

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

сентябрь—октябрь 2009

№ 5 (63)



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартамян,
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин, д.т.н., профессор А.В. Демин,
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,
д.т.н., профессор Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин,
д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина, д.т.н. О.А. Степанов,
д.т.н., профессор В.Л. Ткалич, д.т.н., профессор А.А. Шалыто,
д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь – Г.О. Котелкова

Редактор – к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО

Телефон: (812) 233 12 70

Факс: (812) 232 02 95 (с пометкой: для редакции
Научно-технического вестника)

[http: //books.ifmo.ru/ntv](http://books.ifmo.ru/ntv)

E-mail: karmanov@mail.ifmo.ru

1. ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ.	
ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	5
Коротаев В.В., Мараев А.А., Похитов П.П., Тимофеев А.Н. Аппаратное снижение погрешности позиционирования в оптико-электронной насадке на теодолит ПУЛ-Н.....	5
Андреев А.Л., Лбова Т.П. Разработка структуры комплексной модели оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами	10
Иванов А.Н. Исследование муар-интерференционной картины, возникающей при дифракции света на зазоре между «толстым» краем и плоской отражающей поверхностью.....	16
Миронов С.А. Расчет характеристик поляризационно-независимого оптического изолятора для волоконно-оптических линий связи	21
2. ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА	30
Адрианов В.Е., Орлова А.О., Маслов В.Г., Баранов А.В., Федоров А.В. Динамика спектрально-люминесцентных свойств квантовых точек CdSe/ZnS в гидрофобных растворителях	30
Топорова Ю.А., Орлова А.О., Маслов В.Г., Баранов А.В., Федоров А.В. Условия диссоциации комплекса полупроводниковая квантовая точка/органическая молекула в тонких полимерных пленках	36
Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Корешов С.Н. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов.....	42
3. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.....	48
Овчинников И.Е., Лагун А.В. Динамика системы ориентации космического летательного аппарата с двигателями-маховиками.....	48
4. МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА	55
Смирнов А.Б., Крушинский И.А. Исследование и применение мехатронных устройств с пьезоприводами	55
Емельянец Г.И., Лочехин А.В. О построении бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках	62
5. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	70
Пинаев А.Л., Стовяга А.В. Исследование режима динамической силовой литографии в системе «металл–полимер»	70
Булгакова В.Г., Воробова Н.Д. Закономерности, методы и технологии формирования объемных микроструктур в фотополимерных нанокмпозиционных материалах.....	74
6. БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	81
Леонова А.В. Влияние слоистой структуры биоткани на акустическое поле мощного источника ультразвука	81
Казначеева А.О., Власюк А.В., Кудряшов А.В. Возможности вейвлет-преобразований в повышении точности измерений параметров диффузии в МРТ.....	86
7. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	92
Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем	92
Боярский К.К., Каневский Е.А. ВЕГА – компьютерная система классификации и анализа текстов.....	98
Стержанов М.В. Графовая модель как средство описания бинарных штриховых изображений	105
Шалымов Д.С. Рандомизированный метод определения количества кластеров на множестве данных	111
8. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ	117
Гетманская Т.А., Гриншпун Д.М., Королев В.В., Стафеев С.К. Задачи развития профильного обучения в старшей школе, ориентированного на профессиональную подготовку выпускников в системе высшего образования.....	117
9. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.....	117
Семёнова М.А., Семёнов В.А. Метод градуированной фильтрации нежелательной корреспонденции («спама»)	122
SUMMARY.....	126

1. OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES.....	5
V. Korotaev, A. Maraev, P. Pokhitonov, A. Timofeev . The apparatus reducing of position inaccuracy in the optoelectronic head for a theodolite PUL-N	5
A. Andreev, T. Lbova. Complex model structure for designing of optical-electronic systems for point object observation	10
A. Ivanov. Investigation of the moiré fringes, appearing at light diffraction at slit between “thick” edges and flat reflecting surface	16
S. Mironov. Characteristics calculation of the polarization-independent optical isolator for fiber-optics communication systems	21
2. PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS	30
V. Adrianov, A. Orlova, V. Maslov, A. Baranov, A. Fedorov. The dynamics of luminescent properties of CdSe/ZnS quantum dots in hydrophobic solvents.....	30
U. Toporova, A. Orlova, V. Maslov, A. Baranov, A. Fedorov. Dissociation conditions of semiconductor quantum dot/organic molecule complex in polymeric thin films	36
O. Nikanorov, G. Ivanov, S. Koreshev. Program complex for synthesis and digital reconstruction of holograms-projectors.....	42
3. ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS	48
A. Lagun, I. Ovchinnikov. Dynamics of the spacecraft orientation system with flywheel motors.....	48
4. MECHANICS AND MECHATRONICS	55
A. Smirnov, I. Krushinsky. Exploration and application of mechatronic devices with piezoactuators.....	55
G. Emelyantsev, A. Lochehin. Construction of strapdown stabilized gyrocompass based on the electrostatic gyroscope and micromechanical sensors	62
5. MATERIALS SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES	70
A. Pinaev, A. Stovpyaga. Research of dynamic force lithography mode in system "metal-polymer"	70
V. Bulgakova, N. Vorzobova. Particularities, methods and techniques of polymer volume microstructure formation in photopolymeric nanocomposite materials.....	74
6. BIOMEDICAL TECHNOLOGIES.....	81
A. Leonova. The influence of a stratified medium bio tissue on acoustic field of the powerful ultrasound source	81
A. Kaznacheeva, A. Vlasyuk, A. Kudryashov. Wavelet-transform abilities for accuracy increasing of the diffusion parameters measurements in MR-imaging	86
7. COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES	92
V. Bogatyrev, S. Bogatyrev. Optimality criteria of multilevel failure-safe computer systems	92
K. Boyarsky, E. Kanevsky. VEGA – computer system for text analysis and classification	98
M. Sterjanov. Graph model as a tool for binary line image description	105
D. Shalymov. Randomized method of finding the number of clusters in a data set.....	111
8. NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION	117
T. Getmanskaya, D. Grinshpun, V. Korolyov, S. Stafeev. Special training development in senior school for vocational training of graduating students in higher education system.....	117
9. INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS	122
M. Semyonova, V. Semyonov. Graduated filtration method of undesirable correspondence («spam»).....	122
SUMMARY.....	126

УДК 681.78

АППАРАТНОЕ СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ НАСАДКЕ НА ТЕОДОЛИТ ПУЛ-Н

В.В. Коротаев, А.А. Мараев, П.П. Похитонов, А.Н. Тимофеев

В статье рассматриваются возможности снижения погрешности позиционирования с помощью оптико-электронной насадки на теодолит с оптической равносигнальной зоной (ПУЛ-Н) для управления строительными машинами путем применения высокоэффективных полупроводниковых излучающих диодов и модернизации оптической системы.

Ключевые слова: позиционирование, зона оптическая равносигнальная, энергетическая чувствительность.

Введение

Существуют приборы для позиционирования рабочих органов машин, выполняющих земельные работы, относительно базовой плоскости. Среди этих приборов эффективно применяется прибор с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ), выполненный как насадка на теодолит [1].

В таких приборах базовая равносигнальная плоскость формируется объективом 4 задатчика базового направления (ЗБН) 1 (рис. 1) путем проецирования на максимальную дистанцию работы машины ребра разделительной прямоугольной призмы 2. От каждой грани призмы отражается изображение излучающей площадки одного из двух инфракрасных полупроводниковых излучающих диодов (ПВД) 3 с различными частотами (f_1 и f_2) излучения. Пучок лучей, посылаемых ЗБН, оказывается «разрезанным» горизонтальной плоскостью на две части – верхнюю, модулированную частотой f_1 , и нижнюю с частотой f_2 . Эта граница и является базовой плоскостью.

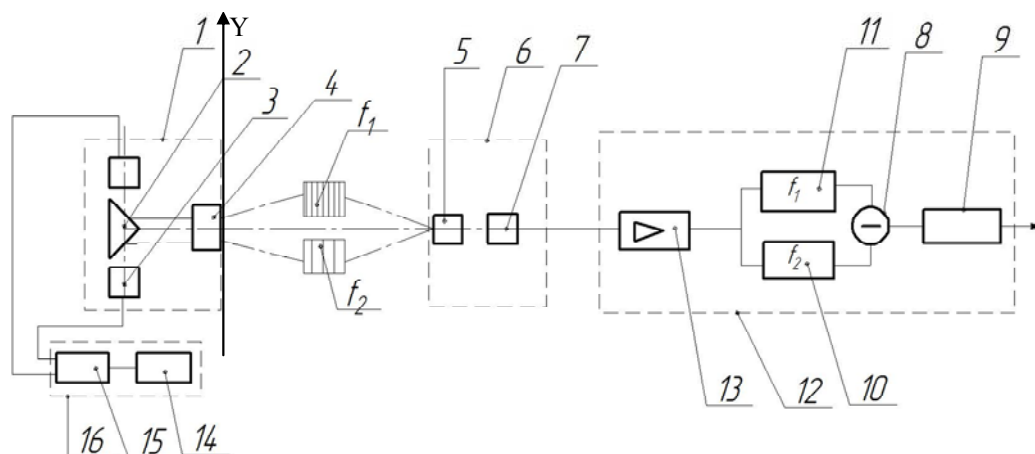


Рис. 1. Структурная схема ПУЛ-Н

Труба ЗБН включает объектив 4, в корпусе – разделительную призму 2 и два одинаковых канала подсветки, каждый из которых содержит полупроводниковые излучающие диоды 3 (типа АЛ107Б). Эти ПВД 3 питаются модулированным током от блока 16, состоящего из генератора 14 и делителя частоты 15 (f_1 и f_2). Приемная часть (ПЧ) 6

содержит объектив 5, в фокальной плоскости которого закреплен фотоприемник 7 (фотодиод ФД-К-155). ПЧ соединена с блоком усилителей 12, содержащим усилитель 13, электронные фильтры 10 и 11, вычитающее устройство 8 и электронное пороговое устройство 9, вырабатывающее команды управления [2].

Развитие техники и оптических технологий позволяет повысить характеристики аппаратных средств оптико-электронных приборов, в том числе и с оптической равносигнальной зоной. Как известно, чтобы повысить точность позиционирования с помощью насадки с ОРСЗ, необходимо увеличивать энергетическую чувствительность устройства [3]. Оценке путей повышения энергетической чувствительности за счет инструментальных усовершенствований рассматриваемого устройства с учетом появившихся новых более совершенных электронных компонентов и технологий и посвящена настоящая статья.

Влияние притупления призмы на энергетическую чувствительность

Энергетическая чувствительность системы с ОРСЗ определяется формулой [1]

$$W = \frac{2\tau' \pi S_1 S_2}{z^2 l_n} L \sin \omega t, \quad (1)$$

где τ' – пропускание атмосферы, S_1 – площадь выходного зрачка ЗБН, S_2 – площадь входного зрачка ПЧ, z – расстояние между ЗБН и ПЧ, l_n – линейный размер переходной зоны [1], L – яркость источника оптического излучения, ω – частота модуляции, t – время. Из формулы (1) видно, что увеличить энергетическую чувствительность можно, увеличивая яркость излучателя L и уменьшая ширину переходной зоны l_n .

Яркость ПИД можно приближенно определить формулой [1]

$$L = \frac{4KP_e}{\pi[d \sin(\theta/2)]^2},$$

где K – коррекционный множитель, P_e – мощность излучения, θ – значение угла излучения ПИД для уровня силы излучения, равной 50 % от максимальной, d – размер излучающей поверхности ПИД. Из последней формулы видно, что для увеличения яркости желательно повышать мощность излучения ПИД при уменьшении угла излучения. В настоящее время появились высокоэффективные ПИД, например фирмы Siemens (SFH 485 P), удовлетворяющие указанным требованиям.

Как известно из литературы, размер линейного участка в плоскости фокусировки будет определяться по формуле [1]

$$l_n = k_1 \delta \varphi z + D_1 |z - z_0| / z_0, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент формы распределения aberrаций объектива ЗБН; $\delta \varphi$ – максимальное значение угловой сферической aberrации объектива ЗБН; D_1 – диаметр выходного зрачка объектива ЗБН; z – дистанция до рассматриваемого сечения пучка ЗБН; z_0 – дистанция фокусировки ЗБН. Однако призма 2 (рис. 1) не может быть выполнена с идеально острым ребром между рабочими поверхностями (на данный момент достигнут размер притупления ребра 5 мкм), поэтому она вносит дополнительную добавку c' (рис. 2) к линейному размеру переходной зоны l_n , которая равна

$$c' = \frac{cz_0}{f'},$$

где c – размер притупления призмы, z_0 – дистанция фокусировки ЗБН, f' – фокусное расстояние объектива ЗБН. В итоге выражение 2 преобразуется к виду

$$l_n = k_1 \delta \varphi z + D_1 |z - z_0| / z_0 + cz / f'.$$

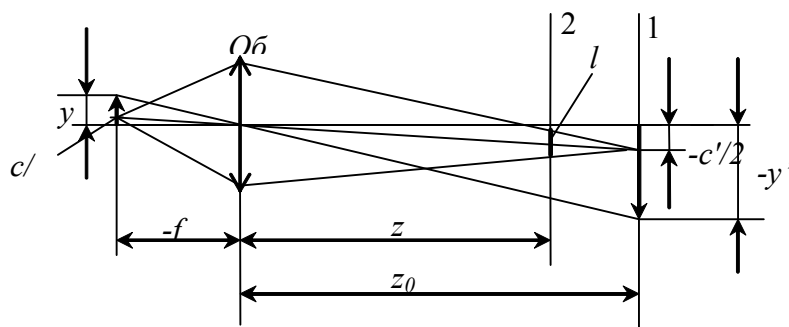


Рис. 2. Формирование переходной зоны с учетом притупления на призме

Увеличение размера переходной зоны приводит к уменьшению энергетической чувствительности W . Для исследования степени влияния параметров проведен сравнительный анализ по результатам теоретических расчетов.

На рис. 3 приведены графики энергетической чувствительности при разных значениях максимальной сферической аберрации объектива ЗБН и размера притупления ребра призмы при выбранной дистанции фокусировки $z_0 = 60$ м. Для расчета использованы характеристики ПИД марки АЛ107Б.

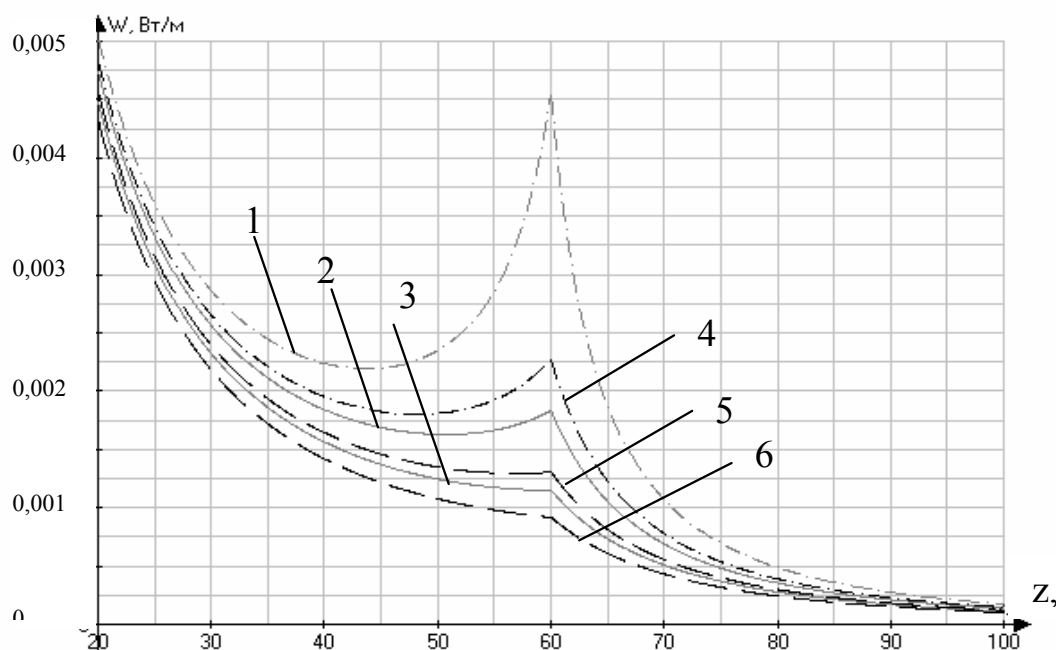


Рис. 3. Зависимость энергетической чувствительности W от дистанции z при различных параметрах оптической системы: 1) $\delta\varphi = 10''$, $c = 0$ мкм — идеализированный график; 2) $\delta\varphi = 10''$, $c = 5$ мкм; 3) $\delta\varphi = 10''$, $c = 10$ мкм; 4) $\delta\varphi = 20''$, $c = 0$ мкм — идеализированный график; 5) $\delta\varphi = 20''$, $c = 5$ мкм; 6) $\delta\varphi = 20''$, $c = 10$ мкм

Из хода кривых видно, что максимальное значение энергетической чувствительности принимает на дистанции фокусировки z_0 , при наименьших значениях $\delta\varphi$ и c ее значение почти в два раза выше, чем при наибольших значениях этих параметров (кривые 2 и 6 графика соответственно). Возрастание энергетической чувствительности в области фокусировки наблюдается только в случаях 2 и 5, так как функция $W(z)$ «успевает» проходить свой минимум до дистанции фокусировки. Кривыми 1 и 3 представлены идеализированные графики чувствительности (при притуплении, равном 0) при максимальных сферических аберрациях $10''$ и $20''$ соответственно. Видно, что при $\delta\varphi =$

10" имеются почти в 2 раза большие возможности для достижения высокой энергетической чувствительности в области фокусировки.

Одним из вариантов решения этой проблемы можно считать внесение конструктивных изменений, а именно замену прямоугольной разделительной призмы на призм-куб 2 (рис. 4) с отражающим покрытием на половине гипотенузной грани. В этом случае граница нанесенного покрытия может быть выполнена с точностью до единиц микрометров, в то время как в отражательной призме достигается минимальный размер притупления ребра между рабочими гранями не менее 5 мкм.

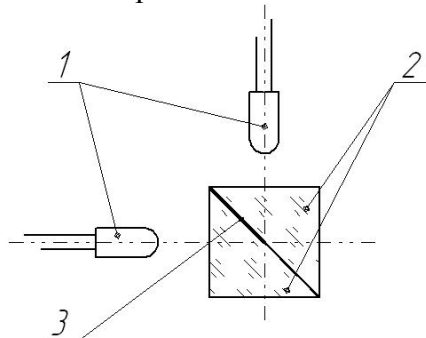


Рис. 4. Оптическая схема каналов подсветки: 1 – ПИД, 2 – призма-куб, 3 – отражающее покрытие на половине гипотенузной грани

Уменьшение размера ребра увеличивает энергетическую чувствительность. Пусть используемый в системе объектив имеет предел разрешения $N = 20\text{--}50$ лин/мм, и этот предел разрешения обусловлен только сферической aberrацией. При фокусном расстоянии объектива $f' = 69,9$ мм сферическая aberrация $\delta\varphi = 0,0004$ рад, и, принимая $k_1 = 1,6$, $z = z_0 = 60$ м, получим при $c = 5$ мкм $W = 3,09 \cdot 10^{-4}$ Вт/м, а при $c = 1$ мкм $W = 3,36 \cdot 10^{-4}$ Вт/м. К тому же наблюдается уменьшение погрешности, вызванной снижением яркости источников излучения с течением времени.

Погрешность, вызванная снижением яркости источников излучения из-за их старения

Применяемые в рассматриваемой оптико-электронной системе источники излучения обладают свойством уменьшать свою яркость с течением времени. При одинаковом снижении яркости полупроводниковых излучающих диодов, облучающих различные грани разделительной призмы, изменения положения оптической равносигнальной зоны не происходит. Однако при неодинаковом изменении яркости произойдет смещение оптической равносигнальной зоны в сторону грани с большей облученностью. Величину смещения от неодинаковой яркости источников [1] с учетом притупления можно определить выражением

$$dy = 0,25 \cdot (k_1 \delta\varphi z + \frac{D_1 |z_0 - z|}{z_0} + \frac{cz}{f'}) \delta L,$$

где k_1 – коэффициент формы распределения aberrаций объектива прожектора; $\delta\varphi$ – максимальное значение угловой сферической aberrации объектива; D_1 – диаметр выходного зрачка объектива; z – дистанция до рассматриваемого сечения пучка; z_0 – дистанция фокусировки; δL – относительный разбаланс яркостей источников излучения в прожекторе; c – размер притупления разделительной призмы; f' – фокусное расстояние объектива ЗБН.

При характеристиках объектива, указанных выше, и относительном разбалансе яркостей $\delta L = 0,4$ получим границу неисключаемой систематической погрешности:

$$\text{при } c = 5 \text{ мкм } dy = \left(k_1 \delta \phi z \delta L + \frac{cz}{f'} \right) / 4 = 4,91 \text{ мм};$$

$$\text{при } c = 1 \text{ мкм } dy = \left(k_1 \delta \phi z \delta L + \frac{cz}{f'} \right) / 4 = 4,05 \text{ мм}.$$

Видим, что уменьшение притупления c позволяет снизить величину неисключаемой систематической погрешности на 17,5 %.

Заключение

В статье впервые было получено выражение зависимости линейной величины переходной зоны от размера притупления ребра призмы, проведен сравнительный анализ распределения энергетической чувствительности при разных характеристиках задатчика. Таким образом, модернизация ПУЛ-Н возможна:

- применением высокоэффективных источников излучения с большей мощностью излучения в меньшем угле расходимости;
- совершенствованием оптической системы путем применения источников с другим спектральным составом;
- применением призмы-куба со светоделительным покрытием на гипотенузной грани, полученным методом литографии.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований на макете с призмой-кубом.

Работа выполнялась в рамках НИР по программе «Развитие научного потенциала высшей школы».

Литература

1. Джабиев А.Н., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной: Монография / Под общ. ред. Э.Д. Панкова. – СПб: СПб ИТМО, 1998. – 238 с.
2. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические юстировочные задачи: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1989. – 206 с.: ил.
3. Цуккерман С.Т., Гридин А.С. Приборы управления при помощи оптического луча. – Л.: Машиностроение, 1969. – 204 с.

Коротаев Валерий Викторович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru
Мараев Антон Андреевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, antoshka87@gmail.com
Похитонов Петр Петрович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sea_pirat@mail.ru
Тимофеев Александр Николаевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст.н.с., доцент, timofeev@grv.ifmo.ru

УДК 004.942:519.876.5

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТОЧЕЧНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.Л. Андреев, Т.П. Лбова

Дается описание структуры модели, используемой для синтеза, анализа и прогнозирования работы оптико-электронной системы (ОЭС) телевизионного типа, решающей задачи наблюдения за подвижными объектами в автоматическом режиме. В качестве исходных данных задаются параметры входных воздействий объектов и фоновых помех, параметры оптической системы, фотоприемника, дестабилизирующих факторов, алгоритмов и др.

Ключевые слова: компьютерное имитационное моделирование систем, телевизионные системы наблюдения, обнаружение и измерение координат точечных объектов.

Введение

Целью настоящей статьи является описание принципов построения комплексной математической модели, используемой для синтеза, анализа, прогнозирования работы телевизионной системы наблюдения за малоразмерными подвижными объектами и обоснования требований к отдельным звеньям системы с учетом необходимых эксплуатационных параметров в реальных условиях функционирования.

К числу важных промежуточных задач, которые нужно решить для достижения поставленной цели, относятся, в частности:

- исследование особенностей физических процессов, протекающих в многоэлементных структурах фотоприемных устройств с учетом физических свойств различных фоточувствительных материалов;
- исследование физической природы источников помех, действующих в различных звеньях оптико-электронной системы и др.;
- исследование различных алгоритмов обработки сигналов, используемых для автоматического обнаружения и измерения параметров объектов.

Универсальность модели предполагает возможность ее использования для различных условий функционирования подобных систем – с использованием наземного, космического или иного базирования, различных дистанций наблюдения, энергетических и динамических параметрах объектов и др.

Структура модели

Структура математической модели ОЭС представлена на рис. 1.

Задача моделирования ОЭС разбивается на следующие этапы: моделирование сигнально-фоновой ситуации; моделирование различных видов помех; моделирование процедур предварительной обработки сигнала (с учетом искажений, связанных с квантованием сигналов при аналого-цифровом преобразовании); моделирование различных алгоритмов целевой обработки сигналов (связанных, в общем случае, с решением задач обнаружения, распознавания и оценки параметров исследуемых объектов, а также оценки метрологических параметров проектируемой системы с учетом заданных доверительных интервалов).

Ввод исходных данных осуществляется в интерактивном режиме. При этом вводимые переменные можно подразделить на следующие группы:

- параметры оптической системы;
- параметры фотоприемного устройства;
- параметры алгоритма первичной обработки сигнала;

- условия наблюдения;
- параметры, определяющие режим статистической обработки полученных реализаций.

Предварительная обработка исходных данных предполагает преобразование вводимых величин и формирование на их основе переменных и констант, используемых при моделировании.

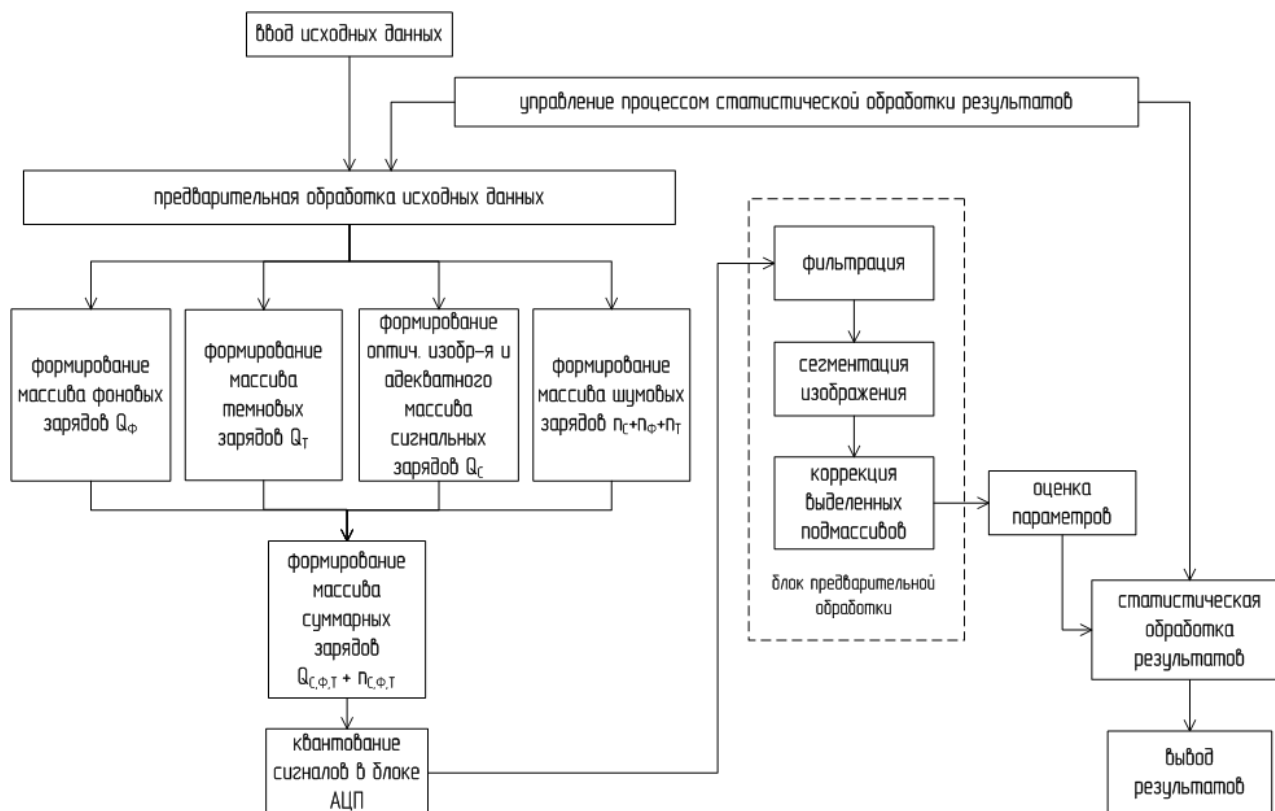


Рис. 1. Структурная схема модели

В общем случае фоновая составляющая сигнала представляет собой случайное поле яркости. Исходным материалом для компьютерного моделирования случайного поля яркости являются независимые числа, полученные генератором случайных чисел ЭВМ. Их совокупность можно рассматривать как случайное δ -поле – обобщение понятия дискретного белого шума на случай нескольких переменных. Моделирование δ -поля осуществляется следующим образом: пространственно-временной координате (x_i, y_j, t_k) ставятся в соответствие выборочные значения из датчика нормальных случайных чисел с параметрами $(0, 1)$.

Для моделирования дискретных реализаций однородного стационарного случайного поля, заданного в конечном пространстве и времени, предлагается использовать метод канонического разложения поля в пространственно-временной ряд Фурье. Неограниченные дискретные реализации однородного стационарного случайного поля можно получить с помощью алгоритма пространственно-временного скользящего суммирования δ -поля [1].

При формировании массива темновых зарядов учитывается аддитивная составляющая «геометрического» шума. Среднее значение темнового заряда, накапливаемого в ячейке, определяется выражением [2]

$$\bar{Q}_T = \bar{i}_T A_{\text{эл}} T_n,$$

где $\bar{i}_T$ – средняя плотность темнового тока накопления заряда, характерная для данного полупроводникового материала при рабочей температуре кристалла; $A_{\text{эл}}$ – площадь электрода, под которым осуществляется накопление.

Формирование массива сигнальных зарядов осуществляется с учетом случайного распределения темновых токов и чувствительности по кристаллу ПЗС с заданным интервалом корреляции «геометрического» шума. Если, например, распределение освещенности от точечного объекта по фоточувствительной площадке аппроксимируется гауссоидой вращения, то распределение сигнальных зарядов определяется в соответствии с выражением

$$E(x_i, y_j) = \frac{\Phi}{2\pi R^2} \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R^2} \right],$$

где Φ – поток оптического излучения, создающего изображение точечного объекта; R – радиус кружка рассеяния объектива, определяемый на уровне $0,606 E_{\text{max}}$; x_0, y_0 – координаты центра пятна рассеяния.

Динамику перемещения наблюдаемых объектов можно задать в параметрическом виде с помощью коэффициентов A, B, C (первой, второй и третьей степени) полинома, аппроксимирующего изменение во времени модуля угловых перемещений объектов

$$S(t) = A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3.$$

Направление перемещения задается посредством угла α между направлением оси X и проекцией вектора скорости в плоскости анализа изображения.

При моделировании массива шумовых составляющих в ячейках ПЗС учитывается совокупность сигнальной, фоновой и темновой составляющих зарядов в каждой ячейке. При этом шумовая составляющая заряда в каждой ячейке определяется путем многократного задания флуктуаций зарядов по случайному закону с заданным распределением с учетом влияния всех вышеперечисленных факторов.

Флуктуация числа зарядов подчиняется закону Пуассона. Однако, поскольку число накапливаемых зарядов достаточно велико ($n_q > 100$), распределение Пуассона можно аппроксимировать нормальным законом распределения с дисперсией, равной среднему значению. Тогда среднеквадратическое значение шума на выходе ФПУ равно

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\sigma_{\text{ш.т}}^2 + \sigma_{\text{ш.ф}}^2 + \sigma_{\text{ш.с}}^2 + \sigma_{\text{ш.г}}^2 + \sigma_{\text{ш.п}}^2 + \sigma_{\text{ш.в.у.}}^2},$$

где $\sigma_{\text{ш.т}}$ – среднеквадратическое число зарядов в i -ой ячейке ФПУ, характеризующее флуктуацию числа темновых зарядов; $\sigma_{\text{ш.ф}}$ – среднеквадратическое значение флуктуации числа зарядов, обусловленных фоновым излучением; $\sigma_{\text{ш.с}}$ – среднеквадратическое значение флуктуации числа сигнальных зарядов, накапливаемых в ячейках ФПЗС, характеризующее фотонный шум; $\sigma_{\text{ш.г}}$ – среднеквадратическое отклонение среднего числа темновых зарядов в различных ячейках ФПУ, характеризующее геометрический шум; $\sigma_{\text{ш.п}}$ – среднеквадратическое значение флуктуаций заряда при переносе (для ФПЗС); $\sigma_{\text{ш.в.у.}}$ – среднеквадратическое значение шума выходного устройства, пересчитанное к числу зарядов.

В результате выполнения описанных выше процедур формируется массив суммарных зарядов, представляющий собой реализацию двумерного нестационарного случайного процесса, результат моделирования которого иллюстрирует рис. 2.

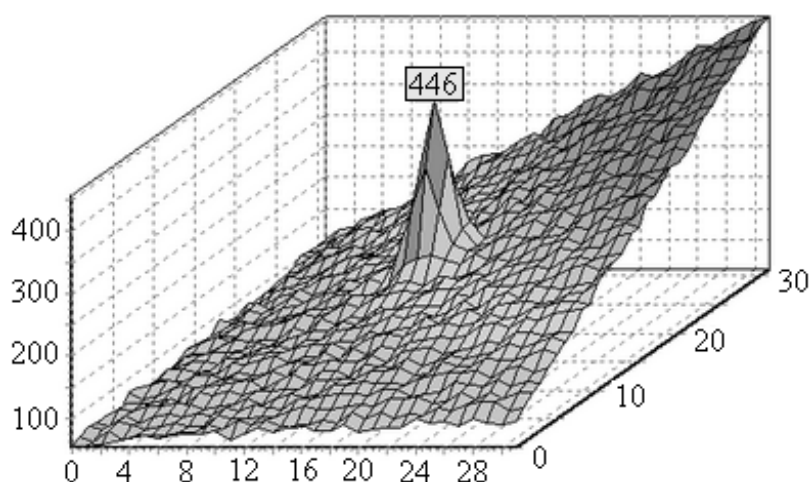


Рис. 2. Распределение освещенности на фоточувствительной площадке ФПУ (по осям X, Y отложены номера пикселей по горизонтали и вертикали)

Квантование сигнала в блоке АЦП осуществляется с учетом заданной разрядности и необходимости согласования динамического диапазона входных уровней АЦП с реальным динамическим диапазоном изменения сигнала на выходе ПЗС. При этом принимается во внимание возможность «привязки» нижнего уровня динамического диапазона АЦП к уровню сигнала, соответствующего минимальному темновому заряду. Максимальный сигнал $Q_{\max}$, поступающий на АЦП, должен соответствовать $(2^N - 1)$ уровням квантования, где N – разрядность АЦП. Тогда произвольному сигналу Q соответствует k уровней квантования:

$$k = \text{INT} \left(\frac{Q \cdot (2^N - 1)}{Q_{\max}} \right).$$

На этапе предварительной обработки сигнала из исходной последовательности чисел, поступающих с выхода АЦП, выделяются и запоминаются подмассивы чисел, соответствующие областям полезного сигнала. В выделенных подмассивах осуществляется компенсация сигнала от фона, который в общем случае может быть неоднородным. Возможные алгоритмы, используемые на стадии предварительной обработки сигнала, подробно описаны в [3].

Оценка координат объектов заключается в вычислении координат характерных точек, связанных с наблюдаемыми объектами, например, энергетических центров их изображений или координат точек, соответствующих максимумам освещенности в изображениях объектов [3]. Если стоит задача нахождения угловых координат объекта ψ и χ (выраженных в радианах), то пересчет координат изображения точечного объекта x и y (выраженных в числе пространственных периодов матричной структуры) осуществляется с учетом следующих соотношений:

$$\text{tg}\psi = x \cdot d/f; \quad \text{tg}\chi = y \cdot d'/f,$$

где d и d' – пространственный шаг элементов матричной структуры по горизонтали и вертикали соответственно, f – расстояние от объектива до плоскости фокусировки изображения. Очевидно, что подобное соотношение устанавливает связь между среднеквадратическими погрешностями измерения координат σ_x и σ_y .

Статистическая обработка результатов моделирования включает в себя подсчет числа ложных выбросов, числа пропусков объектов, оценку вероятности пропусков и среднеквадратических погрешностей измерения их координат.

Определение вероятности выделения ложного выброса $P_{\text{л.в.}}$ осуществляется методом статистических испытаний.

В режиме «поиск» расчетно-прогнозируемая вероятность выделения ложного выброса в кадре может быть определена по формуле

$$P_{\text{л.в.к.}} = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P_{\text{л.в.}}(i)], \quad (1)$$

где $P_{\text{л.в.}}(i)$ – вероятность ложного выброса в i -м элементе кадра. Поскольку (как указывалось ранее) число зарядов, накапливаемых в ячейках значительно больше 10, то флуктуации зарядов в ячейках можно приблизительно описывать нормальным законом распределения с дисперсией, равной среднему значению накопленных зарядов. При этом вычитание постоянной составляющей, соответствующей среднему числу зарядов, обеспечивается в результате выполнения процедуры «селекция» на этапе предварительной обработки сигнала. Таким образом,

$$P_{\text{л.в.}}(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi'}^{\infty} \exp[-x^2/2] dx,$$

где ξ' – относительный порог в разностном сигнале. Учитывая также, что величина относительного порога ξ' для каждого элемента устанавливается одинаковой (благодаря учету «карты» распределения темновых токов и чувствительности по кристаллу на этапе калибровки), можно считать, что $P_{\text{л.в.}}(i)$ не зависит от i . Тогда

$$P_{\text{л.в.к.}} = 1 - [1 - P_{\text{л.в.}}(i)]^N. \quad (2)$$

В режиме «слежение» при вычислении $P_{\text{л.в.к.}}$ в выражения (1) или (2) следует вместо числа элементов в кадре N подставлять число элементов N' в стробируемых окнах.

Обработка результатов серии косвенных измерений угловой координаты наблюдаемого объекта ψ сводится первоначально к нахождению результатов измерения $\tilde{x}$, оценки среднего квадратического отклонения (СКО) результата измерения $S(\tilde{x})$, доверительной границы случайной погрешности результата измерения ϵ_x и доверительной границы неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения θ_x , полученных при обработке прямых измерений [4]. Далее определяется оценка результата косвенного измерения $\psi(x)$ и рассчитывается доверительная граница погрешности результата прямого измерения Δ_x при доверительной вероятности 0,95:

$$\tilde{\psi} = \arctg(x \cdot d / f), \Delta_x = \begin{cases} \epsilon_x & \text{при } \frac{\theta_x}{S(\tilde{x})} < 0,8; \\ \theta_x & \text{при } \frac{\theta_x}{S(\tilde{x})} < 8; \\ KS_{\Sigma} & \text{при } 0,8 < \frac{\theta_x}{S(\tilde{x})} < 8; \end{cases}$$

вычисляются значения частной производной $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ при найденной величине $\tilde{x}$ и определяется доверительная граница погрешности результата измерения угловых координат при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$:

$$\Delta_{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \Delta_x.$$

Итог измерения угловой координаты записывается в виде $\psi = \tilde{\psi} \pm \Delta_{\psi}$; $\alpha = 0,95$. Аналогичные расчеты производятся для угловой координаты χ .

Заключение

На базе предложенной методики комплексного моделирования возможно на ранней стадии проектирования проводить анализ степени влияния каждого из физических факторов на обнаружительные, метрологические или иные характеристики ОЭС в целом. Модульная структура позволит проводить дальнейшее совершенствование модели путем дополнения ее необходимыми модулями (с учетом реальных потребностей и условий функционирования ОЭС) или путем замены отдельных модулей на альтернативные варианты без изменения остальных частей и структуры в целом.

Литература

1. Андреев А.Л. Автоматизированные телевизионные системы наблюдения. Часть I. Аппаратные средства и элементная база: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – СПб: СПбГУИТМО, 2005.
2. Андреев А.Л. Автоматизированные телевизионные системы наблюдения. Часть II. Арифметико–логические основы и алгоритмы: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – СПб: СПбГУИТМО, 2005.
3. Андреев А.Л., Ярышев С.Н. Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения: Методические указания к лабораторным работам. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
4. Бегункова А.Ф., Парфенов В.Г. Обработка результатов наблюдений при выполнении лабораторных работ физического практикума: Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1980.
5. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. – СПб: Папирус, 2003.
6. Ферапонтов М.М., Крицына Н.А., Деев Д.Л. Моделирование случайных воздействий на ЭВМ: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 1995.

Андреев Андрей Леонидович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, and-andr@yandex.ru

Лбова Татьяна Павловна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, tlbova@gmail.com

УДК 531.7.082.5:535.42/44

ИССЛЕДОВАНИЕ МУАР-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ЗАЗОРЕ МЕЖДУ «ТОЛСТЫМ» КРАЕМ И ПЛОСКОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А.Н. Иванов

Рассмотрена проблема извлечения информации о геометрических параметрах контролируемого объекта из муар-интерференционной картины, которая сформирована наложением частотных спектров этого объекта. Предложена конкретная методика для ее решения.

Ключевые слова: дифракция, муар, измерения.

Введение

При интерференционных измерениях информация о геометрических параметрах контролируемых объектов содержится в интерференционной картине – интерферограмме. Некоторую качественную информацию об этих параметрах можно получить по виду этой интерферограммы. Однако в большинстве случаев наибольший интерес представляет количественная информация. При этом для автоматизации контроля, увеличения точности и скорости получения результатов интерферограмма регистрируется ПЗС-матрицей и затем обрабатывается на компьютере. Для оценки измеряемой характеристики необходимо на стадии численного моделирования определить зависимость, связывающую изменение этой характеристики с изменением параметров интерференционной картины. Другим условием получения точных результатов является предварительная обработка интерферограмм, направленная на снижение шумов в ней без потери полезной информации об исследуемом объекте.

Формирование муар-интерференционных полос

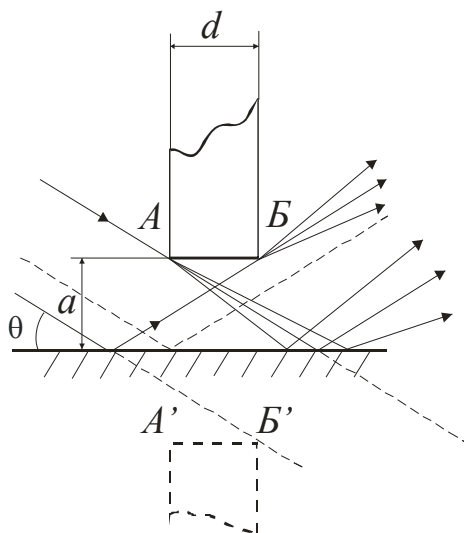


Рис. 1. Схема формирования дифракционной картины от «толстого» края

В работе [1] было предложено использовать для контроля геометрических параметров объекта дифракционную картину от зазора, образованного краем этого объекта и эталонной плоской отражающей поверхностью. Проведенные исследования показали, что при дифракции на таком зазоре в дифракционной картине формируется дополни-

тельная система муар-интерференционных полос. Эти полосы образуются наложением частотных спектров, сформированных при дифракции света на краях объекта A и B (рис. 1). Так как прямая и отраженная волны падают на края объекта с разными по знаку углами падения, то при смещении этих краев между их частотными спектрами появляется фазовый сдвиг, пропорциональный величине смещения

$$\psi = k \theta \Delta a / 2 + k \theta \Delta b / 2, \quad (1)$$

где k – волновое число, θ – угол падения волны на край, Δa и Δb – смещения краев A и B . Если объект наклонить относительно поверхности зеркала, то разность фаз будет изменяться вдоль зазора, и в дифракционной картине возникнет дополнительная система полос равной ширины.

В случае, когда толщина края $d \approx 0$ (тонкий край), распределение амплитуды от зазора в дальней области будет иметь вид

$$U(\omega_x, y') = A \operatorname{sinc}(k \omega_x a(y) / 2) \cos((k \omega_x a(y) + k \Delta a(y) \theta) / 2), \quad (2)$$

где $\omega_x = x' / z$ – пространственная частота, z – расстояние от зазора до плоскости регистрации. Рассматривая множители выражения (2) как пространственные решетки, удалось получить параметрическое уравнение полос $p = (2 \Delta a(y) \theta - \lambda) / 2 \lambda$ и определить, что они ориентированы строго перпендикулярно поверхности зеркала [1].

Когда $d \neq 0$, мы имеем «толстый» край. Полагая $\Delta a = \Delta b$ и пренебрегая срезанием части волнового фронта, проходящего через зазор, получим выражение для дальней области:

$$U(\omega_x, y') \approx A \operatorname{sinc}(k \omega_x a(y) / 2) \cos((k \omega_x a(y) + k \Delta a(y) \theta) / 2 - k \omega_x^2 d / 4). \quad (3)$$

Наличие «толстого» края приводит к частичному срезанию отраженного от зеркала волнового фронта в соответствии с выражением $a' = a - d \theta$. Мы не учитываем это, так как анализ выражений (2) и (3) показал, что равномерный сдвиг края не приводит к изменению параметров муаровых полос.

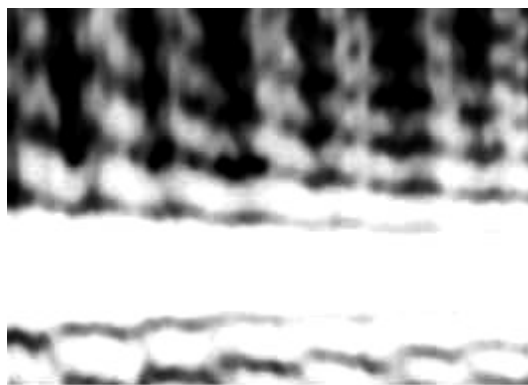


Рис. 2. Муар-интерференционная картина от зазора, образованного краем толщиной 0,9 мм и плоской отражающей поверхностью

Продольное смещение краев A и B приводит к фазовому сдвигу между частотными спектрами $\varphi = k d \omega_x^2 / 2$ [2] и искривлению муаровых полос (рис. 2). Параметрическое уравнение полос в этом случае имеет вид

$$p = (2 \Delta a(y) \theta - \omega_x^2 d - \lambda) / 2 \lambda. \quad (4)$$

Наклоняя объект относительно поверхности зеркала, получаем линейный закон изменения ширины зазора $\Delta a = \alpha y$, где α – угол наклона. Тогда уравнение (4) примет вид

$$y = (\omega_x^2 d + \lambda (2p + 1)) / 2\alpha\theta. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что, определив координаты центра полосы и порядок полосы p , можно определить толщину объекта.

Определение толщины объекта по муар-интерференционной картине

Анализ полученных муаровых картин показывает, что определить непосредственным измерением координаты полос невозможно. Невозможно определить и порядок регистрируемых полос. Кроме того, сама муаровая картина требует предварительной обработки для удаления из нее фоновых дифракционных полос. Поэтому была разработана методика, позволяющая определить нужный параметр косвенным методом.

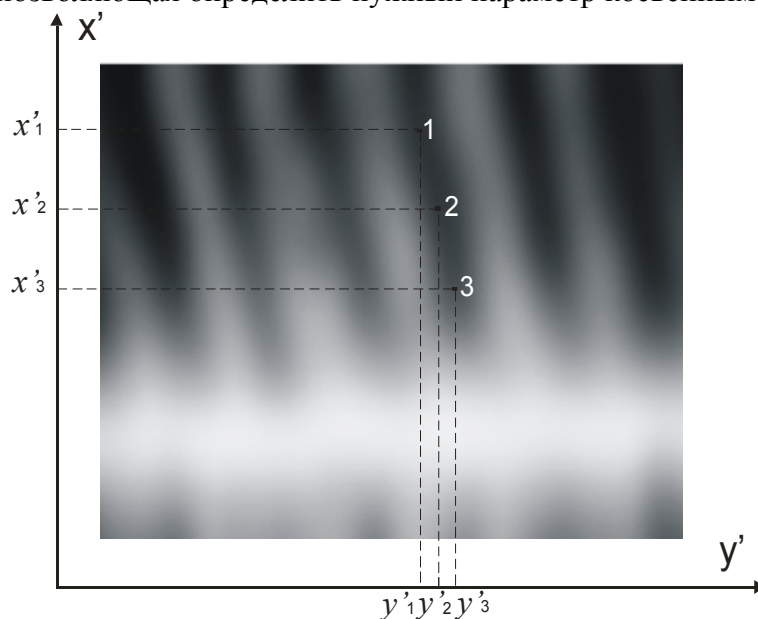


Рис. 3. Вид муар-интерференционной картины после ее обработки низкочастотным фильтром с функцией пропускания типа Гаусса

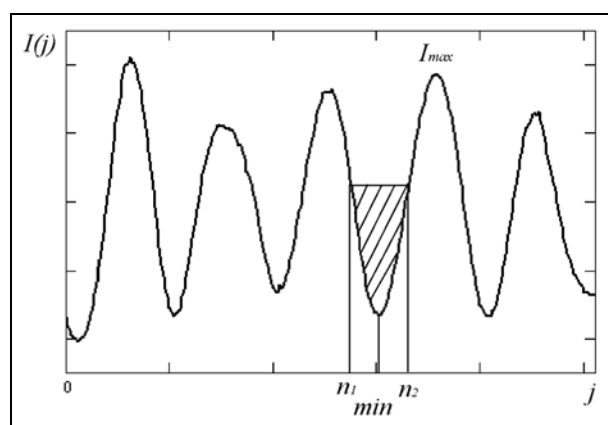


Рис. 4. Определение минимума полосы как центра тяжести фигуры

Сначала из муаровой картины удалялся фон. Для этого выполнялась свертка полученного изображения с одномерной функцией Гаусса, ширина купола которой определялась из выражения $\sigma_x \geq 3v$, где v – частота фоновых полос [3]. На следующем эта-

пе из муаровой картины удалялся высокочастотный аддитивный шум. Так как, согласно (5), ширина муаровых полос равна

$$S = y(p+1) - y(p) = \lambda / \alpha \theta,$$

то из Фурье-спектра изображения можно удалить все гармоники, частоты которых будут больше граничной частоты $\nu_{\text{гр}} = 2\pi / S$. Пример обработанной таким образом муаровой картины приведен на рис. 3.

Затем было выполнено три сечения зарегистрированной муаровой картины с координатами x'_1, x'_2 и x'_3 таким образом, что $\Delta x' = x'_3 - x'_2 = x'_2 - x'_1$ (рис. 3). По этим сечениям определялось смещение минимума муаровой полосы порядка p : $\Delta y'_2 = y'_3 - y'_2$ и $\Delta y'_1 = y'_2 - y'_1$. Положение минимума полосы определялось как центр тяжести заштрихованной фигуры, изображенной на рис. 4. Для этого сначала приближенно оценивалось положение минимума по наименьшей интенсивности сигнала и положение границ фигуры в пикселях изображения: $n_1 \approx m - (S/4t)$ и $n_2 \approx m + (S/4t)$, где t – размер одного пикселя. Затем приближенно оценивалась интенсивность сигнала в максимуме полосы порядка $p - I_{\text{max}}$. Центр тяжести фигуры определялся по формуле

$$\min = \sum_{j=n_1}^{n_2} ((I_{\text{max}}/2 - I(j))j) / \sum_{j=n_1}^{n_2} (I_{\text{max}}/2 - I(j)),$$

где $I(j)$ – интенсивность сигнала в j -м пикселе сечения.

Так как определить абсолютные координаты точек минимумов полос невозможно, попытаемся определить толщину объекта через разности этих координат. Для этого составим две системы уравнений, связывающих координаты точек минимумов, воспользовавшись для этого выражением (5):

$$\begin{cases} y'_3 = x'^2_3 d / 2z^2 \alpha \theta + \lambda (2p+1) / 2\alpha \theta, \\ y'_2 = x'^2_2 d / 2z^2 \alpha \theta + \lambda (2p+1) / 2\alpha \theta; \\ y'_2 = x'^2_1 d / 2z^2 \alpha \theta + \lambda (2p+1) / 2\alpha \theta, \\ y'_1 = x'^2_1 d / 2z^2 \alpha \theta + \lambda (2p+1) / 2\alpha \theta. \end{cases}$$

Вычитая уравнения, входящие в системы, друг из друга, получаем:

$$\Delta y'_2 = y'_3 - y'_2 = \Delta x' (x'_3 + x'_2) d / 2z^2 \alpha \theta, \quad (6)$$

$$\Delta y'_1 = y'_2 - y'_1 = \Delta x' (x'_2 + x'_1) d / 2z^2 \alpha \theta, \quad (7)$$

и, вычитая из уравнения (6) уравнение (7), получаем:

$$\Delta y'_2 - \Delta y'_1 = \Delta x' (x'_3 - x'_1) d / 2z^2 \alpha \theta.$$

С учетом того, что $x'_3 - x'_1 = 2\Delta x$, упрощаем выражение:

$$\Delta y'_2 - \Delta y'_1 = \Delta x'^2 d / z^2 \alpha \theta. \quad (8)$$

Таким образом, удалось связать разность координат центра муаровой полосы с толщиной края.

Экспериментальная часть

Для экспериментальной оценки предложенного метода был собран макет измерительной установки, изображенный на рис. 5. В роли контролируемого объекта был использован калиброванный цилиндр диаметром 13 мм с неотражающей поверхностью, изготовленный с допуском h9. Согласно методу эквивалентных диафрагм [4], его воздействие на падающую волну аналогично действию двух тонких краев, смещенных от-

носителем друг друга на расстояние $d = D\theta$, где D – диаметр цилиндра. Поэтому, оценив по муаровым полосам величину d , можно перейти от нее к диаметру цилиндра.

Регистрация муаровых полос производилась цифровой камерой со встроенным объективом. Поэтому, чтобы оценить размер пикселя изображения в плоскости матового экрана, на последний наносился эталонный объект. Расстояние от объекта до матового экрана выбиралось из условия наблюдения дифракции Фраунгофера $z \geq a^2 / \lambda$.

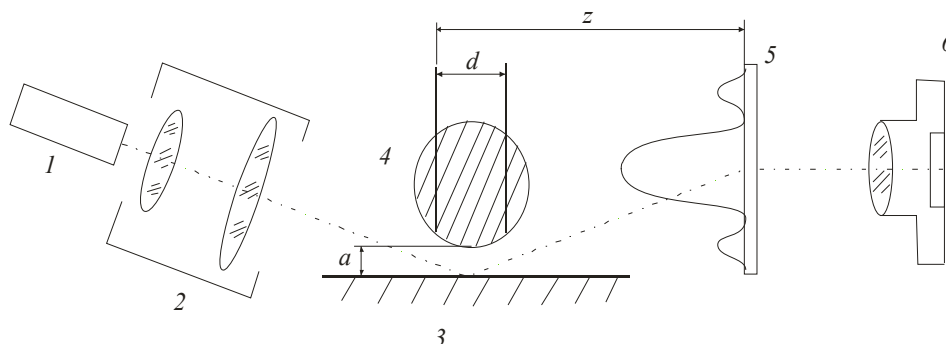


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для измерения диаметров цилиндров:
1 – лазер, 2 – формирователь пучка, 3 – плоская отражающая поверхность,
4 – контролируемый цилиндр, 5 – матовый экран, 6 – цифровая камера

На данной установке были проведены измерения диаметра цилиндра по приведенной выше методике. Погрешность измерения составила порядка 3 %. Такая достаточно большая погрешность может быть объяснена ошибкой установки дистанции δz и достаточно большой ошибкой измерения координат минимумов полосы. Хотя метод, основанный на определении минимума как центра тяжести фигуры, теоретически дает ошибку измерения сдвига полосы порядка 0,8 %, на практике эта ошибка сильно зависит от уровня шума. Ошибка установки дистанции обусловлена трудностью определения положения эквивалентных плоскостей. Эта ошибка может быть уменьшена использованием цилиндрического объектива, выполняющего преобразование Фурье. В этом случае положение эквивалентных плоскостей относительно линзы не оказывает влияния на параметры муаровой картины.

Заключение

Предложен дифракционный метод контроля толщин объектов, основанный на использовании муаровых полос, которые возникают при наложении частотных спектров краев объекта. Их использование позволяет значительно увеличить чувствительность измерений.

Получено параметрическое уравнение муаровых полос, позволившее связать координаты полосы с толщиной края. Так как абсолютные координаты полос не могут быть определены при измерениях, была разработана методика, позволяющая использовать для измерения толщины объекта разность координат нескольких точек центра полосы.

Для проверки правильности сделанных выводов был собран макет установки для измерения диаметров цилиндров предложенным методом. Получено хорошее совпадение между результатами численного моделирования и эксперимента. Доказана возможность применения предложенной методики для оценки толщины объекта. Увеличение точности предложенного метода может быть достигнуто путем применения более точного метода определения координат минимумов муаровых полос.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга в виде гранта № 28-04/18.

Литература

1. Иванов А.Н., Назаров В.Н. Использование явления муара для увеличения точности дифракционных методов контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 1. – С. 46–50.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970.
3. Грейсух Г.И., Ежов Г.И., Земцов А.Ю., Степанов С.А. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28.
4. Лемешко Ю.А, Чугуй Ю.В. Размерный контроль круговых отражающих цилиндров интерференционным методом // Автометрия. – 2003. – Т. 39. – № 5. – С. 42–52.

Иванов Александр Николаевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, i_off@mail.ru

УДК 681.7.068

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕЗАВИСИМОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

С.А. Миронов

Рассмотрена схема поляризационно-независимого оптического изолятора микрооптического типа, основанного на принципе смещения пучков. Проведен расчет вносимых потерь, изоляции и возвратных потерь изолятора, предназначенного для работы в аппаратуре волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: ВОЛС, невзаимные приборы, защита излучателей, оптические изоляторы, вносимые потери, изоляция, возвратные потери.

Введение

В современных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) для обеспечения стабильного режима одномодовой генерации полупроводникового лазера необходимо защитить его резонатор от воздействия случайных внешних отражений прямого излучения, поступающих из волоконного тракта. Отражения могут происходить от различных неоднородностей в тракте передачи, включая френелевские отражения от разъемных соединителей и мест сварки оптических волокон, а также от поверхностей элементов объемной оптики в функциональных устройствах ВОЛС. Кроме того, обратное релеевское рассеяние, возникающее в оптическом волокне, может вносить заметный вклад в обратно возвращающийся сигнал. В результате воздействия отражений возникают хаотические осцилляции выходной мощности, сдвиг и расширение спектра излучения, увеличение уровня шумов и даже коллапс когерентности лазера [1]. К числу объектов, требующих защиты излучателей, относятся высокоскоростные цифровые ВОЛС, аналоговые системы кабельного телевидения, когерентные ВОЛС, ВОЛС с оптическими усилителями, а также волоконно-оптические датчики интерферометрического типа [2].

Для защиты излучателей в аппаратуре ВОЛС используются оптические изоляторы (ОИ) [3], принцип действия которых основан на магнитооптическом эффекте Фарадея. ОИ является невзаимным оптическим прибором, коэффициент передачи которого изменяется в зависимости от направления распространения оптического излучения. Идеальный ОИ передает световую волну без затухания в одном (прямом) направлении и полностью ослабляет волну, распространяющуюся в обратном направлении. В настоящее время предложено несколько схем ОИ, изготовленных по микрооптической технологии [4–7]. Однако стандартная схема построения ОИ [4, 5] является поляризационно-зависимой, т.е. потери устройства зависят от поляризации входного излучения. Она может быть использована только в специальных случаях, когда состояние поляризации оптического излучения остается неизменным, например, непосредственно на выходе лазера. ОИ, устанавливаемые в аппаратуре линейного тракта ВОЛС, должны быть поляризационно-независимыми, чтобы исключить замирания передаваемого сигнала. Некоторые схемы таких устройств описаны в [3, 6, 7], однако расчет их характеристик не приводится.

В настоящей работе рассмотрена одна из простых схем поляризационно-независимого ОИ, основанного на принципе смещения пучков, который применяется в современных ВОЛС. Представлена методика расчета основных технических характеристик: потерь мощности излучения для прямого направления (вносимые потери), потерь для обратного направления (изоляция) и возвратных потерь (обратные отражения) от входа устройства. Выполнены численные оценки величин достижимых параметров ОИ.

Структурная схема и принцип работы поляризационно-независимого ОИ

Базовая схема и принцип работы однокаскадного ОИ на смещении пучков показаны на рис. 1. Аналогично схеме классического ОИ [4], для получения изоляции используется невзаимный поворот плоскости поляризации в фарадеевском ротаторе (ФР). Для применения в ВОЛС, работающих в диапазоне 1,3–1,55 мкм, ФР изготавливают на основе монокристаллов (или пленок) ферритов – гранатов с высокой магнитооптической добротностью, например, из иттрий-железного граната (ИЖГ) $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Следует отметить, что в коротковолновом диапазоне 0,85 мкм кристалл ИЖГ обладает значительным поглощением. Поэтому перспективными материалами являются висмут-содержащие гранаты [8], которые, в отличие от традиционных парамагнитных стекол [9], обладают большим фарадеевским вращением, не требуют сильных магнитных полей и обеспечивают малые размеры ФР. Вместо поляризатора и анализатора в схеме ОИ (рис. 1, а) используются двулучепреломляющие элементы (ДЛПЭ) из одноосных анизотропных кристаллов с большим двулучепреломлением, в частности, из рутила (TiO_2). В таких кристаллах при распространении света под углом к оптической оси происходит разделение входного излучения на две ортогонально поляризованные компоненты. Если при этом ДЛПЭ имеет форму плоскопараллельной пластинки, то на выходе появляются два параллельных луча – с обыкновенной (o) и необыкновенной (e) поляризацией, которые смещены в пространстве. Величина смещения o - и e - лучей зависит от толщины ДЛПЭ и типа кристалла. Так, например, для кристалла рутила при распространении под углом $\sim 45^\circ$ к оптической оси поперечное смещение $d \approx 0,1l$, где l – толщина ДЛПЭ. Для ввода и вывода излучения в схеме ОИ используется квазиконфокальная оптическая система, состоящая из двух линз, сопряженных с оптическими волокнами тракта ВОЛС.

На рис. 1, б, показаны пространственное положение пучков и направление поляризационных компонент для прямого и обратного распространения излучения через

ОИ. Заметим, что толщина ДЛПЭ-2 и ДЛПЭ-3 в $\sqrt{2}$ раз меньше толщины ДЛПЭ-1, а оси смещения лучей развернуты на углы 135° и 45° соответственно. При прямом распространении поступающее в ОИ через порт 1 оптическое излучение с произвольной поляризацией коллимируется линзой и попадает на ДЛПЭ-1. В ДЛПЭ-1 происходит разделение входного пучка (рис. 1, б, поз. 1) на две поляризационные компоненты (поз. 2), которые после прохождения через ФР (поз. 3), ДЛПЭ-2 (поз. 4) и ДЛПЭ-3 (поз. 5) объединяются в один общий пучок, который выходит из ОИ через порт 2. При рассмотрении обратного распространения следует учесть, что, поскольку при прохождении через ДЛПЭ-3 и ДЛПЭ-2 соблюдается закон взаимности (обратимости световых лучей), то в поз. 3 (рис. 1, б) пространственное положение *o*- и *e*- лучей и состояние поляризации в них должны быть идентичными как для прямого, так и для обратного направления. Но после прохождения ФР и дополнительного невзаимного вращения на 45° направления поляризации становятся ортогональными по отношению к входным (поз. 2). Поэтому после прохождения ДЛПЭ-1 (поз. 1) оба обратных луча не объединяются, а расходятся и оказываются смещенными на величину d относительно места входа излучения. Таким образом, обеспечивается высокая изоляция входного порта 1 независимо от поляризации обратно возвращающихся оптических сигналов.

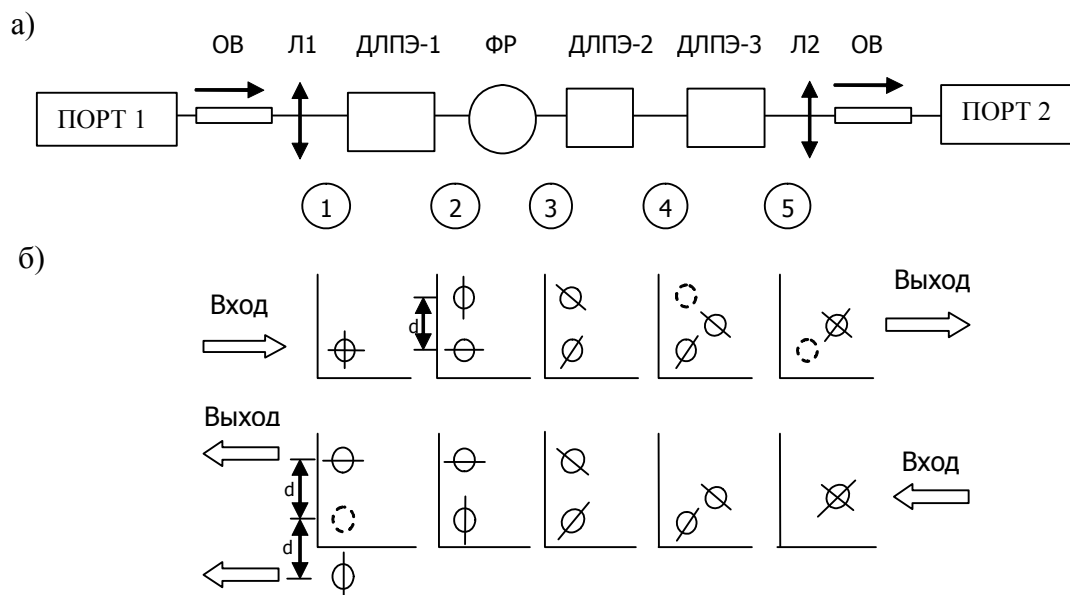


Рис. 1. Структурная схема однокаскадного ОИ (а) и положение поляризационных компонент на выходе из элементов ОИ для прямого и обратного направления (б). Цифрами 1–5 обозначены поперечные сечения в рассматриваемых позициях между элементами. ДЛПЭ – двулучепреломляющие элементы, ФР – фарадеевский ротатор, ОВ – оптическое волокно, Л – линза

Расчет характеристик ОИ

Вносимые потери ОИ A_{12} , т.е. потери для прямого направления распространения, рассчитываются по формуле

$$A_{12} = -10 \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где P_2 – оптическая мощность, измеренная на выходе ОИ (порт 2), P_1 – мощность, поступающая на вход (порт 1). Величина A_{12} может быть представлена в виде суммы потерь различных элементов в структуре ОИ:

$$A_{12} = A_{oc} + A_{длпэ} + A_{фр} + A_{тех}, \quad (2)$$

где A_{oc} – потери в оптической системе, $A_{длпэ}$ – потери в двулучепреломляющих элементах, $A_{фр}$ – потери в фарадеевском ротаторе, $A_{тех}$ – технологические потери.

Потери A_{oc} обусловлены абберационными потерями линз коллиматоров ($A_{аб}$), потерями, вызванными френелевскими отражениями на торцах ОВ и поверхностях линз ($A_{отр}$), а также потерями из-за погрешности юстировки элементов ($A_{юст}$):

$$A_{oc} = A_{аб} + A_{отр} + A_{юст}. \quad (3)$$

На практике при использовании в оптической системе коллиматоров на основе сферических микролинз из стекла К8 диаметром 1,5 мм типичные значения потерь составляют: $A_{аб} \approx 0,2$ дБ, $A_{отр} \approx 0,1$ дБ, $A_{юст} = 0,3–0,5$ дБ. Для системы на градиентных линзах, где снижены абберационные потери, значение A_{oc} обычно составляет 0,2–0,4 дБ.

Потери в двулучепреломляющих элементах $A_{длпэ}$ возникают в результате поглощения и рассеяния излучения внутри элемента $A_{пр}$ и френелевских отражений на рабочих поверхностях $A_{отр}$, следовательно,

$$A_{длпэ} = A_{отр} + A_{пр}. \quad (4)$$

Для ДЛПЭ, изготовленных из высококачественных монокристаллов рутила, $A_{пр} \approx 0$, поэтому $A_{длпэ} \approx A_{отр} = 0,05–0,1$ дБ. Таким образом, суммарные потери для трех ДЛПЭ составляют 0,2–0,3 дБ.

Потери в фарадеевском ротаторе рассчитываются аналогичным образом:

$$A_{фр} = A_{отр} + A_{пр} + A(\Delta\varphi_F). \quad (5)$$

Здесь $A(\Delta\varphi_F)$ – дополнительные потери, вызванные отличием угла фарадеевского вращения от 45° , которые рассчитываются по формуле [7]

$$A(\Delta\varphi_F) = -10 \lg[\cos^2(\Delta\varphi_F)] \text{ [дБ]}. \quad (6)$$

Следует отметить, что даже при значительном отклонении $\Delta\varphi_F = 1^\circ$, что легко регистрируется, величина $A(\Delta\varphi_F) < 0,005$ дБ, т.е. может не учитываться. Для ротаторов на основе кристаллов ИЖГ имеем $A_{фр} \approx 0,1–0,2$ дБ.

Оптические потери $A_{тех}$, связанные с технологическими допусками на изготовление и установку элементов при производстве ОИ, могут находиться на уровне $A_{тех} \approx 0,1–0,3$ дБ. Таким образом, расчетное значение прямых потерь ОИ может составлять $A_{12} = 0,7–1,3$ дБ в зависимости от уровня развития технологической базы.

Важной характеристикой ОИ, характеризующей изменение вносимых потерь, является поляризационная чувствительность (ПЧ). ПЧ определяется максимальной величиной изменения уровня выходного сигнала ОИ, которая возникает при вращении плоскости поляризации оптического излучения, подаваемого на вход ОИ. Как отмечалось ранее, для рассматриваемой схемы идеального ОИ (рис. 1) вносимые потери не зависят от поляризации распространяющегося излучения, т.е. такой ОИ является поляризационно-независимым устройством. Однако реальный ОИ обладает некоторой ПЧ, даже когда имеет место полное сведение пучков на выходе (рис. 1, б). Типичная величина ПЧ в этом случае составляет 0,1–0,2 дБ и обусловлена различием коэффициентов передачи o - и e -лучей (дихроизмом) при прохождении через элементы ОИ. Снижение ПЧ достигается поляризационным контролем и отбором элементов с идентичными коэффициентами поглощения, отражения и рассеяния для обеих поляризационных компонент.

Следует отметить, что в некоторых ОИ из-за неточностей изготовления и сборки элементов o - и e -лучи не сводятся в один пучок, и между ними на выходе ОИ (после ДЛПЭ-3) образуется пространственное рассогласование. Тогда ПЧ устройства может увеличиваться из-за погрешности установки выходного ОВ относительно оптимального положения, соответствующего минимальной ПЧ.

Изоляция характеризует потери передачи оптической мощности при обратном направлении распространения излучения через ОИ (т.е. из порта 2 в порт 1) и определяется следующей формулой:

$$I = A_{21} = -10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ [дБ]}, \quad (7)$$

где P_1 – оптическая мощность, измеренная на входном порте 1, когда мощность P_2 поступает на порт 2.

На практике величина изоляции конкретного ОИ определяется несколькими причинами. Теоретически максимальная достижимая изоляция может быть рассчитана в соответствии с принципом работы ОИ (см. рис. 1) как потери между двумя гауссовыми пучками, смещенными в поперечном направлении:

$$A_{21}^{\text{см}} = -10 \lg \exp \left[- \left(\frac{d}{\omega'} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где d – пространственное смещение o - и e - лучей в ДЛПЭ, ω' – радиус модового поля пучка, сформированного коллиматором оптической системы. Из (8) следует, что для получения большой изоляции необходимо увеличивать смещение пучков в ДЛПЭ и уменьшать диаметр коллимированного пучка. На рис 2 приведены расчетные зависимости (8) потерь A_{21} (изоляции) от поперечного смещения d для пучков с различным радиусом модового поля ω' . Как видно из рис. 2, значительная величина изоляции (~ 50 дБ) достигается при достаточно малом относительном смещении $d\omega' = 3,4$.

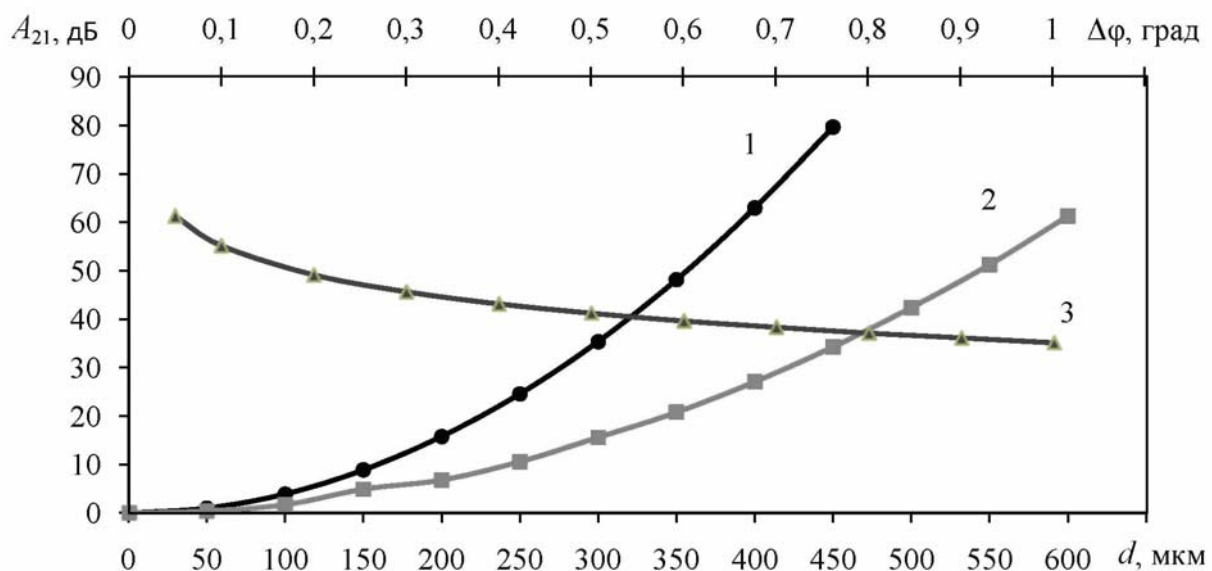


Рис. 2. Зависимость изоляции от величины смещения пучков (1, 2) и погрешности угла фарадеевского вращения (3) для различных пучков. Радиус модового поля:

1 – $\omega' = 105$ мкм, 2 – $\omega' = 160$ мкм

Однако в процессе изготовления ОИ из-за неточностей при юстировке и сборке устройства возможно уменьшение величины изоляции вследствие возникновения паразитных поляризационных компонент, которые достигают входа ОИ без смещения. Среди таких причин можно выделить, во-первых, угловое рассогласование взаимной ориентации ДЛПЭ (рис. 1, б), а также отклонение угла фарадеевского вращения от 45° . Значение изоляции определяется в этом случае выражением [7]

$$A_{21}^{\text{угл}} = -10 \lg [\sin^2(\Delta\phi)] \text{ [дБ]}, \quad (9)$$

где $\Delta\phi$ – величина угловой ошибки. На рис. 2 показано рассчитанное по (9) снижение уровня изоляции при возрастании отклонении угла фарадеевского вращения $\Delta\phi$ от номинального значения 45° . Для современного уровня технологии возможно получить $\Delta\phi \approx 0,1-0,2^\circ$, что ограничивает изоляцию на уровне 50–55 дБ. Во-вторых, это вторич-

ное переотражение в ФР, возникающее в результате несовершенства просветляющих покрытий [4]. Уровень изоляции при этом с учетом поперечного смещения пучка при прохождении через ФР можно оценить как

$$A_{21}^{\text{вн}} = 2A_{\text{отр}} - 10 \lg \exp \left[- \left(2t \frac{\sin \gamma}{n\omega'} \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (10)$$

где $A_{\text{отр}}$ – потери отражения просветляющих покрытий, t – длина ФР, обеспечивающая угол вращения $\varphi_F = 45^\circ$, n – показатель преломления материала ФР, ω' – радиус модового поля пучка, γ – угол наклона рабочих поверхностей ФР к оси распространения. Если взять, например, типичные значения: $2A_{\text{отр}} = 40\text{--}50$ дБ (коэффициент отражения покрытий $R = 0,3\text{--}1\%$), $t = 2,6$ мм, $n = 2,2$ (кристалл ИЖГ, длина волны 1,55 мкм), $\omega' = 105$ мкм и угол $\gamma = 1^\circ$, то оценка согласно (10) показывает ограничение изоляции на уровне $A_{21} \approx 41\text{--}51$ дБ. Еще одна причина снижения изоляции – рассеянное излучение в ДЛПЭ и ФР, возникающее вследствие наличия различных дефектов в кристаллах. Обычный уровень такого рассеянного неполяризованного излучения в стандартных кристаллов рутила и ИЖГ составляет $A_{\text{тех}} = 40\text{--}45$ дБ. Поэтому величина изоляции реального устройства определяется не теоретическим значением A_{21} , рассчитанным согласно (8), а ограничена наименьшим значением изоляции, обусловленным одной из перечисленных выше причин. Для рассмотренного однокаскадного ОИ типичное значение изоляции составляет $A_{21} = 40\text{--}45$ дБ. Для получения более высокой изоляции необходимо использовать многокаскадные ОИ [8, 9].

Возвратные потери. Возвратные (или обратные) потери ОИ характеризуют потери мощности поступающего входного сигнала в результате частичного отражения от входного порта. Они могут быть рассчитаны по формуле

$$A_{11} = -10 \lg \frac{P_1'}{P_1} \text{ [дБ]}, \quad (11)$$

где P_1 – оптическая мощность, вводимая во входной порт 1, P_1' – мощность, возвращенная обратно из этого же порта. В ОИ (рис. 1) источниками обратных френелевских отражений являются свободный торец ОВ, поверхности линзы входного коллиматора, а также поверхности ДЛПЭ и ФР. Для уменьшения отражений торец ОВ, как правило, имеет просветляющее покрытие и наклонен к оси волокна. В этом случае уровень обратных отражений от входного ОВ можно рассчитать по формуле

$$A_{11}^{\text{ОВ}} = A_{\text{отр}}^{\text{ОВ}} - 10 \lg \exp \left[- \left(\frac{2\alpha}{\theta} \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (12)$$

где $A_{\text{отр}}^{\text{ОВ}}$ – потери, определяемые коэффициентом отражения просветляющего покрытия на ОВ, α – угол наклона торца ОВ к оси, θ – угол распространения излучения в ОВ, определяемый его числовой апертурой. Если взять коэффициент отражения покрытия $R = 0,3\%$, то $A_{\text{отр}}^{\text{ОВ}} \approx 25$ дБ, и при $\alpha = 5,5^\circ$ и $\theta = 3,5^\circ$ получаем $A_{11}^{\text{ОВ}} \approx 68$ дБ.

Возвратные потери, вызванные отражениями от поверхностей ДЛПЭ и ФР, описываются выражением

$$A_{11}^{\text{Э}} = A_{\text{отр}}^{\text{Э}} - 10 \lg \exp \left[- \left(\frac{2\psi}{\theta'} \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (13)$$

где $A_{\text{отр}}^{\text{Э}}$ – потери просветляющего покрытия, ψ – угол наклона поверхности элемента к оси, $\theta' = \lambda/\pi\omega'$ – угловая расходимость пучка, сформированного входным коллиматором.

ром. В случае использования просветляющих покрытий с коэффициентом отражения $R = 1\%$ имеем $A_{\text{отр}}^{\circ} = 20$ дБ. Тогда для углов $\psi = 0,5^{\circ}$ и $\theta' \approx 0,29^{\circ}$ ($\omega' = 105$ мкм) получаем величину обратных потерь $A_{11}^{\circ} \approx 73$ дБ.

Возвратные потери, обусловленные френелевскими отражениями от линзы входного коллиматора, могут быть записаны в следующем виде:

$$A_{11}^{\text{л}} = A_{\text{отр}}^{\text{л}} + A^{\text{л}}(r, x), \quad (14)$$

где $A_{\text{отр}}^{\text{л}}$ – потери отражения просветляющего покрытия на линзе. Для коэффициента отражения $R = 0,3\%$ получаем $A_{\text{отр}}^{\text{л}} \approx 25$ дБ. Второе слагаемое $A(r, x)$ в (14) является функцией радиуса линзы и ее положения относительно оси пучка. Экспериментально установлено [15], что для сферической микролинзы диаметром порядка 1 мм величина $A^{\text{л}}(r, x) \approx 40$ дБ. Таким образом, расчетный уровень обратных отражений от линзы составляет $A_{11}^{\text{л}} \approx 65$ дБ. В заключение следует отметить, что величина возвратных потерь всего устройства A_{11} определяется наименьшим значением возвратных потерь, обусловленных отражением от его компонентов ($A_{11}^{\text{об}}$, A_{11}° , $A_{11}^{\text{л}}$), и на практике обычно находится в пределах 55–60 дБ.

Спектральная и температурная область работы ОИ

При эксплуатации ОИ в составе ВОЛС важное значение приобретают такие характеристики, как спектральный диапазон и температурный интервал работы устройства, в пределах которых вносимые потери и изоляция удовлетворяют требуемым значениям. Ширина спектрального диапазона $\Delta\lambda$ определяется совместным действием различных причин: дисперсией показателей преломления материалов, из которых изготовлены элементы, характеристиками просветляющих покрытий, а также дисперсией фарадеевского вращения в кристалле ФР. Обычно спектральный диапазон работы ОИ является достаточно узким, $\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 1\text{--}2\%$ (здесь $\lambda_0 = 1545$ нм – рабочая длина волны). Поэтому можно считать, что характеристики покрытий и материалов в этом диапазоне при $\Delta\lambda$ от -15 нм до $+15$ нм изменяются незначительно и практически не влияют на величину вносимых потерь и изоляции, а основное влияние оказывает дисперсия фарадеевского вращения. Для кристалла ИЖГ спектральная зависимость удельного фарадеевского вращения $\phi'_F(\lambda)$ является нелинейной, но в узкой области в окрестности $\lambda_0 = 1545$ нм, где $\phi'_F(\lambda_0) = 173,1$ град/см [4], возможна линейная аппроксимация с коэффициентом $d\phi'_F/d\lambda \approx -0,2$ град/(см·нм). Тогда на краях диапазона, где $\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$, отклонение угла фарадеевского вращения ФР от номинального значения 45° можно определить по формуле

$$\Delta\phi_F(\lambda) = \left| 45^{\circ} - \phi_F(\lambda) \right| = \left| \frac{d\phi'_F}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda \right| \cdot t, \quad (15)$$

где t – длина ФР. В этом случае вносимые потери и изоляцию можно рассчитать согласно (6) и (9) соответственно. Расчеты показывают, что при изменении длины волны на $\Delta\lambda$ от λ_0 происходит монотонное снижение изоляции. Так, при $\Delta\lambda = 15$ нм, когда отклонение угла фарадеевского вращения составляет $\Delta\phi_F \approx 0,8^{\circ}$, изоляция в соответствии с (9) составляет ~ 37 дБ, а при $\Delta\lambda = 20$ нм имеем $\Delta\phi_F \approx 1^{\circ}$ и величину изоляции ~ 35 дБ. Что касается вносимых потерь, то в соответствии с (6), даже на краях диапазона, когда $\Delta\lambda = 20$ нм, увеличение вносимых потерь составляет не более 0,005 дБ и может не учитываться. Та-

ким образом, ширина спектрального диапазона работы ОИ определяется допустимым уровнем снижения изоляции и составляет на практике 30–40 нм.

Изменение вносимых потерь и изоляции может происходить также при воздействии температуры T , что обусловлено, главным образом, температурной зависимостью фарадеевского вращения. Изменение T вызывает отклонение угла поворота плоскости поляризации в ФР от оптимального значения $\varphi_F = 45^\circ$. Температурные зависимости вносимых потерь и изоляции, также как и рассмотренные ранее спектральные зависимости, могут быть рассчитаны по формулам (6) и (9) для различных отклонений $\Delta\varphi_F(T)$, определенных аналогично $\Delta\varphi_F(\lambda)$ (15).

Для кристалла ИЖГ известно, что в интервале T от 0°C до 47°C температурный коэффициент удельного фарадеевского вращения $d\varphi_F'/dT \approx -0,13$ град/(см·К) [10]. Проведенные расчеты показывают, что при длине ФР $t=0,26$ см и удельном вращении ИЖГ $\varphi_F'=173,1$ град/см (для $T_0=20^\circ\text{C}$ и $\lambda_0=1545$ нм) отклонение угла фарадеевского вращения от 45° составляет $\Delta\varphi_F \approx 1^\circ$ в интервале температур T от -10°C до $+50^\circ\text{C}$. Тогда в соответствии с (9) на краях указанного температурного интервала изоляция уменьшается до уровня ~ 35 дБ, но при этом согласно (6) увеличение вносимых потерь пренебрежимо мало ($<0,005$ дБ).

Таким образом, и ширина спектрального диапазона, и величина температурного интервала работы ОИ определяются допустимым уровнем снижения величины изоляции.

Заключение

Рассмотрена схема однокаскадного поляризационно-независимого оптического изолятора, основанного на принципе смещения пучков, который используется в аппаратуре ВОЛС. Рассчитаны основные технические характеристики – вносимые потери, изоляция и возвратные потери. Показано, что при современном уровне технологии практически достижимые параметры составляют: вносимые потери 0,7–1,3 дБ, изоляция 40–45 дБ, возвратные потери 55–60 дБ. Улучшение этих характеристик возможно при изготовлении элементов ОИ (ДЛПЭ, ФР) из оптически однородных кристаллов со сниженным до 50–60 дБ уровнем рассеянного излучения, потерями не более 0,05 дБ и просветляющими покрытиями с коэффициентом отражения не более 0,1 %. Предложенная методика может быть использована для расчета более сложных структур многокаскадных оптических изоляторов [11, 12] и циркуляторов [13, 14].

Литература

1. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE Journal on Quantum Electronics. – 1980. – Vol. QE-16. – P. 347–352.
2. Pan J.J., Shih M., Shih K. High-performance fiberoptic systems rely on special isolators // Laser Focus World. – 1993. – №6. – P. 167–169.
3. Chang K.W., Schmidt S., Sorin W.V. et al. A high-performance optical isolator for lightwave systems // Hewlett-Packard Journal. – 1991. – № 2. – P. 45–50.
4. Fischer G. The Faraday optical isolator // Journal of Optical Communications. – 1987. – V. 8. – № 1. – P. 18–21.
5. Green A.F., Georgiou G. Compact bulk optical isolator with monomode fibre pigtails for use at 1.3 μm // Electronics Letters. – 1986. – V. 22. – № 10. – P. 1045–1046.
6. Shirasaki M., Asama K. Compact optical isolator for fibers using birefringent wedges // Applied Optics. – 1982. – V. 21. – № 23. – P. 4296–4299.

7. Chang K.W., Sorin W.V. Polarization independent isolator using spatial walkoff polarizers // IEEE Photonics Technology Letters. – 1989. – V. 1. – P. 68–70.
8. Tsushima K. A compact high-performance optical isolator // JEE. – 1984. – V. 21. – № 205. – P. 78–80.
9. Kuwahara H., Onoda Y., Sasaki M. An optical isolator for semiconductor lasers in the 0,8 μm range // Optical Communications. – 1984. – V. 40. – № 2. – P. 99–104.
10. Matsumoto S., Suzuki S. Temperature-stable Faraday rotator material and its use in high-performance optical isolators // Applied Optics. – 1986. – V. 25. – № 12. – P. 1940–1945.
11. Shiraishi K., Kawakami S. Cascaded optical isolator configuration having high-isolation characteristics over a wide temperature and wavelength range // Optics Letters. – 1987. – V. 12. – № 7. – P. 462–464.
12. Chang K.W., Sorin W.V. High-performance single-mode polarization-independent isolators // Optics Letters. – 1990. – V. 15. – № 8. – P. 449–451.
13. Рудов Ю.К., Зингеренко Ю.А., Оробинский С.П., Миронов С.А. Применение оптических циркуляторов в волоконно-оптических системах передачи // Электросвязь. – 1999. – № 6. – С. 36–38.
14. Koga M., Matsumoto T. High-isolation polarization-insensitive optical circulator for advanced optical communication systems // Journal of lightwave technology. – 1992. – V. 10. – № 9. – P. 1210–1217.
15. Drögemüller K. A compact optical isolator with a plano-convex YIG lens for laser-to-fiber coupling // Journal of lightwave technology. – 1989. – V. 7. – № 2. – P. 340–346.

Миронов Сергей Александрович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физико-математических наук, ст.н.с., доцент, s.a.mironov@inbox.ru

УДК 538.9+538.958

**ДИНАМИКА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS В ГИДРОФОБНЫХ
РАСТВОРИТЕЛЯХ****В.Е. Адрианов, А.О. Орлова, В.Г. Маслов, А.В. Баранов, А.В. Федоров**

В статье приведены результаты исследования долговременной эволюции спектрально-люминесцентных свойств квантовых точек на основе CdSe/ZnS в различных гидрофобных растворителях, в том числе и в зависимости от концентрации поверхностно-активных веществ в растворах.

Ключевые слова: квантовая точка, спектральные исследования, гидрофобные растворители.

Введение

Коллоидные полупроводниковые нанокристаллы размером 2–10 нм, или квантовые точки (КТ), благодаря своим уникальным оптическим, химическим, физическим свойствам широко применяются в оптоэлектронике, фотонике, биологии и медицине [1]. Из-за малого размера нанокристаллы обладают свойствами, отличными от объемных полупроводниковых кристаллов. Пространственное ограничение движения носителей заряда в нанокристалле приводит к квантоворазмерному эффекту, выражающемуся в дискретной структуре электронных уровней, из-за чего КТ иногда называют «искусственными атомами» [2].

Оптические параметры квантовых точек (спектры поглощения и люминесценции) зависят от размеров нанокристаллов. Поэтому, меняя их размеры и химический состав, можно получить спектры излучения квантовых точек в широкой области длин волн – от ближнего ультрафиолета до ближнего ИК диапазона. При этом квантовые точки имеют большой коэффициент поглощения (до единиц $10^6 \text{ М}^{-1}\text{см}^{-1}$) в широкой полосе, что позволяет возбуждать разные нанокристаллы светом с одной и той же длиной волны. Спектр люминесценции КТ представляет собой относительно узкую полосу, положение максимума которой зависит от среднего размера КТ, а ширина определяется разбросом КТ по размерам, который достигает 5–10%. Кроме того, при высоком квантовом выходе люминесценции (до 80 %) такие нанокристаллы обладают достаточно высокой химической устойчивостью и фотостабильностью.

На основе коллоидных нанокристаллов в жидких растворах возможно создание надмолекулярных гибридных структур (комплексов КТ/молекула, КТ/КТ) с управляемыми спектрально-люминесцентными свойствами, что является на сегодняшний день одной из важных задач в области применения квантовых точек [3]. Для решения этой проблемы необходимо проведение исследований стабильности оптических параметров КТ в различных гидрофобных растворителях, в том числе и в зависимости от концентрации поверхностно-активных веществ в растворах, что является целью настоящей работы.

Объекты и методы исследования

Для исследования зависимости спектрально-люминесцентных свойств от типа растворителя были использованы гидрофобные сферические квантовые точки типа ядро/оболочка CdSe/ZnS, полученные методом высокотемпературного металлоорганиче-

ского синтеза [4]. Синтезированные нанокристаллы покрыты слоем поверхностно-активных молекул триоктилфосфина оксида (ТОРО), что дает возможность растворения КТ в гидрофобных растворителях, таких как гексан, четыреххлористый углерод, хлороформ и т.д., и предотвращает агрегацию КТ. Количество ТОРО в поверхностном слое зависит от условий синтеза и может варьироваться в достаточно широких пределах. Следует отметить, что молекулы ТОРО привязаны к поверхности нанокристаллов посредством слабой координационной связи, поэтому при растворении КТ часть молекул ТОРО переходит в раствор до достижения химического равновесия между свободными и связанными с КТ молекулами. В растворах с относительно высокой концентрацией КТ или избытком ТОРО на поверхности количество связанных молекул ТОРО остается достаточным для предотвращения агрегации КТ и стабильности растворов. Обеднение поверхностного слоя молекул в растворах КТ низкой концентрации или исходный недостаток ТОРО на поверхности часто приводят к неконтролируемой агрегации и выпадению КТ из раствора. В то же время относительно низкие концентрации КТ в растворах ($\sim 10^{-6}$ – 10^{-7} М) являются оптимальными для различных приложений. В этом случае следует ожидать существенного влияния количества молекул ТОРО на поверхности нанокристаллов на стабильность спектрально-люминесцентных характеристик КТ, таких как амплитуды, спектральные положения и полуширины полос поглощения и люминесценции, а также квантовый выход люминесценции.

Оценку исходного количества ТОРО на поверхности КТ можно сделать путем сравнения массы одной CdSe/ZnS КТ без ТОРО, рассчитанной с использованием известных плотностей CdSe и ZnS и их объема, с массой КТ, покрытой ТОРО, определенной по экспериментально измеренным спектрам поглощения и люминесценции растворов КТ известной концентрации [5]. Используя этот подход, мы в качестве модельного объекта исследований выбрали КТ, имеющие явный недостаток молекул ТОРО на поверхности. Разница между «расчетной» и «экспериментальной» массами КТ (масса ТОРО на поверхности) составила всего 10%. Растворы нанокристаллов имели длинноволновые максимумы поглощения вблизи 510 нм, максимумы люминесценции около 530 нм с молярным коэффициентом экстинкции $\varepsilon \sim 6,5 \cdot 10^4 \text{ М}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (на длине волны 510 нм). Диаметр ядра нанокристаллов составлял 2,5 нм [5]. Эксперименты проводились в диапазоне низких концентраций нанокристаллов ($\sim 5 \cdot 10^{-7}$ М).

Для изучения временной зависимости стабильности спектрально-люминесцентных характеристик КТ от количества ТОРО на поверхности нанокристаллов были исследованы растворы КТ в гексане и хлороформе в чистых растворителях и с добавлением молекул ТОРО различной концентрации ($C=3 \cdot 10^{-2}$ – $3 \cdot 10^{-6}$ М). Также нами была исследована эволюция спектрально-люминесцентных свойств квантовых точек в четыреххлористом углероде без добавления избыточного количества молекул ТОРО в раствор. Спектры поглощения и люминесценции растворов регистрировались на спектрофотометре Shimadzu (UV-3600) и спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама».

В качестве эталона при определении квантового выхода люминесценции нанокристаллов использовался раствор родамина 6Ж в этаноле ($\phi = 0,88$).

Результаты и обсуждение

Раствор КТ в гексане. Сразу после растворения КТ в гексане без добавления избыточного количества молекул ТОРО наблюдалось эффективное тушение люминесценции КТ с характерным временем $\sim 2,5$ часа, которое сопровождалось более медленным уменьшением амплитуды длинноволновой полосы поглощения (рис. 1 и 2). Последнее свидетельствует о выпадении КТ из раствора. При этом квантовый выход люминесценции, составлявший сразу после приготовления раствора 25 %, через 4 часа

уменьшился в 2,5 раза, в то время как интенсивность люминесценции за то же время уменьшилась практически в 5 раз. Уменьшение интенсивностей люминесценции и поглощения не сопровождалось существенными изменениями полуширины спектра люминесценции, которая составила 27 нм. Также не происходило и сдвигов положений максимумов поглощения и люминесценции, которые изначально находились на 514 нм 528 нм соответственно.

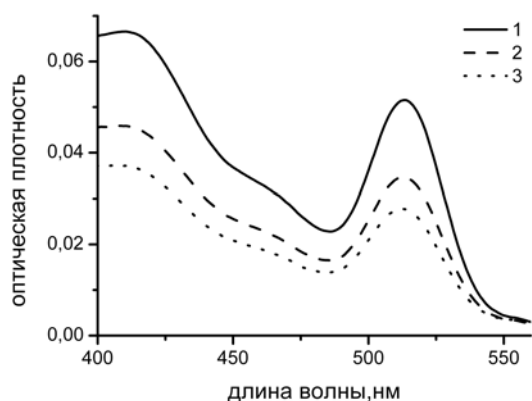


Рис. 1. Спектры поглощения КТ CdSe/ZnS в гексане: 1 – начальный момент времени, 2 – через 150 мин, 3 – через 250 мин

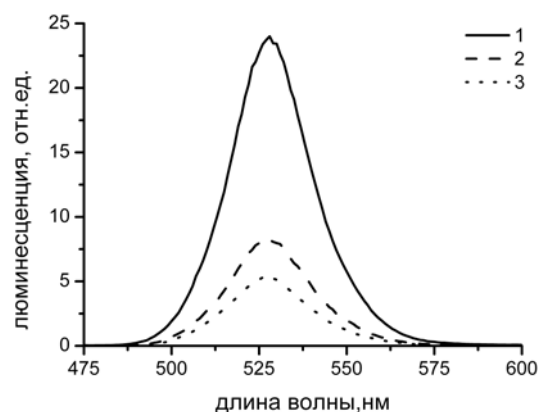


Рис. 2. Спектры люминесценции КТ CdSe/ZnS в гексане (при длине волны возбуждения 415 нм): 1 – начальный момент времени, 2 – через 150 мин, 3 – через 250 мин

В случае растворения КТ CdSe/ZnS в гексане с добавками молекул ТОРО полуширина полосы люминесценции и положение максимумов поглощения и люминесценции КТ были такими же, как и в эксперименте с гексаном без добавления ТОРО. В то же время оптическая плотность в длинноволновой полосе не зависела от времени, что свидетельствует об отсутствии выпадения квантовых точек из растворов, обогащенных молекулами ТОРО. Сразу после приготовления растворов квантовый выход люминесценции КТ, как и в случае гексана без добавления ТОРО, составил 25 %. Однако прослеживалось отличие в эволюции люминесценции КТ. В растворе КТ в гексане с ТОРО с концентрацией $3 \cdot 10^{-4}$ М, спектры поглощения и люминесценции которого приведены на рис. 3 и 4 соответственно, не претерпевали существенных изменений в течение указанных выше временных интервалов. Через 48 часов после разведения квантовый выход люминесценции незначительно уменьшился (до 20 %), но в течение следующих 330 часов вернулся к начальному значению. Аналогичным образом изменялась люминесценция и в двух других растворах ($C=3 \cdot 10^{-2}$ М и $C=3 \cdot 10^{-3}$ М), однако в них на начальном этапе квантовый выход люминесценции уменьшился до 13 % и, несмотря на последующий постепенный рост, так и не достиг первоначального значения. Отсюда можно заключить, что в рассматриваемом случае для долговременной стабильности оптических характеристик КТ CdSe/ZnS в гексане достаточно дополнительной концентрации $3 \cdot 10^{-4}$ М молекул ТОРО в растворе. Уменьшение же со временем квантового выхода люминесценции КТ при увеличении концентрации ТОРО, добавляемого в раствор, связано, скорее всего, с увеличением привносимых примесей. С другой стороны, при меньшей концентрации ТОРО в растворе ($C=3 \cdot 10^{-6}$ М), несмотря на отсутствие спектральных проявлений выпадения КТ, динамика тушения люминесценции была значительно интенсивнее. Так, квантовый выход люминесценции уже за 4 часа уменьшился до 9 %. Таким образом, была найдена оптимальная концентрация молекул ТОРО, которые необходимо добавить в раствор гексана с КТ для получения наилучших люминесцентных характеристик.

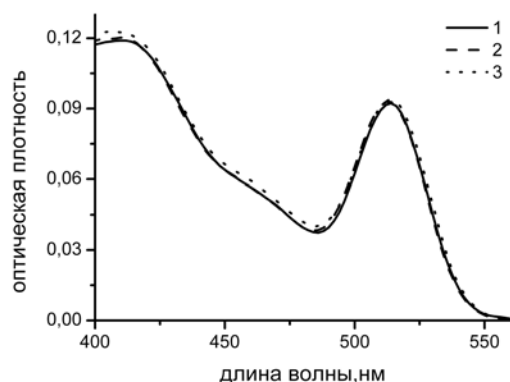


Рис. 3. Спектры поглощения КТ CdSe/ZnS в гексане с ТОРО $C=3 \cdot 10^{-4}$ М: 1 – сразу после разведения раствора, 2 – через 48 часов, 3 – через 300 часов

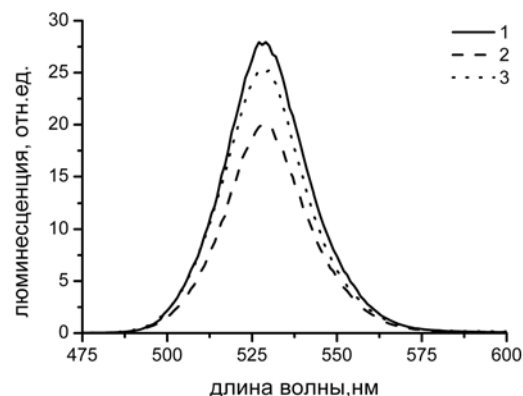


Рис. 4. Спектры люминесценции КТ CdSe/ZnS в гексане с ТОРО $C=3 \cdot 10^{-4}$ М (при длине волны возбуждения 415 нм): 1 – сразу после разведения раствора, 2 – через 48 часов, 3 – через 300 часов

Раствор КТ в четыреххлористом углероде. Сразу после приготовления раствора КТ в четыреххлористом углероде квантовый выход люминесценции КТ был на порядок ниже, чем в гексане (около 3 %). На рис. 5 и 6 представлены спектры поглощения и люминесценции КТ в четыреххлористом углероде соответственно. После приготовления растворов люминесценция КТ монотонно росла, и через 300 часов квантовый выход люминесценции достиг своего максимального значения (16 %). Максимумы полос поглощения и люминесценции свежеприготовленного раствора соответствовали 511 нм и 529 нм при полуширине полосы люминесценции 25 нм. Стоксов сдвиг полосы люминесценции КТ увеличивался со временем. В спектрах поглощения и люминесценции со временем наблюдалось смещение максимумов в коротковолновую область, которое через 600 часов составило 19 нм и 9 нм соответственно.

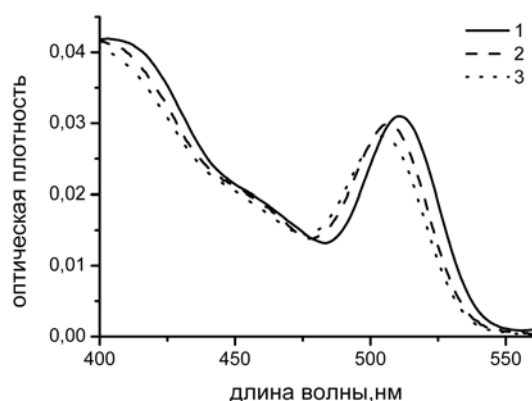


Рис. 5. Спектры поглощения КТ CdSe/ZnS в четыреххлористом углероде: 1 – в первый день эксперимента, 2 – через 300 часов, 3 – через 600 часов

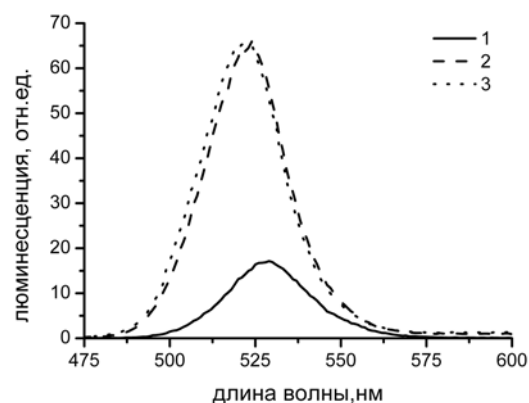


Рис. 6. Спектр люминесценции КТ в четыреххлористом углероде (при длине волны возбуждения 415 нм): 1 – в первый день эксперимента, 2 – через 300 часов, 3 – через 600 часов

Наблюдаемый спектральный сдвиг полос можно объяснить изменением сольватной оболочки КТ, частичным замещением молекул ТОРО молекулами растворителя и частичной дезагрегацией КТ. В отличие от гексана, в четыреххлористом углероде не наблюдалось выпадения квантовых точек из раствора в осадок. С этой точки зрения четыреххлористый углерод является более благоприятной средой для КТ с недостатком

молекул ТОРО на поверхности. В то же время наблюдаемые нами изменения в спектрах поглощения и люминесценции квантовых точек не позволяют говорить о полной стабильности оптических характеристик данных КТ в четыреххлористом углероде.

Раствор КТ в хлороформе. При растворении КТ в хлороформе положение максимума поглощения – 507 нм, положение максимума люминесценции – 532 нм. Длинноволновое положение максимума люминесценции по сравнению с другими растворами может свидетельствовать о том, что сразу после растворения в хлороформе КТ уже находятся в агрегированном состоянии. Это косвенным образом подтверждается и тем обстоятельством, что исходный квантовый выход люминесценции КТ в хлороформе был на два порядка ниже (около 0,2 %), чем в гексане. Надо отметить, что эволюция спектрально-люминесцентных свойств аномальна. В спектре поглощения наблюдалось уширение длинноволновой полосы поглощения, сопровождающееся уменьшением ее интенсивности (рис. 7), что является проявлением агрегации и выпадения КТ из раствора. Поэтому следовало ожидать падения интенсивности люминесценции с характерным длинноволновым сдвигом максимума полосы люминесценции. Вместо этого интенсивность люминесценции раствора быстро возрастала. Квантовый выход люминесценции увеличивался, и через 24 часа после приготовления раствора составил 13 % (кривые 3 на рис. 7 и 8), т.е. оставшиеся в растворе КТ по квантовому выходу люминесценции сопоставимы с КТ в гексане.

Такую динамику оптических свойств КТ в хлороформе можно объяснить следующим образом. Благодаря малости своего размера молекулы хлороформа могут, проникая в пространство между квантовыми точками в агрегатах, разрыхлять структуру этих образований, делая упаковку агрегатов менее плотной. Взаимодействие между КТ в агрегате уменьшается, что в конечном итоге приводит к увеличению квантового выхода люминесценции и сдвигу полосы люминесценции в коротковолновую область. Такой процесс может приводить к дезагрегации КТ, не успевших выпасть из раствора. Стоит отметить, что, в отличие от гексана, молекулы четыреххлористого углерода и хлороформа способны координационно связываться с поверхностными ионами цинка КТ и изменять тем самым сольватную оболочку КТ.

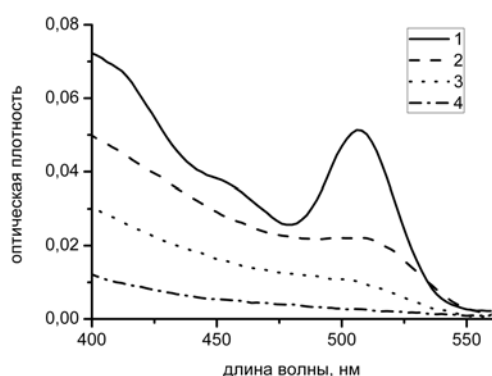


Рис. 7. Спектры поглощения КТ CdSe/ZnS в хлороформе: 1 – сразу после разведения раствора, 2 – через 2 часа, 3 – через 24 часа, 4 – через 144 часа

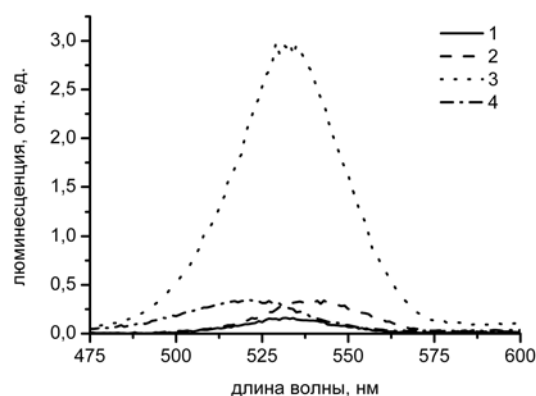


Рис. 8. Спектр люминесценции КТ в хлороформе (при длине волны возбуждения 415 нм): 1 – сразу после разведения раствора, 2 – через 2 часа, 3 – через 24 часа, 4 – через 144 часа

При разбавлении КТ в хлороформе с добавкой ТОРО концентрации $C=3 \cdot 10^{-4}$ М и $C=3 \cdot 10^{-6}$ М молекул ТОРО привели к уменьшению люминесценции КТ. Вероятно, это связано с тем, что наличие молекул хлороформа, способных присоединяться к КТ, препятствует координационному присоединению ТОРО. При внесении вместе с ТОРО тушащих примесей ухудшаются оптические свойства КТ в растворе.

Выводы

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства растворов КТ CdSe/ZnS (концентрация растворов около $5 \cdot 10^{-7}$ М), имеющих недостаточное количество молекул ТОРО, связанных с поверхностью оболочки нанокристалла. Получены данные о долговременной стабильности оптических свойств КТ в гексане, четыреххлористом углероде и хлороформе. Продemonстрировано, что для растворов в гексане необходимым условием стабильности спектрально-люминесцентных свойств КТ в растворах низких концентраций является достаточное количество молекул ТОРО, связанных с поверхностью квантовых точек. Для данных КТ стабильность их оптических свойств в гексане может быть обеспечена добавлением в раствор избыточного количества молекул ТОРО (оптимальная концентрация $3 \cdot 10^{-4}$ М). Частичное замещение молекул ТОРО молекулами растворителя, например, четыреххлористого углерода, предотвращает выпадение КТ из раствора в осадок, но приводит к изменению спектрально-люминесцентных свойств нанокристаллов – существенным сдвигам полос поглощения и люминесценции в область коротких длин волн.

Анализ экспериментальных данных для растворов КТ в хлороформе показал, что в этом растворителе КТ исходно находятся в агрегированном состоянии. Благодаря возможности координационного присоединения молекул хлороформа и четыреххлористого углерода к поверхности КТ в этих растворах происходит частичная дезагрегация и изменение сольватной оболочки КТ, которые приводят к увеличению квантового выхода люминесценции, изначально низкого в данных растворителях.

Литература

1. Олейников В.А., Суханова А.В, Набиев И.Р. Флуоресцентные полупроводниковые нанокристаллы в биологии и медицине // Российские нанотехнологии. – 2007. – №1–2. – С. 160–173.
2. Федоров А.В., Баранов А.В. Оптика квантовых точек // В кн. Оптика наноструктур / Под ред. Федорова А.В. – СПб.: Недра, 2005. – 181 с.
3. Sapsford K.E., Pons T., Medintz I.L., Mattoussi H. Biosensing with Luminescent Semiconductor Quantum Dots // Sensors. – 2006. – V. 6. – P. 925–953.
4. Rosenthal S.J., McBride J., Pennycook S.J., Feldman L.C. Synthesis, surface studies, composition and structural characterization of CdSe, core/shell and biologically active nanocrystals // Surface Science Reports. – 2007. – V. 62. – P. 111–157.
5. Yu W.W., Qu L., Guo W., Peng X. Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals // Chem. Mater. – 2003. – V. 15. – P. 2854–2860.

Адрианов Владимир Евгеньевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, adriatika@front.ru
Орлова Анна Олеговна	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший научный сотрудник, udfa@mail.ru
Маслов Владимир Григорьевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий научный сотрудник, maslov@sp.ru
Баранов Александр Васильевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, начальник отдела, a_v_baranov@yahoo.com
Федоров Анатолий Валентинович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, заведующий кафедрой, a_v_fedorov@inbox.ru

УДК 538.9+538.958

УСЛОВИЯ ДИССОЦИИАЦИИ КОМПЛЕКСА ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ КВАНТОВАЯ ТОЧКА/ОРГАНИЧЕСКАЯ МОЛЕКУЛА В ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ

Ю.А. Топорова, А.О. Орлова, В.Г. Маслов, А.В. Баранов, А.В. Федоров

Приведены результаты спектрального исследования комплекса квантовая точка (КТ) / молекула органического красителя 1-(2-пиридилазо)-2-нафтола (ПАН) в гидрофобных растворах и тонких полимерных пленках в присутствии ионов металлов. На основе полученных данных сделаны выводы об условиях формирования комплекса КТ/ПАН в растворах и пленках и его диссоциации в присутствии ионов металлов. Сделан вывод о перспективности использования данного комплекса в качестве чувствительного элемента диссоциативного люминесцентного сенсора.

Ключевые слова: квантовая точка, органический краситель, диссоциация, ионы металлов.

Введение

В настоящее время пристальное внимание уделяется исследованиям гибридных наноструктур, состоящих из полупроводниковых нанокристаллов или квантовых точек (КТ) и органических молекул, и их применениям в различных приложениях. Использование полупроводниковых нанокристаллов создает уникальную возможность изменением геометрических параметров менять физические, химические, оптические и другие свойства как КТ, так и комплексов и систем, в состав которых они входят [1]. На основе таких систем в настоящее время, в частности, разрабатывается новое поколение сверхчувствительных люминесцентных сенсоров для использования в биологии, медицине и экологии [2].

Данная работа посвящена исследованию процессов образования комплексов квантовая точка/молекула органического красителя и их диссоциации при взаимодействии с ионами различных металлов в гидрофобных растворителях и в тонкой полимерной пленке. Часто при исследовании таких процессов анализируемым сигналом служит изменение (уменьшение или увеличение) интенсивности люминесценции КТ, что в ряде случаев обусловливается безызлучательным резонансным переносом энергии (Fluorescence Resonant Energy Transfer, FRET) от донора (КТ) к акцептору (органической молекуле) [3]. Чтобы в системе был возможен перенос энергии по механизму FRET, необходимо одновременное выполнение двух условий: расстояние между донором и акцептором не должно превышать 10 нм, а спектр поглощения акцептора должен перекрываться со спектром люминесценции донора.

Для исследований были использованы гидрофобные квантовые точки CdSe/ZnS, а в качестве органической молекулы нами был выбран азокраситель 1-(2-пиридилазо)-2-нафтол (ПАН), который, являясь металлоиндикатором, может создавать комплекс с КТ посредством координационной связи с ионами цинка на поверхности оболочки КТ. В созданном комплексе выполняются все условия для эффективного переноса энергии между нанокристаллом и органической молекулой: расстояние между координационно связанными КТ и молекулой много меньше 10 нм, а перекрытие спектра люминесценции КТ со спектром поглощения молекулы легко обеспечить, выбрав наночастицу нужного размера. Поэтому люминесценция КТ в составе комплекса может быть полностью потушена.

Комплекс КТ/ПАН был получен в разных гидрофобных растворителях и внедрен в тонкие полимерные пленки толщиной 1–3 мкм. Мы ожидали, что в присутствии ионов других металлов будет происходить диссоциация комплекса КТ/ПАН с образованием комплекса ПАН/ион металла, что может быть обнаружено по появлению люминесценции КТ.

Объекты исследования

В данной работе при создании комплексов были использованы гидрофобные квантовые точки CdSe/ZnS с диаметром 2,5 нм, коэффициентом экстинкции $5,9 \times 10^4 \text{ М}^{-1} \text{ см}^{-1}$ [4], максимумом полосы люминесценции на длине волны 530 нм, полушириной 27 нм и стоксовым сдвигом 14 нм. Для придания растворимости в гидрофобных растворителях КТ покрыты молекулярной оболочкой ТОРО (триоктилфосфиноксид).

В качестве молекулы органического красителя использовался 1-(2-пиридилазо)-2-нафтол (ПАН), обладающий индикаторными свойствами на изменение pH и ионы некоторых металлов [5]. ПАН в зависимости от величины pH и присоединенных ионов способен находится в трех формах: нейтральной (желтая), кислой (желто-зеленая) и щелочной (сиреневая). На рис. 1 и 2 приведена структура ПАН в различных формах, а также спектры поглощения ПАН в основной форме и в комплексе с цинком. Известно, что при образовании комплекса ПАН/ Zn^{2+} молекула ПАН переходит в щелочную форму.

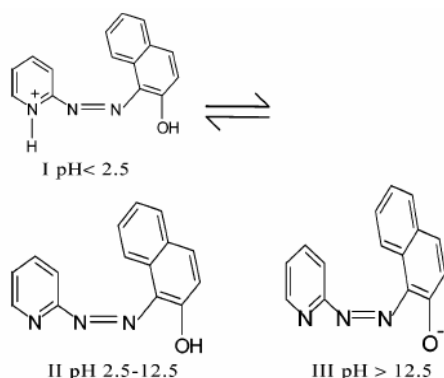


Рис. 1. Структура ПАН при различных значениях pH [7]

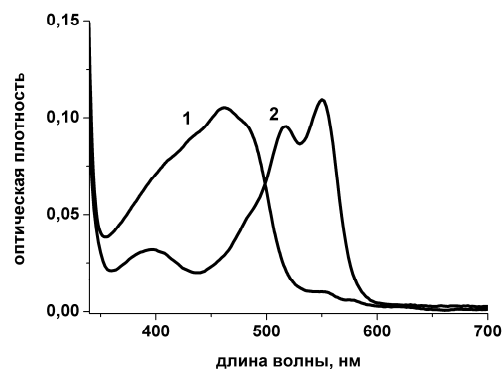


Рис. 2. Спектры поглощения основной формы ПАН (1) и комплекса ПАН/ Zn^{2+} в ацетоне (2)

Для проведения спектрально-люминесцентных измерений использовался спектрофлуориметр «Флюорат-02-Панорама» («Люмекс», Россия), с помощью которого измерялись спектры люминесценции и, в некоторых случаях, спектры пропускания, а также спектрофотометр «UV-Probe 3600» («Shimadzu»).

При изучении процесса комплексообразования и выбора оптимального растворителя нами были проведены эксперименты по смешиванию растворов КТ и ПАН известных концентраций в различных гидрофобных растворителях с последующим наблюдением за изменениями спектров поглощения и люминесценции растворов.

При смешивании растворов квантовых точек и молекул ПАН в четыреххлористом углероде наблюдалось эффективное тушение люминесценции КТ, которое сопровождалось параллельным появлением и дальнейшим увеличением интенсивности полосы с максимумом на 560 нм в спектрах поглощения смеси растворов КТ и ПАН. На рис. 3 и 4 приведены спектры поглощения и люминесценции смеси КТ и органического красителя в четыреххлористом углероде (к раствору КТ объемом 3 мл с концентрацией $2 \times 10^{-7} \text{ М}$ добавлялось 20 мкл раствора ПАН с концентрацией $2 \times 10^{-6} \text{ М}$). Предварительные исследования показали, что наиболее эффективное взаимодействие КТ и ПАН наблюдается при соотношении КТ к ПАН 1:10. При таком соотношении концентраций наблюдается практически полное тушение люминесценции КТ (рис. 4). В соответствии с нашими экспериментальными данными (рис. 2, спектр 2) и по литературным данным [6] полоса поглощения с максимумом 560 нм относится к комплексу органического красителя с ионами Zn.

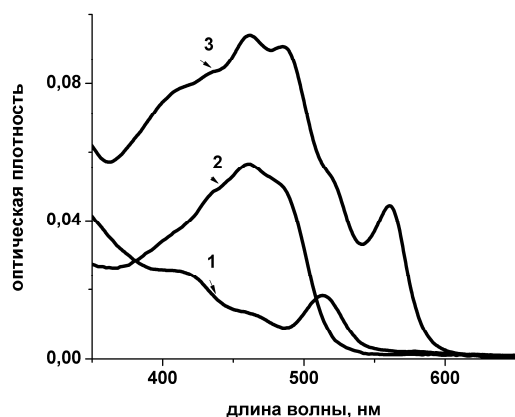


Рис. 3. Спектры поглощения: 1 – КТ в CCl_4 , 2 – ПАН в CCl_4 , 3 – смеси КТ и ПАН в CCl_4

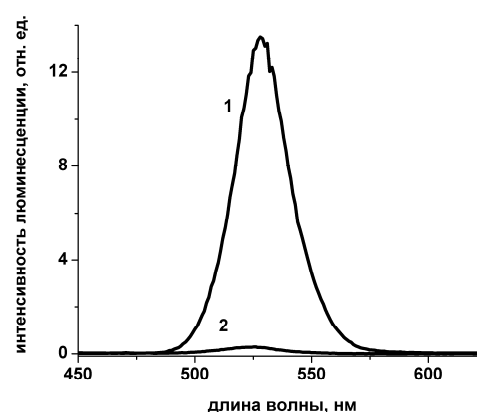


Рис. 4. Спектры люминесценции КТ: 1 – в CCl_4 , 2 – после добавления раствора ПАН в CCl_4 . Длина волны возбуждающего излучения 360 нм

Нами также были получены комплексы КТ/ПАН в других растворителях (толуоле, гексане, хлороформе). Об этом свидетельствует наблюдающееся увеличение оптической плотности раствора на длине волны 560 нм с параллельным тушением люминесценции квантовых точек при добавлении микроколичеств раствора ПАНа в раствор КТ. В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены спектры поглощения и люминесценции толуольных растворов смеси квантовых точек и молекул пиридилазонафтола (20 мкл раствора ПАН концентрации $2,9 \times 10^{-3}$ М и 3 мл раствора КТ концентрации 1×10^{-7} М).

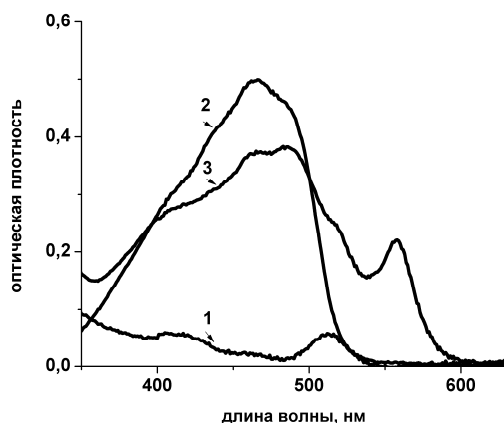


Рис. 5. Спектр поглощения: 1 – КТ в толуоле, 2 – ПАН в толуоле, 3 – смеси КТ и ПАН в толуоле

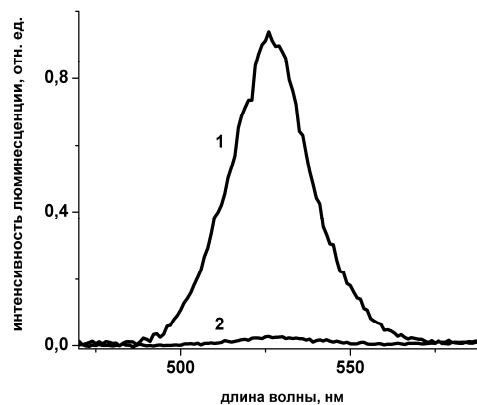


Рис. 6. Спектры люминесценции КТ: 1 – в толуоле, 2 – после добавления в толуол раствора ПАН. Длина волны возбуждающего излучения 360 нм

Несмотря на то, что при смешивании в толуоле, гексане и других растворителях квантовых точек и молекул мы наблюдали параллельное тушение люминесценции КТ и увеличение полосы поглощения на 560 нм, вопрос о том, происходит ли образование комплекса КТ/ПАН посредством координационной связи ПАНа с поверхностными ионами цинка или молекулы ПАН образуют комплексы с ионами цинка, отрывая их с поверхности оболочки КТ, оставался невыясненным. Для ответа на него мы провели эксперимент по получению комплексов КТ/ПАН в ацетоне. Следует отметить, что в ацетоне КТ нерастворимы. Поэтому раствор КТ с концентрацией 8×10^{-5} М был получен в

четырёххлористом углероде, затем порциями по 50 мкл наносился на стеклянную подложку, испарялся и смывался с подложки раствором ПАН концентрации 1×10^{-6} М в ацетоне. Спектры поглощения КТ в CCl_4 и ПАН в ацетоне приведены на рис. 7.

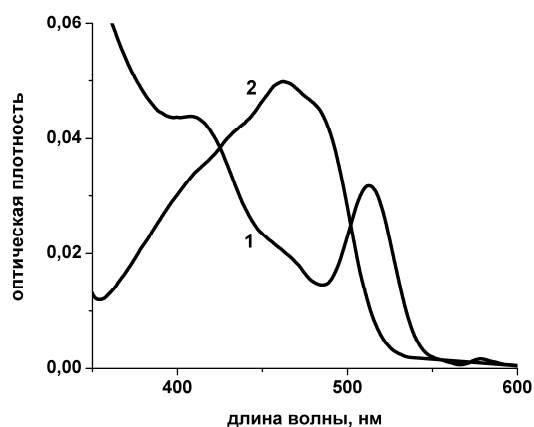


Рис. 7. Спектры поглощения: 1 – КТ в CCl_4 , 2 – ПАН в ацетоне

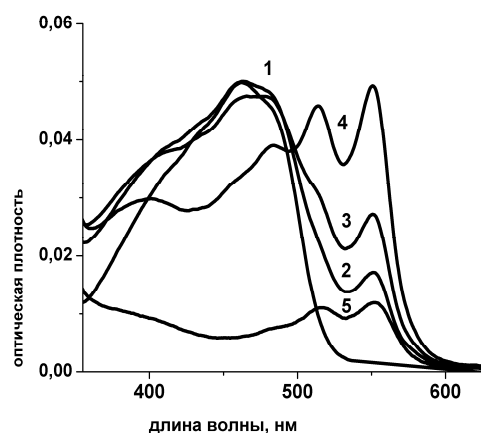


Рис. 8. Спектры поглощения: 1 – раствора ПАН в ацетоне, 2–4 – раствора ПАН после добавления в ацетон последовательно одной, двух, трех и четырех порций КТ, 5 – раствора (4) через 3 дня после приготовления раствора

На рис. 8 показано, что при последовательном добавлении квантовых точек к раствору ПАН в ацетоне наблюдался постепенный переход красителя в форму, соответствующую комплексу с ионами Zn, при полном тушении люминесценции КТ. При максимальной концентрации КТ мы наблюдали практически полное исчезновение полосы на 460 нм, соответствующей исходной форме ПАН, с параллельным увеличением оптической плотности на полосе 560 нм. Важно, что через несколько дней хранения наблюдалось существенное уменьшение оптической плотности в спектре поглощения ПАН (рис. 8, спектр 5), что свидетельствует об уменьшении концентрации органических молекул в растворе. ПАН, образовавший комплекс с ионами металлов, находится в устойчивом состоянии, поэтому его выпадение в таком случае кажется невозможным. Следовательно, факт выпадения ПАН указывает на образование комплексов КТ/ПАН.

Анализ полученных спектров поглощения и люминесценции позволяет сделать вывод о том, что ПАН, координационно присоединяясь к ионам цинка на поверхности оболочки нанокристалла и замещая при этом ТОРО, создает комплекс КТ/ПАН вне зависимости от растворителя.

Полученные нами комплексы квантовых точек с молекулами пиридазонафтола были внедрены в полимерную среду. Данный технологический прием позволил нам проводить эксперименты по изучению условий диссоциации комплекса КТ/ПАН в полимерной среде при воздействии на него ионами металлов, просто помещая пленочный образец в водный раствор соли определенного металла. Полимерные пленки были приготовлены путем нанесения на лавсановую подложку полиуретанового двухкомпонентного клея с введенным в него толуольным раствором комплексов КТ/ПАН в соотношении 1:10. При толщине полимерной пленки 3 мкм средняя поверхностная концентрация КТ составляла 4×10^{-4} М, а ПАН соответственно 4×10^{-3} М. В полимерных пленках люминесценция нанокристаллов была полностью потушена, и в спектре поглощения пленочных образцов присутствовали полосы, соответствующие комплексу красителя с ионами цинка. Регистрация спектров поглощения проводилась на спектрофото-

метре «UV-Probe 3600» («Shimadzu») с использованием интегральной сферы. Спектры люминесценции регистрировались в кюветном отделении спектрофлуориметра «Флюорат – 02 – Панорама» под углом 45° к направлениям возбуждения и регистрации люминесценции.

Образцы пленок с комплексами КТ/ПАН на несколько часов помещались в водные растворы солей металлов. После этого регистрировались спектры поглощения и люминесценции пленок. Нами были проведены эксперименты с водными растворами азотнокислого кобальта, сернокислого никеля и уксуснокислого хрома.

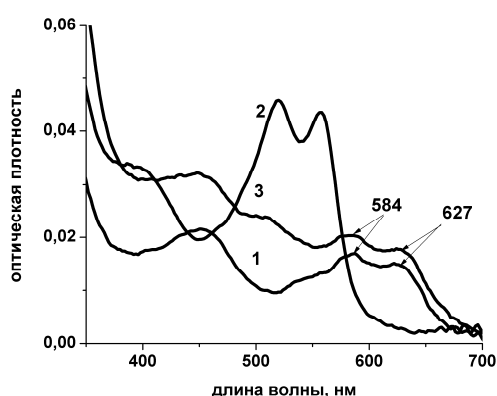


Рис. 9. Спектры поглощения полимерной пленки: 1 – с ПАН после обработки ионами кобальта; 2 – с комплексом КТ/ПАН до обработки ионами кобальта; 3 – с комплексом КТ/ПАН после обработки ионами кобальта

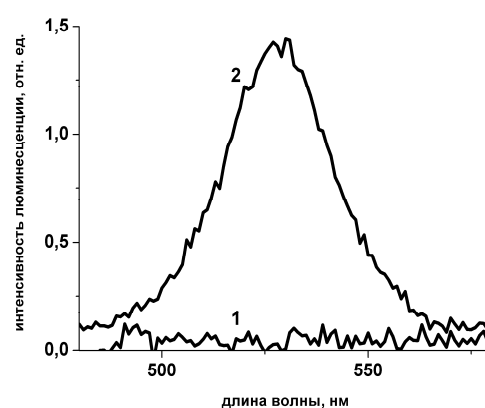


Рис. 10. Спектры люминесценции полимерной пленки: 1 – с комплексом КТ/ПАН, 2 – с комплексом КТ/ПАН после обработки ионами кобальта. Длина волны возбуждающего излучения 360 нм

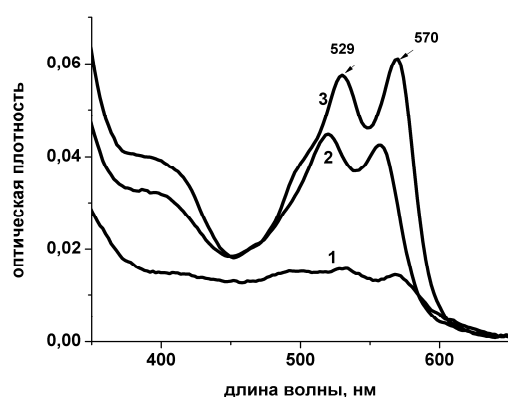


Рис. 11. Спектры поглощения полимерной пленки: 1 – с ПАН в после обработки ионами никеля; 2 – с комплексом КТ/ПАН; 3 – с комплексом КТ/ПАН в присутствии ионов никеля

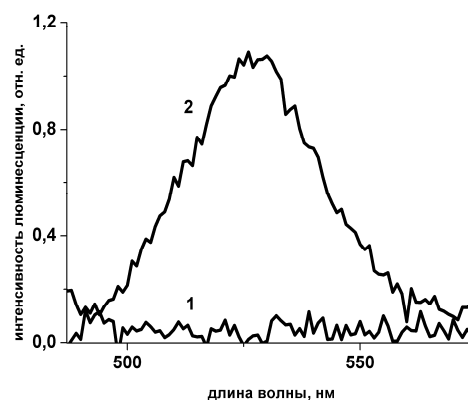


Рис. 12. Спектр люминесценции полимерной пленки: 1 – с комплексом КТ/ПАН; 2 – с комплексом КТ/ПАН в присутствии ионов никеля. Длина волны возбуждающего излучения 360 нм

В случае раствора хрома с концентрацией ионов вплоть до 5×10^{-4} М люминесценции квантовых точек в данных образцах зарегистрировано не было. Изменений в спектре поглощения образцов также не наблюдалось. Из этого можно сделать вывод о том, что, находясь в полимерной среде, ПАН не образует комплексов с ионами хрома, и соответственно диссоциации комплексов КТ/ПАН не происходит. В то же время для раствора, содержащего ионы кобальта с концентрацией $\sim 10^{-5}$ М (рис. 9 и 10), в полимерных пленках наблюдалось возгорание люминес-

ценции КТ и одновременное появление полос поглощения на 584 нм и 627 нм, которые, согласно литературным данным [7], соответствует комплексу азокрасителя с ионами кобальта.

Для раствора с ионами никеля ($C = 2,3 \times 10^{-5}$ М) также наблюдалось возгорание люминесценции КТ одновременно с появлением полос поглощения на длинах волн 529 нм и 570 нм, соответствующих полосам поглощения комплекса ПАНа с ионами никеля. На рис. 11 и 12 соответственно приведены спектры поглощения и люминесценции пленочных образцов с комплексами КТ/ПАН в присутствии в растворе ионов никеля.

Заключение

В работе было исследовано образование комплексов КТ/ПАН в различных гидрофобных растворителях. Показано, что во всех случаях смешивание растворов КТ и органических молекул приводит к появлению полосы поглощения с максимумом 560 нм и увеличению ее интенсивности с параллельным тушением люминесценции квантовых точек. Основываясь на этих фактах, мы сделали вывод об образовании комплекса КТ/ПАН путем координационного присоединения молекул ПАНа к ионам Zn^{2+} , находящимся на оболочке КТ.

На основе полученных в толуольном растворе комплексов КТ/ПАН были приготовлены полимерные пленки, содержащие эти комплексы. В образцах пленок, обработанных ионами никеля и кобальта, было зарегистрировано появление полосы люминесценции, по положению, форме и полуширине соответствующей полосе люминесценции используемых в работе КТ. В спектре поглощения пленок было зарегистрировано появление новых полос, соответствующих комплексу ПАНа с ионом металла, которым обрабатывался образец. При этом наблюдалось значительное уменьшение оптической плотности в полосе на 560 нм. Следовательно, за время нахождения полимерных пленок с комплексом КТ/ПАН в водном растворе, содержащем ионы никеля или кобальта, происходит диффузия ионов в слой полимера, которая приводит к образованию комплекса азокрасителя с соответствующим ионом металла.

Появление люминесценции КТ и изменения в спектре поглощения пленочного образца указывают на диссоциацию комплекса КТ/ПАН. В то же время сигнал люминесценции КТ, появляющийся в результате диссоциации комплекса квантовых точек с красителем, оказывается несколько ниже ожидаемого, что может свидетельствовать о наличии тушащих факторов в самой полимерной среде. Для решения этой проблемы необходимы дальнейшие исследования в области поиска оптимальной полимерной среды для внедрения полученных нами комплексов. Факт отсутствия люминесценции в комплексе и ее появление в результате диссоциации при появлении в анализируемой пробе ионов металлов открывает широкие перспективы для использования данного комплекса в качестве чувствительного элемента диссоциативного тонкопленочного наносенсора.

Литература

1. Федоров А.В., Баранов А.В. Оптика квантовых точек. // В кн. Оптика наноструктур / Под ред. Федорова А.В. – СПб: Недра, 2005. – 181 с.
2. Schroder G.F., Grubmuller H. FRETsg. Biomolecular structure model building from multiple FRET experiments // Comput. Phys. Commun. – 2004. – V. 158. № 3. – P. 150–157.
3. Goldman E.R., Medintz I.L., Whitley J.L., Hayhurst A., Clapp A.R., Mattoussi H.A. Hybrid Quantum Dot-Antibody Fragment Fluorescence Resonance Energy Transfer-Based TNT Sensor // J. Am. Chem. Soc. – 2005. – V. 127. – № 18. – P. 6744–6751.
4. Peng X., Manna L., Yang W., Wickham J., Scher E., Kadavanich A., Alivisatos A.P. // Nature. – 2000. – V. 59. – P. 404.

5. Cheng K.L. Complexometric Titration of Copper and Other Metals in Mixture 1-(2-Pyridylazo)-2-naphthol (Dye) as Indicator // Anal. Chem. – 1958. – V. 30. – № 2. – P. 243–245.
6. Kumar M., Sharma V., Rao L.J. Column Preconcentration and Spectrophotometric Determination of Ziram and Zineb in Commercial Samples and Foodstuffs Using (1,2.-Pyridylazo)-2-naphthol (PAN)-Naphthalene as Adsorbate // Food Chem. – 2004. – V. 52. – P. 7763–7767.
7. Иванов В.М. Гетероциклические азотсодержащие азосоединения – М.: Наука, 1982. – 270 с.

<i>Топорова Юлия Александровна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, toriyuliya@yandex.ru
<i>Орлова Анна Олеговна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший научный сотрудник, udfa@mail.ru
<i>Маслов Владимир Григорьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий научный сотрудник, maslov@sp.ru
<i>Баранов Александр Васильевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, начальник отдела, a_v_baranov@yahoo.com
<i>Федоров Анатолий Валентинович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, заведующий кафедрой, a_v_fedorov@inbox.ru

УДК 535.421

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СИНТЕЗА И ЦИФРОВОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ

О.В. Никаноров, Ю.А. Иванов, С.Н. Корешев

Рассмотрены особенности синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для использования в голографическом варианте фотолитографического процесса. Сформулирована и обоснована необходимость поиска альтернативных методов фотолитографии. Основное внимание уделено алгоритмам синтеза и восстановления голограмм-проекторов. Представлен интерфейс созданного программного комплекса. Обсуждаются примеры синтеза и последующего восстановления изображения тестового объекта.

Ключевые слова: голограмма, синтез, восстановление, фотолитография.

Введение

В настоящее время наметилась тенденция к разделению подходов к фотолитографическим технологиям, используемым для изготовления различных электронных, оптоэлектронных и дисплейных элементов и систем. Для первого подхода основной задачей является стремление к более высокому разрешению, что приводит к необходимости применения малых полей зрения, при втором же подходе для ускорения производственных процессов и понижения стоимости продукции первоочередным является использование широких полей зрения при достаточно высоком разрешении. При этом уменьшения минимального отображаемого характеристического размера изготавливаемых структур добиваются путем увеличения разрешающей способности используемых для этих целей оптических систем. Традиционный метод повышения разрешения основан на увеличении апертуры объектива и уменьшении длины волны. Он приводит к постепенному переходу в более коротковолновую область, в том числе и экстремально коротковолновую ультрафиолетовую и рентгеновскую, для которых нет оптически

прозрачных сред, пригодных для создания объективов-рефракторов. Так, при работе на длине волны 13 нм могут использоваться только зеркальные объективы. Существенными недостатками зеркальных систем являются малые поля зрения, необходимость большого количества отражающих поверхностей и сложность их изготовления [1, 2].

Все вышеперечисленное приводит к необходимости поиска альтернативных методов фотолитографии. Одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является использование отражательных рельефно-фазовых голограмм, так как в этом случае не используются прозрачные среды, а размер одновременно экспонируемой области полупроводниковой пластины в большей степени зависит от когерентности источников излучения и характеристик расширителей пучков, чем от полевых аберраций проекционного объектива, в качестве которого используется голограмма-проектор.

В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля, голограмм сфокусированного изображения и синтезированных голограмм [3]. Метод цифровой голографии, основанный на применении синтезированных голограмм-проекторов при решении фотолитографических задач, заключается в цифровом синтезе и аналоговом физическом восстановлении топологии микросхем. Под голограммой-проектором в настоящей работе мы понимаем голограммы, предназначенные для точного, т.е. безаберрационного, формирования действительного изображения двумерных амплитудных бинарных транспарантов, пригодных для использования в фотолитографических технологиях [4].

Применение цифровой голографии позволяет исключить этап использования физического фотошаблона для создания голограммы. Вместо этого достаточно создать виртуальный цифровой шаблон, с использованием которого синтезируется цифровая голограмма, наносимая с помощью генератора изображения на стеклянную пластину, покрытую слоем фоторезиста. При этом в зависимости от пространственных частот изготавливаемой голограммы отображение голограммной структуры на носителе может осуществляться с помощью коммерчески доступных лазерных и электронно-лучевых генераторов изображений [5]. В известной нам на данный момент литературе описаны лазерные генераторы изображения, способные воспроизводить элементы порядка 1 мкм. Однако уже есть технологии, позволяющие фокусировать пучки электронов в точку, размеры которой не превышают 10 нм.

В доступной нам литературе содержатся сведения о попытках использования принципов цифровой голографии при решении задач ультракоротковолновой проекционной фотолитографии, однако практически полностью отсутствует описание используемых алгоритмов и программно-аппаратного комплекса. Кроме того, в доступных нам источниках отсутствуют сведения об успешном внедрении методов цифровой голографии в фотолитографический процесс. Все сказанное приводит к необходимости разработки оригинального метода цифрового синтеза голограмм, пригодных для использования в фотолитографическом процессе. С этой целью нами была выполнена работа, направленная на создание программного комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов. При этом восстановление использовано нами для проверки работоспособности алгоритма синтеза.

Метод синтеза голограмм-проекторов

При создании алгоритма синтеза был выбран метод на основе вычисления комплексного вектора электромагнитного поля, так как при расчетах в нем меньше приближений в сравнении с методами Фурье и Френеля. Данный метод описывает физические процессы при регистрации реальной голограммы. Его суть сводится к вычислению

для каждой точки голограммы комплексной амплитуды голографического поля, формируемого всеми точками исходного объекта.

В данной работе рассматривается случай, при котором виртуальный транспарант освещается когерентным пучком, перпендикулярно падающим на ее поверхность. Таким образом, транспарант можно представить в виде набора точечных когерентных источников света с одинаковой фазой. Поэтому набег фазы от источника до точки голограммы (1) будет зависеть от расстояния между ними l , описанного выражением (2):

$$\varphi_{u,v,n,m} = \frac{2\pi l_{u,v,n,m}}{\lambda}, \quad (1)$$

$$l_{u,v,n,m} = \sqrt{(u-m)^2 + (v-n)^2 + h^2}. \quad (2)$$

Тогда выражение (3) описывает комплексный вектор электромагнитного поля точки на голограмме.

$$\varphi_{u,v,n,m} = \frac{2\pi l_{u,v,n,m}}{\lambda}, \quad (3)$$

где u, v и x, y – координаты на голограмме и транспаранте соответственно, а h – расстояние между этими плоскостями. На рис. 1 представлено графическое отображение данного выражения.

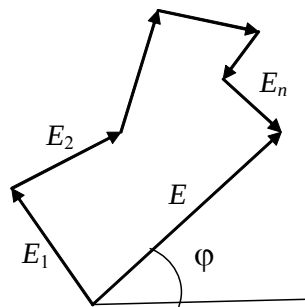


Рис. 1. Суммирование комплексных амплитуд

Представим опорную волну в виде параллельного пучка, падающего под углом Θ . Исходя из геометрии задачи (рис. 2), можно определить зависимость фазы опорного пучка на поверхности голограммы от координат и угла наклона (4):

$$\phi_{\text{оп}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot x \cdot \sin \Theta}{\lambda}. \quad (4)$$

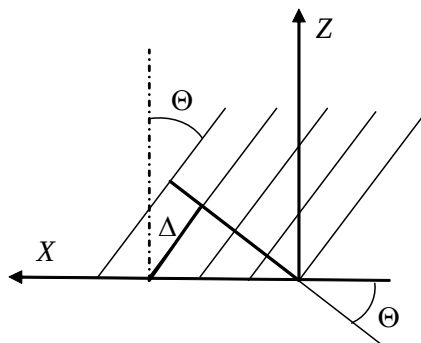


Рис. 2. Параллельный опорный пучок

Далее для каждой точки голограммы складываются комплексные амплитуды электромагнитного поля опорного пучка и излучения, прошедшего через транспарант. Тем самым мы получаем массив общих комплексных амплитуд для каждой точки голограммы необходимый для ее отображения и печати. Возведя каждый элемент выборки в квадрат, получим набор интенсивностей точек голограммы [5, 6].

После расчета голограмма может быть нанесена на какой-либо физический носитель и восстановлена. При использовании генераторов изображений, отображающих только две градации, необходимо произвести бинаризацию. В данной работе она осуществляется способом, описанным выражением (5):

$$\begin{cases} 1, & I \geq t, \\ 0, & I < t, \end{cases} \quad (5)$$

где t – уровень бинаризации. Преимущество бинарной голограммы в сравнении с серой голограммой заключается в возможности практического отображения голограммы на носителе, а также в большей дифракционной эффективности [7].

Для проверки созданного алгоритма и исследования влияния параметров синтеза на формируемое голограммой изображение был создан алгоритм восстановления, причем для надежности был выбран другой алгоритм, нежели при синтезе.

Метод восстановления изображения с помощью преобразования Френеля является параксиальным приближением интеграла Рэлея–Зоммерфельда. Основой этого метода является вычисление интеграла Френеля, который описывает распределение интенсивности в плоскости изображений. Преобразование Френеля для двумерного объекта при этом принимает вид (6), а его дискретное представление – (7) [8–14].

$$G(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda d} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2] \right\} dx dy, \quad (6)$$

$$G(\xi, \eta) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N t(n, m) \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda h} [(\xi - n)^2 + (\eta - m)^2] \right\}. \quad (7)$$

Интерфейс программы

На рис. 3 представлен интерфейс созданной программы.

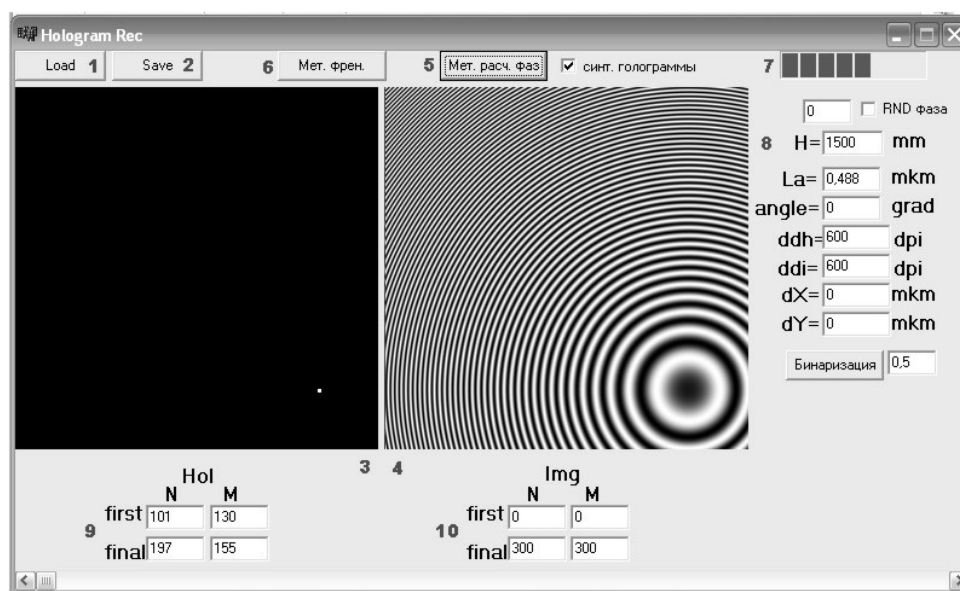


Рис. 3. Интерфейс программы

Пунктами **1** и **2** отмечены кнопки для загрузки исходного и сохранения в файл рассчитанного изображения, которые отображаются в областях **3** и **4**. В поле **7** отображается ход выполнения расчета. Кнопка **5** служит для запуска алгоритма синтеза голограммы, а **6** – для восстановления. В полях **8** задаются такие параметры, как H – рас-

стояние между плоскостями голограммы и изображения, разрешение, угол падения опорного пучка Θ и смещение области регистрации в пространстве. Пунктами **9** и **10** отмечены поля, в которых можно задать области голограммы и изображения, которыми будет оперировать алгоритм. Кнопка **11** запускает алгоритм бинаризации по уровню, указанному в поле **12**.

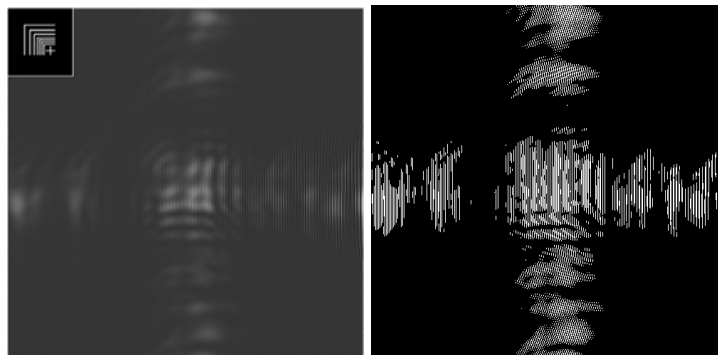


Рис. 4. Пример синтезированной голограммы в тоновом и бинарном виде

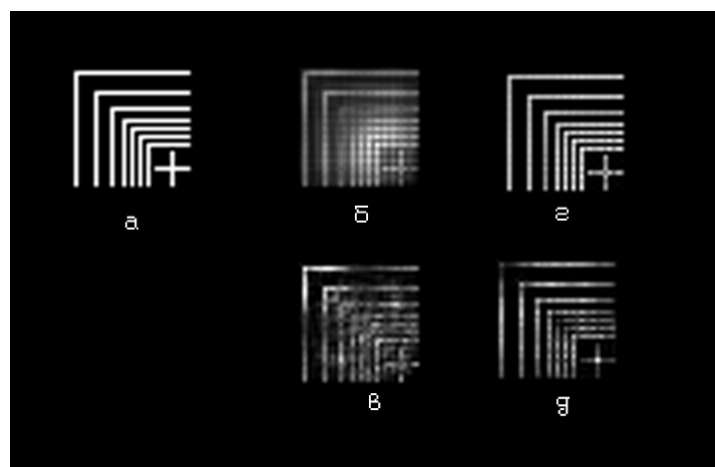


Рис. 5. Варианты изображений: а – исходное; б, г – при различных углах падения опорного пучка; в, д – от бинарных голограмм

Было проведено тестирование программного комплекса, показавшее положительные результаты. На рис. 4 приведен пример исходного изображения (слева сверху) и синтезированных с его помощью голограмм-проекторов.

При восстановлении были получены результаты, представленные на рис. 5. Изображения рис. 5, б и в, были получены при нормальном падении опорного пучка, а рис. 5, г и д – при $\Theta = 10,5^\circ$. Улучшение качества структуры связано с пространственным разделением порядков дифракции. Заметно, что бинаризация привела к потере информации, записанной на голограмме (рис. 5, в, д).

Заключение

Данная работа была направлена на исследование возможности компьютерного синтеза голограмм для последующего использования в фотолитографии. Основные результаты настоящей работы состоят в следующем:

- разработан алгоритм синтеза голограмм-проекторов;
- разработан алгоритм восстановления;

- реализована программная оболочка и создан интерфейс программы;
- проведено тестирование, показавшее положительные результаты.

Литература

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 10. – С. 32–39.
2. Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfoy S., Darbellay Y. Holographic micro-lithography // Opt. Eng. 1995. – Vol. 34. – № 9. – P. 2724–2730.
3. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 101. – № 6. – С. 1038–1042.
4. Jacobsen C., Howells M. Projection x-ray lithography using computer-generated holograms: A study of compatibility with proximity lithography // J. Appl. Phys. – 1992. – V. 71. – P. 2993–3001.
5. Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A. Design and fabrication of a high-efficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram // Appl. Optics. – 2007. – V. 46. – № 14. – P. 2581–2585.
6. Кольер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
7. Семенов Г.Б., Корешев С.Н. Дифракционная эффективность и некоторые особенности спектров дискретных амплитудных бинарных голограмм // Оптика и спектроскопия. – 1976. – Т. 41. – № 2. – С. 310–314.
8. Гудмен Дж. введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
9. W. Silfvast High Precision Soft X-ray Optics // Proceedings of a workshop held in Rockville, MD, Oct. 1989.
10. Levenson M., Johnson K., Hanchett V. Projection photolithography by wave-front conjugation // J. Opt Soc. Am. – 1981. – Vol. 71. – P. 737–739.
11. Lohmann A.W., Paris D.P. Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer // JOSA. – 1967. – Vol. 56. – № 4. – P. 535.
12. Lohmann A.W. Variable Fresnel zone pattern // Appl. Optics – 1967. – Vol. 6. – P. 9.
13. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Math. of Comput. – 1965. – Vol. 19. – P. 297–301.
14. Ландсберг Г. С. Оптика: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003.

Никаноров Олег Викторович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр технических наук, аспирант, nikanorovov@ya.ru

Иванов Юрий Александрович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, бакалавр технических наук, студент, drunkcow@mail.ru

Корешев Сергей Николаевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, koreshev@list.ru

3

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.532.8

**ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ДВИГАТЕЛЯМИ-МАХОВИКАМИ****И.Е. Овчинников, А.В. Лагун**

Рассматривается динамика одноосной системы ориентации космического летательного аппарата с помощью маховой массы, приводимой во вращение управляемым вентильным двигателем. Изучаются режимы при отсутствии внешнего возмущающего момента, действующего на аппарат, и при наличии длительного действующего момента малой величины.

Ключевые слова: космический летательный аппарат, система ориентации, двигатель-маховик, вентильный двигатель.

Введение

В большинстве случаев после вывода на орбиту космических летательных аппаратов (КЛА) или искусственных спутников Земли (ИСЗ) требуется ориентация одной из их конструктивных осей на некоторый объект в космическом пространстве (Солнце, Звезда, планета) или по вертикали к Земле. Такая ориентация должна поддерживаться многие месяцы и даже годы, в силу чего встает задача экономии затрат энергии, необходимой для поддержания заданного направления оси аппарата, отработки внешних возмущений или переориентации оси на другое направление.

Для решения подобных задач наилучшие результаты зачастую дают электрические двигатели-маховики, для питания которых электрическая энергия обеспечивается солнечными батареями, устанавливаемыми на КЛА [1]. Рассмотрим динамику двигателей-маховиков с целью исследования возможности применения для такой задачи вентильного двигателя.

Уравнения динамики двигателя-маховика в системе ориентации КЛА

Принцип осуществления ориентации или управляемого поворота КЛА основывается на законе сохранения момента количества движения системы тел спутник (КЛА)–двигатель-маховик. Если предположить, что на такую систему тел не действуют внешние моменты, что хорошо оправдывается для условий свободного тела в космическом пространстве, то закон сохранения момента количества движения для случая плоского вращательного движения относительно некоторой оси формулируется в виде [2]

$$J_a \cdot \omega_a + J_m \cdot \Omega_m = J_a \cdot \omega_a(0) + J_m \cdot \Omega_m(0) = \text{const}. \quad (1)$$

Здесь J_a , J_m – моменты инерции КЛА и ротора-маховика двигателя; ω_a , Ω_m – соответственно их угловые скорости; $\omega_a(0)$, $\Omega_m(0)$ – начальные значения угловых скоростей, которые в частном случае могут быть равны нулю. Произведения $J_a \cdot \omega_a$ и $J_m \cdot \Omega_m$ называются моментами количества движения КЛА и маховика соответственно.

Из выражения (1) видно, что любое изменение скорости движения $\Delta\Omega_m$ приводит к изменению скорости КЛА (или спутника) $\Delta\omega_a$, но в противоположном направлении и в соотношении, определяемом моментами инерции. Если $\Delta\omega_a = \omega_a - \omega_a(0)$,

$\Delta\Omega_m = \Omega_m - \Omega_m(0)$, то с учетом уравнения динамики двигателя $J_m \cdot \frac{\Delta\Omega_m}{\Delta t} = M_\delta$ из (1) имеем

$$\Delta\omega_a = -\frac{J_i}{J_a} \cdot \Delta\Omega_i = -\frac{1}{J_a} \cdot M_a \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Таким образом, управляя скоростью ω_a за счет изменения скорости двигателя Ω_m или момента двигателя M_δ , в соответствии с (1) или (2) можно управлять некоторой угловой координатой КЛА $\alpha = \int \omega_a dt$. Схематически такая «плоская» задача представлена на рис. 1, а, где двигатель-маховик ДМх размещен внутри спутника А, причем статор двигателя неподвижно закреплен в корпусе А.

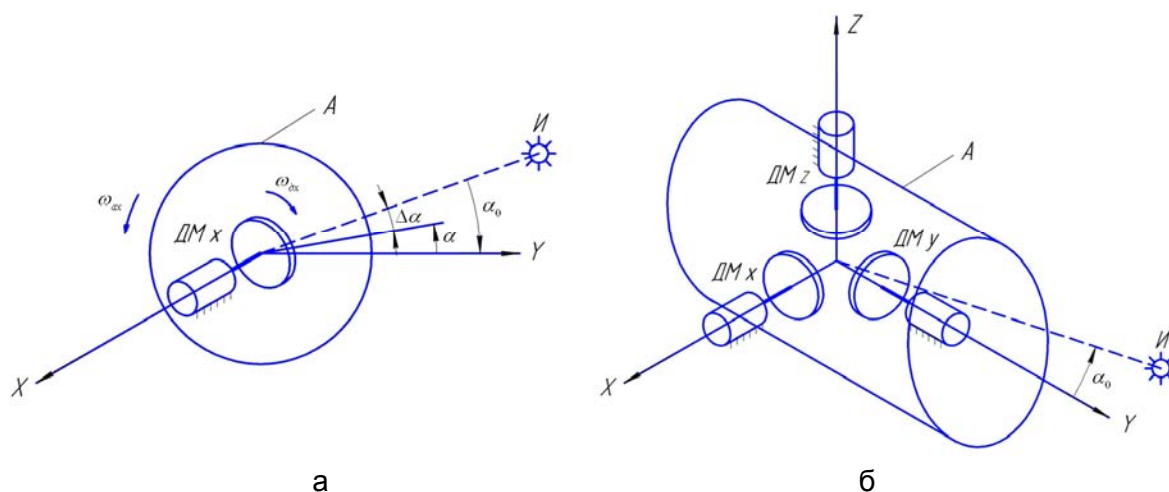


Рис. 1. Расположение электрических двигателей-маховиков в системе ориентации КЛА: а – одноосная система, б – трехосная система

Появление скорости двигателя-маховика в направлении ω_{mx} приводит к появлению скорости спутника ω_{ax} , но в противоположном направлении, что соответствует закону сохранения момента количества движения (1). В действительности задача движения может оказаться много сложнее, поскольку КЛА представляет собой твердое тело, поворачивающееся в процессе ориентации относительно точки, связанной с центром масс. Движение твердого тела относительно точки описывается уравнениями Эйлера [2], которые для нашего случая применительно к одной из осей имеют вид

$$J_{ax} \cdot \frac{d\omega_{ax}}{dt} + (J_{az} - J_{ay}) \cdot \omega_{ay} \cdot \omega_{az} = \sum M_x, \quad (3)$$

$$\sum M_x = -M_{\delta x} + M_{\text{вх}},$$

где $\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}$ – угловые скорости аппарата относительно соответствующих осей; J_{ax}, J_{ay}, J_{az} – моменты инерции аппарата относительно тех же осей; $\sum M_x$ – сумма моментов, действующих относительно оси x ; $M_{\delta x}$ – электромагнитный момент двигателя ДМ, расположенного по оси x аппарата А (рис. 1, б); $M_{\text{вх}}$ – внешний возмущающий момент, действующий на корпус аппарата по оси x . Управление моментами двигателя $M_{\delta x}, M_{\delta y}, M_{\delta z}$ в функции координат рассогласования осей x, y, z от требуемого положения, их производных и интегралов от рассогласования позволяет обеспечить задачу трехосной ориентации космического летательного аппарата. Знак «минус» обусловлен

тем, что учитывается момент, прикладываемый к статору двигателя, т.е. к корпусу аппарата A .

В случае, когда моменты инерции $J_{ax} = J_{ay} = J_{az}$, что имеет, например, место для однородного тела сферической формы, нелинейное уравнение с перекрестными связями (3) распадается на три независимых уравнения. Именно этот случай и будет исследован далее. Для оси x , таким образом, получим уравнение динамики для корпуса аппарата

$$J_{ax} \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -M_{\partial x} + M_{\text{вх}}$$

и уравнение динамики для ротора-маховика двигателя

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega_{ax}, \quad J_m \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = M_{\partial x}.$$

Подставив одно уравнение в другое и затем интегрируя, получаем:

$$J_{ax} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + J_m \cdot \Omega_m = M_{\text{вх}} \cdot t + H_x(0), \quad (4)$$

где $H_x(0) = J_{ax} \cdot \omega_{ax}(0) + J_m \cdot \Omega_m(0)$ – начальные значения суммарного момента количества движения. Уравнение (4) позволяет исследовать возможные условия ориентации при начальном рассогласовании α_0 : 1) $H(0) = 0$, $M_g = 0$; 2) $H_x(0) = J_{ax} \cdot \omega_{ax}(0) \neq 0$, $M_g = 0$; 3) $H(0) = 0$, $M_g \neq 0$.

При длительном функционировании системы ориентации к двигателю-маховику предъявляется ряд требований, среди которых – малая масса и высокая надежность двигателя, малые потери холостого хода, высокий удельный момент на единицу массы двигателя. Наилучшим образом данному комплексу требований отвечает вентильный двигатель [3] с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, регулировочные характеристики которого и будут использованы при дальнейшем рассмотрении.

Моделирование динамики одноосной системы ориентации КЛА с вентильным двигателем-маховиком

Момент двигателя с учетом только первой гармоники питающего напряжения можно представить выражением [3]

$$M_{\partial x} \approx \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[C' \cdot U - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot (C')^2 \cdot \Omega_m \right] \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 0,3 \cdot X_1^2}, \quad (5)$$

где U – регулируемое напряжение в звене постоянного тока, R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивление фазы, причем $X_1 = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_1 \cdot \Omega_m$, L_1 – собственная индуктивность фазы, p – число пар полюсов, $C' = p \cdot k_{01} \cdot w_1 \cdot \Phi$, $k_{01} \cdot w_1$ – эффективное число витков фазы, Φ – рабочий поток на пару полюсов.

Уравнение напряжения U , подаваемого на двигатель, запишем в форме

$$U = k_1 \cdot \Delta\alpha + k_2 \cdot \dot{\Delta\alpha} + k_3 \cdot \int \Delta\alpha dt, \quad (6)$$

где ошибка $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ (рис. 1, а).

Выражения (4), (5), (6) образуют следующую систему уравнений:

$$J_{ax} \cdot \frac{d^2 \Delta \alpha}{dt^2} = -\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[C' \cdot U - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot (C')^2 \cdot \Omega_m \right] \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 0,3 \cdot X_1^2} + M_{ex},$$

$$U = k_1 \cdot \Delta \alpha + k_2 \cdot \dot{\Delta \alpha} + k_3 \cdot \int \Delta \alpha dt, \quad (7)$$

$$J_m \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[C' \cdot U - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot (C')^2 \cdot \Omega_m \right] \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 0,3 \cdot X_1^2}.$$

Использование интеграла от ошибки позволит обеспечить астатизм системы, т.е. отсутствие установившейся ошибки по окончании переходного процесса ориентации. Структурная схема системы, соответствующей уравнениям (7), представлена на рис. 2, а. В зависимости от рассматриваемого варианта мы будем полагать в структурной схеме: 1) $H(0) = 0$, $M_e = 0$; 2) $H(0) \neq 0$, $M_e = 0$; 3) $H(0) = 0$, $M_e \neq 0$. Моделирование системы дифференциальных уравнений (7), имеющих нелинейность относительно Ω_m , обусловленную характеристикой момента двигателя M_{ax} (5), было проведено при следующих исходных данных: $\Phi = 1,15 \cdot 10^{-3}$ Вб, $R_1 = 0,0353$ Ом, $L_1 = 9,15 \cdot 10^{-5}$ Гн, $p = 3$, $w_1 = 36$, $k_1 = 100$ В/рад, $k_2 = 200$ В·с/рад, $k_3 = 0,1$ В/рад·с, $J_m = 33,1$ кг·м², $J_a = 2385$ кг·м², $\alpha_0 = 0,5$ рад. Максимальное напряжение в звене постоянного тока двигателя $U_{max} = 100$ В, скорость идеального холостого хода двигателя $\Omega_{0xx} = 100$ рад/с.

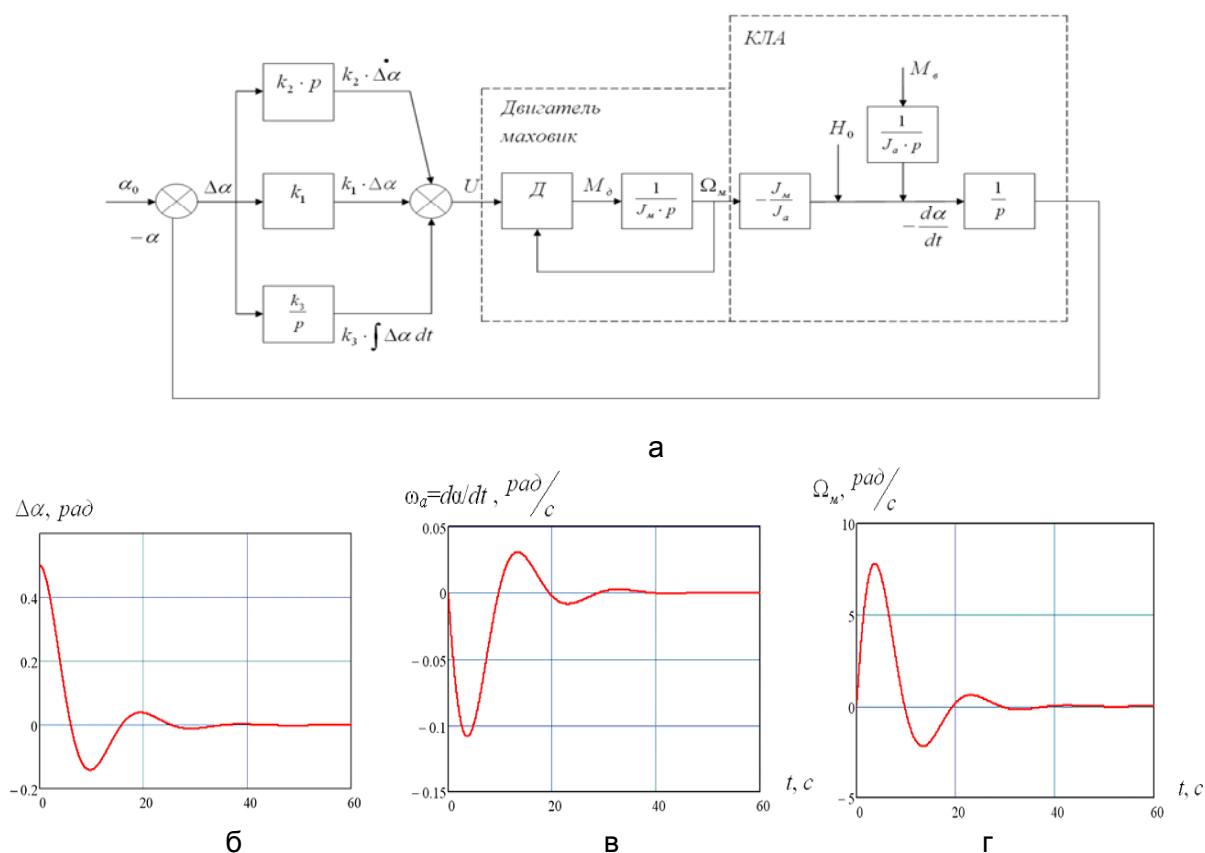


Рис. 2. Структурная схема (а) и переходный процесс одноосной ориентации с двигателем-маховиком по углу ошибки (б), по скорости аппарата (в), по скорости маховика (г)

Результаты моделирования представлены на рис. 2, б–г. Из рисунков видно, что переходный процесс заканчивается приблизительно через 40 с, причем, как и следовало ожидать, в установившемся режиме скорость аппарата $\frac{d\alpha}{dt}$ и скорость двигателя-маховика Ω_m равны нулю, поскольку начальное значение момента количества движения было нулевым:

$$H_x(0) = J_{ax} \cdot \omega_{ax}(0) + J_m \cdot \Omega_m(0) = 0.$$

Второе условие применительно к уравнению (3) было сформулировано для начальных условиях по углу рассогласования и угловой скорости аппарата в виде $\alpha_0 = 0,5$ рад, $\frac{d\alpha}{dt}(0) = 0,58$ рад/с. Возмущающий момент $M_{вх}$ предполагался равным нулю. Все остальные данные были приняты, как и в предыдущем примере. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

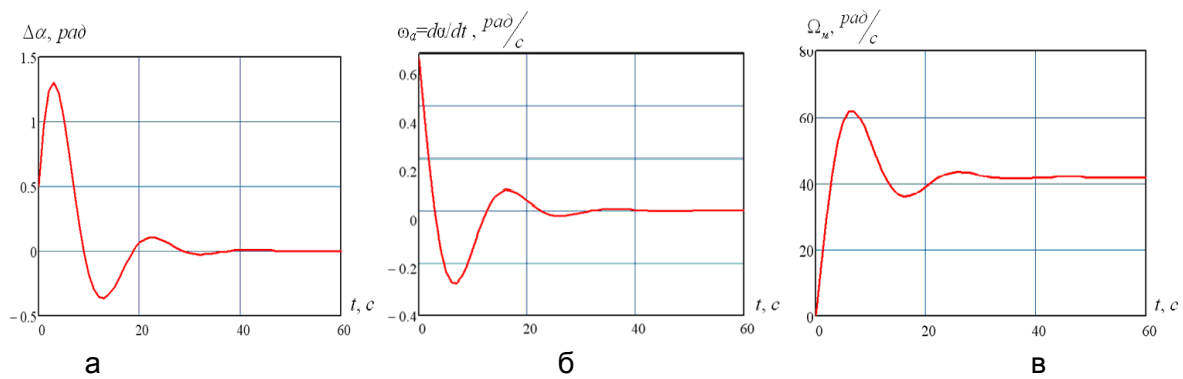


Рис. 3. Переходный процесс при наличии начального угла рассогласования и начальной угловой скорости аппарата: а – для угла ошибки, б – для скорости аппарата, в – для скорости маховика

В отличие от предыдущего случая, установившаяся скорость маховика отлична от нуля (рис. 3, в), поскольку в соответствии с законом сохранения момента количества движения (3) при $M_{вх} = 0$ $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_\infty = 0$, $(\Omega_m)_\infty = \frac{H_x(0)}{J_m}$, т.е. весь начальный момент количества движения, обусловленный начальной скоростью аппарата, $J_{ax} \cdot \frac{d\alpha}{dt}(0) = H_x(0)$, по окончании переходного процесса «перекачивается» в момент количества движения маховика:

$$J_m \cdot (\Omega_m)_\infty = J_{ax} \cdot \frac{d\alpha}{dt}(0).$$

Рассмотрим последний случай для уравнения (3), когда на аппарат действует некоторый малый возмущающий момент $M_{вх}$, а начальные условия по угловой скорости аппарата – нулевые. Величина момента принята равной $M_{вх} = 10^{-3}$ Н·м. Результат моделирования представлен на рис. 4.

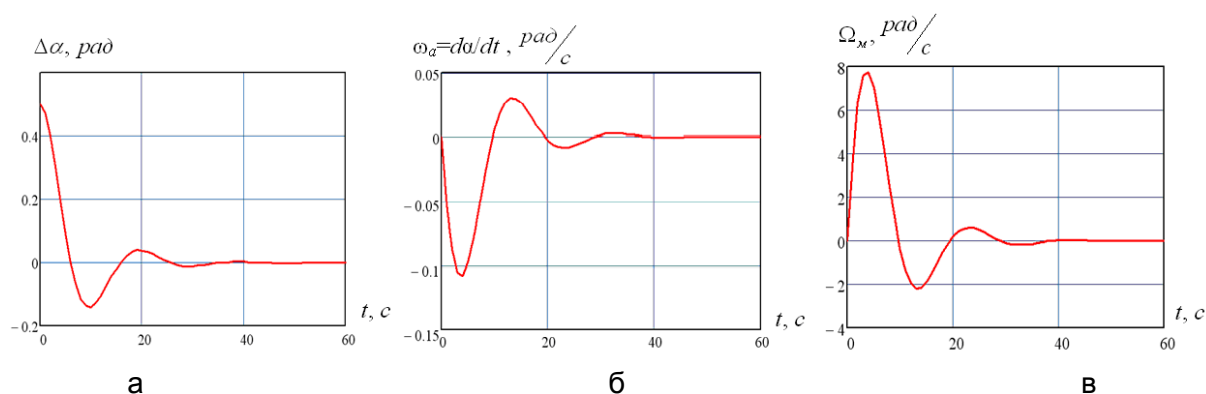


Рис. 4. Переходный процесс при наличии начального угла рассогласования и возмущающего момента: а – для угла рассогласования, б – для скорости аппарата, в – для скорости маховика

На рис. 4, а, и 4, б, также как и в случае рис. 2, б, и 2, в, угловая скорость аппарата $\frac{d\alpha}{dt}$ в конце переходного процесса приходит к нулевому значению. Однако скорость маховика Ω_m медленно возрастает, что можно наблюдать за сравнительно продолжительное время. Это объясняется тем, что по окончании процесса ориентации, когда угловая скорость аппарата $\frac{d\alpha}{dt}$ равна нулю, двигатель должен создавать электромагнитный момент, равный и встречно направленный к внешнему моменту M_e , действующему на корпус КЛА. Этот момент создается за счет подаваемого на двигатель нарастающего сигнала вида $\int \Delta\alpha_\infty dt$, где $\Delta\alpha_\infty$ – установившееся значение ошибки, которая в силу малости (0,001) на рис. 4, а, не видна. Под действием этого весьма малого электромагнитного момента ротор двигателя с маховиком будет постепенно разгоняться. Разгон может осуществляться вплоть до скорости холостого хода двигателя. Это, в свою очередь, означает, что время непрерывного «парирования» внешнего возмущающего момента с помощью электромагнитного момента двигателя-маховика будет равно $t_{\max} = \frac{J_m \cdot \Omega_{mxx}}{M_e}$. Для нашего случая время составит $t_{\max} = \frac{33,1 \cdot 418}{10^{-3} \cdot 3600} = 3843$ час. После

разгона до скорости холостого хода двигатель должен быть остановлен, а момент количества движения и соответственно угловая скорость КЛА, приобретенная в связи с этим, в соответствии с законом сохранения момента количества движения составят

$$\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{\max} = - \frac{J_m \cdot \Omega_{mxx}}{J_{ax}}.$$

Чтобы процесс ориентации двигателем-маховиком мог быть возобновлен, следует «разгрузить» аппарат импульсом реактивного момента, создаваемого специальными микрореактивными разгрузочными двигателями, причем импульс разгрузочного момента должен быть равен

$$M_p \cdot t_p = J_{ax} \cdot \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{\max},$$

где M_p – разгрузочный момент, t_p – время действия разгрузочного момента.

Заключение

Показано, что вентильный двигатель-маховик является эффективным средством управления угловым положением космического летательного аппарата. Сигнал управления напряжением, подаваемым на двигатель, состоящий из трех компонентов (отклонение по углу, производная отклонения, интеграл от отклонения), позволяет обеспечить приемлемое качество переходного процесса и астатизм системы при наличии начальной угловой скорости объекта. Постоянный внешний возмущающий момент, действующий на корпус КЛА, приводит в установившемся режиме к появлению малой ошибки $\Delta\alpha$ и плавному разгону двигателя-маховика, а время поддержания заданной ориентации становится ограниченным и зависящим от величины максимального кинетического момента двигателя $J_M \cdot \Omega_{Mxx}$ и величины возмущающего момента.

Литература

1. Петров В.П., Сочивко А.А. Искусственные спутники Земли и погода. – Л.: Гидрометеоздат, 1961.
2. Аппель П. Теоретическая механика. – М.: Физматгиз, 1960.
3. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. – СПб: Корона-Век, 2006.

Овчинников Игорь Евгеньевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ludimit@yandex.ru

Лагун Антон Владимирович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, lagunanton@yandex.ru

УДК 621.865.8 – 781.2.001.63

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ С ПЬЕЗОПРИВОДАМИ****А.Б. Смирнов, И.А. Крушинский**

Показана актуальность использования мехатронных устройств с пьезоэлектрическими приводами для установки поверхностно монтируемых компонентов. Представлен новый пьезоэлектрический схват, позволяющий осуществлять микропозиционирование деталей и имеющий очувствление без дополнительных датчиков. Экспериментально определена зависимость величины микропозиционирования от напряжения питания. Обнаружено уменьшение гистерезисной погрешности при микропозиционировании. Предложены методы очувствления схвата путем включения пальцев схвата в режиме датчика.

Ключевые слова: мехатронное устройство, биморф, пьезоэлектрический схват, микропозиционирование, очувствление без дополнительных датчиков, экспериментальный стенд, уменьшение гистерезиса.

Введение

В области приборостроения последнее десятилетие характеризуется высоким интересом к созданию миниатюрных высокоточных исполнительных механизмов. Это связано, в первую очередь, с возросшими требованиями по миниатюризации приводов и требованиями по надежности и точности исполнения движений.

В настоящее время в миниатюрных исполнительных устройствах используются различные физические эффекты для преобразования электрической энергии в механическую. Наиболее востребованными являются пьезоэлектрические приводы, которые по многим совокупным параметрам оказываются лучшими [1].

Для сборки и монтажа микроустройств востребованы микроманипуляторы и микрозахватные устройства, которые могут обеспечить высокую точность и надежность позиционирования микродеталей. Проблема разработки мехатронных систем микроперемещений актуальна, так как требуется создавать новые высокоточные автоматические устройства в областях микроробототехники, микробиологии и микроэлектроники. Кроме того, остается актуальной задача вибротранспортирования и подачи к рабочему органу манипулятора ориентированных мини и микродеталей.

Исходя из требований, предъявляемых к автоматическому оборудованию для установки поверхностно монтируемых электронных компонентов (ПМК) на печатные платы, для точного позиционирования ПМК относительно проводящих дорожек в качестве модулей точных перемещений представляется эффективным использование биморфных пьезоэлектрических актюаторов (БПА). Это связано с тем, что БПА могут осуществлять перемещения рабочих органов с погрешностью до долей микрометра при максимальном перемещении до 1–2 мм без дополнительных механических передаточных устройств.

Кроме того, использование как обратного, так и прямого пьезоэффекта позволяет использовать одни и те же пьезокерамические элементы БПА в качестве привода и датчика механических величин одновременно. Такой мехатронный подход к созданию миниатюрных манипуляционных систем является наиболее эффективным, так как в этом случае механическая часть манипуляционных устройств упрощается, а характеристики управления улучшаются [2].

Объект исследования

Простой пьезоэлектрический схват (рис. 1), состоящий из двух параллельных БПА, закрепленных на основании, может осуществлять функцию не только захвата микродетали, но и функцию микропозиционирования.

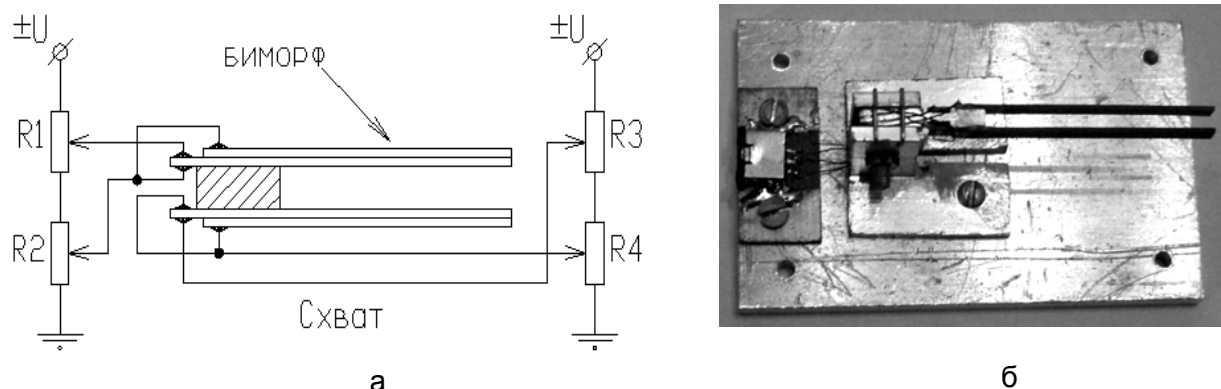


Рис. 1. Пьезоэлектрический схват с микропозиционированием: а – схема подключения; б – опытный образец

Управляющее напряжение U подается через делители на резисторах R1–R2 и R3–R4 на каждый палец схвата отдельно. В зависимости от соотношения напряжений, подаваемых на пальцы схвата, деталь может быть либо зажата по оси схвата, либо смещена в схвате влево или вправо от оси схвата (рис. 2). Для исследования был изготовлен пьезоэлектрический схват (рис. 1, б), в котором использованы два БПА с размерами 35×2,5×0,6 мм, которые производятся фирмой ЭЛПА (таблица).

Для пьезосхвата, который служит рабочим органом автоматической системы для установки ПМК на печатные платы, необходимо иметь обратную связь по силе сжатия детали и по моменту взятия детали соответственно. Наличие такой информации дает возможность увеличения быстродействия системы и повышает надежность взятия детали.

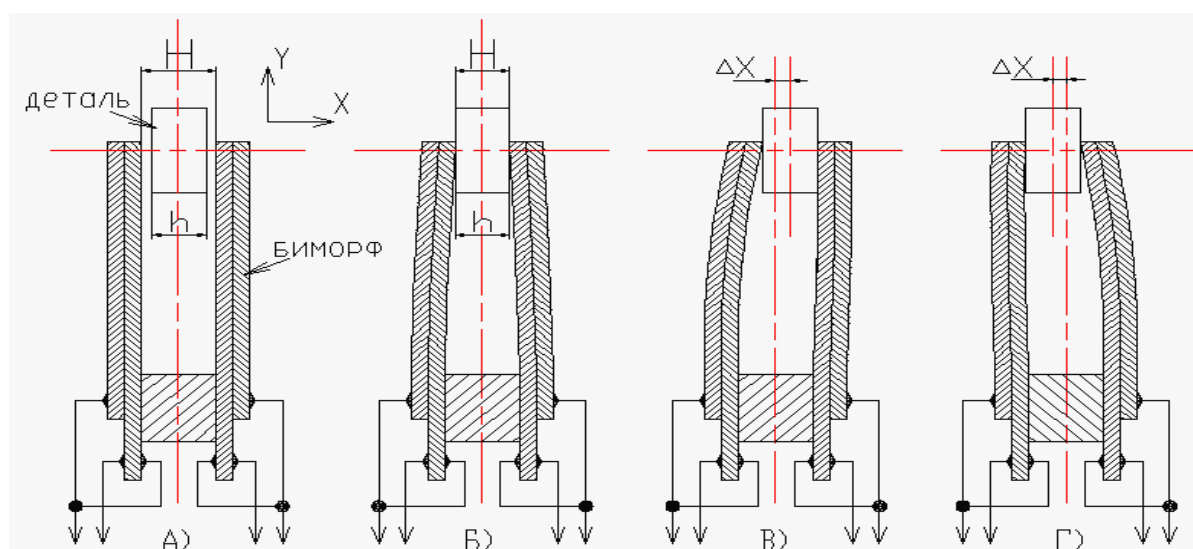


Рис. 2. Принцип работы пьезосхвата: А) деталь не зажата, $H > h$; Б) захват детали, $H = h$; В) микропозиционирование вправо; Г) микропозиционирование влево

Параметр	Значение
Размеры биморфа, мм	35×2,5×0,6
Масса биморфа, г	0,5
Емкость, нФ	13
Управляющее напряжение, В	±100
Прогиб конца каждого пальца, мм	±0,5
Рабочая длина пальца, мм	28
Максимальное усилие, Н	0,12
Расстояние между пальцами, мм	2,25
Масса схвата, г	2

Таблица. Характеристики пьезоэлектрического схвата

Экспериментальный стенд

Для исследования пьезоэлектрического микросхвата был собран экспериментальный стенд (рис. 3), состоящий из следующих основных частей: блок питания Б5-60 на 140 В, двухканальный блок управления напряжением, микроскоп МБС-10 с подсветкой, видеокамера, микротеленасадка МТН-222 для микроскопа МБС-10, монитор аналоговый черно-белый для микроскопа МБС-10, мультиметр DT-830В, двухканальный USB PC осциллограф PCSU-1000.

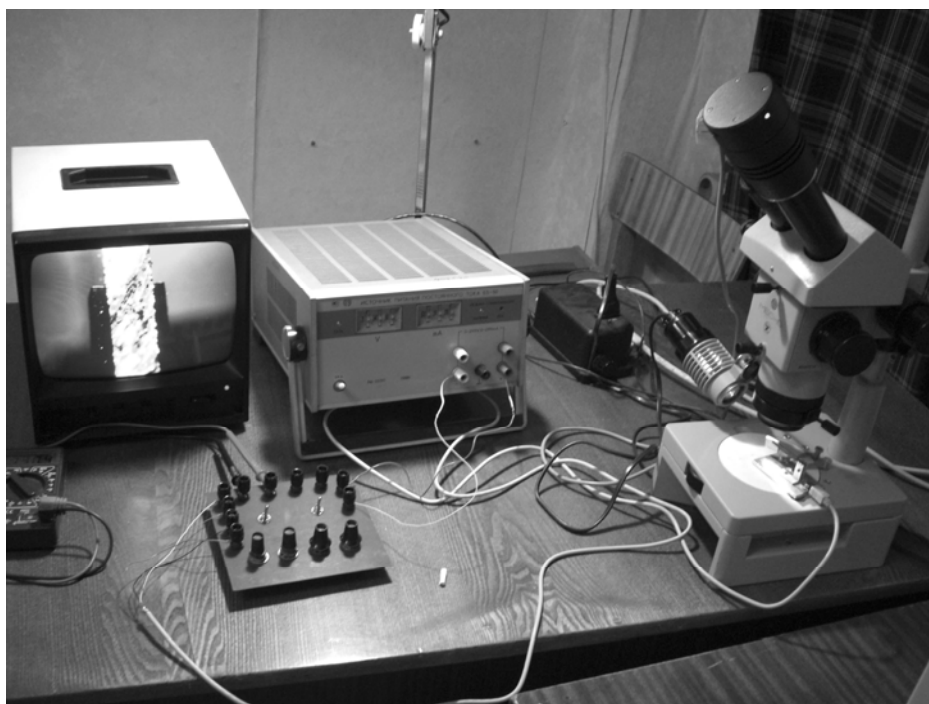


Рис. 3. Стенд для исследования пьезосхвата

Блок-схема экспериментального стенда показана на рис. 4. В каждом из проведенных опытов схват устанавливался в фокус микроскопа, затем подключался к устройству управления напряжением и блоку питания. При разных напряжениях пальцы схвата формируют различные изгибные деформации, изображения которых из микро-

скопа с помощью видеокамеры поступают на экран монитора, где, зная кратность увеличения изображения, с помощью штангенциркуля определяется перемещение.

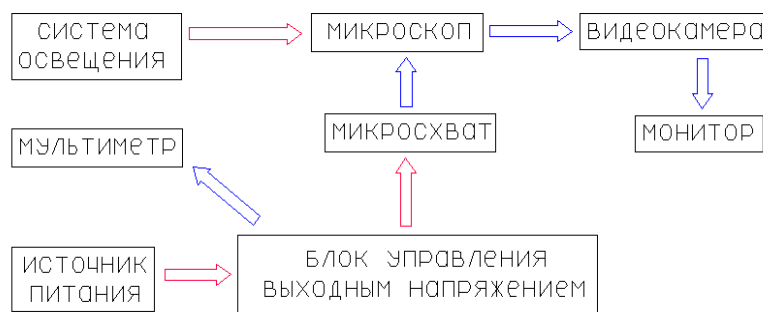


Рис. 4. Схема станда для исследования пьезосхвата

В процессе экспериментов исследовались перемещения свободных пальцев схвата и перемещение детали, зажатой в схвате. Одним из недостатков пьезоэлектрических актюаторов является гистерезис зависимости перемещения от напряжения, подаваемого на актюатор, который дает увеличение погрешности позиционирования и усложняет систему управления.

Микропозиционирование

Зависимость микропозиционирования детали, зажатой в схвате, показана на рис. 5, а, зависимость перемещения конца свободного пальца схвата от напряжения показана на рис. 5, б. При взятии детали в начальный момент схват подводится к детали таким образом, что между губками схвата и деталью остается зазор порядка 0,25 мм на сторону. Далее подается одинаковое напряжение 70 В на оба БПА, в результате чего они изгибаются навстречу друг другу, и деталь зажимается. Далее, изменяя отдельно напряжения на каждой губке, добиваются изменения смещения центра детали относительно корпуса схвата в ту или иную сторону. Ступенчатый характер прямой (1) и обратной ветви (2) зависимости (рис. 5, а) объясняется последовательным, поочередным изменением напряжения на пьезобиморфах.

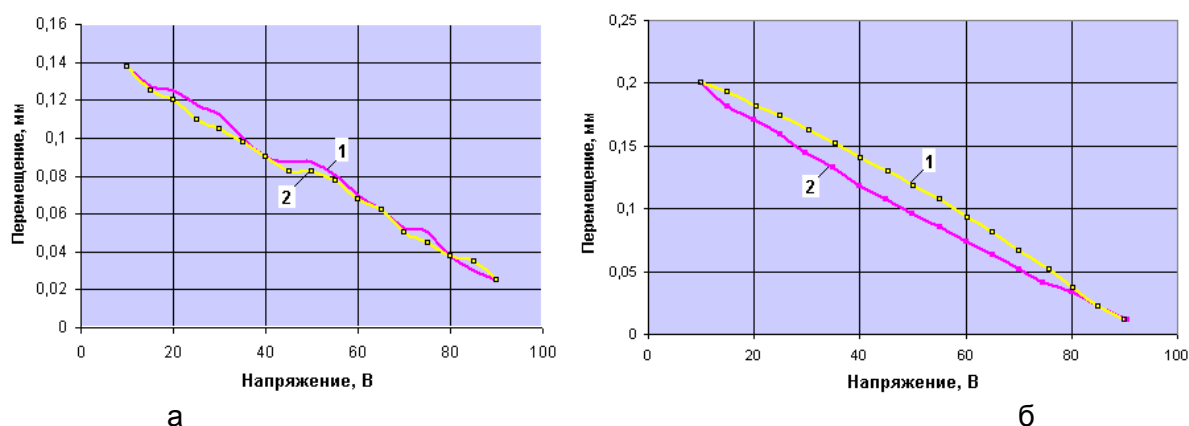


Рис. 5. Зависимости перемещения пальцев схвата от напряжения:

а – микропозиционирования детали, зажатой в схвате,

б – конца свободного пальца

Сравнивая зависимость перемещения губки схвата без детали от напряжения (рис. 5, б) с зависимостью перемещения центра зажатой детали от напряжения (рис. 5, а), можно сделать вывод, что влияние гистерезиса во втором случае уменьшается примерно на порядок. Такое уменьшение гистерезиса позволяет упростить систему управления микропозиционированием и повысить его точность. Микроперемещение детали по оси X (рис. 2) экспериментальным пьезосхватом дает возможность реализовать микропозиционирование детали с погрешностью 5 мкм при минимально возможном шаге напряжения 1 В.

Очувствление

В исследуемом схвате используются пьезоэлектрические биморфы, в которых проявляется как прямой, так и обратный пьезоэффект, поэтому для очувствления схвата могут быть предложены следующие схемы работы:

1) один из пальцев включается как датчик в цепь автогенератора, и измеряется изменение частоты автоколебаний от внешнего воздействия при наличии детали и без нее;

2) один из пальцев схвата включается в качестве привода, а второй выступает в роли датчика, затем измеряются АЧХ, напряжение датчика при колебании пальца привода с деталью и без нее;

3) один из пальцев схвата включается в качестве привода, а второй – в цепь генератора синусоидального сигнала на резонансной частоте, и определяется изменение силы тока в цепи пальца датчика при зажатой детали и планомерном увеличении давления на деталь со стороны пальца привода;

4) один из пальцев схвата, выбранный в качестве датчика, подключается как пьезотрансформатор к генератору синусоидального сигнала и к осциллографу, и определяется изменение коэффициента передачи в зависимости от давления на палец схвата.

Для определения возможности очувствления и оценки быстродействия схвата в режиме зажатия детали и микропозиционирования важно на начальном этапе исследовать АЧХ свободных пальцев схвата и при микропозиционировании зажатой в схвате детали (рис. 6).

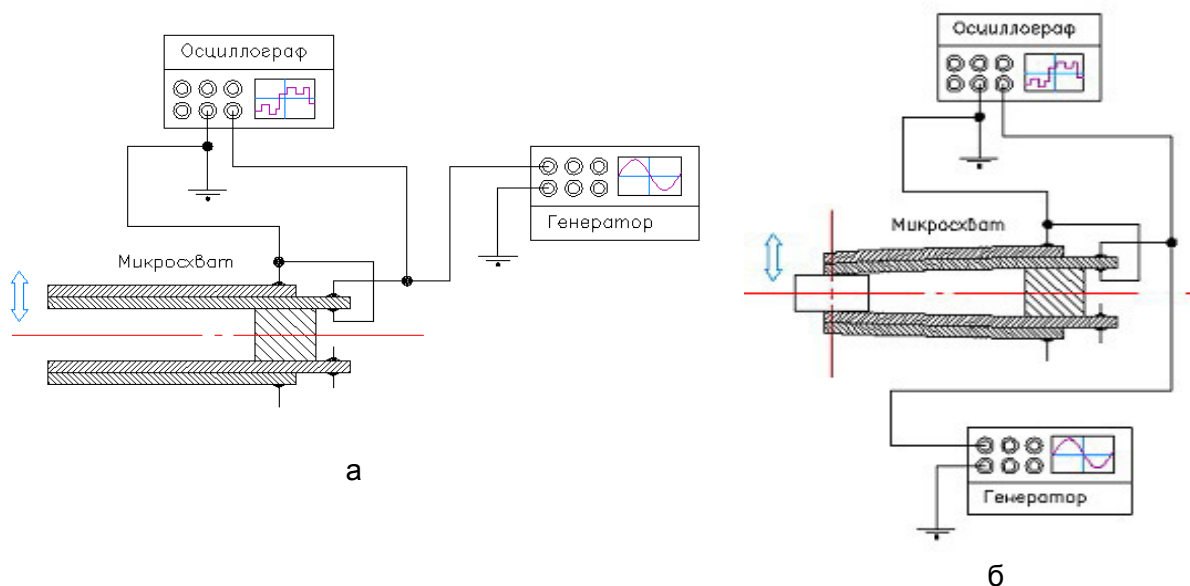


Рис. 6. Схема определения АЧХ пальца схвата: а – без детали, б – с деталью

Из сравнения графиков (рис. 7) следует вывод о том, что при захвате детали резонанс смещается в сторону понижения частоты, локальный минимум расширяется и оказывается в интервале частот от 200 до 250 Гц. Уменьшается амплитуда резонансных колебаний в 3,5 раза. Таким образом, по смещению резонансной частоты и уменьшению амплитуды колебаний можно судить о наличии детали в схвате.

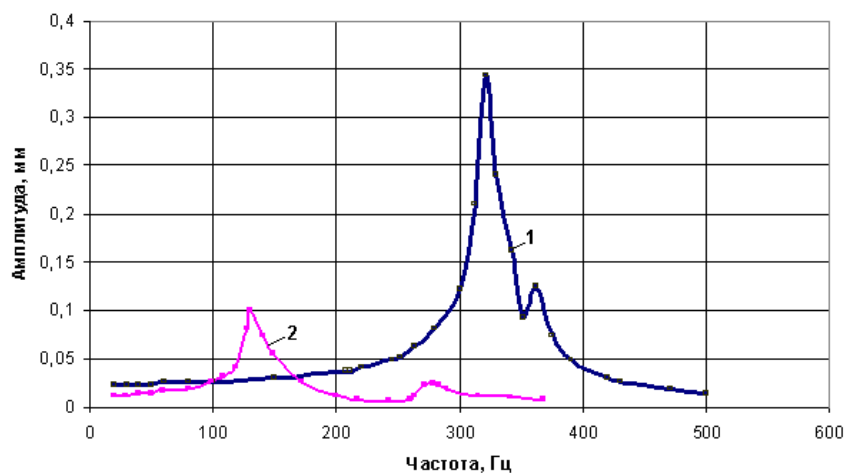


Рис. 7. Графики АЧХ для свободного пальца схвата (1) и для схвата с деталью (2)

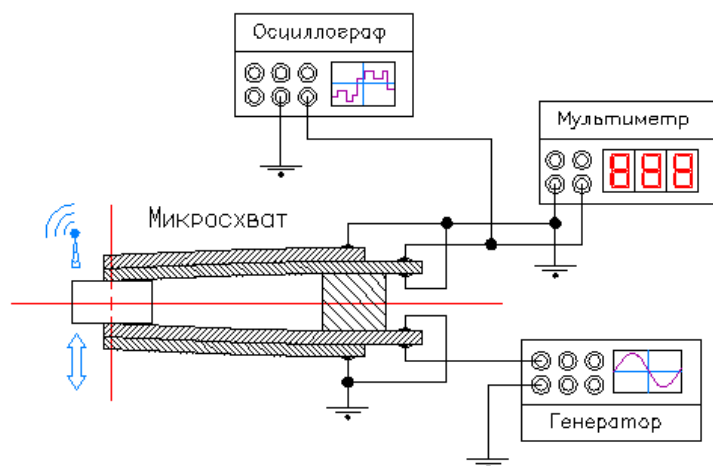


Рис. 8. Определение резонанса датчика для схвата с деталью

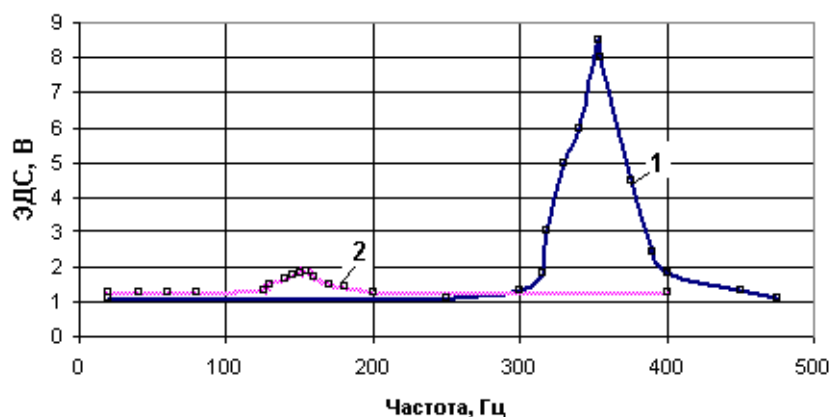


Рис. 9. Напряжение на датчике свободного пальца схвата (1) и схвата с деталью (2)

Для схемы, при которой один палец является приводом колебаний, а второй палец служит датчиком (рис. 8), получены АЧХ при отсутствии и наличии детали (рис. 9).

Сравнение графиков (рис. 7, 9) показывает, что смещения резонанса в рассматриваемых случаях близки (около 200 Гц). Поэтому очувствление по схеме (рис. 8) может быть использовано на практике.

Заключение

Приведенные материалы показывают возможность использования БПА для привода рабочего органа автоматического сборочного комплекса. Рассматривая возможности применения пьезоэлектрических актюаторов в других областях науки и техники, можно выделить следующие направления:

- в микроманипуляционных системах – для сборки микроизделий, для биологических исследований и технологий и микрохирургии, для привода головок высокоточных измерительных машин, в прецизионных электроэрозионных станках для двухкоординатной подачи проволоки;
- в качестве вибрационных питателей миниатюрных деталей и ориентирующих устройств;
- в автономных микророботах, предназначенных для мониторинга окружающей среды (летающие, ползающие, плавающие минироботы), для лапороскопической хирургии, эндоскопической диагностики организма человека;
- в оптоэлектронных переключателях и сканерах технологических лазерных установок, миниатюрных устройствах пневматики и гидравлики (микронасосы и микроклапаны), предназначенных для работы в медицинских аппаратах и приборах;
- в прецизионных многокоординатных вибродвигателях, предназначенных для перемещения и ориентации столиков микроскопов и чувствительных элементов навигационных приборов;
- в устройствах бытового назначения – вибрационных бритвах и зубных щетках, вибромассажерах, игрушках.

Важно отметить, что пьезокерамика может работать с высокой надежностью при высоких температурах (до 300°C), в агрессивных средах и в вакууме, а также не создает значительных электромагнитных полей в вибрационном режиме. Эти преимущества формируют перспективу использования пьезоэлектрических устройств в космической технике, в метрологическом оборудовании и электронной промышленности. БПА являются наиболее дешевыми пьезоэлектрическими преобразующими устройствами, имеющими большой диапазон перемещений выходных звеньев (до 1–2 мм) при силах порядка 1 Н. Современная отечественная промышленность осваивает в настоящее время пьезокерамические изделия толщиной 0,1–0,2 мм, которые позволяют снизить питающее напряжение до 10–50 В, что повлечет дальнейшую миниатюризацию мехатронных устройств.

Литература

1. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 160 с.
2. Смирнов А.Б. Динамические характеристики упругих систем с пьезоэлектрическими приводами // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы научн.-практ. конф. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 61–66.

Смирнов Аркадий Борисович

– Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, доктор технических наук, профессор, 123smirnov@list.ru

Крушинский Илья Александрович

– Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, аспирант, testing387@mail.ru

УДК 656.2

НАЧАЛЬНАЯ ВЫСТАВКА И КАЛИБРОВКА БЕСКАРДАННОГО ГИРОГОРИЗОНТКОМПАСА НА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

Г.И. Емельянцев, А.В. Лочехин

Рассматривается режим начальной выставки и калибровки бескарданного гироскопического компаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках с привлечением данных приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем с разнесенными антеннами. Особенностью рассматриваемого решения начальной выставки и калибровки системы в пуске в интересах сокращения времени готовности является оценивание суммарных дрейфов электростатического гироскопа в квазинерциальной системе координат. При этом формируется виртуальный («идеальный») электростатический гироскоп, используемый в качестве опорного. Алгоритмы строятся на базе обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния.

Ключевые слова: гироскопический компас, электростатический гироскоп, микромеханические инерциальные датчики, спутниковая навигационная система, калибровка.

Введение

В настоящее время для проведения глубоководных работ и океанографических исследований находят широкое применение автономные необитаемые подводные аппараты. В состав их навигационного оборудования включаются различные типы курсоуказателей, лагов, приемной аппаратуры (ПА) спутниковых (СНС) и гидроакустических навигационных систем.

Известно, например [1, 3], что при использовании в составе измерительного модуля микромеханических датчиков современного уровня точности (гироскопов $0,01^\circ/\text{с}$ и акселерометров $0,1\text{--}0,01\text{ м/с}^2$) можно обеспечить выработку углов качки с приемлемой точностью, привлекая для демпфирования шулеровских колебаний в погрешностях гироскопов данные о скорости от СНС или лага. Однако остается проблема с выработкой курса, так как современные микромеханические гироскопы «не чувствуют» вращение Земли. Поэтому в измерительном модуле на микромеханических датчиках погрешность по курсу постоянно растет во времени. Проблему обеспечения требований по курсу в интегрированных системах ориентации и навигации с измерительным модулем низкого уровня точности пытаются решить, в частности, за счет использования для подвижных объектов ПА СНС с разнесенными антеннами. Известна [2] интегрированная система Seapath 200 норвежской фирмы Seatex AS для морских судов, которая использует мультиантенную ПА СНС с фазовыми измерениями на несущей частоте. Из отечественных разработок следует выделить аналогичную мультиантенную ПА СНС МРК-11, использующую фазовые измерения (разработка Красноярского государственного технического университета и Научно-исследовательского института радиотехники). Однако в системах навигации подводных аппаратов данное решение можно использовать только в надводном положении.

Рассмотрим схему построения и алгоритмы работы бескарданного гироскопического компаса, включающего инерциальный измерительный модуль на микромеханических датчиках (гироскопах и акселерометрах) и один бескарданный электростатический гироскоп (БЭСГ). Для ограничения погрешности измерительного блока на микромеханических датчиках по курсу (для ее непрерывной коррекции) в условиях эксплуатации подводного аппарата предлагается привлекать данные от БЭСГ разработки Центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», установленного в одном корпусе с измерительным модулем. При этом вектор кинетического момента БЭСГ при запуске может быть ориентирован либо по оси Мира (полярная ориентация при использовании бескарданного гироскопического компаса в низких и средних широтах), либо в

плоскости экватора Земли (экваториальная ориентация для высоких широт). К достоинствам такой схемы построения бескарданного гироскопического компаса следует отнести его малые массогабаритные характеристики и возможность функционирования в высоких широтах. При этом ожидается сохранение точности выработки параметров ориентации объекта на уровне современных зарубежных бескарданных гироскопических компасов на волоконно-оптических гироскопах.

Задача начальной выставки и калибровки бескарданного гироскопического компаса, построенного по предложенной схеме, сводится к двум задачам: выставка и калибровка измерительного модуля на микромеханических датчиках и точная выставка в инерциальной системе координат орта кинетического момента БЭСГ. Решение первой задачи получается путем привлечения данных от мультиантенной ПА СНС, формирования скоростных, позиционных и курсовых измерений и обработки данных с помощью известных алгоритмов [3]. Настоящая статья посвящена решению второй задачи.

Постановка задачи

Рассмотрим режим точной начальной выставки и калибровки БЭСГ при запуске бескарданного гироскопического компаса в условиях надводного положения необитаемого подводного аппарата, т.е. алгоритм решения задачи точной начальной выставки в инерциальной системе координат (ИСК) орта кинетического момента БЭСГ и калибровки его дрейфов с опорой на данные мультиантенной ПА СНС и данные об углах качки, поступающие от измерительного модуля на микромеханических датчиках.

Введем четыре системы координат: $Ox_k y_k z_k$ – система координат, связанная с корпусом гироскопа; $Ox_c y_c z_c$ – система координат, связанная с объектом; $O_* \xi_* \eta_* \zeta_*$ – инерциальная система координат (связанная с неподвижными звездами); $O \xi_{int} \eta_{int} \zeta_{int}$ – квазиинерциальная система координат, совпадающая в момент коррекции с осями гироскопического трехгранника $q_1 q_2 q_3$, построенного на ортах кинетических моментов опорного и калибруемого БЭСГ. Графическое изображение описанных систем координат представлено на рис. 1, где φ, λ_* – широта и инерциальная долгота.

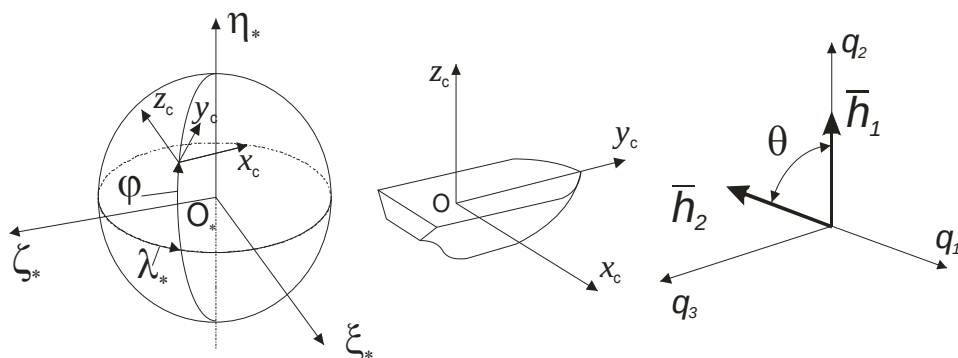


Рис. 1. Системы координат: $O_* \xi_* \eta_* \zeta_*$ – инерциальная; $Ox_c y_c z_c$ – связанная с объектом

В настоящее время в качестве базовой принята детерминированная модель ухода БЭСГ, которая представляется в виде аналитических функций, связывающих геометрические параметры несферичного и несбалансированного ротора с параметрами физических полей – источников уводящих моментов. При этом зависимости строятся с учетом произвольной ориентации ротора, а проекции ускорений характеризуются управляющими напряжениями на электродах, которые являются реакциями подвеса на силовые воздействия.

Так, скорость дрейфа в проекции на одну из осей x_k корпуса гироскопа имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} \omega_{x_k} = & k_0 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + k_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) u_1 + h_1 h_2 u_2 + h_1 h_3 u_3 \right] + \\ & + k_2 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) u_1^2 + h_2^2 u_2^2 + h_3^2 u_3^2 \right] + k_3 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1 u_1 + h_2^3 u_2 + h_3^3 u_3 \right] + \\ & + k_4 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 u_1^2 + h_2^4 u_2^2 + h_3^4 u_3^2 \right] + h_1 \left(\mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2 \right) + h_2 h_3 v_{23} + \\ & + \left(H_1 h_1 + H_2 h_2 + H_3 h_3 \right) \left\{ \alpha'' \left(H_3 h_2 - H_2 h_3 \right) + \right. \\ & \left. + \alpha' \left[H_1 - h_1 \left(H_1 h_1 + H_2 h_2 + H_3 h_3 \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $h_i (i = 1, 2, 3)$ – направляющие косинусы орта кинетического момента ротора в корпусной $x_k y_k z_k$ системе координат; k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты модели ухода БЭСГ; $u_i = \frac{U_i}{U_0}$ – относительные напряжения на электродах подвеса. Здесь U_i – управляющие напряжения на электродах подвеса; U_0 – опорное напряжение на электродах подвеса (постоянная величина); H_i – проекции напряженности магнитного поля на оси корпуса; α', α'' – действительная и мнимая части определяемого экспериментально коэффициента поляризуемости ротора, отнесенные к величине кинетического момента гироскопа; μ_{ij} – коэффициенты, характеризующие консервативную часть момента от взаимодействия неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, а коэффициенты v_{ij} – диссипативную часть данного момента.

Оценка коэффициентов модели ухода БЭСГ осуществляется вначале в условиях стенда. В условиях эксплуатации при каждом запуске системы в интересах точности также целесообразно осуществлять оценивание значений этих коэффициентов. Однако, как показывают результаты проведенных исследований, в этом случае время готовности бескарданного гироскопического компаса будет лежать в пределах 16–18 часов, что не всегда допустимо.

Таким образом, постановка задачи точной начальной выставки и калибровки БЭСГ заключается в выработке оценок для вектора состояния системы (описание которого приводится ниже) с последующим учетом их в обратной связи для корректировки оцениваемых параметров. Следует выделить ряд особенностей поставленной задачи:

- используются два БЭСГ с ортогональными векторами кинетических моментов, на основе выходных данных которых ($\vec{h}_{k_i}^S$ – векторов измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов $\mathcal{E}SG_i$ в их корпусных осях $x_k y_k z_k$, где $i = 1, 2$) моделируется в пространстве соответствующий ортогональный гироскопический трехгранник $q_1 q_2 q_3$. При этом по данным от ПА СНС и измерительного блока на микромеханических датчиках формируется эталонный («идеальный») БЭСГ, используемый в качестве опорного. Погрешности определения положения вектора его кинетического момента относительно ИСК и коэффициенты модели ухода равны нулю с точностью до погрешностей определения углового положения, определяемого матрицей ориентации $C_{c,*}^{et}$, вычисленной по данным от мультиантенной ПА СНС и микромеханических датчиков;
- применяется дискретный алгоритм обработки данных. Использование квази-ИСК позволяет осуществить линеаризацию матрицы динамики погрешностей БЭСГ (также описанных в квази-ИСК) и измерений в точках пространства (в момент коррек-

- ции положения БЭСГ), дискретно движущихся вместе с вектором кинетического момента гироскопа [4]. Прогнозирование ухода калибруемого БЭСГ осуществляется в ИСК;
- в интересах сокращения времени готовности системы дрейфы БЭСГ могут описываться одним винеровским процессом (далее «суммарный дрейф») в осях квази-ИСК. В этом случае решается только задача точной начальной выставки БЭСГ;
 - для обработки измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния системы.

Разностные измерения

При решении задачи используются два скалярных измерения:

$$\begin{aligned} z_1 &= (\vec{h}_{*1}^R \cdot \vec{h}_{*2}^R) - (\vec{h}_{c1}^{et} \cdot \vec{h}_{c2}^{et}) = \cos \theta_R - \cos \theta, \\ z_2 &= h_{int1_2}^R - h_{int1_2}^{et}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь z_1 – первое измерение, представляющее собой разность косинусов расчетного θ_R и измеренного θ углов между ортами векторов кинетических моментов опорного ($i = 1$) и калибруемого ($i = 2$) гироскопов; $\vec{h}_{c1}^{et}, \vec{h}_{c2}^{et}$ – векторы эталонных и измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов БЭСГ_{*i*} в осях $Ox_c y_c z_c$ соответственно.

Второе скалярное измерение z_2 представляет собой первый элемент вектора

$$\vec{z}_2 = \vec{h}_{int_2}^R - \vec{h}_{int_2}^{et} = (C_{int_pr}^{int_et} - E) \vec{h}_{int_2}^{et},$$

в котором $\vec{h}_{*1}^R, \vec{h}_{*2}^R, \vec{h}_{int_2}^R, \vec{h}_{int_2}^{et}$ – расчетные $\vec{h}^R$ (прогнозируемые) и эталонные $\vec{h}^{et}$ значения ортов БЭСГ в проекциях на оси соответственно ИСК и квази-ИСК; $C_{int_pr}^{int_et}$ – матрица перехода от истинных осей квази-ИСК к их приборной реализации, характеризующая прецессию БЭСГ; E – единичная матрица размерности 3×3 .

Положение ортов $\vec{h}_{*i}^R$ кинетических моментов гироскопов в ИСК и корпусных осях вычисляется на рабочей частоте следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{h}_{*1}^R(t) &= \vec{h}_{*1}^{et}(t_0) = const; \quad h_{k1}^{et} = (C_{c,in}^{et})^T \vec{h}_{*1}^{et}(t_0); \\ d\vec{h}_{*2}^R / dt &= \vec{\omega}_{*2} \times \vec{h}_{*2}^R; \quad \vec{h}_{*2}^R(t_0) = C_{c,*}^{et}(t_0) C_{k,c} h_{k2}(t_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\vec{h}_{k1}^{et}, \vec{h}_{k2}$ – векторы соответственно эталонных и измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов ЭСГ_{*i*} в его корпусных осях. $C_{k,c}$ – матрица ориентации измерительных осей ЭСГ₂ относительно осей, связанных с подводным аппаратом, которая определяется при калибровке БЭСГ в условиях стенда.

Положение (построение) ИСК относительно трехгранника $q_1 q_2 q_3$ характеризуется матрицей $C_{q,*}$, орты-столбцы которой, согласно принятому условию ортогонализации, определяются как

$$\vec{q}_1 = \frac{1}{\sin \theta} (\vec{h}_{*1} \times \vec{h}_{*2}), \quad \vec{q}_2 = \vec{h}_{*1}, \quad \vec{q}_3 = \vec{q}_1 \times \vec{q}_2.$$

Согласно алгоритму (3), расчетные значения систематических дрейфов $\vec{\omega}_{*2}$ ЭСГ₂ в ИСК пересчитываются из осей корпуса БЭСГ в соответствии с соотношением

$$\vec{\omega}_{*_{-2}} = C_{c,*}^{pr} C_{k,c} \cdot \vec{\omega}_{k_{-2}}, \quad (4)$$

где $C_{c,*}^{pr}$ – расчетные (приборные) значения матрицы ориентации, формируемые без использования данных ПА СНС, $\vec{\omega}_{k_{-2}}$ – систематические дрейфы ЭСГ₂ в корпусных осях, коэффициенты модели ухода которых, согласно (1), вычисляются при стендовых испытаниях. Положение квази-ИСК относительно ИСК определяется матрицей $C_{*,int}$, равной значению матрицы $(C_{q,*})^T$ в моменты коррекции положения БЭСГ. Необходимые для формирования измерений (2) расчетные значения ортов ЭСГ_i равны

$$\vec{h}_{int_i}^R = C_{*,int} \cdot \vec{h}_{*_{-i}}^R. \quad (5)$$

Эталонные значения орта $\vec{h}_{int_2}^{et}$ для ЭСГ₂ формируются следующим образом:

$$\vec{h}_{int_2}^{et} = C_{*,int} C_{c,*}^{et} C_{k,c} \vec{h}_{k_{-2}}. \quad (6)$$

Модель погрешностей

Модель погрешностей $\Delta \vec{h}_{int_2}^R$ прогнозирования текущих значений орта $\vec{h}_{int_2}^R$ ЭСГ₂ в проекциях на оси квази-ИСК, требуемая для обработки в фильтре Калмана измерений (2), была получена варьированием уравнений (3) с учетом соотношений (4), (6). Линеаризация матрицы динамики системы осуществлялась относительно следующих значений ортов БЭСГ_i:

$$\vec{h}_{int_1o}^R = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{h}_{int_2o}^R = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Учитывая, что калибровка коэффициентов модели ухода БЭСГ и привязка его измерительных осей к корпусу гироскопа была произведена в условиях стенда, получена следующая упрощенная модель погрешностей уходов реального БЭСГ:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{h}_{int1_2}^R &= -(\omega_{int3_2} + \omega_{int2_2} \cos \theta / \sin \theta) \cdot \Delta h_{int2_2}^R + \Delta \omega_{intS_2}, \\ \Delta \dot{h}_{int2_2}^R &= \omega_{int3_2} \cdot \Delta h_{int1_2}^R + (\omega_{int1_2} \cos \theta / \sin \theta) \cdot \Delta h_{int2_2}^R - \sin \theta \cdot \Delta \omega_{int1_2}, \\ \Delta \dot{\omega}_{int1_2} &= w_3, \\ \Delta \dot{\omega}_{intS_2} &= w_4, \\ \Delta \dot{h}_{k1_2} &= w_5, \\ \Delta \dot{h}_{k2_2} &= w_6, \\ \Delta \dot{h}_{k3_2} &= w_7, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta \omega_{int1_2}$, $\Delta \omega_{intS_2} = \sin \theta \cdot \Delta \omega_{int2_2} - \cos \theta \cdot \Delta \omega_{int3_2}$ – суммарные дрейфы БЭСГ₂ в осях квази-ИСК, описываемые винеровскими процессами с заданными параметрами и характеризующие погрешности калибровки коэффициентов модели ухода БЭСГ на стенде и изменчивость их при каждом запуске; $\Delta \vec{h}_{ki_2}$ ($i=1, 2, 3$) – погрешности списывающих устройств БЭСГ₂ в корпусных осях, скачкообразно меняющиеся при переходе с одного датчика угла на другой (при изменении угла более 45°) и описываемые случайными постоянными.

Погрешности моделирования квази-ИСК могут быть представлены вектором малого поворота $\vec{\Lambda}_{\text{int}} = [\Lambda_{\text{int}1} \quad \Lambda_{\text{int}2} \quad \Lambda_{\text{int}3}]^T$, характеризующим текущие погрешности построения ИСК в проекциях на оси квази-ИСК. Анализируя матрицу

$$C_{\text{int}_{pr}}^{\text{int}_{et}} = E - \delta C_{\text{int}_{et}}^{\text{int}_{pr}}, \text{ где } \delta C_{\text{int}_{et}}^{\text{int}_{pr}} = \begin{bmatrix} 0 & -\Lambda_{\text{int}3} & \Lambda_{\text{int}2} \\ \Lambda_{\text{int}3} & 0 & -\Lambda_{\text{int}1} \\ -\Lambda_{\text{int}2} & \Lambda_{\text{int}1} & 0 \end{bmatrix},$$

можно показать, что в окрестности точки линеаризации имеют место следующие приближенные соотношения [4]:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\text{int}1} &= -\Delta h_{\text{int}3_1}^R, \\ \Lambda_{\text{int}2} &= -\frac{1}{\sin \theta} \Delta h_{\text{int}1_2}^R + \text{ctg} \theta \cdot \Delta h_{\text{int}1_1}^R, \\ \Lambda_{\text{int}3} &= \Delta h_{\text{int}1_1}^R, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta h_{\text{int}j_i}^R$ – составляющие ($j=1, 2, 3$) векторов погрешностей прогнозирования уходов БЭСГ_i ($i=1, 2$) в проекциях на оси квази-ИСК.

Очевидно, что в рассматриваемой задаче при формировании «идеального» БЭСГ₁ справедливы соотношения: $\Delta h_{\text{int}1_1}^R \cong 0$, $\Delta h_{\text{int}3_1}^R \cong 0$. Учитывая (8) и соотношения (9), измерения (2) в окрестности точки линеаризации могут быть представлены следующими приближенными выражениями:

$$\begin{aligned} z1 &\cong \Delta h_{\text{int}2_2}^R + v_1, \\ z2_1 &\cong \Delta h_{\text{int}1_2}^R + v_2, \end{aligned}$$

где $v_1 = -\Delta h_{\text{int}2_2}$, $v_2 = -\Delta h_{\text{int}1_2}^{\text{et}}$ – шумы измерений. Здесь $\Delta h_{\text{int}2_2}$ – второй элемент орта вектора погрешности списывающих устройств БЭСГ₂ в проекциях на оси квази-ИСК; $\Delta h_{\text{int}1_2}^{\text{et}}$ – погрешности формирования эталонных значений первого элемента орта $\vec{\Delta h}_{\text{int}2}^{\text{et}}$ БЭСГ₂ по данным мультиантенной ПА СНС и измерительного модуля на микромеханических датчиках, включающие погрешности списывающих устройств БЭСГ₂ в проекциях на оси квази-ИСК, а также погрешности измерительного блока по углам качки и ПА СНС по курсу.

Отметим, что в окрестности точки линеаризации также справедливы следующие соотношения для оценок:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta h}_{\text{int}3_2}^R &= -(\cos \theta / \sin \theta) \cdot \hat{\Delta h}_{\text{int}2_2}^R; \\ \hat{\Delta \vec{h}}_{*_2}^R &= (C_{*,\text{int}})^T [\hat{\Delta h}_{\text{int}1_2}^R; \hat{\Delta h}_{\text{int}2_2}^R; \hat{\Delta h}_{\text{int}3_2}^R]; \\ \Delta \hat{\omega}_{\text{int}2_2} &= \Delta \hat{\omega}_{\text{int}S_2} \cdot \sin \theta; \Delta \hat{\omega}_{\text{int}3_2} = -\Delta \hat{\omega}_{\text{int}S_2} \cdot \cos \theta. \end{aligned}$$

Таким образом, вектор оцениваемых параметров для упрощенной и полной модели дрейфов будут соответственно равны:

$$x_{\text{упр}}^T = [\Delta h_{\text{int}1_2}^R \quad \Delta h_{\text{int}2_2}^R \quad \Delta \omega_{\text{int}1_2} \quad \Delta \omega_{\text{int}S_2} \quad \Delta \bar{h}_{k1_2} \quad \Delta \bar{h}_{k2_2} \quad \Delta \bar{h}_{k3_2}], \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x_{\text{полн}}^T &= [\Delta k_0 \quad \Delta k_1 \quad \Delta k_2 \quad \Delta k_3 \quad \Delta k_4 \quad \Delta \mu_1 \quad \Delta \mu_2 \quad \Delta \mu_3 \quad \Delta v_1 \quad \Delta v_2 \quad \Delta v_3, \\ &\quad \Delta \bar{h}_{k1_2} \quad \Delta \bar{h}_{k2_2} \quad \Delta \bar{h}_{k3_2}]. \end{aligned} \quad (11)$$

Результаты моделирования

Для сравнения времени готовности системы при калибровке коэффициентов модели ухода БЭСГ и в режиме точной начальной выставки (упрощенная модель погрешностей) осуществлялось численное моделирование задачи оценивания в среде MATLAB с использованием пакета SIMULINK. При этом для достижения потенциальной точности бескарданного гироскопического компаса решалась задача оценивания вектора состояния (11) при измерениях (2). При тех же измерениях, но уже с вектором оцениваемых параметров (10), решалась задача точной начальной выставки вектора кинетического момента БЭСГ.

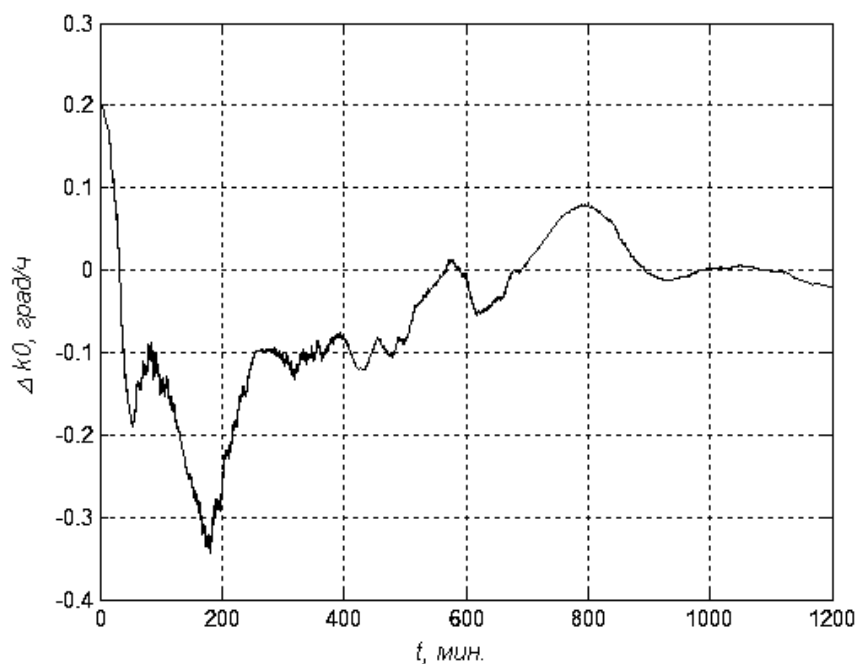


Рис. 2. Погрешность калибровки коэффициента k_0 модели ухода БЭСГ

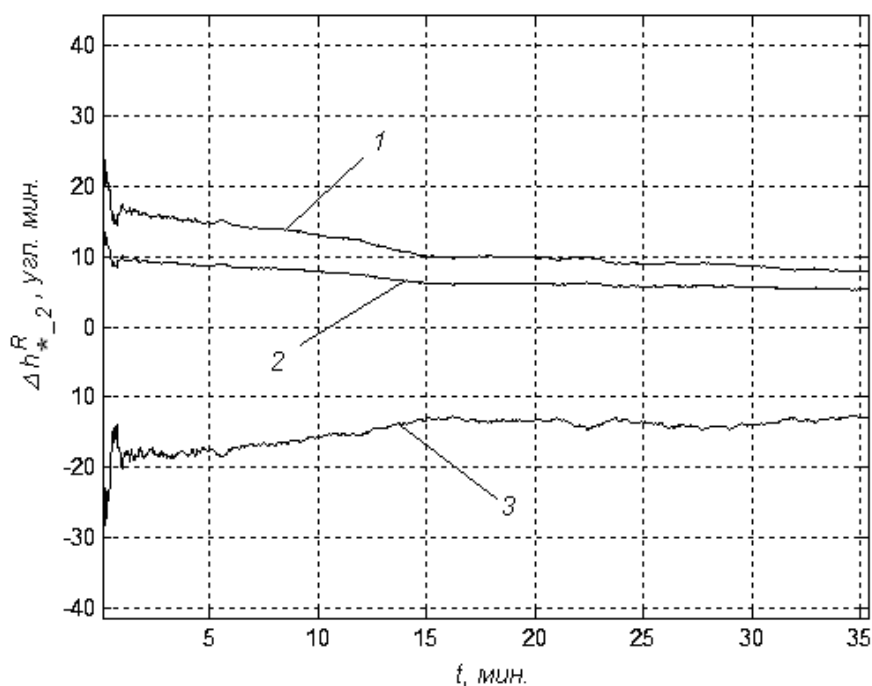


Рис. 3. Погрешности выставки БЭСГ: 1 – Δh_{in1}^R , 2 – Δh_{in2}^R , 3 – Δh_{in3}^R

Принимались следующие исходные значения:

- неопределенность знания коэффициентов модели ухода БЭСГ $0,2\text{--}0,5^\circ/\text{ч}$;
- погрешности измерительного модуля на микромеханических датчиках по углам качки: $0,1^\circ$ – систематическая составляющая, $0,3^\circ$ – флуктуационная составляющая;
- погрешность мультиантенной ПА СНС по курсу: $0,3^\circ$ – систематическая составляющая, $0,5^\circ$ – флуктуационная составляющая;
- погрешности грубой начальной выставки БЭСГ – около 1° ; начальная ориентация вектора кинетического момента БЭСГ – в плоскости земного экватора.

На рис. 2 приведен график погрешности одного из калибруемых коэффициентов модели ухода (k_0) БЭСГ при использовании полной расчетной модели уходов БЭСГ, когда отсутствует ограничение по времени готовности бескарданного гироскопического компаса. Видно, что время переходного процесса находится в районе 1000 мин.

На рис. 3 представлены погрешности режима точной начальной выставки БЭСГ при использовании упрощенной расчетной модели его ухода. В этом случае получаем существенное сокращение времени готовности при точности выставки вектора кинетического момента БЭСГ в ИСК в пределах 15 угловых минут.

Выводы

Рассмотрен режим начальной выставки и калибровки бескарданного гироскопического компаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках. Показано, что при калибровке коэффициентов модели ухода БЭСГ при запуске системы (для достижения потенциальной точности бескарданного гироскопического компаса) время готовности будет лежать в пределах 18–20 часов. Предложена упрощенная расчетная модель погрешностей БЭСГ, обеспечивающая решение задачи его точной начальной выставки в течение 30–40 мин.

Литература

1. Рапопорт Л.Б., Ткаченко М.Я., Могильницкий В.Г. и др. Интегрированная система спутниковой и инерциальной навигации: экспериментальные результаты и применение к управлению мобильными роботами // Гироскопия и навигация. – 2007. – Т. №1(56). – С. 16–28.
2. Интегрированная система Seapath 200. Product Manuals - Seapath 200. Precise Heading, Attitude and Position. – Seatex AS, Trondheim, Norway, 1998-05-04.
3. Блажнов Б.А., Волынский Д.В., Емельянцев Г.И., Несенюк Л.П., Степанов А.П. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с микромеханическим инерциальным модулем. Результаты испытаний на автомобиле // Рефераты докладов XXVI конф. памяти Н.Н. Острякова. СПб, 2008, с. 21–22 // Гироскопия и навигация. – 2008. – №4(63). – С. 77.
4. Емельянцев Г.И., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г. Об уточнении модели дрейфов электростатических гироскопов бескарданной инерциальной системы ориентации и о методике их калибровки на стенде и в условиях орбитального космического аппарата // Гироскопия и навигация. – 2008. – №1(60). – С. 43–54.

Емельянцев Геннадий Иванович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Emel@mail.ifmo.ru

Лочехин Алексей Владимирович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alex@infom.su

5

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 53.084.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ
ЛИТОГРАФИИ В СИСТЕМЕ «МЕТАЛЛ – ПОЛИМЕР»

А.Л. Пинаев, А.В. Стовяга

Предлагается простая и недорогая технология создания проводящих структур с пониженной размерностью на основе применения метода динамической силовой литографии (ДСЛ) к системе «металл – полимер». Приводятся результаты локальной ДСЛ-модификации поверхности поликарбоната и поликарбоната, покрытого алюминиевой пленкой, с использованием вольфрамового нанозондов с радиусом порядка 100 нм. Результаты модификации анализируются с помощью сканирующего зондового и растрового электронного микроскопов.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, литография.

Введение

Методы микро- и наномодификации материалов вызывают большой интерес, поскольку они во многом определяют развитие нанотехнологий. Известны методы ультрафиолетовой, рентгеновской, электронной или ионной литографии, основанные на взаимодействии фотонов, электронов или ионов с веществом. Существуют также методы сканирующей зондовой литографии (СЗЛ), использующие взаимодействие твердотельного нанозонда с поверхностью модифицируемого объекта. В основе СЗЛ лежит возможность концентрации в области наноконтакта токов большой плотности, высоких электрических полей и механических давлений. В этих условиях активизируется целый ряд явлений, таких как локальный разогрев, пластическая деформация, поляризация, полевое испарение, массоперенос за счет ионных токов в электролите и электрохимические реакции, в том числе реакции окисления. Раздельное или совместное действие этих факторов используется для наномодификации материалов в различных режимах СЗЛ.

Целью работы было исследование режима динамической силовой литографии (ДСЛ) на поверхности полимеров с металлическим покрытием. Метод ДСЛ легко реализуется на основе недорогих и доступных сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) с пьезорезонансными датчиками силового взаимодействия [1]. В некоторых приложениях он успешно конкурирует с дорогостоящими методами электронной или ионной литографии, позволяя создавать рисунок на поверхности образца с характерными размерами в несколько десятков нанометров. Известно, что ДСЛ с использованием вольфрамовых нанозондов хорошо работает на поверхности полимеров, таких, например, как поликарбонат [2]. Представляется весьма интересным распространить этот метод на тонкие металлические пленки с целью создания проводящих структур с пониженной размерностью. Мы выбрали систему «металл – полимер», чтобы исключить разрушение вольфрамового зонда в процессе ДСЛ.

Методика проведения эксперимента

Исследование метода ДСЛ в системе «металл – полимер» проводилось в СЗМ «NanoEducator». Суть метода ДСЛ состоит в следующем. Создается цифровой шаблон, в котором зафиксированы координаты X , Y и величина модифицирующего воздействия. В полуконтактном силовом режиме осуществляется сканирование зондом. На прямом

ходе сканирования в заданных точках производится локальное силовое воздействие на поверхность объекта путем подачи на пьезосканер импульса напряжения, приводящего к перемещению образца вдоль координаты Z по направлению к зонду (рис. 1).

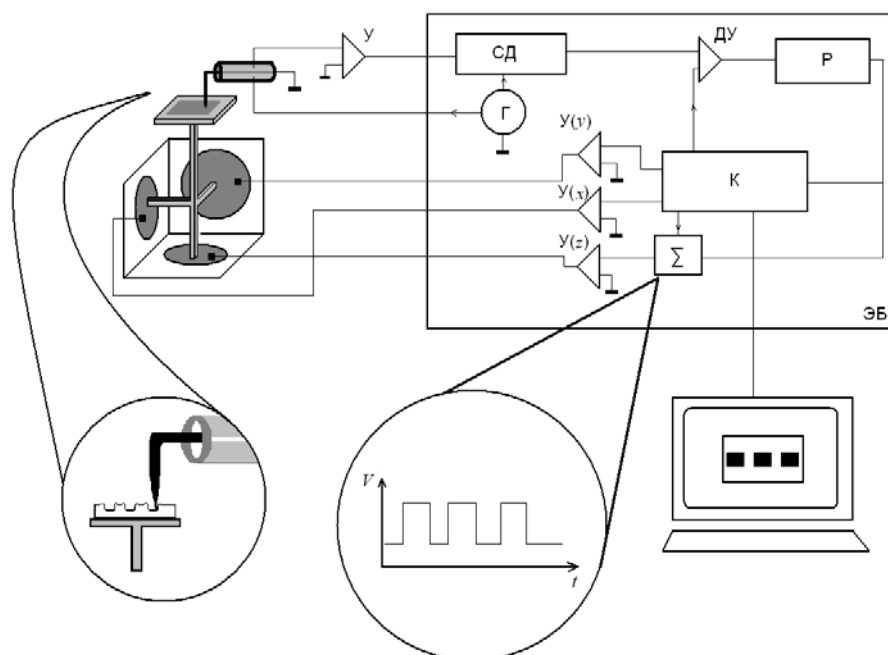


Рис. 1. Схема процесса ДСЛ: У – усилитель сигнала с датчика; Г – генератор раскачивания пьезотрубки датчика; СД – синхродетектор; ДУ – дифференциальный усилитель; Р – регулятор; К – контроллер; Σ – сумматор (суммирует сигнал обратной связи и импульсы перемещения образца вверх по оси Z , значение амплитуды и частоты которых таково, что система обратной связи не успевает обрабатывать вертикальное перемещение); $U(x)$, $U(y)$, $U(z)$ – усилители перемещения сканера

Величина силового воздействия определяется амплитудой импульса напряжения. Длительность импульса воздействия t выбирается из условия

$$t > 1/f,$$

где f – резонансная частота колебаний сканера вдоль координаты Z . В противном случае сканер не успеет произвести заданное перемещение. На обратном ходе сканирования производится визуализация результатов модификации. Величину механического давления τ в точке касания нанозонда с поверхностью объекта модификации можно оценить как

$$\tau = \frac{Mdf^2}{2R^2},$$

где M – масса перемещающейся части сканера с образцом, d – амплитуда смещения сканера, R – радиус зонда. Смещение сканера можно получить из выражения

$$d = \alpha U,$$

где α – чувствительность сканера по координате Z , U – амплитуда импульса напряжения воздействия. Тогда условие оптимальной реализации режима ДСЛ будет иметь вид

$$\tau_p > \tau > \tau_s,$$

где τ_p – напряжение пластической деформации зонда, τ_s – напряжение пластической деформации образца. Исходя из этой модели, подбирались оптимальные параметры для ДСЛ и выполнялась модификация поверхности поликарбоната. В качестве объекта модификации выбирался фрагмент лазерного диска размером 5×5 мм, который размещался на рабочем столике СЗМ «NanoEducator».

Результаты эксперимента

На рис. 2 представлен результат модификации поверхности лазерного диска методом ДСЛ при $d = 100$ нм, $t = 100$ мкс и шаге сканирования 40 нм. Использовался зонд из вольфрама с радиусом R порядка 100 нм. Из рис. 2 видно, что глубина каналов на поверхности поликарбоната, полученных методом ДСЛ, составляет 40 нм.

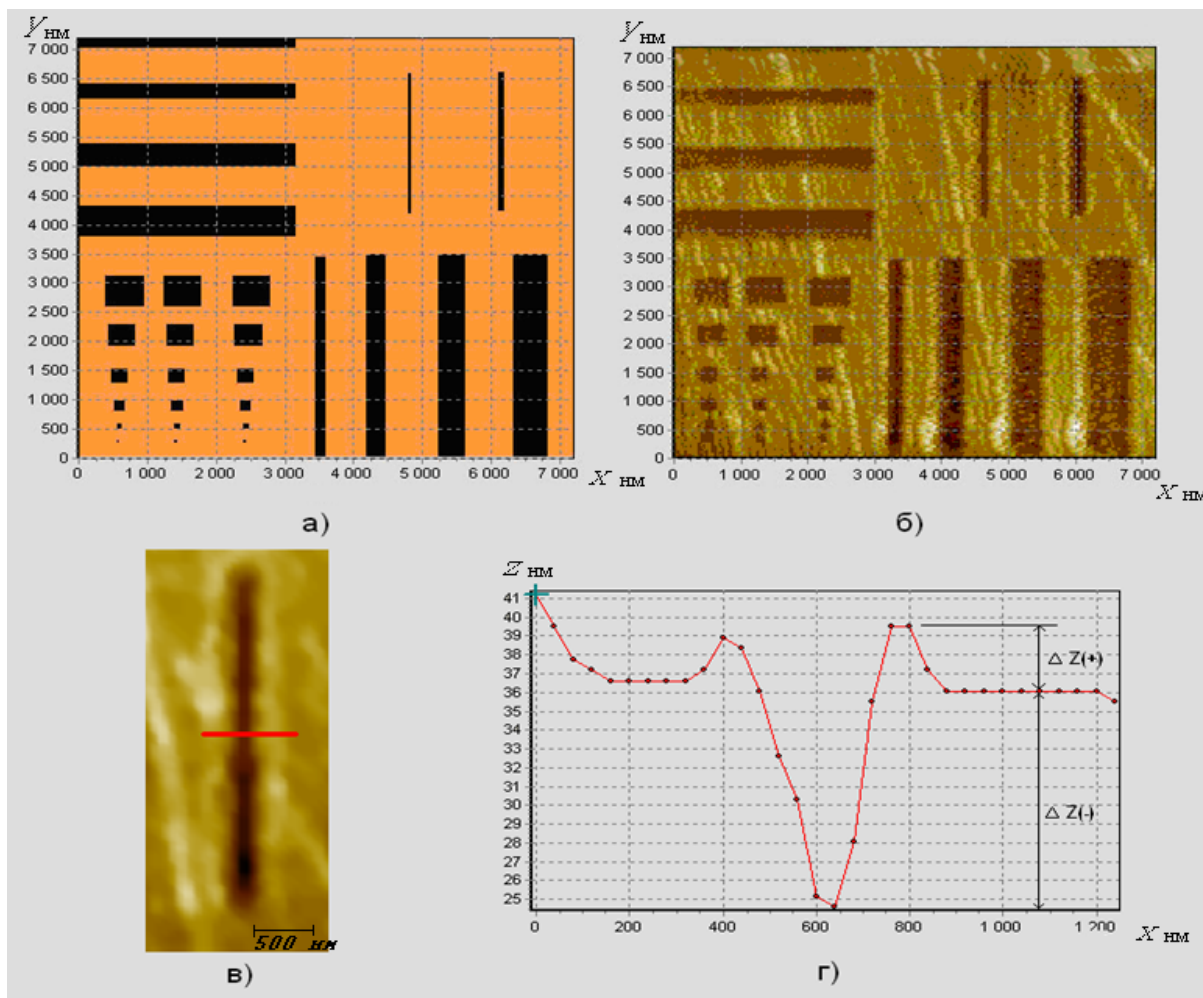


Рис. 2. Результат модификации поверхности лазерного диска методом ДСЛ:
 а – шаблон, б – СЗМ изображение поверхности после модификации,
 в – анализируемая канавка, г – сечение канавки

Для исследования метода ДСЛ в системе «металл – полимер» использовался фрагмент от металлизированного участка того же лазерного диска. Известно, что на металлизированном участке диска поликарбонат покрыт алюминиевой пленкой толщиной порядка 100 нм. Из рис. 3 видно, что метод ДСЛ может работать в системе «металл – полимер». Получены достаточно ровные края каналов с глубиной порядка 250 нм. Вместе с тем полного воспроизведения шаблона методом ДСЛ в системе «металл – полимер» получено не было.

Модифицированная поверхность образца металлизированного поликарбоната была исследована в растровом электронном микроскопе (РЭМ) (рис. 4)

Отметим, что РЭМ-изображения металлизированной поверхности поликарбоната до ДСЛ-модификации имели устойчивый характер и представляли собой гладкие поверхности с однородным контрастом. В то же время РЭМ-изображения модифициро-

ванных образцов были неустойчивыми во времени (расплывались и искажались). Контраст изображения был неоднородным, наблюдались отдельные яркие линии.

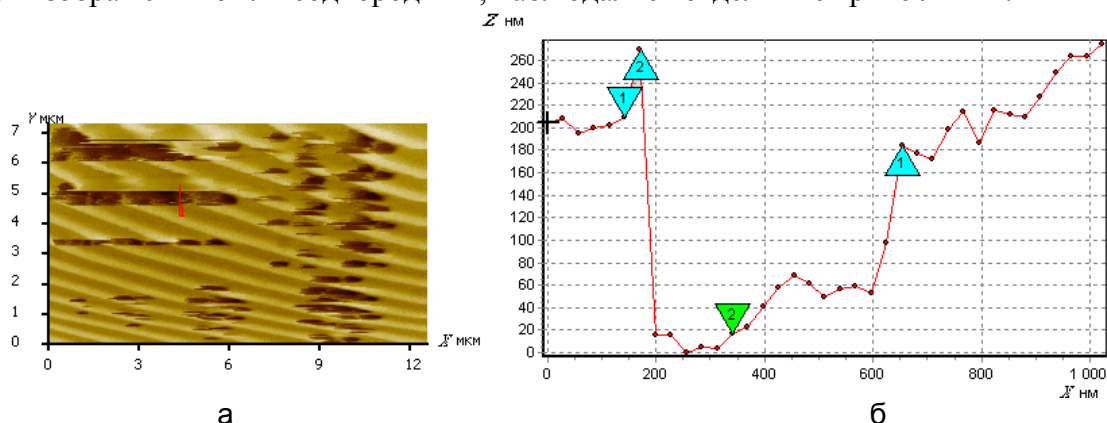


Рис. 3. Результат модификации металлизированной поверхности лазерного диска:
а – СЗМ-изображение поверхности после модификации, б – сечение канавки
(1 – расстояние между точками: по оси $x = 511$ нм, по оси $z = 24$ нм;
2 – расстояние между точками: по оси $x = 190$ нм, по оси $z = 250$ нм)

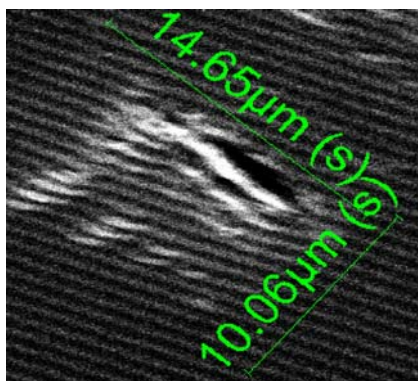


Рис. 4. РЭМ-изображение металлизированной поверхности поликарбоната, модифицированной методом ДСЛ

Подобное поведение РЭМ-изображений можно объяснить тем, что в процессе модификации с поверхности поликарбоната был удален металлизированный слой. В результате вскрытые участки поликарбоната заряжались электронным пучком, что приводило к неустойчивости РЭМ-изображений и неоднородности их контраста. На некоторых участках РЭМ-изображений наблюдались яркие линии, повторяющие фрагменты шаблона, используемого при ДСЛ. Однако полностью шаблон на РЭМ-изображениях не воспроизводился. Этот факт можно объяснить тем, что в экспериментах с системой «металл – полимер» не были достигнуты оптимальные параметры для режима ДСЛ, и на некоторых участках металлическая пленка не была разрушена под действием локальной модификации.

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что метод ДСЛ с использованием вольфрамовых нанозондов может быть применен к системе «металл – полимер». Анализ СЗМ- и РЭМ-изображений поверхности поликарбоната, покрытого алюминиевой пленкой, показывает, что металлическая пленка может быть удалена с поверхности с помощью метода ДСЛ.

Пространственное разрешение при создании структур таким методом сравнимо с пространственным разрешением, достигаемым на чистых поверхностях поликарбоната, и определяется радиусом используемого вольфрамового нанозонда (порядка 100 нм). Для определения оптимальных параметров метода ДСЛ для системы «металл – поликарбонат» необходимо провести дополнительные исследования, в частности, исследовать зависимость результатов локальной модификации от толщины и состава металлических покрытий. Использование метода ДСЛ в системе «металл – полимер» открывает путь для простой и недорогой технологии создания проводящих структур с пониженной размерностью.

Литература

1. Голубок А.О., Васильев А.А., Кerpелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д. Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 62–69.
2. Стовпяга А.В., Пинаев А.Л., Голубок А.О. Исследование нанозонда для модификации поверхности полимера методом динамической силовой литографии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 58. – С. 86–81.
3. Неволин В.К. Зондовые технологии в электронике. – М. : Техносфера, 2006. – 159 с.

Пинаев Александр Леонидович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pinaich@mail.ru

Стовпяга Александр Владимирович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanja100v@mail.ru

УДК 547.97: 535.8; 541.147

ЗАКОНОМЕРНОСТИ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ МИКРОСТРУКТУР В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.Г. Булгакова, Н.Д. Ворзобова

Исследованы закономерности формирования полимерных микроструктур в светоотверждаемом нанокompозите. Установлена связь размерных характеристик микроструктур с экспозиционными параметрами, характеристиками амплитудной маски, толщиной слоя. Выявлена роль эффектов диффузии, ингибирования кислородом воздуха и самофокусировки света в процессах формирования микроструктур.

Ключевые слова: фотополимер, фотополимеризация, микроструктура, форматное отношение, характеристический размер элемента, нанокompозит.

Введение

Разработка методов формирования полимерных микроструктур является актуальной для получения элементов MEMS и MOEMS, элементов фотоники, электроники, механотроники, биотехнологий, элементов сопряжения и управления световыми пучками в волоконных линиях связи, элементов жидкокристаллических мониторов. Современный уровень исследований в данной области характеризуется поиском перспективных материалов, источников излучения, процессов получения микроструктурных элементов, а также их форм и конфигураций при уменьшении характеристических размеров элементов и увеличении форматного отношения. Одним из возможных методов формирования объемных микроструктурных элементов является глубокая литография.

В настоящее время наилучшие результаты обеспечивают процессы LIGA [1, 2] с использованием в качестве экспонирующего излучения рентгеновских и ионных пучков. Однако рентгеновские установки являются дорогостоящими и требуют соблюдения мер безопасности, а технологии, базирующиеся на использовании ионных пучков, требуют большого времени для получения сложных структур и не могут быть использованы для массового производства дешевых компонент.

Основным материалом для получения микроструктур является фоторезист SU-8. Одной из основных проблем, определяющих качество микроструктур, получаемых с использованием этого материала, является проблема удаления остаточного растворителя. В связи с этим актуальной является задача ориентации на оптические источники излучения и материалы, исключающие присутствие растворителя.

Постановка задачи

Возможность получения структур с высоким форматным отношением с использованием рентгеновского излучения определяется его малой расходимостью. В работах [3, 4] показана возможность формирования структур с практически вертикальными стенками при экспонировании оптическим излучением с существенной расходимостью за счет использования материала с положительным знаком изменения показателя преломления, в котором возможны эффекты самоорганизации светоотверждаемого материала. В работе [5] рассмотрен новый материал с введением структурирующей добавки – наночастиц ZnO, в котором отсутствует растворитель.

Целью данной работы являлось исследование размерных характеристик и закономерностей роста микроструктурных элементов с использованием источников оптического излучения и мономерной композиции с введением наночастиц ZnO.

Условия эксперимента

Микроструктуры формировались контактным методом при наложении амплитудной маски на слой жидкой композиции, нанесенной на поверхность стеклянной подложки. Толщина слоя задавалась размером прокладок и менялась от 30 до 300 мкм. Амплитудная маска (фотошаблон) изготавливалась фотографическим методом при уменьшении (20×) исходного рисунка, изготовленного на компьютере. Плотность амплитудной маски менялась от 0,5 до 2,5. В качестве исследуемой конфигурации использовался штриховой тест с изменением размеров элементов (ширин линий) и расстояний между ними. Экспонирование проводилось излучением ртутной лампы (365 нм). Параллельный пучок формировался кварцевым конденсором. Высоты микроструктур и их поперечные размеры (ширины) измерялись с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследование зависимости высоты элементов микроструктур от экспозиции (рис. 1) показало, что уже на начальном этапе роста структуры (при длительностях экспозиции до 10 с) формируется 50–70% конечной высоты микроструктуры, при дальнейшем увеличении экспозиции (до 20–30 с) происходит плавная достройка микроструктуры.

Кинетика роста микроструктуры в высоту качественно аналогична кинетике роста полимерного слоя в макрообъеме. Однако скорость роста микроструктуры зависит от ширины линии в амплитудной маске и уменьшается с ее уменьшением. Достигаемая высота структур практически не зависит от расстояния между элементами и плотности шаблона (рис. 2). Конечная высота структур может превышать заданную толщину слоя.

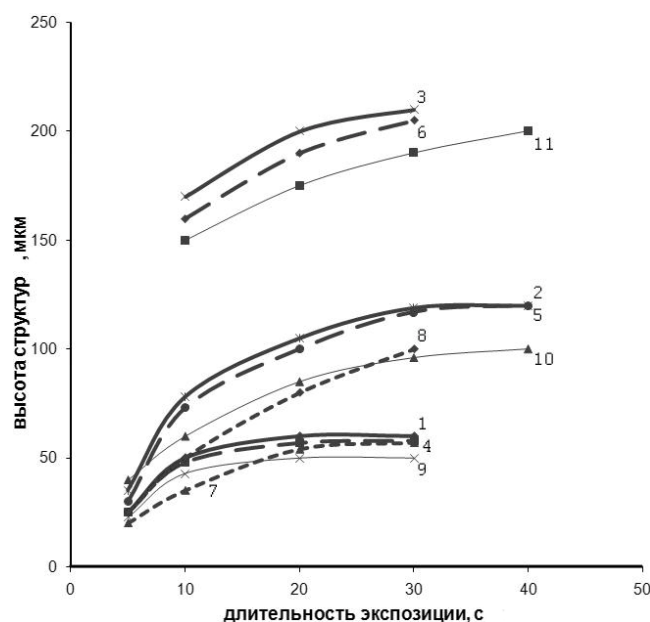


Рис. 1. Зависимость высоты структуры от длительности экспозиции. Ширина линий в амплитудной маске: 100 мкм (1, 2, 3), 75 мкм (4, 5, 6), 50 мкм (7, 8). 9, 10, 11 – кинетика роста полимерного слоя. Толщина слоя: 30 мкм (1, 4, 7, 9), 100 мкм (2, 5, 8, 10), 300 мкм (3, 6, 11)

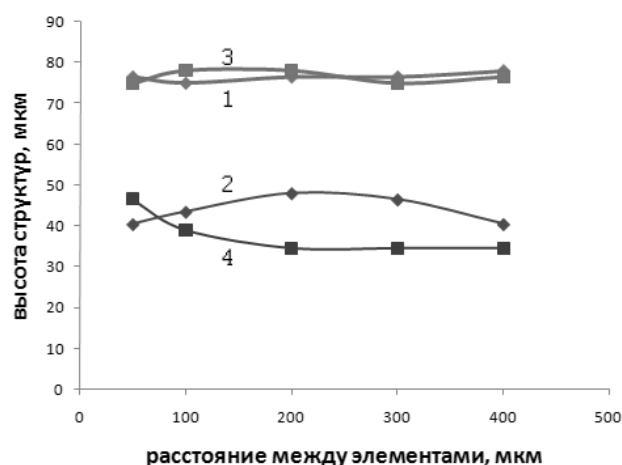


Рис. 2. Зависимость высоты структуры от расстояния между элементами и плотности шаблона. Плотность шаблонов: 1,2 (1, 2) и 2,5 (3, 4). Толщина слоя: 30 мкм (2, 4) и 100 мкм (1, 3). Длительность экспозиции 20 с

Исследование кинетики роста микроструктурных элементов в ширину установило отличие от кинетики роста в высоту. Так, процентное отношение начальной ширины (для длительности экспозиции до 10 с) к конечной ширине меньше соответствующего отношения для высот микроструктур. Начальная ширина элементов существенно зависит от ширины линии в фотошаблоне, расстояния между линиями и плотности шаблона и может составлять от 5 до 70 % конечной ширины (рис. 3). Скорость роста элементов в ширину практически не зависит от ширины линии, но увеличивается с уменьшением соотношения расстояние/ширина. Конечная ширина элементов (рис. 4) существенно зависит от расстояния между линиями (уменьшается с его увеличением) и плотности шаблона (увеличивается с уменьшением плотности) и может быть меньше заданной ширины линий в амплитудной маске. Уменьшение ширины элемента (наряду с увели-

чением высоты) является позитивным фактором с точки зрения увеличения форматного отношения при уменьшении характеристического размера. Наблюдаемое уменьшение поперечных размеров элементов микроструктур при увеличении плотности шаблона и расстояния между линиями может быть связано с ингибированием процесса фотополимеризации кислородом воздуха. Кинетика роста элементов в ширину и их конечные поперечные размеры не зависят от толщины слоя (рис. 5), что свидетельствует о формировании элементов с практически вертикальными стенками.

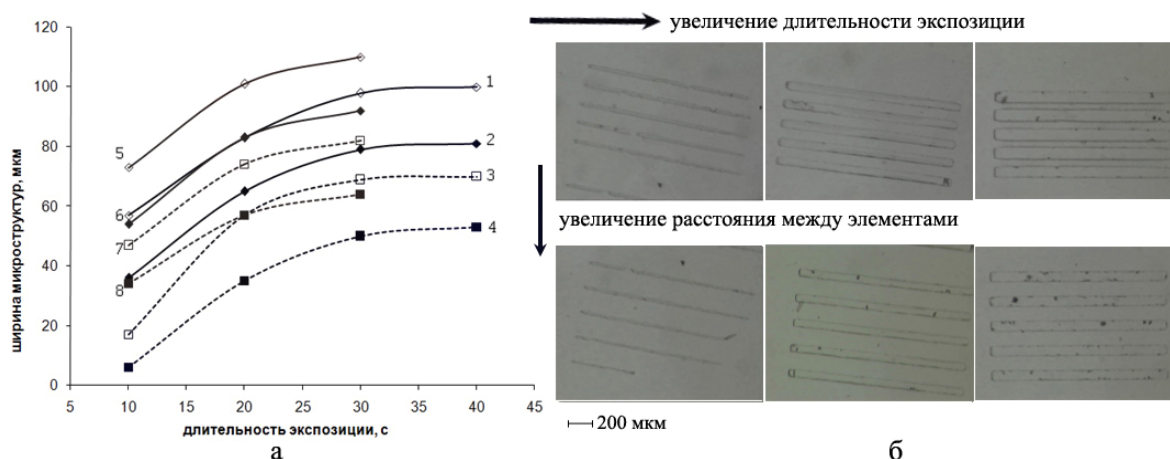


Рис. 3. Зависимость ширины элемента микроструктуры от длительности экспозиции.
а – Экспериментальные кривые. Плотность шаблонов: 2,5 (1, 2, 3, 4) и 1,2 (5, 6, 7, 8). Ширина линии: 100 μm (1, 2, 5, 6) и 75 μm (3, 4, 7, 8). Соотношение расстояние / ширина: 4 (2, 4, 6, 8) и 0,5 (1, 3, 5, 7). Толщина слоя 100 μm .
б – Микрофотографии структур

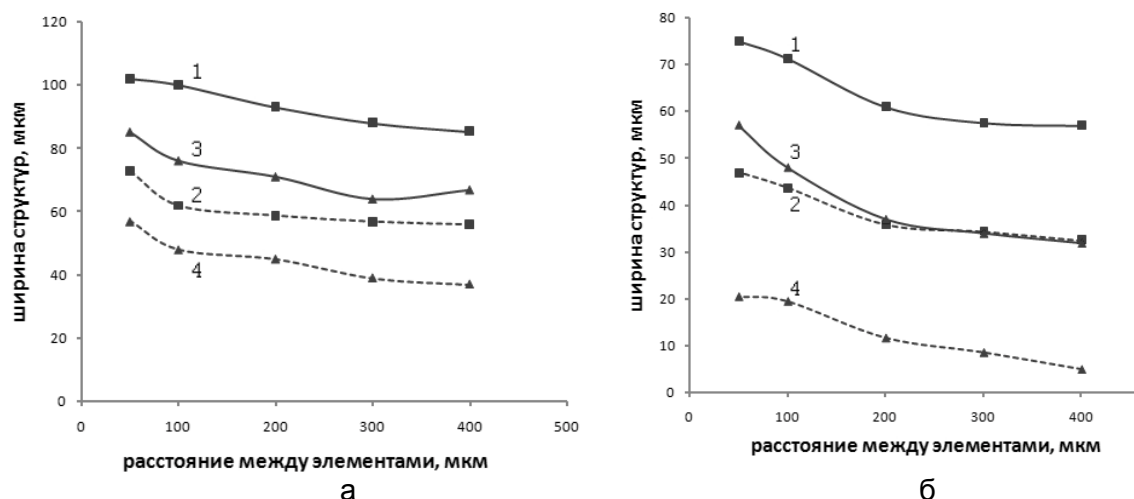


Рис. 4. Зависимость ширины элемента микроструктуры от расстояния между линиями.
Ширина линии: 100 μm (а) и 75 μm (б). Плотность шаблонов: 1,2 (1, 2) и 2,5 (3, 4).
Длительность экспозиции: 10 с (2, 4) и 20 с (1, 3)

Наибольший научный и практический интерес представляет проблема слияния близко расположенных элементов микроструктур вследствие полимеризации областей под темными участками фотошаблона. Проведенные исследования позволили установить следующие закономерности. Высота полимерного слоя между элементами микроструктур увеличивается при уменьшении расстояния между ними, увеличении экспозиции и уменьшении плотности шаблона (рис. 6). Образование полимерного слоя между элементами структур при больших плотностях шаблонов (т.е. при экспозициях в

темных областях, существенно меньших порога фотополимеризации) можно объяснить диффузией молекул инициатора со свободными радикалами из освещенных областей в неосвещенные. Влияние эффектов диффузии проявляется при больших длительностях экспозиции. Так, при длительности экспозиции 10 с наименьшее расстояние между элементами микроструктуры (НР) не зависит от плотности шаблона (рис. 7). Длительность экспозиции, соответствующая началу участка насыщения, характеризует время, необходимое для обеспечения требуемой для полимеризации в промежутках под темными областями фотошаблона концентрации фоторадикалов.

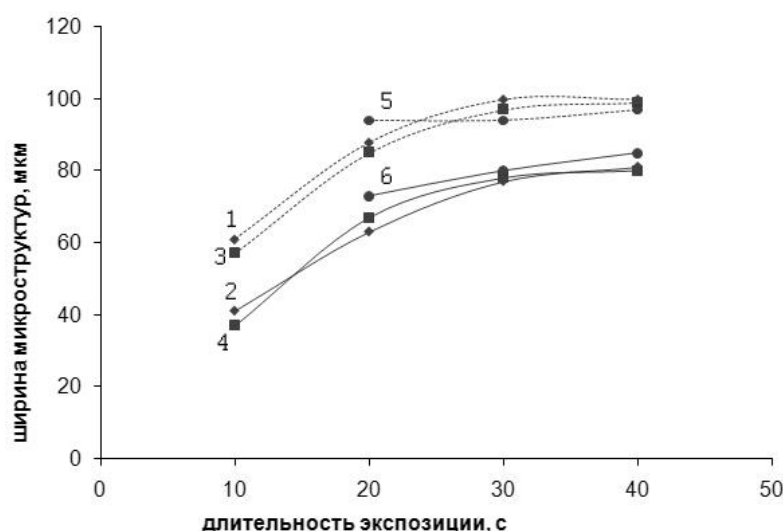


Рис. 5. Зависимость ширины элемента микроструктуры от толщины слоя. Толщина слоя: 30 мкм (1, 2), 100 мкм (3, 4), 300 мкм (5, 6). Соотношение расстояние / ширина: 4 (2, 4, 6) и 0,5 (1, 3, 5). Плотность шаблона 2,5

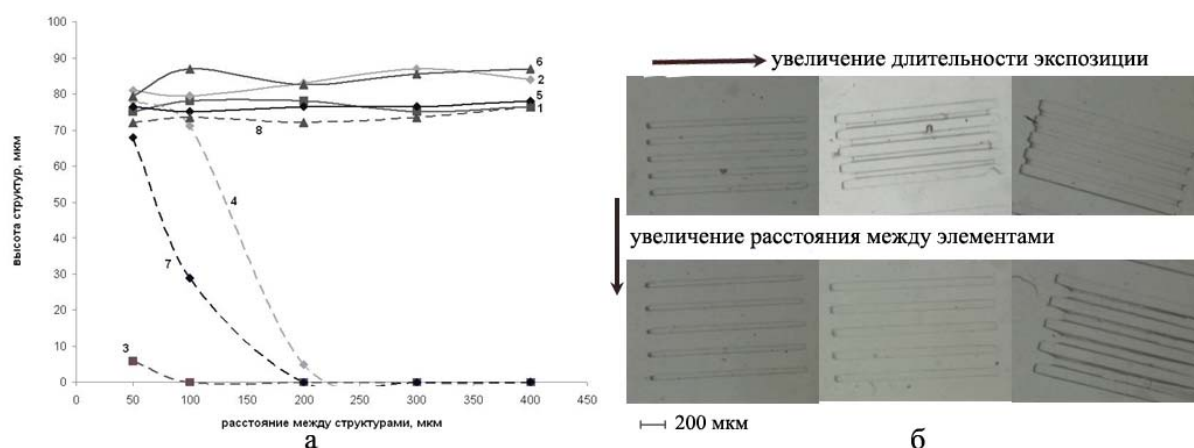


Рис. 6. Зависимость высоты полимерного слоя и элементов микроструктур от расстояния между элементами: а – экспериментальные кривые. Плотность шаблонов: 2,5 (1, 2, 3, 4) и 1,2 (5, 6, 7, 8). Длительность экспозиции: 20 с (1, 3, 5, 7) и 40 с (2, 4, 6, 8). 1, 2, 5, 6 – высота элементов, 3, 4, 7, 8 – высота полимерного слоя. Толщина слоя 100 мкм. Ширина линии 100 мкм; б – микрофотографии структур

Отношение НР к ширине линии постоянно (не зависит от ширины линии) для заданной экспозиции и уменьшается с уменьшением экспозиции. Таким образом, при уменьшении длительности экспозиции можно уменьшить как характеристические размеры элементов, так и расстояния между ними. НР практически не зависит от толщины

слоя (некоторые отклонения в сторону уменьшения НР наблюдаются для толщин слоев 300 мкм).

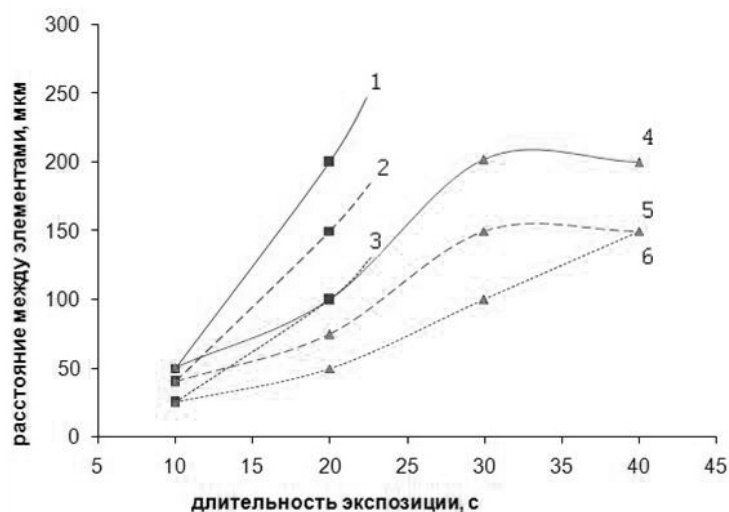


Рис. 7. Зависимость наименьшего расстояния между элементами от длительности экспозиции. Плотность шаблонов: 1,2 (1, 2, 3) и 2,5 (4, 5, 6). Ширина линии: 100 мкм (1, 4), 75 мкм (2, 5) и 50 мкм (3, 6). Толщина слоя 100 мкм

Кроме рассмотренных закономерностей, в процессе формирования микроструктур с различной конфигурацией установлено сужение элементов к основанию, которое может быть связано с эффектом самофокусировки света, уменьшение ширины элементов по краям структур, связанное с ингибированием кислородом, а также сглаживание углов вследствие эффектов диффузии (рис. 8).

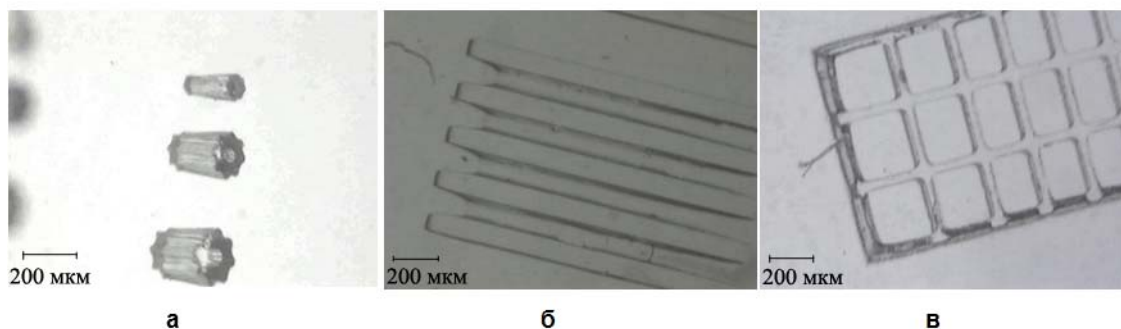


Рис. 8. Размерные эффекты при формировании структур различной конфигурации: а — сужение микроэлементов к основанию, б — уменьшение ширины по краям, в — сглаживание углов

Заключение

Установлена связь размерных характеристик полимерных микроструктур с экспозиционными параметрами, параметрами амплитудной маски (оптической плотностью, шириной линий и расстоянием между ними) и толщиной слоя. Выявлены особенности фотополимеризации в микрообъеме нанокомпозита, различия кинетики роста микроэлементов в высоту и ширину и определяющие их факторы. Показано, что элементы вначале образуются по центру экспонирующего пучка света, и затем при увеличении экспозиции их ширина увеличивается, при этом боковые поверхности вертикальны в течение всего процесса.

Определены условия уменьшения характеристических размеров элементов микроструктур, их наибольшего сближения и увеличения форматного отношения. Получены структуры различной конфигурации с форматным отношением до 1:50.

Результаты использованы для получения брэгговских структур формирования пучков в терагерцовом спектрометре и высоких структур для направленного роста нелинейных кристаллов DAST.

Литература

1. Munnik F., Benninger F., Mikhailov S., Bertsch A., Renaud P., Lorenz H., Gmur M. High aspect ratio, 3D structuring of photoresist materials by ion beam LIGA // *Microelectronic Engineering*. – 2003. – P. 96–103.
2. Madou M.J. // *Fundamentals of Miniaturization*, 2nd Edition, CRC Press, Boca Ration, FL, 2002.
3. Denisyuk I.Yu., Fokina M.I., Vorzobova N.D., Burunkova Yu.E., Bulgakova V.G. Microelements with high aspect ratio prepared by self-focusing of the light at UV-curing // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2008. – Vol. 497. – P. 228–235.
4. Денисюк И.Ю., Бурункова Ю.Э., Фокина М.И., Ворзобова Н.Д., Булгакова В.Г. Формирование микроструктур с высоким форматным отношением в результате самофокусировки света в фотополимерном нанокompозите // *Оптический журнал*. – 2008. – № 10. – С. 59–65.
5. Бурункова Ю.Э., Семьина С.А., Капорский Л.Н, Левичев В.В. Наномодифицированные оптические акрилатные композиты // *Оптический журнал*. – 2008. – № 10. – С. 54–67.

Булгакова Вера Геннадьевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, vera-bulgakova@yandex.ru

Ворзобова Надежда Дмитриевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, vorzobova@mail.ifmo.ru

УДК 534.222

**ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ БИОТКАНИ
НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ****А.В. Леонова**

Работа посвящена исследованию изменения поля мощного фокусирующего пьезопреобразователя при взаимодействии ультразвука с биотканями организма. Рассматривается задача формирования в биоткани акустического поля как слоистой структуры, образованной при прохождении звуковых волн через границы раздела вода–жировая ткань–мышечная ткань. Исследуется коэффициент прохождения в зависимости от параметров системы слоев и от параметров источника мощного ультразвука.

Ключевые слова: ультразвук, биоткань, коэффициент прохождения, фокусное пятно.

Введение

Неинвазивный метод лечения мочекаменной болезни, а именно метод дистанционной ударно-волновой литотрипсии, имеет очевидные преимущества по сравнению с оперативным вмешательством. Достаточно сказать, что сеанс дистанционной ударно-волновой литотрипсии проходит без повреждения тканей организма, а раздробленные в процессе литотрипсии конкременты выходят естественным путем. Создаваемые вне организма короткие импульсы энергии в виде ударных волн фокусируются на конкременте. Давление в зоне фокуса достигает 160 мПа (1600 бар), что и приводит к разрушению конкремента. Одним из основных компонентов литотриптера, который определяет конечный терапевтический эффект, является источник мощного ультразвука. В современных пьезоэлектрических литотриптерах в качестве источника мощного ультразвука применяется многоэлементный пьезоэлектрический фокусирующий излучатель ультразвуковых волн – силовая антенная решетка.

Использование поля мощных фокусирующих преобразователей в режиме излучения для целей медицинской хирургии и диагностики приводит к необходимости исследований влияния свойств различных биологических сред на распространение ультразвуковых волн. Так как область прохождения звука представляет собой слоистую структуру кожный покров–жировая ткань–мышечная ткань, то возникает вопрос о степени и характере влияния составляющих ее слоев на характеристики и параметры формируемого поля мощных фокусирующих преобразователей.

Постановка задачи

Диаметр зрачка ударно-волновой головки литотриптера колеблется от 300 мм до 400 мм, рабочая дистанция литотриптера, т.е. расстояние от среза зрачка до терапевтического фокуса, варьируется от 135 мм (для «худых» пациентов и детей) до 170 мм (для полных и тучных пациентов) [2]. При таких параметрах ударно-волновой головки литотриптера ультразвуковые ударные волны входят в ткани организма под углами в диапазоне от 0° до 45° (рис. 1).

В результате такой геометрии источника мощного ультразвука формируется фокальное пятно заданного размера (обычно 3–5 мм). Представляет интерес проследить, каким образом изменятся параметры поля в фокальной области в зависимости от угла вхождения ультразвуковых колебаний в тело человека. Задача формирования в биоткани акустического поля как слоистой структуры заключается в нахождении зависимости

пространственного распределения поля от параметров биоткани – жирового слоя. Искомое поле представляет собой сформированное в жировом слое поле, образованное исходной волной после прохождения полубезграничного пространства – воды. Такое поле можно представить в виде волны, образованной в результате многократных преломлений на границе слоя. Параметры искомого поля могут быть получены посредством введения соответствующих числовых значений коэффициентов прохождения.

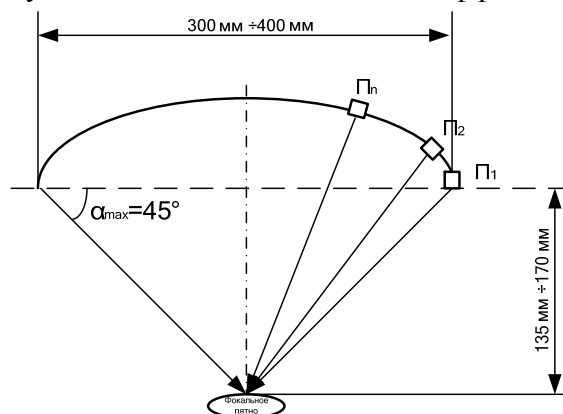


Рис. 1. Ударно-волновая головка пьезоэлектрического литотриптера

Решение задачи

Рассмотрим геометрию задачи прохождения звуковых волн через границы раздела воды, жировой и мышечной тканей (рис. 2). Полубесконечной среде, из которой падает плоская волна, присвоим номер 1, жировому слою – номер 2, а полубесконечной среде, в которую проходит волна – мышечной ткани – номер 3. Пусть на нижнюю границу слоя 2 под произвольным углом падает плоская волна. Плоскость падения волны будем считать совмещенной с плоскостью xz .

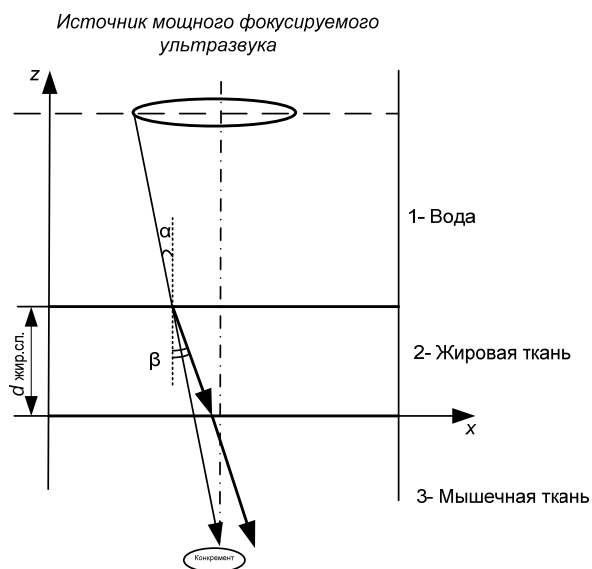


Рис. 2. Геометрия задачи – прохождение ультразвуковой волны через слой

Найдем коэффициент прохождения при произвольном угле падения плоской волны на границы раздела. Обозначим коэффициент прохождения или прозрачности через W . Предполагаем, что временная зависимость дается множителем $\exp(-i\omega t)$. Тогда

выражения для преломленной волны в нижней среде запишется в виде (для сокращения множитель $\exp(-i\omega t)$ опускаем)

$$P_{\text{прош}} = WAe^{ik_j z}, \quad (1)$$

где $k=\omega/c=2\pi/\lambda$ – волновое число, k_j – волновое число для j -го слоя. Величина W определяется из граничных условий, которые заключаются в непрерывности p и v_z – нормальной к границе компоненты скорости частиц среды.

Коэффициент прохождения для произвольного числа слоев, по определению равный отношению амплитуд звукового давления в прошедшей и падающей волнах, задается формулой [1]:

$$W = A_1/A_{n+1} = \prod_{j=1}^n (Z_{\text{вх}}^{(j)} + Z_j)/(Z_{\text{вх}}^{(j)} + Z_{j+1})e^{i\varphi_j}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{вх}}^{(j)}$ – «входной» импеданс на верхней границе слоя, а $j = 1, 2, \dots, n$ – номер слоя.

Импеданс плоской волны в j -ой среде находим по формуле

$$Z_j \equiv \omega \rho_j / k_{jz} = \rho_j c_j / \cos \alpha_j. \quad (3)$$

Входной импеданс j -го слоя $Z_{\text{вх}}^{(j)}$ задается следующей формулой [1]:

$$Z_{\text{вх}}^{(j)} = \frac{Z_{\text{вх}}^{(j-1)} - iZ_j \operatorname{tg}(k_{jz} d_j)}{Z_j - iZ_{\text{вх}}^{(j-1)} \operatorname{tg}(k_{jz} d_j)} Z_j. \quad (4)$$

Толщина слоя d_j пересчитывается по формуле

$$d_j = \frac{d_{\text{жир. сл.}}}{\cos(\alpha_2)},$$

где $d_{\text{жир. сл.}}$ – толщина жирового слоя. Углы падения связаны между собой через закон преломления Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (6)$$

Коэффициент прохождения для системы вода–жировой слой–мышечная ткань представлен в виде

$$W = A_1/A_3 = \left[(Z_{\text{вх}}^{(1)} + Z_1)/(Z_{\text{вх}}^{(1)} + Z_2)e^{i\varphi_1} \right] \times \left[(Z_{\text{вх}}^{(2)} + Z_2)/(Z_{\text{вх}}^{(2)} + Z_3)e^{i\varphi_2} \right], \quad (7)$$

а входной импеданс для жирового слоя задается формулой

$$Z_{\text{вх}}^{(2)} = \frac{Z_1 Z_2^2 + Z_1 Z_2^2 \operatorname{tg}^2(\varphi_2)}{Z_2^2 + Z_1^2 \operatorname{tg}^2(\varphi_2)} + i \frac{Z_1^2 Z_2 \operatorname{tg}(\varphi_2) - Z_2^3 \operatorname{tg}(\varphi_2)}{Z_2^2 + Z_1^2 \operatorname{tg}^2(\varphi_2)}. \quad (8)$$

Тогда коэффициент прохождения для системы двух слоев может быть представлен в явном виде :

$$W = A_1/A_3 = \left[2Z_1/(Z_1 + Z_2)e^{i\varphi_1} \right] \times \left[\left(\frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg}(\varphi_2)}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg}(\varphi_2)} Z_2 + Z_2 \right) / \left(\frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg}(\varphi_2)}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg}(\varphi_2)} Z_2 + Z_3 \right) e^{i\varphi_2} \right]. \quad (9)$$

Моделирование

Проследим зависимость коэффициента прохождения от угла падения. Для формирования короткого импульса, используемого в литотрипсии, частота колебаний должна быть в пределах от 1 до 3 МГц. Значения импедансов сред и скорости распространения в них звука даны в табл. 1.

№	Среда	Импеданс в среде, $\text{кгм}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Скорость звука в среде, м/с
1	Вода	$1,52 \cdot 10^6$	1496
2	Жировая ткань	$1,38 \cdot 10^6$	1450
3	Мышечная ткань	$1,68 \cdot 10^6$	1575

Таблица. Характеристики сред

График зависимости коэффициента прохождения от угла падения для частот 1 МГц, 1,5 МГц, 2 МГц, 3 МГц представлен на рис. 3.

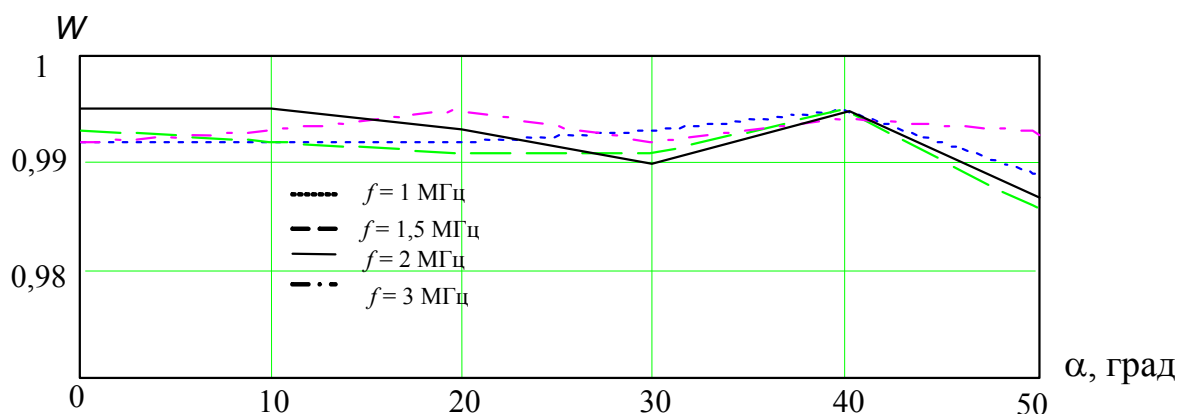


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения от угла падения

Из рис. 3 видно, что коэффициент прохождения при изменении угла ввода изменяется нелинейно, имея свои максимумы и минимумы, характер изменения коэффициента прохождения в зависимости от частоты излучателя слабо выражен.

Учитывая коэффициенты преломления сред, были учтены особенности фокусировки акустической волны внутри биологического объекта. На рис. 4 представлена модель фокусирующей системы.

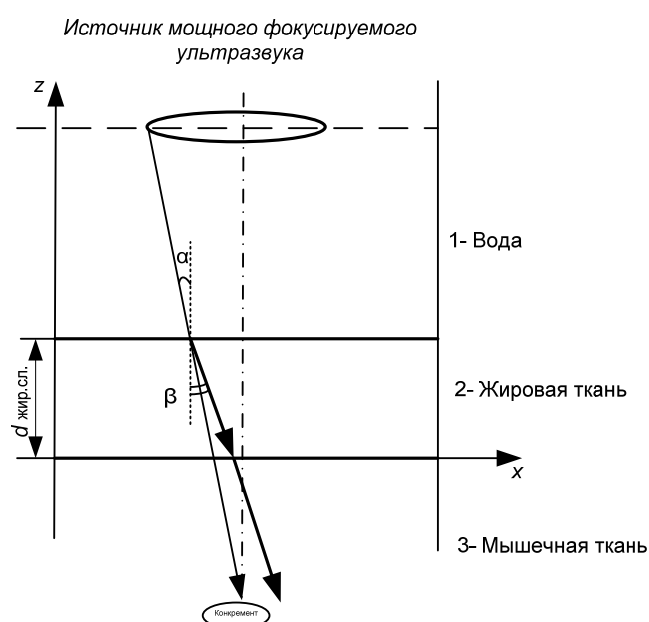


Рис. 4. Модель фокусирующей системы

На рис. 5 представлена зависимость координаты точки фокусировки от угла падения волны. Так как координата положения точки фокусировки зависит еще и от толщины слоя (толщина жирового подкожного слоя среднестатистического человека колеблется от 1 мм до 7 мм), то были построены зависимости для значений толщин жирового слоя 1 мм, 5 мм, 7 мм.

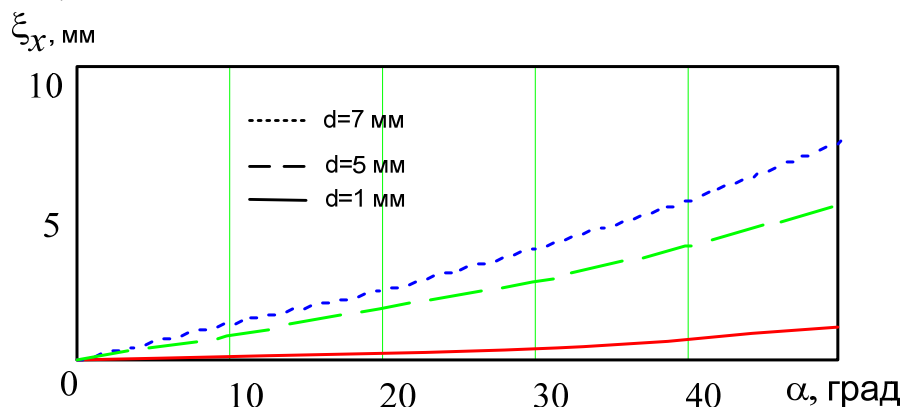


Рис. 5. Зависимость координаты точки фокусировки от угла падения

Из рис. 5 видно, что в зависимости от угла ввода акустический луч смещается относительно начального положения, соответствующего нормальному падению в биоткань. Толщина жирового слоя значительно влияет на изменение координаты точки фокусировки. Если при малых толщинах (порядка 1 мм) жирового слоя такое смещение незначительно, то уже при толщине 5 мм смещение достигает размеров больших, чем фокусное пятно. Таким образом, при различных углах вхождения, а также в зависимости от толщины слоя имеет место расфокусировка ультразвукового луча, в результате чего происходит размывание фокусного пятна. Учитывая, что диаметр фокусного пятна соответствует диаметру конкремента и варьируется в пределах 3–5 мм, допускать такую расфокусировку невозможно, так как появляется опасность не только не разрушить конкремент, но и повредить прилегающие к нему ткани организма.

Заключение

В работе представлена модель решения задачи прохождения акустического луча через слоистые среды. Использование модели позволит проводить корректировку сфокусированного терапевтического луча и тем самым повысить точность диагностики заболеваний и визуализации внутренних органов.

Литература

1. Разработка пьезоэлектрического генератора ударно-волновых импульсов для комплекса «Литотриптер-Медолит». Отчет о НИР № ГР 01200800986. Договор № 13649 от 1.09.2007. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2008. – 115 с.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: АН СССР, 1973. – 504 с.

Леонова Антонина Валерьевна

– Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге (ТТИ ЮФУ), аспирант, antonina_tsure@mail.ru

УДК 004.932.1+655.3.062.2

ВОЗМОЖНОСТИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИИ В МРТ**А.О. Казначеева, А.В. Власюк, А.В. Кудряшов**

В работе рассмотрены возможности магнитно-резонансной томографии (МРТ) для определения параметров диффузии в биологических тканях. Проанализированы экспериментальные данные, полученные при различных условиях, проведена оценка точности определения коэффициента диффузии. Результаты измерений обработаны с помощью вейвлетов Добеши с различными параметрами, рассчитаны количественные критерии эффективности шумоподавления.

Ключевые слова: МР-томография, коэффициент диффузии, качество изображений, вейвлеты Добеши.

Введение

Одной из развивающихся областей применения МРТ является изучение процессов диффузии в биологических системах, что обусловлено как совершенствованием аппаратуры, так и созданием новых алгоритмов регистрации и обработки данных. Диффузия молекул воды в живых тканях происходит как в пределах одной клетки (ограниченная диффузия), так и в межклеточных пространствах среди структур, ограничивающих его (затрудненная диффузия). Диффузионно-взвешенные МР-изображения (ДВИ) отображают не анатомическое строение структур, а броуновское движение в них и позволяют оценивать скорость движения молекул в ткани. Измерения проводятся с помощью методики эхо-планарного отображения (ЕРІ), позволяющей за 1 с получить полный набор данных фазово-частотного распределения МР-сигналов после единичного возбуждающего импульса [1]. Подобные ЕРІ-изображения характеризуются высокой чувствительностью к скорости исследуемых процессов, низким соотношением сигнал/шум (SNR) и наличием артефактов на границе раздела двух сред. В данной работе рассматриваются возможности вейвлет-анализа для подавления шума МР-изображений и повышения точности определения коэффициента диффузии.

Оценка параметров диффузии в МР-томографии

В реальной биологической среде свободному движению протонов препятствуют естественные барьеры (клеточные мембраны, большие белковые молекулы). Молекулы воды легко диффундируют вдоль нервных волокон, но поперек волокон их движение ограничено миелиновой оболочкой [2]. Это приводит к затуханию МР-сигнала, поэтому измеряемый коэффициент диффузии будет меньше коэффициента диффузии чистой воды при температуре тела. Для получения ДВИ используется пара диффузионных градиентных импульсов одинаковой амплитуды G и длительности d , благодаря которым получаемые изображения не зависят от плотности спинов и времен релаксации T_1 или T_2 , но зависят от диффузии молекул воды в тканях изучаемого среза. Первый диффузионный градиент подается перед 180° -ным РЧ-импульсом и вносит добавочное изменение фазы протонов в исследуемом срезе; второй диффузионный градиент компенсирует созданный фазовый сдвиг в неподвижной ткани. Диффундирующие протоны имеют некомпенсированные фазовые сдвиги и дадут меньший МР-сигнал, чем неподвижные.

Для количественной характеристики диффузионного движения введено понятие измеряемого (или действительного) коэффициента диффузии (ADC):

$$ADC = -\frac{\ln(S/S_0)}{\beta},$$

где S_0 – интенсивность сигнала без действия диффузных градиентов, S – интенсив-

ность сигнала при действии диффузных градиентов, β – фактор диффузии. Зависимость ADC от направления называют анизотропией диффузии, а измеряемый диффузный коэффициент является тензорной величиной. Для исключения анизотропии диффузного коэффициента и количественной оценки ADC используют среднее значение диагональных элементов диффузного тензора:

$$ADC_c = -\frac{1}{3}(ADC_{xx} + ADC_{yy} + ADC_{zz}),$$

где ADC_{xx} , ADC_{yy} , ADC_{zz} – величины коэффициента диффузии, измеренные при действии диффузных градиентов в направлениях x, y, z соответственно.

Если рассматривается анизотропия коэффициента диффузии, ее оценивают по формуле

$$A = \frac{\sqrt{\frac{1}{6}[(ADC_{xx} - ADC_c)^2 + (ADC_{yy} - ADC_c)^2 + (ADC_{zz} - ADC_c)^2]}}{ADC_c}.$$

Поскольку практически все патологические процессы сопровождаются изменением скорости движения молекул, сигнал на ДВИ и значение измеряемого коэффициента диффузии обратно пропорциональны друг другу.

В работе проанализировано влияние параметров исследования на точность измерения коэффициента диффузии. Экспериментальные данные получены с помощью DW EPI импульсной последовательности со следующими базовыми параметрами: время эхо-сигнала $TE = 28$ мс, время повторения $TR = 8000$ мс, $\beta = 1000$, толщина среза 5 мм, поле сканирования 30×20 см, матрица изображения 128×128 , исследовалась диффузия в направлении осей x, y, z . Затем значения времени TR изменялись в диапазоне от 5000 мс до 11000 мс при размере поля сканирования от 260 до 380 мм. Оценка контраста тканей проводилась для значений β от 500 до 3000 с/мм^2 с шагом 500 с/мм^2 (рис. 1).

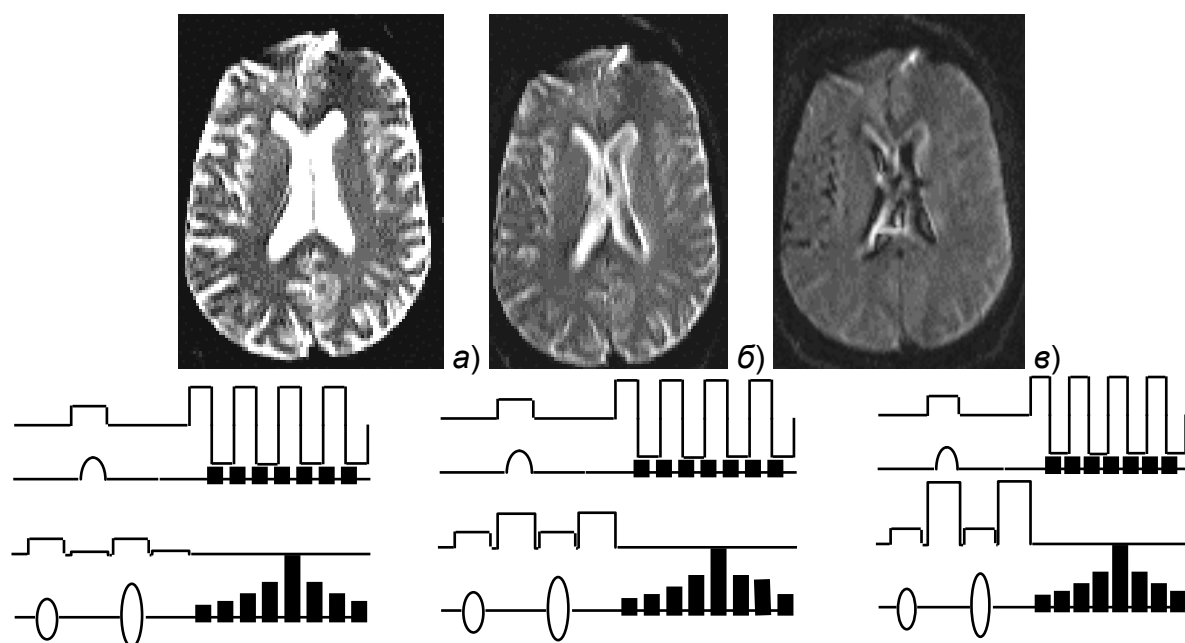


Рис. 1. Связь фактора диффузии с амплитудой градиентов и контрастом изображений:
а) $\beta = 5$; б) $\beta = 500$; в) $\beta = 1000$

Увеличение фактора диффузии, включающего все градиентные эффекты (градиенты считывания и диффузные градиенты), приводит к повышению контрастности изо-

бражения и чувствительности метода за счет увеличения амплитуды градиентных импульсов. Увеличение β вызывает снижение интенсивности сигнала от нормальных тканей на диффузионно-взвешенных изображениях, которое при изменении значения с $\beta = 500$ до $\beta = 1500$ составляет 50% при постоянном уровне шума. В то же время выбор $\beta = 1000$ является достаточным для выявления изменений скорости диффузионных процессов в тканях. Увеличение пространственного разрешения приводило к увеличению продолжительности исследования и снижению чувствительности метода. Оценка точности измерений проводилась путем расчета относительной погрешности δ измерения коэффициента диффузии белого вещества мозга, известное значение которого для здоровой ткани составляет $D_{\text{бел}} = 65 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$ (рис. 2).

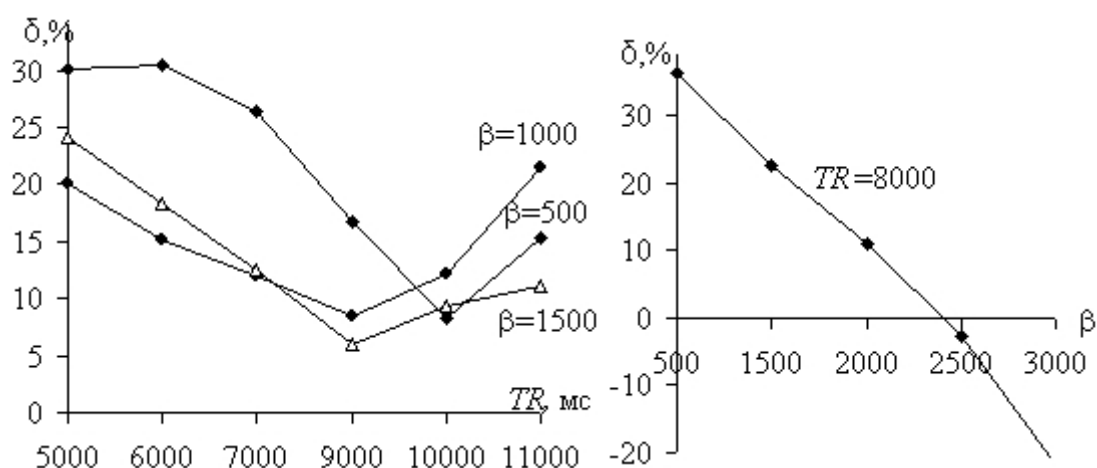


Рис. 2. Относительная погрешность расчета коэффициента диффузии белого вещества

Проведенный анализ позволил выявить параметры исследований, обеспечивающих наибольшую точность измерения коэффициента диффузии. Выбор $TR = 9000$ мс, $\beta = 1500$ и пространственного разрешения 1,9 мм дает относительную погрешность не более 6 % при высокой контрастности тканей. Дальнейшее повышение точности определения коэффициента диффузии связано с увеличением чувствительности метода, а также с повышением пространственного разрешения изображений, например, путем их постобработки с помощью вейвлет-фильтров.

Вейвлет-анализ экспериментальных данных

Новые эффективные способы обработки изображений основаны на использовании вейвлет-преобразований, позволяющих выявлять все локальные особенности функций, сигналов и изображений с привязкой их ко времени или координатам пространства [4, 5]. Вейвлет-анализ заключается в разложении сигнала $s(t)$ по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами функции (вейвлета) $\psi_k(t)$ посредством масштабных изменений и переносов:

$$s(t) = \sum_k C_k \psi_k(t).$$

Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в физическом пространстве (времени).

В основе непрерывного вейвлет-преобразования лежит использование двух непрерывных и интегрируемых по всей оси t (или x) функций:

- вейвлет-функции $\psi(t)$ с нулевым значением интеграла ($\int \psi(t)dt = 0$), определяющей детали сигнала и порождающей детализирующие коэффициенты;
- аппроксимирующей функции $\phi(t)$ с единичным значением интеграла ($\int \phi(t)dt = 1$), определяющей грубое приближение сигнала.

Функции $\psi(t)$ и $\phi(t)$ уточняются итерационным методом, каждый шаг которого соответствует определенному уровню декомпозиции и реставрации сигнала.

Для проведения вейвлет-коррекции необходимо определить двумерные масштабные функции и двумерные вейвлеты. Для любой масштабирующей функции и соответствующего ей вейвлета можно построить двумерную аппроксимирующую функцию и три двумерных вейвлета, используя тензорное произведение:

$$\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y),$$

$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\phi(y),$$

$$\psi^V(x, y) = \phi(x)\psi(y),$$

$$\psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y).$$

Эти вейвлеты измеряют вариации значений функции (изменения яркости изображений) по разным направлениям: ψ^H измеряет вариации вдоль столбцов (связанные, например, с горизонтальными краями объектов), ψ^V – вдоль строк (вертикальные края), ψ^D – вдоль диагоналей.

Обработка изображений производилась в среде MatLab с помощью вейвлетов Добеши с различными значениями глубины разложения L и параметра настройки выбора вейвлет-коэффициентов α . Глубина разложения определяет «масштаб» отсеиваемых деталей: чем больше эта величина, тем более «крупные» изменения сигнала будут отброшены. При $L > 7$ выполняется не только подавление шума, но и сглаживание сигнала («обрезаются» пики). Значение параметра α должно быть больше 1. Для эффективного сжатия сигнала $\alpha = 1,5$; для удаления шумов выбирается $\alpha = 3$; наиболее часто используется значение $\alpha = 2$. Параметр, определяющий вид пороговой обработки, может принимать значения s (мягкий порог) или h (жесткий порог).

Оценка результатов проводилась путем расчета среднего значения шума ($I_{\text{ш}}$) изображения, среднеквадратического отклонения для шума (σ) и пикового соотношения сигнал/шум ($PSNR$), вычисляемого по формуле:

$$PSNR = 20 \cdot \lg \frac{L_{\max}}{\sqrt{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_{i,j})^2}},$$

где m, n – количество строк и столбцов матрицы изображения; $x_{i,j}, \bar{x}_{i,j}$ – интенсивность пиксела оцениваемого и эталонного изображения.

Анализ представленных зависимостей показывает, что наилучшее шумоподавление достигается при $\alpha = 3$ для всех исследуемых вейвлет-функций Добеши. Другие значения α оказывают незначительное влияние на снижение среднего значения шума и его среднеквадратического отклонения. В целом наилучшие результаты шумоподавления дали вейвлеты Добеши db2, db8 и db15, позволяющие наиболее эффективно подавить шум и снизить среднеквадратическое отклонение. Нецелесообразно использовать уровень разложения $L > 5$, так как это требует большего количества машинной памяти и приводит к затрате большего времени на обработку данных. Оценка подавления случайного шума произведена для различных уровней разложения и значений аппрокси-

мирующих и детализирующих коэффициентов. Результаты количественной оценки эффективности подавления шума МР-изображений с помощью вейвлетов Добеши представлена на рис. 3–5.

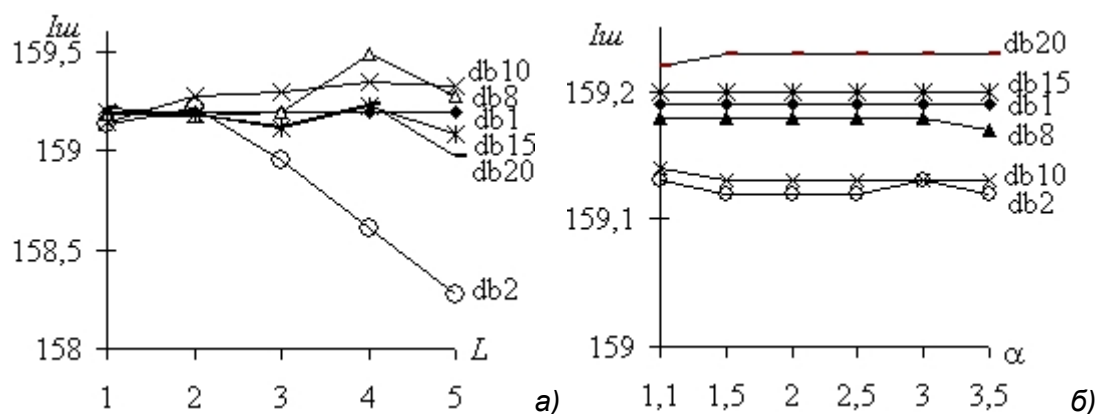


Рис. 3. Зависимость I_u обработанного изображения: а) от L ; б) от α

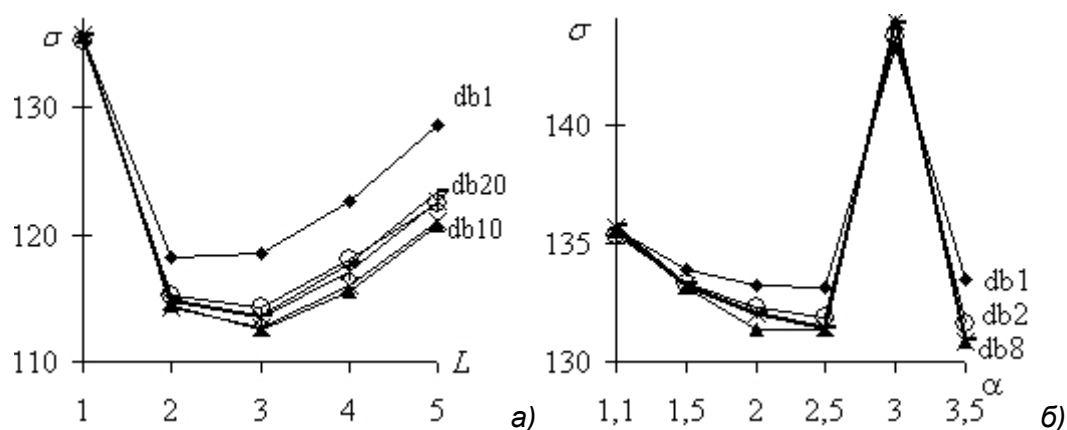


Рис. 4. Зависимость σ обработанного изображения: а) от L ; б) от α

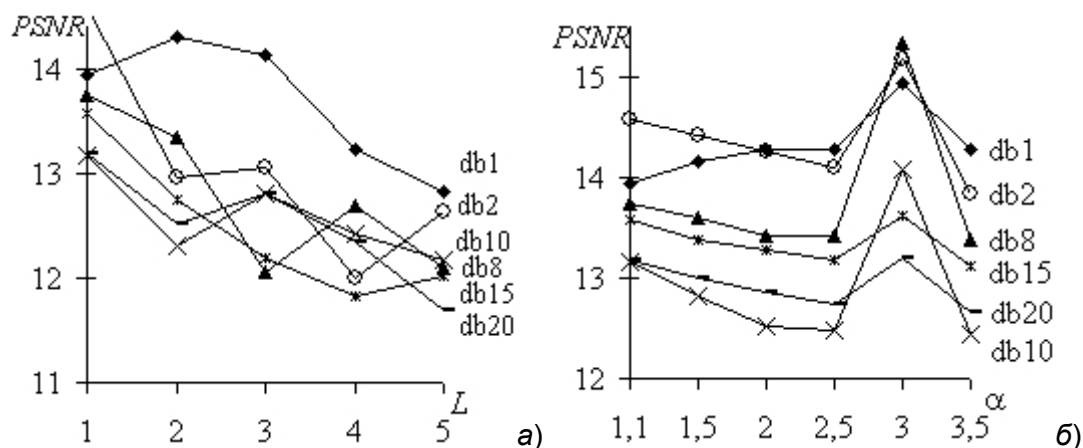


Рис. 5. Зависимость PSNR обработанного изображения: а) от L ; б) от α

Количественная оценка проведена для 20 вейвлетов Добеши при различных сочетаниях исследуемых параметров. Наилучшее шумоподавление достигнуто при использовании вейвлета Добеши 8 при $L = 2$ и $\alpha = 3$. Для всех исследуемых вейвлетов значительное σ наблюдается при изменении уровня разложения сигнала от 2 до 5.

Заключение

Вейвлет-анализ МР-изображений показал, что для обработки томограмм наиболее эффективно семейство вейвлетов Добеши, позволяющих снизить шум в 2 раза без потерь пространственного разрешения. Наилучшее шумоподавление достигнуто при использовании вейвлета Добеши 8 при $L = 2$ и $\alpha = 3$. Для всех исследуемых вейвлетов значительное σ наблюдается при изменении уровня разложения сигнала от 2 до 5. Таким образом, аппарат вейвлет-аппроксимаций является эффективным средством подавления шума изображений, позволяющим повысить соотношение сигнал/шум без потери информации о мелких деталях изображений и увеличения времени исследования. Выбор используемого вейвлета и глубины разложения в общем случае зависит от свойств конкретного сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-08-00922-а.

Литература

1. Poustchi-Amin M., Mirovitz S., Brown J. et. al. Principles and applications of echo-planar imaging: a review for the general radiologist // RadioGraphics. – 2001. – Vol. 21. – P. 767–779.
2. Корниенко В.Н., Пронин И.Н. Диагностическая нейрорадиология. – М., 2007.
3. Казначеева А.О. Молекулярная визуализация в МРТ с помощью методики EPI-отображения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1 (59). – С. 56–60.
4. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.
5. Pizurica A., Wink A.M. et. al. A review of wavelet denoising in MRI and ultrasound brain imaging // Current medical imaging reviews. – 2006. – Vol. 2. – P. 247–260.

Казначеева Анна Олеговна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a_kazn@mail.ru

Власюк Алёна Васильевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, alisa190@yandex.ru

Кудряшов Александр Владимирович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Alexandr257@mail.ru

7

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.3

КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ
ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

В.А. Богатырев, С.В. Богатырев

Рассмотрены варианты формирования частных и обобщенных критериев при решении задачи векторной оптимизации многоуровневых компьютерных систем с учетом надежности, времени обработки запросов и стоимости реализации системы. Показана возможность применения коэффициента сохранения эффективности в качестве объективного обобщенного критерия векторной оптимальности.

Ключевые слова: надежность, отказоустойчивость, векторная оптимизация, критерий оптимальности, коэффициент сохранения эффективности.

Введение

Проектирование отказоустойчивых компьютерных систем связано с решением задачи оптимального резервирования. При многоуровневой структуре компьютерных систем задача оптимизации сводится к определению кратности резервирования узлов каждого уровня, при котором эффективность системы максимальна, а затраты на ее реализацию не превышают допустимого предела. Результат оптимизации во многом зависит от выбора критерия эффективности, формируемого с учетом требований по надежности, производительности (времени ожидания) и стоимости системы. В связи с этим рассматриваются варианты формирования частных и обобщенных критериев эффективности многоуровневых компьютерных систем. Актуальность выбора объекта оптимизации обуславливается тем, что в настоящее время многоуровневая организация широко используется в компьютерных системах, в том числе кластерной архитектуры (рис. 1).

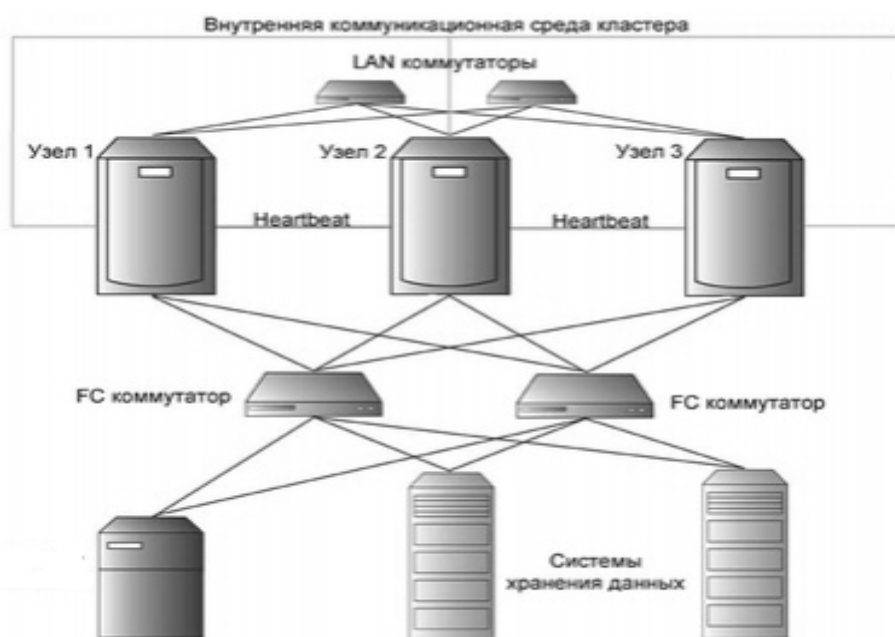


Рис. 1. Многоуровневая компьютерная система

Постановка задачи оптимизации

В качестве объекта оптимизации рассмотрим вычислительную систему, в которой выделены M уровней. Требуется найти число (кратность резервирования) узлов на каждом уровне $(m_1, m_2, \dots, m_M)$, при котором обеспечивается максимум надежности системы, минимум среднего времени пребывания запросов в системе, а стоимость реализации системы не превышает выделенных средств:

$$P(m_1, m_2, \dots, m_M) \rightarrow \max \text{ при } T(m_1, m_2, \dots, m_M) \rightarrow \min, C(m_1, m_2, \dots, m_M) = \sum_{i=1}^M m_i \leq C_0.$$

Возможна также другая постановка задачи. Требуется найти число узлов на каждом уровне, при котором обеспечивается минимум стоимости реализации:

$$C(m_1, m_2, \dots, m_M) \rightarrow \min \text{ при } P(m_1, m_2, \dots, m_M) \geq P_0, T(m_1, m_2, \dots, m_M) \leq T_0.$$

При этом T_0, P_0, C_0 – предельно допустимые значения среднего времени ожидания, надежности и стоимости системы. При оптимизации будем считать заданными интенсивность входного потока запросов λ , показатели надежности узлов $p_1, p_2, p_3, \dots, p_M$ и средние времена выполнения запросов узлами каждого уровня $v_1, v_2, v_3, \dots, v_M$.

Рассматриваемая задача оптимизации является векторной, и ее сложность обусловлена тем, что одно решение (альтернатива) может превосходить другую по одним показателям и уступать по другим. В задачах принятия решений по векторному показателю главное внимание уделяется выработке решающего правила, основанного на компромиссе между значениями компонент векторного показателя. Таким образом, проблема принятия решений по векторному показателю сопряжена с поиском концептуально обоснованного критерия выбора наилучшего решения, который для отказоустойчивых систем должен характеризовать эффективность процесса деградации системы при накоплении отказов. Формальное определение обобщенного критерия в виде аддитивной или мультипликативной свертки показателей надежности и производительности не отражает возможную потерю производительности по мере накопления отказов и дает завышенный результат, что может привести к необоснованному выбору структуры системы.

Для многоуровневых отказоустойчивых систем с возможностью накопления отказов узлов различных уровней и с образованием работоспособных состояний системы с разным уровнем ее эффективности искомым комплексный показатель будем искать в виде математического ожидания эффективности (производительности) с учетом вероятностей всех работоспособных состояний в форме

$$K^*(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M, \delta) = \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} \sum_{k_3=1}^{m_3} \dots \sum_{k_M=1}^{m_M} E(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) P(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M, \delta),$$

где δ – условие работоспособности состояний системы, которое может зависеть от предельно допустимого среднего времени пребывания запросов в системе $\delta(T_0)$; $E(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) = 1 / T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)$ характеризует эффективность состояния при исправности $k_1, k_2, k_3, \dots, k_M$ узлов на соответствующих уровнях системы. Для систем с деградацией потерю эффективности относительно исходного состояния (при исправности всех $m_1, m_2, m_3, \dots, m_M$ узлов системы) можно охарактеризовать выражением $E(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) = T(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) / T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)$.

Решение задач векторной оптимизации

Известны различные подходы к решению задач векторной оптимизации [1]:

– методы скалярной свертки на основе аддитивного критерия, мультипликативного

критерия, отклонения от идеала;

- методы, основанные на ранжировании критериев, в том числе метод главного критерия, лексикографическая оптимизация, метод последовательной уступки;
- методы, основанные на использовании функции полезности;
- минимаксные методы.

Перечисленные методы являются эвристическими и не исключают субъективизм лица принимающего решение (ЛПР). Субъективность методов может привести к выбору не лучшего решения. В связи с этим целесообразна разработка объективного результирующего показателя эффективности, устанавливаемого на основе анализа назначения проектируемой системы, качество которой может характеризоваться единым показателем, зависимым от частных показателей. Сложность получения такого показателя сопряжена с тем, что требуется точно представлять назначение системы как составной части надсистемы и необходимы знания зависимости обобщенного показателя от частных. Как правило, результирующий показатель должен иметь некоторый физический смысл, подтверждающий соответствие системы ее функциональному назначению с позиции надсистемы [2].

Частные показатели качества системы

Возможности системы по обработке запросов определим по среднему времени пребывания запросов в системе. В простейшем случае каждый узел представим системой массового обслуживания типа $M/M/1$. Считая, что каждый запрос последовательно обслуживается одним из исправных узлов на каждом уровне системы, среднее время пребывания запросов в системе оценим как $T(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{i=1}^M \frac{v_i}{1 - v_i \lambda / m_i}$, где $(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M)$ – число узлов на каждом уровне.

Надежность системы оценим по вероятности сохранения работоспособности, которая зависит от формулировки условия отказа (сохранения функционирования Y).

Если система работоспособна, когда исправен хотя бы один узел на каждом уровне, то вероятность работоспособности системы определяется по формуле $P(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \prod_{i=1}^M (1 - (1 - p_i)^{m_i})$, где p_i – вероятность работоспособности узла, находящегося на i -м уровне системы.

Если система работоспособна, когда запрос обслуживается за время, не превосходящее заданный предельный уровень (ограничение на допустимое время выполнения запросов), то надежность системы оценим как

$$P(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} \sum_{k_3=1}^{m_3} \dots \sum_{k_M=1}^{m_M} \delta(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} C_{m_3}^{k_3} \dots C_{m_M}^{k_M} \times \\ \times p_1^{k_1} p_2^{k_2} p_3^{k_3} \dots p_M^{k_M} (1 - p_1)^{m_1 - k_1} (1 - p_2)^{m_2 - k_2} (1 - p_3)^{m_3 - k_3} \dots (1 - p_M)^{m_M - k_M},$$

где $C_{m_i}^{k_i} = m_i! / k_i! (m_i - k_i)!$, а $\delta(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) = \begin{cases} 1, & \text{if } T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) \leq T_0, \\ 0, & \text{if } T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M) > T_0. \end{cases}$

Здесь $\delta(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)$ – условие работоспособности состояний системы при ограничении на допустимое время выполнения запросов T_0 , а $T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)$ – среднее время пребывания запросов в системе при исправности $k_1, k_2, k_3, \dots, k_M$ узлов соответствующих уровней. При особых требованиях к времени реакции (реальный масштаб вре-

мени) в качестве условия работоспособности состояний $\delta(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)$ может использоваться вероятность неперевышения времени реакции (пребывания запросов в системе) за предельное время T_0 .

Сравним результаты расчета надежности с учетом ограничений на время пребывания запросов в системе. Для трехуровневой системы ($M=3$) будем считать $p_1 = p_2 = p_3 = 0,9$, $m_1 = m_2 = m_3 = 4$ шт., $v_1 = 1$ с, $v_2 = 2$ с, $v_3 = 1$ с. Зависимость надежности $P(T_0)$ от предельно допустимого среднего времени пребывания запросов в системе T_0 приведена на рис. 2, на котором кривая 1 соответствует значению интенсивности входного потока $\lambda=1,3$ 1/с, а кривая 2 – $\lambda=1,7$ 1/с.

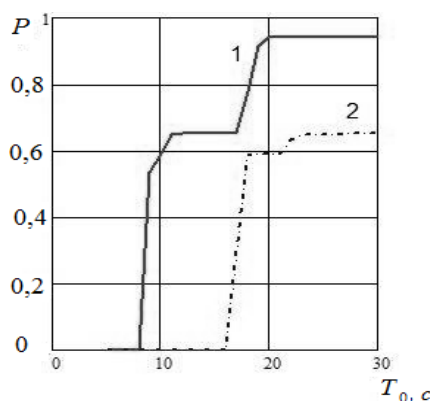


Рис. 2. Надежность системы с учетом предельного времени пребывания запросов

Формирование скалярного критерия

Скалярная свертка, используемая при решении задач векторной оптимизации, составляется формально на основе субъективных предпочтений ЛПР, и часто ее физический смысл не просматривается. В качестве скалярной свертки обычно используют мультипликативный и аддитивный критерии, определяемые для рассматриваемых систем как

$$M(m_1, m_2, \dots, m_M) = \frac{P(m_1, m_2, \dots, m_M)^{\alpha_1}}{T(m_1, m_2, \dots, m_M)^{\alpha_2}},$$

$$A(m_1, m_2, \dots, m_M) = \alpha_1 P(m_1, m_2, \dots, m_M) + \alpha_2 \frac{T_0}{T(m_1, m_2, \dots, m_M)},$$

где коэффициенты α_1, α_2 учитывают субъективную оценку ЛПР важности частных критериев, причем $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ (стоимость учитывается как ограничение).

Показатели сохранения эффективности

Эффективность каждого работоспособного состояния оценим величиной, обратной среднему времени пребывания запросов в системе при прохождении запроса через узлы каждого уровня:

$$K^*(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} \sum_{k_3=1}^{m_3} \dots \sum_{k_M=1}^{m_M} [1/T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)] C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} C_{m_3}^{k_3} \dots C_{m_M}^{k_M} \times$$

$$\times p_1^{k_1} p_2^{k_2} p_3^{k_3} \dots p_M^{k_M} (1-p_1)^{m_1-k_1} (1-p_2)^{m_2-k_2} (1-p_3)^{m_3-k_3} \dots (1-p_M)^{m_M-k_M}.$$

Оценивая каждое работоспособное состояние отношением его эффективности относительно эффективности исходного состояния системы (когда все узлы исправны), коэффициент сохранения эффективности определим как математическое ожидание:

$$K(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} \sum_{k_3=1}^{m_3} \dots \sum_{k_M=1}^{m_M} \left[\frac{T(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M)}{T(k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)} \right] C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} C_{m_3}^{k_3} \dots C_{m_M}^{k_M} \times \\ \times p_1^{k_1} p_2^{k_2} p_3^{k_3} \dots p_M^{k_M} (1-p_1)^{m_1-k_1} (1-p_2)^{m_2-k_2} (1-p_3)^{m_3-k_3} \dots (1-p_M)^{m_M-k_M}.$$

Коэффициент сохранения эффективности с учетом условия выполнения запроса за время, не превышающее T_0 , вычислим как

$$K(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} \sum_{k_3=1}^{m_3} \dots \sum_{k_M=1}^{m_M} \delta(k_1, k_2, \dots, k_M) \left[\frac{T(m_1, m_2, \dots, m_M)}{T(k_1, k_2, \dots, k_M)} \right] C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} C_{m_3}^{k_3} \dots C_{m_M}^{k_M} \times \\ \times p_1^{k_1} p_2^{k_2} p_3^{k_3} \dots p_M^{k_M} (1-p_1)^{m_1-k_1} (1-p_2)^{m_2-k_2} (1-p_3)^{m_3-k_3} \dots (1-p_M)^{m_M-k_M}.$$

Зависимость коэффициента сохранения эффективности $K(T_0)$ от предельно допустимого времени пребывания запросов в системе T_0 приведена на рис 3, где кривая 1 соответствует интенсивности входного потока $\lambda = 1,8$ 1/с, а кривая 2 – $\lambda = 1,5$ 1/с.. Расчет проведен при $M=3$, $p_1 = p_2 = p_3 = 0,9$, $m_1 = m_2 = m_3 = 4$ шт., $v_1 = 1$ с, $v_2 = 2$ с, $v_3 = 1$ с.

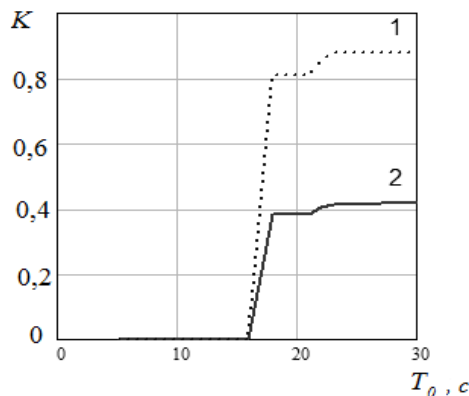


Рис. 3. Зависимость коэффициента сохранения эффективности $K(T_0)$ от предельно допустимого времени пребывания запросов в системе T_0

Результаты оптимизации

Проведем оптимизацию трехуровневой компьютерной системы по критерию максимума коэффициента сохранения эффективности, а также по максимуму аддитивного и мультипликативного критериев. Будем считать заданными $C = (450, 150, 450)$ у.е., $C_0 = 6000$ у.е., $V = (1, 4, 1)$ с, $T_0 = 80$ с. Результаты оптимизации сведены в таблицу. Для каждого варианта исходных данных определено распределение числа узлов на каждом уровне, которое обеспечивает соответственно максимум коэффициента сохранения эффективности, аддитивного и мультипликативного критерия при ограничении расходов на реализацию системы C_0 . Оценены потенциальные потери D значения коэффициента сохранения эффективности при нахождении оптимального числа узлов на каждом уровне m_1, m_2, m_3 по максимуму аддитивного и мультипликативного критериев.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о влиянии выбора критерия на результат принятия решения по построению многоуровневых компьютерных систем. При этом предпочтительно использование коэффициента сохранения эффективности, объективно отражающего требования системы по обеспечению производительности системы даже в условиях деградации производительности вследствие отказов.

$\lambda, 1/c$	Критерий	P=(0,9; 0,95; 0,9)		P=(0,8; 0,95; 0,9)	
		m_1, m_2, m_3 , шт.	$K(m_1, m_2, m_3), D$	m_1, m_2, m_3 , шт.	$K(m_1, m_2, m_3), D$
1,45	Аддитивный	3,19,4	$K=0,89928$ $D=0,0365$	4,19,3	$K=0,85679811$ $D=0,059073881$
	Мультипликативный	4,19,3	$K=0,89928$ $D=0,0365$	4,19,3	$K=0,856798$ $D=0,0590738$
	Сохранения эффективности	5,13,4	$K=0,93578$ $D=0$	5,13,4	$K=0,91587199$ $D=0$
0,45	Аддитивный	3,22,3	$K=0,9821$ $D=0,0057$	3,22,3	$K=0,96700$ $D=0,016971$
	Мультипликативный	3,22,3	$K=0,9821$ $D=0,0057$	4,19,3	$K=0,978363$ $D=0,00561$
	Сохранения эффективности	4,16,16	$K=0,9879$ $D=0$	5,13,4	$K=0,983976$ $D=0$

Таблица. Результаты оптимизации

Таким образом, показано, что при векторной оптимизации с учетом надежности, производительности и стоимости целесообразно использование обобщенного критерия на основе коэффициента сохранения эффективности. Из таблицы видна неточность решения на основе аддитивного и мультипликативного критериев (не учитывающих, что работоспособные состояния могут характеризоваться разным качеством функционирования). Следовательно, скалярные критерии мультипликативного и аддитивного типа могут использоваться при приближенном решении задачи оптимизации.

Заключение

Рассмотрены варианты формирования частных и обобщенных критериев при решении задачи векторной оптимизации многоуровневых компьютерных систем с учетом их стоимости, надежности и времени обработки запросов. Показана целесообразность применения при решении задач векторной оптимизации многоуровневых компьютерных систем критерия на основе коэффициента сохранения эффективности, учитывающего накопление отказов узлов различных уровней и наличие работоспособных состояний системы с разным уровнем эффективности (с разным средним временем пребывания запросов в системе). Оценена разница определения оптимального числа узлов на каждом уровне (кратность резервирования) при использовании в качестве целевой функции рассматриваемого критерия на основе коэффициента сохранения эффективности, а также на основе мультипликативного и аддитивного критериев.

Результаты исследований могут использоваться при проектировании и обосновании выбора многоуровневых высоконадежных компьютерных систем, в том числе кластерной архитектуры.

Литература

1. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб: БХВ, 2005. – 408 с.
2. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Сов. радио, 1975. – 368 с.

Богатырев Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, bva@tinuviel.ru

Богатырев Станислав Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, realloc@gmail.com

УДК 004.912: 303.7

**ВЕГА – КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ
И АНАЛИЗА ТЕКСТОВ****К.К. Боярский, Е.А. Каневский**

ВЕГА представляет собой систему для классификации и обработки как анкетной, так и другого рода текстовой информации. Обсуждаются особенности анализа текстовой информации, основанной на контент-аналитическом сравнении фраз. Рассматриваются возможности системы и особенности ее функционирования. Большое внимание уделяется вопросам практического использования описываемой системы.

Ключевые слова: анализ текста, классификация, контент-анализ, словари, социологические анкеты, открытые вопросы, статистический анализ, шкалирование.

Введение

В текстовых массивах, циркулирующих в обществе, содержатся специфические познавательные возможности. Анализируются различные тексты: материалы средств массовой информации, политические материалы в виде программ партий и кандидатов в электоральных кампаниях, уставы партий и движений, биографии и дневники, научные публикации и др. Социология сама стимулирует появление в обществе специальных текстов, проводя конкурсы сочинений и автобиографий, организуя интервью.

Анализом содержания текстов занимаются многие исследователи при изучении влияния средств массовой информации на общественное мнение, документов истории и культуры, политического, экономического, юридического и даже экологического сознания общества. Одной из первых систем автоматизированного анализа текстов явилась General Inquirer (Гарвард, 1968), широко использующая различные словари [1]. Современные системы TACT и TextPack также основаны на использовании словарей [2].

Сегодня наибольшее распространение получили два метода анализа: кластерный анализ и контент-анализ. Математический аппарат кластерного анализа можно использовать для автоматического выделения естественных тематических групп из случайной однородной массы текстового материала (например, набора статей из различных журналов). Созданы методы классификации полнотекстовых баз данных (БД) на основе алгоритмов визуального эвристического кластерного анализа документов. Методы основаны на составлении частотных словарей и выделении тех слов, частота встречаемости которых во всех текстах БД превышает общеупотребительную частоту [3].

Другим методом качественно-количественного изучения содержания текстов является контент-анализ (КА). В процессе КА все многообразие текстов по интересующей исследователя тематике сводится к набору определенных элементов, которые затем подвергаются подсчету и анализу. На использовании контент-анализа построены программы TACT, ARRAS, TextPack, SYREX, SATO [4].

Обычно в качестве элемента содержания (единицы анализа) при «машинном» КА используют слово, которому ставят в соответствие определенную категорию. Это удобно, так как слово изначально выделено в тексте пробелами. Однако слово характеризуется лишь номинативной, назывной функцией. Единицей выражения мысли является предложение, которое используется в качестве единицы содержания при классическом («ручном») КА. Мы используем в качестве элемента содержания несколько другую единицу анализа – фразу, которая может состоять даже из одного слова. Каждая фраза является выражением одного суждения, одной мысли. При сравнении фразы считаются идентичными друг другу при совпадении двух–трех слов или одного–двух ключевых слов [5].

Любые попытки применения КА к текстовым массивам неизбежно связаны с проблемой классификации и, следовательно, с разработкой классификатора. Простейшая

структура классификатора обычно напоминает таблицу и содержит категории (группы) и их модальности (типы). Более сложный классификатор имеет древовидную структуру, состоящую из классов и групп.

В большинстве исследований заранее составляется формализованная, полностью закрытая схема классификации [6]. При повторяющихся исследованиях, например, в средствах массовой информации, стандартный классификатор даже помогает сравнивать результаты очередного обследования с предыдущими. Однако при анализе быстро меняющейся ситуации даже опытный исследователь, проводя обследования через 1–2 года, не может заранее создать полностью готовый классификатор. Причина ясна: сместилась тематика ответов респондентов, их волнует уже не то, что год или два тому назад. Поэтому на один и тот же вопрос (открытого типа) они отвечают совсем не так, как раньше. Очевидно, что в этом случае классификатор должен уточняться непосредственно в процессе КА, при осмыслении материалов данного опроса.

Система ВЕГА

На основе разработанных методик в 1991–1997 г.г. была создана система ДИСКАНТ [7]. Основная ее цель – обеспечить мощной компьютерной поддержкой работу различных исследователей и аналитиков, имеющих дело с анализом текстовой информации. ДИСКАНТ представляла собой систему для классификации и обработки как текстовой, так и другого рода анкетной информации, которая хранится в БД системы. Система была разработана под DOS и позволяла классифицировать содержание текстовой информации по множеству оснований, составлять указатели и частотные словари слов и фраз, осуществлять поиск слов в тексте и в словаре. Были разработаны разнообразные способы визуализации результатов в виде гистограмм, циклограмм, сопряженных двумерных диаграмм.

На основе этой системы сегодня разработана более совершенная система ВЕГА, предназначенная для работы с текстовой и цифровой информацией при проведении социальных и социологических исследований. Система в основном предназначена для обработки структурированной и, прежде всего, анкетной информации. Кроме того, система позволяет выполнять некоторые элементы анализа текста: составление словарей, подсчет встречаемости слов, поиск слов по словарю и по тексту и т.д. Система обеспечивает статистический анализ ответов на закрытые и полужакрытые вопросы.

В системе ВЕГА используется методика итерационной классификации текста. В качестве единицы анализа выбрана фраза. Слова, наиболее точно отражающие смысл фразы, выделяются прописными буквами – это ключевые слова. Выделение фраз и ключевых слов осуществляется вручную в процессе предварительной подготовки текста к анализу.

В системе вся исходная информация хранится в собственной БД. При этом в случае анкетной информации ответы на одну анкету составляют одну запись, ответы на один вопрос помещаются в одно поле. Каждое поле имеет свой номер, имя и определенный тип. Набор всех этих параметров для данной БД образует ее структуру. Выбранный набор типов полей позволяют наиболее адекватно хранить ответы респондентов, учитывая, что в анкетах имеются открытые, закрытые и полужакрытые вопросы. Для удобства пользователей и контроля вводимой информации предусмотрены следующие типы полей.

- **Символьное** содержит любую последовательность текстовых символов и может быть разделено на отдельные фразы. Размер текста в каждом поле – до 32767 символов. Разделенный на фразы текст имеет вид

“НЕСТАБИЛЬНОСТЬ | отсутствие РЕАЛЬНОЙ ВЛАСТИ | несоблюдение ЗАКОННОСТИ”.

- **Целое** содержит одно или несколько целых положительных десятичных чисел, которые соответствуют номерам вариантов ответов, выбранных респондентом. Они разделяются друг от друга запятыми. Содержимое поля имеет вид “2” или “1,3,6” или “1, 3, 6”.
- **Вещественное** содержит только одно вещественное десятичное число.
- **Диапазон** содержит одно или два положительных вещественных числа и вспомогательные знаки (“>”, “<”, “–”). Содержимое поля имеет вид “<89.6732” или “>7845” или “56 – 238.349”.

Кроме того, имеются составные поля, в которых числовая часть специальным знаком отделяется от символьной. Это позволяет производить независимую обработку разных частей такого поля. К полям составного типа относятся:

- **Смешанное 1**, первая часть которого представляет собой целый тип, а вторая – символьный. Содержимое поля имеет вид “7 ‡ Вооруженные силы”.
- **Смешанное 2**, первая часть которого представляет собой символьный тип, а вторая – целый. Содержимое поля имеет вид “Вооруженные силы ‡ 1,7”.

Классификация текста предполагает распределение всех текстовых фраз по классификатору. Последующий анализ результатов классификации, сравнение полей или массивов, проверка гипотез уже не представляют технических и содержательных трудностей. В *ручном варианте* классификация состоит из трех основных процедур [5, 8].

1) Разрабатывается классификатор, представляющий собой древовидную структуру классов и групп, приблизительно соответствующую содержанию текста. Отбираются фразы, наиболее часто встречающиеся в тексте.

2) Выполняется собственно классификация. При этом в каждый класс (и в каждую группу) помещается некоторое количество предварительно отобранных фраз. Желательно, чтобы в каждой такой фразе было выделено (прописными буквами) хотя бы одно ключевое слово. Эти фразы получают статус нормативных фраз.

3) Производится идентификация. Каждой фразе основного текстового массива ставится в соответствие одна из нормативных фраз, наиболее близкая ей по смыслу. В результате этой текстовой фразе приписывается порядковый номер выбранной нормативной фразы – своеобразный адрес в классификаторе, по которому в дальнейшем определяется класс и группа текстовой фразы.

В принципе полная реализация классификационного процесса осуществляется множественными итерациями всех трех перечисленных процедур. Такая итерационная схема позволяет выполнять анализ порциями. Например, сначала можно классифицировать массу более легких, типовых фраз, а затем уже переходить к нестандартным фразам, последовательно улучшая результаты.

Сущность предлагаемой методики сводится к тому, что вместо 100%-ной классификации всех фраз проводится классификация только части фраз, а все остальные фразы отождествляются с ними. Это дает двойное преимущество. Во-первых, сокращается объем работы по классификации фраз. Во-вторых, при любом изменении классификатора, – а это не исключение, а правило при анализе текстов – достаточно изменить класс и группу у ряда нормативных фраз, чтобы автоматически произошли соответствующие изменения и у всех остальных фраз, связанных с ними.

В режиме *автоматической классификации* система самостоятельно выполняет все три процедуры, описанные выше [5]. При этом очередная текстовая фраза сравнивается с уже имеющимися нормативными фразами. Если при сравнении обнаруживается похожая нормативная фраза, то ее порядковый номер приписывается этой текстовой фразе. В противном случае данная текстовая фраза объявляется нормативной, и для нее заводится новая группа в классификаторе. В результате автоматической классификации получается

классификатор, состоящий из одного класса, который содержит множество групп. Далее работа исследователя заключается в объединении этих групп в новые группы и в классы в соответствии с их тематикой с целью организации соответствующего классификатора. Практика показывает, что для достаточно точной классификации количество исходных групп в 5–6 раз превышает количество результирующих групп [9].

В результате выполнения этих процедур фиксируются все три составляющие процесса классификации текста: своего рода «каталожный ящик» – классификатор, приписанные к соответствующим ящичкам (классам и группам) нормативные фразы и система соответствия (идентификаторы) каждой исходной фразы с одной из нормативных фраз. Никаких других сведений по классификации система не хранит.

Процедура сравнения фраз, не совпадающих текстуально, заключается в том, что каждая текстовая фраза разлагается на отдельные слова, ее составляющие [5]. Для каждого такого слова в нормативном словаре (словаре, составленном по нормативным фразам) ищется слово, совпадающее с ним по правилам сравнения слов. Если такое слово в этом словаре имеется, то для этого слова фиксируется номер той нормативной фразы, в которой он встретился. Для каждой из встретившихся нормативных фраз подсчитывается ее вес. Та нормативная фраза, которая получит наибольший вес, и будет считаться наиболее близкой к анализируемой текстовой фразе.

Основные характеристики системы

В табл. 1 заголовки граф показывают основные режимы работы системы ВЕГА, реализованные в виде соответствующих экранных форм. Ячейки табл. 1 представляют различные возможности каждого режима.

ФАЙЛ	БАЗА ДАННЫХ	СЛОВАРИ	КЛАССИФИКАЦИЯ	АНАЛИЗ ТЕКСТА	СТАТ. АНАЛИЗ	СЕРВИС
Создать	Просмотр записей	Вывод словаря	Классификатор	по классам	1-мерный	Сжатие базы
Открыть Закрыть	Просмотр поля	Пермутационный вывод	Классификация	по признакам	2-мерный	Параметры: – общие – шрифты – идентичность
Импорт Экспорт Печать	Структура	Новый словарь	Нормативные (фразы)	по сочетаемости классов	3-мерный	
Объединение БД			Идентификация	по количеству фраз	Таблица	
					МСА	
					Шкала	

Таблица 1. Структура системы ВЕГА

Основной формой является БАЗА ДАННЫХ. При переходе на эту форму всегда выводится закладка Просмотр записей. В этом режиме осуществляется ввод и редактирование информации, вывод ее в файл или на печать и переход во все другие режимы. В текстовые окна выводится содержимое ряда полей выбранной записи. Обеспечивается возможность разбиения текстовых ответов респондента на фразы и выделения ключевых слов. Кроме того, обеспечивается выделение фразы для последующей классификации (занесение в Сундук – вспомогательную БД для хранения отобранных фраз с целью их последующей классификации) или непосредственный переход к ее классификации. Закладка Структура обеспечивает задание полей. При отсутствии записей допускается любое редактирование вновь введенной структуры, при наличии хотя бы одной записи – только просмотр и редактирование имен полей.

Закладка Объединение баз служит для формирования новой БД на основе уже имеющихся. Режим обеспечивает перепись содержимого выбранных полей из одной БД в другую с одновременной конвертацией типов полей.

Форма СЛОВАРИ обеспечивает анализ частоты встречаемости отдельных элементов и различного вида поиска. Как известно, широкое использование словарей характерно для различных методов анализа текста. В системе ВЕГА словари (вместе с пермутационным выводом) служат, прежде всего, для изучения текста и разработки классификатора [10], хотя могут использоваться и по своему прямому назначению. При выводе словаря обеспечивается просмотр его содержимого, вывод его в файл или на печать, его удаление, а также различного вида поиска. В окне вывода словаря для каждого айтема (словарной единицы) указывается количество слов или фраз, объединенных в ней. Для выбранного айтема приводятся все адреса его вхождений в исходный текст – номер записи и номер поля в БД, что обеспечивает простой переход к контексту. При пермутационном выводе обеспечивается такое представление текста, при котором заданные тем или иным способом слова словаря расположены в центре экрана, а контекст их окружения укорочен до размера стандартной строки экрана. В начале каждой строки указан адрес выводимого текста. Пермутационный вывод является одним из основных инструментов исследователя при первичном анализе текста. Могут быть созданы словари четырех типов: по словам, по ключевым словам, по фразам и частотный словарь. При этом в трех первых типах словарей айтемы расположены по алфавиту, а в последнем – по частоте встречаемости.

Форма КЛАССИФИКАЦИЯ обеспечивает создание классификатора и распределение всех текстовых фраз по нему. Вывод классификатора осуществляется в виде таблицы (служит для ввода и редактирования) или в виде дерева (используется для объединения групп и классов и изменения конфигурации классификатора). Закладка Классификация обеспечивает классификацию фраз, хранящихся в Сундуке. В процессе классификации исследователь присваивает классифицируемой фразе выбранные им класс и группу, после чего эта фраза становится нормативной. Обеспечен просмотр и редактирование нормативных фраз. Возможно непосредственное изменение класса и группы у отдельной фразы. Можно удалить нормативную фразу. Если по этой нормативной фразе идентифицирована хотя бы одна текстовая фраза, то такие идентификаторы гасятся.

Закладка Идентификация позволяет идентифицировать текстовые фразы в нескольких режимах. В *ручном режиме* каждая фраза основного текстового массива уже не классифицируется, а ставится в соответствие с одной из нормативных фраз. Результаты идентификации можно проверить в режиме «Просмотр». Возможно использование одного из *автоматических режимов* идентификации. При выборе режима «Автоматическая идентификация» автоматически выполняется только идентификация текстовых фраз – к этому моменту должны существовать классификатор и набор нормативных фраз. При выборе режима «Создание классификатора» не только автоматически выполняется идентификация, но одновременно создаются классификатор и нормативные фразы, т.е. весь процесс классификации выполняется автоматически. Полученный таким образом классификатор обычно содержит множество групп, расположенных в одном единственном классе, и дополнительно требует объединения этих групп [9].

Форма АНАЛИЗ ТЕКСТА обеспечивает анализ распределения фраз из заданных полей по классам и группам. Обеспечивается стыковка с Microsoft Excel и SPSS на уровне передачи в них первичных результатов анализа. Для сопоставления текстовых и числовых ответов следует сформировать вторичные признаки. Для каждого такого признака запоминается его имя, номера используемых им полей и условия его вычисления. После этого система позволяет анализировать распределение фраз по классификатору и вторичным признакам с представлением результатов в виде таблицы и двумерных гистограмм. Результаты анализа сочетаний классов в каждой анкете для выбранного набора полей представляются в виде гистограмм (рис. 1). Этот анализ позволяет понять, сочетания каких тем встречается в ответах чаще всего.

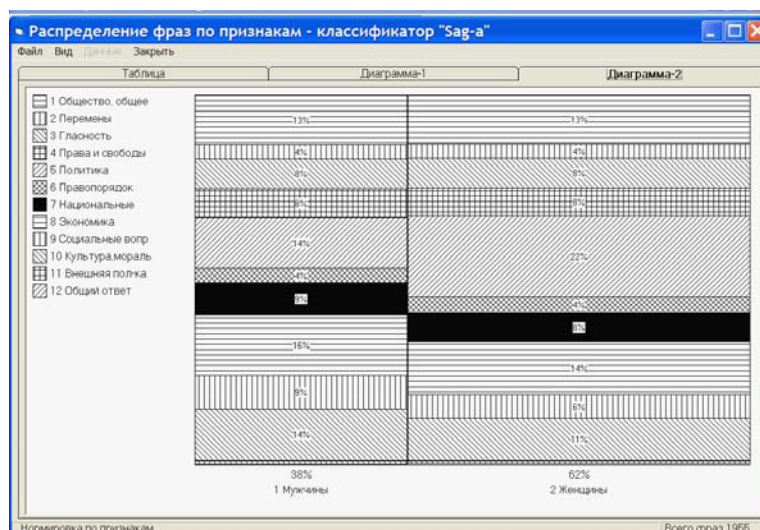


Рис. 1. Двумерная гистограмма распределения ответов по 12 классам для мужчин и женщин

Форма СТАТ.АНАЛИЗ обеспечивает возможность статистического анализа ответов респондентов на закрытые или полужакрытые вопросы анкеты. Статистическая обработка данных в рассматриваемой системе производится только для полей целого или смешанного типа. Вывод результатов обеспечивается в виде таблиц и диаграмм. Предварительно необходимо определить максимальное количество рангов (градаций) для каждого из этих полей. В ряде случаев данные, например возраст респондента, могут иметь значительный разброс. В таких случаях можно воспользоваться шкалированием, разделив весь диапазон изменения данных на ограниченное число градаций (рис. 2). Затем можно приступить к статистическому анализу ответов на одноальтернативные вопросы. При одномерном и двухмерном статистическом анализе результаты выводятся в виде таблиц и диаграмм, кроме того, подсчитывается ряд дополнительных параметров. При трехмерном статистическом анализе результаты выводятся в виде многомерной таблицы, в которой для каждого имеющегося набора рангов выводятся количество анкет и их процентное содержание. При многоальтернативном статистическом анализе результаты выводятся в виде двух многомерных таблиц.

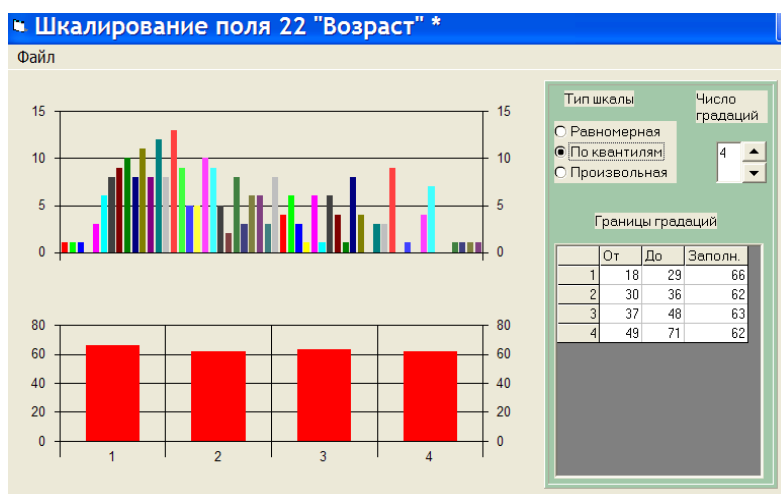


Рис. 2. Шкалирование поля «Возраст»

Форма СЕРВИС обеспечивает задание параметров системы, которые сохраняются и после выхода из нее. Можно задавать кодировку для импортируемой информации, тип пермутационного вывода, шрифты для текста и отдельно для пермутационного вывода, а также веса простых и ключевых слов и уровень отсечки фраз.

Дополнительные возможности системы

Система позволяет анализировать и отдельные тексты, не имеющие жесткой структуры – эссе, биография и т.п. [10]. Их анализ может быть осуществлен двумя путями.

Для свободных текстов можно создать БД, состоящую из одного поля символьного типа. При этом в одной записи можно разместить до 32 Кбайт текста. В этом случае каждый абзац текста будет соответствовать одной записи.

Для текстов, не имеющих жесткой структуры (типа автобиографий), можно создать БД, состоящую из нескольких полей символьного типа, сопоставив каждому из них узкую тематическую направленность (отношения в семье, отношение к искусству и т.п.). Импортируемый текст в этом случае может состоять из ряда разделов (параграфов), каждый из которых соответствует одной записи. Параграф состоит из нескольких абзацев, каждый из которых соответствует какому-либо полю записи в БД. Каждый такой абзац начинается с указателя номера поля. Номера полей могут быть расположены в любом порядке и могут даже повторяться в пределах одной записи. В последнем случае все абзацы, имеющие одинаковый номер поля, будут помещены в одно поле.

Даже для текстов такого рода система ВЕГА позволяет строить разнообразные словари и классифицировать информацию с последующей статистической обработкой.

Литература

1. Coxon A.R.M., Trappes-Lomax H.R.N. INQUIERER III (Edinburg's version). – Edinburg Univer., Jan.1977, Rep. 92. – 43 p.
2. Popping Roel. Computer-Assisted Text Analysis. – London: Sage Publications, 2000. – 240 p.
3. Сбойчаков К.О. Автоматизированная система классификации текстов на основе визуального эвристического кластерного анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gpntb.ru/win/elbib/trud3/fl_06.htm, свободный.
4. Компьютеризированный анализ текста [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://edu.tsu.ru/historynet/informatika/posobia/istgf_kleo/analiz.htm, свободный.
5. Каневский Е.А. Методы классификации текста // Труды Международного семинара Диалог'98 по компьютерной лингвистике и ее приложениям. – Казань: ООО «Хэ-тер», 1998. – С. 488–497.
6. Коробейников В.С. Методы качественно-количественного анализа содержания документов // Методы анализа документов в социологических исследованиях. – М.: ИСИ АН СССР, 1985. – С. 10–66.
7. Каневский Е.А., Саганенко Г.И., Гайдукова Л.М., Клименко Е.Н. Система анализа текстов // Социология: 4М. – 1997. – № 9. – С. 198–216.
8. Каневский Е.А., Лезин Г.В. Анализ текстов // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. Вып. 2. – СПб: ЗАО «Центр стратегических анализов общественных процессов», 2001. – С. 260–285.
9. Боярский К.К., Каневский Е.А. Вега – система для работы с текстами // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. Вып. 6. – СПб: Нестор История, 2008. – С. 184–200.

10. Саганенко Г.И., Каневский Е.А. Боярский К.К. Контексты эмпирического познания в социологии и возможности программы ВЕГА // Телескоп. – 2008. – № 6. – С. 43–55.

Боярский Кирилл Кириллович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, boyarin9@yandex.ru
Каневский Евгений Александрович – Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН, кандидат технических наук, вед. научный сотрудник, kanev@emi.nw.ru

УДК 515.142.33

ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ КАК СРЕДСТВО ОПИСАНИЯ БИНАРНЫХ ШТРИХОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.В. Стержанов

Описывается методика представления штриховых бинарных изображений в виде планарного нагруженного графа. Предлагается алгоритм построения графовой модели, основанный на кодировании изображения в виде концов серий. Результат работы может быть использован при векторизации растра, в системах классификации изображений и поиска шаблонов изображения.

Ключевые слова: бинарный растр, RLE-кодирование, планарный псевдограф.

Введение

Растровое изображение представляет собой прямоугольную матрицу, значение элемента которой (пикселя) соответствует его яркости. В бинарном изображении каждый пиксель окрашен в белый (фон) либо в черный (изображение) цвет. Под штриховыми изображениями будем понимать бинарные изображения, каждый объект которых представлен совокупностью линий, имеющих относительно одинаковую толщину на всем протяжении [1]. Примерами штриховых изображений являются технические чертежи, планы зданий, электросхемы.

При сканировании широкоформатных чертежей получается растровое изображение большого размера, что накладывает определенные ограничения на применяемые алгоритмы обработки. В частности, необходима структура данных, которая будет обеспечивать компактное хранение изображения, сохраняя его топологию. Рассмотрим сильные и слабые стороны некоторых методов представления растровой информации. Операция утоньшения, впервые рассмотренная в [2], позволяет представить объекты на растре линиями единичной ширины. Скелетизированное изображение сохраняет топологию, однако оно чувствительно к шуму, места соединений обрабатываются не всегда корректно. Некоторые алгоритмы скелетизации не сохраняют связность. Алгоритмы выделения контуров можно условно разбить на две группы: отслеживающие и сканирующие. Недостатком контурного препарата является то, что по нему трудно построить топологию исходного изображения. Граф смежности линий является удобным способом представления изображения, состоящего из большого числа горизонтальных или вертикальных отрезков [3]. Однако такая структура не хранит информацию о местах соединения, что, безусловно, является серьезным недостатком.

В данной работе предлагается представление каждого объекта изображения в виде планарного нагруженного ориентированного псевдографа, в котором все ребра суть прямолинейные отрезки или дуги кривых, а вершины – точки на плоскости, являющиеся концами отрезков или точками сочленения нескольких отрезков.

Используемая терминология

Под серией будем понимать последовательность отсчетов, имеющих одинаковое значение [4]. В зависимости от ориентации серия может быть горизонтальной или вертикальной. Серия однозначно определяется с помощью четырех значений: d – направление (вертикальное или горизонтальное); pos – номер столбца (строки) матрицы изображения, которому принадлежит серия; beg – номер строки (столбца) матрицы изображения, которому принадлежит первый пиксель серии; end – номер строки (столбца) матрицы изображения, которому принадлежит последний пиксель серии.

Две серии A и B называются смежными, если выполняются условия (1)–(4):

$$A.d = B.d, \quad (1)$$

$$|A.pos - B.pos| = 1, \quad (2)$$

$$A.beg \leq B.end + 1, \quad (3)$$

$$A.end \geq B.beg - 1. \quad (4)$$

Под путем из серии A к серии B будем понимать последовательность серий $A=A_1, A_2, \dots, A_n=B$, таких, что A_i является смежной с A_{i+1} для $1 \leq i \leq n-1$.

Рассмотрим две смежные серии. Они находятся в отношении «родитель–потомок», причем серию с меньшим значением pos будем называть родительской, а серию с большим значением pos – дочерней. Серия будет называться нормальной, если она имеет ровно одного родителя и ровно одного потомка. В противном случае серия является особой. Под начальной будем понимать серию, не имеющую родителей, под конечной – не имеющую потомков. Под серией слияния будем понимать серию, имеющую более одного родителя, а под серией ветвления – серию, имеющую более одного потомка.

Под полосой будем понимать связное множество нормальных серий. Полной полосой будем называть полосу, которая не является подмножеством другой полосы. Полоса представляет отдельную «ветвь» изображения. Полоса может содержать строго одну серию из столбца изображения, т.е. в полосе отсутствуют случаи ветвления и слияния серий. Под длиной полосы будем понимать количество серий, которые образуют полосу. Под весом полосы будем понимать суммарное число отсчетов ее серий. Если квадрат длины полосы больше ее веса, то полоса закрывается.

Скелетной кривой (СКР) в непрерывном пространстве является либо линейный скелет, либо средняя ось, сохраняющие топологические или геометрические признаки [5]. СКР задается множеством из N целочисленных точек $pnt_0, pnt_1, \dots, pnt_{N-1}$ и имеет характеристику ширины. На атрибуты СКР задаются следующие ограничения:

$$N \geq 3; \quad (5)$$

$$|pnt.x_{i+1} - pnt.x_i| \leq 1, \quad i = (0, 1, \dots, N-2); \quad (6)$$

$$|pnt.y_{i+2} - pnt.y_i| \leq 4, \quad i = (0, 1, \dots, N-3). \quad (7)$$

Закрытием полосы является формирование СКР по центральным точкам серий полосы (рис. 1). Серии, образовавшие СКР, удаляются из полосы. Посредством СКР представляются только те серии полосы, чьи центральные точки соответствуют условиям (5)–(7).

Рассмотрим полную полосу S . Серии, являющиеся родительской и дочерней по отношению к первой и последней сериям S соответственно, назовем краевыми. Обозначим краевые серии через E_1 и E_2 . Узловыми будем называть серии, к которым прикрепляются СКР при закрытии полосы. Если краевая серия является начальной или конечной, то она является узловой. В этом случае узловая серия «сужается» до центральной точки. Пусть краевая серия E_1 будет серией слияния или ветвления. Рассмотрим путь

E_1E_2 . Тогда узловой будет серия E_{1+n} . В данном случае размеры серии не изменяются. Такой выбор узловых серий сохраняет топологию соединения.

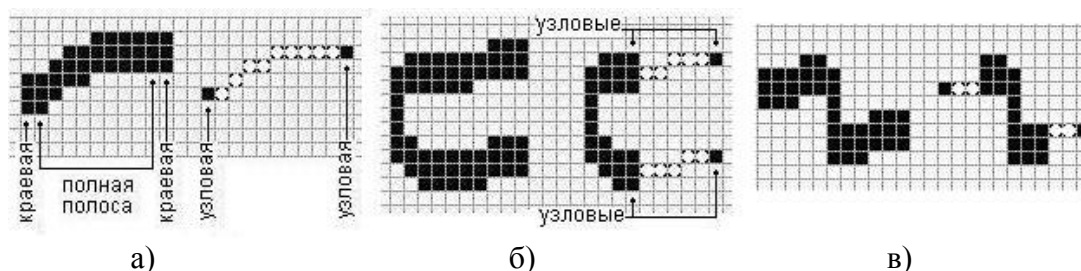


Рис. 1. Пример закрытия полос: а) узловые серии являются краевыми; б) узловые серии слева отличаются от краевых; в) полная полоса не может быть представлена одной СКР из-за нарушения условия 7

Пусть имеется полная полоса S , состоящая из n серий R . Общее число отсчетов серий полосы S равняется m . После закрытия она представляется кривой C . Вычисляются следующие морфологические свойства: площадь как количество пикселей, соответствующих полосе, длина как евклидово расстояние между центрами узловых серий, ширина W – по формуле

$$W = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \sqrt{1 + \left(\frac{R_i.beg + R_i.end - (R_{i-1}.beg + R_{i-1}.end)}{2} \right)^2}}.$$

Вычисление характеристик объектов

Каждый столбец матрицы изображения представляется упорядоченным по возрастанию координат списком серий. Изображение хранится в виде массива списков серий (МСС). Первый элемент МСС соответствует самому левому столбцу изображения, содержащему черный пиксель, а последний элемент МСС – самому правому столбцу изображения, содержащему черный пиксель. Если столбец матрицы изображений не содержит черных пикселей, то соответствующее значение элемента МСС равно нулю.

Выделим связные компоненты (СК) изображения. Благодаря RLE-кодированию возможно использование эффективного алгоритма [6]. Его основная идея заключается в том, что метка СК ассоциируется не с отдельным пикселем, а с серией. Однако для больших изображений размер таблицы эквивалентности является фактором, снижающим производительность. Для нахождения СК изображений большого размера применяем методику «разделяй и властвуй». Основываясь на работе [7], разделим изображение на $N \times N$ частей, для каждой части применим алгоритм [6], затем выполним процедуру слияния. Каждая СК соответствует объекту на изображении и будет представлена псевдографом. Некоторые характеристики объектов могут быть легко вычислены на основе представления в виде МСС.

Площадь характеризует общие размеры объекта и вычисляется как сумма всех пикселей СК, умноженная на горизонтальный и вертикальный масштабные коэффициенты. В соответствии с формами представления объектов различают несколько способов вычисления площади. Простую площадь иногда называют сетевой (net area). Выпуклая площадь (convex area) – это площадь многоугольника, вершины которого соответствуют выступам объекта. Под полной площадью (filled area) понимают площадь заполненного объекта.

Основная ось (major axis) соответствует максимальной линии, которую можно провести через объект. В работе [8] доказывается эффективность нахождения основной оси в кодированном концями серий изображении. Производной характеристикой от основной оси является ортогональная ось, которая определяется как максимальная линия внутри объекта, проходящая перпендикулярно основной оси.

Из топологических характеристик, описывающих форму объекта, вычисляются число Эйлера, характеризующее вложенность объектов внутри измеряемого, и количество дыр (holes), или отверстий, внутри объекта.

С помощью RLE-кодирования могут быть легко вычислены текстурные характеристики. Несмотря на широкое применение термина «текстура», для него нет точного определения [9]. Часто под текстурой понимают повторяемость фрагментов изображения. Следовательно, наличие какой-либо периодичности является текстурной характеристикой объекта. Мы вычисляем горизонтальный и вертикальный интерцепты [10].

Полученные характеристики описывают объект в целом. В процессе построения графовой модели будут вычислены характеристики, относящиеся к элементам СК.

Построение графовой модели бинарного растра

Выполним частичную скелетизацию СК, скан-проход которой заключается в следующем. Изображение сканируется по вертикали, анализируется связность смежных серий и выделяются полосы. Найденные полосы закрываются. После вертикального сканирования изображение поворачивается на 90° , снова выполняется скан-проход, затем изображение поворачивается в исходное положение (рис. 2). Очевидно, что алгоритм частичной скелетизации инвариантен по отношению к поворотам объектов изображения на угол, кратный 90° .

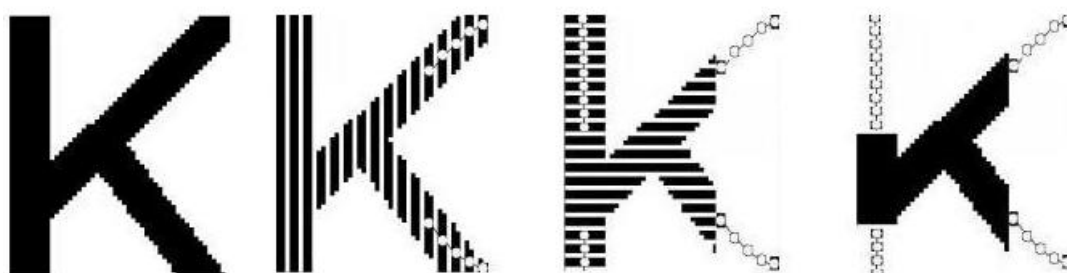


Рис. 2. Пример работы алгоритма частичной скелетизации

В результате двух скан-проходов прямолинейные отрезки СК заменяются скелетными кривыми (СКР). Группы серий, которые не были заменены СКР на процедуре частичной скелетизации, представляют собой области соединений (например, X , T , Y -типа). Из области соединения (ОС) исходят СКР, аппроксимирующие относительно прямолинейные участки. Для каждой СКР, исходящей из ОС, получим вектор направления, построенный по ее начальным точкам. Найдем точку пересечения векторов направлений ОС и соединим ее отрезками с начальными точками СКР. Пометим точки раstra, через которые проходят эти отрезки, флагом, затем применим параллельный алгоритм утоньшения для ОС, который не будет удалять помеченные флагом пиксели. Таким способом обеспечивается корректная обработка соединений.

На следующем шаге анализом последовательности серий единичной ширины выделим группы серий, удовлетворяющие условиям (5)–(7). Заменяем эти серии с помощью СКР. В данном случае СКР будет являться альтернативным способом представления последовательности пикселей единичной толщины. Перейдем к построению графо-

вой модели. По координатам узловых серий (т.е. серий, которые указывают на СКР) сформируем множество вершин V . По точкам СКР построим ребра. Каждая СКР была прикреплена к двум сериям, которые преобразовались в вершины, следовательно, можно найти вершины, из которых исходят ребра.

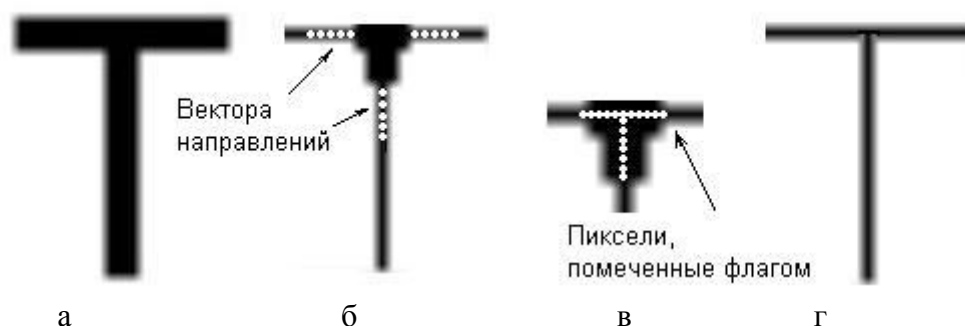


Рис. 3. Обработка соединений: а – исходное изображение; б – результат частичной скелетизации; в – ОС, белым показаны точки соединения; г – результат скелетизации

В результате вышеописанных действий каждая СК изображения представляется нагруженным ориентированным планарным псевдографом [11], вершинам которого соответствуют концевые и узловые точки отрезков СК, а ребрам – сами отрезки СК, представленные в форме СКР. Независимые подходы к описанию и построению графовых моделей были предложены в [8, 12–14].

Псевдограф G задается парой $G=(V, E)$, где V – множество вершин; E – мульти-множество ребер, каждое из которых соединяет две вершины из V , причем изображения ребер из E на плоскости не пересекаются, поэтому (V, E) представляет собой планарный граф. Каждое ребро имеет важные характеристики (длина, ширина, элонгация), которые могут быть использованы при последующем создании векторной модели. Графовая модель является компактной формой представления СК изображения. Она описывает топологию СК, связи между отрезками СК (ОСК) и позволяет осуществлять эффективное нахождение графических примитивов.

Под мультиточкой будем понимать точку пересечения как минимум трех отрезков [8]. Нахождение мультиточек является важной задачей при распознавании образов. Вершины графа, из которых исходит более трех ребер, являются мультиточками.

По графовой модели могут быть получены следующие характеристики:

а) для отдельной СК – выделение петли на изображении СК; количество ОСК; длина каждого ОСК; общая длина всех ОСК; средняя длина всех ОСК; максимальная и минимальная длина ОСК; средняя элонгация всех ОСК; максимальная и минимальная элонгация ОСК; средняя ширина всех ОСК; максимальная и минимальная ширина ОСК.

б) для изображения – количество объектов; количество ОСК всех объектов; суммарное, среднее, максимальное и минимальное значение параметров СК.

Граф может быть преобразован в более компактную форму гиперграфа [15], гиперребра которого состоят из ребер, соединяющих вершины степени 1 и 2 исходного графа (см. рис. 4).



Рис. 4. Исходное изображение и вершины гиперграфа

Заключение

Эффективный метод представления растрового изображения должен обеспечивать достаточную степень сжатия информации и в то же время позволять обрабатывать изображение напрямую в кодированной форме. Например, векторизация часто осуществляется для изображений большого размера, и разбиение изображения на фрагменты с последующей «сшивкой» является источником ошибок.

В статье предложено использование графовой модели как средства хранения и описания структуры раstra. Достоинством подхода является простота реализации и достаточно высокое быстродействие. Разработана модификация алгоритма нахождения СК, созданная специально для обработки изображений большого размера. Благодаря кодированию концов серий построение скелета осуществляется быстрее, чем при использовании классических методов попиксельного анализа. Также решается проблема обработки соединений. Кроме того, в процессе построения графовой модели вычисляются важные геометрические, топологические и текстурные характеристики объектов. Исходная СК может быть реконструирована анализом графа. Недостатком подхода является неполное описание площадных объектов. Полученная графовая модель может быть успешно применена при векторизации планов зданий, технических чертежей [16].

Литература

1. Семенков О.И., Абламейко С.В., Берейшик В.И., Старовойтов В.В. Обработка и отображение информации в растровых графических системах. – Минск: Наука и техника, 1989. – 183 с.
2. Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape // *Models for the Perception of Speech and Visual Form* (W.Wathen-Dunn, ed.). – Cambridge MA: MIT Press, 1967. – P. 362–380.
3. Pavlidis T. A minimum storage boundary tracing and its application to automatic inspection // *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*. – January 1978. – № 8(1). – P. 66–69.
4. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применения. Учебное пособие. – Мн.: Амалфея, 2000. – 304 с.
5. Klette G. Topologic, Geometric, or Graph-Theoretic Properties of. Skeletal Curves. PhD dissertation, Groningen Univ., 2007.
6. Linda G. Shapiro Connected Component Labeling and Adjacency Graph Construction. – 1996. – V. 1. – № 31. – P. 293.
7. Jung-Me P., Carl G. Looney, Hui-Chuan C. Fast Connected Component Labeling Algorithm Using a Divide and Conquer Technique // *CATA 2000 Conference on Computers and Their Applications*, Dec. 2000. – P. 373–376.
8. Zenzo S. Di, Cinque L., Levialdi S. Run-based algorithms for binary image analysis and processing // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – January 1996. – V. 18. – № 1. – P. 83–89.
9. Старовойтов В.В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений. – Мн: ИТК НАН Беларуси, 1997. – 282 с.
10. Абламейко С.В., Недзьведь А.М. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине. – Мн: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 155 с.
11. Харари Ф. Теория графов. – М.: Мир, 1973.
12. Садыков С.С., Кан В.Н., Самандаров И.Р. Методы выделения структурных признаков изображений. – Фан: Ташкент, 1990.
13. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Графовые модели цветных растровых изображений высокого разрешения // *Вестник ТГУ*. – 2002. – № 275. – С. 153–160.

14. Burge M., Kropatsch W.G. A minimal line property preserving representation of line images // Computing. – 1999. – Volume 62. – Issue 4. – P. 355–368.
15. Berge C., Ed. Graphs and Hypergraphs. – American Elsevier, New York, 1973.
16. Стержанов М.В. Векторизация бинарного раstra, кодированного длинами серий // Тезисы докладов МНТК, посв. 45-летию МРТИ-БГУИР. – С. 145–146.

Стержанов Максим Валерьевич

– Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, аспирант, ascept@bk.ru

УДК 004.021, 004.32.2

РАНДОМИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА КЛАСТЕРОВ НА МНОЖЕСТВЕ ДАННЫХ

Д.С. Шалымов

Рассмотрен новый непараметрический метод устойчивой кластеризации на основе рандомизированного алгоритма стохастической аппроксимации с искусственными возмущениями на входе. Описаны особенности, которые обеспечивают сходимость при почти произвольных (не обязательно гауссовых, но ограниченных по абсолютному значению) помехах. Предлагаемый метод может быть использован в задаче on-line кластеризации для динамически изменяющихся данных. Эффективность демонстрируется примерами.

Ключевые слова: кластеризация, устойчивость кластеризации, рандомизированные алгоритмы, стохастическая аппроксимация, пробное возмущение, on-line алгоритмы.

Введение

Кластеризацией является объединение данных в группы по схожим признакам. Она используется при решении многочисленных задач интеллектуальной обработки данных, в том числе при распознавании образов, машинном обучении, выработке стратегий управления и т.д.

Одной из наиболее сложных задач кластерного анализа является определение количества кластеров, которое получают за счет применения алгоритмов устойчивой кластеризации [1]. Несмотря на кажущееся многообразие, до сих пор не было найдено универсального алгоритма, который был бы эффективным для данных различной природы. Большинство существующих методов основано на индексах, сравнивающих степени «разброса» данных внутри кластеров и между кластерами [2], на расчете значений эвристических характеристик (функций устойчивости), показывающих соответствие назначенных кластеров для выборочных элементов множества [3], на статистиках, определяющих наиболее вероятное решение [4], либо на оценивании плотностей распределений [5]. Чаще всего эти методы либо настроены для конкретных специфических данных, либо требуют определенных предположений о своих параметрах. Кроме того, вычислительная сложность известных алгоритмов кластеризации существенно растет при увеличении мощности исследуемого множества. Также большинство таких алгоритмов недостаточно математически обосновано. Снять эти трудности позволяет использование рандомизированных алгоритмов [6].

В статье предлагается новый непараметрический индексный метод устойчивой кластеризации, основанный на использовании рандомизированного алгоритма типа стохастической аппроксимации (РАСА). Существенная особенность данного алгоритма заключается в том, что при небольших вычислительных затратах на каждой итерации обеспечивается сходимость при почти произвольных помехах. Предлагаемый метод прост в реализации, оказывается эффективным как для искусственно сгенерированных данных с заранее известными свойствами, так и для данных, взятых из реальных практических задач.

Алгоритм устойчивой кластеризации

Устойчивость кластеризации является характеристикой, определяющей различие результирующих разбиений после многократного применения алгоритмов кластеризации. Небольшое расхождение результатов интерпретируется как высокая устойчивость. Количество кластеров, которое максимизирует кластерную устойчивость, может служить хорошей оценкой для реального количества кластеров [7].

В кластерном анализе популярны итеративные методы, которые базируются на априорном знании количества кластеров и некотором выборе первоначального разбиения. Задача нахождения оптимального количества кластеров в общем случае является *NP*-сложной проблемой [8]. Данные часто имеют сложное поведение и не могут быть описаны с помощью аналитических функций. Как правило, это приводит к возникновению шумов и потере информации. Чтобы избежать этого, обычно проводят большее количество итераций, что значительно повышает вычислительную сложность процесса кластеризации. Известно, что в других приложениях снять эти трудности удастся при использовании рандомизированных алгоритмов, сложность которых, как правило, не зависит от роста размерности исходной задачи [6].

Известен эффективный метод устойчивой кластеризации, предложенный исследователями Suga и James [9], основанный на использовании внутренних дисперсий кластеров, называемых «искажениями». С помощью алгоритма *k-means* [10] множество разбивается на кластеры, далее строится кривая зависимости минимального «искажения» от текущего количества кластеров. Теоретически и эмпирически доказывается, что при определенном выборе параметра Y (степень трансформации) вышеупомянутая кривая будет иметь резкий скачок в том месте, которое соответствует настоящему количеству кластеров.

Основная процедура метода состоит из следующих шагов.

1. Запускается *k-means* алгоритм для K кластеров и определяется соответствующее «искажение» d_k . Для различных значений K строится набор d_k .
2. Выбирается степень трансформации $Y > 0$ (обычно принимается $Y = p/2$).
3. Вычисляются скачки по формуле $J_K = d_K^{-Y} - d_{K-1}^{-Y}$.
4. За итоговое количество кластеров выбирается то, которое соответствует наибольшему скачку: $K^* = \arg \max_K J_K$.

Вместо алгоритма *k-means* предлагается использовать альтернативный алгоритм РАСА с двумя измерениями [12], который оказывается эффективным в многомерных задачах с большим количеством параметров и наличием разнообразных помех, а также не обладает, в отличие от *k-means*, свойством вырожденности, когда на какой-либо итерации получается пустой кластер.

На рис. 1 изображены зависимости «искажений» модифицированного метода от количества кластеров. В примере для входных данных было использовано гауссово распределение, однако метод успешно зарекомендовал себя также на негауссовых данных.

Единственным параметром, зависящим в общем случае от данных, является степень трансформации. Есть возможность отказаться от него, если свести вышеописанную задачу устойчивой кластеризации к оптимизационной задаче. Для этого исследуется кривая на рис. 1, с, которая приближается гладкой функцией и имеет одну ярко выраженную экстремальную точку. Для поиска этой точки в условиях помех можно воспользоваться, например, классическим методом конечно-разностной стохастической аппроксимации [11]. Еще одним способом отказа от параметра является использование степени трансформации, обратно пропорциональной текущему количеству кластеров.

Учитывая тот факт, что кривая на рис. 1, с, аппроксимируется прямой на участках до и после истинного значения количества кластеров, можно использовать метод ломаной [9]. Тогда за результирующее значение количества кластеров можно принять то, которое минимизирует квадратичное отклонение кривой от двух прямых ломаной.

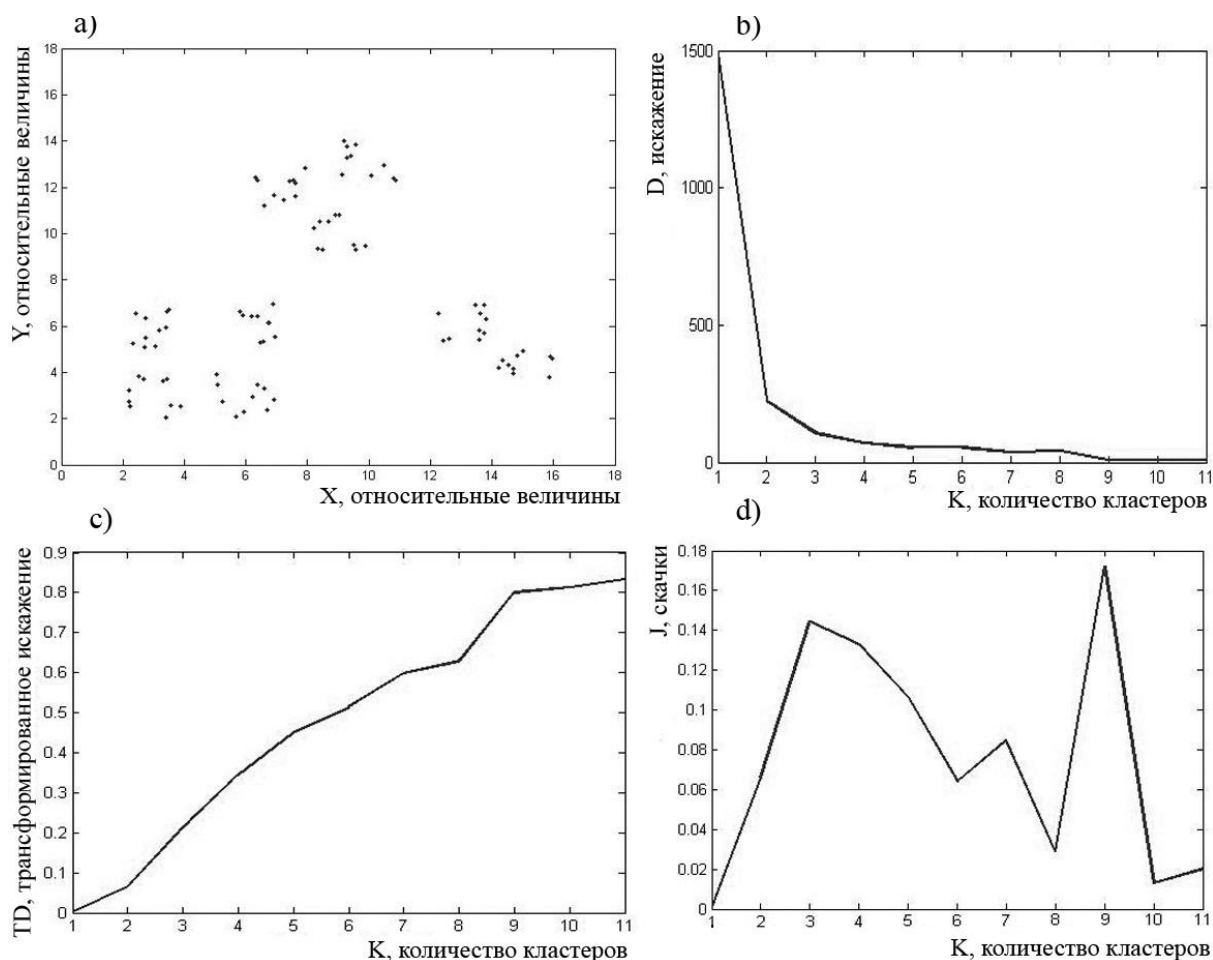


Рис. 1. Иллюстрация работы предлагаемого метода устойчивой кластеризации: а) входные двумерные данные, представляющие собой набор из девяти гауссовских кластера; б) кривая зависимости внутренней дисперсии от количества кластеров; в) кривая преобразованных внутренних дисперсий; г) кривая зависимости скачков от количества кластеров

Предлагаемый метод оказывается также эффективным в задаче определения структуры множества. Анализируя кривую скачков на рис. 1, d, можно увидеть, что в качестве основного ответа метод предлагает количество кластеров, равное девяти, а в качестве альтернативного – трем.

Автоматическая классификация входных данных

Для определения «правильного» количества кластеров на множестве данных многократно запускаются алгоритмы автоматической классификации с заранее известным количеством классов. С содержательной точки зрения смысл автоматической классификации состоит в построении правила, сопоставляющего каждой точке x множества X некоторый образ (класс). При этом должна быть задана функция расстояния между объектами $\rho(x, x')$.

Всякий способ классификации связан с потерями, которые обычно характеризуются с помощью штрафных функций (стоимости) $q^k(x, \eta)$, $k = 1, 2, \dots, l$, η – набор век-

торов, характеризующий центры классов. В типичных случаях, когда X – вещественное векторное пространство, значения штрафных функций $q^k(x, \eta)$ возрастают при удалении x от центра соответствующего образа (класса). Геометрический смысл задачи автоматической классификации заключается в следующем. Допустим, что в системе всего l классов $\eta = (\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^l)$, а штрафные функции имеют похожий друг на друга вид $q^k(x, \eta) = \|x - \theta^k\|^2$, $k = 1, 2, \dots, l$. Рассмотрим разбиение множества X на l классов $X^1(\eta), X^2(\eta), \dots, X^l(\eta)$ по правилу: к множеству $X^k(\eta)$ относятся все точки x , которые находятся к центру θ^k ближе, чем к любому другому. Интеграл

$$\int_{X^k(\eta)} \|x - \theta^k\|^2, \quad 1, 2, \dots, l,$$

определяет рассеяние точек x в множестве $X^k(\eta)$, а функционал среднего риска есть

$$F(\eta) = \sum_{k=1}^l \int_{X^k(\eta)} \|x - \theta^k\|^2 P(dx).$$

Задача автоматической классификации состоит в определении набора центров $\{\theta^k, k = 1, 2, \dots, l\}$, при которых суммарное рассеивание минимально. Решение не обязательно должно быть единственным, поскольку при перестановке местами векторов внутри набора $\{\theta^k, k = 1, 2, \dots, l\}$ значение определенного выше функционала среднего риска не изменяется.

На практике функции $q^k(\cdot, \eta), k = 1, 2, \dots, l$ не всегда заданы аналитически, но их значения доступны измерению (может быть, с помехами v^k):

$$y^k(x, \eta) = q^k(x, \eta) + v^k, \quad k = 1, 2, \dots, l.$$

Если функционал $F(\eta)$ дифференцируем, то искомый набор центров η_* должен удовлетворять уравнению $\nabla F(\eta_*) = 0$. Но при решении рассматриваемой задачи нельзя воспользоваться традиционными градиентными методами, так как из его вида понятно, что он не везде дифференцируем, и, кроме того, не всегда возможно прямое вычисление $\nabla F(\eta)$. Для аппроксимации градиента функционала среднего риска будем использовать РАСА с двумя измерениями на входе [12]. Известно, что при выполнении определенных условий РАСА по сравнению с классическим конечно-разностным алгоритмом стохастической аппроксимации (процедура Кифера–Вольфовица) [11] обеспечивает одинаковую точность за одно и то же количество итераций. При этом РАСА требуется в M (где M – размерность пространства) раз меньше измерений функции, что обеспечивает большой выигрыш в вычислительной сложности. РАСА основан на использовании наблюдаемой последовательности серии случайных независимых друг от друга векторов $\Delta_j \in R^m$, $j = 1, 2, \dots$, называемых пробным одновременным возмущением и составленных из независимых бернуллиевских случайных величин. В [12] доказывалось, что подобные алгоритмы сходятся к оптимальному набору центров классов η_* при почти произвольных помехах.

Практическое применение

Существует пять наиболее известных алгоритмов устойчивой кластеризации. Метод CH (Calinski–Harabasz) [5] выбирает количество кластеров, максимизирующее функцию $CH(K) = \frac{B(K)/(K-1)}{W(K)/(n-K)}$, где $B(K)$ и $W(K)$ – средние межкластерные и внутри-

кластерные расстояния. Подход *KL* (Krzanowski and Lai) [13] максимизирует функцию $KL(K) = \frac{DIFF(K)}{DIFF(K+1)}$, где $DIFF(K) = (K-1)^{2/p}W(K-1) - K^{2/p}W(K)$. Hartigan [4] предлагает выбирать наименьшее значение K , при котором значение функции $H(K) = (n-K-1) \left[\frac{W(K)}{W(K+1)} - 1 \right]$ меньше либо равно 10. Silhouette [1] измеряет, насколько хорошо была кластеризована i -я точка, для чего определяется функция $s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max[a(i), b(i)]}$, где $a(i)$ – среднее расстояние между i -ой точкой и всеми остальными наблюдениями, попавшими в тот же кластер, $b(i)$ – среднее расстояние до точек в ближайшем кластере, где под ближайшим кластером понимается тот, который минимизирует $b(i)$. Количество кластеров считается верным, если оно максимизирует среднее значение $s(i)$. Метод GAP [14] использует статистику расхождений, вычисляя функцию $GAP(K) = \frac{1}{B} \sum_b \log(W_b^*(K)) - \log(W(K))$. Метод использует B различных унифицированных множеств. Требуется подобрать K , максимизирующее $GAP(K)$.

Предлагаемый метод на основе PACA был сравнен с вышеописанными алгоритмами для данных, сгенерированных по трем различным сценариям. Результаты представлены в таблице.

Данные	Метод	Оценка количества кластеров									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I сценарий 5 гауссовских кластера, размерность пространства равна 10	<i>CH</i>	0	96	4	0	0	0	0	0	0	0
	<i>KL</i>	0	0	0	0	98	0	1	1	0	0
	<i>Hartigan</i>	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
	<i>Silhouette</i>	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>GAP</i>	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
	<i>PACA</i>	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
II сценарий 4 гауссовских кластера с различными ковариациями, размерность пространства равна 10	<i>CH</i>	0	0	0	83	5	5	3	0	1	1
	<i>KL</i>	0	0	0	76	7	2	3	8	4	0
	<i>Hartigan</i>	0	0	0	0	0	0	8	20	23	49
	<i>Silhouette</i>	0	34	0	65	1	0	0	0	0	0
	<i>GAP</i>	0	20	0	78	2	0	0	0	0	0
	<i>PACA</i>	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
III сценарий 4 кластера с экспоненциальным распределением, размерность пространства равна 10	<i>CH</i>	0	0	0	22	11	19	10	6	15	17
	<i>KL</i>	0	0	0	71	17	4	3	0	5	0
	<i>Hartigan</i>	0	0	0	0	0	2	7	9	17	65
	<i>Silhouette</i>	0	0	0	60	30	8	1	1	0	0
	<i>GAP</i>	85	9	0	6	2	0	0	0	0	0
	<i>PACA</i>	0	0	0	99	1	0	0	0	0	0

Таблица. Применение алгоритмов устойчивой кластеризации к искусственным данным, сгенерированным по трем различным сценариям

Для каждого сценария было сгенерировано по 100 тестовых множеств. Предлагаемый метод оказывается помехоустойчивым. Каждый из классических подходов, в отличие от PACA, для данных второго и третьего сценариев дал неверные результаты как минимум в двух случаях.

Метод PACA был успешно применен для данных, ставших классическими для тестирования алгоритмов кластеризации, а также для данных, количество кластеров в которых изменялось во времени. С помощью предложенного метода можно определить не только количество кластеров и структуру данных, но также оценки координат центров кластеров.

Заключение

Рассмотренный непараметрический индексный метод устойчивой кластеризации на основе РАСА оказывается эффективным как на искусственных, так и на реальных данных. Метод прост в применении. Кроме того, в отличие от большинства существующих алгоритмов кластеризации, он может быть строго описан математически. РАСА остается устойчивым в условиях почти произвольных помех. При этом с ростом размерности фазового пространства его сложность не возрастает.

В качестве дальнейшего исследования предполагается рассмотреть альтернативные способы определения количества кластеров на основе анализа кривой «искажений», а также апробировать существующие модификации РАСА с одним и двумя измерениями функции стоимости на каждой итерации.

Литература

1. Kaufman L. and Rousseeuw P. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. – New York: Wiley, 2005. – 368 с.
2. Wishart D. Mode analysis: A generalisation of nearest neighbour which reduces chaining effects. // Numerical Taxonomy. – 1969. – С. 282–311.
3. Levine E. and Domany E. Resampling method for unsupervised estimation of cluster validity // Neural Computation – 2001. – № 13. – С. 2573–2593.
4. Hartigan J.A. Clustering Algorithms. – New York: John Wiley, 1975. – 351 с.
5. Calinski R. and Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis // Commun Statistics. – 1974. – № 3. – С. 1–27.
6. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оптимизации и оценивания при почти произвольных помехах. – М., Наука, 2003. – 291 с.
7. Volkovich Z., Barzily Z., Morozensky L. A statistical model of cluster stability // Pattern Recognition. – 2008. – № 41. – С. 2174 – 2188.
8. Hansen P. and Mladenovic N. J-means: a new local search heuristic for minimum sum-of-squares clustering // Pattern Recognition. – 2002. – № 34(2). – С. 405–413.
9. Sugar C. and James G. Finding the number of clusters in a data set : An information theoretic approach. // Journal of the American Statistical Association. – 2003. – № 98. – С. 750 – 763.
10. Hartigan J.A., Wong M.A. A K-Means Clustering Algorithm // Applied Statistics. – 1979. – № 28. – С. 100 – 108.
11. Kushner H.J., Yin G.G. Stochastic Approximation Algorithms and Applications. – New York, Springer-Verlag, 2003. – 474 с.
12. Граничин О.Н., Измакова О.А. Рандомизированный алгоритм стохастической аппроксимации в задаче самообучения // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 52–63.
13. Krzanowski W.J., Lai Y.T. A criterion for determining the number of clusters in a data set // Biometrics. – 1985. – № 44. – С. 23–34.
14. Tibshirani R., Walther G., Hastie T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic // Journal of the Royal Statistical Society. – 2001. – № 63. – С. 411–423.

Шалымов Дмитрий Сергеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет, аспирант, shalydim@mail.ru

УДК 37.014.5

ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ ПРОФИЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ В СТАРШЕЙ ШКОЛЕ, ОРИЕНТИРОВАННОГО НА ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ ВЫПУСКНИКОВ В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Т.А. Гетманская, Д.М. Гриншпун, В.В. Королев, С.К. Стафеев

В статье сформулированы рекомендации по развитию профильного обучения в старшей школе и представлены модели решения двух основных задач, решаемых на основе гипотезы о профильном обучении как этапе профессионального самоопределения школьника: создание системы интегрированной подготовки специалистов и профессиональная переподготовка преподавательских кадров для системы предпрофильного и профильного обучения.

Ключевые слова: мониторинг, профильное обучение школьников, старшая школа, потребности школьников, потребности рынка труда в специалистах.

Введение

В настоящей статье сформулированы рекомендации по развитию профильного образования в старшей школе, сформированные в соответствии с результатами проведенного в 2008 г. мониторинга [1], в ходе которого изучалось качество образовательных услуг, с одной стороны, оцениваемое их потребителями (учениками), заказчиками (родителями) и поставщиками (учителями и руководителями ОУ), а с другой – сопоставляемое с профессиональным образованием и потребностями рынка труда. Идеология мониторинга опиралась на концептуальное определение предназначения профильного обучения – обеспечение эффективной профессиональной ориентации личности за счет изменений в структуре, содержании и организации образовательного процесса.

Профессиональная ориентация личности – это процесс профессионального самоопределения с учетом, прежде всего, интересов и способностей человека, а также региональных потребностей экономического характера. Социально-экономическая значимость профессиональной ориентации возрастает в связи с такими обстоятельствами, как постоянно возрастающая потребность производства в высококвалифицированных кадрах, усиление напряженности баланса трудовых ресурсов региона, что требуется оптимизации их межпрофессионального, межотраслевого и территориального распределения [2]. К тому же следует учитывать ярко проявившуюся в результате мониторинга особенность профессионального самоопределения в современных условиях – его все более ранний характер, что, в свою очередь, делает приоритетным обеспечение целостности образовательного процесса, начиная с самых ранних этапов, в том числе целостности индивидуальной образовательной траектории. Это ставит перед учреждениями разных образовательных этапов общие задачи, например:

- обеспечение преемственности (содержание образовательных программ каждого уровня (ступени, этапа) должно учитывать знания, практические умения, навыки и компетенции, полученные на каждой предыдущей ступени);
- ориентированность на заказчика (содержание образовательных программ на всех этапах профессионального становления должно корректироваться в соответствии с требованиями работодателя к профессиональной компетенции выпускника);

- применение индивидуального подхода, направленного на выявление и развитие способностей ученика (студента), и т.д.

Эти новые задачи определяют целесообразность развития поэтапного образования, в котором можно выделить два ключевых направления работы: разработку модели интегрированной подготовки специалистов (если рассматривать ученика профильного направления как будущего специалиста), позволяющей обеспечить преемственность уровней и раннее профессиональное самоопределение школьников, и соответствующую профессиональную переподготовку педагогов, занятых в системе предпрофильного и профильного обучения на разных этапах образования.

Модель интегрированной подготовки специалистов

Основными элементами предлагаемой модели интегрированной подготовки специалистов являются предпрофильная подготовка (ППП), профильное образование (ПО), профессиональное образование, работодатели, научно-методический комплекс по сопровождению ранней диагностики и индивидуальной поддержки одаренных детей (НМК), которые призваны обеспечить:

- предпрофильная подготовка – профильное самоопределение ученика средней школы путем формирования у него «предпрофильных компетенций»;
- профильное образование – профессиональное самоопределение путем формирования «профильных (допрофессиональных) компетенций»;
- профессиональное образование – подготовку специалиста путем формирования профессиональных компетенций в соответствии с заказом работодателей;
- научно-методический комплекс по сопровождению ранней диагностики и индивидуальной поддержки одаренных детей – сопровождение этапов предпрофильного, профильного и профессионального самоопределения, обеспечение индивидуальной поддержки школьников, осуществление психолого-педагогического сопровождения студентов.

Очевидно, что должен быть создан координационный орган, обеспечивающий непрерывность образовательного процесса, реализующий следующий алгоритм работы: он аккумулирует заказы работодателей в форме профессиональных требований к востребованным на рынке труда специалистам, проводит мониторинг региональной системы образования на предмет его соответствия поступившим заказам и с учетом планов развития региона формирует паспорт социального заказа на подготовку специалистов; паспорт должен определять количественные параметры специальностей, профильных и предпрофильных направлений, а также формировать региональные компоненты профессиональных компетенций будущих специалистов; на основе паспорта социального заказа ОУ высшего или среднего профессионального образования (ВПО/СПО) осуществляют поддерживаемый психолого-педагогическим сопровождением образовательный процесс и формируют соответствующие региональные компоненты «профильных компетенций» для ОУ профильного образования (общеобразовательные школы или ОУ ДО); последние под учебно-методическим патронажем координационного органа осуществляют подготовку будущих абитуриентов ОУ профессионального образования, обеспечивая при этом с помощью НМК отбор учеников старших классов на обучение по соответствующим им профильным направлениям и условия для их профессионального самоопределения, а также формируют соответствующие региональные компоненты «предпрофильных компетенций»; на основе «предпрофильных компетенций» и под учебно-методическим патронажем координационного органа функционируют ОУ предпрофильной подготовки.

Учебно-методический патронаж на всех уровнях предполагает содействие в формировании профильных рабочих учебных планов и программ, их содержательную кор-

релированность, т.е. преемственность на различных образовательных этапах, исключаящую дублирование, обеспечение привлечения материально-технических ресурсов «вышестоящих» ОУ для проведения отдельных видов занятий «нижестоящих» (например, лабораторий, вычислительных центров, библиотек, систем тестирования), организацию объединенных мероприятий (конференций, круглых столов, семинаров) и т.д. Таким образом, для каждого из элементов системы интегрированной подготовки специалистов определены входные и выходные воздействия, а также управляющие параметры.

Представляется наиболее целесообразным функцию координационных органов закрепить за соответствующими ОУ ВПО (например, в форме центров довузовской подготовки), обладающими самым высоким в рассматриваемой цепи образовательных этапов научно-методическим потенциалом, имеющими естественные связи со всеми остальными участниками и максимально заинтересованными в востребованности на рынке труда своих выпускников.

Таким образом, можно сформулировать рекомендации по обеспечению потребностей старшей школы для реализации эффективной модели обучения на каждом из этапов непрерывного образования.

Профессиональная переподготовка педагогов в системе предпрофильного и профильного обучения

Как отмечалось в описании модели интегрированной подготовки специалистов, должны выполняться два противоречивых требования – с одной стороны, направленность на профессию, ориентированную на рынок труда, с другой – обеспечение развития индивидуальности, т.е. должен быть организован личностно-ориентированный образовательный процесс [3].

№	Наименование информационно-образовательных блоков	Учителя ППП			Учителя ПО		
		Осведом- ленность	Вне- дрение	Разра- ботка	Осведом- ленность	Вне- дрение	Разра- ботка
1	Профильные (предпрофессиональные) «компетенции»	+	-	-	+	+	-
2	Рабочие учебные планы и программы ПО на основе профильных «компетенций»	+	-	-	+	+	+
3	Профессиональная направленность образовательных профилей	+	-	-	+	-	-
4	Профессиональная диагностика, профессиональное самоопределение, профориентация	+	-	-	+	+	+
5	Профессии ВПО и СПО, в том числе профессиональные компетенции	+	-	-	+	-	-
6	Ресурсная готовность ПО	+	-	-	+	+	+
7	Профессии НПО, в том числе профессиональные компетенции	+	-	-	+	-	-
8	Профильная диагностика (профильное самоопределение)	+	+	+	+	-	-
9	Предпрофильные «компетенции»	+	+	-	+	-	+
10	Рабочие учебные планы и программы ППП на основе предпрофильных «компетенций»	+	+	+	+	-	-
11	Ресурсная готовность ППП	+	+	+	+	-	-

Таблица. Основные информационно-образовательные блоки

Обеспечение целостности образовательного процесса, в том числе целостности индивидуальной образовательной траектории, ставит перед педагогами разных образовательных этапов в соответствии со структурой модели общие задачи, перечисленные в разделе «Введение». В то же время имеются специфические задачи каждого из этапов. Совокупность этих общих и специфических задач определяет дополнительные информационно-образовательные блоки, которыми должны владеть учителя этапов ППП и ПО системы интегрированной подготовки специалистов. Помочь в овладении этими блоками призваны программы переподготовки учителей, занятых в системе предпрофильного и профильного обучения школьников.

В таблице приведены основные информационно-образовательные блоки, которыми должны владеть учителя ППП и ПО в соответствии с вышеизложенными особенностями МИПС. Столбец «Осведомленность» означает, что учитель должен знать материал соответствующего раздела, «Внедрение» – уметь его реализовывать, «Разработка» – уметь его создавать. Блоки расположены в обратном порядке относительно прохождения образовательных этапов, т.е. от конечного результата.

В соответствии со спроектированными данными таблицы может быть разработана программа профессиональной переподготовки учителей, занятых в системе предпрофильного и профильного обучения школьников.

Заключение

Представленный в статье материал является результатом мониторингового комплексного исследования профильной школы как этапа профессионального становления личности. Выполнен сопоставительный анализ ожиданий потребителей и заказчиков образовательных услуг, возможностей их исполнителей, потребностей рынка труда. На основе результатов анализа результатов мониторинга предложена модель системы интегрированной подготовки специалистов, опирающаяся на многолетний авторский опыт реализации непрерывного профессионального образования от 8-х классов до ВПО. Определены цели, задачи, методы и содержание программы подготовки (повышения квалификации) учителей, реализующих профильное обучение в рамках предложенной системы.

Литература

1. Гетманская Т.А., Гриншпун Д.М., Королев В.В., Стафеев С.К. Мониторинг профильного обучения: анализ спроса и предложения // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – № 4. – С. 12–19.
2. Виноградова А.С., Лискачева А.Д. Психолого-педагогическое сопровождение абитуриентов и студентов в рамках среднего профессионального образования // Труды XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2008». – Министерство образования и науки РФ, Российская академия наук, Национальный фонд подготовки кадров, 2008. – Т. 2. – С. 478–479.
3. Королев В.В. Особенности проектирования содержания учебной программы классов информационно-технологического профиля системы непрерывного профессионального образования с профессиональной ориентацией на специальности ВПО // Труды Первого Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». – Министерство образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 131–133.

- Гетманская Татьяна Александровна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, педагог-организатор, firefly.tg@gmail.com
- Гриншпун Дмитрий Михайлович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, декан, dgr1@yandex.ru
- Королев Владимир Владимирович*** – Негосударственное образовательное учреждение «СЕГРИС-ИИТ», зам. генерального директора, vvkorolyov@gmail.com
- Стафеев Сергей Константинович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, stafeev@phd.ifmo.ru

9

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 002:004:056

**МЕТОД ГРАДУИРОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ
КОРРЕСПОНДЕНЦИИ («СПАМА»)****М.А. Семёнова, В.А. Семёнов**

Получение «спам» сопряжено с потерями сетевых ресурсов и времени получателей. В такой ситуации приобретает особую важность правильный способ создания фильтров от такой нежелательной корреспонденции. В статье представлен метод градуированной фильтрации «спам», позволяющий наиболее точным образом определять «спам» в поступающем потоке сообщений.

Ключевые слова: «Спам», противоспамные фильтры, коэффициенты «спамерности», фильтрующее ПО, алгоритм фильтрации, градуированная фильтрация.

Введение

Распространение писем в сети приняло угрожающие размеры и стало серьезно мешать работе Интернета. «Спам» составляет до 90% полного объема почтовых сообщений. «Спам» делает бизнес менее эффективным [1]: он вызывает раздражение сотрудников, потери рабочего времени, ресурсов на приобретение и обслуживание фильтрующих программ, часть «спам» часто заражена вирусами, «червями» или «троянскими программами» [2]. Противоспамные фильтры могут не пропустить и уничтожить важное сообщение, сочтя его за «спам». Впрочем, и человек, вынужденный просматривать десятки рекламных сообщений в день, тоже легко может пропустить среди них нужную корреспонденцию.

В настоящее время существует несколько алгоритмов фильтрации нежелательной корреспонденции. В частности, фильтр, основанный на алгоритме Байеса, имеет следующие достоинства:

- уникальный для каждой организации набор данных, что делает невозможным обход фильтра;
- просмотр полного нежелательного сообщения, а не только ключевых слов или известных подписей;
- многоязычность.

В других алгоритмах для расчета «спамерности» применяются следующие правила:

- для анализа сообщений используются ограниченный набор (15, 25, 27 в зависимости от алгоритма) наиболее «интересных» слов, для которых коэффициент «спамерности» слов наиболее сильно отклоняется от нейтрального значения (0,5).
- если ранее слово встречалось менее чем в пяти письмах, оно игнорируется.

Главными недостатками всех существующих методов являются ложные тревоги, пропуск «спам», фиксированное количество слов, участвующих в оценке письма. Представленный в данной статье метод градуированной фильтрации «спам» позволяет более точным образом определять «спам» во входящем потоке сообщений за счет иного способа расчета коэффициентов «спамерности», а также гибкой настройки определения количества слов, участвующих в оценке письма.

Борьба с нежелательной электронной корреспонденцией

В последнее время в почтовых программах, кроме стандартных папок «Входящие», «Исходящие», «Отправленные», «Корзина», у каждого ящика появилась папка

«Спам» («Junk mail»), в которую должна отсортировываться вся нежелательная или сомнительная корреспонденция. Эта сортировка возможна как вручную, так и при помощи самодельной системы фильтров. Действительно, все рекламные письма имеют в своем тексте что-то общее: в одних предлагают что-нибудь купить, в других – что-то посетить; в одних оставляют свой адрес, в других – телефон [3]. Совсем не сложно выбрать около десятка признаков, по которым можно отнести письма к категории «спам» [4]. Используемый при этом метод заключается в следующем: анализируется содержание письма, производятся расчеты коэффициентов «спамерности», и на основании рассчитанных коэффициентов производится общая оценка письма и делается вывод, «спам» это или нет. Письмо, классифицированное как «спам», отделяется от прочей корреспонденции: оно может быть помечено, перемещено в другую папку, удалено. Пользователь не видит отфильтрованного «спам», но продолжает нести издержки, связанные с его приемом, так как фильтрующее программное обеспечение (ПО) получает каждое письмо и только потом решает, показывать его или нет.

Проблемой при автоматической фильтрации является то, что она может по ошибке отмечать как «спам» полезные сообщения. Поэтому многие почтовые сервисы и программы по желанию пользователя могут не стирать те сообщения, которые фильтр счел «спамом», а помещать их в отдельную папку.

Метод фильтрации сообщений на основе градации сообщений

Метод позволяет более детально оценивать письмо, перед тем как отнести его к определенной категории («спам» или «не спам»). В основе метода градуированной фильтрации лежит механизм разбиения входящих писем на слова («токены»), на основе которых составляются частотные словари. Блок-схема составления частотных словарей представлена на рис. 1.

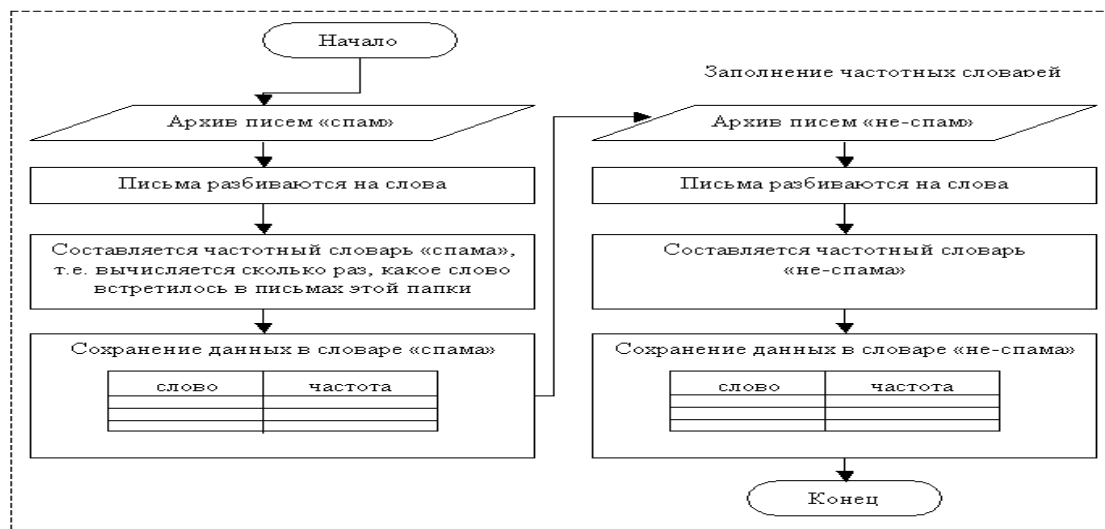


Рис. 1. Составление частотных словарей

Для обучения используется архив старых сообщений, отсортированных вручную (почти все пользователи ведут свои почтовые архивы, в которых «спам» хранится либо в папке «удаленные», либо в отдельной папке «спам»). Программа обучения для каждого типа (папки) сообщений вычисляет частоту встречаемости слов в письмах этой папки. Когда словари заполнены, производится вычисление вероятности принадлежности конкретного нового письма к той или иной категории («спам» или «не спам») (рис. 2). Письмо, поступающее через фильтр, разбивается на слова, и каждому слову сопоставляется коэффициент встречаемости из частотного словаря, причем при отсутствии сло-

ва в словарях устанавливается коэффициент, равный 0,5. После этого рассчитывается коэффициент «спамности» (коэффициент, по которому письмо относится к категории «спам» или «не спам») по формуле Байеса, но с подстановкой новых вероятностей нахождения «спама» в письме. Далее следует выборка показателей, наиболее «интересных» с точки зрения оценок. Уровень «интересности» определяется тем, насколько оценка «токена» отличается от нейтральной. Эвристическим параметром для данной модели статистической фильтрации писем будет количество «токенов», по которым оценивается то или иное письмо.

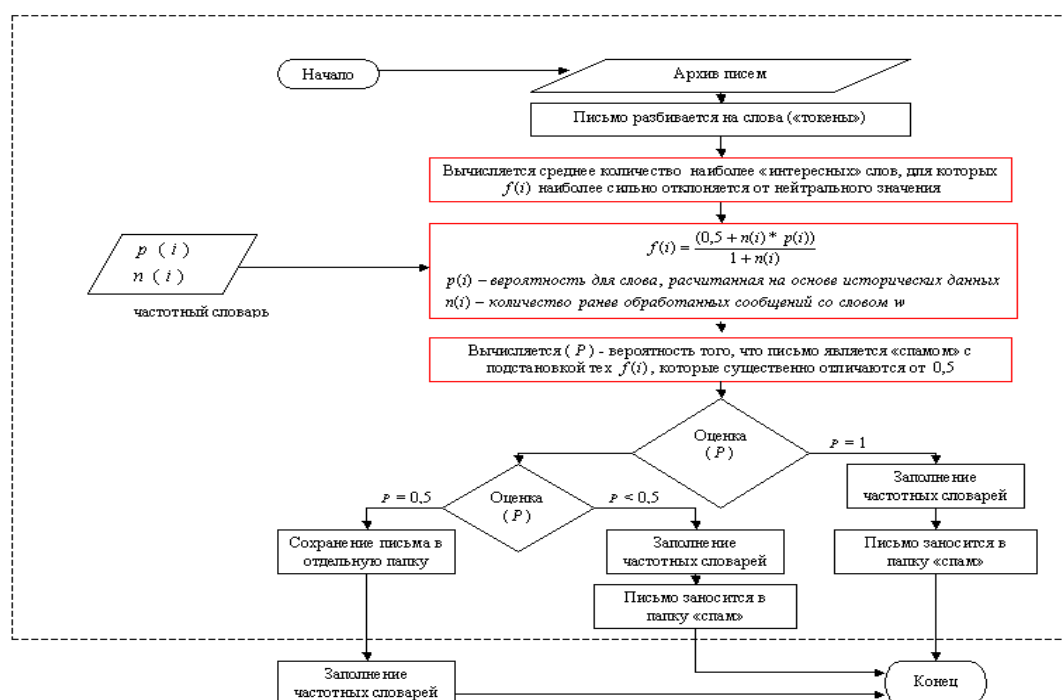


Рис. 2. Процесс фильтрации писем на основе метода градуированной фильтрации «спама»

Принцип работы классификатора «спама», построенного на основе метода градуированной фильтрации, основан на вычислении для каждого «токена» оценки

$$P = \frac{S}{S + G} > K, \quad (1)$$

где P – вероятность того, что сообщение является «спамом», S – суммарный коэффициент «спамности» сообщения, G – суммарный коэффициент «неспамности» сообщения, K – заданный пользователем порог. Для вычисления вероятностных оценок p_i используется описанный выше процесс обучения, во время которого анализируются заранее классифицированные документы.

Для корректного соотношения «спама» и «не спама» и дальнейшей оценки категории письма (при градуировании) будем рассчитывать «спамность» по формуле вычисления оценок вероятностей, учитывающей специальные случаи редких характеристик, что при нулевой частоте дает нейтральный результат, а при увеличении частоты асимптотичности приближается к реальной оценке. Тогда суммарный коэффициент «спамности» можно представить в следующем виде:

$$S = \frac{0,5 + n_1 \cdot p_1}{1 + n_1} \cdot \frac{0,5 + n_2 \cdot p_2}{1 + n_2} \cdot \frac{0,5 + n_3 \cdot p_3}{1 + n_3} \cdot \dots \cdot \frac{0,5 + n_{i-1} \cdot p_{i-1}}{1 + n_{i-1}} \cdot \frac{0,5 + n_i \cdot p_i}{1 + n_i},$$

а суммарный коэффициент «неспамерности» – в виде

$$G = \left(1 - \frac{0,5 + n_1 \cdot p_1}{1 + n_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{0,5 + n_2 \cdot p_2}{1 + n_2}\right) \cdot \left(1 - \frac{0,5 + n_3 \cdot p_3}{1 + n_3}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{0,5 + n_{i-1} \cdot p_{i-1}}{1 + n_{i-1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{0,5 + n_i \cdot p_i}{1 + n_i}\right).$$

Здесь n – общее число «токенов» в письме с оценками $p_1 \dots p_n$, n_i – количество ранее обработанных сообщений с «токеном» i , p_i – вероятность для «токена», рассчитанная на основе исторических данных.

Использование метода позволяет решить две проблемы: 1) оценки «токенов», впервые встретившихся в проверяемом письме и не существовавших до этого в базе; 2) повышения качества оценки данных (градуирования). Если анализируемый «токен» ранее не встречался, то, как уже упоминалось, оно автоматически получает коэффициент 0,5, а по мере накопления статистики это значение будет выходить на свой естественный уровень.

Метод был реализован в разработанном программном обеспечении «антиспам». В процессе испытания через фильтр были пропущены 480 писем, половина из которых являлась «спамом». В результате система не смогла распознать лишь 0,5% сообщений типа «спам», а количество ложных срабатываний фильтра оказалось равным 1,1%.

Заключение

«Антиспамерские» фильтры, основанные на статистической оценке, позволяют с достаточно большой вероятностью определять принадлежность письма к «спаму» на основе анализа его заголовка и текста с учетом сообщений, ранее полученных конкретным пользователем. При этом каждый владелец почтового ящика имеет возможность индивидуальной настройки характеристик распознавания в процессе обучения фильтра.

Литература

1. Distributed Checksum Clearinghouse [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rhyolite.com/anti-spam/dcc>, свободный.
2. Спам – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Спам>, свободный.
3. Визначення терміну СПАМ у законодавстві України. Журнал «Інформаційні технології. Аналітичні матеріали». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://it.ridne.net/uaspamdef>, свободный.
4. RAZOR. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://razor.sourceforge.net>, свободный.

- Семенова Мария Александровна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, semenova-maria@rambler.ru
- Семенов Вениамин Александрович** – Главное управление Банка России по Санкт-Петербургу, кандидат технических наук, эксперт I категории, veny-semenov@yandex.ru

SUMMARY

1. OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

THE APPARATUS REDUCING OF POSITION INACCURACY IN THE OPTOELECTRONIC HEAD FOR A THEODOLITE PUL-N

V. Korotaev, A. Maraev, P. Pokhitonov, A. Timofeev

The ways of the positioning inaccuracy decreasing by the optoelectronic head for a theodolite with the optical equisignal zone (PUL-N) for the building techniques control are regarded in this article. These ways are based on the application of high-effective semiconductor light emitting diodes and the modernization of the instrument optical scheme.

Keywords: positioning, optical equisignal zone, energy sensitivity.

Valery Korotaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Chief of Department, D.Sc., Professor, korotaev@grv.ifmo.ru

Anton Maraev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, antoshka87@gmail.com

Peter Pokhitonov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, sea_pirat@mail.ru

COMPLEX MODEL STRUCTURE FOR DESIGNING OF OPTICAL- ELECTRONIC SYSTEMS FOR POINT OBJECT OBSERVATION WORKING IN VARIOUS BACKGROUND CONDITIONS

A. Andreev, T. Lbova

The description of model structure used for synthesis, analysis and prediction of optical-electronic point objects observation system (OES) is given. Moving point object is under observation. Parameters of object input influences and background noise, optical system parameters, photodetector parameters, destabilizing factors, algorithms, etc. are set as initial data.

Keywords: computer system simulation, optical-electronic observation systems, point object detection.

Andrey Andreev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D., Associate professor, and-andr@yandex.ru

Tatyana Lbova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, tlbova@gmail.com

INVESTIGATION OF THE MOIRÉ FRINGES, APPEARING AT LIGHT DIFFRACTION AT SLIT BETWEEN “THICK” EDGES AND FLAT REFLECTING SURFACE

A. Ivanov

The extraction problem of the information on geometrical parameters of controllable object from moiré fringes generated by imposing of frequency spectra of these objects is considered. The concrete technique for its decision is offered.

Keywords: diffraction, moiré, measurement.

Alexander Ivanov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, tutor, PH.D., i_off@mail.ru

CHARACTERISTICS CALCULATION OF THE POLARIZATION-INDEPENDENT OPTICAL ISOLATOR FOR FIBER-OPTICS COMMUNICATION SYSTEMS

S. Mironov

The paper deals with the analysis of the polarization-independent optical isolator in micro-optics technology based on the spatial separation of the polarized rays. The calculation results of the insertion loss, isolation and return loss have been presented for the optical isolator intended in fiber-optics communication systems.

Keywords: fiber-optics communication systems, non-reciprocal devices, optical isolator, laser diode protection, insertion loss, isolation, return loss.

Sergey Mironov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D., Senior scientific fellow, s.a.mironov@inbox.ru

2. PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

THE DYNAMICS OF LUMINESCENT PROPERTIES OF CdSe/ZnS QUANTUM DOTS IN HYGROPHOBIC SOLVENTS

V. Adrianov, A. Orlova, V. Maslov, A. Baranov, A. Fedorov

The investigation results of long-time evolution of CdSe/ZnS quantum dots (QD) luminescent properties are given. The luminescence and absorption spectra were registered for CdSe/ZnS QDs placed in different

hydrophobic solvents. The influence of surface-active materials concentration on optical properties of QDs is concerned.

Keywords: quantum dot, spectral analysis, hydrophobic solvents.

Vladimir Adrianov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Post-graduate student, adriatika@front.ru

Anna Orlova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior researcher, udifa@mail.ru

Vladimir Maslov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Leading researcher, maslov@sp.ru

Alexander Baranov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of section, a_v_baranov@yahoo.com

Anatoly Fedorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of department, a_v_fedorov@inbox.ru

DISSOCIATION CONDITIONS OF SEMICONDUCTOR QUANTUM DOT/ORGANIC MOLECULE COMPLEX IN POLYMERIC THIN FILMS

U. Toporova, A. Orlova, V. Maslov, A. Baranov, A. Fedorov

The article reports the results of a spectral research of semiconductor quantum dot (QD)/organic dye 1-(2-Pyridylazo)-2-naphthol (PAN) complex in hydrophobic solutions and in polymeric thin films in the presence of metal ions. Conditions of QD / PAN complex formation in solutions and thin films and its dissociation in the presence of metal ions were defined on the basis of experimental results. It was concluded that QD/PAN complex can be used as a sensitive element of dissociative luminescence nanosensor.

Keywords: quantum dot, organic dye, dissociation, metal ions.

Yulia Toporova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, topyuliya@yandex.ru

Anna Orlova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior researcher, udifa@mail.ru

Vladimir Maslov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Leading researcher, maslov@sp.ru

Alexander Baranov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of section, a_v_baranov@yahoo.com

Anatoly Fedorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of department, a_v_fedorov@inbox.ru

PROGRAM COMPLEX FOR SYNTHESIS AND DIGITAL RECONSTRUCTION OF HOLOGRAMS-PROJECTORS

O. Nikanorov, G. Ivanov, S. Koreshev

Features of the hologram-projectors synthesis used in a holographic variant of photolithographic process are considered in the article. Necessity of alternative photolithography methods search is formulated and proved. The main attention is given to synthesis algorithms and hologram-projectors restoration. The interface of the created program complex is presented. Examples of synthesis and the subsequent restoration of the test object image are discussed.

Keywords: hologram, synthesis, reconstruction, photolithography.

Oleg Nikanorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, nikanorovov@ya.ru

Yuri Ivanov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, drunkcow@mail.ru

Sergey Koreshev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Senior researcher, koreshev@list.ru

3. ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

DYNAMICS OF THE SPACECRAFT ORIENTATION SYSTEM WITH FLYWHEEL MOTORS

A. Lagun, I. Ovchinnikov

Dynamics of the uniaxial spacecraft orientation system with full-control brushless flywheel DC-motor is considered. Operation modes both without outside disturbing moment and with small disturbing moment, acted on a spacecraft, are studied.

Keywords: spacecraft, orientation system, brushless DC-motor, flywheel motor.

Anton Lagun – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, lagunanton@yandex.ru

Igor Ovchinnikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, ludimit@yandex.ru

4. MECHANICS AND MECHATRONICS

EXPLORATION AND APPLICATION OF MECHATRONIC DEVICES WITH PIEZOACTUATORS

A. Smirnov, I. Krushinsky

This article introduces a significance of using the mechatronic devices with piezoactuators for setting surface mounted components on print board. A new piezoelectric gripper is developed. This device has self-sensing mode without any additional sensors and it can do micro-positioning of small details. The micro-positioning function was examined experimentally. Hysteresis reduction was observed during micro-positioning. Some different methods of sensing were suggested.

Keywords: mechatronic device, bimorph, piezoelectric gripper, micro-positioning, self-sensing, experimental stand, hysteresis reduction.

Arkadiy Smirnov - St. Petersburg State Polytechnic University, Professor, D. Sc., Associate professor, 123smirnov@list.ru

Ilya Krushinsky - St. Petersburg State Polytechnic University, Postgraduate, testing387@mail.ru

CONSTRUCTION OF STRAPDOWN STABILIZED GYROCOMPASS BASED ON THE ELECTROSTATIC GYROSCOPE AND MICROMECHANICAL SENSORS

G. Emelyantsev, A. Lochehin

Algorithms of an initial adjustment and calibration of strapdown stabilized gyrocompass on the basis of an electrostatic gyroscope and the block of micromechanical gauges are considered. Characteristic feature of the considered decision of an initial adjustment and calibration in start-up is total error estimation of an electrostatic gyroscope. The equipments of satellite navigating system given to a reception with the carried aerals and the inertial block on micromechanical gauges are involved as the reference information. Thus, the virtual ("ideal") electrostatic gyroscope used as the basic is formed. Algorithms are generated on the basis of generalized Kalman filter with a feedback along condition vector.

Keywords: stabilized gyrocompass, electrostatic gyroscope, micromechanical inertial sensors, satellite navigation systems, calibration.

Gennady Emelyantsev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, Emel@mail.ifmo.ru

Alexey Lochehin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, alex@infom.su

5. MATERIALS SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

RESEARCH OF DYNAMIC FORCE LITHOGRAPHY MODE IN SYSTEM "METAL-POLYMER"

A. Pinaev, A. Stovpyaga

The simple and inexpensive technology of conducting structures creation with the lowered dimension on the basis of dynamic force lithograph (DFL) method application to system «metal – polymer» is offered. Results of local DFL – modifications of polycarbonate surface and polycarbonate covered with aluminum film (Al) with tungsten nanoprobe and radius about 100 nanometers are given. Modification results are analyzed by means of scanning probe and raster electronic microscopes.

Keywords: scanning force microscope, lithography.

Alexander Pinaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pinaich@mail.ru

Alexander Stovpyaga – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, sanja100v@mail.ru

PARTICULARITIES, METHODS AND TECHNIQUES OF POLYMER VOLUME MICROSTRUCTURE FORMATION IN PHOTOPOLYMERIC NANOCOMPOSITE MATERIALS

V. Bulgakova, N. Vorzobova

Processes of polymer microstructure formation in nanocomposite materials are investigated. Relation of dimensional parameters with exposure characteristics, characteristics of amplitude mask, layer thickness and inhibiting by oxygen, self focusing and diffusion effects is established.

Keywords: photopolymer, photopolymerization, microstructure, aspect ratio, dimensional parameter of element, nanocomposite.

Vera Bulgakova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, vera-bulgakova@yandex.ru

Nadezda Vorzobova - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D., vorzobova@mail.ifmo.ru

6. BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

THE INFLUENCE OF A STRATIFIED MEDIUM BIO TISSUE ON ACOUSTIC FIELD OF THE POWERFUL ULTRASOUND SOURCE

A. Leonova

The research deals with the change of the powerful ultrasound source acoustic field by ultrasound interaction with bio tissue. The problem of acoustic field forming is examined. We found the acoustic field, which is created after sound waves passing through medium boundaries: water, adipose tissue, muscle tissue. The transmission factor is calculated depending on layer operation factors and operation factors of the powerful ultrasound source.

Keywords: ultrasound, bio tissue, transmission factor.

Antonina Leonova – Taganrog Institute of Technology of Southern Federal University (TIT SFU), Postgraduate student, antonina_tsure@mail.ru

WAVELET-TRANSFORM ABILITIES FOR ACCURACY INCREASING OF THE DIFFUSION PARAMETERS MEASUREMENTS IN MR-IMAGING

A. Kaznacheeva, A. Vlasyuk, A. Kudryashov

Magnetic resonance imaging (MRI) abilities for measuring the diffusion parameters in vivo tissues were considered in the paper. Experimental datasets, obtained under different conditions, were analyzed and accuracy of apparent diffusion coefficient measuring was determined. Measuring results were processed by using Daubechey wavelets with different parameters; quality factors of the noise blanking efficiency were calculated.

Keywords: MR-tomography, apparent diffusion coefficient, image quality, Daubechey wavelets.

Anna Kaznacheeva - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D., a_kazn@mail.ru

Alyona Vlasyuk - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, alisa190@yandex.ru

Alexander Kudryashov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, Alexandr257@mail.ru

7. COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

OPTIMALITY CRITERIA OF MULTILEVEL FAILURE-SAFE COMPUTER SYSTEMS

V. Bogatyrev, S. Bogatyrev

Variants of private and generalized criteria formation are considered in solving a problem of multilevel computer systems vector optimization with a glance to reliability, time of inquiries processing and system realization cost. Application possibility of efficiency preservation factor as the objective generalized criterion of a vector optimality is shown.

Keywords: reliability, fault tolerance, vector optimization, optimality criterion, efficiency preservation factor.

Vladimir Bogatyrev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Stanislav Bogatyrev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, realloc@gmail.com

VEGA – COMPUTER SYSTEM FOR TEXT ANALYSIS AND CLASSIFICATION

K. Boyarsky, E. Kanevsky

The VEGA system is intended first of all for processing answers in sociologic questionnaires as well as unstructured texts. Characteristics of text processing based on content-analyzing comparison of phrases are discussed. We consider the system possibilities and some features of its operation. Special attention is paid to problems of practical application of the described system. The VEGA system gives a wide opportunity to text processing in social sciences and various investigations of Russian-language texts.

Keywords: text analysis, classification, content-analysis, dictionaries, sociologic questionnaires, open questions, statistical analysis, scaling.

Kirill Boyarsky - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D., boyarin9@yandex.ru

Yevgeniy Kanevsky - Saint Petersburg Institute for Economics and Mathematics RAS, Leading scientist, Ph.D., kanev@emi.nw.ru

GRAPH MODEL AS A TOOL FOR BINARY LINE IMAGE DESCRIPTION

M. Sterjanov

The method for binary line drawings description in a form of planar attributed oriented pseudograph is presented. Hybrid algorithm for graph model construction is suggested. The algorithm is based on run length encoding of the image. The result of the research can be used in the raster vectorization task, in image classification and image retrieval systems.

Keywords: binary raster, RLE, planar pseudograph.

Maxim Sterjanov – Byelorussian State University of Informatics and Radio electronics, Postgraduate, accept@bk.ru

RANDOMIZED METHOD OF FINDING THE NUMBER OF CLUSTERS IN A DATA SET

D. Shalymov

New non-parametric method of choosing the number of groups in a data set is proposed. It is based on randomized stochastic approximation algorithm with input artificial perturbation. Main features to keep convergence under almost arbitrary noise are described. Proposed method could be used for on-line clustering of dynamically changed data sets. The effectiveness is demonstrated on a wide range of simulated and real nature data sets.

Keywords: clustering, cluster stability, randomized algorithms, stochastic approximation, simultaneous perturbation, on-line algorithms.

Dmitry Shalymov – Saint Petersburg State University, Postgraduate, shalydim@mail.ru

8. NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

SPECIAL TRAINING DEVELOPMENT IN SENIOR SCHOOL FOR VOCATIONAL TRAINING OF GRADUATING STUDENTS IN HIGHER EDUCATION SYSTEM

T. Getmanskaya, D. Grinshpun, V. Korolyov, S. Stafeev

This article contains the recommendations about the development of specialized training in Senior High School and represents the two basic problems solution models based on hypothesis about specialized training as a stage in the pupils' professional self-determination: integrated specialists training and professional retraining for teachers of pre-specialized and specialized education.

Keywords: monitoring, specialized training, Senior High School, pupils' needs, demand on the labor market.

Tatiana Getmanskaya - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, lecturer, firefly.tg@gmail.com

Dmitry Grinshpun - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, dgr1@yandex.ru

Vladimir Korolyov - Private Educational Foundation "Institute of Information Technologies "SEGRYS", Deputy Director, vvkorolyov@gmail.com

Sergey Stafeev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department Head, D. Sc., Professor, stafeev@phd.ifmo.ru

9. INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

GRADUATED FILTRATION METHOD OF UNDESIRABLE CORRESPONDENCE («SPAM»)

M. Semyonova, V. Semyonov

«Spam» reception causes not only network resource losses, but, what is more important, losses of recipients' time. Correct method of creation of filters against undesirable correspondence becomes specifically important. This article represents the method of «spam» graduated filtration, which allows most adequate selection of «spam» messages from incoming data-flow.

Keywords: «Spam», antispam filters, «spam» factors, filtering software, filtration algorithm, graduated filtration.

Maria Semyonova - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, semeonova-maria@rambler.ru

Veniamin Semyonov – Central administrative board of Bank of Russia in St. Petersburg, expert of the 1st category, Ph.D., veny-semenov@yandex.ru

Обращение к подписчикам

Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

«Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание (до 11 выпуска, издание называлось «Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета)»). Издатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО»).

Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска 120 листов.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN: 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Все публикации в журнале проходят рецензирование ведущих специалистов по научным направлениям.

Примерная тематика журнала

Публикация материалов, отражающих достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оптотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Журнал может быть полезен для учреждений высшего профессионального образования, научных учреждений и производственных предприятий, а также для отдельных научных работников, студентов, аспирантов и соискателей ученой степени доктора и кандидата наук.

Подписку можно оформить во всех отделениях печати. Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (газеты и журналы).

Главный редактор журнала,
доктор технических наук, профессор  В.О.Никифоров

Адрес редакции: 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49, E-mail: karmanov@mail.ifmo.ru Сайт журнала <http://books.ifmo.ru/ntv>

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

Общие положения

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В *аннотации*, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

Во *введении* необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущество (особенности) предлагаемого подхода.

В *основном тексте* статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В *заключении* необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

Предоставляемые материалы

Авторы статьи представляют в редакцию журнала следующие материалы.

1. Оригинал-макет статьи (в 2 экземплярах), содержащий:

- индекс УДК;
- название статьи на русском языке;
- И.О., фамилию авторов (предпочтительно в алфавитном порядке);
- полное название места работы или учебы авторов (для авторов из разных организаций – сведения по каждому автору);
- аннотация статьи на русском языке (до 100 слов);
- ключевые слова;
- текст публикации (с рисунками, таблицами и т.д.);
- список литературы.

2. Экспертное заключение о возможности опубликования.

3. Сведения об авторах (на отдельном листе):

Ф.И.О. – полностью, место работы или учебы (для иногородних – город), должность, ученая степень, звание, e-mail; Для контактного лица дополнительно указываются адрес для переписки, телефон для связи и e-mail.

4. Сведения о публикации, содержащие (на отдельном листе):

- название статьи (на русском языке);
- авторы (на русском языке);
- индекс УДК;
- ключевые слова (на русском языке);
- аннотация (на русском языке);
- литература (на русском языке);
- название статьи (на английском языке);
- авторы (на английском языке);
- ключевые слова (на английском языке);
- аннотация (на английском языке).

5. Диск (CD-R, DVD-R, допускается дискета 3,5 дюйма) с перечисленными выше материалами в электронном виде. Материалы в электронном виде представляются в виде отдельного каталога (название каталога – фамилия и инициалы контактного лица латинскими буквами, образец: IVANOV_A_A) отдельными файлами. Кроме перечисленных материалов, в электронном виде отдельными файлами представляются:

- рисунки (в т.ч. графики), выполненные в приложениях Microsoft Office, Microsoft Visio, Corel Draw, Adobe Photoshop, Adobe Illustrator;
- таблицы (в сгруппированном виде).

Текст статьи и сведения об авторах должны быть подписаны каждым автором.

Основные требования к оформлению статей

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал 1, поля сверху – 20 мм, остальные поля – 25 мм. Абзацный отступ – 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полусторонней пустой строкой, а от последующего текста – одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста – Times New Roman, прямой; функции – Times New Roman, прямой; переменной – Times New Roman, наклонный; греческих букв – Symbol, прямой; символов – Symbol, прямой; матрицы-вектора – Times New Roman, прямой, полужирный; чисел – Times New Roman, прямой. Размеры: обычный – 12 pt, крупный индекс – 10 pt, мелкий индекс – 8 pt, крупный символ – 16 pt, мелкий символ – 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. Нумерация позиций – согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Подписано к печати 15.09.2009 Тираж 350 экз. Заказ № 11(63)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.

Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать
(Газеты. Журналы)

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2009