



УДК 53.082.54

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В СХЕМЕ ГОМОДИННОГО ПРИЕМА СИГНАЛА ФАЗОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

М.В. Мехреньгин^а, А.Ю. Киреев^а, Д.А. Погорелая^а, М.Ю. Плотников^а, Ф.А. Шуклин^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: pdarja@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.11.14, принята к печати 15.01.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-227-233

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мехреньгин М.В., Киреев А.Ю., Погорелая Д.А., Плотников М.Ю., Шуклин Ф.А. Компенсация температурной зависимости выходного сигнала в схеме гомодинного приема сигнала фазовых волоконно-оптических датчиков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 227–233.

Аннотация. Предложена модифицированная схема гомодинного приема сигнала фазовых волоконно-оптических датчиков. На данный момент метод гомодинной демодуляции является одним из самых распространенных. Одним из его недостатков является температурная зависимость выходного сигнала, обусловленная зависимостью масштабного коэффициента модулятора от температуры. Компенсация такой зависимости возможна при автоматической подстройке глубины фазовой модуляции. Для решения этой задачи был проведен анализ дополнительных гармоник интерференционного сигнала с использованием функции Бесселя. В известную схему гомодинной демодуляции добавлена ветвь умножения интерферометрического сигнала на третью гармонику сигнала модуляции. Отклонение отношения нечетных гармоник от оптимального значения используется в качестве сигнала обратной связи для подстройки глубины модуляции. В моменты, когда третья гармоника принимает значения, близкие к нулю, в сигнале обратной связи возникают выбросы. Для устранения выбросов в сигнале обратной связи в схему добавлена ветвь умножения сигнала интерферометра на четвертую гармонику сигнала модуляции. Отклонение отношения четных гармоник от оптимального значения используется в сигнале обратной связи попеременно с отклонением отношения нечетных гармоник от оптимального значения. Предложенный алгоритм реализован в пакете MATLAB. Результаты моделирования подтвердили, что предложенный метод позволяет автоматически подстраивать глубину фазовой модуляции и компенсировать температурную зависимость масштабного коэффициента модулятора и амплитуды выходного сигнала.

Ключевые слова: фазовые волоконно-оптические датчики, гомодинная демодуляция, компенсация температурной зависимости.

Благодарности. Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

COMPENSATION OF OUTPUT SIGNAL TEMPERATURE DEPENDENCE IN HOMODYNE DEMODULATION TECHNIQUE FOR PHASE FIBER-OPTIC SENSORS

M.V. Mekhregin^а, A.Yu. Kireenkov^а, D.A. Pogorelaya^а, M.Yu. Plotnikov^а, Ph.A. Shuklin^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: pdarja@mail.ru

Article info

Received 21.11.14, accepted 15.01.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-227-233

Article in Russian

For citation: Mekhregin M.V., Kireenkov A.Yu., Pogorelaya D.A., Plotnikov M.Yu., Shuklin Ph.A. Compensation of output signal temperature dependence in homodyne demodulation technique for phase fiber-optic sensors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 227–233. (in Russian)

Abstract. Modified phase-generated carrier homodyne demodulation technique for fiber-optic sensors is presented. Nowadays phase-generated carrier homodyne demodulation technique is one of the most widespread. One of its drawbacks is the temperature dependence of the output signal because of the modulator scale factor temperature dependence. In order to compensate this dependence an automatic adjustment of the phase modulation depth is necessary. To achieve the result, additional harmonics analysis is used with the help of the Bessel functions. For this purpose the known demodulation scheme is added with the branch, where interferometric signal is multiplied by the third harmonic of the modulation signal. The deviation of optimal ratio of odd harmonics is used as a feedback signal for adjusting the modulation depth. Unwanted emissions arise in the feedback signal, when the third harmonic possesses a value close to zero. To eliminate unwanted emission in the feedback signal, the principle scheme is added with one more branch, where interferometric signal is

multiplied by the forth harmonic of the modulation signal. The deviation of optimal ratio of even harmonics is used as a feedback signal alternately with the deviation of optimal ratio of odd harmonics. A mathematical model of the algorithm is designed using the MATLAB package. Results of modeling have confirmed that suggested method gives the possibility for an automatic adjustment of the phase modulation depth and makes it possible to compensate temperature dependence for the modulator scale factor and output signal magnitude.

Keywords: interferometric fiber-optic sensors, homodyne demodulation technique, compensation of temperature dependence.

Acknowledgements. This work was carried out in ITMO University and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project #02.G25.31.0044).

Введение

На данный момент одним из наиболее распространенных методов демодуляции сигнала для волоконно-оптических датчиков интерференционного типа является метод гомодинной демодуляции (phase-generated carrier homodyne demodulation technique) на основе перекрестного перемножения [1–3]. Он получил широкое распространение благодаря двум своим особенностям: метод не требует использования петли обратной связи, а выходной сигнал схемы обработки не зависит от положения рабочей точки интерферометра [4]. В последнее время этот метод был усовершенствован схемой на основе вычисления арктангенса [5]. Схема была разработана для снижения влияния мощности оптического излучения на амплитуду выходного сигнала схемы демодуляции. Известно, что корректная работа алгоритма демодуляции сигналов на основе вычисления значений функции арктангенса возможна лишь при оптимальных значениях глубины фазовой модуляции или значениях, близких к ним [6]. Однако существует проблема температурной зависимости масштабного коэффициента модулятора, вследствие чего изменяется глубина фазовой модуляции, и измеряемый сигнал восстанавливается некорректно. Существует метод устранения зависимости выходного сигнала от глубины модуляции, описанный в [7], однако метод работает в малом диапазоне возможных значений глубины модуляции от 1,5 до 3,5 рад, к тому же сложен для реализации на программируемой логической интегральной схеме [8]. В настоящей работе предложен метод компенсации температурной зависимости выходного сигнала путем подстройки глубины фазовой модуляции и введения обратной связи.

Принципиальная схема гомодинной демодуляции на основе вычисления арктангенса

Рассматриваемая схема хорошо известна и описана в ряде работ [5, 8, 9]. Согласно этим работам, на выходе фотоприемника схемы, приведенной на рис. 1, получим интерференционный сигнал, описываемый следующей формулой:

$$I(t) = A + B\cos[C\cos(\omega_0 t) + D\cos(\omega_0 t) + \varphi_0],$$

где A – постоянная составляющая; B – размах интерференционного сигнала; C – глубина фазовой модуляции; D – амплитуда измеряемого фазового сигнала; ω_0 – частота сигнала модуляции; φ_0 – фаза, обусловленная положением рабочей точки интерферометра; t – время.

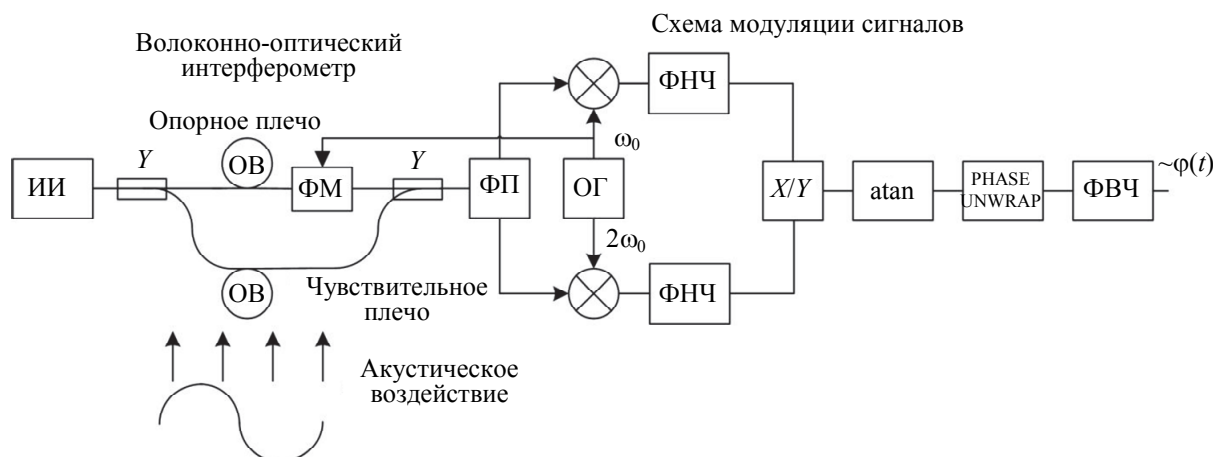


Рис. 1. Принципиальная схема гомодинной демодуляции на основе вычисления арктангенса: ИИ – источник излучения; Y – Y-разветвитель; ОВ – оптическое волокно; ФМ – фазовый модулятор; ФП – фотоприемник; ОГ – опорный генератор; ФНЧ – фильтр низких частот; X/Y – блок деления; atan – блок вычисления значений функции арктангенса; PHASE UNWRAP – блок доворачивания фазы; ФВЧ – фильтр высоких частот; X – перемножитель

Сигналы на выходах ФНЧ находятся следующим образом:

$$S_1(t) = -BJ_1(C)\sin(\varphi(t)),$$

$$S_2(t) = -BJ_2(C)\cos(\varphi(t)).$$

Тогда выходной сигнал схемы есть

$$S_{\text{вых}}(t) \sim \arctan \left(\frac{J_1(C)}{J_2(C)} \tan(\varphi(t)) \right), \quad (1)$$

где $J_1(C)$ и $J_2(C)$ – функции Бесселя [10] первого рода первого и второго порядка соответственно; $\varphi(t)$ – измеряемый фазовый сигнал.

Если рассмотреть зависимость выходного сигнала схемы гомодинной демодуляции от глубины фазовой модуляции, то, согласно выражению (1), она определяется отношением функций Бесселя первого и второго порядка от глубины фазовой модуляции. График зависимости значения отношения $J_1(C)/J_2(C)$ от глубины фазовой модуляции представлен на рис. 2.

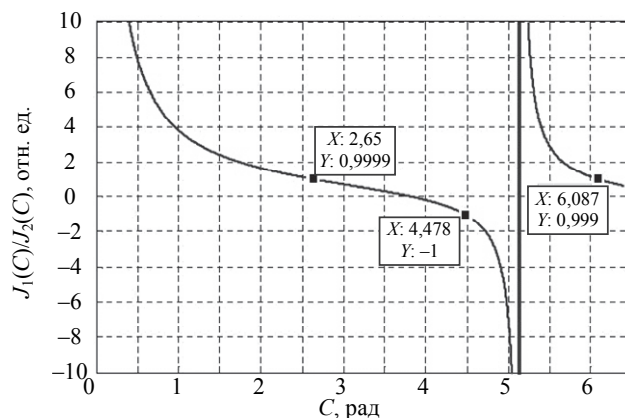


Рис. 2. Зависимость отношения $J_1(C)/J_2(C)$ от глубины фазовой модуляции

Согласно рис. 2, отношение функций Бесселя первого и второго порядка от глубины фазовой модуляции равно единице по модулю при определенных значениях глубины фазовой модуляции: 2,63 рад, 4,478 рад и 6,087 рад на промежутке $[0, 2\pi]$. При этих значениях глубины фазовой модуляции сигнал на выходе схемы демодуляции будет равен измеряемому фазовому сигналу без искажений [11], т.е. его амплитуда не будет зависеть от рабочей точки интерферометра. В качестве такого оптимального значения глубины модуляции выбрано наименьшее подходящее значение $C = 2,63$ рад [12].

При настройке цифровой схемы обработки значение глубины модуляции подбирается как значение в отсчетах шкалы цифроаналогового преобразователя в зависимости от коэффициента соответствия подаваемого на модулятор напряжения вносимому в сигнал сдвигу фазы. Однако со временем от температуры данное соответствие, называемое масштабным коэффициентом модулятора, нарушается [13, 14], и необходимо подстраивать значение глубины модуляции.

Алгоритм автоматической подстройки глубины модуляции

Для автоматической подстройки глубины модуляции предлагается использовать дополнительные гармоники модулирующего сигнала. Далее будет показано, как отношение четных либо нечетных гармоник может служить критерием ошибки в используемом значении глубины модуляции. Для реализации автоматической подстройки добавим в схему обработки умножение интерферометрического сигнала на третью гармонику сигнала модуляции.

На рис. 3 показана модифицированная принципиальная схема гомодинной демодуляции с аналогичной ветвью для третьей гармоники с множителем и ФНЧ 3, блоком деления первой гармоники на третью X/Y и блоком modul depth corr , в котором происходит вычисление сигнала обратной связи и скорректированной величины глубины модуляции. Учитывая скорректированное значение глубины модуляции, сигнал модуляции поступает на цифроаналоговый преобразователь (digital analog converter) (To DAC).

Получим следующее выражение для выходного сигнала с ФНЧ 3:

$$S_3(t) = B J_3(C) \sin(\varphi(t)).$$

Рассмотрим отношение сигналов S_1 и S_3 :

$$E_{13} = S_1(t)/S_3(t) = -J_1(C)/J_3(C).$$

Как видно из рис. 4, оптимальному значению глубины модуляции $C = 2,632$ рад соответствует отношение функций Бесселя первого и третьего порядка $E'_{13} = -1,914$. Примем это значение E_{13} за оптимальное. Тогда в алгоритме демодуляции отклонение полученного значения E_{13} от оптимального E'_{13} может служить сигналом обратной связи Δ_{oc} для автоматической подстройки глубины модуляции:

$$\Delta_{oc} = k_{oc}(E_{13} - E'_{13}),$$

где k_{oc} – коэффициент обратной связи.

Однако в моменты, когда значение третьей гармоники выходного сигнала S_3 близко к нулю, в сигнале E_{13} будут наблюдаться выбросы, соответствующие моментам деления на число, близкое к нулю. На рис. 5, а, показана третья гармоника S_3 . На рис. 5, б, показан сигнал обратной связи Δ_{oc} с выбросами.

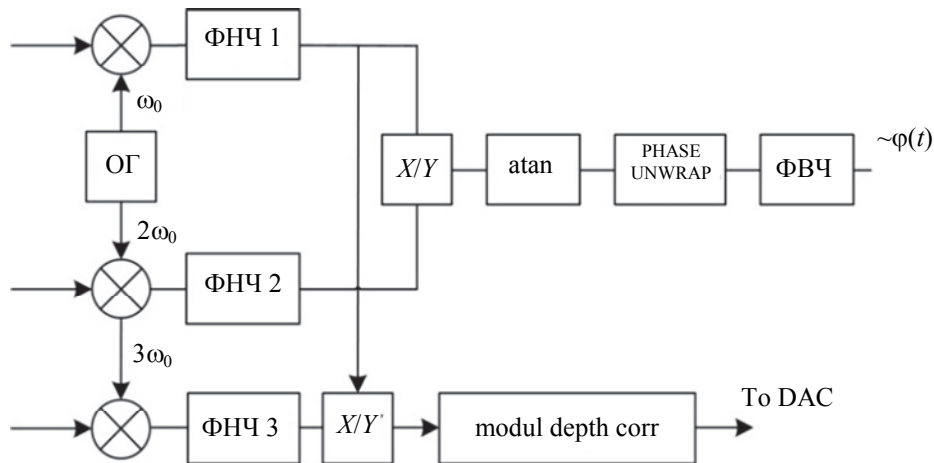


Рис. 3. Модифицированная принципиальная схема гомодинной демодуляции для реализации алгоритма автоматической подстройки глубины модуляции

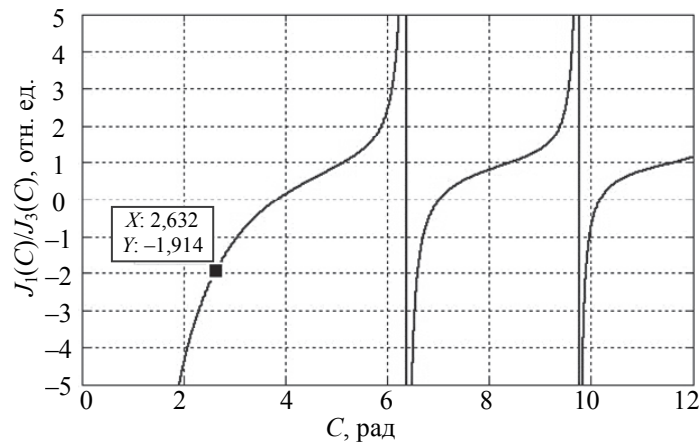


Рис. 4. Зависимость отношения $J_1(C)/J_3(C)$ от глубины фазовой модуляции C

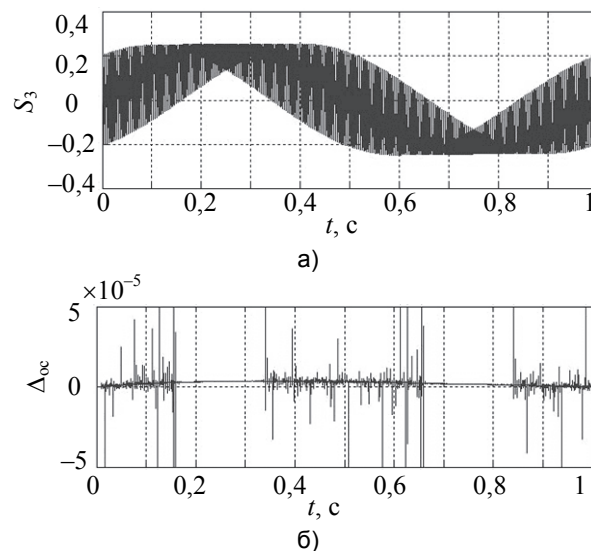


Рис. 5. Зависимость сигнала S_3 (а) и сигнала обратной связи Δ_{oc} (б) от времени t

Для устранения выбросов в сигнале обратной связи предлагается следующий алгоритм. Необходимо добавить в схему гомодинной демодуляции умножение интерферометрического сигнала на четвертую гармонику сигнала модуляции. На выходе соответствующего перемножителя и ФНЧ, аналогично другим гармоникам, получим сигнал вида

$$S_4(t) = BJ_4(C) \cos(\varphi(t)).$$

Аналогично операциям с третьей гармоникой, получим оптимальный коэффициент E'_{24} , равный отношению J_2 и J_4 , и соответствующий оптимальному значению глубины модуляции C :

$$E'_{24} = S_2(t)/S_4(t) = -J_2(C)/J_4(C).$$

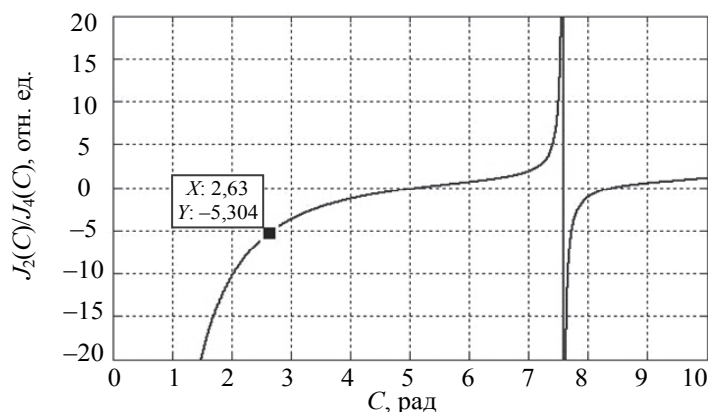


Рис. 6. График зависимости отношения $J_2(C)/J_4(C)$ от глубины модуляции C

Из рис. 6 видно, что оптимальному значению глубины модуляции $C = 2,63$ рад соответствует отношение функций Бесселя второго и четвертого порядка $E'_{24} = -5,304$. Примем это значение E'_{24} за оптимальное. Тогда отклонение полученного значения E_{24} от оптимального E'_{24} может служить сигналом обратной связи для автоматической подстройки глубины модуляции.

Проблема выбросов в сигнале обратной связи решается следующим образом. Учитывая, что третья и четвертая гармоники выходного сигнала S_3 и S_4 изменяются соответственно по закону синуса и косинуса, в моменты выбросов в сигнале E_{13} , сигналом обратной связи может служить сигнал E_{24} , и наоборот. Назовем момент смены сигналов E_{13} и E_{24} для использования в цепи обратной связи моментом перехода. Для определения момента перехода вводится минимальное пороговое значение для сигналов S_3 и S_4 . Если значение сигнала, используемого в данный момент в цепи обратной связи, становится меньше порогового, то на следующем шаге алгоритма обработки сигнал для обратной связи сменяется другим. На рис. 7, а, б, показаны сигналы S_3 и S_4 соответственно. На рис. 7, в, показано, что при описанном алгоритме в сигнале обратной связи выбросы исчезают по сравнению с сигналом обратной связи на рис. 5, б. На рис. 7, г, крупным планом показано, что даже в момент, когда оба сигнала колеблются около нуля, если S_3 близок к нулю, то S_4 принимает ненулевые значения, и наоборот.

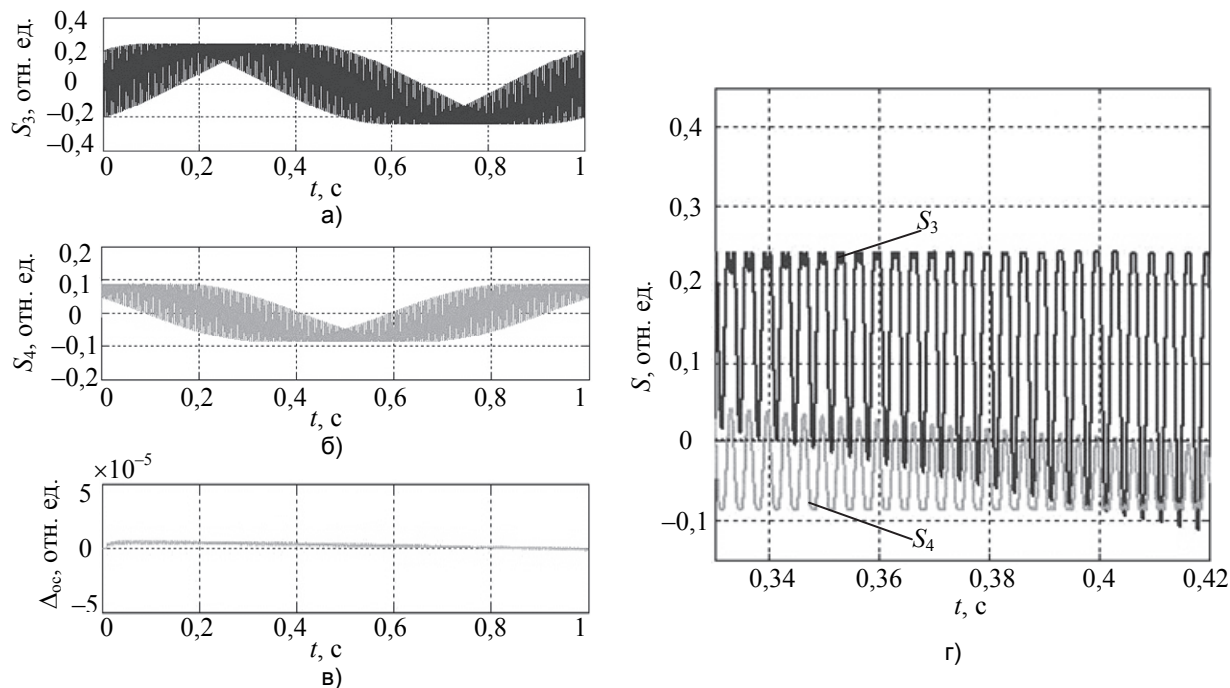


Рис. 7. Зависимости сигналов: S_3 (а), S_4 (б) и сигнала обратной связи Δ_{oc} (в) от времени t ; зависимость сигналов S_3 и S_4 от времени t (крупным планом) (г)

Тем не менее, полученный сигнал обратной связи требует низкочастотной фильтрации, однако она может быть обеспечена фильтром с бесконечной импульсной характеристикой [15] маленького порядка.

Сравнение алгоритмов без применения и с применением предложенного метода

Для подтверждения работоспособности предложенного метода сравним алгоритмы гомодинной демодуляции без применения описанного метода и с применением. Предположим, что изменение температуры повлекло изменение масштабного коэффициента модулятора, что привело к отклонению значения глубины модуляции от оптимального. В модель MATLAB была внесена зависимость, которая изменяет значение глубины модуляции, как на красном графике на рис. 8, а. Вследствие такого отклонения глубины модуляции от оптимального значения выходной сигнал алгоритма вычисляется с ошибкой по амплитуде относительно реального измеряемого сигнала. Сравнение выходного и реального сигналов в алгоритме без подстройки глубины модуляции показано на рис. 8, б. Из рис. 8, а, б, можно сделать вывод, что амплитуда выходного сигнала A зависит от глубины модуляции. Рассмотрим алгоритм с подстройкой глубины модуляции при тех же условиях влияния температуры на масштабный коэффициент модулятора. В предложенном алгоритме с помощью петли обратной связи амплитуда модулирующего напряжения подстраивается таким образом, что глубина модуляции принимает оптимальное значение. Подстройка значения глубины модуляции показана синим цветом на рис. 8, а. Таким образом, достигается компенсация температурной зависимости выходного сигнала алгоритма демодуляции, и выходной сигнал соответствует реальному сигналу. Сравнение выходного и реального сигналов в алгоритме с подстройкой глубины модуляции показано на рис. 8, в.

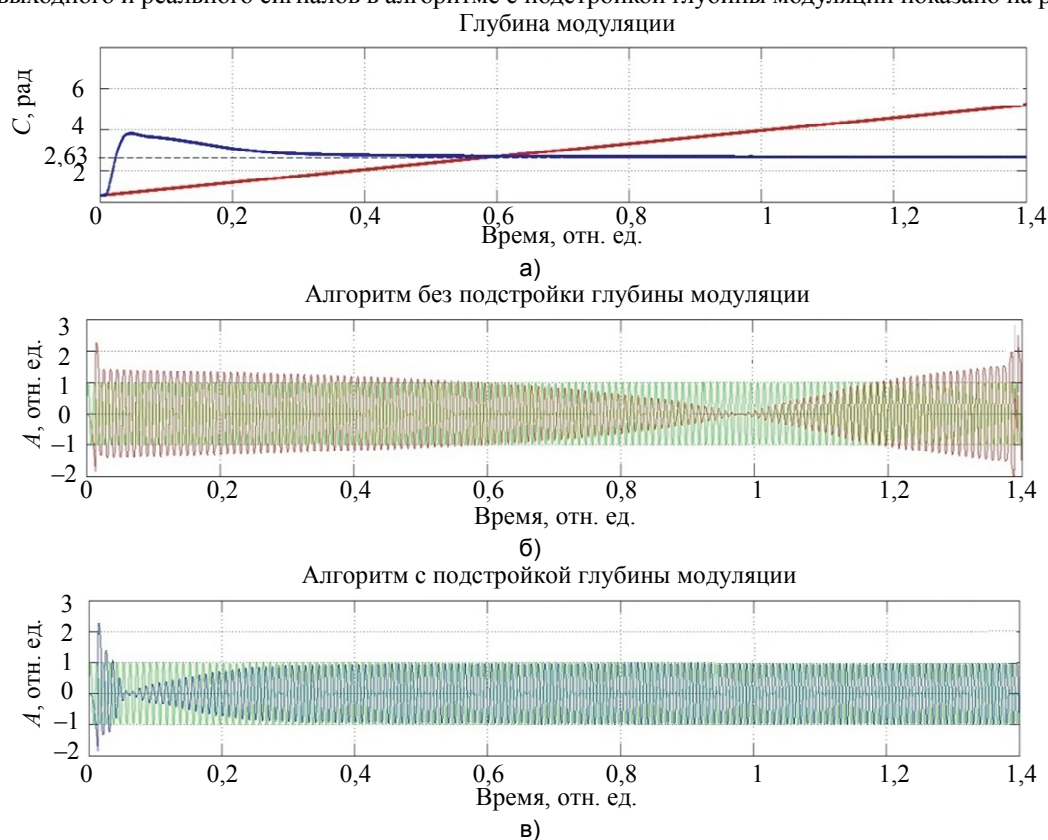


Рис. 8. Значение глубины модуляции C без алгоритма подстройки (красный цвет) и с алгоритмом подстройки (синий цвет) (а); реальный (зеленый цвет) и выходной (красный цвет) сигналы в алгоритме без подстройки глубины модуляции (б); реальный (зеленый цвет) и выходной (синий цвет) сигналы в алгоритме с подстройкой глубины модуляции (в)

Заключение

Предложенная модифицированная схема гомодинного приема сигнала фазовых волоконно-оптических датчиков позволяет реализовать автоматическую подстройку глубины модуляции и тем самым компенсировать температурную зависимость выходного сигнала схемы. Работоспособность описанного метода компенсации температурной зависимости выходного сигнала была подтверждена путем моделирования в пакете MATLAB [16]. В ходе моделирования было произведено сравнение алгоритмов демодуляции без применения предложенного метода и с ним. Сравнение показало, что за счет подстройки значения глубины модуляции обеспечивается компенсация температурной зависимости амплитуды выходного сигнала, что позволяет более точно восстанавливать измеряемый сигнал.

References

1. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique. *Advances in Optical Technologies*, 2014, art. 815108. doi: 10.1155/2014/815108

2. Dandridge A., Tveten A.B., Gialloronzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 18, no. 10, pp. 1647–1653.
3. Plotnikov M., Kulikov A., Strigalev V. Issledovanie zavisimosti amplitudy vykhodnogo signala v skheme gomodinnoi demodulyatsii dlya fazovogo volokonno-opticheskogo datchika [Optical technologies investigation of output signal amplitude dependence in homodyne demodulation scheme for phase fiber-optic sensor]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 18–22.
4. Azmi A.I., Leung I., Chen X., Zhou S., Zhu Q., Gao K., Childs P., Peng G. Fiber laser based hydrophone systems. *Photonic Sensors*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 210–221. doi: 10.1007/s13320-011-0018-3
5. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2006, vol. 6292, art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
6. Plotnikov M.Yu. *Volokonno-Opticheskii Gidrofon. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* [Fiber-Optic Hydrophone. Thesis eng. sci. diss.]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2014, 23 p.
7. Yang X., Chen Z., Ng J.H., Pallayil V., Unnikrishnan K.C. A PGC demodulation based on differential-cross-multiplying (DCM) and arctangent (ATAN) algorithm with low harmonic distortion and high stability. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, vol. 8421, art. 84215J. doi: 10.1117/12.974939.
8. Tarasov I.E. *Razrabotka Tsifrovyykh Ustroystv na Osnove PLIS Xilinx s Primeneniem Yazyka VHDL* [Development of Digital Devices Based on Xilinx FPGAs Using VHDL language]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ., 2005, 252 p.
9. Liao F., Zhang M., Wang L., Liao Y. The noise analysis and digital realization of arctangent approach of PGC demodulation for optic interferometric sensors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2007, vol. 6595, art. 65954A. doi: 10.1117/12.726512
10. Watson G.N. *A Treatise on the Theory of Bessel Functions*. Cambridge, Cambridge University Press, 1922, 812 p.
11. Volkov A.V., Oskolkova E.S., Plotnikov M.Yu. Modelirovanie i issledovanie algoritmov demodulyatsii signalov volokonno-opticheskikh interferometricheskikh datchikov [Modeling and analysis of algorithms for demodulation of interferometric fiber optic sensors]. *Sbornik Tezisov Dokladov III Kongressa Molodykh Uchenykh, vyp. 4* [Proc. III Congress of Young Scientists, vol. 4]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2014, pp. 364–365.
12. Bush J., Suh K. Fiber Fizeau interferometer for remote passive sensing. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, vol. 8370, art. 83700S. doi: 10.1117/12.921010
13. Miroshnichenko G., Deyneka I., Pogorelaya D., Shuklin F., Smolovik M. Sposob izmereniya fazy interferometricheskogo signala [Method of interferometer signal phase measurement]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 61–67.
14. Plotnikov M.Yu., Deyneka I.G., Sharkov I.A. Modifikatsiya skhemy obrabotki dannykh fazovogo interferometricheskogo akusticheskogo datchika [Data processing scheme modification for phase interferometric acoustic sensor]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 5 (81), pp. 20–25.
15. Smith S.W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed. California Technical Publishing, 1999, 650 p.
16. Ingle V.K., Proakis J.G. *Digital Signal Processing Using MATLAB*. 3rd ed. CL-Engineering, 2011, 672 p.

Мехреньгин Михаил Викторович	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mehrengin@mail.ru
Киреев Александр Юрьевич	– инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alexkir49@gmail.com
Погорелая Дарья Андреевна	– инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, pdaria@mail.ru
Плотников Михаил Юрьевич	– ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, plotnikov-michael@yandex.ru
Шуклин Филипп Александрович	– ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, shuklin.philipp@gmail.ru
Mikhail V. Mekhrengin	– engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mehrengin@mail.ru
Alexander Yu. Kireenkov	– engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alexkir49@gmail.com
Daria A. Pogorelaya	– engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, pdaria@mail.ru
Mikhail Yu. Plotnikov	– assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, plotnikov-michael@yandex.ru
Philipp A. Shuklin	– assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, shuklin.philipp@gmail.ru