непротиворечивых баз знаний с неопределенностью // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 1997. Т. 36. № 5. С. 33–42.
3. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.
4. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Николенко С.И. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. СПб.: СПбГУ, 2009. 400 с.
5. Bobadilla J., Ortega F., Hernando A., Gutierrez A. Recommender systems survey // Knowledge-Based Systems. 2013. V. 46. P. 109–132. doi: 10.1016/j.knosys.2013.03.012
6. Borrás J., Moreno A., Valls A. Intelligent tourism recommender systems: a survey // Expert Systems with Applications. 2014. V. 41. N 16. P. 7370–7389. doi: 10.1016/j.eswa.2014.06.007
7. Constantinou A.C., Fenton N.E., Neil M. Pi-football: a Bayesian network model for forecasting Association Football match outcomes // Knowledge-Based Systems. 2012. V. 36. P. 322–339. doi: 10.1016/j.knosys.2012.07.008
8. Kim J.-S., Jun C.-H. Ranking evaluation of institutions based on a Bayesian network having a latent variable // Knowledge-Based Systems. 2013. V. 50. P. 87–99. doi: 10.1016/j.knosys.2013.05.010
9. Ngoduy D., Watling D., Timms P., Tight M. Dynamic Bayesian belief network to model the development of walking and cycling schemes // International Journal of Sustainable Transportation. 2013. V. 7. N 5. P. 366–388. doi: 10.1080/15568318.2012.674627
10. Weber P., Medina-Oliva G., Simon C., Jung B. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. V. 25. N 4. P. 671–682. doi: 10.1016/j.engappai.2010.06.002
11. Chen T.-T., Leu S.-S. Fall risk assessment of cantilever bridge projects using Bayesian network // Safety Science. 2014. V. 70. P. 161–171. doi: 10.1016/j.ssci.2014.05.011
12. Hu Y., Zhang X., Ngai E.W.T., Cai R., Liu M. Software project risk analysis using Bayesian networks with causality constraints // Decision Support Systems. 2013. V. 56. N 1. P. 439–449. doi: 10.1016/j.dss.2012.11.001
13. Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches // Reliability Engineering and System Safety. 2011. V. 96. N 8. P. 925–932. doi: 10.1016/j.ress.2011.03.012
14. Khadjeh Nassiroussi A., Aghabozorgi S., Ying Wah T., Ngo D.C.L. Text mining for market prediction: a systematic review // Expert Systems with Applications. 2014. V. 41. N 16. P. 7653–7670. doi: 10.1016/j.eswa.2014.06.009
15. Landuyt D., Broekx S., D'hondt R., Engelen G., Aertsen J., Goethals P.L.M. A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling // Environmental Modelling and Software. 2013. V. 46. P. 1–11. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.03.011
16. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Алгебраические байесовские сети: принцип декомпозиции и логико-вероятностный вывод в условиях неопределенности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 10. С. 85–87.
17. Nilsson N.J. Probabilistic logic // Artificial Intelligence. 1986. V. 28. N 1. P. 71–87. doi: 10.1016/0004-3702(86)90031-7
18. Schippers M. Probabilistic measures of coherence: from adequacy constraints towards pluralism // Synthese. 2014. V. 191. N 16. P. 3821–3845. doi: 10.1007/s11229-014-0501-7
19. Larrañaga P., Karshenas H., Bielza C., Santana R. A review on evolutionary algorithms in Bayesian network learning and inference tasks // Information Sciences. 2013. V. 233. P. 109–125. doi: 10.1016/j.ins.2012.12.051
20. de Campos L.M., Castellano J.G. Bayesian network learning algorithms using structural restrictions // International Journal of Approximate Reasoning. 2007. V. 45. N 2. P. 233–254. doi: 10.1016/j.ijar.2006.06.009

21. Тулупьев А.Л. Апостериорные оценки вероятностей в алгебраических байесовских сетях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2012. № 2. С. 51–59.
22. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Матричные уравнения локального логико-вероятностного вывода оценок истинности элементов в алгебраических байесовских сетях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. 2012. № 3. С. 63–72.
23. Беллман Р. Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1969. 375 с.
24. Сироткин А.В. Алгебраические байесовские сети: вычислительная сложность алгоритмов логико-вероятностного вывода в условиях неопределенности. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: СПбГУ, 2011. 218 с.

- Золотин Андрей Александрович* – студент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504, Российская Федерация, andrey.zolotin@gmail.com
- Тулупьев Александр Львович* – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, СПИИРАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504, Российская Федерация, Alexander.tulupyev@gmail.com
- Сироткин Александр Владимирович* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, СПИИРАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, Alexander.sirotkin@gmail.com
- Andrei A. Zolotin* – student, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation, andrey.zolotin@gmail.com
- Alexander L. Tulupyev* – D.Sc., Associate professor, Head of Laboratory, SPIIRAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation, Alexander.tulupyev@gmail.com
- Alexander V. Sirotkin* – PhD, senior scientific researcher, SPIIRAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, Alexander.sirotkin@gmail.com

УДК 004.627

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УСТРАНЕНИЯ БЛОКИНГ-ЭФФЕКТА ПУТЕМ ВНУТРИКАДРОВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ СЕГМЕНТОВ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

И.С. Рубина^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

Адрес для переписки: gubren@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.04.14, принята к печати 23.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-86-93

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Рубина И.С. Исследование методов устранения блокинг-эффекта путем внутрикадровой интерполяции сегментов видеопоследовательности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 86–93

Аннотация. Рассматриваются методы интерполяции изображений и возможность их применения в процессе сжатия видеоданных для устранения ряда артефактов, связанных как с динамическими свойствами объектов видеопоследовательности, так и с алгоритмами, используемыми в последовательности этапов кодирования. Основным недостатком существующих методов является высокая вычислительная сложность алгоритмов, неприемлемая при обработке видео. В ходе исследования предложено использование интерполяции отсчетов сигнала для устранения блокинг-эффекта на выходе блока кодирования преобразованием. Было необходимо разработать методы повышения степени сжатия и качества восстановленных видеоданных путем устранения блокинг-эффекта на границах сегментов путем внутрикадровой интерполяции сегментов видеопоследовательности. Сущностью разработанных методов является использование адаптивного рекурсивного алгоритма с адаптивным размером ядра интерполяции как с учетом градиента яркости на границах блоков и объектов видеопоследовательности, так и без него. В рамках теоретической части исследования использовались методы теории информации (RD-теории и устранения избыточности данных), методы распознавания образов и цифровой обработки сигналов, а также методы теории вероятностей. В рамках экспериментального исследования проведена программная реализация алгоритмов сжатия с последующим сравнением реализованных алгоритмов с уже существующими алгоритмами. Проведено сравнение предлагаемых алгоритмов с алгоритмом простого усреднения и адаптивным алгоритмом интерполяции центрального отсчета. Показано, что разработанный алгоритм интерполяции на основе адаптивного выбора размера ядра повышает степень сжатия на 30%, а модифицированный алгоритм интерполяции на основе адаптивного выбора размера ядра – на 35% по сравнению с существующими алгоритмами интерполяции; качество восстановленной видеопоследовательности улучшается на 3% по сравнению со сжатием без интерполяции. Результаты исследования найдут широкое применение в задачах обработки видеоданных, различных кодеках сжатия видео и системах потокового вещания.

Ключевые слова: интерполяция, адаптивный алгоритм, адаптивный размер ядра интерполяции, устранение блокинг-эффекта.

STUDY OF BLOCKING EFFECT ELIMINATION METHODS BY MEANS OF INTRAFRAME VIDEO SEQUENCE INTERPOLATION

I.S. Rubina^а

^а ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: gubren@mail.ru

Article info

Received 30.04.14, accepted 23.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-86-93

Article in Russian

Reference for citation: Rubina I.S. Study of blocking effect elimination methods by means of intraframe video sequence interpolation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 86–93 (in Russian)

Abstract. The paper deals with image interpolation methods and their applicability to eliminate some of the artifacts related to both the dynamic properties of objects in video sequences and algorithms used in the order of encoding steps. The main drawback of existing methods is the high computational complexity, unacceptable in video processing. Interpolation of signal samples for blocking - effect elimination at the output of the conversion encoding is proposed as a part of the study. It was necessary to develop methods for improvement of compression ratio and quality of the reconstructed video data by blocking effect elimination on the borders of the segments by intraframe interpolating of video sequence segments. The main point of developed methods is an adaptive recursive algorithm application with adaptive-sized interpolation kernel both with and without

the brightness gradient consideration at the boundaries of objects and video sequence blocks. Within theoretical part of the research, methods of information theory (RD-theory and data redundancy elimination), methods of pattern recognition and digital signal processing, as well as methods of probability theory are used. Within experimental part of the research, software implementation of compression algorithms with subsequent comparison of the implemented algorithms with the existing ones was carried out. Proposed methods were compared with the simple averaging algorithm and the adaptive algorithm of central counting interpolation. The advantage of the algorithm based on the adaptive kernel size selection interpolation is in compression ratio increasing by 30%, and the advantage of the modified algorithm based on the adaptive interpolation kernel size selection is in the compression ratio increasing by 35% in comparison with existing algorithms, interpolation and quality of the reconstructed video sequence improving by 3% compared to the one compressed without interpolation. The findings will be widely used in video processing tasks, various codecs of video compression and streaming systems.

Keywords: interpolation, adaptive algorithm, variable size of interpolation kernel, blocking - effect elimination.

Введение

В процессе сжатия видеоданных чаще всего возникает ряд артефактов, связанных как с динамическими свойствами объектов видеопоследовательности [1], так и с используемыми алгоритмами в последовательности этапов кодирования. Среди них выделяют блокинг-эффект [2] или видимость границ блоков-сегментов, блеринг-эффект [3] или потеря четкости динамичных локальных областей, рингинг-эффект [4] или эффект Гиббса и пр. Предметом настоящего исследования явился блокинг-эффект, возникающий в ходе сжатия блочными алгоритмами кодирования преобразованием [5], такими как дискретное косинусное преобразование (ДКП), преобразование Карунена–Лоэва [6], дискретное преобразование Хартли [7, 8] и т.д. Несмотря на вносимые искажения, блочные алгоритмы обладают рядом достоинств [9], важнейшим из которых является низкое требование к объему памяти.

Интерполяция отсчетов сигнала обычно используется при сжатии изображений и применяется в рамках схемы интерполяция – вычисление разностного сигнала – квантование разностного сигнала.

Основным требованием к интерполятору является как можно более высокая точность при малой вычислительной сложности алгоритма [10]. Исходя из этого, для интерполяции, как правило, используют алгоритмы простого усреднения ближайших восстановленных отсчетов [11]. Необходимо отметить, что интерполяция может также использоваться для сжатия путем устранения пространственной избыточности [12], использующего подобие схожих пикселей видеокadra. Таким образом, целью настоящей работы является разработка метода повышения степени сжатия и качества восстановленных видеоданных путем устранения блокинг-эффекта на границах сегмента за счет внутрикадровой интерполяции сегментов видеопоследовательности.

Описание алгоритмов

В основе разработанного адаптивного алгоритма интерполяции отсчетов сигнала лежит подход, представленный в работе [11]. В данном подходе для определения значения центрального отсчета по четырем смежным опорным отсчетам используется одна из трех интерполирующих функций:

$$f^0(2m+1, 2n+1) = \frac{[f(2m, 2n) + f(2m+2, 2n+2)]}{2},$$

$$f^1(2m+1, 2n+1) = \frac{[f(2m, 2n) + f(2m+2, 2n) + f(2m, 2n+2) + f(2m+2, 2n+2)]}{4},$$

$$f^2(2m+1, 2n+1) = \frac{[f(2m+2, 2n) + f(2m, 2n+2)]}{2},$$

где f^t – значение интерполированного отсчета с индексом решающего правила, а m и n – индексы отсчета.

Графическое представление рассматриваемых интерполирующих функций представлено на рис. 1.

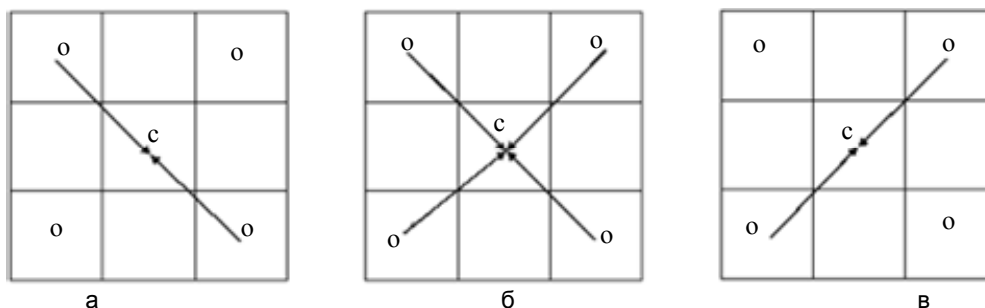


Рис. 1. Адаптивная интерполяция центрального отсчета, где о – опорные отсчеты, с – центральные отсчеты, остальные – крайние отсчеты

Выбор функции в каждой точке изображения осуществляется на основе признака $\mu(2m+1, 2n+1) = |f(2m, 2n) - f(2m+2, 2n+2)| - |f(2m, 2n+2) - f(2m+2, 2n)|$ с помощью зависящего от параметров α_1 и α_2 решающего правила, которое в каждой точке изображения определяет номер используемой интерполирующей функции по значению этого признака:

$$f(2m+1, 2n+1) = \begin{cases} 0, & \mu < \alpha_1 \\ 1, & \alpha_1 \leq \mu \leq \alpha_2 \\ 2, & \mu > \alpha_2 \end{cases}$$

Слабым местом прямого использования данного подхода является то, что непосредственной обработке данных в нем предшествует трудоемкий процесс обучения (настройки решающего правила), который заключается в отыскании этих параметров. При этом выбор значений параметров решающего правила осуществляется, исходя из минимизации суммарной ошибки интерполяции, и формулируется в виде

$$\sum_{(m,n) \in I} |f^t(m, n) - f(m, n)| \rightarrow \min_{\alpha_1, \alpha_2}, \quad (1)$$

где I – множество индексов опорных отсчетов, а t – индекс решающего правила.

С целью устранения данного недостатка, уменьшения блокинг-эффекта, а также в связи с особенностями обработки видеоданных на предшествующих интерполяции стадиях предварительной обработки и межкадрового/внутрикадрового предсказания на этапе компрессии и на стадии кодирования предсказанием на этапе декомпрессии разработанный адаптивный алгоритм интерполяции реализует следующие технические решения.

- Предложенный алгоритм интерполяции (рис. 2) на основе адаптивного размера ядра при размере блока $M \times N$ является рекурсивным алгоритмом и состоит из следующих этапов.
 1. Пусть переменная a равна M , а переменная b равна N .
 2. Пусть локальный адрес текущего отсчета $(0, 0)$.
 3. Если текущий отсчет является не граничным и не крайним, то осуществить переход к п. 5.
 4. Вычисление значения интерполируемого отсчета с использованием алгоритма «прямой крест» [11] и переход к п. 6.
 5. Вычисление значения интерполируемого отсчета с индексом $(a/2-1, b/2-1)$ в рамках адаптивного алгоритма интерполяции центрального отсчета.
 6. Завершение алгоритма, если переменные a и b равны 2.
 7. Присваивание a значения $a/2$, а b значения $b/2$.
 8. Если a больше b , то осуществить переход к п. 11.
 9. Если a меньше b , то осуществить переход к п. 12.
 10. Для отсчетов с адресами $(0, 0)$, $(0, b/2)$, $(a/2, 0)$, $(a/2, b/2)$ выполнить переход к п. 2.
 11. Для отсчетов с адресами $(0, 0)$, $(a/2, 0)$ выполнить переход к п. 2.
 12. Для отсчетов с адресами $(0, 0)$, $(0, b/2)$ выполнить переход к п. 2.
- Используется адаптивный размер ядра интерполяции. Таким образом, для блоков различного размера, полученных на этапе оценки и компенсации движения [13, 14], применяются соответствующие ядра интерполяции, обеспечивающие совместимость при стыковке блоков различного размера.
- Предлагается передавать номер интерполирующей функции для каждого блока в виде 2-битного кода, определяемого на этапе кодирования путем минимизации суммарной ошибки интерполяции (1).
- Решающее правило интерполяции определяется в целом для блока в соответствии с критерием минимизации суммарной ошибки интерполяции и передается кодовым словом длиной 2 бита на блок.
- Интерполяционный остаток предлагается формировать только для опорных кадров, а для ссылочных кадров предлагается обращать все коэффициенты кроме опорных коэффициентов в нуль.

Принцип действия модифицированного алгоритма интерполяции «косой крест» (рис. 3) заключается в адаптивном средневзвешенном определении значения интерполированного отсчета по четырем смежным опорным отсчетам, в отличие от оригинального алгоритма интерполяции «косого креста» [11], где используется непосредственное усреднение опорных отсчетов. Использование непосредственного усреднения может приводить к получению значения интерполированного отсчета, значительно превосходящего значения интерполированных отсчетов по двум вариантам изменения интенсивности из шести (2 диагональных, горизонтальный, вертикальный, «прямой крест», «косой крест»), что представляет собой одно из проявлений артефактов сглаживания при устранении блокинг-эффекта.

Кроме того, в алгоритме интерполяции «косой крест» предполагается, что распределение значения интенсивности в окрестности интерполируемого отсчета обладает приблизительно одинаковым поведением, что в общем случае может быть верно для отсчетов, относящихся к какому-либо выделенному объекту сцены, но для границ объектов данное приближение будет приводить к взаимному влиянию одного объекта на другой и ухудшению общего восприятия границ объектов.

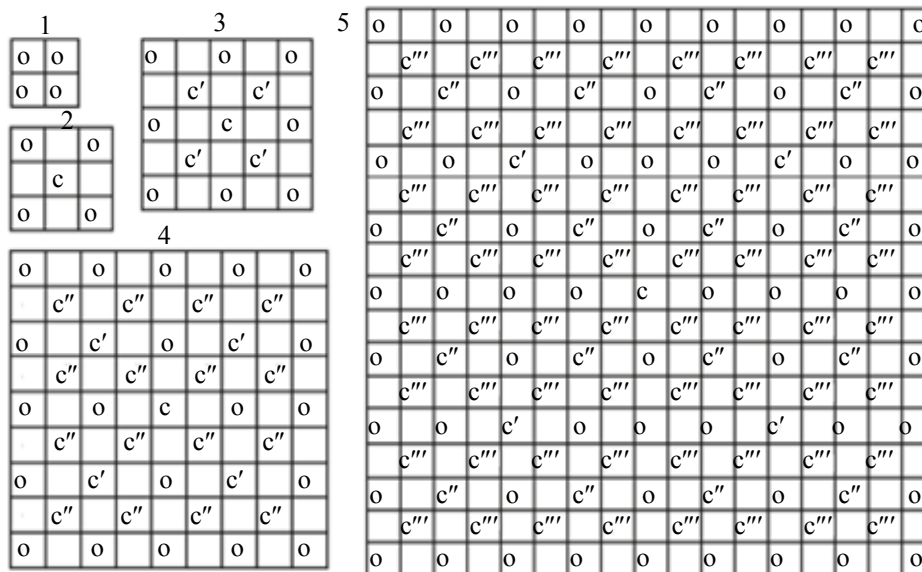


Рис. 2. Ядра интерполяции алгоритма с адаптивным размером ядра: 1 – 2×2, 2 – 4×4, 3 – 8×8, 4 – 16×16, 5 – 32×32, о – опорный отсчет, а, с, с', с'' – рекурсивно вычисляемые значения интерполированных отсчетов

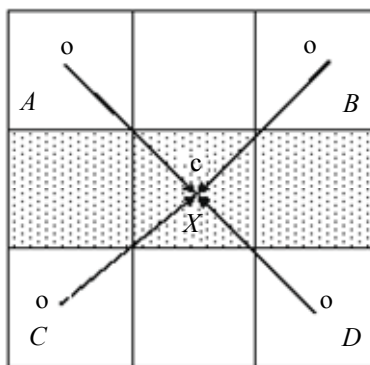


Рис. 3. Модифицированный алгоритм интерполяции центрального отсчета «косой крест», где о – опорные отсчеты (A, B, C, D), а с – интерполируемый отсчет (X)

С целью уменьшения проявлений блокинг-эффекта при вычислении значения интерполируемого отсчета необходимо учитывать величину перепада интенсивностей как на стыке объектов, так и вдоль границы объектов

$$\exists \left(\sum \frac{A+B+C+D}{4} \right) = X : \left| X - \frac{C+D}{2} \right| \rightarrow \left| X - \frac{A+B}{2} \right| \gg \left| X - \frac{\sum_{i,j \in \{A,B,C,D\}}^{i+j}}{2} \right|. \quad (2)$$

Предлагаемый модифицированный алгоритм «косого креста», пытающийся учесть перепад интенсивностей по всем направлениям, можно записать следующим образом:

$$X = k \times \frac{A+C}{2} + (1-k) \times \frac{B+D}{2}, \quad (3)$$

$$\text{где } \begin{cases} v_2 = 0 \rightarrow k = 1 \\ v_2 \neq 0 \rightarrow k = \frac{v_1}{v_2} \end{cases}, \text{ где } \begin{cases} A+B=0 \rightarrow v_1 = 0 \\ A+B \neq 0 \rightarrow v_1 = \frac{|A-B|}{A+B} \\ C+D=0 \rightarrow v_2 = 0 \\ C+D \neq 0 \rightarrow v_2 = \frac{|C-D|}{C+D} \end{cases}.$$

Покажем, что артефакты сглаживания (2) при подавлении блокинг-эффекта в алгоритме интерполяции «косой крест» устраняются в разработанном модифицированном алгоритме «косого креста» (3). Допустим, опорные отсчеты имеют следующие значения: A=20, B=22, C=2, а D=8. Тогда для алгоритма «косого креста» получим X=13, которое больше, чем (C+D)/2=5, на 8 и меньше, чем (A+B)/2=21, тоже на 8. При этом по остальным четырем направлениям изменения интенсивности значения X отличаются не

больше, чем на 2 единицы. Исходя из формулы модифицированного алгоритма «косого креста» (3), мы получим значение $X=14,68$, которое теперь больше, чем $(C+D)/2=5$, на 9,68 и меньше, чем $(A+B)/2=21$, на 6,32. Таким образом, вместо приближения по четырем вариантам изменения интенсивности из шести мы получили один из способов приближения по пяти вариантам изменения интенсивности из шести, что позволяет уменьшить видимые артефакты сглаживания при устранении блокинг-эффекта на границах объектов без увеличения суммарной ошибки интерполяции (1).

На рис. 4 представлено увеличенное тестовое изображение «Лена» в случае использования алгоритма интерполяции «косого креста» (рис. 4, а) и разработанного модифицированного алгоритма «косого креста» (рис. 4, б). В ходе исследования выявлено сокращение видимых проявлений артефактов сглаживания при устранении блокинг-эффекта при применении модифицированного алгоритма «косого креста» для ряда тестовых изображений. В связи с этим было предложено использовать данный модифицированный алгоритм в адаптивном алгоритме интерполяции центрального отсчета на пятом этапе предложенного алгоритма интерполяции на основе адаптивного размера ядра (модифицированный алгоритм с адаптивным размером ядра).

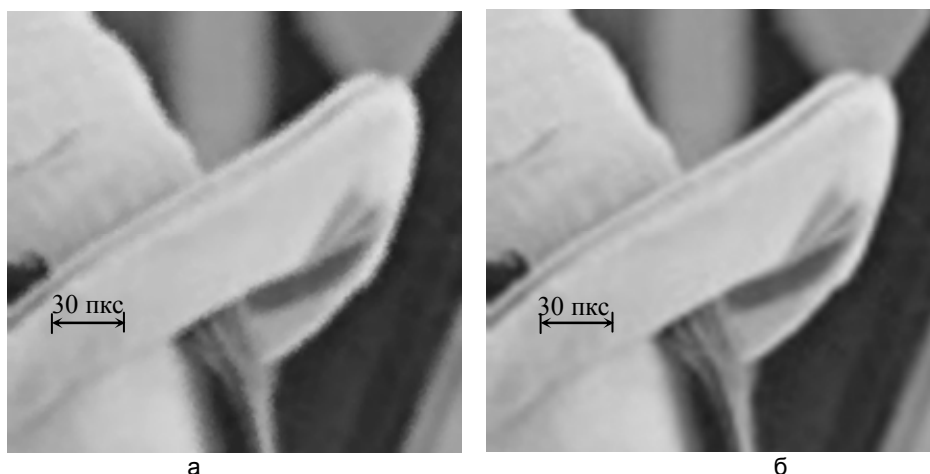


Рис. 4. Результаты устранения блокинг-эффекта на границах объектов для алгоритмов интерполяции «косой крест» (а) и модифицированный «косой крест» (б)

Экспериментальные результаты

Для анализа описанных ранее алгоритмов интерполяции были выбраны стандартные тестовые последовательности группы MPEG, такие, как «Теннис», «Бригадир» и «Береговая охрана». В ходе экспериментов для алгоритма без интерполяции, адаптивного алгоритма центрального отсчета, алгоритма с адаптивным размером ядра в диапазоне от минимального до максимального (таблица) и модифицированного алгоритма с адаптивным размером ядра были получены следующие зависимости:

- пиковое соотношение сигнал/шум (PSNR, дБ) [15], вычисляемое в соответствии с формулой

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{(2^n - 1)^2}{MSE},$$

где n – разрядность цветовой схемы (для цветовой схемы YUV (яркость Y и две цветоразностных U и V компоненты), равная 8); MSE – среднеквадратичное отклонение исходного изображения от восстановленного после сжатия, определяемое формулой

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2,$$

где m, n – размеры кадра, а $I(i, j)$ и $K(i, j)$ – интенсивности соответствующих пикселей интерполированного и исходного кадров. Необходимо отметить, что в рамках исследования применялось ограничение по допустимому уровню PSNR, равное 30 дБ, отмеченное на рис. 5, в, стрелкой;

- RD – характеристика, выражающая зависимость искажения (D) сигнала PSNR от степени его сжатия (R);
- вычислительная сложность алгоритма, измеряемая количеством операций умножения и сложения на пиксел. Определяется средним значением количества таких операций для перечня размеров блока, приведенного в таблице.

Перечисленные зависимости для последовательности «Теннис» графически представлены на рис. 5.

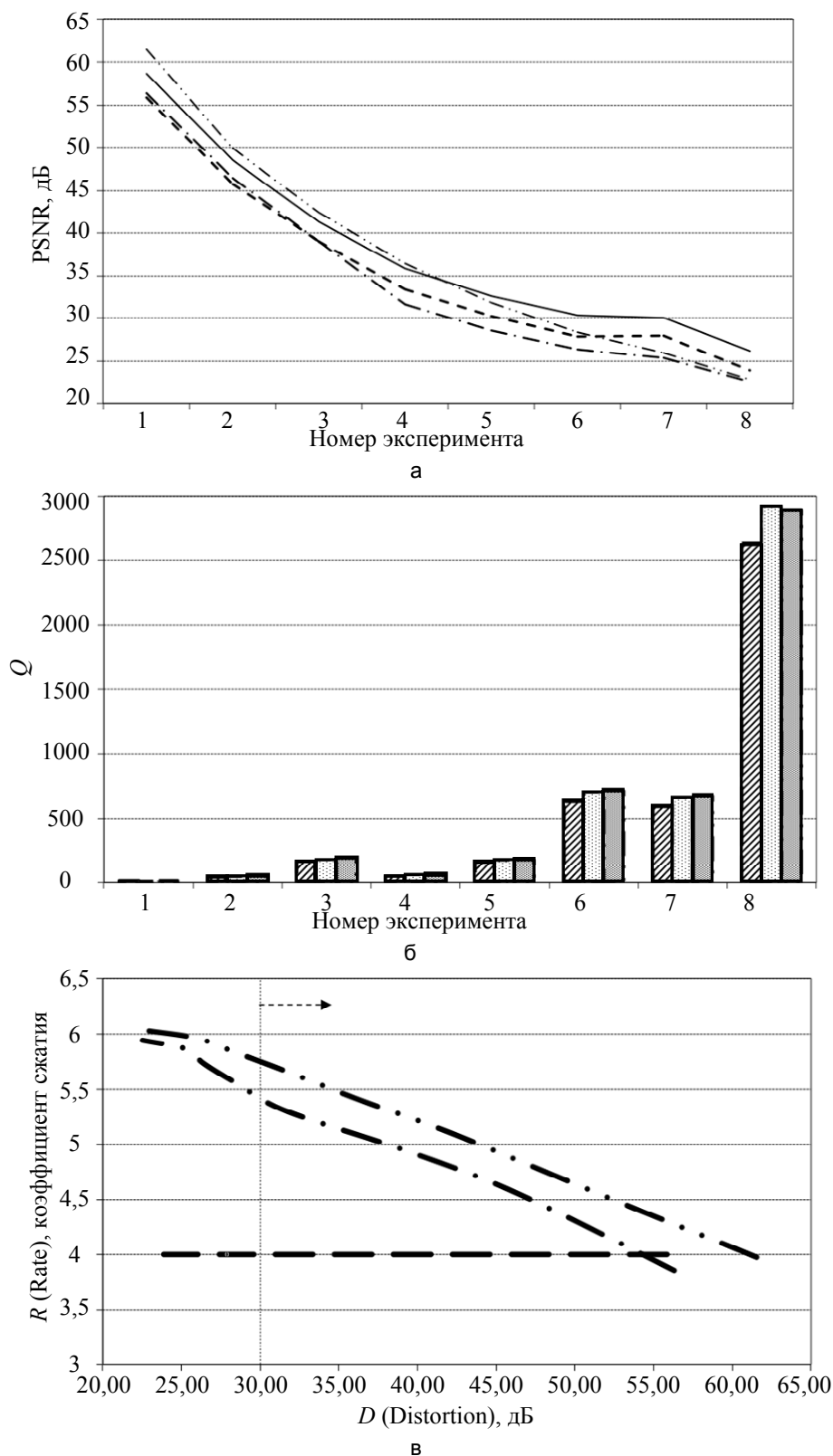


Рис. 5. Сравнительная оценка алгоритмов интерполяции для алгоритма адаптивной интерполяции центрального отсчета — □, алгоритма интерполяции с адаптивным размером ядра — · — □, алгоритма без интерполяции — и модифицированного алгоритма с адаптивным размером ядра — · — □ значений искажений сигнала (а), вычислительной сложности Q (б) для ряда экспериментов (таблица) и RD -характеристики (в)

№ эксперимента	Минимальный размер ядра, пиксел	Максимальный размер ядра, пиксел
1	2^2	2^4
2	2^2	2^6
3	2^2	2^8
4	2^4	2^6
5	2^4	2^8
6	2^4	2^{10}
7	2^6	2^{10}
8	2^6	2^{12}

Таблица. Диапазон значений размеров ядра интерполяции для ряда экспериментов

В ходе анализа результатов для последовательности «Теннис» (рис. 5) было выявлено:

1. использование интерполяции отсчетов сигнала при определенных параметрах является эффективным инструментом для устранения блокинг-эффекта на выходе блока кодирования преобразованием;
2. предложенный алгоритм интерполяции на основе адаптивного выбора размера ядра позволил повысить степень сжатия на 30% при PSNR меньше 60 дБ;
3. модифицированный алгоритм интерполяции на основе адаптивного выбора размера ядра при определенных параметрах позволил повысить степень сжатия на 35% и качество восстановленной видеопоследовательности на 3% по сравнению со сжатием без интерполяции.

Заключение

В данной работе описаны новые методы повышения качества восстановленных видеоданных путем устранения блокинг-эффекта на границах сегмента путем внутрикадровой интерполяции сегментов видеопоследовательности, также позволяющие повысить степень сжатия. Результаты работы нашли применение в НИР «Разработка методов и средств системотехнического проектирования информационных и управляющих вычислительных систем с распределенной архитектурой» и «Исследование и разработка методов искусственного интеллекта применительно к задаче построения обобщенного решения мультимодальной биометрической идентификации». Программное обеспечение, реализующее предложенные методы и алгоритмы, прошло государственную регистрацию пакетов программ для ЭВМ. Результаты исследования могут эффективно применяться в задачах обработки видеоданных, различных кодеках сжатия видео и системах потокового вещания.

Литература

1. Рубина И.С. Анализ методов построения траектории движущихся объектов на основе сегментации видеоданных // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 2 (72). С. 127–132.
2. Wang Z., Bovik A.C., Evans B.L. Blind measurement of blocking artifacts in images // IEEE International Conference on Image Processing. 2000. V. 3. P. 981–984.
3. Madhuri K., Madhuri J. Blur and ringing artifact measurement in image compression using wavelet transform // International Journal of Computer, Information Science and Engineering. 2007. V. 1. N 2. P. 57–60.
4. Feng X. Measurement of ringing artifacts in JPEG images // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6076. Art. 60760A.
5. Рубина И.С., Тропченко А.Ю. Исследование алгоритмов кодирования преобразованием в задачах сжатия кадров видеопоследовательности // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 10. С. 26–30.
6. Grim J. Multimodal discrete Karhunen-Loève expansion // Kybernetika. 1986. V. 22. N 4. P. 329–339.
7. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения. М.: Мир, 1990. 225 с.
8. Zeng Y., Bi G., Leyman A.R. New algorithms for multidimensional discrete Hartley transform // Signal Processing. 2002. V. 82. N 8. P. 1086–1095. doi: 10.1016/S0165-1684(02)00241-4
9. Auyeung C., Kosmach J.J., Orchard M.T., Kalafatis T. Overlapped block motion compensation // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 1992. V. 1818. N 2. P. 561–572.
10. Puri R., Ramchandran K. PRISM: a video coding architecture based on distributed compression principles // Proc. Allerton Conf. Communications, Control, and Computing. Urbana-Champaign, 2002. P. 1–10.
11. Беденьгов А.Н., Гашиников М.В. Исследование эффективности адаптивных алгоритмов интерполяции для иерархической компрессии изображений // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 141–145.
12. Bastani V., Helfroush M.S., Kasiri K. Image compression based on spatial redundancy removal and image inpainting // Journal of Zhejiang University – Science C. 2010. V. 11. N 2. P. 92–100. doi: 10.1631/jzus.C0910182

13. Ribas-Corbera J., Neuhoff D.L. Optimal block size for block-based, motion compensated video coders // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 1997. V. 3024. P. 1132–1143. doi: 10.1117/12.263193
14. Рубина И.С., Тропченко А.Ю. Исследование алгоритмов выделения опорных пикселей в задачах выделения сегментов кадра видеопоследовательности // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 1. С. 9–14.
15. Al-Najjar Y.A.Y., Soong D.C. Comparison of image quality assessment: PSNR, HVS, SSIM, UIQI // International Journal of Scientific and Engineering Research. 2012. V. 3. N 8. P. 1–5.

Рубина Ирина Семеновна – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, rubren@mail.ru

Irina S. Rubina – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, rubren@mail.ru

УДК 004.273:004.051

АЛГОРИТМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ПРОЦЕССОРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Н.А. Шаменков^а, А.М. Зыков^б, А.А. Карытко^б

^а Научно-исследовательский испытательный центр центрального научно-исследовательского института ВВКО Министерства обороны Российской Федерации, Москва, 129345, Российская Федерация

^б Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

Адрес для переписки: kurok134@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.10.14, принята к печати 26.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-94-100

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шаменков Н.А., Зыков А.М., Карытко А.А. Алгоритм выбора рациональной процессорной архитектуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 94–100

Аннотация. Представлен алгоритм, позволяющий осуществить выбор процессорной архитектуры вычислительного ядра. Такая архитектура обеспечивает максимально возможный темп вычислительного процесса. Работа алгоритма основана на использовании метода скользящего окна, применяемого к фрагментам кода программ, исполнение которых занимает максимальный процент времени – «узким местам». Алгоритм обеспечивает расчет рационального числа арифметико-логических каналов вычислительного ядра процессора в зависимости от типа поддерживаемых им операций. На примере программного кода, реализующего алгоритм расчета тессеральных гармоник гравитационного поля Земли, произведен расчет рационального числа арифметико-логических каналов процессорной архитектуры. В примере учитывались арифметические операции целочисленного и вещественного сложения (вычитания), вещественного умножения, а также операции расчета значений логических предикатов. В соответствии с результатами расчета установлено, что для рассмотренного примера рациональный вариант процессорной архитектуры должен включать два арифметико-логических канала, способных выполнять указанные операции. Разработанный алгоритм целесообразно использовать при решении задач синтеза процессорных архитектур и вычислительных систем, создаваемых на их основе. Максимальный эффект использования результатов работы алгоритма достигается в процессе синтеза вычислительных систем, выполняющих задачи на основе единого математического аппарата.

Ключевые слова: процессорная архитектура, метод скользящего окна, вычислительный конвейер, арифметико-логический канал.

ALGORITHM OF RATIONAL PROCESSOR ARCHITECTURE

N.A. Shamenkov^a, A.M. Zykov^b, A.A. Karytko^b

^a Scientific Research Test Department of the Head Central Scientific Research Institute of Aerospace Defence of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, 129345, Russian Federation

^b Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

Corresponding author: kurok134@yandex.ru

Article info

Received 03.10.14, accepted 26.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-94-100

Article in Russian

Reference for citation: Shamenkov N.A., Zykov A.M., Karytko A.A. Algorithm of rational processor architecture. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 94–100 (in Russian)

Abstract. The paper deals with an algorithm that makes it possible to decide on processor architecture for computational kernel. This architecture provides the maximum possible rate of the computational process. The algorithm is based on a sliding window method applied to bottlenecks - fragments of program code taking a maximum percentage of time for execution. The algorithm calculates a rational number of arithmetic-logic processor core computing channels depending on the type of supported operations. Calculation of the rational number for arithmetic and logical channels of processor architecture is performed on the code example that implements the algorithm for calculating the tesseral harmonics of the Earth gravitational field. Arithmetic operations of integer and real addition (subtraction), real multiplication, as well as the operations of calculating the values of logical predicates, were considered in the example. Calculation results revealed that for considered example, rational variant of processor architecture should include two arithmetic logic channels capable of performing these operations. The developed algorithm is feasible for application in solving the synthesis tasks for processor architectures and computing systems based on them. Maximum effect after using the algorithm results is achieved at the synthesis of computing systems that perform tasks on the basis of a consistent mathematical tool.

Keywords: processor architecture, sliding window method, instruction pipeline, arithmetic logic channel.

Введение

Исследованиям влияния архитектуры процессоров и многопроцессорных многомашинных вычислительных систем на оперативность решения задач сложными техническими системами посвящено значительное количество работ как в России [1–4], так и за рубежом [5, 6]. В соответствии с данными работами дальнейшее повышение оперативности решения задач достигается за счет наращивания вычислительных ресурсов гетерогенных распределенных систем, жесткого закрепления задач, решаемых ее элементами, а также введения в их состав специализированных, в том числе реконфигурируемых, вычислительных модулей.

Одним из критериев выбора процессорной архитектуры базового вычислительного элемента системы служит мера ее приспособленности к выполнению вычислительных задач, решаемых системой. Под мерой приспособленности понимается соответствие аппаратных ресурсов процессора (в данной работе – количество арифметико-логических каналов (АЛК) ядра процессора) требованиям, предъявляемым программно-математическим содержанием «узкого места» программы. Недостаток числа АЛК проявляется при условии доступности к исполнению на одном такте работы процессора нескольких арифметических операций, а также при большом числе условных ветвлений, не позволяющих осуществить верное аннотирование дальнейшего хода вычислительного процесса. При возникновении блокировок в вычислительных конвейерах недостаток АЛК приводит к увеличению времени ожидания операций, готовых к исполнению. Причинами возникновения блокировок являются:

1. изменение последовательности операций в комбинированных командах, поступающих на вход вычислительного конвейера;
2. меньшее по сравнению с числом АЛК количество портов записи и чтения регистрового файла ядра процессора;
3. выполнение АЛК многотактных арифметических операций;
4. отмена выполнения ветви вычислительного процесса в режиме спекулятивных вычислений, арифметические операции которой заполняют вычислительный конвейер в текущий момент времени.

С целью минимизации указанных явлений в современных процессорных архитектурах универсального назначения может быть предусмотрена избыточность АЛК, основанная на специфике задач, решаемых процессором, и частоте проявления различных видов арифметических операций. Вместе с тем излишнее количество АЛК приводит к росту числа портов регистрового файла процессора и общих шин байпаса, обеспечивающих передачу данных между каналами, что, напротив, увеличивает время передачи результатов операций с выходов арифметико-логических каналов и существенно усложняет проектирование систем на кристалле.

Таким образом, в условиях современного разнообразия процессорных архитектур [7] представляет интерес проведение исследований по выбору рационального варианта построения процессорной архитектуры, базового вычислительного элемента вычислительной системы универсального назначения. Проведение этих исследований основывается на анализе взаимозависимостей шагов алгоритма и операторов реализующей его программы [8, 9], выборе способа представления выявленных взаимозависимостей и инструмента для их анализа [10], декомпозиции шагов алгоритма, обладающих высокой вычислительной сложностью [11].

Цель настоящей работы заключается в повышении оперативности функционирования вычислительных систем за счет выбора рациональной процессорной архитектуры базового вычислительного элемента системы с помощью алгоритма, учитывающего особенности динамических профилей программных реализаций вычислительных задач.

Постановка задачи исследования

Исходными данными разработанного алгоритма являются:

- программная реализация алгоритма функционирования технической системы – A ;
- множество арифметических операций, имеющих аппаратную реализацию в процессорных архитектурах, $O = \{+i, \times i, +f, \times f, / \}$, где символы i, f соответствуют операциям над целочисленными и вещественными данными;
- множество вариантов процессорных архитектур $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, каждый из элементов которого характеризуется количеством тактов процессора n , необходимых для выполнения соответствующих элементарных операций множества O .

Требуется определить рациональное число АЛК, поддерживающих конвейерные операции вещественного и целочисленного сложения, умножения, деления, а также вычисления значений логических предикатов.

Обнаружение «узких мест» программ – множества S , чье выполнение занимает наибольший процент времени от времени выполнения всей программы – выполняется средствами стандартных профилировщиков программ. К элементам сформированного множества S применяется разработанный алгоритм.

Алгоритм выбора рациональной процессорной архитектуры

Алгоритм состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Макрооперации «узкого места» программы подвергаются процедуре последовательно-параллельной декомпозиции [11], заключающейся в рекурсивном вычитании и объединении множеств вида

$$X_i = (X_{i-1} \setminus X'_i) \cup \{x_{n+i}\},$$

где X_i – исходный функционал, вычисляемый на заданном шаге алгоритма; X'_i – исключаемый из функционала X_i блок арифметических операций, соответствующих какому-либо элементу множества O ; $\{x_{n+i}\}$ – множество ранее вырезанных блоков арифметических операций.

Результатом данного шага является формирование множества базовых арифметических операций «узкого места» – U . При этом специальные алгебраические и тригонометрические функции заменяются элементами множества O с условием сохранения тождественности результатов, получаемых в результате использования функционала оригинала и преобразованных выражений.

Шаг 2. Формируется матрица \mathbf{M} инцидентности операндов арифметических операций множества U размерностью $k \times k$, где k – общее число операндов операторов U , при этом создаются временные операнды, содержащие результаты промежуточных операций, элемент матрицы $\mathbf{M} - m(i, j)$ равен единице, если для вычисления значения операнда j требуется вычислить значение операнда i .

Шаг 3. Формируется множество $B = \{\langle o_1, r_1, i_1, j_1, t \rangle, \dots, \langle o_n, r_n, i_n, j_n, t \rangle\}$, где n – общее количество арифметических операций $o_j \in O, j \in \overline{1, n}$, r – номер строки и столбца матрицы \mathbf{M} , ассоциированных с промежуточной переменной, содержащей результат операции o_j , i, j – номера строк и столбцов, ассоциированных с операндами операции O_j , t – номер такта процессора с момента начала исполнения «узкого места» программы.

Шаг 4. На основе матрицы \mathbf{M} , а также множества B формируется матрица расстояний \mathbf{M}_p [12] размерностью $k \times k$, в которой единичные элементы $m(i, r)$ матрицы \mathbf{M} заменяются числом тактов процессора $n(o_j | h_i)$ с архитектурой $h_i \in H$, необходимых для выполнения операции o_j , формирующей значение переменной i .

Шаг 5. Применяя к матрице расстояний \mathbf{M}_p алгоритм поиска в глубину, в поле t элементов множества B записываются значения $\max_{l \in L} (l(r))$, где L – множество всевозможных трасс до операнда r .

Шаг 6. Для каждого элемента множества O выполняется подсчет числа $n(t)$ элементов множества B , обладающих одинаковым значением поля t . Таким образом, число АЛК $N_{\max}(o)$, поддерживающих выполнение арифметической операции o и обеспечивающее минимальное время выполнения «узкого места» программы, вычисляется с помощью следующего выражения:

$$N_{\max}(o) = \max(n_l(t)), l = \overline{1, S},$$

где S – число групп элементов множества B с одинаковыми значениями поля t , характеризующих выполнение арифметической операции o .

Шаг 7. На основе элементов множества B для каждого типа операций o формируются булевы матрицы вызова операций \mathbf{M}_{bo} размерностью $d \times n$, где d – максимальное значение поля t , среди элементов множества B , характеризующих выполнение операции o . Элемент $m_{bo}(i, j)$ равен единице, если j -я операция o начинает выполнение на i -ом такте работы процессора.

Шаг 8. Методом скользящего окна осуществляется поиск разреженных областей матрицы \mathbf{M}_{bo} (последовательностей нулевых вектор-строк) размером $k \times n$ и более, где k – глубина конвейера, выполняющего арифметическую операцию o . Найденные области удаляются из \mathbf{M}_{bo} .

Шаг 9. Методом скользящего окна производится расчет коэффициента загрузки вычислительного конвейера для заданного типа арифметической операции согласно формуле:

$$K_o = \frac{1}{(d-k)} \sum_{i=1}^{d-k} \sum_{j=i}^{k+i} v_i(j|z_i),$$

где $v_i(j|z)$ – количество конвейеров, попавших в текущее окно $z_i = k \times n$ и имеющих загрузку j операций.

Шаг 10. Методом скользящего окна производится расчет коэффициента пересечения K_{\cap}^{os} арифметических операций o и s , допускающих аппаратную реализацию в рамках одного арифметического устройства:

$$K_{\cap}^{os} = 1 - \frac{N_{\emptyset}}{N_{\cap}},$$

где N_{\emptyset} – число окон, содержащих такты начала выполнения только операций o или операций o совместно с операциями, отличными от операции s ; N_{\cap} – общее число окон, содержащих такты начала выполнения операции o .

Шаг 11. Рассчитывается рациональное число АЛК n_{alu}^o , выполняющих базовую операцию o , с помощью выражения

$$n_{alu}^o = \left\lceil K_o + \sum_{s \in O, s \neq o} K_{\cap}^{os} \cdot K_s \right\rceil,$$

где квадратные скобки соответствуют операции округления вещественных чисел в сторону ближайшего наибольшего целого числа.

На этом работа алгоритма заканчивается.

Результаты экспериментов

Описанный алгоритм применялся для анализа программ, используемых для реализации прогноза движения космических объектов в околоземном космическом пространстве. Результаты профилирования программ свидетельствуют о том, что до 40% общего времени их исполнения выполняется процедура расчета коэффициентов секторальных, тессеральных, а также зональных гармоник [13] гравитационного поля Земли. Фрагмент кода на языке С, представленный ниже, идентичен исходному фрагменту программы с точки зрения его арифметической сложности и порядка следования операторов:

```

1.   while(q<=n){
2.       i=q+ct;
3.       i2=q+ct;
4.       w=(ct*q(i)+ct)*e;
5.       w2=(ct*q(i2)+ct)*z*r;
6.       while(a<=n) {
7.           b1=m*k;
8.           b2=f*k;
9.           c1+=b1*y*(a+ct);
10.          c2+=b2*y*(a+ct);
11.          s+=b1*y;
12.          s2+=b2*y;
13.          if(a>q+ct)
14.             l=((ct*a-ct)*u*w2-(a+q)*w)/(a-q-ct);
15.          if(a!=q) {
16.              z+=b1*u;
17.              z2+=b2*u;}
18.          if(q!=t) {
19.              v+=q*(s*p+s2*p2);
20.              v2+=q*(s2*p2-s*p);
21.              zz0+=c1*p+c2*p2;
22.              zz1+=q*(s*p+s2*p2);
23.              zz2+=z*p+z2*p2;}

```

В представленном фрагменте кода обозначение ct соответствует константе. Ярусно-параллельная форма приведенного фрагмента кода представлена на рисунке. Вершины графа имеют обозначение вида o, t , здесь o – тип арифметической операции, t – операнд, используемый для сохранения результата операции o , значение t , имеющее обозначение «...», характеризует временную переменную, используемую для сохранения промежуточных результатов, прочие обозначения – « q », « n », « a », « b », « c », « i », « l », « v », « z », « w », « u » – соответствуют переменным рассматриваемого фрагмента кода.

В треугольниках рядом с вершинами указаны номера тактов, на которых возможно выполнение операторов. Дуги представленного графа имеют числовые значения, характеризующие количество тактов процессорной архитектуры, необходимых для выполнения оператора-источника дуги. Указанные значения сформированы на основе анализа соответствующих характеристик процессорных архитектур x86 и e3s (архитектура «Эльбрус»).

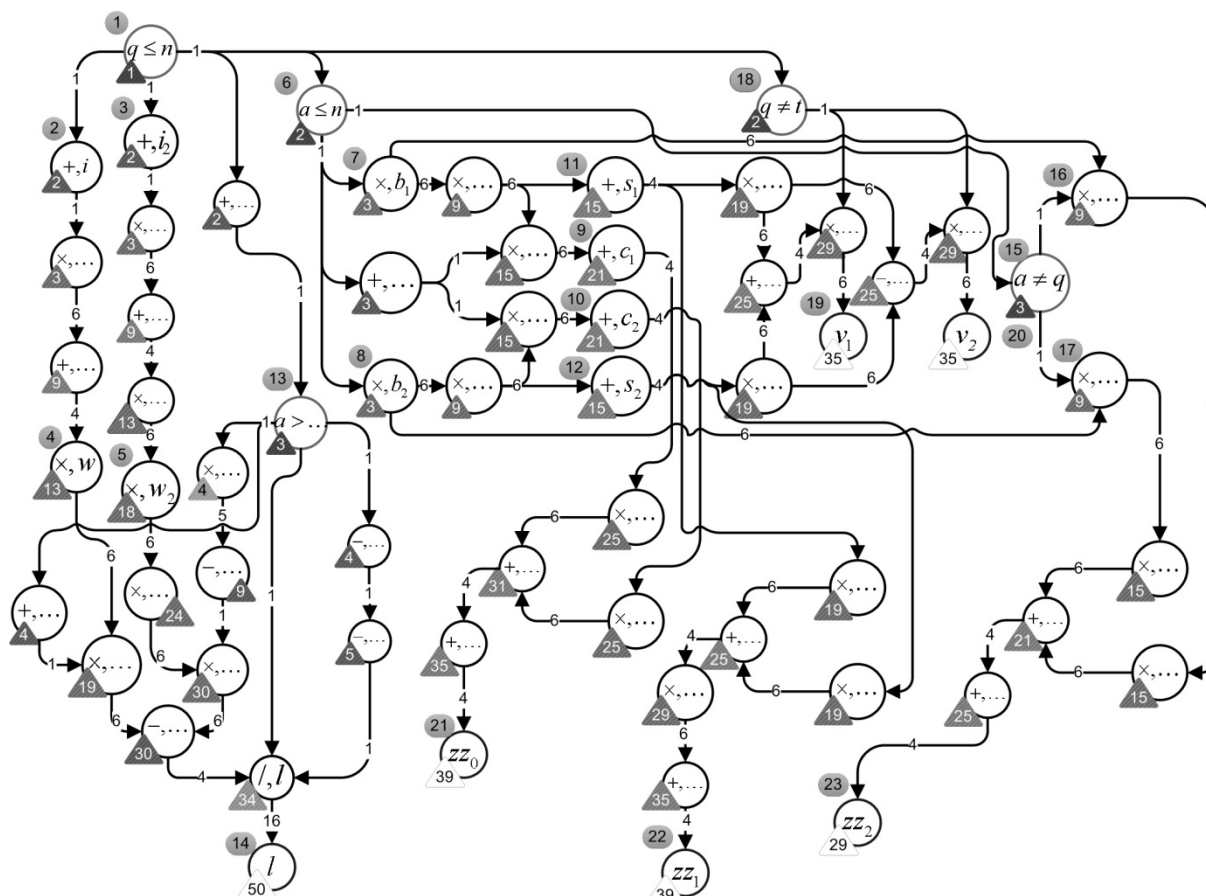


Рисунок. Ярусно-параллельная форма «узкого места» программы расчета коэффициентов тессеральных, зональных и секторальных гармоник

Расчет числа тактов, необходимых процессорной архитектуре x86, для выполнения рассматриваемых типов арифметических операций, производился с использованием ассемблерной инструкции `rdtsc`. Арифметическая операция размещалась в теле цикла, состоящего из k итераций. С использованием инструкции `rdtsc` производился замер числа тактов процессора n_1, n_2 , выполненных с момента последнего сброса процессора на входе в тело цикла, реализующего процесс тестирования, и выходе из него. При этом учитывалось, что результат, возвращаемый инструкцией `rdtsc`, содержит по четыре дополнительных такта, затрачиваемых на чтение исходных данных и запись результата каждой операции в регистровый файл процессора, а также декодирование инструкции и доступ к памяти. Оценка числа тактов $n(o)$ процессорной архитектуры x86, расходуемых на выполнение операции o , осуществлялась согласно выражению

$$n_i = (n_2^i - n_1^i) \cdot k^{-1}, i \in 1, 10,$$

$$n(o) = \min_{n_i \in N} (n_i) - 4,$$

где N – множество результатов наблюдений числа тактов процессора, затрачиваемых на выполнение операции o ; k – количество итераций, производимых в теле цикла, для каждой арифметической операции o .

Всего осуществлялось десять процедур тестирования для каждого значения k , принадлежащего множеству значений $\{10^2, 10^3, 10^4, 10^5\}$. Итоговые значения для процессорной архитектуры x86 составили: для операций целочисленного сложения – 1,4, вещественных операций сложения – 4,8, умножения – 7,7, деления – 18,2 такта на одну операцию. Наличие десятичного знака после запятой и возможное увеличение числа тактов, требуемых для выполнения операций, объясняются отсутствием учета в используемой методике возникающих в ходе выполнения тестовой программы обращений к кэш-памяти процессора и влияния на ход вычислительного процесса работы операционной системы и прерываний, генерируемых устройствами вычислительной системы.

Относительно процессорной архитектуры e3s в соответствии с работой [14], а также общим описанием устройства данной микроархитектуры известно, что целочисленное сложение занимает один такт работы процессора, вещественные операции сложения – до 5 тактов, умножение – от 4 до 6 тактов, деление – от 11 до 20 тактов. Вычисление значений логических предикатов во всех современных процессор-

ных архитектурах реализовано за один такт работы процессора. На основе указанных данных в рассматриваемом примере полагалось, что для выполнения операции вычисления значения логического предиката и целочисленного сложения необходим один такт, для вычисления результата вещественного сложения и целочисленного умножения – 4 такта, результата вещественного умножения – 6 тактов, результата операции деления – 16 тактов.

В соответствии с исходными данными получены следующие значения коэффициентов загрузки вычислительных конвейеров:

- вещественного умножения – 1,61;
- вещественного сложения – 1,27;
- целочисленного сложения – 1,78;
- расчета значений логических предикатов – 1,82.

Операции деления и целочисленного умножения участия в расчетах не принимались во внимание, поскольку они имеют низкий процент использования в рассматриваемом участке программы. Однако, учитывая количество шагов, необходимых для реализации операции деления, совмещение данной арифметической операции с прочими рассмотренными операциями в рамках одного АЛК является нецелесообразным. В рассмотренном примере наиболее часто используемая операция вещественного умножения обладает следующими коэффициентами пересечения с прочими арифметическими операциями:

- вещественного сложения – 0,8;
- целочисленного сложения – 0,086;
- расчета значений логических предикатов – 0,17.

Таким образом, рациональный вариант процессорной архитектуры для выполнения рассматриваемого фрагмента кода состоит из двух АЛК, способных выполнять операции целочисленного и вещественного сложения (вычитания), умножения, вычисления значений предикатов и одного АЛК, обеспечивающего выполнение операции деления. Добавление четвертого АЛК позволяет получить незначительный выигрыш оперативности решения задачи, максимальное значение которого не превышает четырех тактов работы процессора (случай, когда команда вещественного умножения готова к выполнению и АЛК заняты выполнением вещественных операций деления и сложения, а также целочисленного умножения). Наличие числа АЛК, превышающего его рациональное значение, способствует дальнейшему сокращению времени исполнения программы в связи с возможностью обеспечения конвейеризации циклов [15, 16] в случаях отсутствия зависимостей по данным между несколькими последовательными итерациями. Вместе с тем увеличение числа АЛК, поддерживающих выполнение операции o свыше максимального числа таковых операций, способных начать выполнение на одном такте работы процессора, является бесполезным.

Адекватность разработанного алгоритма выбора рациональной процессорной архитектуры подтверждается результатами, полученными на пакете тестов обработки радиолокационной информации для отечественного процессора Эльбрус-2С+ и процессора Core 2 Duo.

Заключение

Описанный алгоритм позволяет формулировать требования к количеству арифметико-логических каналов вычислительных ядер процессорной архитектуры. Результаты работы алгоритма целесообразно использовать на этапе синтеза процессорных архитектур, предназначенных для решения задач, использующих единый математический аппарат. Подобный подход обеспечивает рациональное использование полезной площади кристаллов процессоров и позволяет достичь максимально возможный темп вычислительного процесса в рамках используемой процессорной архитектуры.

При проектировании многопроцессорных многомашинных распределенных вычислительных систем результаты работы алгоритма позволяют максимально адаптировать структуру вычислительной системы к множеству решаемых задач за счет их жесткого закрепления за конкретными узлами вычислительной сети на основе критерия совпадения рационального числа арифметико-логических каналов узла и требуемого числа каналов для решения задачи.

Вместе с тем представляет несомненный интерес проведение дальнейших исследований, посвященных оптимизации системы команд процессорных архитектур и процесса обмена результатами арифметических операций между арифметико-логическими каналами процессора, организации асинхронного доступа к регистровому файлу процессора, количеству блоков регистрового файла и распределению регистров по назначению, входящих в их состав.

Литература

1. Трахтенгерц Э.А. Влияние архитектуры и структуры многопроцессорных вычислительных машин на язык программирования и методы трансляции // Автоматика и телемеханика. 1986. № 3. С. 5–47.
2. Румянцев А.С. Метод отображения задач на крупногранулярные реконфигурируемые вычислительные системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 76–81.

3. Богданов А.Ю., Перекатов В.И., Фельдман В.М. Коммуникационные интерфейсы межмашинных связей вычислительных средств семейства «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 4. № 3. С. 72–83.
4. Мыскин А.В., Торгашев В.А., Царев И.В. Процессоры с динамической архитектурой на основе схем гибкой логики // Труды СПИИРАН. 2002. Т. 1. № 1. С. 113–128.
5. Bacon D.F., Grahem S.L., Sharp O.J. Compiler transformations for high-performance computing // ACM Computing Surveys. 1994. V. 26. N 4. P. 345–420. doi: 10.1145/197405.197406
6. Molka D., Hackenberg D., Schone R., Muller M.S. Memory performance and cache coherency effects on an Intel Nehalem multiprocessor system // Proc. 18th Int. Conf. on Parallel Architectures and Compilation Techniques. Dresden, Germany, 2009. P. 261–270. doi: 10.1109/PACT.2009.22
7. Стегайлов В.В., Норман Г.Э. Проблемы развития суперкомпьютерной отрасли в России: взгляд пользователя высокопроизводительных систем // Программные системы: теория и приложения. 2014. Т. 5. № 1–1 (19). С. 111–152.
8. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 320 с.
9. Тель Ж. Введение в распределенные алгоритмы. М.: МЦНМО, 2009. 616 с.
10. Карпов В.Е., Лобанов А.И. Численные методы, алгоритмы и программы. Введение в распараллеливание. М.: Физматкнига, 2014. 196 с.
11. Чебурахин И.Ф. Синтез дискретных управляющих систем и математическое моделирование. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 247 с.
12. Резников Б.А. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. Л.: МО СССР, 1990. 522 с.
13. Рой А. Движение по орбитам. М.: Мир, 1981. 544 с.
14. Ким А.К., Перекатов В.И., Ермаков С.Г. Микропроцессоры и вычислительные комплексы семейства «Эльбрус». СПб.: Питер, 2013. 272 с.
15. Гергель В.П., Мееров И.Б., Бастраков С.И. Введение в принципы функционирования и применения современных мультиядерных архитектур (на примере Intel Xeon Phi) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/10611/1095/info>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.09.2014).
16. Rau B.R. Iterative modulo scheduling: an algorithm for software pipelining loops // Professional Engineering. 1994. V.7. N 21. P. 63–74.

- Шаменков Николай Александрович** — кандидат технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский испытательный центр центрального научно-исследовательского института ВВКО Министерства обороны Российской Федерации, Москва, 129345, Российская Федерация, Shna810516@mail.ru
- Зыков Александр Михайлович** — кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, Amz05@rambler.ru
- Карытко Анатолий Александрович** — аспирант, адъюнкт, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, kurok134@yandex.ru
- Nikolai A. Shamenkov** — PhD, Department head, Scientific Research Test Department of the Head Central Scientific Research Institute of Aerospace Defence of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, 129345, Russian Federation, Shna810516@mail.ru
- Alexander M. Zykov** — PhD, Associate professor, Associate professor, Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, Amz05@rambler.ru
- Anatoliy A. Karytko** — postgraduate, Graduated in a military academy, Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, kurok134@yandex.ru

УДК 004.414.23

ВЛИЯНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ НА ВРЕМЯ ИСПОЛНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Д.Н. Шинкарук^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: dimashink@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.11.14, принята к печати 25.12.14
doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-101-106

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шинкарук Д.Н. Влияние сбалансированности на время исполнения распределенной имитационной модели // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 101–106

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния распределения нагрузки между вычислительными узлами на время выполнения распределенной имитационной модели компьютерной сети. Рассматриваются два основных типа балансировки – по вычислительной нагрузке и по объему передаваемых данных. Моделирование проводилось на одном компьютере, и распределение осуществлялось между ядрами одного процессора. В результате проведенных имитационных экспериментов на моделях сетей сетчатой топологии показано, что отсутствие сбалансированности по объему передаваемых данных между частями распределенной модели ведет к снижению скорости выполнения модели в несколько раз, что объясняется накладными расходами на передачу данных между логическими процессами распределенной модели в связи с использованием MPI. Изменение времени выполнения модели при неравномерном распределении вычислительной нагрузки в значительной степени зависит от нагрузки, которую создают приложения, работающие на узлах моделируемой сети. Показано, что даже при использовании приложений, не требующих значительных вычислительных ресурсов, сбалансированная модель выполняется быстрее несбалансированного варианта. Для уменьшения времени распределенного моделирования предлагается разделение модели таким образом, чтобы уменьшить количество передаваемых данных между ее частями и сократить разброс нагрузок, создаваемый приложениями в разных логических процессах модели.

Ключевые слова: распределенное моделирование, компьютерные сети, NS-3, балансировка нагрузок.

RUNTIME BALANCING EFFECT IN DISTRIBUTED SIMULATION MODEL

D.N. Shinkaruk^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: dimashink@gmail.com

Article info

Received 21.11.14, accepted 25.12.14
doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-101-106
Article in Russian

Reference for citation: Shinkaruk D.N. Runtime balancing effect in distributed simulation model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 101–106 (in Russian)

Abstract. The paper deals with study of the load distribution effect between computing nodes for simulation run-time of a distributed computer network model. Two main types of balancing are considered: computational load balancing and reduction of transmitted amounts of data. Simulation was performed on one computer, and distribution was carried out between the cores of one processor. Simulation experiments showed that the lack of balance in the amounts of data, transferred between parts of a distributed model, leads to decrease of the simulation speed by several times due to overhead charges for data transmission between logical processes because of MPI usage. Model run-time changing at uneven distribution of computational load depends to a large extent on the load, which is created by the applications running on the simulated network nodes. It is shown that a balanced model is performed much faster than unbalanced version even when using applications that do not require significant computing resources. Simulation time reduction can be achieved by model separation in such manner as to reduce amounts of data transferred between its parts and reduce variability of loads generated by applications in different logical processes.

Keywords: distributed simulation, computer networks, NS-3, load balancing.

Введение

Большие системы состоят из тысяч, десятков тысяч элементов и еще большего количества связей между ними. Такие системы характеризуются неоднородностью элементов (большим количеством раз-

личных типов элементов) и неоднородностью связей. Это приводит к тому, что классические математические методы становятся практически непригодными для описания и анализа больших систем [1]. Примером большой системы может быть компьютерная сеть провайдера или сеть крупного предприятия. Несмотря на то, что отдельные элементы или связи прекрасно описываются моделями дискретной математики или теории массового обслуживания [2], о системе в целом этого сказать нельзя. Естественной альтернативой является использование имитационного моделирования, позволяющего соединить между собой разнородные математические модели элементов системы [3].

Имитационное моделирование успешно используется для анализа систем различного масштаба [4]. Но при исследовании больших систем возникают специфические проблемы, требующие использования параллельного или распределенного моделирования и балансировки нагрузки [5–10].

В настоящей работе рассматривается применение системы имитационного моделирования NS-3 для моделирования больших компьютерных сетей с поддержкой возможности распределения вычислений между узлами для ускорения процесса моделирования [11]. NS-3 позволяет строить компьютерные сети с глубоким уровнем детализации процессов, происходящих в узлах и каналах моделируемой сети.

Уменьшение времени исполнения распределенной модели относительно последовательной зависит от того, насколько удачно пользователь разбил модель на подмодели до начала процесса моделирования. Однако предугадать нагрузку на узлы моделируемой сети или объем передаваемых данных по линиям связи довольно сложно, и в некоторых случаях необходим детальный анализ структуры моделируемой сети [12, 13]. Таким образом, пользователю сложно эффективно разделить модель, что приведет к увеличению времени выполнения модели. В ситуациях, когда параметры модели меняются в ходе моделирования, эффективно разбить модель перед запуском модельного прогона невозможно [14]. В этом случае необходимо использовать динамическую балансировку нагрузки в процессе моделирования. Цель настоящей работы – экспериментально оценить зависимость времени имитационного эксперимента от способа разбиения модели на логические процессы.

Особенности распределенной системы моделирования NS-3

Система моделирования NS-3 служит для моделирования процессов, протекающих в компьютерных сетях [15]. В связи с этим внутреннее устройство системы во многом обусловлено этой спецификой, включая наличие различных стеков сетевых протоколов и передачу данных между узлами при помощи пакетов, структура которых полностью повторяет структуру реальных сетевых пакетов, что также делает возможным использование системы в реальных компьютерных сетях [16].

Модель в NS-3 состоит из узлов, выполняющих роль компьютеров, к которым подключаются сетевые адаптеры, которые, в свою очередь, соединяются при помощи каналов передачи данных. Для выполнения какой-либо полезной работы на узлы устанавливаются приложения, которые выполняют необходимую работу (генерация, обработка, прием данных) [17].

Распределение модели в NS-3 выполняется следующим образом: узлам при создании присваивается определенный номер, который соответствует номеру логического процесса (ЛП), в котором будет обрабатываться этот узел. ЛП – это последовательная часть модели, которая имеет собственный набор объектов, управляющую программу и часы локального времени. В ЛП происходит моделирование только тех процессов, которые относятся к узлам, привязанным к данному ЛП. При установке приложений на узлы учитывается то, к какому ЛП принадлежит данный узел, и приложения, создающие наибольшую вычислительную нагрузку, не дублируются между подмоделями и выполняются только в пределах своего ЛП. В отличие от приложений, все узлы модели и связи между ними создаются во всех ЛП, т.е. каждый ЛП содержит полную топологию моделируемой сети. Сделано это для упрощения процессов маршрутизации [18].

Связь логических процессов между собой осуществляется при помощи MPI (*Message Passing Interface*). Если канал, соединяющий два моделируемых узла, пересекает границы логических процессов, то пакет, передаваемый по этому каналу, упаковывается в сообщение MPI, передается сетевыми средствами операционной системы, в которой выполняется модель, и после приема пакета ЛП-адресатом извлекается из сообщения и преобразовывается в структуру пакета NS-3 для дальнейшей передачи по каналам связи.

Несбалансированность по вычислительной нагрузке

Для демонстрации результатов неэффективного разбиения модели был проведен ряд экспериментов. Были созданы сети сетчатой топологии различных размеров: 20×10 , 40×10 , 60×10 . В каждой моделируемой сети было запущено различное количество приложений. Приложения делятся на два вида: генераторы и приемники трафика. Модель разбивалась на два логических процесса, каждый из которых содержал одинаковое количество моделируемых узлов. Генераторы трафика посылали данные на узлы, расположенные в том же ЛП (трафик между логическими процессами не передавался). Различное распределение приложений между логическими процессами позволяло создавать сбалансированную или несбалансированную распределенную модель. Каждое приложение-генератор создает равномерный поток UDP-пакетов в направлении приемника. Скорость потока равна 1 Мбит/с, размер пакетов – 512 Б. Генераторы

и приемники трафика располагаются равномерно по краям сетки в моделируемой сети в данном ЛП (рис. 1). Таким образом, каждая пара генератор–приемник создает одинаковую нагрузку в рамках одного ЛП, так как между ними располагается одинаковое количество промежуточных узлов. Моделировалось 5 мин работы такой сети. Все эксперименты проводились на компьютерах с процессором Intel Core i5 (4×2,6 GHz) и 8 ГБ оперативной памяти.

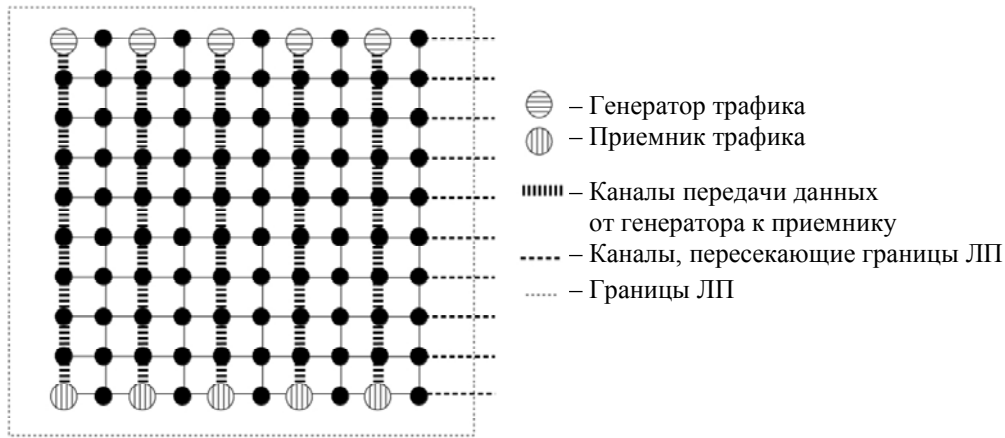


Рис. 1. Структура моделируемой сети 20×10 для одного из логических процессоров

В табл. 1 представлены результаты моделирования. Отдельно от времени моделирования (T_m) выделено время построения топологии (T_t), так как для больших сетей оно составляет большую часть общего времени выполнения модели (T_f) и является постоянным для каждой отдельной сети. Большую часть этого времени занимают создание связей между узлами и настройка различных параметров для них (пропускная способность, ip-адреса интерфейсов). Количество таких связей в сети сетчатой топологии будет выражаться формулой $M \times (N-1) + N \times (M-1)$, где M и N размеры сетки.

Из табл. 1 видно, что время моделирования сбалансированной модели и худшего варианта несбалансированной модели различается в 2,47 раза для сети размером 20×10 и в 3,54 раза для сетей 40×10 и 60×10. Однако такое сравнение различных моделей некорректно, так как отношение количества приложений в разных ЛП больших и малых моделируемых сетей различно. Так, для худшего варианта несбалансированности сети 20×10 оно составляет 1/9, а для сети 60×10 – 1/29. Если же сравнивать время моделирования для сетей с одинаковым соотношением несбалансированности, то получим, что при соотношении 1/9 модель сети 20×10 выполнялась в 2,47 раза медленнее сбалансированной модели, тогда как модель сети 60×10 (распределение приложений 27×3) в 3,14 раз медленнее. Связано это с тем, что с увеличением количества приложений в ЛП возрастает нагрузка на вычислительное ядро системы, на котором обрабатывается данный ЛП, в том числе и из-за возрастающего объема передаваемых данных, что влечет за собой увеличение нагрузки на подсистему работы с памятью.

Размер сети	Количество приложений	Распределение приложений между ЛП	T_f , с	T_t , с	T_m , с
20×10	10	9×1	2,1	0,2	1,9
		7×3	1,5	0,2	1,3
		5×5	0,9	0,2	0,7
40×10	20	19×1	23,1	7,7	15,4
		17×3	20,1	7,6	12,4
		15×5	17,9	7,6	10,2
		13×7	15,3	7,6	7,6
		10×10	12,0	7,7	4,3
60×10	30	29×1	171,1	108,7	62,3
		27×3	165,5	110	55,5
		25×5	158,8	110,2	48,5
		23×7	152	109,8	42,2
		20×10	142,8	109,9	32,8
		17×13	133,8	109,9	23,8
		15×15	129,6	111,9	17,6

Таблица 1. Сравнение времени выполнения сбалансированной и несбалансированной по вычислительной нагрузке модели

Несбалансированность по объему передаваемых данных

В предыдущем эксперименте в разных ЛП модели работало различное количество приложений, которые создавали разную нагрузку на вычислительные узлы. Модель была построена таким образом, что трафик между логическими процессами не передавался. Однако, так как для взаимодействия ЛП используется MPI, то пакеты, пересекающие границы ЛП, должны быть упакованы в сообщения MPI и переданы через сетевую инфраструктуру операционной системы. Это создает дополнительные накладные расходы и должно влиять на время выполнения модели [19, 20].

Для следующего эксперимента также были построены модели сетей сетчатой топологии (10×10, 20×20, 30×30), однако трафик между узлами-генераторами и приемниками пересекал границы ЛП (рис. 2). Модель построена так, чтобы в каждом ЛП было одинаковое количество приложений-генераторов и приемников. Таким образом, исключается влияние количества приложений в логических процессах на время выполнения модели.

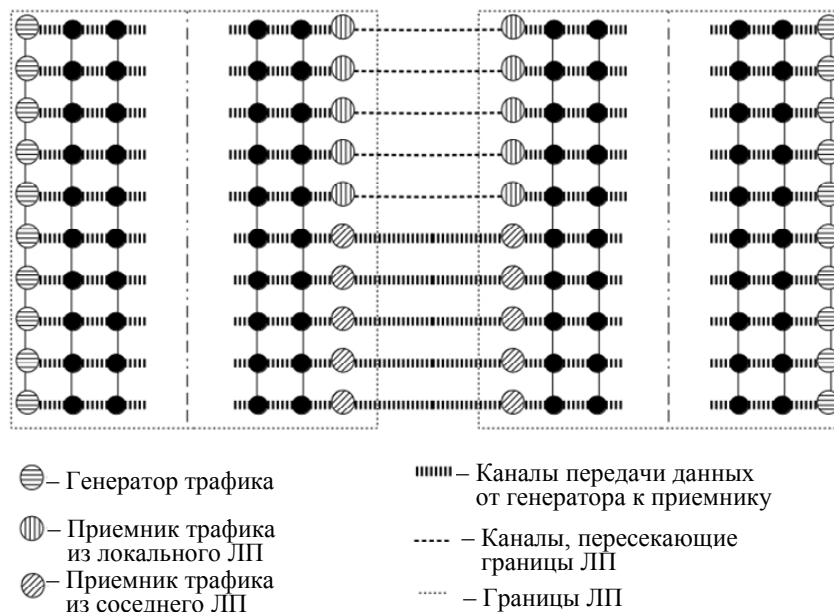


Рис. 2. Структура модели компьютерной сети, в которой трафик пересекает границы логических процессов

Размер сети	Количество приложений	Распределение потоков данных	T_f, c	T_m, c
10×10	20	20×0	3,53	3,33
		16×4	2,92	2,72
		12×8	2,34	2,15
		8×12	1,81	1,58
		4×16	1,16	0,96
		0×20	0,57	0,36
20×20	40	40×0	48,71	40,97
		32×8	45,97	38,23
		24×16	43,77	36,14
		16×24	37,24	29,58
		8×32	30,75	23,13
		0×40	23,94	16,24
30×30	60	60×0	294,43	189,72
		48×12	288,39	184,08
		36×24	279,5	176,44
		24×36	257,15	151,04
		12×48	220,42	116,92
		0×60	185,34	81,19

Таблица 2. Время выполнения модели с пересечением потоками данных границ ЛП

В табл. 2 представлены результаты проведенных экспериментов. Так как количество приложений-генераторов в каждом ЛП одинаково, то в таблице представлено распределение приложений, трафик ко-

торых пересекает и не пересекает границы логических процессов. Так, соотношение 12×28 для 40 приложений означает, что потоки данных 12 приложений пересекают границы ЛП, а 28 приложений передают данные только в пределах одного ЛП.

Из табл. 2 видно, что при отсутствии передачи данных между логическими процессами моделирование выполняется в 2,2–2,5 раза быстрее для больших сетей и до 9,2 раза для сети 10×10 узлов, чем в ситуации, когда все приложения передают данные в соседний ЛП.

На рис. 3 представлена зависимость времени моделирования от распределения приложений, передающих данные только внутри ЛП и пересылающих данные в соседний ЛП.

Таким образом, время моделирования для представленных моделей могло быть сокращено за счет уменьшения объема передаваемых данных между логическими процессами. Сделать это можно, изменяя границу разбиения модели на логические процессы таким образом, чтобы максимально локализовать трафик внутри ЛП. Для представленной на рис. 2 модели можно проводить границу не в вертикальной плоскости, а в горизонтальной, в таком случае весь трафик будет локализован внутри отдельных ЛП. Однако для большинства моделей такое идеальное разбиение затруднительно, так как распределение узлов генераторов и приемников может быть случайным. В таком случае перераспределение генераторов и приемников необходимо выполнять отдельно на уровне моделируемых узлов.

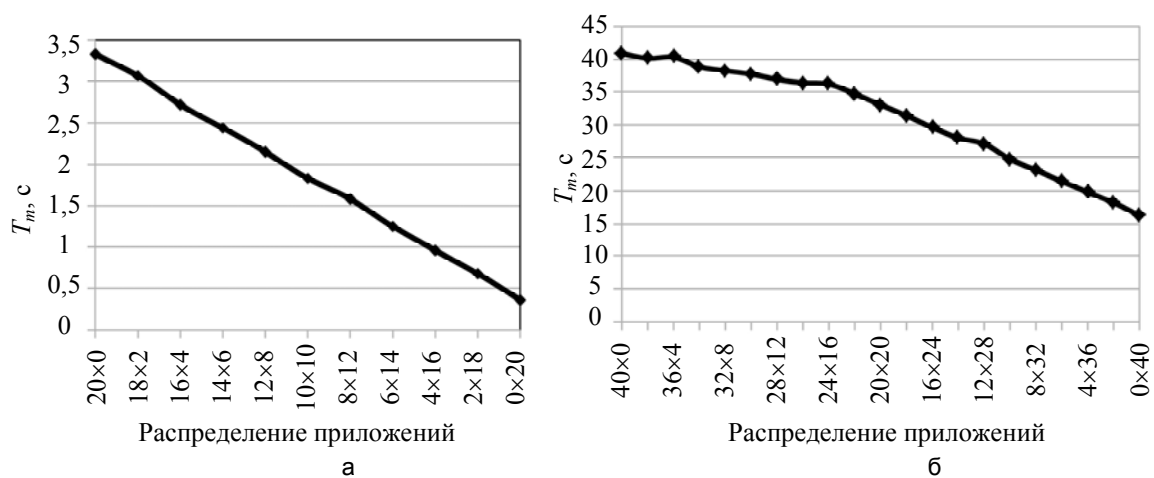


Рис. 3. Зависимость времени моделирования от распределения трафика между ЛП: 20 активных приложений в сети 10×10 (а); 40 активных приложений в сети 20×20 (б)

Заключение

В результате проведенных экспериментов показано, что несбалансированность распределенной имитационной модели может значительно влиять на время моделирования. В некоторых случаях расчет плохо сбалансированной распределенной модели может выполняться значительно дольше аналогичной нераспределенной модели из-за накладных расходов, связанных с синхронизацией времени и передачей данных между логическими процессами.

В работе рассмотрена балансировка нагрузки между вычислительными узлами при распределении модели сети передачи данных с сетчатой топологией. Экспериментально показано, что время выполнения несбалансированной модели, в которой логические процессы обрабатывают разное количество приложений, может в 2,5–3 раза превышать время выполнения сбалансированной модели. При моделировании больших компьютерных сетей с большим количеством приложений, создающих значительную нагрузку на вычислительные узлы, эта разница будет значительно больше.

Также показано, что изменение количества передаваемых данных между логическими процессами сильно влияет на время выполнения модели из-за значительных накладных расходов на передачу данных между логическими процессами. Для малых сетей соотношение между временем исполнения сбалансированной и несбалансированной модели достигло 9 раз. Для больших моделей (20×20 и 30×30) соотношение составило 2,2–2,5 раза. Связано это с тем, что в больших моделях значительную часть времени выполнения тратится на моделирование работы приложений. Таким образом, большая часть времени работы логических процессов тратится на обработку приложений и передачу данных между узлами внутри отдельного логического процесса.

Для уменьшения времени исполнения распределенных моделей компьютерных сетей следует учитывать два основных фактора, влияющих на скорость моделирования: равномерность загрузки логических процессов и минимизация передаваемых между логическими процессами данных. В большинстве моделей эти два фактора могут быть связаны друг с другом различными соотношениями, в такой ситуации необходимо минимизировать функцию времени от этих двух параметров.

Литература

1. Миков А.И., Замятина Е.Б. Технология имитационного моделирования больших систем // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». М.: МГУ, 2008. С. 199–204.
2. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
3. Fujimoto R.M. Parallel and Distributed Simulation Systems. Wiley, 2000. 320 p.
4. Perumalla K., Park A., Wu H., Ammar M.H., Riley G.F. Large-scale network simulation: how big? How fast? // IEEE 20th Int. Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. 2003. P. 116–123.
5. Manjikian N., Loucks W.M. High performance parallel logic simulations on a network of workstations // ACM SIGSIM Simulation Digest. 1993. V. 23. N 1. P. 76–84.
6. Misra J. Distributed discrete-event simulation // ACM Computing Surveys. 1989. V. 18. N 1. P. 39–65.
7. Chandy K.M., Misra J. Distributed simulation: a case study in design and verification of distributed programs // IEEE Transactions on Software Engineering. 1979. V. SE-5. N 5. P. 440–452.
8. Wentong C., Turner S.J., Hanfeng Z. A load management system for running HLA-based distributed simulations over the grid // Distributed Simulation and Real-Time Applications. 2002. P. 7–14.
9. Deelman E., Szymanski B.K. Dynamic load balancing in parallel discrete event simulation for spatially explicit problems // Proc. Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS'98). Banff, Canada, 1998. P. 46–53.
10. Schlaghaft R., Ruhwandl M., Bauer H., Sporrer C. Dynamic load balancing of a multi-cluster simulator on a network of workstations // Proc. 9th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS'95). Lake Placid, USA, 1995. V. 25. N 1. P. 175–180.
11. Renard K., Peri C., Clarke J. A performance and scalability evaluation of the NS-3 distributed scheduler [Электронный ресурс]. 2012. Режим доступа: <http://eudl.eu/pdf/10.4108/icst.simutools.2012.247679>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 18.11.2014).
12. Nandy B., Loucks W.M. An algorithm for partitioning and mapping conservative parallel simulation onto multicomputers // Proc. 6th Workshop on Parallel and Distributed Simulation. 1992. P. 139–146.
13. Nandy B., Loucks W.M. On a parallel partitioning technique for use with conservative parallel simulation // Proc. 7th Workshop on Parallel and Distributed Simulation. San Diego, USA, 1993. V. 23. N 1. P. 43–51.
14. Ferscha A. Parallel and Distributed Simulation of Discrete Event Systems. In: Handbook of Parallel and Distributed Computing. McGraw-Hill, 1995. 49 p.
15. Henderson T.R., Floyd S., Riley G.F. NS-3 Project Goals [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www2.nsnam.org/docs/meetings/wns2/wns2-ns3.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.11.2014).
16. Алиев Т.И., Бурмакин Н.Г., Соснин В., Тихонов М.Ю., Шинкарук Д.Н. САПР маршрутизируемой компьютерной сети на основе компонентов с открытыми исходными кодами // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 10. С. 47–53.
17. Соснин В.В., Шинкарук Д.Н. Особенности проектирования имитационной модели маршрутизируемой компьютерной сети // Сборник трудов молодых ученых и сотрудников кафедры ВТ. Выпуск 3. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. С. 57–63.
18. Pelkey J., Riley G. Distributed simulation with MPI in NS-3 [Электронный ресурс]. 2011. Режим доступа: <http://users.ece.gatech.edu/~riley/ece6110/handouts/DistNS3.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.11.2014).
19. Liu X., Chien A.A. Traffic-based load balance for scalable network emulation // Proc. 2003 ACM/IEEE Conference on Supercomputing. 2003. P. 40. doi: 10.1145/1048935.1050190
20. Zhou S. Trace-driven simulation study of dynamic load balancing // IEEE Transactions on Software Engineering. 1988. V. 14. N 9. P. 1327–1341. doi: 10.1109/32.6176

Шинкарук Дмитрий Николаевич — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, dimashink@gmail.com

Dmitry N. Shinkaruk — assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, dimashink@gmail.com

УДК 004.855

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЯЗЫКА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

А.С. Потапов^a, В.В. Батищева^b, А.Ю. Воропай^c

^a Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

^b Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

^c ИП «ТраффикДНА Украина», Запорожье, 69001, Украина

Адрес для переписки: pas.aicv@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.11.14, принята к печати 25.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-107-114

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Потапов А.С., Батищева В.В., Воропай А.Ю. Исследование влияния языка представления решений на эффективность предсказания целочисленных последовательностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 107–114

Аннотация. Предметом исследования в работе являются методы генетического программирования при решении задач экстраполяции целочисленных последовательностей. В целях проверки гипотезы о влиянии выразительности языка представления программ на эффективность предсказания был реализован метод генетического программирования на основе нескольких ограниченных языков для представления рекуррентных последовательностей. На одной выборке последовательностей реализованный метод с использованием наиболее полного языка показал результаты, существенно превосходящие один из представленных в литературе современных методов на основе искусственных нейронных сетей. Анализ результатов экспериментального сравнения разработанного метода с использованием различных языков показал, что расширение языка, делая доступными для предсказания новые классы последовательностей, в то же время увеличивает сложность поиска закономерностей для последовательностей, доступных для предсказания в более простом языке. Данный эффект может быть ослаблен, но не устранен полностью, при расширении языка конструкциями, делающими решения наиболее компактными. На основе проведенных исследований сделан вывод, что, хотя с использованием генетического программирования могут быть получены практически применимые методы, одного только выбора адекватного языка представления решений недостаточно для полного решения задачи предсказания целочисленных последовательностей (и, тем более, проблемы универсального предсказания).

Ключевые слова: генетическое программирование, универсальное предсказание, целочисленные последовательности, алгоритмическая сложность.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №2323 в рамках базовой части государственного задания) и частично при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

STUDY OF SOLUTION REPRESENTATION LANGUAGE INFLUENCE ON EFFICIENCY OF INTEGER SEQUENCES PREDICTION

A.S. Potapov^a, V.V. Batishcheva^b, A.Yu. Voropay^c

^a ITMO University, Saint Petersburg 197101, Russia

^b Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

^c FE «TrafficDNA Ukraine», Zaporizhzhya, 69001, Ukraine

Corresponding author: pas.aicv@gmail.com

Article info

Received 10.11.14, accepted 25.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-107-114

Article in Russian

Reference for citation: Potapov A.S., Batishcheva V.V., Voropay A.Yu. Study of solution representation language influence on efficiency of integer sequences prediction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 107–114 (in Russian)

Abstract. Methods based on genetic programming for the problem solution of integer sequences extrapolation are the subjects for study in the paper. In order to check the hypothesis about the influence of language expression of program representation on the prediction effectiveness, the genetic programming method based on several limited languages for recurrent sequences has been developed. On the single sequence sample the implemented method with the use of more complete language has shown results, significantly better than the results of one of the current methods represented in

literature based on artificial neural networks. Analysis of experimental comparison results for the realized method with the usage of different languages has shown that language extension increases the difficulty of consistent patterns search in languages, available for prediction in a simpler language though it makes new sequence classes accessible for prediction. This effect can be reduced but not eliminated completely at language extension by the constructions, which make solutions more compact. Carried out researches have drawn to the conclusion that alone the choice of an adequate language for solution representation is not enough for the full problem solution of integer sequences prediction (and, all the more, universal prediction problem). However, practically applied methods can be received by the usage of genetic programming.

Keywords: genetic programming, universal prediction, integer sequences, algorithmic complexity.

Acknowledgements. The research has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project #2323 within the basic component of the government assignment) and partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01).

Введение

Экстраполяция последовательностей символов является принципиальным компонентом моделей универсального искусственного интеллекта [1]. Для этой проблемы существует общее теоретическое решение – модель универсального предсказания, основанная на понятии алгоритмической вероятности [2]. К сожалению, данное решение является невычислимым, в связи с чем на его основе невозможно непосредственно построить практически применимые методы. Даже вычисляемые аппроксимации модели универсального предсказания, в частности, основанные на сложности по Л.А. Левину [3], вместо алгоритмической вероятности, без использования каких-то дополнительных эвристик требуют слишком большого объема вычислений.

В этой связи представляет интерес исследование связи теоретической модели универсального предсказания с эффективными специализированными методами, работающими в конкретных проблемных областях. В качестве такой области может выступать предсказание целочисленных последовательностей, представляющее самостоятельный интерес. Действительно, такое предсказание является традиционным компонентом IQ-тестов [4], в связи с чем его выполнение нередко требуется и от моделей искусственного интеллекта [5–7].

Некоторые авторы [5] указывают на существование всего двух подходов к решению этой проблемы – на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) и антиунификации, противопоставляя их собственному когнитивному подходу (к которому, однако, можно отнести и иные работы [6, 7]). Другие авторы [7] выделяют большое число прочих подходов, включая подходы на основе скрытых марковских моделей, динамического программирования, обучения с подкреплением, графовых моделей, моделей эвристического поиска, эволюционных вычислений, символьного планирования и продукционных систем. Кроме того, существуют и модули предсказания числовых последовательностей в промышленном программном обеспечении, например Mathematica, Maple, Wolfram|Alpha и др. Однако в некоторых работах отмечается их слабость [6, 7].

Стоит отметить, что указанные подходы не являются взаимоисключающими, и их можно классифицировать, по крайней мере, по двум сравнительно независимым компонентам – способу представления решений и методу поиска оптимального решения (в качестве дополнительного компонента можно рассмотреть и критерий оптимальности). Действительно, модели эвристического поиска или эволюционных вычислений имеют прямое отношение к компоненту поиска оптимального решения и могут сочетаться с другими подходами, преимущественно выделяемыми по способу представления решений (задающему пространство решений). Теоретически оптимальная (по вероятности правильного предсказания) модель универсального предсказания характеризуется тем, что в ней используется Тьюринг-полный язык представления решений и исчерпывающий поиск [1, 2], в отличие от практически реализуемых методов. Среди последних выразительная сила языка представления решений может быть различной, что влияет как на скорость поиска решения, так и на множество доступных для предсказания последовательностей. В частности, в работе [7] отмечается, что некоторые коммерческие системы предсказания численных последовательностей ограничиваются рекуррентными соотношениями определенного вида, для которых известны эффективные алгоритмы вычисления коэффициентов по заданной последовательности. В ряде же работ выбор способа представления решений не имеет содержательного обоснования, а ограничения на возможность предсказания последовательностей, накладываемые выбранным способом, в явном виде не описываются. Примером такой работы нам представляется [8], где используются ИНС, оказавшиеся принципиально неспособными предсказывать некоторые из последовательностей, выбранных авторами.

Более глубокими на этом фоне нам представляются работы, в которых выбор языка представления присутствует как явно поставленная задача. Естественно, постановка этой задачи может проистекать из особенностей конкретного приложения. Однако в рамках исследований по искусственному интеллекту интерес представляет создание системы, способной выполнять предсказание, по крайней мере, тех же последовательностей, что и человек [5–7]. При этом структура языка представления также зачастую выбирается, исходя из аналогий с человеческим мышлением, и разрабатывается лишь один язык представления.

Таким образом, актуальной является задача более детального сравнения и анализа влияния выбора языка представления решений на эффективность предсказания целочисленных последовательностей. В рамках настоящей работы рассмотрена последовательность из нескольких усложняющихся языков для представления выражений, задающих числовые последовательности. Для поиска выражения, восстанавливающего заданную последовательность, реализован вариант метода генетического программирования. Проведено исследование эффективности поиска различных выражений (возможности и трудоемкости их обнаружения) в зависимости от языка.

Модель универсального предсказания

Основы теории универсального предсказания заложены полвека назад [9, 10]. Основное понятие в этой теории – понятие алгоритмической вероятности, которая для некоторой символьной (например, бинарной) строки α определяется как

$$P_U(\alpha) = \sum_{\mu: U(\mu)=\alpha} 2^{-l(\mu)},$$

где U – некоторая универсальная машина (например, универсальная машина Тьюринга), $l(\mu)$ – длина программы μ для этой машины (при представлении μ как битовой строки). Суммирование ведется по всем программам, которые при выполнении на машине U на выходе печатают α (в целях решения задачи предсказания следует требовать, чтобы программа μ печатала некоторую строку, не обязательно точно совпадающую с α , но строку, префиксом которой является строка α).

Предсказание осуществляется на основе условной алгоритмической вероятности, определяемой на основе выражения

$$P_U(\beta | \alpha) = P_U(\alpha\beta)/P_U(\alpha),$$

где $\alpha\beta$ – конкатенация двух строк. $P_U(\beta | \alpha)$ оказывается вероятностью того, что строка β будет напечатана после строки α .

Крайне привлекательным свойством алгоритмической вероятности является то, что предсказание при ее использовании в качестве критерия асимптотически (причем зачастую достаточно быстро) сходится к оптимальному при увеличении длины экстраполируемой строки [2] для любого вычислимого источника данных, даже если никакой априорной информации об этом источнике или его классе нет, в связи с чем такое предсказание и получило название модели универсального предсказания. При этом в предсказании используются все возможные модели источника информации, не противоречащие имеющимся данным (т.е. не происходит выбора лучшей модели). Однако таких моделей бесконечно много.

Очевидным упрощением, позволяющим избежать суммирования по бесконечному числу слагаемых, является использование только наибольшего из них. Таковым является слагаемое $2^{-K_U(\alpha)}$, где $K_U(\alpha) = \min_{\mu: U(\mu)=\alpha} l(\mu)$ – алгоритмическая сложность строки α по А.Н. Колмогорову (или ее модификации, предполагающая порождение программой μ строки α в качестве префикса).

Данное упрощение, не являющееся адекватным в моделях общего искусственного интеллекта [11], приемлемо при решении задачи предсказания, поскольку также обеспечивает сходимость [12] (хотя и более медленную). Более того, в IQ-тестах зачастую предполагается однозначный выбор лучшей модели. Действительно, такие последовательности, как 1, 2 или 6, 7, 8, 10, представляются для теста некорректными, поскольку допускают несколько близких по сложности решений с разными предсказаниями. Таким образом, достаточно вести поиск наикратчайшей программы, согласованной с заданной строкой, после чего выполнять предсказание только на ее основе.

Однако такой поиск также алгоритмически нереализуем в силу неразрешимости проблемы останова. Использование сложности по Левину, $C_U(\alpha) = \min_{\mu: U(\mu)=\alpha} [l(\mu) + \log_2 t(\mu, \alpha)]$, где $t(\mu, \alpha)$ – число операций, совершаемых программой μ для печати α , решает данную проблему. Величина $C_U(\alpha)$ является не только вычислимой, но также может считаться адекватнее и с точки зрения задания априорных вероятностей программ. В частности, предпочтение моделям, наиболее простым как структурно, так и вычислительно, отдается и человеком [7].

Однако прямой поиск оптимального по критерию $C_U(\alpha)$ решения μ^* требует числа операций, возрастающих экспоненциально с $l(\mu^*)$, и становится практически неосуществимым уже для весьма коротких программ (длиной несколько десятков бит) [13]. Может возникнуть впечатление, что неэффективность такого подхода связана с его чрезмерной общностью, проистекающей из универсальности (полноты по Тьюрингу) опорной машины U . Однако отказ от универсальности U в пользу ограниченных машин (языков представления решений), допускающих эффективные алгоритмы поиска, приводит к принципиальной невозможности предсказания тех или иных последовательностей, доступных для предсказания человеку. При менее жестких ограничениях, даже в случае неуниверсальности U , поиск оптимального решения вполне может оказаться NP-полной задачей (к примеру, при использовании в качестве U опорной машины, эквивалентной контекстно-зависимым грамматикам).

Таким образом, разработка эффективных методов поиска для специализированных U , хотя и является практически важной (и даже, может быть, значимой компонентой общего интеллекта), не решает проблемы в целом. Общим приемом облегчения поиска оптимального решения здесь может служить уменьшение сложности самого этого решения за счет выбора подходящей опорной машины. Способ представления программ на языке этой машины и наличие или отсутствие в нем тех или иных операций в качестве базовых может существенно сказаться на длине искомого решения и, как следствие, на скорости его обнаружения [13]. В частности, в случае классической универсальной машины Тьюринга реализация одной только операции сложения чисел в битовом представлении будет достаточно длинной, чтобы задача экстраполяции числовых последовательностей оказалась практически нерешаемой даже в самых простых случаях. Таким образом, выбор представления оказывается одним из ключевых моментов для достижения эффективности в методе универсальной индукции.

Выбор языков представления числовых последовательностей

Программа μ , являющаяся моделью источника некоторой последовательности α , должна порождать строку, префиксом которой оказывается α . Вместо таких программ несколько удобнее рассматривать функции, которые возвращают следующий элемент последовательности, получая на вход предыдущие элементы. Имея такую функцию, несложно построить программу, которая будет в цикле порождать всю последовательность.

В качестве таковых функций мы будем рассматривать функции из разных подмножеств языка Racket (диалект Lisp/Scheme – <http://racket-lang.org/>). Одно из простейших подмножеств для задачи предсказания можно определить следующим образом:

```
(define (f xs) t).
```

Здесь f – функция, возвращающая следующий элемент последовательности по списку предыдущих элементов xs ; t – терм, определяемый рекурсивно: цифры 0, ..., 9 – термы; $(length\ xs)$ – терм; если t_1 и t_2 – термы, то $(o_2\ t_1\ t_2)$, где o_2 – одна из двуместных библиотечных функций (+, -, *), также терм. $(length\ xs)$ рассматривается как элементарный терм, а не как одноместная операция, применяемая к произвольному терму, поскольку в данном подмножестве языка нет других списков, к которым эту операцию можно было бы применить, и такой подход позволяет избавиться от необходимости контроля типов (все термы имеют тип целого числа). Для явного указания на элементарность этого терма можно множество функций задать в следующем виде

```
(define (f xs)
  (let ([n (length xs)]) t))
```

и при генерации t вместо $(length\ xs)$ использовать n .

Данный язык, который мы обозначим S_1 , задает множество многочленов с целочисленными коэффициентами. Например, вместо t может быть подставлено выражение $(+ n 1)$, что даст последовательность '(1 2 3 4...), или $(* n (+ n 1))$, что даст последовательность '(0 2 6 12...), и т.д. Естественно, этот язык весьма ограничен, и в нем не может быть описано много простых для человека последовательностей, например, последовательность Фибоначчи.

Для человека естественным является задание последовательностей в рекуррентном виде [7]. В этой связи введем расширение языка S_1 , включив в него символы x_1 и x_2 , обозначающие последний, $(n-1)$ -й, и предпоследний, $(n-2)$ -й, элементы списка xs соответственно. Обращение к этим элементам требует особой обработки при $n < 2$. Типичным для рекуррентного задания последовательностей является введение базовых случаев. В этой связи может быть рассмотрено специальное подмножество функций, которое мы будем обозначать через S_2 :

```
(define (f xs)
  (let ([n (length xs)])
    (cond [(equal? n 0) a0]
          [(equal? n 1) a1]
          [#t (let ([x1 (list-ref xs (- n 1))]
                   [x2 (list-ref xs (- n 2))])
                t)))]))
```

Здесь a_0 и a_1 заменяются первыми двумя элементами последовательности, а t определяется, как и ранее, но с добавлением символов x_1 и x_2 . Стоит отметить, что в данном специальном подмножестве программ значения a_0 и a_1 не ищутся перебором, что само по себе является существенной *ad hoc* оптимизацией универсальной индукции. Также структура $cond$ является априорно заданной и может не учитываться при определении сложности программы, за исключением вариативной части, т.е. заменяемых элементов a_0 и a_1 . Для функций, не использующих символы x_2 и (или) x_1 , задание a_1 и (или) a_0 не требуется, и их сложность может считаться более низкой.

Введение указанных двух символов существенно расширяет выразительную силу языка S_2 . Вместо этих двух символов можно было бы добавить общую операцию взятия элемента последовательности с

заданным номером k , которое бы работало как (list-ref xs k). Тогда вместо $x1$ можно было бы использовать выражение (list-ref xs (- n 1)). Очевидно, однако, что вероятность породить такое выражение в ходе перебора весьма мала, в отличие от выражения $x1$. В этой связи может быть полезным ввести данную операцию не как замену, а как дополнение к символам $x1$ и $x2$. Кроме того, поскольку обращение к предыдущим элементам последовательности может быть более типичным, чем к первым элементам, более эффективной представляется операция вида (xs-ref k), эквивалентная (list-ref xs (- n k)). Язык, расширенный данной операцией, а также операцией целочисленного деления, обозначим как S_3 .

Полезным является сравнение этого языка с языком S_{3-} , в котором вместо $x1$, $x2$ и $xs-ref$ используется $list-ref$, первым аргументом которого всегда является xs , так как других списков в этом языке нет, а вторым аргументом является номер элемента в списке (который, в отличие от $xs-ref$, отсчитывается не с конца списка, а с его начала).

Специальной обработки при вызове функций $list-ref$ и $xs-ref$ требует случай выхода за границы списка. Как и при использовании термов $x1$ и $x2$, оказывается необходимым вводить базовые случаи $a0$ и $a1$, так и для этих функций обращение к несуществующим элементам является индикатором базового случая. Такая программа считается корректной, но введение дополнительных базовых случаев штрафует за сложность (прибавляется к длине программы).

Рассмотренные языки могут быть расширены и дальше до алгоритмически полных языков, однако для достижения целей нашего исследования этого не требуется.

Реализация генетического программирования

Эффективным средством поиска в пространстве программ (в различных формализмах – от клеточных автоматов до нейронных сетей) считается генетическое программирование (ГП) [14, 15], идея использования которого для реализации универсальной индукции также высказывалась ранее [2]. Естественно, нельзя ожидать, чтобы ГП целиком решало проблему поиска в пространстве программ, однако, по крайней мере, оно существенно практичнее полного перебора или случайного поиска (что, в частности, было проверено в наших экспериментах: с помощью полного перебора оказалось практически невозможным искать программы длиной более 5 термов).

Программы в случае рассмотренных языков представляются деревьями (вложенными списками), чем и определяется реализация метода ГП для них. ГП традиционно включает следующие шаги:

- генерацию начальной популяции некоторого размера N_{pop} ;
- порождение последующих поколений (в базовом случае число поколений является установочным параметром N_{gen}):
 - порождение kN_{pop} потомков, где k – установочный параметр, больший либо равный единице ($k=1$ может использоваться в случае, когда особи из предыдущего поколения участвуют в отборе вместе с особями из нового поколения; в противном случае типично использование $k \geq 2$), для каждого из которых выполняются действия:
 - выбор родительской пары;
 - скрещивание;
 - мутация;
 - отбор лучших N_{pop} особей.

В нашей реализации каждая особь начальной популяции порождалась с использованием процедуры, работающей в соответствии с рекурсивным определением термина со случайным выбором между возможными вариантами, вероятности которых брались разными. Например, в языке S_1 в 30% случаев в качестве термина порождалась случайная цифра (сами цифры были равновероятными), в 30% случаев – символ n , а в 40% случаев – (op2 t1 t2), где op2 с равной вероятностью оказывалась одной из операций $+$, $-$, $*$, а $t1$ и $t2$ далее порождались рекурсивно. Конкретный выбор этих вероятностей может существенно сказываться на трудоемкости нахождения решения для продолжения той или иной последовательности, однако этот вопрос детально не исследовался в связи с тем, что нас интересовало не построение максимально эффективной системы предсказания последовательностей, а относительная эффективность разных языков.

Параметры N_{pop} и N_{gen} в каждом случае подбирались таким образом, чтобы правильное решение находилось не менее чем в 90% запусков. При этом для простоты бралось $N_{pop} = N_{gen}$. Значение k было взято равным двум, но при этом в отборе также участвовали и родительские особи (т.е. отбор на каждой итерации проводился среди $3N_{pop}$ особей).

Родители в паре выбирались равномерно случайно (без учета значения их фитнес-функции) и независимо. Скрещивание было реализовано как замена одного случайно выбранного поддерева в первом родителе на случайно выбранное поддерево во втором родителе. Мутации были реализованы как замена случайно выбранного поддерева в особи на случайно порожденный терм (процедура порождения термов использовалась та же, что и при генерации начальной популяции) и осуществлялись с вероятностью 10%.

Фитнесс-функция включала штраф за сложность программы (число узлов в дереве программы N_{nodes}) и за использование базовых случаев (или выход за границы списка xs) – N_{base} , а также штраф за суммарную ошибку предсказания (в качестве которой бралась сумма модулей отклонений порожденного значения от заданного E_{mod}). Поскольку во всех случаях предполагалась возможность точного предсказания, детальный баланс между сложностью и точностью решения не требовался, и фитнес-функция носила отчасти эвристический характер: $F = 0,1(N_{nodes} + N_{base}) + E_{mod}$.

Поскольку само ГП не является предметом исследования настоящей работы, исследование различных вариантов реализации генетических операторов и детальная настройка параметров не проводились.

Экспериментальный анализ

На первом этапе экспериментов была проверена возможность находить корректные решения для разных S_i в сравнении друг с другом и другими методами, описанными в литературе. К сожалению, детальный перечень тестовых последовательностей был найден лишь в одной работе [8], тогда как в ряде других работ (например, [5]) были использованы последовательности из коммерческих IQ-тестов, в связи с чем они не приводились. Рассмотрим результаты сравнения на 20 последовательностях из [8] (табл. 1)

Последовательность	человек, P	ИНС, P	S_1	S_2	S_3	S_{3-}
12, 15, 8, 11, 4	0,88	0,63	–	60	100	–
148, 84, 52, 36, 28	0,71	0,82	–	–	600	–
2, 12, 21, 29, 36	0,82	0,64	–	180	250	750
2, 3, 5, 9, 17	0,76	0,23	–	130	370	–
2, 5, 8, 11, 14	0,53	0,79	40	35	100	250
2, 5, 9, 19, 37	0,35	0	–	70	180	–
25, 22, 19, 16, 13	0,94	0,79	35	50	70	200
28, 33, 31, 36, 34	1	0,40	–	45	60	1000
3, 6, 12, 24, 48	0,76	0	–	10	50	500
3, 7, 15, 31, 63	0,71	0	–	35	110	1500
4, 11, 15, 26, 41	0,47	0,03	–	40	50	–
5, 6, 7, 8, 10	0,59	0,14	–	–	700	–
54, 48, 42, 36, 30	0,94	0,45	100	45	50	350
6, 8, 5, 7, 4	0,94	0,26	–	120	130	–
6, 9, 18, 21, 42	0,82	0,12	–	–	700	–
7, 10, 9, 12, 11	0,82	0,48	–	55	60	–
8, 10, 14, 18, 26	0,76	0,03	–	150	250	–
8, 12, 10, 16, 12	1	0,06	–	–	230	–
8, 12, 16, 20, 24	0,88	0,73	30	30	35	200
9, 20, 6, 17, 3	0,94	0,48	–	50	70	–

Таблица 1. Результаты предсказания числовых последовательностей

Здесь данные в столбцах «человек, P », «ИНС, P » приведены на основе информации из работы [8] и означают вероятности нахождения корректного решения человеком и ИНС. Последующие столбцы показывают требуемые значения N_{pop} (N_{gen}), при которых ГП находит решение с вероятностью не менее чем 90%. Чтобы получить эти пороговые значения, метод ГП запускался не менее 10 раз для больших и малых значений N_{pop} . Проводилось увеличение нижней границы N_{pop} , пока количество ошибок оказывалось не более двух на 10 запусков, и уменьшение верхней границы N_{pop} , пока не возникало первого ошибочного результата. Далее между этими границами подбиралось такое значение N_{pop} , при котором вероятность ошибки оказывалась приблизительно равной 10% на 20 запусках. Шаг по N_{pop} брался от 5 до 50 в зависимости от его абсолютного значения. Стоит отметить, что время работы метода ГП, реализованного на интерпретируемом языке Scheme, при запуске на компьютере с процессором i7 3,40 ГГц составляло около 1 с при $N_{pop} = N_{gen} = 100$. К сожалению, информации о времени обучения ИНС в работе [8] не приводится.

Как видно, с использованием языка S_3 оказывается возможным предсказывать все из указанных последовательностей, что говорит о нецелесообразности решения задач символьной индукции на нейросетевом уровне.

Очевидно, что в языках S_1 и S_2 некоторые закономерности, представимые в языке S_3 , оказываются непредставимыми, в связи с чем решение не может быть найдено. Интереснее, однако, вопрос, насколько более сложным оказывается поиск эквивалентных решений в более богатых языках. Ведь, как видно из табл. 1, в языке S_{3-} не удастся найти многие последовательности, хотя они все представимы, но в более сложном, чем в S_3 виде. В табл. 2 приведены результаты для последовательностей (взятых из табл. 1 и пополненных), закономерности в которых представимы во всех языках S_i .

Последовательность	Значение N_{pop} (N_{gen})			
	S_1	S_2	S_3	S_{3-}
2, 5, 8, 11, 14	40	35	100	250
25, 22, 19, 16, 13	35	50	70	200
54, 48, 42, 36, 30	100	45	50	350
8, 12, 16, 20, 24	30	30	35	200
0, 1, 4, 9, 16	20	150	200	100
1, 3, 7, 13, 21	60	100	250	750
9, 8, 9, 12, 17, 24	250	200	300	–

Таблица 2. Результаты предсказания числовых последовательностей

Результаты, представленные в табл. 2, могут показаться противоречивыми. В ряде случаев язык S_1 оказывается менее эффективным, чем S_2 или S_3 . Это, однако, связано с тем, что одна и та же закономерность может быть представлена разными способами (как функция от n или рекуррентно). Иначе говоря, расширение языка может не только делать представимыми некоторые закономерности, но также и уменьшать сложность уже представимых закономерностей. В то же время, однако, когда не появляется более простого представления некоторой закономерности, сложность ее поиска, естественно, возрастает. Нас интересует, насколько этот рост существенный.

Во многих случаях это возрастание оказывается умеренным и не приводит к принципиальной невозможности нахождения решения в связи с ресурсными ограничениями. На основе сравнения представлений S_3 и S_{3-} видно, что введение избыточных конструкций, «синтаксического сахара», предпочтительно для ГП: оно дает больший выигрыш в возможности решения новых задач, чем проигрыш в усложнении решения тех задач, которые решались в более простом языке. В то же время сравнение S_1 и S_{3-} показывает, что при «неудачном» расширении языка сложность нахождения решения заметно возрастает (или даже превосходит критический уровень).

Заключение

В работе было проведено исследование влияния языка представления программ на эффективность их поиска методом генетического программирования в задаче экстраполяции целочисленных последовательностей. Рассмотренные языки обладали разной выразительной силой, но не были алгоритмически полными. При этом, если некоторая закономерность не выразима в заданном языке, то последовательность на ее основе не может быть точно экстраполирована (таковой для выбранных языков является, например, последовательность простых чисел). Тем не менее, разработанным методом оказалось возможным предсказывать широкий класс последовательностей, в том числе недоступных для некоторых других существующих методов.

Эксперименты показали, что расширение языка повышает сложность поиска простых закономерностей, постепенно делая этот поиск неэффективным. Добавление «синтаксического сахара» – конструкций, компактно выражающих полезные комбинации термов, – ослабляет этот эффект, однако не устраняет его полностью. Таким образом, представимость решения не означает возможность его найти за обозримое время. Хотя использование генетического программирования с подходящим языком представления программ позволяет получить практически приемлемые методы, для полного решения задачи предсказания целочисленных последовательностей (и, тем более, проблемы универсального предсказания) одного лишь выбора языка недостаточно, и требуется развивать также методы поиска, не ограничиваясь «слепым» поиском, направляемым лишь метаэвристиками.

Литература

1. Hutter M. Universal algorithmic intelligence: a mathematical top→down approach // Cognitive Technologies. 2007. V. 8. P. 227–290. doi: 10.1007/978-3-540-68677-4_8
2. Solomonoff R. Algorithmic probability, heuristic programming and AGI // Proc. 3rd Conf. on Artificial General Intelligence (AGI 2010). Lugano, Switzerland, 2010. P. 151–157.
3. Schmidhuber J. The new AI: general & sound & relevant for physics // Cognitive Technologies. 2007. V. 8. P. 175–198. doi: 10.1007/978-3-540-68677-4_6
4. Stern W., Whipple G. The Psychological Methods of Testing Intelligence. Baltimore: Warwick & York, 1914. 160 p.
5. Siebers M., Schmid U. Semi-analytic natural number series induction // Lecture Notes in Computer Science. 2012. V. 7526. P. 249–252. doi: 10.1007/978-3-642-33347-7_25
6. Strannegard C., Nizamani A.R., Sjoberg A., Engstrom F. Bounded Kolmogorov complexity based on cognitive models // Lecture Notes in Computer Science. 2013. V. 7999. P. 130–139. doi: 10.1007/978-3-642-39521-5_14

7. Strannegard C., Amirghasemi M., Ulfsbacker S. An anthropomorphic method for number sequence problems // *Cognitive Systems Research*. 2013. V. 22–23. P. 27–34. doi: 10.1016/j.cogsys.2012.05.003
8. Ragni M., Klein A. Predicting numbers: an AI approach to solving number series // *Lecture Notes in Computer Science*. 2011. V. 7006. P. 255–259. doi: 10.1007/978-3-642-24455-1_24
9. Solomonoff R.J. A formal theory of inductive inference. Part I // *Information and Control*. 1964. V. 7. N 1. P. 1–22.
10. Solomonoff R.J. A formal theory of inductive inference. Part II // *Information and Control*. 1964. V. 7. N 2. P. 224–254.
11. Potapov A., Svitenkov A., Vinogradov Y. Differences between Kolmogorov complexity and Solomonoff probability: consequences for AGI // *Lecture Notes in Computer Science*. 2012. V. 7716. P. 252–261. doi: 10.1007/978-3-642-35506-6_26
12. Poland J., Hutter M. MDL convergence speed for Bernoulli sequences // *Statistics and Computing*. 2006. V. 16. N 2. P. 161–175. doi: 10.1007/s11222-006-6746-3
13. Potapov A., Rodionov S. Universal induction with varying sets of combinatorics // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. V. 7999. P. 88–97. doi: 10.1007/978-3-642-39521-5_10
14. Царев Ф.Н. Совместное применение генетического программирования, конечных автоматов и искусственных нейронных сетей для построения системы управления беспилотным летательным аппаратом // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2008. № 53. С. 42–60.
15. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Гераничев В.Н. Синтез оптимальных искусственных нейронных сетей с помощью модифицированного генетического алгоритма // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 2 (78). С. 51–55.

<i>Потапов Алексей Сергеевич</i>	– доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, pas.aicv@gmail.com
<i>Батищева Вита Вячеславовна</i>	– студент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, elokkuu@mail.ru
<i>Воропай Алексей Юрьевич</i>	– кандидат технических наук, инженер-программист, ИП «ТраффикДНА Украина», Запорожье, 69001, Украина, voropay.o@gmail.com
<i>Alexei S. Potapov</i>	– D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, pas.aicv@gmail.com
<i>Vita V. Batishcheva</i>	– student, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, elokkuu@mail.ru
<i>Alexei Yu. Voropay</i>	– PhD, software engineer, FE «TrafficDNA Ukraine», Zaporizhzhya, 69001, Ukraine, voropay.o@gmail.com

УДК 53.082.79

ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЙ МИНИРЕЛАКСОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ И ВЯЗКИХ СРЕД

В.В. Давыдов^а, Е.Н. Величко^а, А.Ю. Карсеев^а

^а Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Адрес для переписки: Davydov_vadim66@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.04.14, принята к печати 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-115-121

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Давыдов В.В., Величко Е.Н., Карсеев А.Ю. Ядерно-магнитный минирелаксометр для контроля состояния жидких и вязких сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 115–121

Аннотация. Предложена новая методика регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса от малого объема исследуемой среды (0,5 мл) в слабом магнитном поле B_0 (0,06–0,08 Тл) и измерения констант релаксации T_1 и T_2 жидких и вязких сред. Для решения задач, связанных с регистрацией сигнала ядерного магнитного резонанса, разработана новая конструкция магнитной системы ядерно-магнитного минирелаксометра, в которой значение неоднородности магнитного поля в зазоре между полюсами в месте размещения катушки регистрации составляет $0,4 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при индукции поля $B_0 = 0,079 \text{ Тл}$. Для новой конструкции магнитной системы релаксометра разработана схема автономного детектора (генератора слабых колебаний) с использованием слабощумящих дифференциальных усилителей, а также схема управления и обработки сигнала ядерного магнитного резонанса для проведения измерений констант релаксации в автоматическом режиме, выполненная на базе микроконтроллера STM32. Применение новых технических решений позволило повысить быстродействие и увеличить динамический диапазон измерения констант релаксации T_1 и T_2 в разработанном релаксометре с сохранением точностных характеристик по сравнению с ранее предлагаемыми авторами малогабаритными измерителями. Разработанные схемы автоподстройки частоты регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса, амплитуды генерации магнитного поля H_1 в катушке регистрации, а также частоты и амплитуды поля модуляции позволили проводить измерения T_1 и T_2 при отношении сигнал/шум около 1,2 с погрешностью не выше 0,5% в диапазоне температур окружающей среды (воздуха) от 3 до 40 °С. Разработанная конструкция электронных схем позволила уменьшить вес минирелаксометра до 4 кг (включая автономный блок питания), что повысило удобство его транспортировки и использования.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, константы релаксации, релаксометр, магнитное поле, микроконтроллер, жидкая среда.

NUCLEAR-MAGNETIC MINI-RELAXOMETER FOR LIQUID AND VISCOUS MEDIA CONTROL

V.V. Davydov^а, E.N. Velichko^а, A.Yu. Karseev^а

^а Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

Corresponding author: Davydov_vadim66@mail.ru

Article info

Received 28.04.14, accepted 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-115-121

Article in Russian

Reference for citation: Davydov V.V., Velichko E.N., Karseev A.Yu. Nuclear-magnetic mini-relaxometer for liquid and viscous media control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 115–121 (in Russian)

Abstract. The paper deals with a new method for registration of nuclear magnetic resonance signal of small volume liquid and viscous media being studied (0.5 ml) in a weak magnetic field (0.06 –0.08 T), and measuring of longitudinal T_1 and transverse T_2 relaxation constants. A new construction of NMR mini-relaxometer magnetic system is developed for registration of NMR signal. The nonuniformity of a magnetic field in a pole where registration coil is located is $0,4 \times 10^{-3} \text{ sm}^{-1}$ (the induction is $B_0 = 0.079 \text{ T}$). An electrical circuit of autodyne receiver (weak fluctuations generator) has been developed with usage of low noise differential amplifier and NMR signal operating and control scheme (based on microcontroller STM32) for measuring of relaxation constants of liquid and viscous media in automatic operating mode. New technical decisions made it possible to improve relaxometer response time and dynamic range of measurements for relaxation constants T_1 and T_2 in comparison with small sized nuclear-magnetic spectrometer developed by the authors earlier (with accuracy characteristics conservation). The developed schemes for self-tuning of registration frequency, generating amplitude

of magnetic field H_1 in registration coil, and amplitude and frequency of modulating field provide measuring of T_1 and T_2 with error less than 0.5 % and signal to noise ratio about 1.2 in temperature range from 3 to 400 C. A new construction of mini-relaxometer reduced the weight of the device to 4 kg (with independent supply unit) and increased transportability and operating convenience.

Keywords: nuclear magnetic resonance, relaxation constants, relaxometer, magnetic field, microcontroller, liquid medium.

Введение

В условиях сложной экономической ситуации в нашей стране и обостряющейся конкуренции многие производители вынуждены уменьшать издержки на производство, чтобы не поднимать цену на свою продукцию. Это мгновенно сказывается на ее качестве, причем отслеживать такую продукцию, особенно если она представляет собой жидкую или вязкую среду, очень сложно [1–3]. Непрерывное ухудшение экологического состояния большинства водоемов также требует проведения различных мероприятий по экологическому мониторингу водных объектов и прибрежных зон [1, 2, 4]. В данной ситуации возрастает роль методов экспресс-контроля состояния жидких и вязких сред в полевых условиях [1, 4].

Кроме того, одним из условий получения надежных результатов при проведении исследований с использованием жидких и вязких сред является наличие достоверной информации о состоянии самой среды (например, о наличии в ней примесей, возможном структурном изменении, произошедшем по различным причинам и т.д.). Особенно это становится актуально, если среда используется после длительного хранения, транспортировки, смены емкости или другого воздействия, способного изменить ее состояние [2, 5]. Многофункциональные рентгеновские, оптические, магниторезонансные спектрометры (в основном зарубежных фирм Bruker, Marjan, Toshiba, Maran и пр.), позволяющие проводить полный анализ таких сред, являются дорогостоящим лабораторным оборудованием, требующим специальных условий эксплуатации и материальных затрат на обслуживание [3–6]. Надежная и доступная по цене аппаратура, позволяющая оперативно проводить экспресс-контроль жидких и вязких сред в лаборатории, была бы одним из решений данной проблемы.

Задачу экспресс-контроля жидких и вязких сред может решить разработанный авторами ранее малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр (ЯМР-спектрометр) [1, 2, 4]. Однако в процессе эксплуатации данного прибора были выявлены определенные проблемы и недостатки, устранение которых повысит эффективность его использования. В связи с этим разработка нового прибора на базе имеющегося малогабаритного ЯМР-спектрометра позволит сделать его более многофункциональным, повысит его конкурентоспособность и востребованность.

Особенности экспресс-контроля жидких и вязких сред методом ЯМР

В работах [1–6] подробно описаны методики измерения констант релаксации (время продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации) и конструкция малогабаритного ЯМР-спектрометра, а также обоснована необходимость одновременного измерения T_1 и T_2 для исключения ошибки в определении состояния среды. Выпускаемые в настоящее время модели ЯМР-спектрометров и ЯМР-релаксометров зарубежных компаний, измеряющие одновременно T_1 и T_2 , весят более 40 кг и потребляют значительное количество электроэнергии, которое не всегда можно обеспечить даже в передвижной лаборатории, и требуют особых условий эксплуатации. Но они позволяют исследовать все существующие жидкие и вязкие среды, как чистые, так и их смеси.

При регистрации сигнал ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с помощью модуляционной методики возникают проблемы, связанные с исследованием жидких и вязких сред с большими временами поперечной релаксации T_2 . В соответствии с методикой определения T_2 по спаду сигнала ЯМР [1, 5, 7–9] необходимо наблюдать данный сигнал в форме «виглей» по времени не менее $2T_2$, чтобы провести измерения T_2 с погрешностью не выше 0,5%. Период следования сигнала ЯМР в форме «виглей» определяется частотой модуляции магнитного поля B_0 , в котором регистрируется сигнал ЯМР [4, 10]. Исходя из этого, в новой конструкции ядерно-магнитного минирелаксометра (ЯМР-минирелаксометра) необходимо разработать систему автоматического управления частотой модуляции f_m , а также амплитудой поля модуляции H_m по максимальному сигналу регистрации. Кроме того, в соответствии с разработанной методикой измерения T_1 значение f_m необходимо будет уменьшить в 5 раз по сравнению с первоначальной, на которой измерялось T_2 [1, 7, 9, 10]. Для этого значения частоты модуляции $f_m/5$ необходимо также будет осуществить автоподстройку амплитуды поля модуляции H_m по максимальному сигналу регистрации.

Уменьшение размеров катушки регистрации в ранее разработанной схеме с целью уменьшения величины ΔH для повышения точности измерения T_2 [1, 9, 10] привело к уменьшению количества исследуемого вещества и, соответственно, к уменьшению числа ядер с магнитными моментами, от которых регистрируется сигнал ЯМР. Следствием этого уменьшения стало ухудшение отношения сигнал/шум (SNR). Причем для различных жидких и вязких сред число протонов N или ядер с магнитными моментами в 1 см^3 существенно различается, поэтому SNR в схеме регистрации сигнала ЯМР зависит также от величины поля H_1 в катушке регистрации [4–7, 11, 12]. По этой причине для регистрации сигнала ЯМР

при оптимальных условиях необходимо разработать схему автоматической подстройки уровня генерации автодинного детектора [1, 13, 14] (величины поля H_1) по максимальному сигналу регистрации.

Частота регистрации сигнала ЯМР $f_{\text{ямп}}$ связана с индукцией магнитного поля B_0 следующим образом [4, 7]:

$$f_{\text{ямп}} = \gamma B_0, \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение.

По умолчанию, минирелаксометр настроен на регистрацию ЯМР-сигнала от протонов (что соответствует гиромагнитному соотношению $\gamma = 42,57637513$ МГц/Тл), но имеется возможность перестройки частоты регистрации $f_{\text{ямп}}$ для регистрации сигналов от ядер фтора, лития и натрия (гиромагнитные отношения 40,106214 МГц/Тл; 16,561322 МГц/Тл и 11,277214 МГц/Тл соответственно). Такая возможность перестройки по частоте предусмотрена для исследования сред, в которых протоны либо отсутствуют, либо их количество значительно меньше числа других ядер (для эффективных измерений количество ядер фтора и лития должно превышать количество протонов в 5 раз, натрия – не менее 20).

Измерения констант релаксации T_1 и T_2 разработанным ЯМР-минирелаксометром предполагается проводить в различных климатических условиях при температуре окружающей среды 3–40 °С, поэтому необходимо будет модернизировать схему автоматической подстройки частоты регистрации сигнала ЯМР $f_{\text{ямп}}$ автодинного детектора по величине индукции магнитного поля B_0 в соответствии с (1), которая меняется с изменением температуры магнитов и магнитной системы при значительных колебаниях температуры окружающей среды (более 10 °С).

Исходя из этого, кроме сохранения различных ранее выполненных требований в изготовленной конструкции малогабаритного ЯМР-спектрометра [1, 4], для разрабатываемой новой конструкции ЯМР-минирелаксометра была поставлена задача разработать новую схему регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле, перечисленные схемы автоподстройки частот ($f_{\text{ямп}}$ и f_m), а также магнитных полей (H_1 и H_m) с использованием микроконтроллера. При этом в новой конструкции ЯМР-минирелаксометра сохраняется методика измерений, позволяющих одним и тем же измерительным устройством определять константы релаксации T_1 и T_2 жидкой или вязкой среды без внесения изменений в конструкцию прибора [1].

Ядерно-магнитный минирелаксометр и методики измерения T_2 и T_1

Структурная схема разработанного ЯМР-минирелаксометра представлена на рис. 1. Для регистрации сигнала ЯМР была разработана и изготовлена новая малогабаритная конструкция магнитной системы на основе двух плоских (квадратных) неодимовых магнитов (с примесями платины и кобальта) 1.

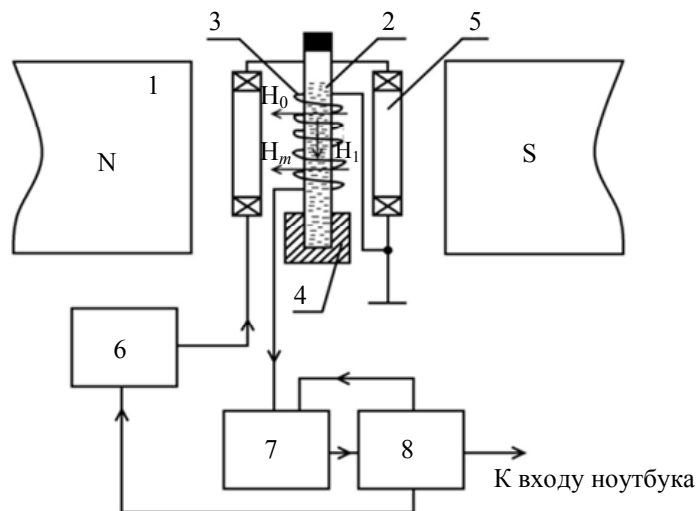


Рис. 1. Структурная схема ЯМР-минирелаксометра: 1 – постоянный магнит с нейтралью; 2 – контейнер с исследуемой средой; 3 – катушка регистрации сигнала ЯМР; 4 – фиксирующее устройство для контейнера; 5 – катушки модуляции; 6 – радиочастотный генератор; 7 – автодинный детектор (генератор слабых колебаний); 8 – устройство обработки и управления

Юстировка взаимного расположения полюсов магнитной системы обеспечивается с помощью изготовленной компактной «нейтрали» с регулировочными винтами на основе ранее разработанной модели [1]. Это позволило получить величину индукции магнитного поля $B_0 = 0,079$ Тл при неоднородности $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ в зазоре между полюсами магнитов. Кроме того, вес конструкции магнитной системы с катушками модуляции 5, фиксирующим устройством для контейнера 4, а также заполненного контейнера исследуемой средой 2 составил не более 1,937 кг, что на 0,45 кг меньше, чем для ранее разработанного малогабаритного ЯМР-спектрометра [1].

В разработанной конструкции для уменьшения влияния неоднородности магнитного поля на результат измерения констант релаксации [1, 5, 7] объем катушки регистрации был минимизирован до 0,1 мл. Для регистрации сигнала ЯМР от такого малого объема в слабом магнитном поле была разработана и собрана новая схема автодинного детектора 7 (генератора слабых колебаний) на основе малошумящих дифференциальных усилителей, что обеспечило стабильную работу автодинного детектора и хорошее подавление синфазных помех [15]. Схема обработки и управления 8 была разработана и реализована на основе микроконтроллера STM32. Эта схема осуществляет подстройку частоты и уровня генерации (величины поля H_1) автодинного детектора для обеспечения оптимальных условий во время регистрации сигнала ЯМР – максимальное SNR при совпадении резонансной частоты контура регистрации с частотой магнитного поля, в котором расположена исследуемая среда. Кроме того, данная схема осуществляет подстройку частоты f_m и амплитуды H_m поля модуляции по максимальному сигналу регистрации. В режиме измерения T_1 данная схема осуществляет управление частотой модуляции f_m и автоподстройку амплитуды поля модуляции H_m для получения максимального сигнала регистрации.

Но, так как число ядер с магнитными моментами N для каждого сред разное, то при таком маленьком объеме регистрации SNR для многих исследуемых жидкостей, даже при использовании систем автоматической подстройки частот и амплитуд с помощью микроконтроллера, будет низким – не позволяющим проводить измерения констант релаксации с необходимой точностью. А при измерении T_1 значение SNR еще уменьшится. По этой причине на основе микроконтроллера была разработана схема накопления сигнала ЯМР. Разработанная программа позволяет микроконтроллеру, вычисляя отношение SNR, определять – включать ему схему накопления сигнала ЯМР во время измерения или нет.

В результате многолетней эксплуатации ЯМР-измерителей (расходомеров, магнитометров, спектрометров и релаксометров) установлено, что для проведения измерений этими приборами с погрешностью не выше $\pm 0,5\%$ необходимо, чтобы выполнялось соотношение $SNR > 3$ [9, 10, 13, 16]. В связи с этим в нашем минирелаксометре выбор числа накоплений происходит на основе анализа значения SNR. Если $SNR \leq 1,5$, то для обеспечения погрешности измерений менее $\pm 0,5\%$ реализуется 1000 накоплений, если $1,5 < SNR \leq 3,5$ – 100 накоплений. Очевидно, что при предложенном подходе возможна ситуация, когда SNR достигнет высоких значений (например, более 30), что превышает необходимые требования. Но построение системы измерений с использованием схемы накопления для таких случаев незначительно затягивает процесс измерения T_1 и T_2 , особенно в случае 100 накоплений (например, для частоты модуляции $f_m = 11,7141$ Гц магнитного поля B_0 время однократного измерения двух констант релаксации будет составлять менее 4 с). Всегда лучше сделать качественное измерение, чем его потом повторять. Делать 10000 накоплений в таком случае нецелесообразно, так как за 400 с (согласно примеру) при работе с прибором на открытом воздухе могут произойти колебания температуры среды, которые недопустимы при измерениях T_1 и T_2 .

Разработанная нами конструкция ЯМР-минирелаксометра позволяет измерять времена релаксации в диапазонах $T_1 - 0,01-20$ с, $T_2 - 0,00005-4$ с при температурах окружающего воздуха 3– 40 °С. В данный диапазон значений T_1 и T_2 попадают почти все жидкие и вязкие среды и их смеси. Следует отметить, что по сравнению с предыдущей конструкцией релаксометра диапазон измерений констант релаксации увеличился более чем на порядок.

На рис. 2 представлены сигналы ЯМР (зависимости амплитуды U регистрируемого сигнала от времени t) без накопления и на выходе схемы накопления от синтетического моторного масла ZIC XQ 5W-40 при температуре $T = 18,6$ °С.

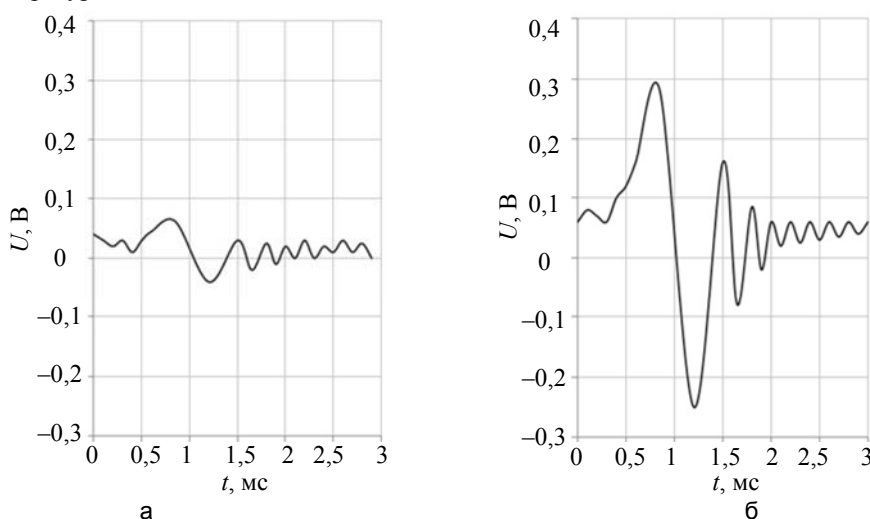


Рис. 2. Регистрируемый сигнал ЯМР от моторного масла: без накопления (а); на выходе схемы накопления (б)

На рис. 2, а, хорошо видно, что SNR регистрируемого сигнала мало, и измерение T_1 и T_2 проводить невозможно, после 100 накоплений сигнал приобретает параметры, позволяющие проводить измерения констант релаксации с необходимой точностью (рис. 2, б). При данной температуре для данного моторного масла были определены $T_1 = 1,021 \pm 0,005$ с и $T_2 = 720,36 \pm 3,59$ мкс. Цикл измерения времен релаксаций повторялся 20 раз для усреднения данных и оценки погрешности измерения в соответствии с методиками, используемыми для таких измерений в [1, 5, 8, 16]. Проба этого масла при $T = 18,6$ °С была исследована на стационарном ЯМР-релаксметре Minispec mq 20 (фирма BRUKER), измеренные – $T_1 = 1,0207 \pm 0,0021$ с и $T_2 = 718,94 \pm 1,44$ мкс.

Так как для измерений констант релаксации используется малый объем жидкой среды 0,5–0,8 мл, то его температура через несколько секунд становится равной температуре окружающей среды, которую можно измерить стандартным прибором с высокой точностью. Это еще одно достоинство разработанного ЯМР-мини-релаксметра. Зная температуру исследуемой среды, можно, сравнив измеренные значения констант релаксации T_1 и T_2 с эталонными, установить отклонение среды от естественного состояния.

Разработанные новые схемы автодинного детектора 7 (рис. 1), устройства обработки и управления 8 с использованием микроконтроллера позволили уменьшить вес этой части конструкции ЯМР-мини-релаксметра, включающей схему радиочастотного генератора 6, энергоемкий аккумулятор и схему стабилизации питания на +12 В, – до 2 кг. При этом общий вес разработанного ЯМР-мини-релаксметра не превышает 4 кг, обеспечивая непрерывный режим работы около 32 ч без подзарядки. В ранее разработанной конструкции общий вес составлял 4,3 кг, а непрерывный режим работы без подзарядки – менее 20 ч.

По измеренным значениям констант релаксации моторного масла можно сделать следующий вывод: T_1 ниже допустимой нормы, T_2 в пределах нормы. Это означает, что масло долго хранилось (может быть, с несоблюдением условий хранения), и использовать его не рекомендуется. Даты на упаковке показывают, что срок годности масла истек более 4 лет назад до момента проведения исследований.

Результаты измерений

В качестве одного из актуальных примеров работы разработанного ЯМР-мини-релаксметра по экспресс-контролю жидких и вязких сред можно привести результаты измерений сигналов ЯМР на выходе схемы накопления от бензина А-76, бензина «Галоша» и его смесей с бензином А-76 и очищенным керосином в определенных пропорциях при температуре $T = 17,9$ °С, представленные на рис. 3.

На туристических слетах и в местах массового скопления туристов (например, п. Лосево в Ленинградской области) почти все пользуются горелками, и многие туристы жалуются на неэффективную работу горелки от бензина «Галоша», приобретенного в пос. Лосево. Для проведения контроля качества бензина студенты-туристы доставили несколько емкостей с бензином «Галоша», купленных как в Санкт-Петербурге, так и пос. Лосево, в нашу лабораторию. По внешним признакам (цвет, запах, вязкость на солнечный свет) бензины из этих емкостей друг от друга не отличались.

На основании полученных экспериментальных данных (рис. 3, а) можно сделать вывод о том, что срок годности бензина А-76 истек (могли быть нарушены условия хранения, так как T_1 стало ниже нормы), а бензин «Галоша» (рис. 3, б), приобретенный в Санкт-Петербурге, имеет высокое качество. Нам удалось подобрать две смеси бензина «Галоша» с бензином А-76 и керосином, сигналы ЯМР от которых полностью совпали с привезенными смесями из п. Лосево. По измеренным константам релаксации T_1 и T_2 видно, что бензин «Галоша» (рис. 3, в, г) содержит примеси, и применять его в горелках не рекомендуется.

Для описываемых сред разработанным ЯМР-мини-релаксметром и ЯМР-релаксметром Minispec mq 20 (компания BRUKER) были измерены константы релаксации, сравнительные данные измерений приведены в таблице.

Среда	ЯМР-мини-релаксметр		Minispec mq 20	
	T_1 , с	T_2 , мкс	T_1 , с	T_2 , мкс
Бензин А-76	$1,432 \pm 0,007$	$146,05 \pm 0,73$	$1,4266 \pm 0,0029$	$145,35 \pm 0,29$
Бензин «Галоша»	$1,333 \pm 0,006$	$207,51 \pm 1,04$	$1,3403 \pm 0,0027$	$206,38 \pm 0,42$
Смесь бензина «Галоша» и бензина А-76 в пропорции 70% к 30%	$1,396 \pm 0,007$	$229,12 \pm 1,49$	$1,3897 \pm 0,0028$	$228,24 \pm 0,46$
Смесь бензина «Галоша» и очищенного керосина в пропорции 75% и 25%	$1,352 \pm 0,006$	$238,11 \pm 1,18$	$1,3486 \pm 0,0027$	$236,92 \pm 0,47$

Таблица. Времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации жидких сред

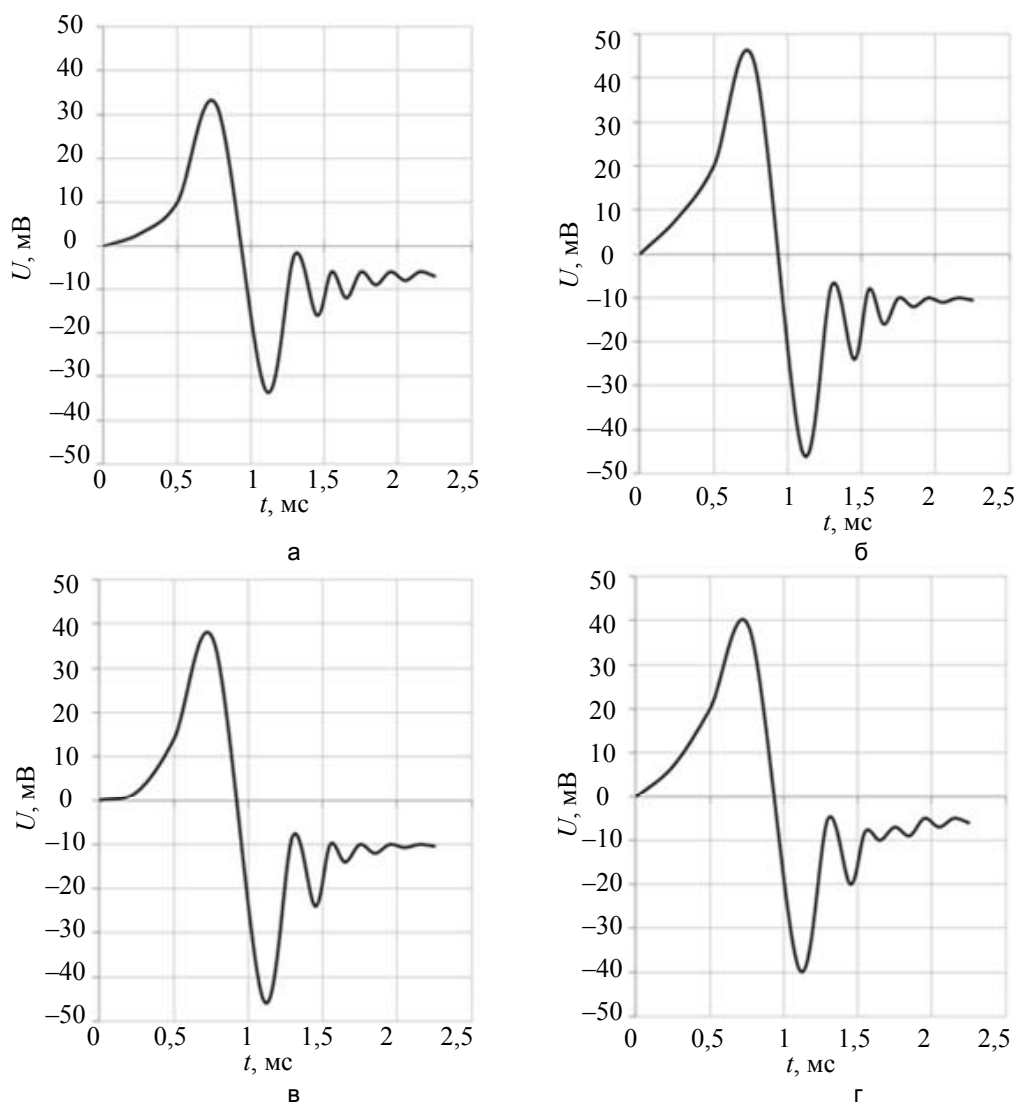


Рис. 3. Регистрируемый сигнал ЯМР на выходе схемы накопления, соответствующий: бензину А-76 (а); бензину «Галоша» (б); смеси, состоящей на 70% из бензина «Галоша» и на 30% из А-76 (в); смеси, состоящей на 75% из бензина «Галоша» и на 25% из керосина (г)

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что разработанный ядерно-магнитный минирелаксометр позволяет проводить измерения констант релаксации (времен релаксации) жидких и вязких сред с погрешностью не выше 0,5 % и определять текущее состояние среды в экспресс-режиме на месте измерения. В определенных случаях разработанная схема регистрации сигнала позволяет по наблюдаемому сигналу ядерного магнитного резонанса (на экране осциллографа или ноутбука) установить наличие примесей в чистых жидкостях (например, бензол или ацетон), без измерения T_1 и T_2 .

Следует отметить, что представленная модель прибора является лабораторным образцом ядерно-магнитного минирелаксометра. В дальнейшем планируется использование новых разработанных моделей неодимовых магнитов небольших размеров с примесями благородных металлов и кобальта, позволяющих получить магнитное поле между полюсами с индукцией $B_0 = 0,12$ Тл и выше, с неоднородностью не хуже $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Это позволит уменьшить размер и вес «нейтрали» магнитной системы релаксометра, а также увеличить SNR в схеме регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса, тем самым увеличивая динамический диапазон измерения T_1 с сохранением точностных характеристик прибора.

Литература

1. Давыдов В.В., Карсеев А.Ю. Малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр для экспресс-анализа жидких сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 87–92.

2. Davydov V.V., Karseev A.Yu. The liquid medium conditions express-control by portable nuclear-magnetic spectrometer // Proc. 10th International Forum «ECOBALTICA'2013». St. Petersburg, 2013. P. 73.
3. Давыдов В.В., Ермак С.В. Квантовый спектроанализатор на радиооптическом резонансе // Приборы и техника эксперимента. 2001. Т. 44. № 2. С. 92–95.
4. Davydov V.V., Karseev A.Yu. The environmental monitoring of access Baltic Sea coast areas // Proc. XV International Environmental Forum Baltic Sea Day «BSD'14». St. Petersburg, 2014. P. 54–56.
5. Davydov V.V. The research of the relaxation times T_1 and T_2 in flow liquid // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 1997. V. 30. N 17. P. 3993–3994.
6. Chen B., Ivanov I., Klein M.L., Parrinello M. Hydrogen bonding in water // Physical Review Letters. 2003. V. 91. N 21. P. 2155–2158.
7. Лёше А. Ядерная индукция. М.: Иностранная литература, 1963. 684 с.
8. Марусина М.Я., Неронов Ю.И. Метод определения времени релаксации протонов моторного масла и возможности его практического использования // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 2. С. 37–41.
9. Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. Повышение точности измерения констант релаксации текущей жидкости в ядерно-магнитном спектрометре // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 10. С. 64–68.
10. Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.U. Nuclear magnetic flowmeter-spectrometer with fiber-optical communication line in cooling systems of atomic energy plants // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2013. V. 22. N 2. P. 112–117. doi: 10.3103/S1060992X13020021
11. Давыдов В.В. Малогабаритный поляризатор для ядерно-магнитных расходомеров и магнитометров // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44. № 8. С. 49–52.
12. Давыдов В.В. Управление временем продольной релаксации T_1 текущей жидкости в ЯМР расходомерах // Изв. вузов. Физика. 1999. Т.42. № 9. С. 50–53.
13. Пряхин А.Е., Шушкевич С.С., Оробей И.О. Нутационный измеритель расхода протонсодержащих жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 1983. № 6. С. 186–188.
14. Давыдов В.В., Семенов В.В. Нестационарный режим работы нутационных ЯМР расходомеров и магнитометров // Приборы и техника эксперимента. 1999. Т. 42. № 3. С. 151–153.
15. Давыдов В.В., Карсеев А.Ю. Генератор слабых колебаний для регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса // Петербургский журнал электроники. 2014. № 1 (78). С. 89–91.
16. Кабардина С.И., Шеффер Н.И. Измерения физических величин. М.: Бинوم, 2009. 152 с.

- Давыдов Вадим Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, Davydov_vadim66@mail.ru
- Величко Елена Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, velichko-spbstu@yandex.ru
- Карсеев Антон Юрьевич** – студент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, antonkarseev@gmail.com
- Vadim V. Davydov** – PhD, Associate professor, Associate professor, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Davydov_vadim66@mail.ru
- Elena N. Velichko** – PhD, Associate professor, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, velichko-spbstu@yandex.ru
- Anton Yu. Karseev** – student, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, antonkarseev@gmail.com

COMPARISON OF VARIOUS APPROACHES TO MULTI-CHANNEL INFORMATION FUSION IN C-OTDR SYSTEMS FOR REMOTE MONITORING OF EXTENDED OBJECTS

A.V. Timofeev^a

^a LPP “EqualiZoom”, Astana, 010000, Kazakhstan
Corresponding author: timofeev.andrey@gmail.com

Article info

Received 24.11.2014, accepted 17.12.2014
doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-122-129
Article in English

Reference for citation: Timofeev A.V. Comparison of various approaches to multi-channel Information fusion in c-otdr systems for remote monitoring of extended objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, no. 1, vol.15, pp. 122–129 (in English)

Abstract. The paper presents new results concerning selection of optimal information fusion formula for ensembles of C-OTDR channels. Here C-OTDR is a coherent optical time domain reflectometer. Each of these channels provides data for appropriate automatic classifier which is designed to classify the elastic vibration sources in the multiclass case. Those classifiers form a so-called classifiers ensemble. Ensembles of Lipschitz Classifiers were considered. In this case the goal of information fusion is to create an integral classifier designed for effective classification of seismoacoustic target events. The Matching Pursuit Optimization Ensemble Classifiers (MPOEC), the Linear Programming Boosting (LP-Boost) (LP- β and LP-B variants), the Multiple Kernel Learning (MKL), and Weighing of Inversely as Lipschitz Constants (WILC) approaches were compared. The WILC is a brand new approach to optimal fusion of Lipschitz Classifiers Ensembles. The basics of these methods have been briefly described along with intrinsic features. All of those methods are based on reducing the task of choosing convex hull parameters to a solution of an optimization problem. All of the mentioned approaches can be successfully used for using in the C-OTDR system data processing. Results of practical usage are presented.

Keywords: C-OTDR channels, MKL, LP-Boost, Lipschitz Classifiers Ensembles.

УДК 004.942, 001.891.57

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МУЛЬТИКЛАССОВОМУ СЛИЯНИЮ ИНФОРМАЦИИ В С-ОТДР СИСТЕМАХ ДЛЯ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

А.В. Тимофеев^a

^a ТОО «Эквализум», Астана, 010000, Казахстан,
Адрес для переписки: timofeev.andrey@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.11.2014, принята к печати 17.12.2014
doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-122-129
Язык статьи – английский

Ссылка для цитирования: Тимофеев А.В. Сравнение различных подходов к мультиклассовому слиянию информации в С-ОТДР системах для удаленного мониторинга протяженных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 122–129

Аннотация. Рассматривается проблема выбора оптимального способа слияния информации, поступающей от множества каналов системы когерентной оптической рефлектометрии во временной области (С-ОТДР). Каждый из этих каналов является источником данных для автоматических классификаторов источников упругой сейсмоакустической вибрации. Эти классификаторы образуют ансамбль классификаторов. Были рассмотрены ансамбли липшицевых классификаторов. В этом случае целью слияния информации является построение интегрального классификатора, предназначенного для эффективной классификации целевых сейсмоакустических событий. Сравнивались следующие методы: поиск совпадений на ансамбле классификаторов (МПОЕС), бустинг с линейным программированием (LP-Boost) (LP- β и LP-B модификации), обучение с множественными ядерными функциями (МКЛ) и метод обратных констант Липшица (WILC). Выделен WILC как новый подход к оптимальному слиянию информации на ансамбле липшицевых классификаторов. Обсуждены основы работы каждого из методов с указанием специфических особенностей. Показано, что все методы основаны на сведении проблемы выбора параметров выпуклой оболочки к

оптимизационной задаче. Все рассмотренные подходы могут успешно использоваться при обработке информации в C-OTDR системах. Представлены результаты практического использования этих методов.

Ключевые слова: C-OTDR каналы, MKL, LP-Boost, ансамбль липшицевых классификаторов

Introduction

Application of the C-OTDR (Coherent Optical Time Domain Reflectometer) technology to decide various problems of extended objects remote monitoring is currently being evaluated as a very promising approach [1, 2]. In particular, this technology can be effectively used to monitor oil and gas pipelines, controlling technological processes and identifying unauthorized activities in close proximity of the monitored objects. Simplistically, a C-OTDR-system consists of an infrared laser, an optical fiber and a processing unit. The laser sends the probing signals through the optical fiber which is buried in the vicinity of the monitoring object. The processing unit is designed for comprehensive processing of the backscattered signals, which are called speckle-structures. The main item of the C-OTDR technology is a comprehensive analysis of the Rayleigh backscattered radiation characteristics, which transforms into an energetically weakened pulse and propagates constantly in the direction opposite to the direction of a pulsed laser flow. The reflected signal is created by the presence of static impurities in the optical fiber body and defects in the microstructure. Signals scattered by the centers coherently and randomly interfere with each other, forming so-called speckle patterns. Speckle patterns corresponding to different sections of the optical fibers are recorded and accumulated in the data center. The slightest change of the reflectance index value of the fiber, which occurred in a particular place, radically changes the speckle pattern corresponding exactly to this place of the fiber. These changes are reliably detected by the data center. The local changes in refractive index occur under the impact of temperature or due to mechanical action on the optical fiber surface. Let us call the optical fiber buried in the soil to a depth of 50–100 cm, a fiber optical sensor (FOS). Mechanical stress on the FOS surface is caused by seismic acoustic waves. These waves are generated of the sources of elastic vibrations (SEV) which located in vicinity of laying the FOS. Upon reaching the FOS, seismoacoustic wave causes a local longitudinal microstrain on its surface. Those microstrains in turn, cause a change in the local refractive index of light in a relatively small sector of the FOS. As a result, the speckle pattern, which corresponds to this sector, changes significantly. Thus, the FOS quite accurately reflects the state of the seismoacoustic field in its vicinity. The seismoacoustic field contains information about events that occur in the surface layers of the ground near the FOS. This field is created by structural waves, which generated due to mechanical effects on the soil or as a result of a seismic activity. Walking or running man, traffic, earthworks, including hand digging are typical sources of the seismoacoustic emission (structural acoustic wave). In this case, the frequency range of the seismoacoustic waves is in the interval of 0.1 Hz to 1000 Hz. The information, which is required for correct identify the type of SEV, is concentrated in the frequency range of 0.1 Hz to 500 Hz, while 95% of the meaningful information is in even the more narrow range of 1 Hz to 350 Hz. The spectral characteristics of the target signals which lie above and below this frequency range carry information only about the individual characteristics of the SEV. The SEV, which are subjects of interest for remote C-OTDR monitoring will be called a target SEV (TSEV). For the convenience of data processing, the entire FOS length is broken to successive portions (sites) each has length around 10-15 m. The data from those sites is processed separately. These sites will be called C-OTDR channels or just channels. Width of the channel Δ_{ω} depends on the probe pulse length. In practice, TSEV has its own small size and assumed point. Due to the nature of the elastic oscillation, the wave from a point source of seismoacoustic emission is usually detected simultaneously in several C-OTDR channels. At the same time, due to strongly anisotropic medium of the elastic vibrations propagation, the structure of the oscillations (speckle patterns) varies considerably between different C-OTDR channels. In each channel a time-frequency characteristics of the speckle pattern are largely reflect a time-frequency structure of the SEV, which occur in vicinity of the corresponding channel. The oscillation energy is considerably attenuated and distorted during propagation in the environment. Intensity of attenuation and distortion depend on the average absorption factor of the medium and on the distance from the oscillation point to the location of channel. Accordingly there is always one channel, wherein vibrations of the TSEV reflected substantially intense than in other channels. We will call this channel dominant. C-OTDR systems perform three major tasks in the following sequence:

1. task “D” (Detection) – detection of the TSEV;
2. task “E” (Estimation) – estimate of the location of the TSEV;
3. task “C” (Classification) – classification of detected TSEV by means of assigning it to one of D priori given classes.

In the multichannel case, the task “C” has to be solved by creation the method of effective multichannel data fusion. There are number of various approaches to effective multichannel data fusion for task “C” (classification). This paper describes results of a comparing various multichannel data fusion approaches for TSEV classification including a brand new approach which based on weighing of inversely as Lipschitz Constants (WILC) and it allows to improve the generalization ability of the classification system.

Designations and Research objective

Let us denote:

- **C-OTDR channels.** $Ch(K_k)$ is k -th C-OTDR channel, where a tuple $K_k = (A_k, R_k)$, here A_k is an absorption coefficient of k -th channel, R_k is a length of k -th channel;
- **Feature.** A tuple (\underline{Z}, d) is a compact feature space where \underline{Z} is a set of feature values, d is a metric of \underline{Z} , data of all channels belongs to \underline{Z} ;
- **Set of SEV classes.** A set Θ is a finite set of indexes of SEV-classes, $|\Theta| = D$;
- **Training Set.** $Z_T = \{(Z_i, \theta_i) | i = 1, \dots, N\}$, $|\{(Z_i, \theta_i)\}| = N$, $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im}\}$, $\theta_i \in \Theta$, each of $z_{ki} \in \underline{Z}, k \in \{1, \dots, m\}$, corresponds to $Ch(K_k)$, and to θ_i ;
- **True index of SEV class.** A $\theta^* \in \Theta$ is a true index of the SEV-class to which the samples z_k belong, thus θ^* is an index of a target class;
- **Samples to classify.** A set $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\} [0, 1]$ is feature sample set; each of $z_k \in \underline{Z}, k \in \{1, \dots, m\}$, corresponds to $Ch(K_k)$; in another words, we obtain the feature sample z_k from k -th channel $Ch(K_k)$;
- **Lipschitz Margin Classifier.** Let $f_k(\theta | z_k), k \in \{1, \dots, m\}; \theta \in \Theta$, be a binary Lipschitz Margin classifier (LMC) [3, 4] with Lipschitz Constant (LC) L_k ; $f_k(\theta | z_k) : Z \rightarrow \{\theta, \Theta \setminus \theta\}$ (concept: **one against all**); so, classifier $f_k(\theta | \cdot)$ divides the feature space (Z, d) into two classes θ and $\Theta \setminus \theta$; $f_k(\theta | z_k) = (f_k(\theta | z_k), R_k)$ here $f_k(\theta | z_k) \in R^1$ is **discriminate (stochastic) functions** (so-called **score-parameters**, which shows similarity degree of a sample z_k regarding to class $\theta \in \Theta$; discriminant function $f_k(\theta | z_k)$ explicitly dependent on the index hypothesis to be tested θ and implicitly on the index of the target class θ^* ; R_k is the classification decision-making rule $R_k : \tilde{\theta}_k = \text{Arg Max}_{\theta \in \Theta} (f_k(\theta | z_k))$; let us denote ψ - set of LMC $f_k(\theta | z_k, \psi)$ parameters, which needs to be tuned during of training process; otherwise, set ψ will be denoted as LMCP or LMCP ψ ;
- **Ensemble of LMC** (Lipschitz Classifiers Ensembles). $F(\theta | Z) = \{f_k(\theta | z_k) | k = 1, \dots, m\}$ is an ensemble of the LMC; $F_\theta : Z \rightarrow \{\theta, \Theta \setminus \theta\}$ is an integral classifier on the ensemble $F(\theta | Z)$; $F_\theta = (F(\theta | F(\theta | Z)), \mathbf{R})$; $\mathbf{R} : \tilde{\theta} = \text{Arg Max}_{\theta \in \Theta} (F(\theta | F(\theta | Z)))$ is output of integral classifier $F(\theta | F(\theta | Z))$;
- $F(\theta | F(\theta | Z))$ – **discriminate function** on the classifiers ensemble $F(\theta | Z)$, $F(\theta | F(\theta | Z)) = \sum_k \beta_k f_k(\theta | z_k)$, where $\sum_k \beta_k = 1, \forall \beta_k \geq 0$; coefficients $\{\beta_k\}$ are determined by various methods, which are object of our investigation.

So there exist m statistical independent C-OTDR channels $\mathbf{Ch} = \{Ch(K_k) | k = 1, \dots, m\}$. Each of those channels depends of external (environmental) parameters tuple $K_k = (A_k, R_k)$. Simply speaking, these channels transmit signals from sources of elastic vibrations (SEV) to FOS. Thus signals $z_k \in Z_k, k \in \{1, \dots, m\}$ are outputs of C-OTDR channels \mathbf{Ch} . The tuple K_k defines the effectiveness of channel $Ch(K_k)$ for signal transmission.

The signals Z are contain relevant information about SEV time-frequency parameters. Every two channels $Ch(K_k)$ and $Ch(K_p)$ distort the SEV time-frequency parameters by differently because of external parameters K_k and K_p are different. Accordingly we suppose every two different samples z_k and z_p are statistically independent if $k \neq p$. For each C-OTDR channel $Ch(K_k)$ are used appropriate D binary classifiers $f_k(\theta_i | z_k), \theta_i \in \Theta$. Each LMC $f_k(\theta_i | z_k)$, is binary classifier, which divides the feature space (Z, d) into two classes θ_i and $\Theta \setminus \theta_i$.

So, we need to classify of the SEV type using observation Z of C-OTDR channels \mathbf{Ch} . An obvious approach to solving this problem is to use the Lipschitz Classifiers Ensembles ($F(\theta | Z)$). But the problem of effective multichannel data fusion arises. There are number of various approaches to multichannel data fusion.

The goal of this paper is to compare some data fusion methods effectiveness. A number of known

approaches and one a brand new method were studied. The brand new method is based on use of Lipschitz constants of LMC's.

Some Approaches to C-OTDR Multichannel Data Fusion for Multiclass Classification of TSEV

So the classification problem TSEV is reduced to the task of creating an effective multiclass classifier (MC) which is based on a LMC classifiers ensemble (Lipschitz Classifiers Ensembles). We remark that an ensemble of classifiers is a set of classifiers whose individual decisions are combined in some way (typically by weighted or unweighted voting) to classify new examples [5]. At any rate a MC learning method choice is a dominant problem. Usually the problem of learning a MC from training data is often addressed by means of kernel method (KM) [6–8]. In this case each kernel corresponds to an appropriate channel of the set \mathbf{Ch} . For brevity we will not describe the baseline of this well-known method but we are going to pay attention to some KM modifications which are designed to work with LMC classifiers ensembles.

For the sake of simplicity, we will consider as a LMC a classic SVM [9]. By definition a SVM discriminant function $f_k(\theta | \mathbf{z}_k, \psi)$ depends on the parameters $\alpha \in R^N$ (N is a power of the training set \mathbf{Z}_T) and $b \in R^1$. Here α is a normal vector to the hyperplane, $|b|/\|\alpha\|$ is the perpendicular distance from the hyperplane to the origin. Thus we have $\psi = \{\alpha, b\}$, and each tuple ψ defines the hyperplane in the feature space.

Multiple Kernel Learning (MKL)

In contrast to baseline kernels selection (“averaging kernels” and “product kernels” [8]), MKL kernel selection is to learn a kernel combination during the training phase of the algorithm. So, the MKL objective is to optimize jointly over a linear combination of kernels $q(Z^{(i)}, Z^{(j)}) = \sum_{k=1}^m \beta_k k_k(\mathbf{z}_{ki}, \mathbf{z}_{kj})$ with LMCP $\psi = \{\alpha, b\}$.

Here $Z^{(i)} = \{\mathbf{z}_{1i}, \mathbf{z}_{2i}, \dots, \mathbf{z}_{mi}\}$, $Z^{(j)} = \{\mathbf{z}_{1j}, \mathbf{z}_{2j}, \dots, \mathbf{z}_{mj}\}$, $\sum_{k=1}^m \beta_k = 1, \beta_k \geq 0$, $k_k(\cdot, \cdot)$ is kernel function. MKL was originally introduced in [6]. Let us denote $Q_i(Z) = (q_i(Z, Z_1), q_i(Z, Z_2), \dots, q_i(Z, Z_N)) \in R^N, i = 1, \dots, m$. The final decision has form

$F_{MKL}(Z) = \text{Arg Max}_{\theta \in \Theta} \left(\sum_{k=1}^m \beta_{k,\theta} \left(Q_k(Z)^T \alpha_{\theta} + b_{\theta} \right) \right)$. The choice of parameters MKL is made by using for each θ the following scheme:

$$\min_{\alpha, b, \beta} \left[0.5 \left(\sum_{k=1}^m \beta_{k,\theta} \alpha_{\theta}^T Q_k \alpha_{\theta} \right) + C \sum_{i=1}^N \left(D(\theta_i, b_{\theta} + \sum_{k=1}^m \beta_{k,\theta} Q_k^T(Z_i) \alpha_{\theta}) \right) \right] \text{ s.t. } \sum_{k=1}^m \beta_{k,\theta} = 1, \beta_{k,\theta} \geq 0.$$

$D(\theta, t) = \max(0, 1 - \theta t)$, $(Z_i, \theta_i) \in \mathbf{Z}_T$. In other words, in MKL case we optimize jointly the convex hull of kernels. Here for each θ we have the same LMCP $\psi_{\theta} = \{\alpha_{\theta}, b_{\theta}\}$ for different k .

LP-Boost (LP- β)

So, we will consider a case when classifiers $f_k(\theta | \mathbf{z}_k)$ of ensemble $F(\theta | \mathbf{F}(\theta | Z))$ are not trained jointly, but coefficients $\{\beta_k\}$ are determined jointly. Here we have a situation where LMCP tuples ψ_{θ} are different for different k . This method is called the β -LP-Boost [10, 11], and here the final decision has the form

$$F_{LP\beta}(Z) = \text{Arg Max}_{\theta \in \Theta} \left(\sum_{k=1}^m \beta_k \left(Q_k(Z)^T \alpha_{\theta,k} + b_{\theta,k} \right) \right).$$

The training phase comes down to an optimal choice of parameters $\{\beta_k\}$. This choice is performed by using standard optimization method (linear programming – LP) according to the following scheme:

$$\min_{\beta, \xi, \rho} \left(-\rho + \frac{1}{vN} \left(\sum_{i=1}^N \xi_i \right) \right),$$

$$\text{under the condition } \sum_{k=1}^m \beta_k \left(k_k(Z, Z_i) \alpha_{\theta^*,k} + b_{\theta^*,k} \right) - \text{Arg Max}_{\theta^* \neq \theta} \sum_{k=1}^m \beta_k \left(k_k(Z, Z_i) \alpha_{\theta^*,k} + b_{\theta^*,k} \right) + \xi_i \geq \rho,$$

$i = 1, \dots, N$, $\sum_{k=1}^m \beta_k = 1, \beta_k \geq 0, k = 1, \dots, m$. Here ξ – slack variables, v – regularization constant, which is chosen using Cross Validation (CV). In frame of this approach not need provide the normalization of kernels $k_k(\cdot)$. Moreover, features for which $\beta_k = 0$ need not to be computed for the final decision function.

LP-Boost (LP-B)

Another version of LP approach to choice $\{\beta_k\}$ was called B-LP-Boost [11, 12]. In this case, each class has its own weight vector. So, we have $(m \times D)$ weighting matrix \mathbf{B} . The final decision has the form

$$F_{LPB}(Z) = \text{Arg Max}_{\theta \in \Theta} \left(\sum_{k=1}^m \mathbf{B}_k^{\theta} \left(Q_k(Z)^T \alpha_{\theta,k} + b_{\theta,k} \right) \right).$$

Choice of parameters $\{\beta_k\}$ we make in such way:

$$\min_{\beta, \xi, \rho} \left(-\rho + \frac{1}{vN} \left(\sum_{i=1}^N \xi_i \right) \right),$$

under the condition $\sum_{k=1}^m \mathbf{B}_k^{\theta'} (k_k(Z, Z_i) \alpha_{\theta', k} + b_{\theta', k}) - \sum_{k=1}^m \mathbf{B}_k^{\theta''} (k_k(Z, Z_i) \alpha_{\theta'', k} + b_{\theta'', k}) + \xi_i \geq \rho$,

$i = 1, \dots, N, \theta' \neq \theta'', \forall \theta, m: \left(\sum_{k=1}^m \mathbf{B}_k^{\theta} = 1, \mathbf{B}_k^{\theta} \geq 0, k = 1, \dots, m \right)$. As above, here ξ are slack variables, v – regularization constant, v is chosen using CV. Here we have a linear programming problem too, but this problem is more expensive because of dimension increasing.

Matching Pursuit Optimization Ensemble Classifiers

The matching pursuit optimization approach was described in [13]. In [14] a new method that Matching Pursuit Optimization Ensemble Classifiers (MPOEC) was proposed in order to eliminate some useless or similar classifiers from the whole ensemble to improve the performance of ensembles without decreasing the diversity among classifiers. So, in frame of MPOEC, we adopt a greedy iterative approach [13] to search for an optimal combination of classifiers. We describe this approach very briefly. So, let $\mathbf{Z}_T = \{(Z_i, \theta_i)\}$ is the training set and we have a finite dictionary $D = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ including M functions. The D is given in given in the Hilbert Space H . We can try to find some target function $q \in H, Z \xrightarrow{q} \Theta$. The sparse approximations of q can be found out in the dictionary D , which is expansion of the form $q_p = \sum_{n=1}^P \alpha_n g_n, \forall \alpha_n \in R^1, P$ is the number of the basis functions (BF) in the expansion, $\{g_n\} \subset D$ is basis of the expansion, $\{\alpha_n\}$ is the set of coefficient of this expansion. The q_N is sparse approximation of function q . The approximation q_N is built with usage of P basis functions from D . The approximation error has the following simple for

$$\|R_p\|^2 = \|q - q_p\|^2 = \sum_{i=1}^n (\theta_i - q_p(Z_i))^2.$$

The basis function $\{g_n\}$ and the coefficients $\{\alpha_n\}$ are selected by applying the iterative greedy method, in the interest to minimizing the R_p . So, in frame of MPOEC approach, the ensemble of classifiers $\mathbf{F}(\theta | Z)$ is regarded as a BF of the dictionary D , and each LMC $f_k(\theta | \mathbf{z}_k) \in \mathbf{F}(\theta | Z)$ obtains the coefficient α_k by minimizing R_p . As result of MPOEC procedure usage, the content of ensemble $\mathbf{F}(\theta | Z)$ is changed. If $\alpha_k \neq 0$, the corresponding classifier $f_k(\theta | \mathbf{z}_k)$ remains in ensemble, otherwise the $f_k(\theta | \mathbf{z}_k)$ is eliminated of ensemble $\mathbf{F}(\theta | Z)$. On each of MPOEC procedure iteration t we have the various combination $\mathbf{F}_t(\theta | Z)$ of LMC from $\mathbf{F}(\theta | Z)$. For convenience let us denote an index of LMC inside the temporary combination $\mathbf{F}_t(\theta | Z)$ (temporary ensemble) as j . On each iteration t the prediction error is calculated as following

$$e_t = N^{-1} \sum_{i=1}^N (\theta_i - q_t(Z_i)) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \left(\theta_i - \text{sign} \left(\sum_{j=1}^t \alpha_j f_j(\theta | \mathbf{z}_{ji}) \right) \right).$$

Here $Z_i = \{\mathbf{z}_{i1}, \mathbf{z}_{i2}, \dots, \mathbf{z}_{mi}\}$, t – number of iteration, α_j is the coefficient gained in j -th iteration. On each iteration t the residues R_t refined by the formula $R_t = R_{t-1} - \alpha_t f_t(\cdot)$, and coefficients $\{\alpha_j\}$ are calculated as following formula $\alpha_j = \langle f_j, R_{t-1} \rangle \|f_j\|^{-2}, j = 1, \dots, |F_t(\cdot)|$. The MPOEC procedure iterations are repeated until prediction error e_t is more than prior given threshold $\lambda > 0$. So, the MPOEC method selects LMC according to diversity between a pair of LMC to increase the diversity of the ensemble $F(\cdot)$. On the other hand, the increase in the diversity will not reduce the accuracy of individual classifiers in the optimization process of MPOEC approach.

MKL Weighing of Inversely as Lipschitz Constants (WILC-MKL)

Let us consider the brand new modification of the MKL that differ from classical MKL by method choice of linear combination parameters. The motivation of this approach is using some intrinsic properties of LMC. The fact is that value of Lipschitz Constant significantly determines of the LMC properties. Simply speaking, the Lipschitz classifier decision function has to a small Lipschitz constant. This feature comes from well-known regularization principle, which recommends avoid using discriminative functions with a high variation. So, LMC's with small LC are more preferable for providing of stable classification process. In other words, classifiers with small LC provide the greater generalization ability of classification system: such difficulties have lower complexity to avoid overfitting. Hence, in formula of $F(\theta | \mathbf{F}(\theta | Z))$ LMC's with small LC must get weight coefficients with bigger value. Let us call this approach to modification of MKL as Weighing of Inversely as to value of the Lipschitz Constant (WILC) or WILC-MKL. In frame of WILC-MKL approach to LMC-ensemble $\mathbf{F}(\theta | Z)$ we have the following discriminative function:

$$F_{WILC}(Z) = \text{Arg} \max_{\theta \in \Theta} \left(\sum_{k=1}^m \sigma_{\theta,k} \beta_{k,\theta} \left(Q_k(Z)^T \alpha_{\theta} + b_{\theta} \right) \right).$$

Here $\sigma_{\theta,k} = L_{\theta,k}^{-1} \left(\sum_{j=1}^m L_{\theta,j}^{-1} \beta_{j,\theta} \right)^{-1}$, $k=1, \dots, m$, $\sigma_{\theta,k} \beta_{k,\theta} > 0$, $\sum_{k=1}^m \sigma_{\theta,k} \beta_{k,\theta} = 1$, $L_{\theta,k}$ is Lipschitz Constant of discrimination function $K_k(Z)^T \alpha_{\theta} + b_{\theta}$. Thus, using WILC-MKL, we make attempt to improve the generalization ability of MKL by considering information about variation characteristics of classifiers discrimination functions. As it was shown in series of practical experiments, usage of WILC-MKL allows considerably improve the performance of LMC-ensemble in some practical cases.

Results of practical usage

All of above described methods were used for multichannel TSEV classification in C-OTDR system of railways monitoring. This system was successfully installed on the railways test area (RTA) of Kazakhstan Railways Company (JSC NC "KTZ") in august of 2014, and this system continues to operate. The RTA is located at a distance of 10 km from Astana City. The FOS which has been installed on RTA has length around 2000 m, depth of the FOS laying is 50 cm approximately, and FOS offset from rails is 5 m. Parameters of the C-OTDR system:

- duration of the probe pulse is 50–200 ns;
- period of probe pulse belongs to the range 50–300 μ s;
- laser wavelength is 1550 nm.

In this case, the main problem is to fusion of multichannel data to classify the TSEV with maximum accuracy. As was said above, for each C-OTDR channel $Ch(K_k)$ are used appropriate D binary classifiers $f_k(\theta_i | \mathbf{z}_k)$, $\theta_i \in \Theta$. Each LMC $f_k(\theta_i | \mathbf{z}_k)$ is binary classifier, which divides the feature space (\underline{Z}, d) into two classes θ_i and $\Theta \setminus \theta_i$. Each LMC $f_k(\cdot)$ was trained independently, and each LMC uses the same set of features in the space (\underline{Z}, d) . The (\underline{Z}, d) is the ordinary GMM-vector space [15]. We describe the procedure for calculation of the GMM-vectors very briefly. On feature extraction phase for each speckle pattern obtained in the probing period T for each of the channel are built Linear-Frequency Spaced Filterbank Cepstrum Coefficients (LFCC). In our case these features are based on 10 linear filter-banks (from 0.1 to 500 Hz) derived cepstra. Thus, 10 static and 10 first-order delta coefficients were used, giving the feature order $m = 20$. Further, approximation of the probability distribution function of the feature vectors (LFCC) by semi-parametric multivariate probability distribution model, so-called Gaussian Mixture Models (GMM), was carried. Presently, the GMM is one of the principal methods of modeling broadband acoustic emission sources (including TSEV) for their robust identification. The GMM of TSEV feature vectors distribution is a weighted sum of J components densities [15] and given by the equation $P(x|\lambda_s) = \mathbf{w}_s \mathbf{B}_s^T(x)$, where x is a random m -vector, $\mathbf{w}_s = (w_{s1}, \dots, w_{sJ}) \in R^J$,

$$\mathbf{B}_s(x) = (B_{s1}(x), \dots, B_{sJ}(x)) \in R^J, \quad \forall_{s,i} B_{si}(x) = \left((2\pi)^{m/2} |\Sigma_{si}|^{1/2} \right)^{-1} \exp \left(-\frac{1}{2} (x - \mu_{si})^T \Sigma_{si}^{-1} (x - \mu_{si}) \right),$$

$\lambda_s = \{(w_{si}, \mu_{si}, \Sigma_{si}) | i=1, J\}$. In general, diagonal covariance matrices Σ_{si} are used to limit the model size. The model parameters λ_s characterize a SEV in the form of a probabilistic density function. During training, those parameters are determined by the well-known expectation maximization (EM) algorithm [15]. In the described experiments value J was equal to 1024. Thus, for identification of TSEV class, each TSEV is modeled by a GMM-vector and is referred to as his model parameters $\lambda \in \underline{Z}$. The classic SVM with Bhattacharyya-kernel [3] was used as the LMC.

Priori defined target classes of TSEV, which collectively makes up a finite set Θ . For example, in case of railways monitoring the array Θ consists of the following TSEV classes: "train", "hand digging the soil", "chiseling ground scrap", "pedestrian", "group of pedestrian", "passenger car", "heavy equipment excavator", "easy excavation equipment". Five alternative approaches for multichannel data fusion were compared on stage of TSEV classification. In particular, MKL, LP- β , LP-B, MPOEC, and WILC-MKL approaches were used. The results of using these methods as parts of the C-OTDR system are presented in Table.

In the process of using the method WILC-MKL values of Lipschitz Constants were evaluated numerically for each LMC from ensemble $\mathbf{F}(\theta | Z)$. The volumes of training sets were equal for each of various data fusion approaches, but those volumes were different for various TSEV types. Presented results prove that the WILC-MKL and LP (β and B) are more effective with respect to MKL and MPOEC approaches. At the same time, WILC-MKL is more effective compared to MKL, but the LP-B is the best approach for a fusion of multichannel data in C-OTDR monitoring systems. It is important; the LP-B approach requires more computing resources than the WILC-MKL approach, wherein the accuracies of those methods are close. That is why the WILC-MLK approach is preferable from the practical point of view.

Method	Type of SEV	Accuracy	Volume of training set
MKL	"hand digging the soil"	76%	60
	"chiselling ground scrap"	79%	60
	"pedestrian"	78%	80
	"group of pedestrians "	79%	30
	"passenger car"	79%	50
	"train"	100%	150
	"heavy equipment excavator"	81%	20
	"easy excavation equipment"	83%	20
	"shrew digging the ground"	81%	30
LP-β	"hand digging the soil"	81%	60
	"chiselling ground scrap"	83%	60
	"pedestrian"	81%	80
	"group of pedestrians "	83%	30
	"passenger car"	80%	50
	"train"	100%	150
	"heavy equipment excavator"	85%	20
	"easy excavation equipment"	86%	20
	"shrew digging the ground"	84%	30
LP-B	"hand digging the soil"	82%	60
	"chiselling ground scrap"	85%	60
	"pedestrian"	79%	80
	"group of pedestrians "	84%	30
	"passenger car"	81%	50
	"train"	100%	150
	"heavy equipment excavator"	86%	20
	"easy excavation equipment"	88%	20
	"shrew digging the ground"	88%	30
MPOEC	"hand digging the soil"	72%	60
	"chiselling ground scrap"	79%	60
	"pedestrian"	75%	80
	"group of pedestrians "	80%	30
	"passenger car"	79%	50
	"train"	100%	150
	"heavy equipment excavator"	81%	20
	"easy excavation equipment"	82%	20
	"shrew digging the ground"	83%	30
WILC-MKL	"hand digging the soil"	81%	60
	"chiselling ground scrap"	82%	60
	"pedestrian"	78%	80
	"group of pedestrians "	83%	30
	"passenger car"	84%	50
	"train"	100%	150
	"heavy equipment excavator"	84%	20
	"easy excavation equipment"	87%	20
	"shrew digging the ground"	86%	30

Table. The practical detection results

Conclusions

This paper describes results of comparison of various multichannel data fusion approaches for TSEV classification including MKL, LP-β, LP-B, MPOEC and WILC-MKL. The practical usage of these approaches proves better effectiveness of LP-B approach to fusion of multichannel data for classification of TSEV type. A brand new approach, WILC-MKL, was suggested for multichannel data fusion. This approach is simple to use and performs well in a C-OTDR classification subsystem.

References

1. Choi K.N., Juarez J.C., Taylor H.F. Distributed fiber-optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2003. V. 5090. P. 134–141. doi: 10.1117/12.484911
2. Timofeev A.V., Egorov D.V. Multichannel classification of target signals by means of an SVM ensemble in C-OTDR systems for remote monitoring of extended objects // Proc. MVML-2014. Prague, 2014. V. 1. P. 22–32.
3. Timofeev A.V. The guaranteed estimation of the Lipschitz classifier accuracy: confidence set approach // Journal of the Korean Statistical Society. 2012. V. 41. N 1. P. 105–114. doi: 10.1016/j.jkss.2011.07.005
4. Von Luxburg U., Bousquet O. Distance-based classification with Lipschitz functions // Journal of Machine Learning Research. 2004. V. 5. P. 669–695.
5. Murty M.N., Devi V.S. Pattern Recognition: an Algorithmic Approach (Undergraduate Topics in Computer Science). London: Springer, 2011. 263 p.
6. Hofmann T., Schölkopf B., Smola A.J. Kernel methods in machine learning // Annals of Statistics. 2008. V. 36. N 3. P. 1171–1220. doi: 10.1214/009053607000000677
7. Lanckriet G.R.G., Cristianini N., Bartlett P., El Ghaoui L., Jordan M.I. Learning the kernel matrix with semidefinite programming // Journal of Machine Learning Research. 2004. V. 5. P. 27–72.
8. Bach F.R., Lanckriet G.R.G., Jordan M.I. Multiple kernel learning, conic duality, and the SMO algorithm // Proc. 21st Int. Conf. on Machine Learning (ICML 2004). Banff, Canada, 2004. P. 41–48.
9. Hearn M.A., Dumais S.T., Osman E., Platt J., Schölkopf B. Support vector machines // IEEE Intelligent Systems. 1998. V. 13. N 4. P. 18–28. doi: 10.1109/5254.708428
10. Demiriz A., Bennett K.P., Shawe-Taylor J. Linear programming boosting via column generation // Machine Learning. 2002. V. 46. N 1-3. P. 225–254. doi: 10.1023/A:1012470815092
11. Gehler P., Nowozin S. On feature combination for multiclass object classification // Proc. ICCV. 2009. P. 47–50.
12. Weston J., Watkins C. Support vector machines for multi-class pattern recognition // Proc. 7th European Symposium on Artificial Neural Networks. 1999. P. 219–224.
13. Mallat S.G., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries // IEEE Transaction on Signal Processing. 1993. V. 41. N 12. P. 3397–3415. doi: 10.1109/78.258082
14. Mao S., Jiao L.C., Xiong L., Gou S. Greedy optimization classifiers ensemble based on diversity // Pattern Recognition. 2011. V. 44. N 6. P. 1245–1261.
15. Blimes J.A. A gentle tutorial of the EM algorithm and its application to parameter estimation for Gaussian mixture and hidden Markov models // Technical Report TR-97-021. Berkley, California: International Computer Science Institute, 1998. P. 97–021.

Andrey V. Timofeev – Dr. Habil. Ing., CSO, LPP “EqualiZoom”, Astana, 010000, Kazakhstan, timofeev.andrey@gmail.com

Тимофеев Андрей Владимирович – доктор технических наук, научный директор, ТОО «Эквализум», Астана, 010000, Казахстан, timofeev.andrey@gmail.com

УДК 004.942

КООРДИНАЦИЯ В МНОГОУРОВНЕВЫХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ: ПОДХОД И ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

А.В. Маслобоев^{a, b}, В.А. Путилов^{a, b}, А.В. Сютин^{a, c}

^a Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация

^b Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация

^c Университет Бергена, г. Берген, N-5020, Норвегия

Адрес для переписки: masloboev@iimm.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.06.14, принята к печати 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-130-138

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Маслобоев А.В., Путилов В.А., Сютин А.В. Координация в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 130–138

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке методов и средств математического и компьютерного моделирования многоуровневых сетевых систем управления региональной безопасностью. Исследования ведутся в рамках реализации стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года на территории Мурманской области. Предполагается создание единой межведомственной многоуровневой автоматизированной системы мониторинга социально-экономической безопасности арктических регионов России. Отличительными особенностями исследуемого класса систем являются открытость, самоорганизация, децентрализация функций управления и принятия решений, слабая иерархия в контуре принятия решений и способность порождать цели внутри себя. Методы исследования включают функционально-целевой подход, математический аппарат теории иерархических многоуровневых систем, принципы сетецентрического управления распределенными системами с активными компонентами и переменной структурой. В работе решаются задачи согласования и координации локальных решений сетецентрического управления в многоуровневых распределенных системах информационного обеспечения региональной безопасности. Предложены подход к решению и формализация задач координации в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью, основанные на разработанной многоуровневой рекуррентной иерархической модели комплексной безопасности региональных социально-экономических систем. Модель обеспечивает координацию показателей региональной безопасности, оптимизируемых различными элементами многоуровневых систем управления, в условиях децентрализованного принятия решений. Специфика модели заключается в использовании функционально-целевой технологии и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем для реализации процедур согласования локальных решений сетецентрического управления. Результаты работы смогут найти приложение как в задачах координации процессов принятия управленческих решений в многоуровневых сетевых системах управления, используемых в различных предметных областях, так и в задачах анализа и синтеза интегрального показателя комплексной безопасности региональных социально-экономических систем, представляющего собой матрицу показателей региональной безопасности.

Ключевые слова: моделирование, координация, многоуровневая система, сетевое управление, информационное обеспечение, региональная безопасность, поддержка принятия решений.

Благодарности. Результаты работы получены в ходе исследований, проводимых по планам научно-исследовательских работ Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН (НИР № 01201452426 «Методы и когнитивные технологии создания, исследования и использования виртуальных систем поддержки управления комплексной безопасностью развития Арктической зоны Российской Федерации»). Авторы выражают благодарность своим коллегам по лаборатории за участие во всестороннем обсуждении результатов работы.

COORDINATION IN MULTILEVEL NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEMS OF REGIONAL SECURITY: APPROACH AND FORMAL MODEL

A.V. Masloboev^{a, b}, V.A. Putilov^{a, b}, A.V. Sioutine^{a, c}

^a Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209, Russian Federation

^b Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation

^c University of Bergen, Bergen, N-5020, Norway

Corresponding author: masloboev@iimm.ru

Article info

Received 10.06.14, accepted 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-130-138

Article in Russian

Reference for citation: Masloboev A.V., Putilov V.A., Sioutine A.V. Coordination in multilevel network-centric control systems of regional security: approach and formal model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 130–138 (in Russian)

Abstract. The paper deals with development of methods and tools for mathematical and computer modeling of the multilevel network-centric control systems of regional security. This research is carried out under development strategy implementation of the Arctic zone of the Russian Federation and national safeguarding for the period before 2020 in the Murmansk region territory. Creation of unified interdepartmental multilevel computer-aided system is proposed intended for decision-making information support and socio-economic security monitoring of the Arctic regions of Russia. The distinctive features of the investigated system class are openness, self-organization, decentralization of management functions and decision-making, weak hierarchy in the decision-making circuit and goal generation capability inside itself. Research techniques include functional-target approach, mathematical apparatus of multilevel hierarchical system theory and principles of network-centric control of distributed systems with pro-active components and variable structure. The work considers network-centric management local decisions coordination problem-solving within the multilevel distributed systems intended for information support of regional security. The coordination problem-solving approach and problem formalization in the multilevel network-centric control systems of regional security have been proposed based on developed multilevel recurrent hierarchical model of regional socio-economic system complex security. The model provides coordination of regional security indexes, optimized by the different elements of multilevel control systems, subject to decentralized decision-making. The model specificity consists in application of functional-target technology and mathematical apparatus of multilevel hierarchical system theory for coordination procedures implementation of the network-centric management local decisions. The work-out and research results can find further application both within the coordination problem-solving of managerial decision-making in the multilevel network-centric control systems used for different subject domains, and within the analysis and synthesis problem-solving of integral complex security index of the regional socio-economic system, represented as regional security index matrix.

Keywords: modeling, coordination, multilevel system, network-centric control, information support, regional security, decision-making support.

Acknowledgements. Findings of this investigation are received within the bounds of research works carried out according to research plans of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (project 01201452426 "Methods and cognitive technologies for engineering, analysis and application of the virtual systems for complex security management support of the Arctic zone of the Russian Federation development"). The authors enclose gratitude to their lab colleagues for assistance and participation within the comprehensive discussion of the research results.

Введение

На сегодняшний день информационная поддержка управления региональной безопасностью в Арктической зоне Российской Федерации в соответствии с пунктом 107 «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации на период до 2020 года» осуществляется за счет формирования единого информационного поля межведомственной деятельности с использованием системы распределенных ситуационно-кризисных центров. Интегрируемые в рамках этого поля организационно разнородные компоненты ведомственных информационных систем предназначены, главным образом, для поддержки принятия управленческих решений в разнотипных чрезвычайных и кризисных ситуациях на различных уровнях управления региональной безопасностью – стратегическом, тактическом и оперативном. Система информационного обеспечения региональной безопасности, построенная на базе сети распределенных ситуационно-кризисных центров, относится к классу многоуровневых сетевых систем управления с активными элементами и переменной структурой.

К данному классу относится большинство современных интегрированных систем управления комплексной безопасностью сложных объектов в социально-экономической, природно-промышленной, технической и других сферах. Реальными проектами таких систем, разрабатываемых для задач управления развитием и безопасностью Арктической зоны Российской Федерации, являются [1]: система VarentsWatch (разработчик Kongsberg Spacetec AS, Норвегия), Комплексная система освещения обстановки в Арктике (разработчик ОАО «Концерн РТИ Системы», Россия), Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (разработчик ВНИИГМИ-НЦ Росгидромета, Россия), Единая национальная диспетчерская служба Арктики (разработчик Северный Арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Россия), а также Единая межведомственная многоуровневая автоматизированная система мониторинга общественной (социальной) безопасности региона (разработчики Государственная корпорация «Ростехнологии», ЗАО «Российская корпорация средств связи», Россия). Некоторые из этих систем и их компоненты реализованы в виде готовых прототипов. Эти системы ориентированы в основном на решение частных задач информационного обеспечения различных видов безопасности компонентов региональных систем – например, в сферах, связанных с метеорологией, энергетикой, морской деятельностью, образованием, транспортной логистикой или экологией.

Такие системы управления распределенными объектами (отдельными системами), согласно работам [2, 3], характеризуются свойствами открытости, самоорганизации, децентрализации функций управления и принятия решений, слабой иерархии в контуре принятия решений и способностью порождать цели внутри себя. Центральной задачей для данного класса систем является согласование и координация взаимодействия входящих в их состав подсистем в условиях децентрализованного управления и принятия решений. Главная задача координации [4] – достижение согласованности в работе всех звеньев системы путем установления рациональных связей (коммуникаций) между ними. Характер этих связей может быть различным, так как зависит от координируемых процессов.

В настоящее время разработаны различные модификации методов координации управлений и согласования локальных решений, принимаемых на разных уровнях управления, в многоуровневых сетевых системах управления. К ним относятся игровые и градиентные методы [5], основанные на предложенных в [6] необходимых и достаточных условиях координируемости локально организованной иерархии динамических систем; методы координации, основанные на принципах самоорганизации на базе моделей вычислительных полей [7]; методы нечеткой параметрической координации в многоуровневых иерархических системах [8]; методы координации путем прогнозирования и развязывания взаимодействий [6, 9, 10]; методы координации на основе моделей коалиционных рефлексивных игр [11]; мультиагентный, триадный, ситуационный подходы [12] к моделированию координации сложных динамических систем и другие.

Настоящая работа продолжает исследования, представленные в работе [13]. Для сетевых систем управления региональной безопасностью разработана многоуровневая рекуррентная иерархическая модель комплексной безопасности региональных социально-экономических систем. Специфика модели заключается в использовании функционально-целевой технологии и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем для реализации процедур согласования локальных решений сетевых систем управления. Модель обеспечивает координацию показателей региональной безопасности, оптимизируемых различными элементами многоуровневых систем управления, в условиях децентрализованного принятия решений.

Далее представлены подход к решению и формализация задач координации в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью, основанные на предложенной в [13] многоуровневой рекуррентной модели иерархического управления.

Координация в многоуровневой системе: формализация и постановка задачи

В настоящей работе под координацией понимается свойство системы находить оптимальные решения общей задачи управления при оптимизации подзадач управления, решаемых подсистемами. Другими словами, координация означает такое воздействие элемента вышестоящего уровня на элементы нижестоящего уровня, которое заставляет нижестоящие элементы действовать согласованно. Для обеспечения координации требуется реализовать определенные ограничения на взаимосвязи между подсистемами.

В работе [13] предложена формальная рекуррентная модель предметной области, представляющая собой иерархию алгебр и основанная на рекуррентной декомпозиции целей управления:

$$Z = \{z_{jk}^k\}_{k=1}^K, \tag{1}$$

$$A^k = \langle \Sigma^k, \{\odot, \oplus\} \rangle, \tag{2}$$

$$\gamma_k : A^{k+1} \rightarrow A^k, \tag{3}$$

где Z – множество классов эквивалентности; K – число уровней декомпозиции; k – индекс уровня декомпозиции; $\mathbf{j}^k = \{j_i\}$, $i = \overline{1, K}$ – вектор-индекс длиной k класса эквивалентности на k -ом уровне декомпозиции; j_i – i -й компонент вектор-индекса; z_{jk}^k – имя класса на k -ом уровне декомпозиции с вектор-индексом \mathbf{j}^k ; γ_k – совокупность отношений $\{R_{jk}^k\}$; R_{jk}^k – отношение эквивалентности, разбивающее z_{jk}^k на $\{z_{jk+1}^{k+1}\}$, $x, y \in z_{jk}^k$; Σ^k – множество цепочек над алфавитом $\{z_{jk}^k\}$.

Для формализации понятия координации в работе [6] вводится предикат $P(x, D)$:

$$(\forall x, \forall D), [P(x, D) \equiv x \text{ есть решение } D],$$

где D – произвольная решаемая задача. Предикат $P(x, D)$ является истинным тогда и только тогда, когда D – решаемая задача, а x – одно из ее решений.

Пусть задачи, решаемые нижестоящими элементами, параметризуются только координирующими сигналами элемента вышестоящего уровня (рис. 1). Пусть D_0 – конкретная задача вышестоящего элемента. Каждый координирующий сигнал $\gamma \in \Gamma$ (Γ – множество координирующих сигналов) вышестоящего элемента конкретизирует задачу $D_i(\gamma)$, которую будет решать i -й элемент нижестоящего уровня. Пусть $\overline{D}(\gamma) = \{D_1(\gamma), \dots, D_n(\gamma)\}$ – совокупность таких задач (здесь n – число элементов нижестоящего уровня). Задачи, решаемые элементами нижестоящего уровня, координируемы по отношению к задаче D_0 вышестоящего уровня тогда и только тогда, когда справедливо предложение

$$(\exists \gamma)(\exists x), [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } P(\gamma, D_0)], \gamma \in \Gamma, x \in X, \quad (4)$$

т.е. когда имеет решение задача D_0 вышестоящего уровня и для координирующего сигнала γ , решающего данную задачу, имеется множество решений $\overline{D}_i(\gamma)$ задач нижестоящих элементов.

Предложению (4) эквивалентно следующее предложение:

$$(\exists \gamma)(\exists x), [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } Q_0(\gamma, x)], \quad (5)$$

вследствие того, что справедливо утверждение $P(\gamma, D_0) \Leftrightarrow (\exists x)[Q_0(\gamma, x)]$, где Q_0 – заданный предикат, определенный для всех пар: $(\gamma, x) : (\gamma, x) \in \Gamma \times X; x = X_1 \times \dots \times X_n$.

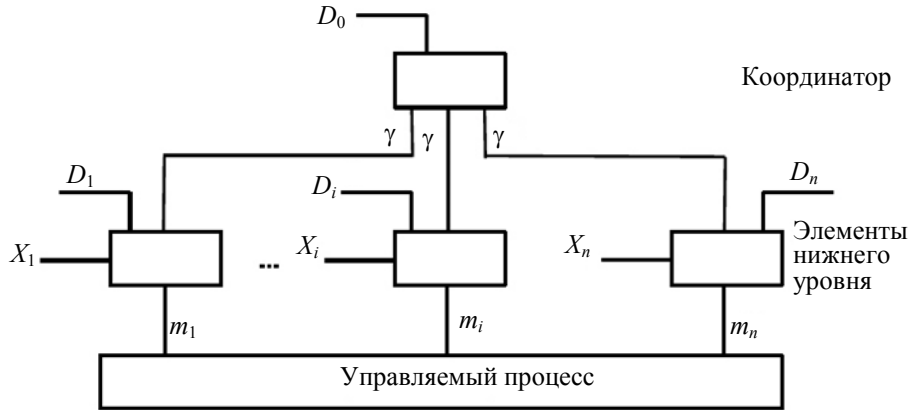


Рис. 1. Структура двухуровневой иерархической модели управления

Общая (глобальная) задача системы определяется по отношению ко всему управляемому системой процессу в целом, поэтому множество решений этой задачи есть множество глобальных управлений M . Будем рассматривать случай, когда глобальные управляющие сигналы из множества M , воздействующие на управляемый процесс в целом, исходят только из элементов нижнего уровня. Тогда эти сигналы представляются отображением $\pi_M : X \rightarrow M$. Задачи, решаемые элементами нижестоящего уровня, координируемы по отношению к данной глобальной задаче D тогда и только тогда, когда справедливо предложение

$$(\exists \gamma)(\exists x), [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } P(\pi_M(x), D)], \gamma \in \Gamma, x \in X, \quad (6)$$

т.е. элемент вышестоящего уровня имеет возможность влиять на элементы нижестоящего уровня таким образом, что их результирующее воздействие на управляемый процесс в целом дает решение глобальной задачи системы.

Рассмотрим совместимость в многоуровневых системах на примере двухуровневой системы [14], в которой имеются задачи трех типов: глобальная, для элемента вышестоящего уровня, для элементов нижестоящего уровня. Эти задачи должны быть определенным образом согласованы между собой (совместимы). Для совместимости задач координация задач $D_i, i = \overline{1, n}$, элементов нижестоящего уровня относительно задачи D_0 вышестоящего уровня должна быть соответствующим образом связана с глобальной задачей D . Постулат совместимости [6]:

$$(\forall \gamma)(\forall x), \{ [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } Q_0(\gamma, x)] \Rightarrow [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } P(\pi_M(x), D)] \}, \\ x \in X, \gamma \in \Gamma, D = \{D_i\}_{i=1}^n, \quad (7)$$

т.е. решаемые элементами нижестоящего уровня задачи $D_i, i = \overline{1, n}$ скоординированы относительно глобальной задачи D всякий раз, когда задачи $D_i, i = \overline{1, n}$ скоординированы относительно задачи D_0 решаемой элементом вышестоящего уровня. Если постулат (7) выполняется, задачи совместимы. Если задачи совместимы, то решение глобальной задачи D достигается тогда, когда элемент вышестоящего уровня координирует элементы нижестоящего уровня по отношению к решению собственной задачи.

Координация путем развязывания взаимодействий

При использовании способа координации путем развязывания взаимодействий успех в координации элементов нижестоящего уровня можно оценить, исходя из степени рассогласованности между фактическими взаимодействиями элементов нижестоящего уровня и теми, которые были бы желательны с точки зрения этих элементов. Связующие сигналы, выбираемые элементами нижестоящего уровня, задаются отображением $\pi_U : X \rightarrow U$, т.е. $u \in U$ – это часть решения $x \in X$. Принцип согласования взаимодействий дается предложением [6]:

$$(\forall \gamma)(\forall x), \{ [P(x, D(\gamma)) \text{ и } K(\pi_M(x)) = \pi_U(x)] \Rightarrow P(\pi_M(x), D) \}, \\ \gamma \in \Gamma, x \in X, D = \{D_i\}_{i=1}^n. \quad (8)$$

Принцип (8) утверждает, что управляющее воздействие $m = \pi_M(x)$ на управляемый процесс решает поставленную глобальную задачу D тогда, когда x является решением задач $D_i, i = \overline{1, n}$ элементов

нижестоящего уровня и желаемые связующие сигналы $u^j = \pi_U(x)$ совпадают (согласованы) с фактическими связующими сигналами $u = K(m)$ ($K : U \rightarrow M$), имеющими место тогда, когда к процессу приложено управляющее воздействие $m = \pi_M(x)$. Другая форма записи принципа согласования взаимодействий [6]:

$$(\forall \gamma) (\forall x), \{ [P(x, D(\gamma)) \text{ и } q(\gamma, x) = \tilde{q}(\gamma, x)] \Rightarrow P(\pi_M(x), D) \},$$

$$\gamma \in \Gamma, x \in X, D = \{D_i\}_{i=1}^n, \tag{9}$$

где \tilde{q} и q – заданные функции, отображающие множество $\Gamma \otimes X$ на числовую ось и используемые для оценки точности согласования между фактическими и желаемыми связующими сигналами элементов нижестоящего уровня.

Таким образом, стремление использовать весьма интуитивно полезные для решения сложных задач возможности, заложенные в структуре многоуровневых иерархических систем приводит к необходимости решать дополнительные задачи координации в таких системах.

Координация в многоуровневой системе на базе рекуррентной модели

Перейдем к анализу многоуровневых иерархических систем. Введем некоторые дополнительные обозначения. Для многоуровневой системы (1)–(3) не будем специально выделять множество управляющих воздействий M , а будем предполагать, что на каждом уровне k системы (1)–(3) для каждого класса эквивалентности z_j^k (j -го элемента k -го уровня) имеется множество F_j^k . Соответственно для всей модели (1)–(3) имеется множество $\Gamma = \{ \{ \Gamma_j^k \}_{j=1}^{N_k} \}_{k=1}^K$.

Элементами множества Γ_j^k являются координирующие воздействия γ_j^k . Пусть $\Gamma^k = \{ \Gamma_j^k \}_{j=1}^{N_k}$. При этом на нижнем уровне ($k = K$): $\Gamma^k = \{ \Gamma_j^k \}_{j=1}^{N_k} \leftrightarrow M$.

В соответствии с приведенной формализацией уровень $k=2$ порождает N_2 двухуровневых систем, уровень $k = i - N_i$ двухуровневых систем и, соответственно, уровень $k = K - 1 - N_{K-1}$ систем (рис. 2).

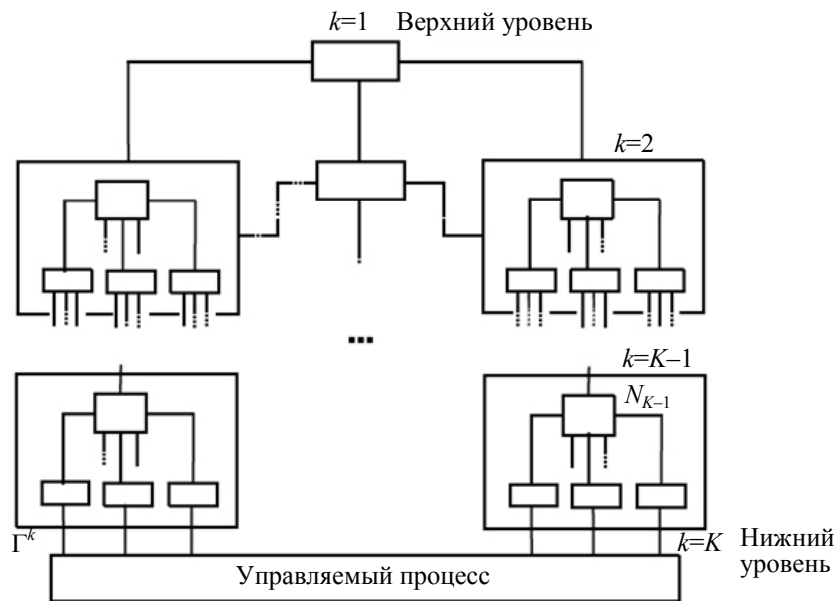


Рис. 2. Структура многоуровневой рекуррентной иерархической модели управления

Пусть множество управляющих воздействий представимо в виде

$$\Gamma^k = \Gamma_1^k \times \dots \times \Gamma_{N_k}^k.$$

Предположим, что j -й класс эквивалентности k -го уровня системы (1)–(3) связан с определенным набором классов эквивалентности $(k+1)$ -го уровня, т.е. на $(k+1)$ -ом уровне N_{k+1} классов эквивалентности собраны в N_k групп, связанных отношениями эквивалентности с N_k классами эквивалентности уровня k . Каждая такая группа представляет собой двухуровневую систему S_j^k , порождаемую каждым классом эквивалентности z_j^k :

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}) (\forall k, k = \overline{1, K-1}) z_j^k \rightarrow S_j^k. \tag{10}$$

Общее число таких двухуровневых систем

$$N_S = \sum_{k=1}^{K-1} N_k.$$

Группирование (10) по элементам вышестоящих уровней отражено в [13] введением вектор-индекса. Далее для упрощения записи вектор-индексы опускаются. Предполагается, что все координирующие воздействия, согласующие сигналы, локальные функции качества и т.д., рассматриваемые для определенного уровня двухуровневой системы (1)–(6), группируются по элементам этого уровня в соответствии с заданными отношениями эквивалентности.

Пусть связующие сигналы на k -ом уровне системы (1)–(3) определяются посредством отображения $Q_k: \Gamma^k \rightarrow U^k$, $k = \overline{1, K}$, где U^k – множество связующих сигналов на уровне k .

Глобальная задача оптимизации D отражает глобальную цель многоуровневой системы и определяется парой (g, Γ^k) , где g – заданная целевая функция. Решением задачи D является такое воздействие $\hat{\gamma}^k$ на нижнем уровне K системы, что

$$g(\hat{\gamma}^k) = \min_{\Gamma^k} g(\gamma^k), \quad \hat{\gamma}^k \in \Gamma^k.$$

Пусть D_j^k – задача, решаемая j -м элементом k -го уровня системы (1)–(3). Задачи, решаемые на этом уровне, также будут оптимизационными. Локальная оптимизационная задача $D_j^k(\gamma)$ ($\gamma \in \Gamma_j^{k-1}$, $j = \overline{1, N_{k-1}}$, $k = \overline{2, K}$) определяется парой $(g_{j\gamma}^k, X_{j\gamma}^k)$, где $g_{j\gamma}^k$ – заданная локальная целевая функция, определенная на множестве решений X_j^k , а $X_{j\gamma}^k$ – заданное подмножество X_j^k , причем $X_{j\gamma}^k = \Gamma_j^k \times U_j^k$, $j = \overline{1, N_k}$, $k = \overline{2, K}$.

Решением локальной задачи $D_j^k(\gamma)$ является элемент $x_j^{k\gamma} \in X_{j\gamma}^k$, такой, что

$$g_{j\gamma}^k(x_j^{k\gamma}) = \min_{X_{j\gamma}^k} g_{j\gamma}^k(x_j^k), \quad x_j^k \in X_{j\gamma}^k; \quad j = \overline{1, N_k}, \quad k = \overline{2, K}.$$

Имеются два способа воздействия на локальные задачи оптимизации [6]: через локальные целевые функции $g_{j\gamma}^k$, или локальные функции качества $G_{j\gamma}^k$ (координация путем изменения целей) и через множество допустимых решений $X_{j\gamma}^k$ (координация путем изменения ограничений). При координации путем изменения целей задаются функции

$$G_{jB}^k: \Gamma_j^k \times U_j^k \times B^k \rightarrow V, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad k = \overline{2, K},$$

где B – заданное множество; V – множество платежей. Пусть каждому γ_j^{k-1} , $\gamma_j^{k-1} \in \Gamma^{k-1}$ приписано свое (единственное) $\beta_j^{k\gamma} \in B^k$. Тогда из G_{jB}^k получается локальная функция качества

$$G_{j\gamma}^k(\gamma_j^k, u_j^k) = G_{jB}^k(\gamma_j^k, u_j^k, \beta_j^{k\gamma}), \quad j = \overline{1, N_k}, \quad k = \overline{2, K}.$$

При координации путем изменения ограничений каждый координирующий сигнал $\gamma_j^{k-1} \in \Gamma^{k-1}$ ($k-1$)-го уровня определяет для конкретного j -го локального элемента k -го уровня множество допустимых решений $X_{j\gamma}^k$, которое в нашем случае является подмножеством множества $\Gamma_j^k \times U_j^k$. Множества $X_{j\gamma}^k$ представляют собой ограничения, накладываемые на локальные решения. Пусть $X_{j\gamma}^k = \Gamma_j^k \times U_j^{k\gamma}$, где $U_j^{k\gamma}$ – заданное подмножество U_j^k . Тогда координация сводится к выбору соответствующих подмножеств связующих сигналов.

Из рассмотренных способов координирования в нашем случае следует использовать координирование путем развязывания взаимодействий. Действительно, при решении задачи оптимизации на формальной рекуррентной модели нужно выбирать в классах эквивалентности представителей, имеющих определенные характеристики (связующие сигналы), влияющие на суммарные характеристики совокупностей таких представителей, входящих в «формулы эксперимента». В общем случае прогнозировать предварительно точные значения этих характеристик или диапазонов их изменения – сложная задача, решение которой может быть основано в некоторых частных случаях на априорных знаниях о зависимости суммарных характеристик от характеристик конкретных представителей классов эквивалентности. В связи с этим наиболее общим и естественным для решения нашей задачи является координирование путем развязывания взаимодействий.

При этом $\forall \gamma_j^k, U_j^{k\gamma} = U_j^k$, $j = \overline{1, N_k}$, $k = \overline{2, K}$, и, следовательно, $X_{j\gamma}^k = X_j^k = \Gamma_j^k \times U_j^k$, $j = \overline{1, N_k}$, $k = \overline{2, K}$, т.е. локальные оптимизационные задачи формулируются для решения независимо друг от друга, и каждый локальный элемент должен выбирать оптимальным образом не только координирующие сигналы для элементов нижележащего уровня, связанных с ним отношениями эквивалентности, но и локальные связующие сигналы.

Многоуровневая система (1)–(3) координируема, если истинно следующее предложение:

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\exists \gamma^{k-1})(\exists x^{k\gamma})(\exists \hat{\gamma}^k) : [\pi(x^{k\gamma}) = \hat{\gamma}^k], \quad (11)$$

где $\hat{\gamma}^k$ – глобально оптимальное координирующее воздействие на нижнем уровне системы; $x^{k\gamma} = (\gamma^{k\gamma}, u^{k\gamma})$, так что каждая пара $(\gamma^{k\gamma}, u^{k\gamma})$ является оптимальной; $\pi : \Gamma^k \times U^k \rightarrow \Gamma^k$.

В (11) утверждается, что система координируема, если для каждой подсистемы $S_j^k, j = \overline{1, N}, k = \overline{1, K-1}$, существует координирующий сигнал $\gamma^k \in \Gamma^k$ и локальные оптимальные решения $(\gamma_j^{(k+1)\gamma}, u_j^{(k+1)\gamma})$ для элементов нижнего уровня подсистемы S_j^k такие, что координирующий сигнал $\gamma^{k\gamma} = (\gamma_1^{k\gamma}, \dots, \gamma_N^{k\gamma})$ является глобально оптимальным, т.е. $\gamma^{k\gamma} = \hat{\gamma}^k$.

Задачей любого элемента вышестоящего уровня в каждой подсистеме $S_j^k, j = \overline{1, N_k}, k = \overline{1, K-1}$, является выработка оптимального координирующего сигнала. Каждая из этих задач должна быть сформулирована таким образом, чтобы ее решение являлось искомым оптимальным координирующим воздействием на элементы нижнего уровня подсистемы S_j^k . При формализации этих задач целесообразно использовать постулат совместимости (7) и принципы координации [6], из которых мы выбрали принцип согласования. Принцип согласования взаимодействий (8), (9) для многоуровневой системы (1)–(3) с учетом проведенной формализации выражается следующим предложением:

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\forall \gamma_j^{k-1}), (\exists x^{k\gamma})(\exists \hat{\gamma}^k): \\ \{[(\gamma^k, u^k) = x^{k\gamma} \text{ и } L^k(\gamma^k) = u^k] \Rightarrow (\gamma^k = \hat{\gamma}^k)\}, \quad (12)$$

где $L^k = \Gamma^k \rightarrow U^k$. Предложением (12) утверждается, что глобально оптимальное координирующее воздействие обеспечивается локальными решениями всякий раз, когда для каждой подсистемы $S_j^k, j = \overline{1, N_k}, k = \overline{1, K-1}$, связующие сигналы для элементов нижнего уровня согласованы.

При использовании принципа согласования функции качества сравниваются локальные затраты (функции качества), а не связующие сигналы. Пусть

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\forall \gamma^{k-1}, \gamma^{k-1} \in \Gamma^{k-1}), (\exists g_{j\gamma}^k : \Gamma^k \times U^k \rightarrow V): \\ [g_{j\gamma}^k(\gamma^k, u^k) = (g_{1\gamma}^k(\gamma_1^k, u_1^k), \dots, g_{j_k}^k(\gamma_{j_k}^k, u_{j_k}^k))] \quad (13)$$

где j_k – число элементов нижнего уровня в подсистеме S_j^{k-1} . С учетом (13) принцип согласования функций качества

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\forall \gamma_j^{k-1}), (\exists x^{k\gamma})(\exists \hat{\gamma}^k) : \{[(\gamma^k, u^k) = x^{k\gamma} \text{ и } \bar{g}_{j\gamma}^k(\gamma^k, L^k(\gamma^k)) = \bar{g}_{j\gamma}^k(\hat{\gamma}^k, L^k(\hat{\gamma}^k))] \Rightarrow \gamma^k = \hat{\gamma}^k\}, \quad (14)$$

т.е. глобально оптимальное координирующее воздействие обеспечивается локальными решениями всякий раз, когда согласованы ожидаемые и фактические локальные затраты для каждой подсистемы $S_j^k, j = \overline{1, N_k}, k = \overline{1, K-1}$. Выражениями (12), (14) определены принципы согласования взаимодействий и функций качества для многоуровневой системы (1)–(3).

При оптимизации элементами многоуровневой системы локальных целевых функций могут возникнуть конфликты (несогласованность) между локальными решениями [15, 16]. Принципы координации обеспечивают отсутствие конфликтов, если при оптимизации локальных целевых функций обеспечиваются условия согласования. Эти условия, в свою очередь, обеспечиваются, если система обладает определенными свойствами, определяемыми через взаимосвязи между целевыми функциями.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают координируемость систем, представленных введенной рекуррентной моделью, при удовлетворении специальных (но довольно общих) требований взаимосвязи между показателями качества (целевыми функциями), оптимизируемыми различными элементами многоуровневых систем. Приведенные подходы и результаты исследований координации демонстрируют пути и методы решения подобных задач анализа систем такого класса.

Заключение

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ подходов к решению задач координации управлений в многоуровневых системах с иерархической и сетевой структурой.
2. Предложена формализация задачи координации управлений в многоуровневых распределенных системах, предназначенных для информационной поддержки принятия решений в сфере обеспечения региональной безопасности.
3. На базе разработанной рекуррентной модели [13] и принципов координации [6] предложен подход к решению задач внутриуровневой и межуровневой координации в многоуровневых распределенных системах. Координация обеспечивается за счет удовлетворения требований взаимосвязи между показателями качества функционирования (целевыми функциями), оптимизируемыми различными элементами многоуровневых систем. Это позволяет достичь достаточной согласованности локальных

решений, принимаемых на разных уровнях управления, в условиях децентрализованного принятия решений и высокой динамики внешней среды.

Результаты работы смогут найти приложение в задачах координации принятия управленческих решений в многоуровневых сетевых системах информационной поддержки межведомственной деятельности в сфере региональной безопасности, характеризующихся организационной и технологической разнородностью, распределенностью и децентрализацией функций управления.

Литература

1. Маслобоев А.В. Реализация трансграничных ИТ-проектов в сфере информационного обеспечения комплексной безопасности развития арктических регионов: состояние и перспективы // Информационные ресурсы России. 2014. № 3 (139). С. 13–20.
2. Sarbazi-Azad H., Zomaya A.Y. Large Scale Network-Centric Distributed Systems. NY: John Wiley & Sons, 2013. 700 p. doi: 10.1002/9781118640708
3. Ефремов А.Ю., Максимов Д.Ю. Сетевая система управления – что вкладывается в это понятие? // Труды Третьей российской конференции “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения”. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 158–161.
4. Фридман О.В., Фридман А.Я. Применение нейронных сетей для детектирования источника возмущений в сетевых структурах // Труды Института системного анализа РАН. 2013. Т. 63. № 2. С. 45–53.
5. Fridman A., Fridman O. Gradient coordination technique for controlling hierarchical and network systems // Systems Research Forum. 2010. V. 4. N 2. P. 121–136. doi: 10.1142/S1793966610000223
6. Mesarovic M.D., Macko D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. NY-London: Academic Press, 1970. 294 p.
7. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. Часть 1. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 92–120. doi: 10.1134/S106423071201008X
8. Запорожцев В.В., Новосельцев В.И., Струков А.Ю. Нечеткая параметрическая координация в многоуровневой иерархической системе // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 50. № 4.1. С. 142–145.
9. Кузьмин И.А., Путилов В.А., Фильчаков В.В. Распределенная обработка информации в научных исследованиях. Л.: Наука, 1991. 304 с.
10. Stoilov T., Stoilova K. Goal and predictive coordination in two level hierarchical systems // International Journal of General Systems. 2008. V. 37. N 2. P. 181–213. doi: 10.1080/03081070601143141
11. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. М.: СИНТЕГ, 2003. 160 с.
12. Юдицкий С.А., Владиславлев П.Н., Точ Д.С. Триадный подход к моделированию систем сетевидного управления // Управление большими системами. 2010. № 28. С. 24–39.
13. Маслобоев А.В., Путилов В.А., Сютин А.В. Многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 163–170.
14. Findeisen W. Control and Coordination in Hierarchical Systems. NY: John Wiley & Sons, 1980. 478 p.
15. Макаров А.А. Методы и модели согласования иерархических решений. Новосибирск: Наука, 1979. 237 с.
16. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 288 с.

Маслобоев Андрей Владимирович

– кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация; заведующий кафедрой, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация, masloboev@iimm.ru

Путилов Владимир Александрович

– доктор технических наук, профессор, директор, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация; директор, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация, putilov@iimm.ru

Сютин Алексей Викторович

– кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет Бергена, г. Берген, N-5020, Норвегия; младший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация, alexei.sioutine@geog.uib.no

- Andrey V. Masloboev* – PhD, Associate professor, senior research fellow, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209, Russian Federation; Department head, Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation, masloboev@iimm.ru
- Vladimir A. Putilov* – D.Sc., Professor, Director, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences; Director, Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation, putilov@iimm.ru
- Alexei V. Sioutine* – PhD, research fellow, University of Bergen, Bergen, N-5020, Norway; junior research fellow, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209, Russian Federation, alexei.sioutine@geog.uib.no

УДК 532.529

АНАЛИЗ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ТОЧНОМ И ПРИБЛИЖЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РИМАНА

П.В. Булат^a, К.Н. Волков^b, М.С. Сильников^{c, d}, М.В. Чернышев^{c, d}

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Университет Кингстона, Лондон, SW15 3DW, Великобритания

^c Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

^d НПО специальных материалов, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

Адрес для переписки: pavelbulat@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.09.14, принята к печати 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-139-148

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Булат П.В., Волков К.Н., Сильников М.С., Чернышев М.В. Анализ разностных схем, основанных на точном и приближенном решении задачи Римана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 139–148

Аннотация. Рассматривается задача Римана о распаде одномерного произвольного разрыва параметров нестационарного газового потока в приложении к построению численных методов типа Годунова. Задача решается в точной и приближенной постановке (разностная схема Ошера–Соломона, используемая в численных методах сквозного счета): определяются интенсивности (отношения статических давлений) и перепады скорости потока на сторонах образующихся разрывов и волн, после чего рассчитываются остальные параметры во всех областях течения. Выполнено сравнение результатов расчетов модельных течений с использованием точных и приближенных решений. Введено понятие скоростной функции. Исследована зависимость скоростной функции от интенсивности разрыва. Выявлена особая интенсивность, при которой изоэнтропическая волна создает такой же скоростной напор, как и ударная волна. В окрестности этой особой интенсивности приближенные методы дают наиболее высокую точность. Путем выполнения тестовых расчетов определена область применимости приближенного решения Ошера–Соломона, результаты представлены в виде, удобном для использования в численных методах. Результаты работы могут быть применены для численных методов высокого порядка точности.

Ключевые слова: распад произвольного разрыва, ударная волна, волна Римана, контактный разрыв.

ANALYSIS OF FINITE-DIFFERENCE SCHEMES BASED ON EXACT AND APPROXIMATE SOLUTION OF RIEMANN PROBLEM

P.V. Bulat^a, K.N. Volkov^b, M.S. Silnikov^{c, d}, M.V. Chernyshev^{c, d}

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Kingston University, London, SW15 3DW, UK

^c Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

^d "Special Materials", Corp., Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

Corresponding author: Davydov_vadim66@mail.ru

Article info

Received 11.09.14, accepted 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-139-148

Article in Russian

Reference for citation: Bulat P.V., Volkov K.N., Silnikov M.S., Chernyshev M.V. Analysis of finite-difference schemes based on exact and approximate solution of Riemann problem. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 139–148 (in Russian)

Abstract. The Riemann problem of one-dimensional arbitrary discontinuity breakdown for parameters of unsteady gas flow is considered as applied to the design of Godunov-type numerical methods. The problem is solved in exact and approximate statements (Osher-Solomon difference scheme used in shock capturing numerical methods): the intensities (the ratio of static pressures) and flow velocities on the sides of the resulting breakdowns and waves are determined, and then the other parameters are calculated in all regions of the flow. Comparison of calculation results for model flows by exact and approximate solutions is performed. The concept of velocity function is introduced. The dependence of the velocity function on the breakdown intensity is investigated. A special intensity at which isentropic wave creates the same flow rate as the shock wave is discovered. In the vicinity of this singular intensity approximate methods provide the highest accuracy. The domain of applicability for the approximate Osher-Solomon solution is defined by performing test calculations. The results are presented in a form suitable for

usage in the numerical methods. The results obtained can be used in the high-resolution numerical methods.

Keywords: arbitrary discontinuity breakdown, shock wave, Riemann wave, contact discontinuity.

Введение

Классическое изложение решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва параметров потока для одномерных волн и разрывов приведено в 2001 г. в работе О. Игга [1]. Независимо от этой работы полное исследование областей существования различных вариантов одномерного распада разрыва в 2000 г. провел В.Н. Усков [2]. Задача встречается в различных технических приложениях, например, разрыв возникает на стенке при отражении от нее ударной волны [3]. Так возникает разрыв скорости, равный скорости потока за ударной волной, поскольку на стенке происходит торможение потока до нулевой скорости. В данном случае, как и в некоторых других, удобно использовать понятие безразмерной скоростной функции интенсивности волны, характеризующей скачок скорости на волне [4]. Если волна распространяется по покоящейся среде, то данный параметр равен скорости спутного потока за волной.

Большое внимание к теории распада произвольного разрыва было привлечено в результате развития численных методов типа Годунова [5, 6], в которых в качестве разрыва рассматривается скачок параметров на границе разностных ячеек. Получены точные решения, сведенные к системе трансцендентных уравнений, решаемых итерационными методами. В ряде случаев, например, при моделировании взрывов в реальном времени [7, 8], необходимо существенное сокращение времени расчетов. Следовательно, актуальными являются и приближенные решения типа разностной схемы Ошера–Соломона [9], использующие тот факт, что вдали от ударных волн разрывы на границе ячеек, как правило, слабые. Как известно, изоэнтропическая поляра сжатия и ударная поляра при интенсивности, равной единице, имеют второй порядок касания, что позволяет получить простое и однозначное приближенное аналитическое решение для параметров течения за исходящими разрывами. Особенно большой выигрыш в скорости вычислений приближенные решения дают в случае численных методов повышенного порядка точности [10].

Важно знать границы применимости приближенных методов решения. Целью настоящей работы является определение этих границ. Задача решается путем сравнения результатов расчетов, полученных численными методами в точной и приближенной постановке. Также приводится прямой расчет погрешности приближенного решения Ошера–Соломона, использующего модель изоэнтропических волн сжатия. Для оценки скоростного напора за простой волной и ударной волной вводится понятие скоростной функции. Получено значение особой интенсивности волн, при которой простая волна и ударная волна создают одинаковый напор, т.е. погрешности приближенных методов в данном случае минимальны.

Математическая модель

Решение одномерной нестационарной задачи о распаде разрыва в терминах скоростной функции. Используя понятие безразмерной скоростной функции интенсивности волны, можно записать универсальное выражение для нахождения скорости потока газа за бегущей волной:

$$\hat{u} = u_0 + \chi_w a_0 U_w(J).$$

Здесь u_0 – скорость невозмущенной среды; a_0 – скорость звука в невозмущенной среде; χ_w – показатель направления движения волны; U_w – скорость фронта волны; J – интенсивность разрыва, равная отношению давлений за разрывом и до него. Для волн, сонаправленных исходному потоку газа, $\chi_w = 1$, а для встречных волн $\chi_w = -1$. Скоростная функция для ударных волн имеет вид

$$U_D(J) = \frac{1-\varepsilon}{\sqrt{1+\varepsilon}} \cdot \frac{J-1}{\sqrt{J+\varepsilon}},$$

где $\varepsilon = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$; γ – показатель адиабаты газа. Для волн Римана (сжатия и разрежения) соотношение, определяющее скоростную функцию, следует из условия изоэнтропности среды:

$$U_R(J) = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} (J^{1/k} - 1), k = 2\gamma/(\gamma - 1).$$

Если в результате распада произвольного разрыва образуются центрированная волна разрежения Римана, движущаяся в область 1, и ударная волна, бегущая в область 4 (рис. 1, а), то условия на контактном разрыве запишутся в виде

$$u_1 - a_1 U_R(J_1, \varepsilon_1) = u_4 + a_4 U_D(J_2, \varepsilon_2). \quad (1)$$

Если, наоборот, волна разрежения распространяется по области 4, а ударная волна бежит в область 1, то условие равенства скоростей на контактном разрыве запишется в виде

$$u_1 - a_1 U_D(J_1, \varepsilon_1) = u_4 + a_4 U_R(J_2, \varepsilon_2). \quad (2)$$

Пусть из точки разрыва исходят две ударные волны (рис. 1, б). Тогда условие равенства скоростей на контактном разрыве можно записать следующим образом:

$$u_1 - a_1 U_D(J_1, \varepsilon_1) = u_4 + a_4 U_D(J_2, \varepsilon_2). \quad (3)$$

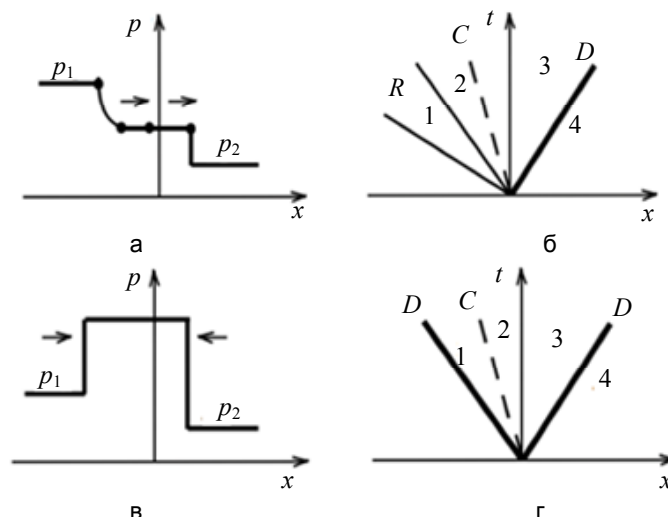


Рис. 1. Задача Римана о распаде произвольного разрыва. Распределения давления (а) и (в); конфигурации, состоящие: из волны разрежения (R), ударной волны (D) и контактного разрыва (C) (б) и двух ударных волн (D) и контактного разрыва (C) (г). p – давление, p_1 – давление до разрыва, p_2 – давление за разрывом, t – время

Теоретически возможны две ударно-волновые конфигурации с исходящими волнами Римана (рис. 2). Технических приложений для таких случаев мало, если они существуют вообще, но при построении разностных схем сквозного счета их тоже нужно учитывать.

Система уравнений, включающая условие равенства статических давлений по сторонам разрывов и одно из уравнений (1)–(3), в зависимости от типов исходящих волн, является замкнутой относительно интенсивностей исходящих волн, и решается численно. Для решения данной системы уравнений необходимо определить вид волн, образующихся в результате распада произвольного разрыва. Определение областей существования решения с различными видами исходящих волн – основная цель решения задачи о распаде произвольного разрыва.

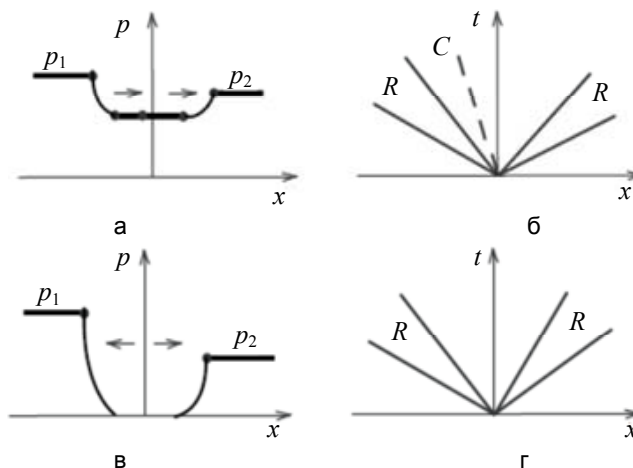


Рис. 2. Задача Римана о распаде произвольного разрыва. Фрагменты (а) и (в) показывают распределения давления, фрагменты (б) и (г) – конфигурации, состоящие из двух волн разрежения (R) и контактного разрыва (C)

Решение одномерной задачи Римана в схеме Годунова. Условия равенства скоростей и давлений потоков на сторонах контактного разрыва

$$u_1 = u_2, \quad p_1 = p_2$$

связывают интенсивности волн $\bar{D}_1(\bar{R}_1)$ и $\bar{D}_2(\bar{R}_2)$ с перепадами $[u]_1$ и $[u]_2$ скорости потока на их сторонах.

При $J_1 > 1$ или $J_2 > 1$ перепады скорости на образующихся ударных волнах связаны с их интенсивностями:

$$\begin{aligned}
 [u]_1 &= -(1-\varepsilon)a_1 \left(\sqrt{\frac{J_1+\varepsilon}{1+\varepsilon}} - \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{J_1+\varepsilon}} \right) \\
 [u]_2 &= (1-\varepsilon)a_2 \left(\sqrt{\frac{J_2+\varepsilon}{1+\varepsilon}} - \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{J_2+\varepsilon}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Изменение скорости в изоэнтропных волнах разрежения определяется соотношениями

$$\begin{aligned}
 [u]_1 &= \frac{2a_1}{\gamma-1} \left(1 - J_1^{(\gamma-1)/2\gamma} \right) \\
 [u]_2 &= -\frac{2a_2}{\gamma-1} \left(1 - J_2^{(\gamma-1)/2\gamma} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Если известны перепады скорости, то можно определить обратные зависимости J_i от $[u]_i$ для ударных волн:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= 1 + \frac{\gamma [u]_1}{2(1-\varepsilon)a_1^2} \left([u]_1 - \sqrt{[u]_1^2 + 4(1-\varepsilon)^2 a_1^2} \right) \\
 J_2 &= 1 + \frac{\gamma [u]_2}{2(1-\varepsilon)a_2^2} \left([u]_2 - \sqrt{[u]_2^2 + 4(1-\varepsilon)^2 a_2^2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

и волн Римана:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \left(1 - (\gamma-1)[u]_1 / 2a_1 \right)^{2\gamma/(\gamma-1)} \\
 J_2 &= \left(1 + (\gamma-1)[u]_2 / 2a_2 \right)^{2\gamma/(\gamma-1)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Отношения E_1 и E_2 плотностей газа до и за ударными волнами (адиабата Рэнкина–Гюгонио) определяются как

$$E_1 = (1 + \varepsilon J_1) / (J_1 + \varepsilon), \quad E_2 = (1 + \varepsilon J_2) / (J_2 + \varepsilon),
 \tag{8}$$

а для изоэнтропных волн Римана (адиабата Пуассона) – как

$$E_1 = J_1^{-1/\gamma}, \quad E_2 = J_2^{-1/\gamma}.
 \tag{9}$$

В отличие от аналогичной задачи о взаимодействии наклонных сверхзвуковых стационарных потоков, система (4)–(9) всегда имеет единственное решение, получаемое численно.

Аналитическое решение Ошера–Соломона для слабых волн. Как правило, перепады параметров течения на границах вычислительных ячеек в разностных методах невелики, и разрывы в решении в задаче Римана можно считать слабыми. Разностная схема Ошера–Соломона использует этот факт, заменяя точную постановку задачи Римана приближенной [11], в которой формулы (5), (7), (9) связывают интенсивности, скорости и плотности потока и на волнах разрежения, и на ударных волнах. Задача о распаде разрыва в приближенной постановке решается аналитически:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \left[\frac{(\gamma-1)(u_1 - u_2) + 2(a_1 + a_2)}{2(a_1 + a_2/I)} \right]^{2\gamma/(\gamma-1)} \\
 J_2 &= \left[\frac{(\gamma-1)(u_1 - u_2) + 2(a_1 + a_2)}{2(a_1 I + a_2)} \right]^{2\gamma/(\gamma-1)}, \\
 [u]_1 &= \frac{2a_2(1-I) + (\gamma-1)I(u_2 - u_1)}{a_1 I + a_2} \cdot \frac{a_{j-1}}{\gamma-1} \\
 [u]_2 &= \frac{2a_1(1-I) + (\gamma-1)I(u_1 - u_2)}{a_1 I + a_2} \cdot \frac{a_2}{\gamma-1}
 \end{aligned}$$

где $I = (p_2 / p_1)^{(\gamma-1)/2\gamma}$.

Численный алгоритм метода Годунова. При решении гиперболической системы квазилинейных уравнений в частных производных, записанной в дивергентной форме,

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{H},$$

простейшая схема первого порядка для определения вектора \mathbf{Q}_j в разностной ячейке j в новый момент времени $t + \Delta t$ (рис. 3, а) выглядит следующим образом:

$$\Delta x_j^N \cdot \mathbf{Q}_j(t + \Delta t) = \Delta x_j \cdot \mathbf{Q}_j(t) + (\mathbf{F}_{j-1/2} - V_{j-1/2} \cdot \mathbf{Q}_{j-1/2}) \Delta t - (\mathbf{F}_{j+1/2} - V_{j+1/2} \cdot \mathbf{Q}_{j+1/2}) \Delta t + S_j \cdot \mathbf{H}_j(t).$$

Здесь Δx_j и Δx_j^N – размеры ячейки j до и после шага Δt интегрирования, $V_{j-1/2}$ и $V_{j+1/2}$ – скорости движения ее границ, $S_j = (\Delta x_j + \Delta x_j^N) \cdot \Delta t / 2$, а $\mathbf{Q}_j(t)$ и $\mathbf{H}_j(t)$ – известные векторы консервативных переменных и источниковых членов в начальный момент времени. Значения консервативных переменных ($\mathbf{Q}_{j-1/2}$ и $\mathbf{Q}_{j+1/2}$) и их потоков ($\mathbf{F}_{j-1/2}$ и $\mathbf{F}_{j+1/2}$) через границы ячеек необходимо определить.

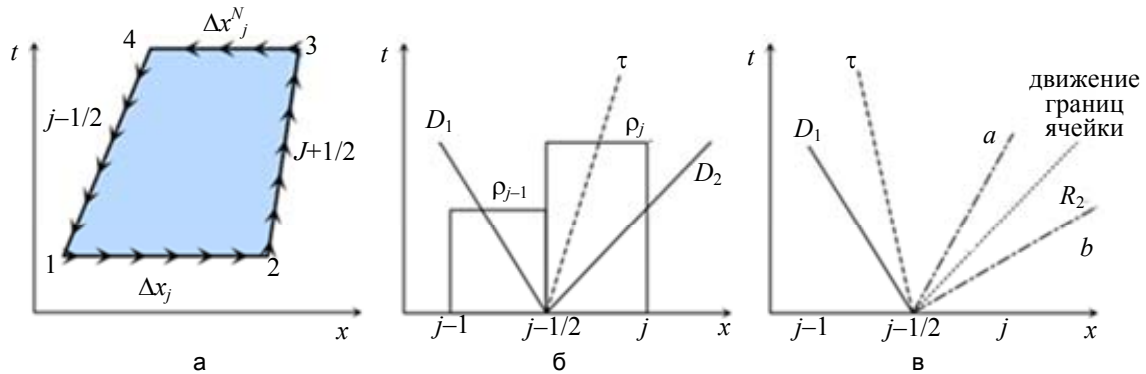


Рис. 3. К обоснованию метода Годунова: разностная ячейка (а); разрыв параметров на границе ячеек (б); распад разрыва с исходящими ударной волной D_1 и волной Римана R_2 (в). τ – тангенциальный разрыв, ρ – плотность; a – первая характеристика волны разрежения и b – последняя характеристика волны разрежения (рис. 3, в)

Основная проблема при построении разностных схем расчета заключается в желании повысить порядок аппроксимации и одновременно обеспечить получение монотонного численного решения при наличии сильных и слабых разрывов. В работе Годунова [5] показано, что монотонная разностная схема не может иметь порядок аппроксимации выше первого. Выход из противоречия между необходимостью получения монотонного решения и повышением порядка аппроксимации предложен в работе Колгана [12], смысл которого заключается в создании нелинейных механизмов, обеспечивающих непрерывный переход от немонотонной схемы второго порядка аппроксимации с центральными разностями к монотонной схеме первого порядка с односторонними разностями в узлах сетки. Разностные схемы с повышенным порядком аппроксимации используются в узлах, в которых численное решение является гладким, а в точках, в которых решение имеет разрывы, используются монотонные разностные схемы низкой точности. Схема Годунова обладает аппроксимационной вязкостью, поэтому для расчета сильных разрывов нет необходимости вводить искусственную вязкость. При расчете слабых разрывов типа волн разрежения погрешность аппроксимации становится достаточно большой, что проявляется в их сильном размазывании (которое тем сильнее, чем меньше число Куранта).

В классической схеме С.К. Годунова значения $\mathbf{Q}_{j-1/2}$, $\mathbf{F}_{j-1/2} = \mathbf{F}(\mathbf{Q}_{j-1/2})$ и им подобные определяются из решения задачи о распаде разрыва параметров потока (\mathbf{Q}_{j-1} и \mathbf{Q}_j , рис. 3, б) на границах ячеек. В качестве времени может выступать любая пространственная координата.

После решения задачи Римана в точной или приближенной постановке рассчитываются скорости движения всех волн и разрывов. Скорости W_1 и W_2 перемещения ударных волн \bar{D}_1 и \bar{D}_2 определяются зависимостями

$$W_1 = u_{j-1} - a_{j-1} \sqrt{(J_1 + \varepsilon)/(1 + \varepsilon)}, W_2 = u_j + a_j \sqrt{(J_2 + \varepsilon)/(1 + \varepsilon)}.$$

Легко вычисляются и скорости распространения контактного разрыва (W_τ), а при образовании волн разрежения \bar{R}_1 и \bar{R}_2 – их передних (W_{1a} и W_{2a}) и задних (W_{1b} и W_{2b}) фронтов (рис. 3, в):

$$W_\tau = u_1 = u_3, W_{1a} = u_{j-1} - a_{j-1}, W_{2a} = u_j + a_j,$$

$$W_{1b} = u_1 - a_1 = u_{j-1} + [u]_1 - a_{j-1} \cdot J_1^{(\gamma-1)/2\gamma},$$

$$W_{2b} = u_2 + a_2 = u_j + [u]_2 - a_j \cdot J_2^{(\gamma-1)/2\gamma}.$$

Рассчитанные значения сравниваются со скоростью $V_{j-1/2}$ движения границы ячеек. Если скорость перемещения границы меньше или больше скоростей перемещения всех волн, то свойства потока на ней – такие же, как в левой ($\mathbf{Q}_{j-1/2} = \mathbf{Q}_{j-1}$) или в правой ($\mathbf{Q}_{j-1/2} = \mathbf{Q}_j$) ячейках до распада разрыва. Если скорость границы меньше скорости одной из волн и больше скорости другой, то вектор $\mathbf{Q}_{j-1/2}$ определяется значениями физических переменных (ρ_1, u_1, p_1) и (ρ_2, u_2, p_2) , соответственно.

Если же траектория границы пролегает внутри веера характеристик волны \bar{R}_1 или \bar{R}_2 , искомые свойства потока зависят от значения скорости:

в волне \bar{R}_1

$$u_{j-1/2} = (1 - \varepsilon)(V_{j-1/2} + a_{j-1}) + \varepsilon u_{j-1},$$

$$a_{j-1/2} = \varepsilon \left(\frac{2a_{j-1}}{\gamma - 1} - u_{j-1} - V_{j-1/2} \right),$$

$$\rho_{j-1/2} = \rho_{j-1} \cdot \left(\frac{a_{j-1/2}}{a_{j-1}} \right)^{2/(\gamma-1)}, \quad p_{j-1/2} = p_{j-1} \cdot \left(\frac{a_{j-1/2}}{a_{j-1}} \right)^{2\gamma/(\gamma-1)},$$

в волне \bar{R}_2

$$u_{j-1/2} = (1 - \varepsilon)(V_{j-1/2} - a_j) + \varepsilon u_j,$$

$$a_{j-1/2} = \varepsilon \left(\frac{2a_j}{\gamma - 1} - u_j + V_{j-1/2} \right),$$

$$\rho_{j-1/2} = \rho_j \cdot \left(\frac{a_{j-1/2}}{a_j} \right)^{2/(\gamma-1)}, \quad p_{j-1/2} = p_j \cdot \left(\frac{a_{j-1/2}}{a_j} \right)^{2\gamma/(\gamma-1)}.$$

Последние соотношения являются следствием условия сохранения инвариантов Римана в изоэнтропных волнах:

$$\bar{R}_1: u + \frac{2a}{\gamma - 1} = u_{j-1/2} + \frac{2a_{j-1/2}}{\gamma - 1} = u_{j-1} + \frac{2a_{j-1}}{\gamma - 1},$$

$$\bar{R}_2: u - \frac{2a}{\gamma - 1} = u_{j-1/2} - \frac{2a_{j-1/2}}{\gamma - 1} = u_j - \frac{2a_j}{\gamma - 1}.$$

Они выводятся из уравнения Менделеева–Клапейрона, адиабаты Лапласа–Пуассона, а также равенства скоростей границы ячеек и одной из прямолинейных характеристик соответствующей волны разрежения: $V_{j-1/2} = u_{j-1/2} - a_{j-1/2}$ или $V_{j-1/2} = u_{j-1/2} + a_{j-1/2}$.

Таким образом, общую схему построения численного метода на основе схемы Годунова можно представить в следующем виде.

1. Экстраполяция неизвестных для нахождения состояния потока на его гранях по величинам, заданным в центре (reconstruction). На практике используются кусочно-постоянное (схема Годунова), кусочно-линейное (схема Ван Лира) и кусочно-параболическое (схема Чакраварти–Ошера) распределение параметров потока в пределах ячейки и различные ограничители потока.
2. Решение задачи Римана для каждой грани контрольного объема с учетом локального направления потока (в направлении нормали к грани контрольного объема). Точное решение задачи Римана представляется достаточно затратным с вычислительной точки зрения, поэтому широкое применение находят приближенные подходы, например, схемы Роз или Ошера.
3. Реализация шага по времени (evolution).

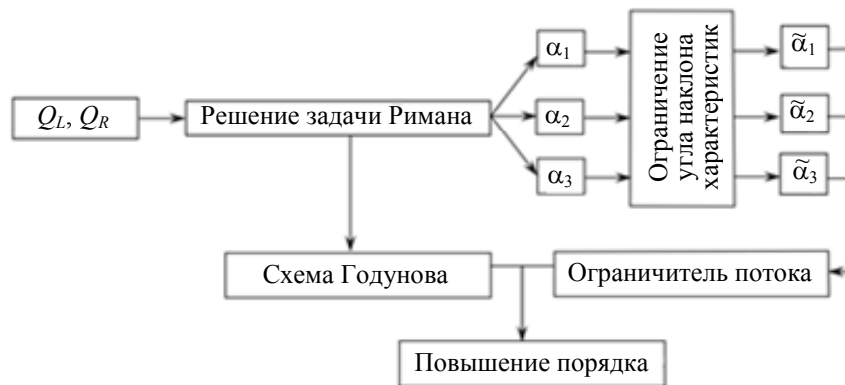


Рис. 4. Типичная реализация схемы Годунова с использованием монотонизирующих ограничителей потоков. Q_L – левая сторона ячейки, Q_R – правая сторона ячейки

Общим во всех методах подобного класса является использование разнообразных монотонизирующих ограничителей потоков (рис. 4) с переключателями, зависящими от локальных свойств решения

(под α_i понимается i -я характеристика). Большинство ограничителей имеют дискретные переключатели типа $\max\{f_1, f_2\}$, что приводит к разрыву первой производной и снижению точности (использование абсолютных значений контрольных функций имеет тот же смысл и приводит к тем же последствиям), в связи с чем применяются и гладкие ограничители.

Анализ

Анализ скоростной функции. Скоростная функция волны Римана $U_R(J)$ и ударной волны $U_D(J)$ имеют при $J = 1$ порядок касания не ниже второго, а при $\gamma = 5/3$ – третий. При $\gamma < 5/3$ спутная скорость за волной сжатия Римана всегда меньше, чем за ударной волной, равной интенсивности. Различие тем больше, чем больше интенсивность волн. При $\gamma > 5/3$ ситуация иная. Скоростные функции $U_R(J)$ и ударной волны $U_D(J)$ имеют еще одну точку пересечения $U_R(J_x) = U_D(J_x)$. Зависимость J_x от показателя адиабаты γ показана на рис. 5.

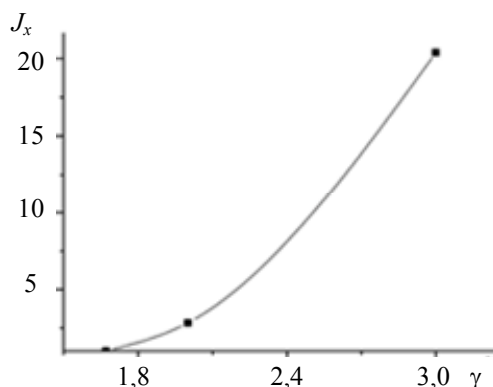


Рис. 5. Зависимость от показателя адиабаты γ особой интенсивности J_x , при которой скоростные функции ударной волны и волны Римана равны

Если $J > J_x$, то спутная скорость за волной сжатия Римана меньше, чем за ударной волной, равной интенсивности. Если $1 < J < J_x$, то меньше спутная скорость за ударной волной. Особая интенсивность J_x имеет определенное прикладное значение. В ряде технических приложений, например, в упрочнении поверхности металлов, используется метание частиц с помощью волн. При J_x достигается наименьшее значение затрат энергии на единицу увеличения кинетической энергии частицы.

Анализ решения Ошера–Соломона для слабых волн. На рис. 6, а, приведены значения интенсивностей волн J_1 и J_2 (кривые 1 и 2 – точное решение, кривые 1' и 2' – решение Ошера–Соломона) и перепадов скорости потока $[u] = [u]_1 = [u]_2$ (кривые 3 и 3') (рис. 6, б) на волнах, образующихся в ударной трубе при распаде разрыва давления P двух первоначально покоящихся газов с одинаковой температурой и показателем адиабаты $\gamma = 1,4$.

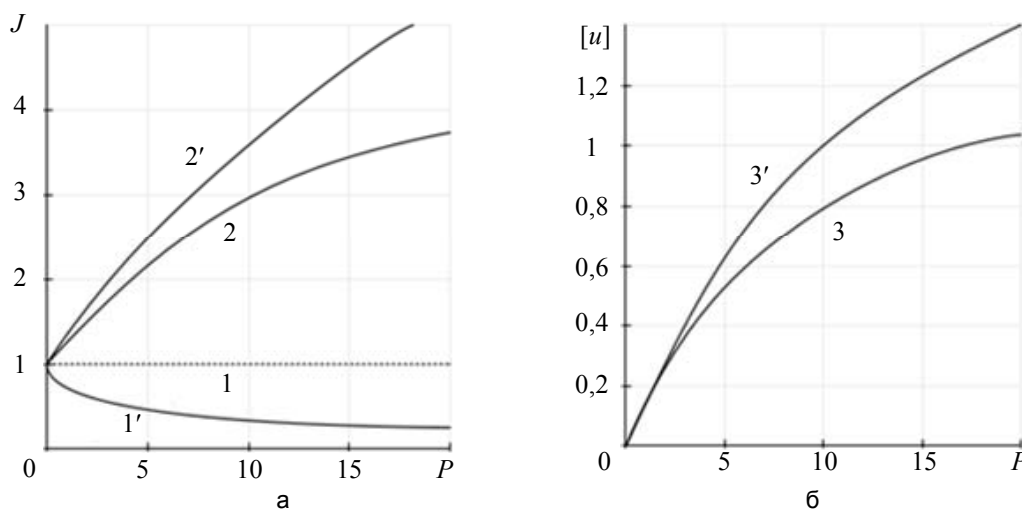


Рис. 6. Точное приближенно-аналитическое решение задачи Римана: значения интенсивностей волн J_1 и J_2 (кривые 1 и 2 – точное решение, кривые 1' и 2' – решение Ошера–Соломона (а); перепадов скорости потока $[u] = [u]_1 = [u]_2$ (кривые 3 и 3') (б)

Видно, что при больших начальных перепадах статического давления ($P > 5$) неточность приближенного решения становится заметной. В области же слабых разрывов совпадение вполне достаточное. Поскольку решение задачи о распаде произвольного разрыва в ходе численных расчетов производится множество раз, то использование приближенной модели считается оправданным.

Решение тестовой задачи Сода методом Годунова в точной постановке и в приближении Ошера–Соломона. Модельные задачи играют роль испытательного полигона для проверки новых методологических концепций и оценки точности результатов, полученных с помощью сконструированных на их основе программных средств. Для тестирования вычислительной процедуры используется задача расчета эволюции бегущих волн различного профиля и различные конфигурации задачи Римана. Задача об эволюции бегущих волн служит для проверки шага реконструкции решения, а задача Римана – для проверки шага эволюции. Результаты расчетов (рис. 7) позволяют судить о монотонности и точности численного метода.

Образующаяся ударно-волновая структура соответствуют двум различным решениям задачи Сода [13]. В первом случае (рис. 7, а–в) имеет место дозвуковое течение, а во втором случае (рис. 7, г–е) – сверхзвуковое. В качестве рабочей среды принимается воздух $\gamma = 1,4$. Приведенные решения соответствуют малому промежутку времени с момента начала распада разрыва, когда в численном решении наблюдаются наибольшие отклонения от точного решения. В отличие от классической постановки задачи Сода, в которой начальные условия заданы в относительных переменных, в настоящей работе используются размерные величины.

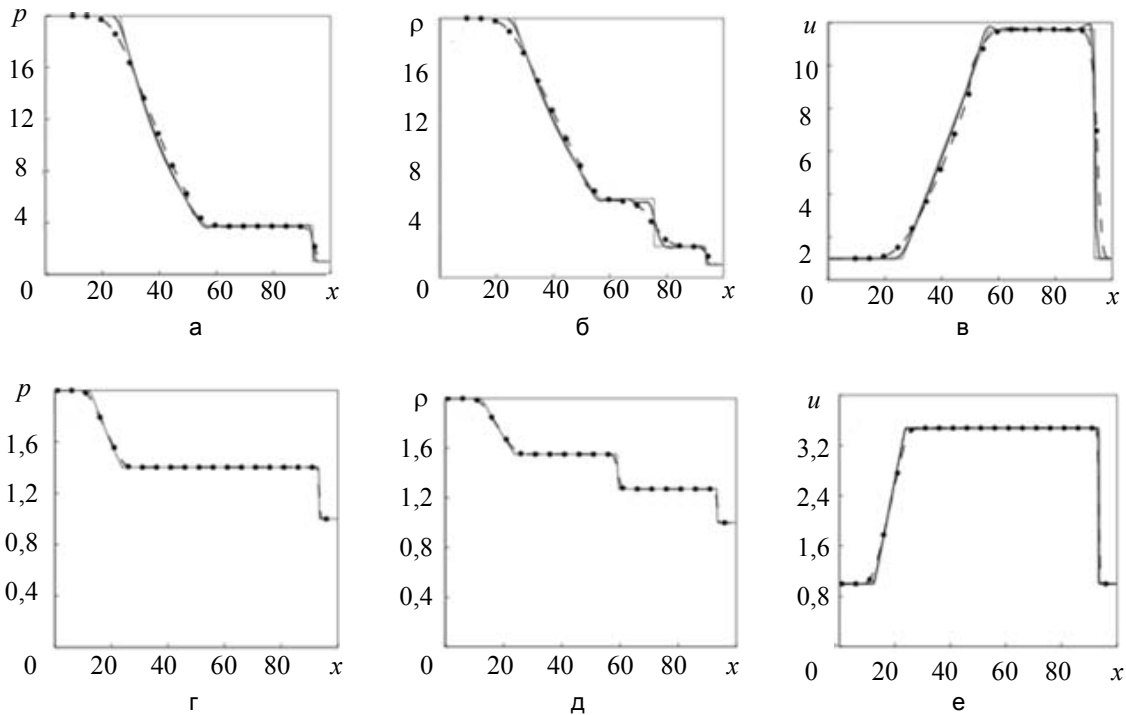


Рис. 7. Тестовая задача Сода. Фрагменты а–в соответствуют дозвуковому течению, фрагменты г–е – сверхзвуковому; а, г – распределения давления; б, д – распределения плотности; в, е – распределения скорости. Сплошная линия соответствует точному решению задачи, пунктирная линия – расчету по схеме Годунова, утолщенная линия --- расчету по схеме MUSCL 3-го порядка, кружки – по схеме Чакраварти–Ошера

Различные разностные схемы показывают примерно одинаковые результаты. В целом схема Чакраварти–Ошера дает более точное решение, чем другие схемы. При этом схема Годунова требует примерно в 4,2 раза больше расчетного времени, чем схемы, основанные на приближенном решении задачи Римана.

Преимущества схем высокого порядка точности хорошо заметны при рассмотрении профилей контактного разрыва и ударной волны. Имеет место немонотонность численного профиля, полученного при помощи обычной схемы второго порядка, которая проявляется вблизи разрывов. С другой стороны, профили плотности и давления, полученные на основе схем высокого порядка, являются монотонными.

Порядок точности разностных схем при наличии разрывов решений и их производных, как правило, не соответствует классическому порядку аппроксимации по тейлоровскому разложению на гладких решениях. Для оценки точности разностных схем применяется метод, основанный на экспериментальном определении сходимости численных расчетов к точному решению исходной задачи.

Заключение

Задача изучения распада произвольного разрыва остается актуальной уже много лет. Необходимость ее решения возникает в численных методах, использующих схему типа Годунова. Требование оптимального сочетания приемлемой точности аппроксимации с высокой скоростью вычислений требует продолжения исследований приближенных методов решения задачи о распаде разрыва, например, схемы Ошера–Соломона, в которой для расчета слабых ударных волн используются соотношения для изоэнтропических волн сжатия. Расчеты показали, что приближенный метод может использоваться до интенсивности ударных волн, меньших пяти, что чаще всего выполняется на границах разностных ячеек в типичных случаях.

Актуальным является разработка новых алгоритмов по расчету областей существования различных решений.

В целом ряде технических приложений (обтекание острой кромки профиля крыла, отражение ударной волны от препятствия, ударно-волновые процессы в струйных течениях) задачу о распаде разрывов необходимо решать в точной установке без каких-либо упрощений. С другой стороны, при реализации численных методов, использующих решение задачи Римана, например, методов типа Годунова, более рациональным представляется применение приближенных решений. Рассмотренное приближенное решение Ошера–Соломона обеспечивает, как показали тестовые расчеты, монотонность разностной схемы и приемлемую точность. В то же время имеется необходимость точного определения границ применимости приближенных решений. Для этого удобно использовать скоростную функцию интенсивности разрыва, которая равна спутной скорости за ударной волной, распространяющейся в покоящейся среде. В работе определена особая интенсивность волн, при которой скоростные функции ударной и простой волны одинаковы, т.е. погрешность приближенных методов минимальна. Прямое вычисление погрешности применения схемы Ошера–Соломона показало, что она применима до интенсивности разрыва, равной пяти.

Литература

1. Handbook of Shock Waves. Eds. G. Ben-Dor, D. Igra, T. Elperin. NY: Academic Press, 2001. 824 p.
2. Усков В.Н. Бегущие одномерные волны. СПб.: БГТУ «Военмех», 2000. 220 с.
3. Архипова Л.П., Усков В.Н. Универсальное решение задачи об отражении одномерных бегущих волн от твердой стенки и его анализ для волн уплотнения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. 2013. № 2. С. 77–81.
4. Архипова Л.П. Скоростная функция интенсивности одномерной нестационарной волны и ее анализ для волн уплотнения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2012. № 3–1(34). С. 57–62.
5. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Математический сборник. 1959. Т. 47. № 8–9. С. 271–306.
6. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
7. Gel'fand B.E., Sil'nikov M.V., Mikhailin A.I., Orlov A.V. Attenuation of blast overpressures from liquid in an elastic shell // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2001. V. 37. N 5. P. 607–612.
8. Silnikov M.V., Mikhaylin A.I. Protection of flying vehicles against blast loads // Acta Astronautica. 2014. V. 97. N 1. P. 30–37. doi: 10.1016/j.actaastro.2013.12.012
9. Osher S., Solomon F. Upwind difference schemes for hyperbolic conservation laws // Mathematics of Computation. 1982. V. 38. N 158. P. 339–374. doi: 10.1090/S0025-5718-1982-0645656-0
10. Волков К.Н. Применение и реализация разностных схем высокой разрешающей способности для решения задач газовой динамики на неструктурированных сетках // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 153–162.
11. Kulikovskii A.G., Pogorelov N.V., Semenov A.Yu. Mathematical Aspects of Numerical Solution of Hyperbolic Systems. Chapman & Hall/CRC Press, 2001. 560 p.
12. Колган В.П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Ученые записки ЦАГИ. 1972. Т. 3. № 6. С. 68–77.
13. Sod G.A. A survey of several finite difference methods for systems of nonlinear hyperbolic conservation laws // Journal of Computational Physics. 1978. V. 27. N 1. P. 1–31. doi: 10.1016/0021-9991(78)90023-2

Булат Павел Викторович

– кандидат физико-математических наук, руководитель научной лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, pavelbulat@mail.ru

Волков Константин Николаевич

– доктор физико-математических наук, старший лектор, Университет Кингстона, Лондон, SW15 3DW, Великобритания, k.volkov@kingston.ac.uk

- Сильников Михаил Владимирович** – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института военно-технического образования и безопасности, Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация; генеральный директор, НПО Специальных материалов, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, director@npo-sm.ru
- Чернышев Михаил Викторович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Экстремальные процессы в материалах и взрывобезопасность» Института военно-технического образования и безопасности, Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация; НПО Специальных материалов, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, chernyshov@npo-sm.ru
- Pavel V. Bulat** – PhD, scientific supervisor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, pavelbulat@mail.ru
- Konstantin N. Volkov** – D.Sc., senior lecturer, Kingston University, London, SW15 3DW, UK, k.volkov@kingston.ac.uk
- Mikhail V. Silnikov** – RAS corresponding member, D.Sc., Professor, Director, Institute of Military-Technical Education and Security, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; CEO, "Special Materials", Corp., Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, General Director, director@npo-sm.ru
- Mikhail V. Chernyshev** – D.Sc., Associate professor, Head of Department, Institute of Military-Technical Education and Security, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; leading scientific researcher, "Special Materials", Corp., 194044, Saint Petersburg, Russian Federation, chernyshov@npo-sm.ru

УДК 531.011,531.36,531.394,531.391.3

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ПРЕОБРАЗОВАНИЙ К НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Г.И. Мельников^а, С.Е. Иванов^а, В.Г. Мельников^а, К.С. Малых^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: melnikov@mail.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.11.14, принята к печати 18.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-149-154

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мельников Г.И., Иванов С.Е., Мельников В.Г., Малых К.С. Применение модифицированного метода преобразований к нелинейной динамической системе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 149–154

Аннотация. Рассматривается математическая модель динамической системы с одной степенью свободы, представленная в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными частями в форме многочленов с постоянными и периодическими коэффициентами. Представлен модифицированный метод для исследования автоколебаний нелинейных механических систем. Авторами разработан уточненный метод преобразования и интегрирования уравнения, основанный на методе нормализации Пуанкаре–Дюлака. Уточнение метода заключается в учете нелинейных членов высших порядков методом экономизации Чебышева, что улучшает точность результатов вычислений. Выполняется аппроксимация остаточных членов высших порядков однородными формами меньших порядков, в рассмотренном случае кубическими формами. В качестве примера рассмотрено применение модифицированного метода для уравнения Ван-дер-Поля и получены выражения для амплитуды и фазы автоколебаний в аналитическом виде. Выполнено сравнение решения уравнения Ван-дер-Поля, найденного разработанным методом, с точным решением численным методом Рунге–Кутты. Погрешность решения модифицированным методом в два раза меньше и составляет 1%, что показывает применимость разработанного метода для исследования автоколебаний нелинейных динамических систем с постоянными и периодическими параметрами.

Ключевые слова: автоколебания, нелинейные системы, экономизация Чебышева, метод Пуанкаре–Дюлака.

APPLICATION OF MODIFIED CONVERSION METHOD TO A NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEM

G.I. Melnikov^а, S.E. Ivanov^а, V. G. Melnikov^а, K.S. Malykh^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: melnikov@mail.ifmo.ru

Article info

Received 19.11.14, accepted 18.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-149-154

Article in Russian

Reference for citation: Melnikov G.I., Ivanov S.E., Melnikov V. G., Malykh K.S. Application of modified conversion method to a nonlinear dynamical system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 149–154 (in Russian)

Abstract. The paper deals with a mathematical model of dynamical system with single degree of freedom, presented in the form of ordinary differential equations with nonlinear parts in the form of polynomials with constant and periodic coefficients. A modified method for the study of self-oscillations of nonlinear mechanical systems is presented. A refined method of transformation and integration of the equation, based on Poincare-Dulac normalization method has been developed. Refinement of the method lies in consideration of higher order nonlinear terms by Chebyshev economization technique that improves the accuracy of the calculations. Approximation of the higher order remainder terms by homogeneous forms of lower orders is performed; in the present case, it is done by cubic forms. An application of the modified method for the Van-der-Pol equation is considered as an example; the expressions for the amplitude and the phase of the oscillations are obtained in an analytical form. The comparison of the solution of the Van-der-Pol equation obtained by the developed method and the exact solution is performed. The error of the solution obtained by the modified method equals to 1%, which shows applicability of the developed method for analysis of self-oscillations of nonlinear dynamic systems with constant and periodic parameters.

Keywords: oscillations, nonlinear systems, Chebyshev economization, method of Poincare-Dulac.

Введение

Математической моделью многих механических систем является система нелинейных динамических уравнений полиномиальной структуры [1]. Исследование нелинейных систем представляет собой сложную актуальную задачу по сравнению с исследованием линейных систем. В современной теории нелинейных динамических систем применяется метод малого параметра [2], метод Ван-дер-Поля, метод усреднения [3], метод гармонического баланса [4], метод возмущений, представленный в работах Пуанкаре и являющийся вариантом метода малого параметра. Метод решения нелинейных задач Крылова–Боголюбова [5] позволяет строить высшие приближения на основании метода усреднения. В методе многочленных преобразований, предложенном в работе Г.И. Мельникова [6], в качестве порождающего решения выбрано решение преобразованных уравнений, которое связано многочленным преобразованием с исходными дифференциальными уравнениями.

В отличие от метода многочленных преобразований [6, 7], в методах Ван-дер-Поля и усреднения рассматривается укороченное уравнение и находится приближенное решение, не учитывающее все слагаемые нелинейного полинома высокой степени. В методе гармонического баланса приближенное решение учитывает только составляющие основной частоты. В методе возмущений и малого параметра приближенное решение ищется в виде степенного ряда с малым параметром, если ряд сходится, и точность существенно зависит от количества поправок к нулевому приближению.

В настоящей работе предложен уточненный метод многочленных преобразований для исследования автоколебаний нелинейных механических систем с одной степенью свободы. Рассматриваемые динамические системы представлены в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными частями в форме многочленов с постоянными и периодическими коэффициентами. Авторами разработан уточненный метод многочленных преобразований, основанный на методе нормализации Пуанкаре–Дюлака [8]. Уточнение метода заключается в учете нелинейных членов высших порядков методом экономизации Чебышева [9], что улучшает точность результатов вычислений. Выполняется аппроксимация остаточных членов высших порядков однородными кубическими формами. Приведем основные этапы модифицированного метода многочленных преобразований и применим метод для уравнения Ван-дер-Поля.

Модифицированный метод многочленных преобразований

Рассмотрим дифференциальное уравнение движения нелинейной автономной механической системы, содержащее однородную кубическую форму [10]:

$$\ddot{q} + 2\alpha\dot{q} + \gamma q = \varepsilon P(\dot{q}, q); P(\dot{q}, q) = \sum_{v=0}^3 p_v \dot{q}^v q^{3-v}, \tag{1}$$

где α, ε – малые положительные константы.

Уравнение приведем к безразмерному виду в квадратной области фазовой плоскости, причем используем отображение прямоугольной области на квадратную область посредством линейного масштабного преобразования независимой переменной:

$$\bar{G} = \{(\dot{q}, q) : |\dot{q}| \leq r, |q| \leq r\}.$$

Предполагаем, что корни характеристического уравнения линейной части системы – комплексные с малыми вещественными частями:

$$\lambda = -\alpha + i\beta, \bar{\lambda} = -\alpha - i\beta; \beta = \sqrt{\gamma - \alpha^2}.$$

Применяя оператор дифференцирования $D = \frac{d}{dt}$, запишем левую часть уравнения (1) в форме

$$(D - \lambda)(D - \bar{\lambda})q = (D - \lambda)x = (D - \bar{\lambda})\bar{x},$$

где введены комплексные переменные

$$x = \dot{q} - \bar{\lambda}q, \bar{x} = \dot{q} - \lambda q,$$

или

$$\dot{q} = -i\mu(\lambda x - \bar{\lambda}\bar{x}), q = -i\mu(x - \bar{x}); \mu = 1/2\beta.$$

Новые переменные удовлетворяют дифференциальным уравнениям с одинаковыми кубическими формами:

$$\dot{x} = \lambda x + \varepsilon f(x, \bar{x}), \dot{\bar{x}} = \bar{\lambda}\bar{x} + \varepsilon f(x, \bar{x}).$$

Отметим, что функция выражена в форме

$$Q = x\bar{x} = \dot{q}^2 + 2\alpha\dot{q}q + \gamma q^2$$

и удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\dot{Q} + 2\alpha Q = 2\varepsilon(\dot{q} + \alpha q)P(\dot{q}, q); \dot{Q} + 2\alpha Q = 2\varepsilon \sum_{v=0}^4 (p_{v-1} + \alpha p_v) \dot{q}^v q^{4-v}.$$

Согласно методу Пуанкаре–Дюлака, для уравнения (1) выполняется замена переменных:

$$y = x + \varepsilon \sum_{v=0}^3 a'_v x^v \bar{x}^{3-v}, \bar{y} = \bar{x} + \varepsilon \sum_{v=0}^3 \bar{a}'_v x^{3-v} \bar{x}^v.$$

Затем можно выполнить нелинейную замену кубических переменных с коэффициентами a'_v , назначенными из условия упрощений дифференциальных уравнений, с тем, чтобы в преобразованном уравнении остался только один неустраиваемый кубический моном и малая невязка δ' :

$$\dot{y} = \lambda y + \varepsilon a' y^2 \bar{y} + \delta', \dot{\bar{y}} = \bar{\lambda} \bar{y} + \varepsilon \bar{a}' \bar{y}^2 + \bar{\delta}'.$$

Перейдем к показательной форме [11], полагая

$$y = \rho \exp(i\theta), u = \rho^2.$$

В силу уравнения (1) получаем систему

$$\dot{y} e^{-i\theta} = \dot{\rho} + \rho i \dot{\theta} = (-\alpha + i\beta)\rho - \varepsilon(a^* + ib^*)\rho^3,$$

$$\dot{\rho} = -\alpha\rho - \varepsilon a^* \rho^3, \dot{\theta} = \beta - \varepsilon b^* \rho^2.$$

Получим дифференциальные уравнения для амплитуды $u = \rho^2$ и фазы θ

$$\dot{u} = -2\alpha u - 2\varepsilon a u^2, \tag{2}$$

$$\dot{\theta} = \beta - \varepsilon b u. \tag{3}$$

В рамках преобразования вещественных переменных получим уравнение (2) и (3) новым способом. Введем вещественную переменную, составленную из однородной квадратичной формы и однородной формы четвертой степени с неопределенными коэффициентами:

$$u = Q + \varepsilon V; V = \sum_{v=0}^4 a_v \dot{q}^v q^{4-v}, \quad Q = \dot{q}^2 + 2\alpha \dot{q}q + \gamma q^2.$$

Для краткости записи в дальнейшем будем опускать знаки суммирования.

Предварительно приведем подобные члены в выражении посредством сдвига в отсчете нелинейных индексов:

$$\dot{V} = (4-v')a_v \dot{q}^{v'+1} q^{3-v'} - 2\alpha v a_v \dot{q}^v q^{4-v} - \gamma v' a_v \dot{q}^{v'-1} q^{5-v'} + \varepsilon R,$$

$$\dot{V} = U + \varepsilon R; U = [(5-v)a_{v-1} - 2\alpha v a_v - \gamma(v+1)a_{v+1}] \dot{q}^v q^{4-v},$$

$$R = v a_v \dot{q}^{v-1} q^{4-v} P = v a_v p_v \dot{q}^{v'+v-1} q^{7-v'-v} = v a_v p_{k+1-v} \dot{q}^k q^{6-k},$$

$$R = \sum_{k=0}^6 R_k \dot{q}^k q^{6-k}; R_k = a_1 p_k + 2a_2 p_{k-1} + 3a_3 p_{k-2} + 4a_4 p_{k-3},$$

$$QV = a_v \dot{q}^{v+2} q^{4-v} + 2\alpha a_v \dot{q}^{v+1} q^{5-v} + \gamma a_v \dot{q}^v q^{6-v} = (a_{k-2} + 2\alpha a_{k-1} + \gamma a_k) \dot{q}^k q^{6-k},$$

$$QV = \sum_{k=0}^6 R'_k \dot{q}^k q^{6-k}; R'_k = a_{k-2} + 2\alpha a_{k-1} + \gamma a_k. \tag{4}$$

Найдем выражение невязки, учитывая (4), и пренебрегая величинами третьего порядка малости:

$$U = Q + \varepsilon V, \tag{5}$$

$$\dot{u} \approx -2\alpha u - 2\varepsilon a u^2, \quad \delta = \dot{u} + 2\alpha u + 2\varepsilon a u^2. \tag{6}$$

Нелинейную степенную форму экономизируем по методу Чебышева [12].

Подставим выражение (6) в формулу (5):

$$\delta = \dot{Q} + 2\alpha Q + \varepsilon [\dot{V} + 2\alpha V + 2aQ^2] + 4\varepsilon^2 aQV + 2\varepsilon^3 aV^2.$$

Выделим элементы второго порядка малости:

$$\delta = \varepsilon [2(p_{v-1} + 2p_v) \dot{q}^v q^{4-v} + v a_v (-2\alpha \dot{q} - \gamma q) \dot{q}^{v-1} q^{4-v} + 2\alpha V + 2qQ^2] + \varepsilon^2 W_6, \tag{7}$$

$$W_6 = 4aQV + v a_v \dot{q}^{v-1} q^{4-v} p = 4a(\dot{q}^2 + 2\alpha \dot{q}q + \gamma q^2) a_v \dot{q}^v q^{4-v} + v a_v p \dot{q}^{v'+v-1} q^{7-v'-v},$$

$$W_6 = 4a(a_{k-2} + 2\alpha a_{k-1} + \gamma a_k) \dot{q}^k q^{6-k} + v a_v p_{k+1-v} \dot{q}^k q^{6-k}. \tag{8}$$

Представим выражение (8) как

$$W_6 = \sum_{k=0}^6 A_k \dot{q}^k q^{6-k}, \quad A_k = \sum_{v=0}^3 v a_v p_{k+1-v} + 4a(\gamma a_k + 2\alpha a_{k-1} + a_{k-2}).$$

Применим экономизацию по Чебышеву [13] в области $\bar{G} = \{(\dot{q}, q) : |\dot{q}| \leq r, |q| \leq r\}$ для формы W_6 :

$$\dot{q}^3 \approx h \dot{q}, q^3 \approx h q; (\dot{q}, q) \in \bar{G}, \quad h = \frac{3}{4} r^2.$$

Выполним аппроксимацию формы W_6 :

$$W_6 \approx W_4 = h \left(A_0 q^4 + A_1 \dot{q} q^3 + A_2 \dot{q}^2 q^2 + \frac{1}{2} A_3 (\dot{q}^3 q + \dot{q} q^3) + A_4 \dot{q}^2 q^2 + A_5 \dot{q}^3 q + A_6 \dot{q}^4 \right),$$

$$W_6 \approx W_4 = \sum_{v=0}^4 B_v \dot{q}^v q^{4-v}; B_0 = A_0; B_1 = A_1 + \frac{1}{2} A_3; B_2 = A_2 + A_4; B_3 = A_5 + \frac{1}{2} A_3; B_4 = A_6. \quad (9)$$

Сделаем подстановку выражения (9) в формулу (7):

$$\delta = \varepsilon \{ [2(\alpha p_v + p_{v-1}) - 2\alpha v a_v - \gamma(v+1)a_{v+1} + 2\alpha a_v + \varepsilon h B_v] \dot{q}^v q^{4-v} + 2aQ^2 \}, \quad (10)$$

$$Q^2 \equiv \sum_{v=0}^4 c_v \dot{q}^v q^{4-v}; c_0 = \gamma^2; c_1 = 4\alpha\gamma; c_2 = 4\alpha^2 + 2\gamma; c_3 = 4\alpha; c_4 = 1.$$

В соответствии с методом Пуанкаре–Дюлака [14] приравняем выражение в формуле (10) к нулю:

$$2(\alpha p_v + p_{v-1}) - \gamma(v+1)a_{v+1} - 2\alpha(v-1)a_v + 2ac_v + \varepsilon h B_v = 0 \quad (v=0, \dots, 4) \quad (11)$$

Найдено решение системы уравнений (11). Искомые коэффициенты представлены в следующей форме:

$$a = (-24\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 - 24\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_3 p_4 - 96\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_0 p_3 - 72\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_2 p_3 + 48\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_1 + 24\alpha^2\gamma\varepsilon h p_1 p_2 - 24\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_3 - 51\alpha\gamma^4\varepsilon h p_3^2 - 12\alpha\gamma^3\varepsilon h p_3^2 + 30\alpha\gamma^3\varepsilon h p_1 p_3 - 9\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1^2 - 9\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_2 + 6\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 - 18\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_4 - 24\gamma^4\varepsilon h p_3 p_4 - 12\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 + 12\gamma^3\varepsilon h p_1 p_4 - 24\alpha^4\gamma p_1 + 24\alpha^3\gamma^2 p_2 - 24\alpha^3\gamma p_0 - 18\alpha^2\gamma^3 p_3 + 24\alpha^2\gamma^2 p_1 + 12\alpha\gamma^4 p_4 - 18\alpha\gamma^3 p_2 + 12\gamma^4 p_3) / (12\gamma^3(2\alpha^2 - \gamma)),$$

$$a_1 = (24\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 + 24\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_3 p_4 + 120\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_0 p_3 + 72\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_2 p_3 - 48\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_1 - 24\alpha^2\gamma\varepsilon h p_1 p_2 + 24\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_3 + 51\alpha\gamma^4\varepsilon h p_3^2 + 12\alpha\gamma^3\varepsilon h p_3^2 - 30\alpha\gamma^3\varepsilon h p_1 p_3 + 9\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1^2 + 9\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_2 - 6\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 + 18\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_4 + 24\gamma^4\varepsilon h p_3 p_4 - 12\gamma^3\varepsilon h p_0 p_3 + 12\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 - 12\gamma^3\varepsilon h p_1 p_4 + 24\alpha^4\gamma p_1 - 24\alpha^3\gamma^2 p_2 + 18\alpha^2\gamma^3 p_3 - 24\alpha^2\gamma^2 p_1 - 12\alpha\gamma^4 p_4 + 18\alpha\gamma^3 p_2 + 12\alpha\gamma^2 p_0 - 12\gamma^4 p_3) / (6\gamma^2(\gamma - 2\alpha^2)),$$

$$a_2 = (-12\alpha^2\gamma^2 p_0 + 6\gamma^3 p_0 - 12\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0^2 + 6\gamma^2\varepsilon h p_0^2 - 60\alpha^3\gamma^2 p_1 + 6\alpha\gamma^3 p_1 - 6\alpha^2\gamma\varepsilon h p_1^2 + 3\gamma^2\varepsilon h p_1^2 + 18\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_1^2 + 36\alpha^2\gamma^3 p_2 - 6\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_2 + 3\gamma^2\varepsilon h p_0 p_2 + 18\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_0 p_2 + 36\alpha^3\gamma^3 p_3 - 24\alpha\gamma^4 p_3 + 8\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 - 10\gamma^3\varepsilon h p_1 p_3 - 48\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_1 p_3 - 6\gamma^4\varepsilon h p_1 p_3 + 24\alpha\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 - 10\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_3^2 + 54\alpha^2\gamma^4\varepsilon h p_3^2 + 36\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_0 p_4 + 48\alpha\gamma^4\varepsilon h p_3 p_4 - 24\alpha\gamma^3\varepsilon h p_1 p_4 + 24\gamma^5\varepsilon h p_3^2 + 17\gamma^4\varepsilon h p_3^2 - 24\alpha^2\gamma^4 p_4) / (6\gamma^3(\gamma - 2\alpha^2)),$$

$$a_3 = (-36\alpha^3\gamma p_0 + 6\alpha\gamma^2 p_0 + 6\alpha\gamma\varepsilon h p_0^2 + 42\alpha^2\gamma^2 p_1 - 6\gamma^3 p_1 + 72\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_1 - 12\gamma^2\varepsilon h p_0 p_1 + 3\alpha\gamma\varepsilon h p_1^2 - 9\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1^2 + 36\alpha^3\gamma^2 p_2 - 24\alpha\gamma^3 p_2 + 3\alpha\gamma\varepsilon h p_0 p_2 - 9\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_2 + 36\alpha^2\gamma\varepsilon h p_1 p_2 - 6\gamma^2\varepsilon h p_1 p_2 - 18\alpha^2\gamma^3 p_3 + 12\gamma^4 p_3 - 36\alpha^2\gamma\varepsilon h p_0 p_3 + 6\gamma^2\varepsilon h p_0 p_3 + 36\alpha^3\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 - 6\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 - 36\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 - 36\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_3 p_4 + 144\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_0 p_3 - 108\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_2 p_3 - 27\alpha\gamma^4\varepsilon h p_3^2 + 5\alpha\gamma^3\varepsilon h p_3^2 + 24\alpha\gamma^3\varepsilon h p_1 p_3 - 4\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 - 18\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_4 + 6\gamma^4\varepsilon h p_2 p_3 - 18\gamma^4\varepsilon h p_3 p_4 + 24\gamma^3\varepsilon h p_0 p_3 + 6\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 + 12\gamma^3\varepsilon h p_1 p_4 + 12\alpha\gamma^4 p_4) / (9\gamma^3(2\alpha^2 - \gamma)),$$

$$a_4 = (-96\alpha^2\gamma^3\varepsilon h p_3^2 - 68\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_3^2 + 24\alpha^2\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 + 40\alpha^2\gamma\varepsilon h p_1 p_3 - 24\alpha^2\varepsilon h p_0^2 - 12\alpha^2\varepsilon h p_1^2 - 12\alpha^2\varepsilon h p_0 p_2 - 24\alpha\gamma^3\varepsilon h p_2 p_3 - 72\alpha\gamma^3\varepsilon h p_3 p_4 - 96\alpha\gamma^2\varepsilon h p_0 p_3 - 96\alpha\gamma^2\varepsilon h p_2 p_3 + 24\alpha\gamma^2\varepsilon h p_1 p_4 + 48\alpha\gamma\varepsilon h p_0 p_1 + 24\alpha\gamma\varepsilon h p_1 p_2 - 24\alpha\gamma\varepsilon h p_0 p_3 - 51\gamma^4\varepsilon h p_3^2 - 12\gamma^3\varepsilon h p_3^2 + 30\gamma^3\varepsilon h p_1 p_3 - 9\gamma^2\varepsilon h p_1^2 - 9\gamma^2\varepsilon h p_0 p_2 + 6\gamma^2\varepsilon h p_1 p_3 - 18\gamma^2\varepsilon h p_0 p_4 - 24\alpha^3\gamma p_1 + 24\alpha^2\gamma^3 p_4 + 24\alpha^2\gamma^2 p_2 - 24\alpha^2\gamma p_0 + 6\alpha\gamma^3 p_3 + 24\alpha\gamma^2 p_1 - 18\gamma^3 p_2) / (36(2\alpha^2 - \gamma)\gamma^3).$$

В работе объектом рассмотрения является математическая модель динамической системы в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными частями в форме многочленов с постоянными и периодическими коэффициентами.

Найдены искомые коэффициенты преобразования и получено решение уравнений (2) и (3):

$$u = \alpha / (e^{2\omega t} (\varepsilon \alpha + \alpha / u_0) - \varepsilon \alpha),$$

$$\varepsilon = (\alpha b / a + \beta) t - b \log \left(e^{2\omega t} (a \varepsilon u_0 + \alpha) - a \varepsilon u_0 \right) / 2a + \varepsilon_0.$$

Применение модифицированного метода многочленных преобразований.

В качестве примера рассмотрим применение модифицированного метода для уравнения Ван-дер-Поля, представленного в форме (1) $\ddot{q} + 2\alpha\dot{q} + \gamma q = \varepsilon\dot{q}^2$.

Для уравнения Ван-дер-Поля получены искомые коэффициенты:

$$a = \alpha(-8\alpha^3\gamma + 8\alpha\gamma^2 + 4\alpha^2\varepsilon h + 3\gamma^2\varepsilon h) / 4\gamma^3(2\alpha^2 - \gamma),$$

$$a_1 = \alpha(-8\alpha^3\gamma + 8\alpha\gamma^2 + 4\alpha^2\varepsilon h + 3\gamma^2\varepsilon h) / 2\gamma^2(2\alpha^2 - \gamma),$$

$$a_2 = (-16\alpha^5\gamma + 20\alpha^3\gamma^2 - 2\alpha\gamma^3 + 8\alpha^4\varepsilon h + 2\alpha^2(3\gamma - 1)\gamma\varepsilon h + \gamma^2\varepsilon h) / 2\gamma^3(\gamma - 2\alpha^2),$$

$$a_3 = (-12\alpha^4\gamma + 14\alpha^2\gamma^2 - 2\gamma^3 + 6\alpha^3\varepsilon h - \alpha\gamma(1 - 3\gamma)\varepsilon h) / 3\gamma^3(2\alpha^2 - \gamma),$$

$$a_4 = (8\alpha^3\gamma - 8\alpha\gamma^2 - 4\alpha^2\varepsilon h - 3\gamma^2\varepsilon h) / (24\alpha^2\gamma^3 - 12\gamma^4).$$

Для уравнения Ван-дер-Поля применен модифицированный метод преобразований и получены выражения для амплитуды и фазы автоколебаний в аналитическом виде:

$$\rho^2 = (\gamma^3\rho_0^2(0,5\gamma - \alpha^2)) / (\gamma^3(0,5\gamma - \alpha^2)e^{2a\tau} + \varepsilon\rho_0^2e^{a\tau}(2\alpha^3\gamma + 0,75\alpha^2\varepsilon - 2\alpha\gamma^2 + 0,5625\gamma^2\varepsilon)\sinh(a\tau)),$$

$$\theta = (\alpha b / a + \beta)t - b \log(a\varepsilon\rho_0^2(e^{2a\tau} - 1) + \alpha e^{2a\tau}) / 2a + \theta_0.$$

При значениях параметров $\varepsilon = 0,6$, $\alpha = -0,3$, $\gamma = 1$ для уравнения Ван-дер-Поля найдены значения амплитуды и фазы колебаний:

$$\rho^2 = \frac{3,90625}{1 - 0,0234375e^{-0,6\tau}}, \quad \theta = 0,1765t + \theta_0.$$

Выполнено сравнение решения уравнения Ван-дер-Поля, найденного модифицированным методом с точным решением численным методом Рунге-Кутты.

Для уравнения Ван-дер-Поля легко получить оценку погрешности, например, для амплитуды погрешность составляет 1,1788%:

$$\delta = \frac{2 - \sqrt{3,90625}}{2} \times 100\% = 1,1788\%.$$

Погрешность решения модифицированным методом составляет 1%, что показывает применимость предложенного метода для исследования автоколебаний нелинейных механических систем. Оценка погрешности обычного метода многочленных преобразований составляет 2%, что показывает целесообразность модификации метода с применением экономизации Чебышева.

Заключение

В работе рассматривается математическая модель динамической системы с одной степенью свободы, представленная в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными частями в форме многочленов с постоянными и периодическими коэффициентами. В работе представлен модифицированный метод для исследования автоколебаний нелинейных механических систем. Авторами разработан уточненный метод преобразования и интегрирования уравнения, основанный на методе нормализации Пуанкаре-Дюлака. Уточнение метода заключается в учете нелинейных членов высших порядков методом экономизации Чебышева. Выполняется аппроксимация остаточных членов высших порядков однородными формами меньших порядков, в рассмотренном случае – кубическими формами. В качестве примера рассмотрено применение модифицированного метода для уравнения Ван-дер-Поля и получены выражения для амплитуды и фазы автоколебаний в аналитическом виде. Выполнено сравнение решения уравнения Ван-дер-Поля, найденного разработанным методом, с точным решением численным методом Рунге-Кутты. Погрешность решения модифицированным методом составляет 1%, что показывает применимость разработанного метода для исследования автоколебаний нелинейных динамических систем с постоянными и периодическими параметрами.

Литература

1. Blanchard P., Devaney R.L., Hall G.R. Differential Equations. 2nd ed. Brooks Cole, 2011. 864 p.
2. Warminski J., Lenci S., Cartmell M.P., Rega G., Wiercigroch M. Nonlinear Dynamic Phenomena in Mechanics. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 276 p.
3. Teschl G. Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems. American Mathematical Society, 2012. V. 140. 356 p.
4. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. СПб.: Лань, 2010. 400 с.

5. Gesztesy F., Holden H., Michor J., Gerald T. Soliton Equations and their Algebraic-Geometric Solutions. Cambridge University Press, 2008. V. 2. 438 p.
6. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 198 с.
7. Иванов С.Е., Мельников Г.И. Автономизация нелинейных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 151–156.
8. Бибииков Ю.Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений. СПб.: Лань, 2011. 304 с.
9. Melnikov V.G. Chebyshev economization in transformations of nonlinear systems with polynomial structure // Proc. 14th WSEAS Int. Conf. on Systems. Corfu Island, Greece, 2010. V. 1. P. 301–303.
10. Мельников В.Г. Многочленные преобразования нелинейных систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 5. С. 20–25.
11. Мельников В.Г., Мельников Г.И., Иванов С.Е. Компьютерные технологии в механике приборных систем: Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 127 с.
12. Иванов С.Е. Алгоритмическая реализация метода исследования нелинейных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 90–92.
13. Мельников В.Г. Преобразование динамических многочленных систем с применением аппроксимации Чебышева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 85–90.
14. Melnikov V.G. Chebyshev economization in Poincare-Dulac transformations of nonlinear systems // Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications. 2005. V. 63. N 5–7. P. e1351–e1355. doi: 10.1016/j.na.2005.01.080

<i>Мельников Геннадий Иванович</i>	– доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, melnikov@mail.ifmo.ru
<i>Иванов Сергей Евгеньевич</i>	– кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sivanov@mail.ifmo.ru
<i>Мельников Виталий Геннадьевич</i>	– доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, melnikov@mail.ifmo.ru
<i>Малых Константин Сергеевич</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, malykh-konstantin@yandex.ru
<i>Gennady I. Melnikov</i>	– D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, melnikov@mail.ifmo.ru
<i>Sergei E. Ivanov</i>	– PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sivanov@mail.ifmo.ru
<i>Vitaly G. Melnikov</i>	– D.Sc., Associate professor, Head of Department, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, melnikov@mail.ifmo.ru
<i>Konstantin S. Malykh</i>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation, 197101, malykh-konstantin@yandex.ru

УДК 007:681.512.2

СЕРВИСЫ ПОЛНОТЕКСТОВОГО ПОИСКА В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ (ПРОЕКТ HUMANITARIANA)

С.Х. Ляпин^{a,b}, А.В. Куковьякин^b, И.А. Мбого^a, И.И. Толстикова^a, А.В. Чугунов^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «Константа», Архангельск, 163045, Российская Федерация

Адрес для переписки: lyapins@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.10.14, принята к печати 20.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-155-162

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ляпин С.Х., Куковьякин А.В., Мбого И.А., Толстикова И.И., Чугунов А.В. Сервисы полнотекстового поиска в распределенной информационной среде (проект Humanitariana) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 155–162

Аннотация

Постановка проблемы. Обосновывается возможность использования сервисов полнотекстового поиска как в универсальных, так и специализированных (по ресурсной базе) электронных библиотеках для извлечения и анализа контекстного знания в гуманитарных дисциплинах. В этой связи описываются архитектура и сервисы виртуального информационно-ресурсного центра для извлечения знаний из гуманитарных текстов, создаваемого в рамках проекта «Humanitariana». Рассматривается функциональная интеграция ресурсов и сервисов полнотекстового поиска в распределенной децентрализованной среде, организованной в архитектуре Интернет/Интранет под управлением клиентского (пользовательского) браузера, обращающегося к множеству независимых серверов. Описан алгоритм осуществления распределенного полнотекстового запроса.

Методы. Используется методика сочетания частотно-ранжированных и абзацно-ориентированных полнотекстовых запросов: первые используются для предварительного анализа предметной области произведения или их совокупности (экспликация «вертикального» контекста, или макроконтекста), вторые – для экспликации «горизонтального» контекста, или микроконтекста в рамках авторского абзаца. При этом результаты частотно-ранжированных запросов используются для составления абзацно-ориентированных запросов.

Результаты. Приведены результаты текстологических исследований по темам: «проблема факта в русской философии», «проблема одиночества в русской философии и культуре». По совокупной ресурсной базе объемом около 2500 полнотекстовых ресурсов по каждой из тем эксплицировано и кратко описано около 50 фрагментов контекстного знания с целью дальнейшего его экспертного изучения.

Практическая значимость. Предлагаемая технология (сервисы продвинутого полнотекстового поиска в распределенной информационной среде) может быть использована для информационной поддержки гуманитарных исследований и гуманитарного образования, для функциональной интеграции ресурсов и сервисов различных организаций, для проведения междисциплинарных исследований.

Ключевые слова: полнотекстовый поиск, экспликация контекстного знания, «горизонтальный» контекст, «вертикальный» контекст, функциональная интеграция ресурсов, децентрализованная распределенная среда, metasearch engine.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского гуманитарного научного фонда (грант РГНФ № 14-03-12017). Выражаем благодарность Университету ИТМО (Санкт-Петербург) за возможность использования своей информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, а также ООО «Константа» (Архангельск) за предоставление специализированного прикладного программного обеспечения – многофункциональной информационной системы T-Libra с сервисами продвинутого полнотекстового поиска.

SERVICES OF FULL-TEXT SEARCHING IN A DISTRIBUTED INFORMATION ENVIRONMENT (PROJECT HUMANITARIANA)

S. Kh. Lyapin^{a,b}, A.V. Kukovyakin^b, I.A. Mbogo^a, I.I. Tolstikova^a, A.V. Chugunov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b "Constanta" Ltd., Arkhangelsk, 163045, Russian Federation

Corresponding author: lyapins@yandex.ru

Article info

Received 15.10.14, accepted 20.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-155-162

Article in Russian

Reference for citation: Lyapin S.Kh., Kukovyakin A.V., Mbogo I.A., Tolstikova I.I., Chugunov A.V. Services of full-text searching in a distributed information environment (project Humanitarian). *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 155–162 (in Russian)

Abstract.

Problem statement. We justify the possibility of full-text search services application in both universal and specialized (in terms of resource base) digital libraries for the extraction and analysis of the context knowledge in the humanities. The architecture and services of virtual information and resource center for extracting knowledge from the humanitarian texts generated by «Humanitarian» project are described. The functional integration of the resources and services for a full-text search in a distributed decentralized environment, organized in the Internet / Intranet architecture under the control of the client (user) browser accessing a variety of independent servers. An algorithm for a distributed full-text query implementation is described.

Methods. Method of combining frequency-ranked and paragraph-oriented full-text queries is used: the first are used for the preliminary analysis of the subject area or a combination product (explication of "vertical" context, or macro context), the second - for the explication of "horizontal" context, or micro context within copyright paragraph. The results of the frequency-ranked queries are used to compile paragraph-oriented queries.

Results. The results of textual research are shown on the topics "The question of fact in Russian philosophy", "The question of loneliness in Russian philosophy and culture". About 50 pieces of context knowledge on the total resource base of about 2,500 full-text resources have been explicated and briefly described to their further expert investigating.

Practical significance. The proposed technology (advanced full-text searching services in a distributed information environment) can be used for the information support of humanitarian studies and education in the humanities, for functional integration of resources and services of various organizations, for carrying out interdisciplinary research.

Keywords: full-text searching, contextual knowledge explication, "horizontal" context, "vertical" context, functional integration of resources, decentralized distributed environment, metasearch engine.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Humanitarian Science Foundation grant (RHF grant #14-03-12017). We express our gratitude to ITMO University (Saint Petersburg) for the opportunity to use their information and telecommunication infrastructure, as well as to "Constanta", Ltd. (Arkhangelsk) for the provision of application-specific software - Multi-functional Information System T-Libra with advanced full-text search services.

Введение. Полнотекстовый поиск и распределенная среда

Поисковые технологии применительно к текстовым ресурсам используются достаточно давно и в широком диапазоне. При этом до сих пор весьма распространены подходы, при которых прямой и непосредственный пользовательский поиск по полнотекстовым массивам универсальных электронных библиотек является скорее исключением, чем правилом.

Так, библиотекарями активно разрабатывается инструментарий «внешней» (по отношению к содержанию самого полнотекстового ресурса) поддержки осуществления полнотекстового поиска для повышения его эффективности (расширение библиографического описания ресурса, транзакционные ссылки, инструкции по поиску в базах данных и т.п.) [1]. Или, с другой стороны, создаются специализированные программные средства для изучения конкретных полнотекстовых ресурсов – например, философского наследия Людвиг Витгенштейна в формате XML-базы данных. При этом используются основанные на правилах (rule-based) поисковые технологии, совместно с локальной грамматикой, в комбинации с электронным словарем и различными компьютерными средствами для включения лемматизации, поддержки семантических и синтаксических запросов к тексту [2].

Вместе с тем важной тенденцией развития современной информационной среды является непосредственное использование сервисов полнотекстового поиска не только в специализированных информационных системах, но и в универсальных электронных библиотеках: переход от поиска по каталогу (с последующей презентацией найденных ресурсов в виде файлов) к предоставлению пользователю продвинутых поисковых сервисов по полнотекстовым и комбинированным ресурсам. Эта тенденция отмечается исследователями и разработчиками для очень широкого диапазона решаемых задач: от разработки онтологий информационных систем «электронного правительства» [3, 4] и создания коллекций электронных документов по этой тематике [5] до использования сервисов полнотекстового поиска для увеличения цитируемости работ [6] или для поддержки аналитической, образовательной и исследовательской деятельности [7–9].

Другой тенденцией, дополняющей и усиливающей первую, является создание распределенных информационных систем – в весьма широком диапазоне понимания «распределенности», – обладающих в том числе функционалом сквозного, транспарентного для пользователя, полнотекстового поиска [10].

Распределенная среда, создаваемая в той или иной архитектуре, позволяеткратно увеличить количество доступных пользователю ресурсов.

Целью работы является обоснование возможности использования сервисов полнотекстового поиска как в универсальных, так и в специализированных (по ресурсной базе) электронных библиотеках для извлечения и анализа контекстного знания в гуманитарных дисциплинах для информационной поддержки гуманитарных исследований и гуманитарного образования, а также функциональной интеграции ресурсов и сервисов различных организаций для проведения междисциплинарных исследований.

Проект «Humanitarian»

В рамках проекта, рассчитанного на 2014–2016 г.г., создается виртуальный информационно-ресурсный центр для извлечения знаний из гуманитарных текстов и интеграции ресурсов и сервисов в распределенной среде, функционально объединяющей несколько удаленных серверов. Организация «взаимодействия» между этими серверами осуществляется по методологии и технологии Metasearch engine [11], где в качестве машины метапоиска используется функционал пользовательского браузера, обращающегося к множеству независимых и напрямую не связанных между собою серверов.

Для целей проекта производится адаптация функций универсальной электронной библиотеки на основе информационной системы (ИС) T-Libra [12], обладающей возможностями продвинутого полнотекстового поиска и различными формами презентации полученных результатов. Такие технологии позволяют эксплицировать как «горизонтальные» микроконтексты (в пределах авторского абзаца), так и «вертикальные» макроконтексты (в пределах целого документа или совокупности документов), производить тем самым содержательное структурирование предметной области произвольной совокупности документов.

В проекте реализуется также возможность распределенного полнотекстового поиска, функционально объединяющего ресурсы нескольких аналогичных (созданных на базе ИС T-Libra) электронных библиотек. В рамках проекта разрабатывается типология задач автоматизированного извлечения контекстного знания из гуманитарных текстов, создаются методики составления запросов разного типа и вида для типовых задач извлечения знаний, некоторые из них будут реализованы в технологиях запроса в ходе реализации проекта.

На первом этапе (2014 г.) создается экспериментальная информационная среда с вышеназванными возможностями и совокупной ресурсной базой в 1000 русскоязычных гуманитарных текстов (предметные области: философия, история, культурология). Разрабатывается и описывается методология осуществления запросов, ориентированных на экспликацию различных смысловых контекстов и на тематизацию материала. На следующих этапах проекта (2015–2016 г.г.) будет обеспечено дальнейшее развитие интеллектуальных возможностей поиска:

- расширение возможностей полнотекстового поиска в распределенной среде (реализованы частотно-ранжированные и гибридные запросы);
- масштабирование проекта: расширение числа организаций-участников центра, обладающих аналогичными технологиями (до 7–8 организаций сферы образования, науки и культуры) и увеличение доступной совокупной ресурсной базы (до 10 тысяч полнотекстовых ресурсов), по которой будет реализован распределенный полнотекстовый поиск с открытым доступом из Интернет.

В результате выполнения проекта будет впервые создана новая высокотехнологичная научная инфраструктура с открытым доступом из сети Интернет, сервисы которой обеспечат извлечение контекстных знаний из текстов гуманитарной направленности (философия, культурология, история). Функционирование ресурсного центра может осуществляться как в режиме локальной сети в каждой из организаций-участников (технология клиент-сервер), так и в распределенной информационной среде (децентрализованная архитектура в среде Интернет, пользовательский запрос ко всем ресурсам с любого из серверов, либо с сервера-координатора, выбранного участниками проекта).

Архитектура информационной системы и базовые сервисы полнотекстового поиска

Архитектура. Используемая в проекте ИС T-Libra функционирует в клиент-серверной Интернет/Интранет архитектуре. На стороне пользователя предполагается лишь наличие Интернет-браузера и стандартных прикладных программ по работе с файловыми ресурсами. На стороне сервера – операционная система Windows, СУБД MySQL, Веб-сервер Apache, сервер приложения. Вся бизнес-логика вынесена в сервер приложения. В настоящее время на серверах участников проекта используются Linux-сервера с развернутой на них виртуальной машиной Windows. В дальнейшем планируется переход на чистую Linux-версию ИС T-Libra.

Сервисы полнотекстового поиска. В используемой нами версии электронной библиотеки имеются следующие типы полнотекстового поиска:

- абзацно-ориентированный;
- частотно-ориентированный.

При этом абзацно-ориентированный поиск представлен разновидностями работы как в локальной, так и в распределенной среде.

Абзацно-ориентированный поиск предназначен для поиска и презентации текста с точностью до отдельных авторских абзацев, содержащих заданную пользователем терминологическую структуру (тем самым эксплицируется «горизонтальный» микроконтекст, в котором в составе абзаца находятся искомые термины). Авторский абзац выбран в качестве естественной единицы смыслового членения текста. Обеспечивается поддержка нескольких видов и различных форм презентации результатов этого поиска.

- **Простой («однослойный») тематический поиск**, с одним комплексным полем для ввода терминов и использованием для этих терминов операторов логического объединения, обязательного исключения или обязательного включения термина в запрос. Результатом поиска является список абзацев, удовлетворяющих заданным условиям.

Каждый из абзацев, входящих в результаты запроса, может быть одним «кликом» мышки раскрыт до своего полного вида. Используя опцию «Контекст» в левом меню, можно последовательно раскрыть абзацы до и после найденного – вплоть до кластера из семи абзацев (три абзаца «до», три абзаца «после», плюс сам абзац – результат запроса).

Имеется возможность посмотреть с этой же экранной страницы соответствующий ресурс (статью, книгу и т.д.) в файловом виде; ресурс при этом может быть представлен в различных формах – текстового документа, графического образа документа (важно для архивных ресурсов), сопровождающего документ аудио- или видеофайла (важно для организации электронных выставок и коллекций).

Имеется также возможность оценки пользователем найденных абзацев и автоматизированной сборки выбранных абзацев с помощью опции «Собрать тему». В результате пользователь получает файл, в котором собраны тематически ориентированные абзацы из различных документов электронной библиотеки и указаны ресурсы (вместе с их библиографическими описаниями), откуда взяты эти абзацы.

- **Расширенный («многослойный») тематический поиск**. Этот вид поиска содержит функционал дополнительной тематической фокусировки запроса. Соответствующий инструментарий включает в себя:

- формирование нескольких поисковых полей («слоев»);
- включение в запрос дополнительных количественных параметров его фокусировки.

Поисковое поле «слои» представляет собой технический инструмент для выделения того или иного содержательного «аспекта» интересующей пользователя «темы»; всего может быть сформировано от 2 до 8 слоев. Например, в первом слое вводим термин «факт», во втором – термин «разум», в третьем – термин «истина». Тем самым в структуре запроса тематика «факта» специализирована (аспектуализирована) в связи с «истиной» и «разумом».

Между слоями действует операция логического пересечения; внутри слоя – операция логического объединения заданных терминов. Имеется возможность комбинировать актуально используемые слои, например, из трех слоев сделать какие-либо два обязательными, а один – произвольным при осуществлении запроса.

Еще более точная тематическая фокусировка запроса достигается за счет выполнения дополнительных условий:

- указания минимально необходимого количества поисковых слоев (от 2 до 8);
- указания максимального расстояния между терминами, принадлежащими разным слоям: от 0, когда слова из двух разных слоев запроса в составе абзаца примыкают друг к другу (например, «факт истории» и т.д.), до произвольной величины.

В рамках распределенной информационной среды в настоящее время реализованы абзацно-ориентированные запросы, наиболее востребованные для тематической обработки документов.

Примеры экспликации контекстного знания с помощью сервисов полнотекстового поиска.

Развивая идею о сервисах полнотекстового поиска для поддержки гуманитарных исследований, на протяжении нескольких последних лет некоторыми из авторов настоящей работы в рамках различных мероприятий были осуществлены предварительные тематические исследования, в частности, по таким крупным темам, как «Проблема факта в русской философии», «Проблема одиночества в русской философии и литературе», «Проблема человека в русской философии и культуре». Эти и аналогичные исследования будут существенно расширены – как по привлекаемой ресурсной базе, так и по изучаемым темам, их аспектам и используемым сервисам – в рамках проекта «Humanitarianiana».

Для экспликации вышеназванных концептов применялась методика сочетания частотно-ориентированных запросов с абзацно-ориентированными. Для этого вначале строились соответствующие частотно-ранжированные списки терминов (существительных) – «терминограммы» – относительно исследуемых терминов (соответственно: «факт», одиночество», «человек»). При этом на заданную глубину (как правило, в 10 слов) средствами относительного частотного поиска автоматически создавались таблицы частотной встречаемости терминов по выбранной совокупности ресурсов. В итоге мы получали экспликацию предметной области, коррелирующей с исследуемыми терминами/концептами (соответственно: «факт», одиночество», «человек») – т.е. экспликацию «вертикального контекста». Затем термины из этих таблиц включались в абзацно-ориентированные запросы, что позволяло эксплицировать микроконтекст («горизонтальный контекст») употребления этих терминов в рамках авторского абзаца.

Экспликация концепта фактуальности в философии Н.А. Бердяева. С помощью относительного частотного поиска (относительно термина «факт») можно предварительно выявить предметную

область (смысловой макроконтекст), в котором существует концепт «факт» в философских текстах Н.А. Бердяева в целом или в тексте отдельного произведения [13]. В частности, для исследуемых работ Бердяева, содержащих термин «факт» (24 произведения), в смысловую окрестность «факта» попадают (т.е. встречаются в абзацах, где обязательно имеется и термин «факт»), в порядке убывания частотности, следующие термины: 1. «жизнь» (850 раз), 2. «мир» (811 раз), 3. «человек» (788 раз), 4. «дух» (484 раза), 5. «Бог» (483 раза), 6. «сознание» (401 раз), 7. «свобода» (377 раз), 8. «факт» (366 раз), 9. «философия» (324 раза), 10. «история» (311 раз).

Опираясь на эти результаты, эксплицирующие предметную область фактуальности в работах Н.А. Бердяева, можно далее с помощью абзацно-ориентированного поиска осуществить экспликацию горизонтальных микроконтекстов (в пределах авторского абзаца), коррелирующих с концептом «факт».

Можно использовать многослойный (например, трехслойный) запрос: в один слой ввести термин «факт», в два других – термины из бердяевской терминограммы (например, «мир» и «человек»), выбрать дополнительные параметры фокусировки запроса (все 3 слоя актуальны, расстояние между терминами не более 8 слов) и получить результат – 7 абзацев в 4 произведениях (поиск произведен по массиву из 64 текстов Бердяева) (рис. 1).

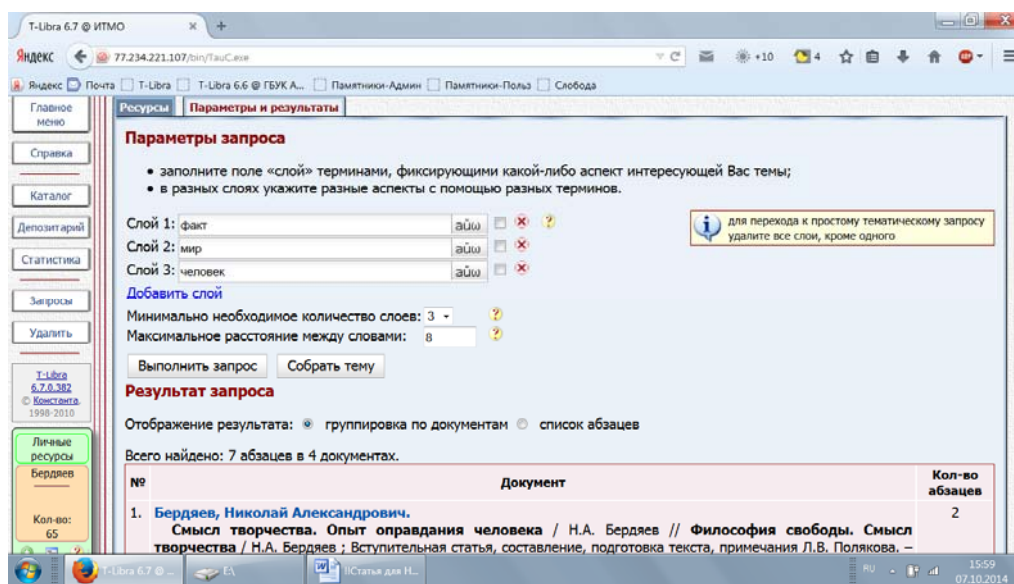


Рис. 1. Многослойный (трехслойный) запрос с терминами [«факт», «мир», «человек»] по массиву текстов Н.А. Бердяева

Экспертная оценка этого и других найденных абзацев говорит о высокой степени релевантности результатов таким образом организованного полнотекстового запроса. Эксплицируются микроконтексты концепта фактуальности, связанные с такими аспектами темы: «гуманизм и факт рабства человека у природного мира»; «факт самосознания человека и трансцендентность сознания»; и т.д.

Выбирая другие термины из терминограмм Бердяева (например, «факт» + «сознание» + «свобода»; или «факт» + «философия» + «история» и т.д.), включая их в абзацно-ориентированные запросы и варьируя условия их фокусировки, можно эксплицировать самые разные семантические микроконтексты в рамках разработки темы «Проблема факта в философии Бердяева».

С соответствующими изменениями сказанное относится к другим авторам – например, терминограммам Лосева и Канта и соответствующим абзацно-ориентированным запросам по их произведениям. Все это дает, в свою очередь, текстологический материал для гносеологической компаративистики.

Полнотекстовый поиск в децентрализованной распределенной среде, управляемой пользовательским браузером

При выборе модели организации распределенной среды для сервисов полнотекстового поиска мы ориентировались на Веб-сервисы и Интернет-протоколы. Это связано как с архитектурой ИС T-Libra (клиент-серверная архитектура, в которой в качестве клиента выступает Веб-браузер), так и с очевидной необходимостью учитывать тенденции развития современного информационного пространства.

В этой связи была выбрана модель децентрализованной среды под управлением пользовательского браузера, обращающегося к множеству независимых серверов, находящихся в ведении различных организаций. Этот подход вполне укладывается в парадигму распределенных информационных систем [14], достаточен для наших целей и позволяет не рассматривать более сложные варианты построения

распределенных систем, связанные, например, с взаимодействием унифицированного протокола Z39.50 [15] с Интернет-протоколами [16] (рис. 2).

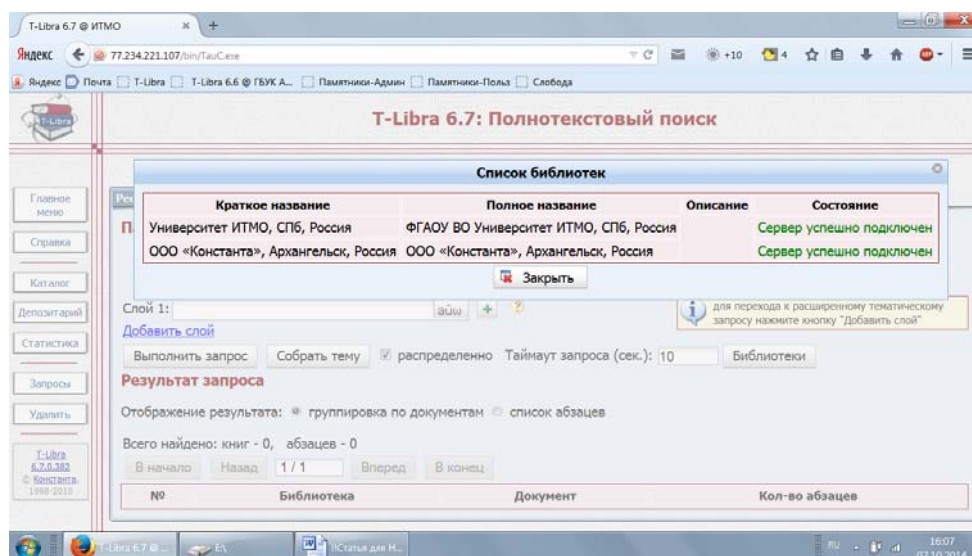


Рис. 2. Сформирован распределенный полнотекстовый запрос

С базового сервера (Университет ИТМО) сформирован распределенный полнотекстовый запрос, на который откликнулся также сервер другого участника проекта – ООО «Константа». Это показано на соответствующей странице во всплывающем окне.

Наш подход может быть рассмотрен как вариант Metasearch engine. Инструментом машины мета-поиска является в этом случае пользовательский браузер. Прямого взаимодействия серверов при этом не требуется.

Алгоритм организации распределенного запроса

Замечание. «Базовый» сервер – это сервер, который сформировал страницу, на которой пользователь нажал кнопку «Создать распределенный запрос». Базовым он является функционально, т.е. для этого конкретного запроса. Практически это тот сервер, с которым пользователь начал работу в одной из библиотек, включенных в распределенную среду.

1. клиентская часть ИС T-Libra (функционирующая в браузере пользователя), работающая с каким-либо сервером T-Libra («базовый» сервер), получает от базового сервера список адресов других серверов, которые будут участвовать в полнотекстовом запросе (этот список ведется администратором базового сервера T-Libra).
2. после заполнения формы полнотекстового запроса пользователь инициирует выполнение запроса (кнопкой «Выполнить запрос»).
3. браузер рассылает http-запросы (на выполнение полнотекстового запроса) на базовый сервер и прочие, перечисленные в списке.
4. каждый сервер выполняет запрос, формирует результат и отправляет в клиентскую часть 10 лучших ответов и общий размер результата.
5. из полученных частичных «топ 10» (от каждого сервера) клиентская часть гарантированно строит и отображает пользователю «топ 10» ответа в целом (первая страница результата) и суммарный размер результата.
6. в ожидании реакции пользователя клиентская часть рассылает http-запросы (на пересылку остатков результата) на все серверы, участвующие в выполнении запроса.
7. клиентская часть принимает ответы от них, объединяя частичные результаты и позволяя пользователю просмотреть следующих страниц результата распределенного полнотекстового запроса.

Заключение. Развитие проекта «Humanitarian»

Развитие ресурсно-сервисной среды, создаваемой в рамках проекта «Humanitarian», предполагается в нескольких взаимно дополняющих друг друга направлениях:

- обеспечение многоплатформенности (адаптация для операционной системы семейства Linux в серверной части информационной системы);
- развитие интеллектуальности поиска (многопараметрическая кластеризация результатов запроса, разработка и использование тезаурусов в полнотекстовом поиске, разработка и реализация каскадных и

- гибридных запросов, семантический анализ и концептуальное моделирование текста, внедрение технологий программных агентов и мультиагентных систем);
- масштабирование распределенной среды: функциональная интеграция со специализированными информационными системами (с полнотекстовой электронной библиотекой, с распределенными информационными системами, обладающими соответствующим функционалом, с веб-сайтами с материалами научных конференций).

Литература

1. Fagan J.C. The effects of reference, instruction, database searches, and ongoing expenditures on full-text article requests: an exploratory analysis // *Journal of Academic Librarianship*. 2014. V. 40. N 3–4. P. 264–274. doi: 10.1016/j.acalib.2014.04.002
2. Hadersbeck M., Pichler A., Fink F., Gjesdal Ø.L. Wittgenstein's nachlass: WiTTFind and wittgenstein advanced search tools (WAST) // *Proc. 1st Int. Conf. on Digital Access to Textual Cultural Heritage, DATeCH 2014*. Madrid, Spain, 2014. P. 91–96. doi: 10.1145/2595188.2595202
3. Юдина Т.Н., Богомолова А.В. УИС РОССИЯ: онтология предметной области «государственное управление» // *Труды XIV Всероссийской конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2011)*. Санкт-Петербург, Россия, 2011. С. 225–230.
4. Heeks R., Santos R. Understanding Adoption of e-Government: Principals, Agents and Institutional Dualism [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.sed.manchester.ac.uk/idpm/research/publications/wp/igovernment/igov_wp19.htm. Яз. англ. (дата обращения 30.11.2014).
5. Мбого И.А., Чугунов А.В. Электронная коллекция «Электронное государство»: технологические аспекты // *Труды XV Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество»*. Санкт-Петербург, 2012. С. 345–347.
6. Ляпин С.Х., Куковякин А.В. Сервисы полнотекстового поиска как инструмент повышения цитируемости научных работ и рейтинга ВУЗа // *Труды XX Всероссийской научно-методической конференции Телематика'2013*. Санкт-Петербург, 2013. Т. 1. С. 15–17.
7. Ляпин С.Х. Электронная полнотекстовая библиотека для поддержки социогуманитарных исследований // *Труды XX Всероссийской научно-методической конференции Телематика'2013*. Санкт-Петербург, 2013. Т. 2. С. 317–318.
8. Ляпин С.Х. Сервисы электронной полнотекстовой библиотеки для образования, науки и культуры // *Научная периодика: проблемы и решения*. 2013. № 2(14). С. 9–17.
9. Ляпин С.Х., Куковякин А.В. Электронная полнотекстовая библиотека для поддержки аналитической и исследовательской деятельности // *Труды XVI Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2013)*. Санкт-Петербург, 2013. С. 163–170.
10. Ляпин С.Х. Как пройти в распределенную библиотеку? // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Гуманитарные науки. 2012. № 7–8. С. 17–21.
11. Metasearch Engine [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Metasearch_engine, свободный. Яз англ. (дата обращения 30.11.2014).
12. T-Libra 6.7 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://demo.tlibra.ru> (дата обращения 30.11.2014).
13. Ляпин С.Х. Тексты, контексты, концепты: использование современных систем полнотекстового поиска для философских исследований (на материале русской философии) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.losev-library.ru/index.php?pid=6872>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.11.2014).
14. Таненбаум Э., ван Стеен М. *Распределенные системы. Принципы и парадигмы*. СПб.: Питер, 2003. 877 с.
15. Жижимов О.Л., Мазов Н.А. Модель распределенной информационной системы Сибирского отделения РАН на базе протокола Z39.50 // *Электронные библиотеки*. 1999. Т. 2. № 2. С. 12.
16. Максимов Н.В., Сысойкина М.А. О реализации электронной библиотеки с использованием протоколов HTTP и Z39.50 // *Электронные библиотеки*. 2002. Т. 5. № 1. С. 4.

Ляпин Сергей Хамзеевич

– кандидат философских наук, доцент, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; генеральный директор, ООО «Константа», Архангельск, 163045, Российская Федерация, lyarins@yandex.ru

Куковякин Алексей Валентинович

– заместитель генерального директора, ООО «Константа», Архангельск, 163045, Российская Федерация, magicmagus@yandex.ru

Мбого Ирина Анатольевна

– программист, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, irina.mbogo@gmail.com

Толстикова Ирина Ивановна

– кандидат философских наук, доцент, зав. кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, tolstikova_irina@mail.ru

- Чугунов Андрей Владимирович** – кандидат политических наук, доцент, директор Центра, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, chugunov@egov-center.ru
- Sergei Kh. Lyapin** – PhD, Associate professor, scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; CEO, "Constanta" Ltd., Arkhangelsk, 163045, Russian Federation, lyapins@yandex.ru
- Alexei V. Kukovyakin** – Deputy director, "Constanta" Ltd., Arkhangelsk, 163045, Russian Federation, magicmagus@yandex.ru
- Irina A. Mbogo** – programmer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, irina.mbogo@gmail.com
- Irina I. Tolstikova** – PhD, Associate professor, Department Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, tolstikova_irina@mail.ru
- Andrei V. Chugunov** – PhD, Associate professor, Director of the eGovernment Center, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, chugunov@egov-center.ru

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN DEGREE OF BLOOD OXYGENATION AND BACKSCATTERED RADIATION WITH THE USE OF NUMERICAL MODELING

O.D. Kozyreva^a, A.E. Pushkareva^a, E.V. Shalobaev^a, I. Biro^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Szeged University, Mezotur, 6720, Hungary

Corresponding author: Kozyreva.o@list.ru

Article info

Received 02.06.2014, accepted 02.12.2014

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-163-165

Article in English

Reference for citation: Kozyreva O.D., Pushkareva A.E., Shalobaev E.V., Biro I. Analysis of blood oxygenation level effect on backscattered radiation signal by means of numerical modeling. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 163–165 (in English)

Abstract. A key role in measuring the level of blood oxygenation is played by a dependence of the signal being measured on the wavelength at which measurements are performed. This paper presents a study of the blood oxygenation effect on the signal of diffusely scattered radiation in the range of 590-860 nm wavelengths. On the basis of previous studies the spectral characteristic of backscattered signal for different levels of blood oxygenation was obtained by the Monte Carlo modeling. In this model photon is characterized by coordinates and weight. The size, step and direction of photon motion from the initial point are determined at each step and specified by means of the random number generator. At each step the photon loses some weight due to absorption. Reducing of the photon weight is also taken into consideration as a result of Fresnel reflection and total internal reflection at two media borderland (the air and blood). The optimal wavelengths range for application in oximeters for sufficiently accurate non-contact measurements of blood oxygenation level by detecting scattered radiation is 650-750 nm. The adequacy of suggested model has been tested by comparing calculated characteristic with experimental results obtained by means of double integral sphere. The highest relative backscattered signal (0.17-0.21) is recorded at 700 nm.

Keywords: oxygenation, blood, modeling, Monte Carlo method.

УДК 004.942, 001.891.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ОКСИГЕНАЦИИ КРОВИ НА СИГНАЛ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.Д. Козырева^a, А.Е. Пушкарева^a, Е.В. Шалобаев^a, И. Биро^b

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Университет Сегеда, Мезегур, 6720, Венгрия

Адрес для переписки: Kozyreva.o@list.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.06.2014, принята к печати 02.12.2014

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-163-165

Язык статьи – английский

Ссылка для цитирования: Козырева О.Д., Пушкарева А.Е., Шалобаев Е.В., Биро И. Исследование влияния степени оксигенации крови на сигнал обратного рассеяния излучения при помощи численного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 163–165

Аннотация. Ключевую роль в измерении степени оксигенации крови играет зависимость измеряемого сигнала от длины волны, на которой проводятся измерения. В данной работе приводится исследование зависимости сигнала диффузно рассеянного излучения от степени насыщения крови кислородом в диапазоне длин волн 590–860 нм. На основе ранее проведенных исследований с использованием метода Монте-Карло получена спектральная характеристика обратно рассеянного сигнала для разных степеней оксигенации крови. В такой модели фотон характеризуется координатами и весом. Размер, шаг и направление движения фотона из исходной точки определяются на каждом шаге и задаются при помощи случайных чисел. На каждом шаге фотон теряет часть веса вследствие поглощения. Также учтено ослабление веса фотона за счет отражения Френеля и эффекта полного внутреннего отражения на границе пересечения двух сред (воздух и кровь). Показано, что оптимальный диапазон длин волн, который может использоваться в оксиметрах для точного неконтактного измерения степени оксигенации крови с использованием эффекта обратного рассеянного излучения, составляет 650–750 нм. Адекватность предлагаемой модели проверена путем сравнения расчетной зависимости с экспериментальными результатами, полученными с использованием двойной интегральной сферы. Наибольший относительный сигнал обратно рассеянного излучения (0,17–0,21) регистрируется на длине волны 700 нм.

Ключевые слова: оксигенация, кровь, моделирование, метод Монте-Карло

Introduction in clinical practice of pulse oximeters is considered to be the most significant achievement in monitoring patient safety over the last 15 years [1–5]. These devices are used in mechatronic biotechnical systems with biofeedback [1, 2, 5, 6].

The study is conducted to identify the optimal wavelengths for non-contact measurement of the degree of blood oxygenation by detecting the scattered radiation.

For modeling the scattering of the incident radiation by blood there were given: the index of refraction [7], the anisotropy factor [8], the scattering coefficient and the absorption coefficient of whole blood on the wavelength [9]. The calculation was performed using numerical Monte Carlo method [10]. In this model, the photon is characterized by the coordinate and weight. Size, step and direction of the motion of a photon from the initial points are determined at each step and are specified using the random number generator. At each step, the photon loses some weight as a result of acquisitions, also taken into account the weakening of the photon weight by the Fresnel reflection and total internal reflection at the intersection of the two mediums (air and blood). The intensity of the backscattered signal (I) composed of the total weight of the photons emerged from the medium through the upper boundary and the fraction of the photons weights incident on medium obtained due to reflection from the surface:

$$I = \frac{I_{FR} + I_{OUT}}{I_0},$$

where I_{FR} – fractions of the photons weigh, obtained by the Fresnel reflection; I_{OUT} – fraction of the photons weigh backscattered from the tissue; I_0 – total weight of the photons incident on the boundary between two mediums.

Spectral dependence (in the range of 590–860 nm) of the relative backscatter signal for various values of the oxygenation degree, shown in Fig. 1, was obtained as a result of calculations. As can be seen from the graph, the influence of the degree of oxygenation can be reduced if the measuring wavelength is near the isobestic point at 805 nm.

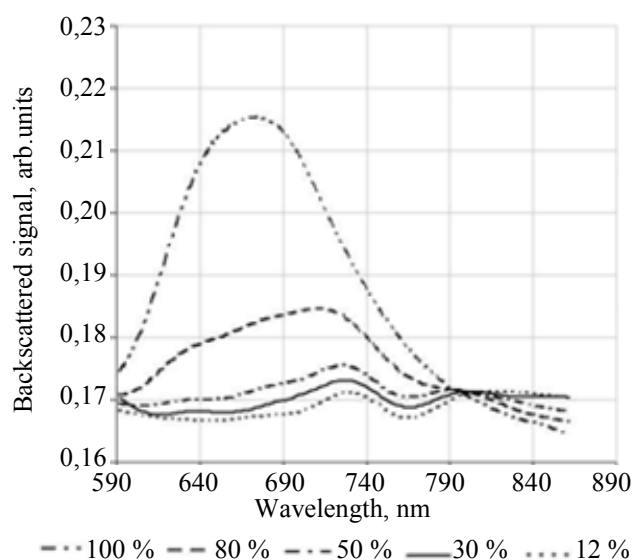


Fig. 1. Influence of the oxygenation of the blood samples on the remission signal, obtained by modeling

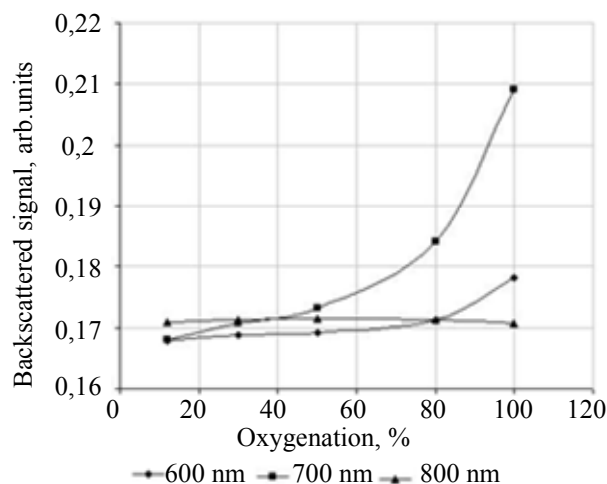


Fig. 2. Influence of the oxygenation of the blood samples on the backscattered signal

For assessing the adequacy of the model the resulting graph was compared with the graph obtained experimentally using the double Ulbricht sphere arrangement [11]. Also, we obtained the influence of the oxygenation of the blood samples on the backscattered signal at wavelengths 600 nm, 700 nm and 800 nm, shown in Fig. 2. From Fig. 2 a high backscatter signal in the wavelength range of 600–700 nm is seen.

We can conclude that the sufficiently accurate measurements of the degree of blood oxygenation can be implemented by measuring the intensity of diffusely scattered radiation in the range wavelength of 650–750 nm, because oxygen saturation of blood in this wavelength range has the greatest influence on the backscatter signal.

Prospect for the future work is taking into account the various aspects of the blood circulation based on the principles of biomechanics and bionics [12–14], as well as the possibilities to use the results in biofeedback systems design [1, 3, 5, 6].

1. Shalobaev E.V., Yurkova G.N., Monahov Yu.S., Efimenko V.T., Efimenko A.V., Korndorf S.F., Dunaev A.V. Problems of creation of biological feedback and it's application in the medical scanning equipment // Izvestiya Orlovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Mashinostroenie. Priborostroenie. 2003. N 4. P. 92–97. (in Russian)
2. ARMED company. Available at: <http://www.armed.ru/catalog/581/2610/> (accessed 22.07.2014).
3. Dunaev A.V., Evstigneev A.R., Shalobaev E.V. Laser Therapeutic Apparatus. Oryol: OSTU Publ., 2005. 143 p. (in Russian)
4. Tuchin V.V. Opticheskaya Biomeditsinskaya Diagnostika [Optical Biomedical Diagnostic]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2006. 560 p.
5. Shalobaev E.V., Leontyeva N.V., Monahov Yu.S., Efimenko A.V., Podmasteryev K.V., Dunaev A.V. The use of biofeedback and tomography tools in laser scanning physiotherapeutic settings // Technologies of Living Systems. 2009. N 4. P. 66–72. (in Russian)
6. Shalobaev E.V., Dunaev A.V., Kozyreva O.D. Scan laser therapy with the use of biological feedbacks and mechatronic aspects design of medical devices // Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii. 2014. N 1(303). P. 101–108. (in Russian)
7. Li H., Lin L., Xie S. Refractive index of human whole blood with different types in the visible and near-infrared ranges // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2000. V. 3914. P. 517–521.
8. Berlien H.P., Muller G.J. Applied Laser Medicine. NY.: Springer, 2003. 764 p.
9. Douven L.F.A., Lucassen G.W. Retrieval of optical properties of skin from measurement and modeling the diffuse reflectance // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2000. V. 3914. P. 312–323.
10. Pushkareva A.E. Metody Matematicheskogo Modelirovaniya v Optike Biotkani [Mathematical Modeling Methods in Optics of Biological Tissue]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2008. 103 p. (in Russian)
11. Lademann J., Weigmann H.-J., Sterry W., Roggan A., Müller G., Priezzhev A.V., Firsov N.N. Investigation of the aggregation and disaggregation properties of erythrocytes by light scattering measurements // Laser Physics. 1999. V. 9. N 1. P. 357–362.
12. Brankov G. Basics of Biomechanics. Moscow: Mir Publ., 1981. 254 p.
13. Parashin V.B., Itkin G.P. Biomechanics of Blood Circulation. Moscow: Bauman MSTU Press, 2005. 224 p. (in Russian)
14. Zherebtsov E.A. Metod i ustroystvo metrologicheskogo kontrolya sostoyaniya priborov lazernoy doplerovskoy floumetrii. Avtoref. diss. [Method and device for monitoring the status of metrological laser Doppler flowmetry instruments. Ph.D. theses]. Orel: State University ESPC, 2013. 16 p.

<i>Olga D. Kozyreva</i>	— student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Kozyreva.o@list.ru
<i>Alexandra E. Pushkareva</i>	— PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alpushkareva@yandex.ru
<i>Eugeny V. Shalobaev</i>	— PhD, Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Shalobaev47@mail.ru
<i>Istvan Biro</i>	— PhD, Professor, Szeged University, Mezotur, 6720, Hungary, biro-i@mk.u-szeged.hu
<i>Козырева Ольга Дмитриевна</i>	— студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Kozyreva.o@list.ru
<i>Пушкарёва Александра Евгеньевна</i>	— кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alpushkareva@yandex.ru
<i>Шалобаев Евгений Васильевич</i>	— кандидат технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Shalobaev47@mail.ru
<i>Биро Истван</i>	— PhD, профессор, Университет Сегеда, Мезетур, 6720, Венгрия, biro-i@mk.u-szeged.hu

УДК 004.832.22;656.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ ДЛЯ РЕДУЦИРОВАНИЯ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ПУТЕЙ НА ГРАФЕ

И.А. Бессмертный^a, Ю.А. Королёва^a, Р.Т. Суринов^b

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «ИНТЕГРАВ», Москва, 125167, Российская Федерация

Адрес для переписки: igor_bessmertny@hotmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.09.14, принята к печати 10.12.14

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-1-166-168

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бессмертный И.А., Королёва Ю.А., Суринов Р.Т. Использование прецедентов для редуцирования дерева решений в задаче поиска путей на графе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 166–168

Аннотация. Рассматривается проблема организации взаиморасчетов между субъектами бизнеса с использованием клиринга, которая решается методом поиска путей на графе. Для сокращения сложности дерева решений в работе предлагается метод прецедентов, заключающийся в том, что в процессе развертывания дерева решений сохраняются промежуточные решения, которые используются при последующих операциях поиска. Приводятся алгоритм и пример, демонстрирующий сложность поиска, приближающуюся к линейной. Проведенные испытания в системе взаиморасчетов на воздушном транспорте демонстрируют сокращение объема реальных платежей приблизительно на 30%. Разработанный алгоритм предполагается внедрить также в других клиринговых организациях Российской Федерации.

Ключевые слова: поиск на графе, прецеденты, взаиморасчеты, дерево решений.

USING PRECEDENTS FOR REDUCTION OF DECISION TREE BY GRAPH SEARCH

I.A. Bessmertny^a, Yu.A. Koroleva^a, R.T. Surinov^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b "Integrav" Ltd., Moscow, 125167, Russian Federation

Corresponding author: igor_bessmertny@hotmail.com

Article info

Received 01.09.14, accepted 10.12.14

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-1-166-168

Article in Russian

Reference for citation: Bessmertny I.A., Koroleva Yu.A., Surinov R.T. Using precedents for reduction of decision tree by graph search. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 166–168 (in Russian)

Abstract. The paper considers the problem of mutual payment organization between business entities by means of clearing that is solved by search of graph paths. To reduce the decision tree complexity a method of precedents is proposed that consists in saving the intermediate solution during the moving along decision tree. An algorithm and example are presented demonstrating solution complexity coming close to a linear one. The tests carried out in civil aviation settlement system demonstrate approximately 30 percent shortage of real money transfer. The proposed algorithm is planned to be implemented also in other clearing organizations of the Russian Federation.

Keywords: graph search, precedents, settlements, decision tree.

Формальная постановка задачи взаиморасчетов представлена в [1] и заключается в следующем. Имеется конечный ориентированный граф $G = (V, E)$, состоящий из множества вершин V , которым соответствуют субъекты взаиморасчетов, и множества дуг E , устанавливающих обязательства совершить платежи. Дуга от вершины $v_i \in V$ к вершине $v_j \in V$ обозначается $e_{i,j} \in E$. Ее длина d_{ij} означает денежную сумму, которую требуется перевести от субъекта i субъекту j . Объем реальных платежей можно сократить при наличии взаимных обязательств. В самом простом случае, если существуют взаимные обязательства d_{ij} и d_{ji} , то на величину $|d_{ij} - d_{ji}|$ можно сделать взаимозачет. Более интересным является поиск длинных замкнутых цепочек платежей (контуров) k , поскольку конечной целью является сокращение общей суммы платежей:

$$\sum_{i,j} d_{ij} \rightarrow \min.$$

При этом $g = \min\{d(e) : e \in k\}$ – максимально возможная сумма взаимозачета в контуре (вес контура) – равна минимальной величине обязательства в цепочке платежей, а сумма весов всех контуров, включающих дугу e_{ij} , не может превышать d_{ij} . После того, как все контуры найдены, задача оптимизации взаимозачетов решается методами линейного программирования.

Для поиска кратчайшего пути на графе используются генетические алгоритмы [2], а также алгоритм Дейкстры [3, 4], суть которого состоит в том, что в процессе обхода графа для каждой вершины графа вычисляется длина пути к ней от исходной вершины (вес). Вначале каждой вершине присваивается бесконечно большой вес, который при нахождении пути перевычисляется и в конце работы алгоритма соответствует минимально возможному. Редуцирование дерева решений в алгоритме Дейкстры заключается в том, что из нескольких ветвей дерева, начинающихся с одной и той же вершины, выбирается та, которая имеет минимальный вес. Поскольку при организации взаимозачетов решается противоположная задача поиска путей максимальной длины, причем начальная вершина совпадает с конечной, в работе [1] предложен модифицированный алгоритм Дейкстры для поиска контуров, который состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Установить вес каждой вершины $g_i := 0, i = (1, s)$.

Шаг 2. Выбрать стартовую вершину $v_0, i := 0$.

Шаг 3. Найти все дуги e_{ij} .

Шаг 4. Для всех j , если $\min(g_i, d_{ij}) > g_j$, то $g_j := d_{ij}$.

Шаг 5. Повторить шаги 3, 4 для всех $i := j$.

Шаг 6. Завершить работу при $j = 0$. Возвратить контур $k_0 = (v_0, \dots, v_x \dots, v_0)$, двигаясь от v_0 и выбирая вершины v_x с максимальными значениями g_x .

Максимальная сложность однократного запуска данного алгоритма для некоторой начальной вершины составляет $O(bs)$, где $b = \sqrt{E}/s$ – коэффициент ветвления (среднее число исходящих дуг из каждой вершины), s – число вершин. Поиск всех контуров имеет сложность $O(bs^2)$, поскольку требуется s -кратный запуск данного алгоритма для каждой вершины, выбираемой в качестве стартовой.

В работах [5, 6] предложен метод сокращения пространства поиска за счет устранения повторяющихся фрагментов дерева решений. Применительно к данной задаче предлагается сохранять в виде прецедентов уже найденные фрагменты возможных цепочек платежей (пути) с максимальными весами. Каждый прецедент идентифицируется последовательностью обхода вершин. Таким образом, предлагается следующая модификация описанного выше алгоритма.

Шаг 1. Установить вес каждой вершины $g_i := 0, i = (1, s)$.

Шаг 2. Выбрать стартовую вершину $v_0, i := 0$.

Шаг 3. Найти все дуги e_{ij} и пути $c_{ij} = (v_i, \dots, v_j)$ с весами w_{ij} , если такие пути есть.

Шаг 4. Для всех j , если $\min(g_i, \max(d_{ij}, w_{ij})) > g_j$, то $g_j := d_{ij}$.

Шаг 5. Для всех j , если не существует путь c_{0j} , то создать путь c_{0j} , а также все пути, входящие в c_{0j} . Если некоторый путь c_{xy} существует, но w_{xy} нового пути больше, чем у существующего, заменить путь новым.

Шаг 6. Повторить шаги 3–5 для всех $i := j$.

Шаг 7. Завершить работу при $j = 0$. Возвратить контур k_0 , включающий в себя дуги e_{ij} и пути c_{xy} .

Для графа, имеющего s вершин, $\max(\{c_{xy}\}) = s^2$, причем в их число входят и искомые замкнутые контуры. В результате будет получено множество прецедентов (путей, соединяющих вершины графа), из которых можно составлять замкнутые контуры. Степень покрытия графа прецедентами при первом запуске поиска зависит от его связности. Можно доказать, что в случае полностью связного графа все прецеденты будут найдены при первом же поиске. При последующих запусках процедуры поиска замкнутый контур составляется всего из двух путей, один из которых соединяет вершины v_i и v_j , второй – вершины v_j и v_i . Таким образом, предельная сложность поиска одного контура при наличии всех прецедентов составляет $O(s-1)$, поскольку из каждой вершины существует не более $(s-1)$ исходящих и не более одной обратной цепочки.

На рисунке представлен граф обязательств из демонстрационного примера в работе [1], на котором цифрами при дугах обозначены объемы обязательств. Результат работы программы, написанной на языке SWI-Prolog для апробации предложенного алгоритма, представлен в таблице.

Номер стартовой вершины	1	2	3	4	5	6	7	8
Вершины, в цепочке	1, 7, 8, 1	2, 3, 1, 6, 2	3, 1, 6, 2, 3	4, 5, 6, 2, 3, 4	5, 6, 2, 3, 1, 7, 5	6, 2, 3, 1, 6	7, 8, 1, 7	8, 1, 7, 8
Вес	5	4	4	4	4	4	5	5

Таблица. Найденные контуры цепочек платежей

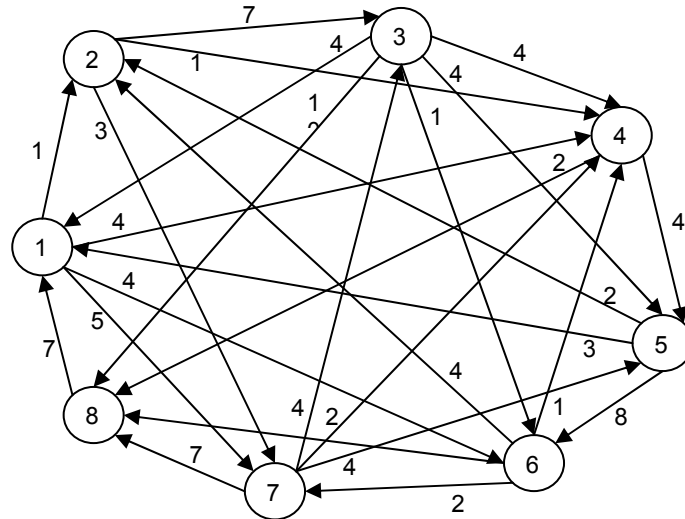


Рисунок. Граф обязательств

В ходе поиска контуров программа породила 63 пути, сохраненные в виде прецедентов, причем 56 путей были созданы уже при первом прогоне программы, который отыскивал контур, начинающийся и оканчивающийся вершиной номер 1. Остальные 7 путей были найдены при втором прогоне программы. Последующие 6 контуров были найдены целиком на основе использования прецедентов, и сложность их поиска составила $O(s-1)$.

Таким образом, использование прецедентов при поиске на графе контуров с максимальными весами позволяет приблизиться к линейной сложности решения данной задачи. Разработанный алгоритм в настоящее время реализуется в процессе реинжиниринга информационной системы Транспортно-клиринговой палаты «ИС ТКП» в части контроля и мониторинга взаиморасчетов авиапредприятий в нейтральной среде общепромышленной Системы взаиморасчетов на воздушном транспорте. Предварительные оценки демонстрируют приблизительно 30%-ое сокращение объема реальных платежей в подсистеме «Учет состояния финансовых расчетов» автоматизированной системы «Сакура». Разработанный алгоритм предполагается внедрить также в других клиринговых организациях Российской Федерации.

1. Rebezova M. Repayment problem at a settlement of debts // Computer Modelling and New Technologies. 2013. V. 17. N 2. P. 7–14.
2. Yang C., Song M. Access path planning of Mobile Agent in wireless sensor networks // Journal of Networks. 2014. V. 9. N 2. P. 507–514. doi: 10.4304/jnw.9.2.507-514
3. Swamy M.N.S., Thulasiraman K. Graphs, Networks, and Algorithms. NY: John Wiley & Sons, 1981. 454 p.
4. Takes F.W., Kosters W.A. Adaptive landmark selection strategies for fast shortest path computation in large real-world graphs // Proc. of IEEE/WIC/ACM International Joint Conf. on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, WI-IAT 2014. 2014. V. 1. Art. 6927522. P. 27–34. doi: 10.1109/WI-IAT.2014.13
5. Бессмертный И.А. Методы поиска информации с использованием интеллектуального агента // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 12. С. 26–31.
6. Бессмертный И.А., Булыгин К.А. Многоагентный подход к решению задач неинформированного поиска // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74). С. 98–101.

Бессмертный Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, igor_bessmertny@hotmail.com

Королёва Юлия Александровна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, julietkoroleva@gmail.com

Суринов Роман Татевосович – генеральный директор, ООО «ИНТЕГРАВ», Москва, 125167, Российская Федерация, surinov@integrav.ru

Igor A. Bessmertny – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, igor_bessmertny@hotmail.com

Julia A. Koroleva – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, julietkoroleva@gmail.com

Roman T. Surinov – CEO, "Integrav" Ltd., Moscow, 125167, Russian Federation, surinov@integrav.ru

УДК 004.4

ПРИМЕНЕНИЕ СЕНТИМЕНТ-АНАЛИЗА ТЕКСТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЩЕСТВЕННОГО МНЕНИЯ

Р.В. Посевкин^а, И.А. Бессмертный^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: igor_bessmertny@hotmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.04.14, принята к печати 03.07.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-169-171

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Посевкин Р.В., Бессмертный И.А. Применение sentiment-анализа текстов для оценки общественного мнения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 169–171

Аннотация. Описывается подход к оценке эмоциональной окрашенности естественно-языковых текстов на основе словарей тональности. Предложен метод автоматической оценки общественного мнения с помощью sentiment-анализа отзывов и обсуждений опубликованных документов в сети Интернет, базирующийся на статистике использованных слов. Разработан исследовательский прототип программной системы, производящей sentiment-анализ естественно-языкового текста на русском языке на основе линейной шкалы. Для более точного сопоставления каждого слова в предложении словарю выполняются синтаксический анализ и лемматизация. Словари тональности представлены в открытом и удобочитаемом виде, что позволяет его расширять и корректировать. Программная система sentiment-анализа русскоязычного текста, реализованная на открытых словарях тональности, разработана впервые.

Ключевые слова: анализ тональности текста, тональность, sentiment-анализ, естественно-языковой текст.

TEXTS SENTIMENT-ANALYSIS APPLICATION FOR PUBLIC OPINION ASSESSMENT

R.V. Posevkin^а, I.A. Bessmertny^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: igor_bessmertny@hotmail.com

Article info

Received 28.04.14, accepted 03.07.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-169-171

Article in Russian

Reference for citation: Posevkin R.V., Bessmertny I.A. Texts sentiment-analysis application for public opinion assessment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 169–171 (in Russian)

Abstract. The paper describes an approach to the emotional tonality assessment of natural language texts based on special dictionaries. A method for an automatic assessment of public opinion by means of sentiment-analysis of reviews and discussions followed by published Web-documents is proposed. The method is based on statistics of words in the documents. A pilot model of the software system implementing the sentiment-analysis of natural language text in Russian based on a linear assessment scale is developed. A syntactic analysis and words lemmatization are used to identify terms more correctly. Tonality dictionaries are presented in editable format and are open for enhancing. The program system implementing a sentiment-analysis of the Russian texts based on open dictionaries of tonality is presented for the first time.

Keywords: text tonality processing, tonality, sentiment-analysis, natural language text.

Сентимент-анализ, или анализ тональности текста, представляет большой интерес для сфер и институтов общества, оперирующих с текстовыми документами. Особенно это относится к сферам образования, журналистики, культуры, издательской деятельности, эффективность которых обусловлена качеством текста, а умения и навыки работы с ним входят в состав профессиональных требований [1]. Эмоциональная окраска текста в общем случае является многомерной, и ее идентификация требует наличия мощных специально подготовленных словарей [2]. В настоящей работе решается частная задача анализа отзывов на публикации в сети Интернет на основе линейной шкалы позитивных или негативных оценок. Таким образом, с помощью sentiment-анализа отзывов и переписки людей на форумах предлагается автоматически оценивать общественное мнение относительно обсуждаемых событий.

Тональность текста в целом определяется лексической тональностью составляющих его единиц и правилами их сочетания [3]. Тональность текста определяется тремя факторами: субъект тональности, тональная оценка, объект тональности. Субъектом тональности является автор текста, объект тональности – то, о чем или о ком идет в тексте речь [4]. Тональная оценка может быть представлена в одном из

следующих видов: бинарный (положительный / отрицательный), тернарный (положительный / нейтральный / отрицательный), ранжированный [5].

Поиск лексической тональности в тексте предлагается осуществлять по заранее составленным тональным словарям (спискам паттернов) с применением лингвистического анализа. Данный метод позволяет не только показать цепочки тональной лексики, но и получить синтаксически корректные эмоциональные выражения [6].

Разработанный авторами исследовательский прототип анализатора тональности текста реализует многофазный процесс [7], состоящий из следующих этапов. На первом этапе текст разбивается на отдельные предложения, предложения – на отдельные слова. На втором этапе производятся морфологический анализ каждого слова, лемматизация и определение частей речи. Для лемматизации используется Томита-парсер. Перечисленные этапы анализа предложений необходимы для точного сопоставления найденных слов тональному словарю.

Используются тональные словари для русскоязычного текста объемом порядка 35000 слов. Если слово присутствует в словаре, записывается его тональность. В словаре каждому слову соответствует тональная оценка. Такой показатель представляет собой набор из пяти значений. Каждое значение определяет степень принадлежности слова к одному из классов: крайне отрицательный, отрицательный, нейтральный, положительный, крайне положительный. Сумма всех значений для конкретного слова равна единице. В случае отсутствия слова в словаре его тональность считается нейтральной. Последним шагом вычисляется общая тональность предложения на основе тональностей составляющих слов. Для расчета общей тональности предложения применяется метод, основанный на теоретико-графовых моделях [8]. В основе этого метода используется предположение о том, что не все слова в текстовом корпусе документа равнозначны. Какие-то слова имеют больший вес и сильнее влияют на тональность текста. Для получения конечного результата нужно вычислить значения двух оценок: положительной и отрицательной составляющей. Чтобы найти положительную составляющую предложения, необходимо найти сумму тональностей всех положительных компонентов слов предложения. Значение отрицательной составляющей текста находится аналогичным образом. Для итоговой оценки тональности всего текста нужно вычислить отношение этих составляющих по формуле.

$$S^* = \frac{\sum_{i=1}^N (S4_i + S5_i)}{\sum_{i=1}^N (S1_i + S2_i)}$$

где S^* – тональная оценка предложения; $S = [S1, S2, S3, S4, S5]$ – тональная оценка слова; $S1, S2$ – отрицательная составляющая тональной оценки слова; $S4, S5$ – положительная составляющая тональной оценки слова; N – количество слов в предложении. Значение S^* сравнивается с некоторым значением T , которое вычисляется экспериментально. Текст, в котором значение S^* близко к значению T , будет считаться нейтральным, если превосходит T – положительным, меньше значения T – отрицательным.

Узкая специализация анализатора – оценка текстов с помощью линейной шкалы – позволяет обойтись словарем небольшого объема.

В ходе исследования проведены эксперименты по анализу работоспособности разработанных алгоритмов оценки тональности текста. В качестве условия проведения эксперимента выступали отзывы пользователей электроники и бытовой техники, оставленные в специализированном сервисе «Яндекс.Маркет» и отзывы зрителей, оставленные на кинофильмы в сервисе «Кинопоиск». На данных сервисах пользователь при публикации отзыва определяет тип рецензии: положительная / отрицательная / нейтральная.

Для экспериментов были отобраны 100 предложений. Таким образом, в эксперименте сравнивается сентимент, полученный в результате анализа разработанным программным средством, и сентимент, который определил пользователь при публикации отзыва. На основании полученных результатов всех экспериментов рассчитывается точность определения сентимента:

$$Prec = \frac{N_{Cor}}{N_{All}}$$

где $Prec$ – точность определения тональности текста; N_{Cor} – количество экспериментов с верно определенной тональностью предложения; N_{All} – общее количество экспериментов. По результатам экспериментов точность определения тональности текста, разработанного программного прототипа, составила 78%.

Разработана программная система сентимент-анализа естественно-языкового текста на русском языке. Словари тональности представлены в открытом и удобочитаемом виде, что обеспечивает возможность для расширения и правки уже существующей информации. Программная система сентимент-анализа русскоязычного текста, реализованная на открытых словарях тональности, разработана впервые.

1. Бессмертный И.А., Джалиашвили З.О., Максимов В.В., Маркин Д.А. Лингвооценочное управление текстом // Тезисы докладов X Международной конференции «Применение новых технологий в образовании». Троицк: Фонд новых технологий в образовании «Байтик», 1999.

2. Nugumanova A., Bessmertnyi I. Applying the latent semantic analysis to the issue of automatic extraction of collocations from the domain texts // Communications in Computer and Information Science. 2013. V. 394. P. 92–101. doi: 10.1007/978-3-642-41360-5_8
3. Позельская А.Г., Соловьев А.Н. Метод определения эмоций в текстах на русском языке // Тезисы докладов Международной конференции по компьютерной лингвистике и интеллектуальным технологиям «Диалог 2011». Москва, РГГУ, 2011. С. 510–522.
4. Cruz F.L., Troyano J.A., Pontes B., Ortega F.J. Building layered, multilingual sentiment lexicons at synset and lemma levels // Expert Systems with Applications. 2014. V. 41. N 13. P. 5984–5994. doi: 10.1016/j.eswa.2014.04.005
5. Ермаков С.А., Ермакова Л.М. Методы оценки эмоциональной окраски текста // Вестник Пермского университета. Серия: математика, механика, информатика. 2012. № 1. С. 85–90.
6. Parau P., Stef A., Lemnaru C., Dinsoreanu M., Potolea R. Using community detection for sentiment analysis // Proc. IEEE 9th Int. Conf. on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2013). 2013. P. 51–54. doi: 10.1109/ICCP.2013.6646080
7. Chiru C.-G., Hadgu A.T. Sentiment-based text segmentation // Proc. 2nd Int. Conf. on Systems and Computer Science (ICSCS 2013). 2013. P. 234–239. doi: 10.1109/IcConSCS.2013.6632053
8. Минаков И.А. Анализ эмоциональной тональности текста и его применение для повышения качества переходов по релевантным объявлениям // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2013. № 1 (37). С. 58–63.

<i>Посевкин Руслан Владимирович</i>	–	аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, rus_posevkin@mail.ru
<i>Бессмертный Игорь Александрович</i>	–	кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, igor_bessmertny@hotmail.com
<i>Ruslan V. Posevkin</i>	–	postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, rus_posevkin@mail.ru
<i>Igor A. Bessmertny</i>	–	PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, igor_bessmertny@hotmail.com

Уважаемые читатели!

Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

Журнал выходит 6 раз в год.

На журнал «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» можно оформить подписку в любом отделении связи. Подписной индекс – 47197 (полугодовая подписка) и 70522 (годовая подписка) по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы).

Годовая подписка оформляется до 10 декабря, полугодовая подписка оформляется до 10 июня и 10 декабря.

Срок подписки и ее стоимость можно уточнить в редакции:

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, комн. 330.

Сайт журнала <http://ntv.ifmo.ru>