

УДК 681.787

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

А.С. Алейник^а, С.А. Волковский^а, М.В. Михеев^а, А.Н. Никитенко^а, М.Ю. Плотников^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: a.n.nikitenko.1@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.03.16, принята к печати 22.04.16
doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-436-444

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Алейник А.С., Волковский С.А. Михеев, М.В., Никитенко А.Н., Плотников М.Ю. Метод определения масштабного коэффициента электрооптического модулятора волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 436–444. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-436-444

Аннотация

Предмет исследования. Предложен метод динамического определения полуволнового напряжения электрооптического модулятора в составе волоконно-оптического гироскопа. Исключение влияния действующего на прибор углового ускорения при измерении значения электрооптического коэффициента достигается за счет использования метода гомодинной демодуляции, позволяющего произвести разделение сигнала фазового сдвига Саньяка и вспомогательного сигнала для измерения электрооптического коэффициента фазового модулятора в частотной области. **Метод.** Сущность метода сводится к разбиению шага цифровой модуляции волоконно-оптического модулятора на две составляющие длительностью в половину шага цифровой серродинной модуляции каждая. Первая составляющая используется для квадратурной сдвигающей модуляции. Вторая составляющая содержит отсчеты вспомогательного сигнала, используемого для определения значения масштабного коэффициента модулятора. Моделирование выполнено как в самостоятельной обособленной модели, так и в составе общей модели гироскопа. Исследована применимость предлагаемого метода, его качественные и количественные характеристики – абсолютная и относительная точность определения электрооптического коэффициента. Исследована устойчивость метода к воздействию угловых скоростей и ускорений и воздействию шумов в реальных приборах. **Основные результаты.** Проведенное моделирование показало возможность измерения быстро изменяющейся угловой скорости и одновременного измерения электрооптического коэффициента фазового модулятора без взаимовлияния между этими процессами. **Практическая значимость.** Показанная в работе возможность исключения влияния углового ускорения на точность измерения электрооптического коэффициента фазового модулятора позволит реализовывать точные измерительные алгоритмы для волоконно-оптических гироскопов, устойчивые к значительным ускорениям, имеющим место в реальных приборах.

Ключевые слова

волоконно-оптический гироскоп, фазовый электрооптический модулятор, гомодинная демодуляция, обратная связь, гармоническая функция

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57815X0109, Соглашение № 14.578.21.0109).

SCALE FACTOR DETERMINATION METHOD OF ELECTRO-OPTICAL MODULATOR IN FIBER-OPTIC GYROSCOPE

A.S. Aleynik^а, S.A. Volkovskiy^а, M.V. Mikheev^а, A.N. Nikitenko^а, M.Yu. Plotnikov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: a.n.nikitenko.1@gmail.com

Article info

Received 28.03.16, accepted 22.04.16
doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-436-444
Article in Russian

For citation: Aleynik A.S., Volkovskiy S.A., Mikheev M.V., Nikitenko A.N., Plotnikov M.Yu. Scale factor determination method of electro-optical modulator in fiber-optic gyroscope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 436–444. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-436-444

Abstract

Subject of Research. We propose a method for dynamic measurement of half-wave voltage of electro-optic modulator as part of a fiber optic gyroscope. Excluding the impact of the angular acceleration on measurement of the electro-optical coefficient is achieved through the use of homodyne demodulation method that allows a division of the Sagnac phase shift signal and an auxiliary signal for measuring the electro-optical coefficient in the frequency domain. **Method.** The method essence reduces to decomposition of step of digital serrodyne modulation in two parts with equal duration. The first part is used for quadrature modulation signals. The second part comprises samples of the auxiliary signal used to determine the value of the scale factor of the modulator. Modeling is done in standalone model, and as part of a general model of the gyroscope. The applicability of the proposed method is investigated as well as its qualitative and quantitative characteristics: absolute and relative accuracy of the electro-optic coefficient, the stability of the method to the effects of angular velocities and accelerations, method resistance to noise in actual devices. **Main Results.** The simulation has showed the ability to measure angular velocity changing under the influence of angular acceleration, acting on the device, and simultaneous measurement of electro-optical coefficient of the phase modulator without interference between these processes. **Practical Relevance.** Featured in the paper the ability to eliminate the influence of the angular acceleration on the measurement accuracy of the electro-optical coefficient of the phase modulator will allow implementing accurate measurement algorithms for fiber optic gyroscopes resistant to a significant acceleration in real devices.

Keywords

fiber optic gyro, phase electro-optic modulator, homodyne demodulation, feedback, harmonic analysis

Acknowledgements

This work was performed at ITMO University with the financial supporting by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (unique project ID: RFMEFI57815X0109, Agreement No 14.578.21.0109).

Введение

Непрерывный прогресс в области волоконной и интегральной оптики на протяжении последних нескольких десятилетий, во многом стимулируемый нуждами телекоммуникационной промышленности, привел к значительному развитию волоконно-оптических датчиков и, в частности, значительному улучшению точностных характеристик волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), применяемых при построении различных систем навигации и стабилизации. К основным достоинствам гироскопов указанного типа можно отнести отсутствие движущихся частей, большой срок службы, высокую чувствительность. Использование более совершенных оптических и электронных компонентов позволило повысить класс точности ВОГ, переведя их из класса из средней точности в класс датчиков навигационной точности (0,01 град/ч–0,001 град/ч).

ВОГ является датчиком угловой скорости интерферометрического типа, основанным на эффекте Саньяка. С общей схемой устройства и принципами его работы можно ознакомиться в [1]. Взаимосвязь между измеряемой угловой скоростью $\Omega(t)$ и выходным сигналом $f(t)$ для ВОГ с закрытым контуром, использующего цифровую серродинную модуляцию, показана в формуле (1) [2]:

$$f(t) = K_{SF} \Omega(t), \tag{1}$$

где K_{SF} – масштабный коэффициент (МК) ВОГ, определяемый по формуле (2):

$$K_{SF} = - \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \frac{1}{K_{EO} V_{p-p}^{DR} \tau}, \tag{2}$$

где L – длина волоконного контура (м); D – диаметр катушки (м); λ – длина волны источника излучения (м); c – скорость света (м/с); K_{EO} – МК электрооптического (ЭО) модулятора (рад/В); V_{p-p}^{DR} – размах сигнала цифровой модуляции (В); τ – длительность шага цифровой серродинной модуляции.

Различные внешние воздействия (нестационарные температурные поля, акустические шумы и вибрации, переменные электрические и магнитные поля и т.д.) приводят к изменению параметров, указанных в (2), и, как следствие, к динамическому изменению МК ВОГ, что вызывает снижение точности измерения угловой скорости. В частности, снижение точности измерения ВОГ связано с изменением МК ЭО-модулятора K_{EO} , вызванным тепловым воздействием или влиянием старения модулятора. Настоящая работа посвящена разработке и моделированию нового метода динамического определения в ВОГ коэффициента K_{EO} . Стоит отметить, что на данный момент существует ряд методов для динамического определения коэффициента K_{EO} [1, 3, 4], обладающих общим недостатком – точность измерения этих методов ограничена диапазоном возможных угловых ускорений из-за того, что в момент измерения ЭО коэффициента K_{EO} возникает ошибка, вызванная изменением угловой скорости на интервале измерения.

С точки зрения практической значимости большим удобством использования в обработке ВОГ по сравнению с коэффициентом K_{EO} обладает величина $U_{2\pi}$ (в дальнейшем также – коэффициент), соответствующая напряжению на модуляторе, приводящему к возникновению фазового сдвига в 2π радиан.

В работе предлагается использование метода гомодинной демодуляции (ГД) сигналов, традиционно используемого в гидроакустических приборах, для преодоления указанного недостатка путем разделения сигнала фазового сдвига Саньяка, пропорционального угловой скорости, и вспомогательного сигнала для измерения коэффициента $U_{2\pi}$ в частотной области. Обзор применения метода ГД в области гидроакустики приведен в следующем разделе работы.

Обзор применения методов гомодинной демодуляции в гидроакустике

Метод ГД на основе перекрестного перемножения [5–7] 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 [8]. Для устранения влияния мощности оптического излучения на амплитуду выходного сигнала указанный метод был модифицирован в соответствии со схемой вычисления значения функции арктангенса [9]. Общая схема этого алгоритма демодуляции сигналов приведена на рис. 1.

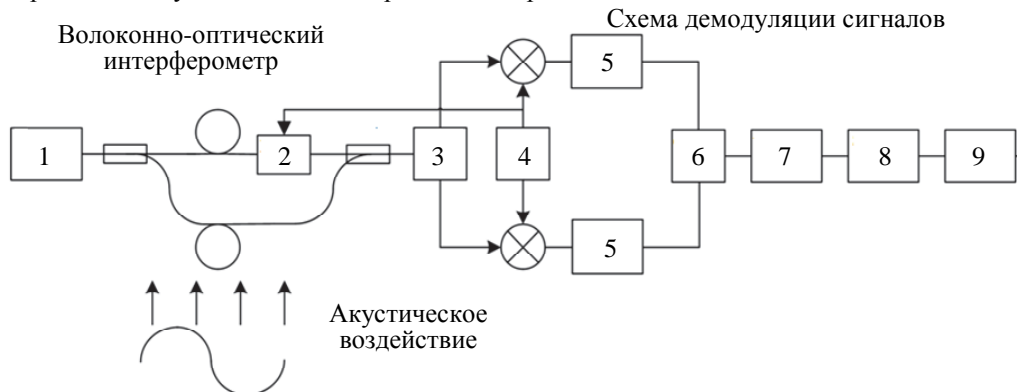


Рис. 1. Общая схема рассматриваемого алгоритма гомодинной демодуляции

Оптическое излучение, испускаемое источником 1, разделяется в оптическом разветвителе Y и попадает в два плеча интерферометра – чувствительное и опорное. В опорном плече оптическое излучение проходит через фазовый модулятор 2 и попадает на второй оптический разветвитель Y , где интерферирует с оптическим излучением, прошедшим через чувствительное плечо интерферометра, после чего интенсивность сигнала интерференции регистрируется на фотоприемном устройстве 3. Сигнал интерференции $I(t)$ представлен формулой (3):

$$I(t) = A + B \cos(C \cos(2\pi f_0 t) + \varphi_s(t) + \varphi_0(t)), \tag{3}$$

где A – постоянный уровень оптического сигнала; B – видность интерференционной картины; $\varphi_s(t)$ – измеряемый фазовый сигнал; $\varphi_0(t)$ – паразитный дрейф рабочей точки; $C \cos(2\pi f_0 t)$ – модулирующая гармоническая функция с частотой f_0 и амплитудой C . Величину C в рамках указанного метода называют глубиной модуляции.

Интерференционный сигнал является полигармоническим и состоит из отдельных компонент – гармоник частоты модуляции f_0 . Выделение амплитуды гармоник производится при помощи перемножения сфазированной с интерферометрическим сигналом гармонической функции с опорного генератора 4, имеющей ту же частоту, что и выделяемая гармоника, и последующей фильтрации в области низких частот фильтром 5.

Результат деления амплитуд первой и второй гармоник с блока 6 поступает на блок вычисления арктангенса 7. Выходное значение сигнала с блока 7 представлено в формуле (4):

$$S_7(t) = \operatorname{atan} \frac{-BJ_1(C) \sin \varphi(t)}{-BJ_2(C) \cos \varphi(t)}, \tag{4}$$

где $J_1(C)$ и $J_2(C)$ – функции Бесселя первого рода от глубины фазовой модуляции C . Когда глубина модуляции C стремится к своему оптимальному значению $C_{opt} \approx 2,63$ радиана, $J_1(C)$ стремится к $J_2(C)$, и значение сигнала $S_7(t)$ стремится к $\varphi(t)$ соответственно. Зависимость от видности B , как видно из формулы, сокращается. Далее следуют операции устранения скачков фазового сигнала в блоке 8 и высокочастотной фильтрации в блоке 9 с целью исключения паразитных дрейфов рабочей точки. Сигнал на выходе блока 9 является измеряемым фазовым сигналом $\varphi_s(t)$.

Обозначенная во введении проблема зависимости МК ЭО от температуры приводит к нежелательным изменениям глубины модуляции C в описанном методе, что, в свою очередь, вызывает искажения при восстановлении сигнала. Существуют методы устранения зависимости выходного сигнала от глубины фазовой модуляции, описанные в работах [10–16]. Рассматривая эти методы применительно к реализации в реальном приборе, можно выделить два недостатка – использование операции дифференцирования, что приводит к усилению шума на высоких частотах [17], и чрезмерную усложненность алгоритма, затрудняющего его реализацию на цифровом вычислителе. В работе [18] предложен метод компенсации температурной зависимости выходного сигнала путем подстройки глубины фазовой модуляции с использованием сигнала обратной связи, переключаемого между двумя вспомогательными сигналами, зависящими от положения рабочей точки по синусу и косинусу соответственно. Использование абсолютного по величине порогового значения как критерия переключения делает метод неустойчивым к изменению

уровня шумов в схеме. В настоящей работе предлагается метод определения масштабного коэффициента ЭО-модулятора в ВОГ, использующий схему ГД, стабилизированную устойчивой к шумам обратной связью по значению глубины фазовой модуляции.

Применение гомодинной демодуляции в ВОГ

Использование предлагаемого метода в составе ВОГ возможно при применении мультиплексирования по времени, что позволяет создать внутри работающего прибора еще один, на котором одновременно с измерением угловой скорости производится определение масштабного коэффициента модулятора. Суть метода сводится к разбиению шага цифровой модуляции ВОГ на две части длительностью $\tau/2$ каждая, где τ – время обхода оптоволоконного контура, первая из которых используется для квадратурной сдвигающей модуляции, совмещенной с пилообразным сигналом компенсации фазы Саньяка (при помощи этих сигналов происходит определение угловой скорости вращения гироскопа), а во второй находятся отсчеты вспомогательного сигнала, используемого для определения коэффициента $U_{2\pi}$ [1]. Применительно к предлагаемому методу во второй части располагается гармонический сигнал. На рис. 2 приводится схема описанного выше сигнала модуляции ВОГ с некоторыми упрощениями для большей наглядности – в первой половине шага цифровой модуляции заключен только сигнал квадратурной сдвигающей модуляции.

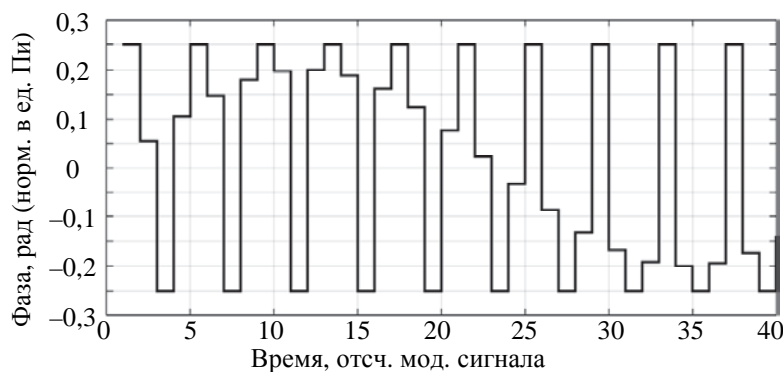


Рис. 2. Фрагмент модулирующего сигнала волоконно-оптического гироскопа

Единицы измерения на рис. 2: по горизонтальной оси – время в отсчетах модулирующего сигнала, по вертикальной оси – фаза в радианах, нормированная в единицах Пи (например, фазе в $\pi/4$ радиана соответствует обозначение 0,25).

В дальнейшем (если нет специальных замечаний) под исходным сигналом S_{source} с частотой f_0 и амплитудой C' подразумеваются дискретные отсчеты, содержащиеся во второй половине шага цифровой модуляции ВОГ, под сигналом модуляции S_{mod} – дискретные отсчеты, содержащиеся во второй половине шага фазоразностного сигнала, участвующего в интерференции.

Использование исходного сигнала S_{source} с относительно низкой частотой, подобного приведенному на рис. 2, неэффективно, так как амплитуда получаемого сигнала модуляции S_{mod} будет мала. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Так как катушка ВОГ является линией задержки длительностью τ [1], сигнал модуляции S_{mod} формируется вычитанием сигнала S_{source} из самого себя со сдвигом в τ (формулы (5)–(8):

$$S_{mod}(t) = S_{source}(t) - S_{source}(t - \tau) = C' \cos(2\pi f_0 t) - C' \cos(2\pi f_0 (t - \tau)), \quad (5)$$

$$S_{mod}(t) = -2C' \sin(2\pi f_0 \tau) \sin(2\pi f_0 t - \pi f_0 \tau), \quad (6)$$

$$S_{mod}(t) = -C \sin\left(2\pi f_0 \left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right), \quad (7)$$

$$C = 2C' \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_0}{f_{2\tau}}\right), \quad (8)$$

где $f_{2\tau} = 1/2\tau$ – собственная частота гироскопа. Зависимость амплитуды C сигнала модуляции S_{mod} от амплитуды C' и частоты f_0 исходного сигнала S_{source} (8) приведена на рис. 3, а.

Согласно формуле (8), в районе собственной частоты гироскопа $f_{2\tau}$ наблюдается приближение значения C к $2C'$, в районе же нулевой частоты C стремится к 0, что позволяет сделать вывод о целесообразности использования исходного сигнала с частотой в районе собственной частоты гироскопа $f_{2\tau}$. Следует отметить, что при работе в дискретной системе получение сигнала на частоте, близкой к собственной частоте ВОГ (рис. 3, б), возможно из относительно низкочастотного сигнала (рис. 3, в, $f_0 = 0,03$) путем его гетеродинирования (перемножения) с собственной частотой гироскопа $f_{2\tau} = 0,5$ (сигнал, которой в дискретной форме представляет собой масштабированную последовательность отсчетов +1, -1, +1, -1, ...; рис. 3, г) [19].

Общая схема применения ГД в ВОГ приведена на рис. 4.

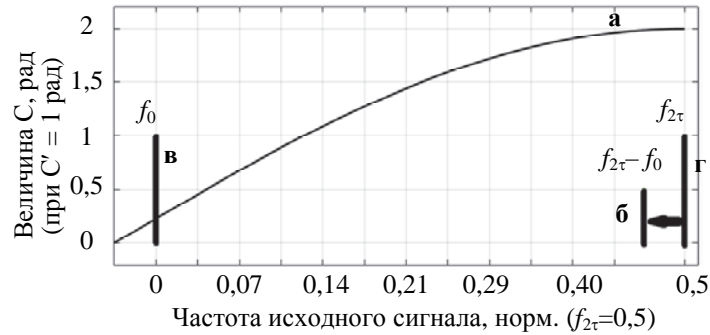


Рис. 3. Зависимость глубины модуляции от амплитуды исходного сигнала (а) и способ формирования сигнала модуляции (б) с частотой в районе собственной частоты волоконно-оптического гироскопа (в) из относительно низкочастотного сигнала (г)

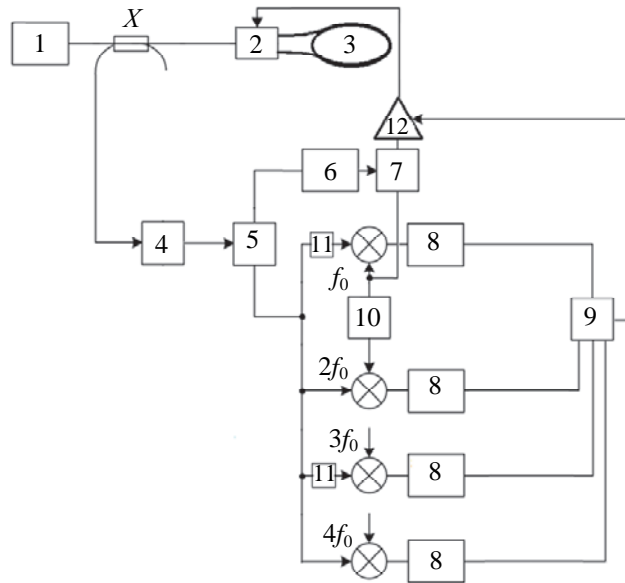


Рис. 4. Общая схема использования гомодинной демодуляции в волоконно-оптическом гироскопе

Оптическое излучение, испускаемое источником 1, разделяется на разветвителе X и проходит через многофункциональную интегрально-оптическую схему (МИОС) 2, где осуществляются его фазовая модуляция и разделение светового пучка на две составляющие, распространяющиеся навстречу друг другу в катушке из оптического волокна 3. Разность фаз двух встречно распространяемых оптических пучков зависит от угловой скорости вращения прибора в соответствии с эффектом Саньяка. Распространение света в обратном направлении происходит через МИОС 2, где он подвергается дополнительной фазовой модуляции, после чего через разветвитель X попадает на фотоприемное устройство 4. Сигнал с фотоприемного устройства демультиплексируется по времени в блоке 5. Интерферометрический отклик на сигнал, содержащий в себе квадратурную сдвигающую модуляцию, совмещенную с пилообразным сигналом компенсации фазы Саньяка, подается на блок 6 с целью определения текущего значения угловой скорости и формирования сигналов, используемых для замыкания контура обратной связи. Далее сформированные сигналы мультиплексируются по времени в блоке 7 с отсчетами дополнительного гармонического сигнала S_{source} с частотой f_0 и амплитудой C' с опорного генератора 10, используемого в дальнейшем для определения МК ЭО-модулятора в составе МИОС 3. Кроме того, отсчеты сигнала S_{source} в блоке 7 перемножаются с дискретным сигналом на собственной частоте ВОГ для переноса в более благоприятную частотную область (рис. 3). Интерферометрический отклик на сигнал S_{mod} (формула (9)), получаемый в фазоразностном сигнале из сигнала S_{source} , демодулируется (перемножение и низкочастотная фильтрация в блоках 8) с целью выделения амплитуд первых четырех гармоник:

$$I(t) = A + B \cos(C \cos(2\pi(f_{2\tau} - f_0)t) + \Delta\varphi_R(t) + \varphi_d(t)), \quad (9)$$

где $\Delta\varphi_R(t)$ – фазовый сдвиг Саньяка; $\varphi_d(t)$ – дрейфовая составляющая в сигнале.

При выделении амплитуд нечетных гармоник соответствующий демультиплексированный интерферометрический отклик также перемножается с дискретным сигналом на собственной частоте ВОГ для разворота дискретного спектра (блок 11). Полученный набор амплитуд гармоник выступает в качестве набора входных сигналов для блока регулировки 9, формирующего управляющий сигнал для усилителя

(реализуемого программно или аппаратно) 12, замыкая тем самым дополнительный контур обратной связи по МК ЭО-модулятора в составе МИОС.

Моделирование второй обратной связи в ВОГ с использованием ГД

Исследование применимости предлагаемого метода проводилось на модели с обратной связью по коэффициенту $U_{2\pi}$. Интервал дискретизации работы модели равен интервалу τ .

Моделирование подстройки коэффициента $U_{2\pi}$ в модели проводилось при линейном возрастании угловой скорости вращения гироскопа в диапазоне от 0 град/с до 3000 град/с за 1 с. Полное время работы модели составляло 1 с. На рис. 5 приведен в логарифмическом масштабе график ошибки подстройки E действующего коэффициента $U_{2\pi}^{\text{дейст.}}$, определяемой по формуле (10):

$$E = \left| 1 - \frac{U_{2\pi}^{\text{дейст.}}}{U_{2\pi}^{\text{ист.}}} \right|, \quad (10)$$

где $U_{2\pi}^{\text{ист.}}$ – значение напряжения, соответствующее истинному. В случае $U_{2\pi}^{\text{дейст.}} = U_{2\pi}^{\text{ист.}}$, т.е. полной подстройки, значение $E = 0$.

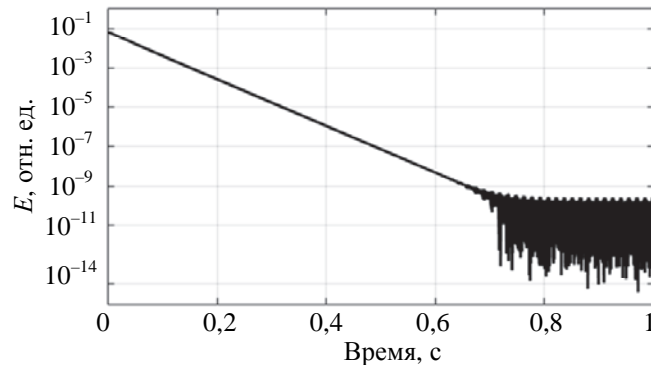


Рис. 5. График ошибки подстройки E коэффициента $U_{2\pi}$

Как видно из рис. 5, за время, приблизительно равное 0,5 с (что соответствует примерно 60000 тактов работы модели), значение ошибки становится меньше значения в 1 млн⁻¹ (в англоязычной литературе используется термин ppm), являющегося максимальным допустимым отклонением для ВОГ класса точности 0,01 град/ч–0,001 град/ч [1]. Полная подстройка происходит за время более 0,6 с (эквивалентное примерно 100000 тактов). Относительная точность при полной подстройке в отсутствии шумов составляет приблизительно $3 \cdot 10^{-10}$, что на четыре порядка лучше, чем обозначенное выше максимальное допустимое отклонение. Следует отметить, что подстройка коэффициента $U_{2\pi}$ происходит при относительно большом угловом ускорении. Независимость метода от значения угловой скорости и ускорения обосновывает потенциал его применения в реальных приборах.

На рис. 6 линия а (серая) представляет собой график ошибки подстройки E при добавлении в модель фазовых шумов (белый шум, размах (peak-to-peak) 100 мкрад) и шумов по интенсивности (белый шум, размах (peak-to-peak) относительно максимума интерференции 10^{-4}). Время моделирования составляет 4 с. Как видно из рис. 6, а, величина ошибки зашумлена и находится в пределах интервала относительной погрешности порядка 2 млн⁻¹. Учитывая медленный характер изменения коэффициента $U_{2\pi}$, можно ввести его фильтрацию, например, скользящим средним с окном длительностью от 0,5 до 1 с. Значение ошибки подстройки, полученное в результате обработки с окном длительностью 1 с и периодом моделирования 4 с, показано на рис. 6 линией б (черная). Полученное значение ошибки свидетельствует об относительной погрешности лучше, чем 1 млн⁻¹. Запоздывание отфильтрованного сигнала составляет приблизительно 1 с, что не критично при медленно изменяющихся внешних условиях. Подстройка коэффициента в модели с шумами происходила при постоянном угловом ускорении в 3000 град/с².

Предлагаемый метод был внедрен в модель ВОГ. Моделирование проводилось без шумов (для обеспечения возможности более тщательного сравнения измеренного воздействия с эталонным) при воздействии линейно возрастающей угловой скорости в диапазоне от 0 град/с до 3000 град/с за 1 с и начальном рассогласовании коэффициента $U_{2\pi}$ в 20%. На рис. 7, а, в логарифмическом масштабе представлен график ошибки подстройки коэффициента $U_{2\pi}$, на рис. 7, б – график измеренной (обозначена крестообразными маркерами) и эталонной (обозначена сплошной линией) угловой скорости, а также разницы между ними в логарифмическом масштабе (рис. 7, в). Как видно из рисунков, измеренная скорость совпадает с эталонной, однако при рассмотрении в увеличенном масштабе можно обнаружить некоторое относительное смещение, вызванное фазовой задержкой ВОГ. Неизменная величина разницы между измеренной и эталонной угловыми скоростями (подразумевается участок при подстроенном коэффициенте $U_{2\pi}$, т.е. точки, расположенные правее значения 0,5 с по оси абсцисс на рис. 7, в), свидетельствует о корректности работы алгоритма. Как видно из рисунков, в процессе измерения угловой скорости происходит

подстройка коэффициента $U_{2\pi}$ с относительной точностью лучше 1 млн^{-1} , что является достаточной точностью для ВОГ класса 0,01 град/ч–0,001 град/ч [1].

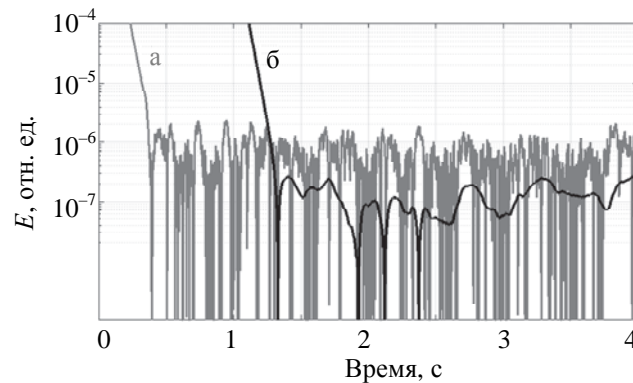


Рис. 6. График ошибки подстройки E коэффициента $U_{2\pi}$ для модели с шумами (а) и для модели с фильтрацией скользящим средним (б)

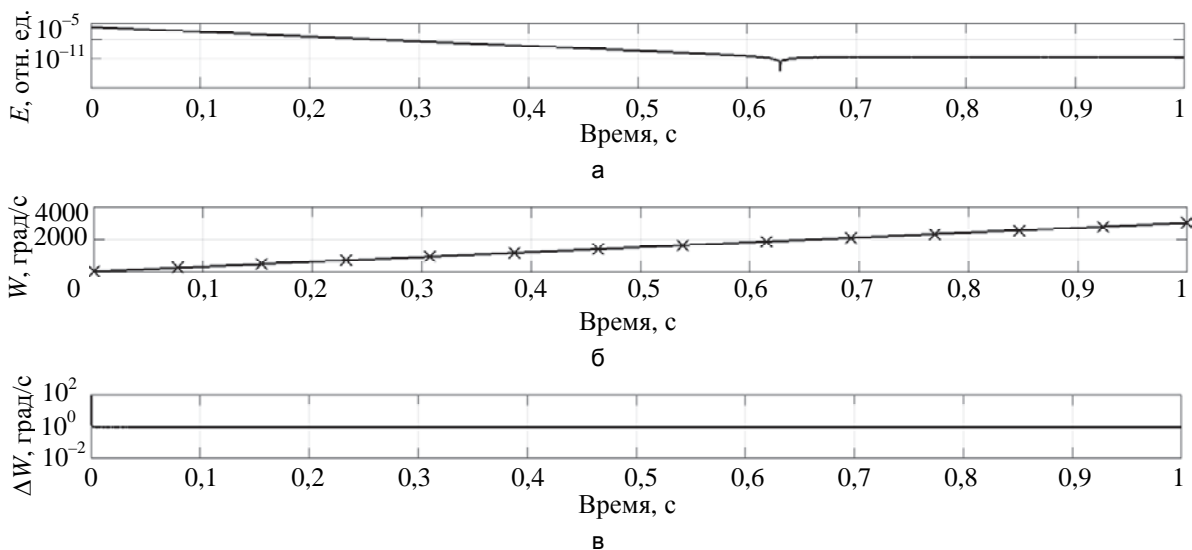


Рис. 7. Графики ошибки подстройки E коэффициента $U_{2\pi}$ (а), измеряемой и фактической угловой скорости (б) и разницы между ними (в)

Заключение

Проведенное в работе моделирование волоконно-оптического гироскопа с использованием метода гомодинной демодуляции для формирования второй обратной связи по коэффициенту $U_{2\pi}$ (производной величины от масштабного коэффициента электрооптического модулятора K_{EO}) показало возможность измерения меняющейся угловой скорости и одновременной подстройки коэффициента $U_{2\pi}$ без взаимовлияния между этими процессами. Возможность исключения влияния углового ускорения на точность подстройки коэффициента $U_{2\pi}$ позволит реализовать точные измерительные алгоритмы для волоконно-оптических гироскопов, устойчивые к значительным ускорениям, чем и обуславливается потенциал предлагаемого метода для применения в реальных приборах. В дальнейшем планируется произвести экспериментальную оценку точности предлагаемого метода.

References

1. Lefevre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 2nd ed. Artech House, 2014, 405 p.
2. Pavlath G.A. Closed-loop fiber optic gyros. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1996, vol. 2837, pp. 46–60. doi: 10.1117/12.258198
3. Lefevre H., Martin F. *Optical-Fiber Measuring Device, Gyrometer, Central Navigation and Stabilizing System*. Patent US5141316, 1992
4. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. *Method of Improving Accuracy of Closed-Loop Fibre-Optic Gyroscope*. Patent RU 2512599, 2012.
5. 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

6. 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.
7. Plotnikov M., Kulikov A., Strigalev V. 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. (In Russian)
8. 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
9. 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
10. He J., Wang L., Li F., Liu Y. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no. 22, pp. 3258–3265. doi: 10.1109/JLT.2010.2081347
11. He J., Li F., Zhang W., Wang L., Xu T., Liu Y. High performance wavelength demodulator for DFB fiber laser sensor using novel PGC algorithm and reference compensation method. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, vol. 7753, art. 775333. doi: 10.1117/12.885823
12. 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
13. Tong Y., Zeng H., Li L., Zhou Y. Improved phase-generated carrier demodulation algorithm for eliminating light intensity disturbance and phase modulation amplitude variation. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 29, pp. 6962–6967. doi: 10.1364/AO.51.006962
14. Wang G.-Q., Xu T.-W., Li F. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, vol. 24, no. 23, pp. 2093–2096. doi: 10.1109/LPT.2012.2220129
15. Wentao Z., Hao X., Cunzhi P., Wenzhu H., Fang Li Differential-self-multiplying-integrate phase generated carrier method for fiber-optic sensors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014, vol. 9233, art. 92331U. doi: 10.1117/12.2069764
16. Wu B., Yuan Y., Yang J., Liang S., Yuan L. Optimized phase generated carrier (PGC) demodulation algorithm insensitive to C value. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9655, art. 96550C. doi: 10.1117/12.2184268
17. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie Tsepi i Signaly* [Radio Circuits and Signals]. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 448 p.
18. Mekhrengin 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) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-227-233
19. Smith S.W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed. California Technical Publishing, 1999, 650 p.

Алейник Артем Сергеевич	– кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, yartemal@yandex.com
Волковский Сергей Александрович	– ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zhihotnoe1941@mail.ru
Михеев Максим Владимирович	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, narkbt@gmail.com
Никитенко Александр Николаевич	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.n.nikitenko.1@gmail.com
Плотников Михаил Юрьевич	– кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, plotnikov-michael@yandex.ru
Artyom S. Aleynik	– PhD, Associate professor, Head of the laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, yartemal@yandex.com
Sergey A. Volkovskiy	– assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zhihotnoe1941@mail.ru
Maksim V. Mikheev	– engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, narkbt@gmail.com
Aleksander N. Nikitenko	– engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.n.nikitenko.1@gmail.com
Mikhail Yu. Plotnikov	– PhD, assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, plotnikov-michael@yandex.ru