



УДК 531.383-11:681.7

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАЗИТНЫХ ЭФФЕКТОВ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ

С.А. Волковский<sup>а</sup>, А.С. Алейник<sup>а</sup>, А.Н. Никитенко<sup>а</sup>, М.А. Смолвик<sup>а</sup>, Д.А. Погорелая<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: zhivotnoe1941@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.08.16, принята к печати 23.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-780-786

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Волковский С.А., Алейник А.С., Никитенко А.Н., Смолвик М.А., Погорелая Д.А. Метод оценки паразитных эффектов электрооптического модулятора в волоконно-оптическом гироскопе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 780–786. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-780-786

### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложен оригинальный метод исследования паразитных эффектов в электрооптическом модуляторе волоконно-оптического гироскопа на основе специального модулирующего сигнала. **Метод.** Сущность предложенного метода заключается в модификации сигнала серродинной модуляции, в результате чего обеспечивается периодическое смещение сигнала разности фаз в максимум интерференции. В этом случае уровень интенсивности отражает влияние паразитных эффектов, степень проявления которых определяется последовательностью управляющих сигналов напряжения на модуляторе. Перебор комбинаций управляющих сигналов и регистрация соответствующих уровней интенсивности позволяет сформировать эмпирическую зависимость коэффициента паразитных воздействий и впоследствии использовать ее для компенсации. **Основные результаты.** Работоспособность предложенного метода продемонстрирована на программной модели волоконно-оптического гироскопа. Получены результаты применения метода на серийном образце прибора, их сравнение с результатами непосредственной оценки эффекта паразитной модуляции интенсивности свидетельствует об эффективности предложенного метода. **Практическая значимость.** Метод может быть использован в качестве диагностического инструмента для количественной оценки влияния паразитных эффектов в электрооптическом модуляторе волоконно-оптического гироскопа, а также для их последующей компенсации.

### Ключевые слова

волоконно-оптический гироскоп, электрооптический модулятор, фазовая модуляция, модуляция интенсивности, четырехступенчатая модуляция

### Благодарности

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

## EVALUATION METHOD FOR PARASITIC EFFECTS OF THE ELECTRO-OPTICAL MODULATOR IN A FIBER OPTIC GYROSCOPE

S.A. Volkovskiy<sup>а</sup>, A.S. Aleynik<sup>а</sup>, A.N. Nikitenko<sup>а</sup>, M.A. Smolovik<sup>а</sup>, D.A. Pogorelaya<sup>а</sup><sup>а</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: zhivotnoe1941@mail.ru

### Article info

Received 01.08.16, accepted 23.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-780-786

Article in Russian

**For citation:** Volkovskiy S.A., Aleynik A.S., Nikitenko A.N., Smolovik M.A., Pogorelaya D.A. Evaluation method for parasitic effects of the electro-optical modulator in a fiber optic gyroscope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 780–786. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-780-786

### Abstract

**Subject of Research.** The paper proposes an original method for studying the parasitic effects in the electro-optic modulator of the fiber optic gyroscope. Proposed method is based on the usage of a special waveform phase modulation signal. **Method.** The essence of the proposed method lies in modification of serrodyne modulation signal, thereby providing a periodic displacement of the phase difference signal to the maximum of the interference curve. In this case, the intensity level reflects the influence of parasitic effects with the degree of manifestation being determined by the sequence of voltage control signals applied to the modulator. Enumeration of combinations of control signals and the corresponding intensity levels gives the possibility to observe an empirical dependence of the parasitic effects and use it later for compensation. **Main Results.** The

efficiency of the proposed method is demonstrated by the program model of the fiber optic gyroscope. The results of the method application on a production sample of the device were obtained. Comparison with the results of direct estimate of the parasitic intensity modulation effect testifies to the effectiveness of the proposed method. **Practical Relevance.** The method can be used as a diagnostic tool to quantify the influence of parasitic effects in the electro-optic modulator of the fiber optic gyroscope as well as for their subsequent compensation.

#### Keywords

fiber-optic gyroscope, electro-optic modulator, phase modulation, intensity modulation, four-stage modulation

#### Acknowledgements

This work was performed at ITMO University with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Unique project ID: RFMEFI57815X0109, Agreement No14.578.21.0109).

### Введение

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – прибор для измерения угловой скорости, реализованный на основе схемы интерферометра Саньяка [1–3]. Структурная схема ВОГ компенсационного типа с цифровой схемой обработки показана на рис. 1.

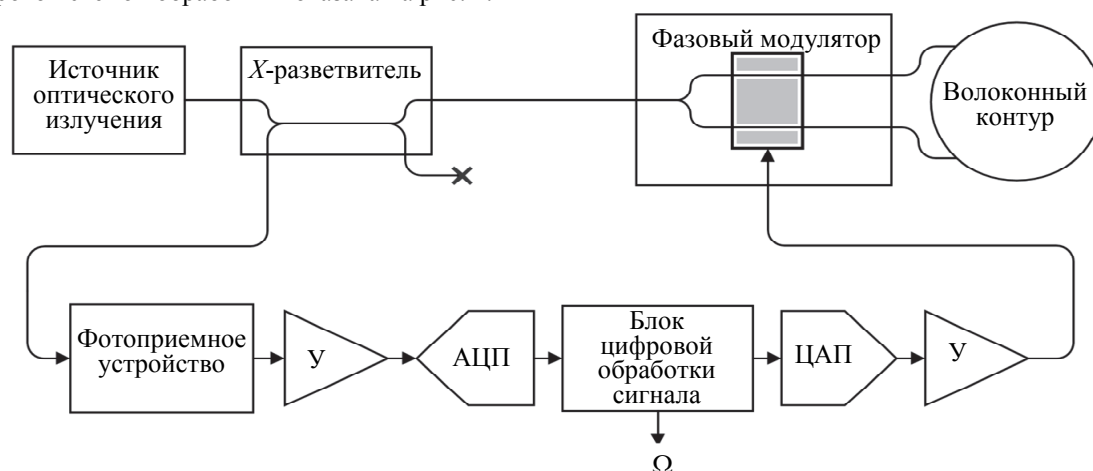


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического гироскопа компенсационного типа с цифровой схемой обработки: У – усилительное устройство, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

Уровень оптической мощности  $P$  на фотоприемнике определяется выражением

$$P(\Delta\varphi_R) = P_0(1 + \cos(\Delta\varphi_R + \Delta\varphi_M)), \quad (1)$$

где  $P$  – величина оптической мощности на фотоприемнике;  $P_0$  – величина оптической мощности источника излучения;  $\Delta\varphi_R$  – фазовый сдвиг Саньяка;  $\Delta\varphi_M$  – фазовый сдвиг, вносимый фазовым модулятором. Если интерферометр неподвижен, пути распространения излучения в обе стороны чувствительного контура идентичны, и наблюдается конструктивная интерференция, обусловленная нулевой разностью фаз. В случае вращения интерферометра с отличной от нуля угловой скоростью  $\Omega$  пути обхода контура становятся различными, и между лучами возникает фазовый сдвиг Саньяка  $\Delta\varphi_R$ , пропорциональный угловой скорости:

$$\Delta\varphi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (2)$$

где  $L$  – общая длина оптического контура;  $D$  – диаметр оптического контура;  $\lambda$  – центральная длина волны источника оптического излучения;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\Omega$  – угловая скорость вращения ВОГ.

Для повышения чувствительности ВОГ рабочую точку интерферометра из области максимума сдвигают в точку квадратуры косинуса, что соответствует величине разности фаз  $\pm 0,5\pi$  радиан. Для этого фазовым модулятором между двумя лучами формируют дополнительную разность фаз в виде ступенчатого импульсного сигнала с периодом  $2\tau$ , где  $\tau$  – время обхода волоконного контура. С целью обеспечить линейность отклика ВОГ в широком диапазоне угловых скоростей рабочую точку интерферометра удерживают в точке максимальной крутизны путем замыкания контура обратной связи. Для этого между лучами с помощью фазового модулятора вносят фазовый сдвиг, величину которого подбирают таким образом, чтобы скомпенсировать фазовый сдвиг Саньяка.

Сигнал, с помощью которого осуществляют компенсацию, представляет собой ступенчатую импульсную последовательность, крутизна которой пропорциональна величине сдвига Саньяка. Кроме того, в силу ограниченности диапазона фазовой модуляции прибегают к использованию серродинной модуляции, для этого ступенчатую импульсную последовательность при выходе за пределы некоторого диапазона сдвигают на величину, соответствующую  $\pm 2\pi$  радиан, что не оказывает влияния на выходной сигнал

интерферометра в силу периодичности функции интерференции (рис. 2). Комбинированный алгоритм, совмещающий серродинную и квадратурную модуляции, обеспечивает широкий динамический диапазон и высокий уровень чувствительности ВОГ [4].

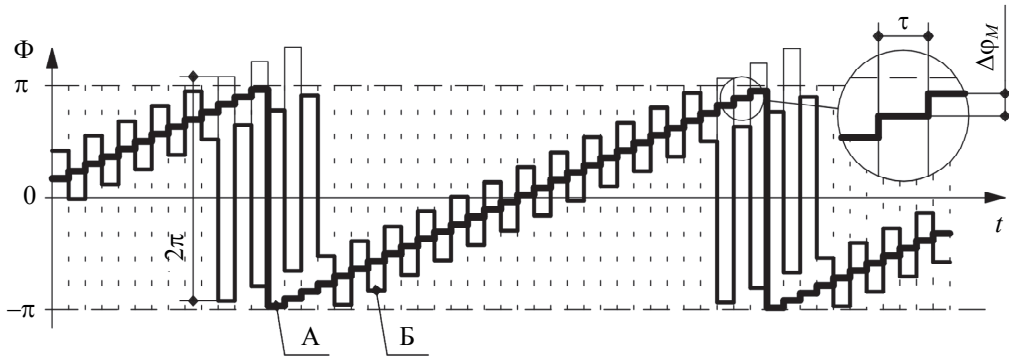


Рис. 2. Фрагмент сигнала серродинной модуляции волоконно-оптического гироскопа.

А – пилообразный сигнал компенсации фазового сдвига Саньяка, Б – сумма сигнала компенсации и вспомогательного сдвигающего сигнала,  $\tau$  – время обхода оптоволоконного контура;  $\Delta\Phi_M$  – приращение величины компенсирующего сигнала за время  $\tau$

Следует, однако, отметить, что отклонения параметров элементов, формирующих систему компенсации сдвига Саньяка, от идеальных могут приводить к возникновению погрешностей в выходном сигнале ВОГ. Одним из наиболее критичных с этой точки зрения компонентов измерительной схемы является интегрально-оптический модулятор. Экспериментально установлено наличие зависимости сигнала интенсивности на фотоприемном устройстве от последовательности и амплитуд управляющих сигналов, приложенных к фазовому модулятору. В литературных источниках упоминается эффект паразитной модуляции интенсивности – ПМИ (Intensity Modulation) [5–7], а также эффект инерционности модулятора (DC Bias Drift) [8–13].

Суть эффекта ПМИ состоит в следующем. Подача на электроды модулятора напряжения приводит к возникновению ряда эффектов, среди которых можно выделить эффект рассеяния света на неоднородностях кристалла; пьезоэлектрический отклик кристалла, приводящий к изменению направления луча; изменение параметров стыковки подводящих волокон и др. В целом данный эффект аналогичен введению в измерительную схему контура паразитной обратной связи с неизвестными характеристиками, что может стать причиной снижения эффективности выбранной системы компенсации ВОГ и ухудшения его динамических и точностных параметров (рис. 3).

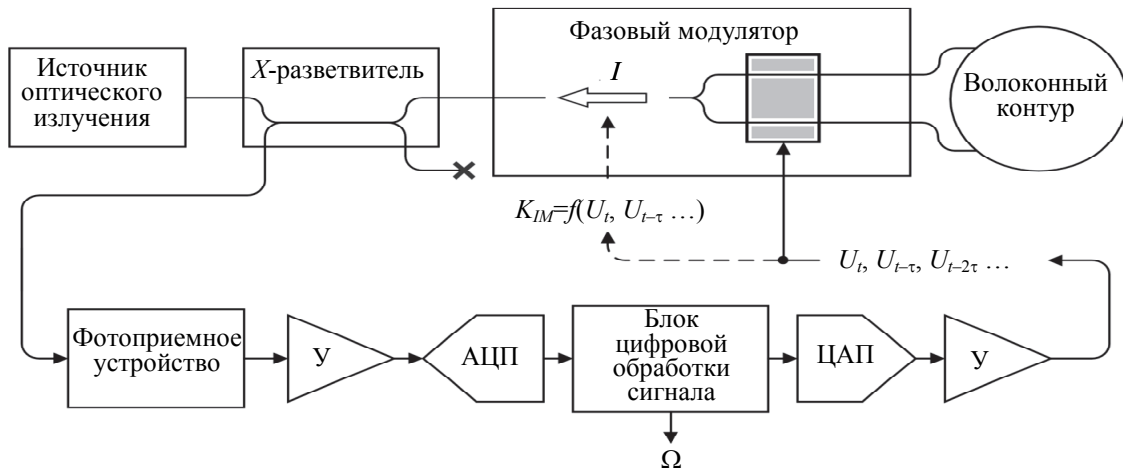


Рис. 3. Схематичное изображение паразитной связи между последовательностью модулирующих напряжений и коэффициентом модуляции интенсивности  $K_{IM}$

Возникновение эффекта инерционности обусловлено тем, что модулятор на основе кристалла ниобата лития проявляет свойства фильтра со сложными частотными характеристиками, поэтому величина наводимого модулятором фазового сдвига является функцией последовательности напряжений общей длительностью в десятки и даже сотни  $\tau$ -интервалов.

Несмотря на то, что оба эффекта хорошо изучены, оценка степени их влияния на точность ВОГ затруднена в силу сложности аппаратной конфигурации и нестабильности ряда технических параметров подобных приборов. Известен, к примеру, способ формирования модулирующего сигнала, снижающий

чувствительность измерительной схемы к ПМИ [14], однако, в силу особенностей схемы модуляции–демодуляции, описанный способ приводит к частичной потере информации об угловой скорости, поэтому его применение в широком диапазоне угловых скоростей нецелесообразно.

Основной целью настоящей работы являлось создание метода оценки эффекта ПМИ модулятора, пригодного для проведения диагностики ВОГ без необходимости его аппаратной модификации, а также рассмотрение возможности применения метода для оценки эффекта инерционности.

#### Описание предлагаемого метода

Для исследования указанных эффектов был разработан метод сбора данных на основе специальной схемы фазовой модуляции. Суть метода заключается в следующем. Модулирующий сигнал представляет собой сумму пилообразного сигнала компенсации фазового сдвига Саньяка и импульсного сигнала сдвигающей модуляции. Сигнал сдвигающей модуляции при этом является результатом произведения двух прямоугольных периодических сигналов  $\Phi_{b1}$  и  $\Phi_{b2}$ . Сигнал  $\Phi_{b1}$  имеет амплитуду  $0,25\pi$  радиан, период  $2\tau$  и скважность 2;  $\Phi_{b2}$  имеет амплитуду 1, период  $n\tau$  и скважность  $n$  (рис. 4). Величину  $n$  необходимо выбрать таким образом, чтобы обеспечить приемлемую частоту сбора данных при минимальном воздействии на систему компенсации сдвига Саньяка. Рекомендуемый диапазон выбора величины  $n = 10–100$ .

Перемножение сигналов  $\Phi_{b1}$  и  $\Phi_{b2}$  приводит к инвертированию каждого  $n$ -го импульса сигнала сдвигающей модуляции, что равносильно кратковременному исчезновению из общей суммы сигналов Б сигнала сдвигающей модуляции А (рис. 2) – результирующая разность повторяет форму сигнала пилообразной модуляции. Поскольку разность между последовательными уровнями пилообразного сигнала  $\Delta\varphi_M$  компенсирует фазовый сдвиг Саньяка  $\Delta\varphi_R$ , сигнал, соответствующей фазовой разности, приобретает нулевое значение, и рабочая точка интерферометра оказывается в нулевом максимуме интерференции.

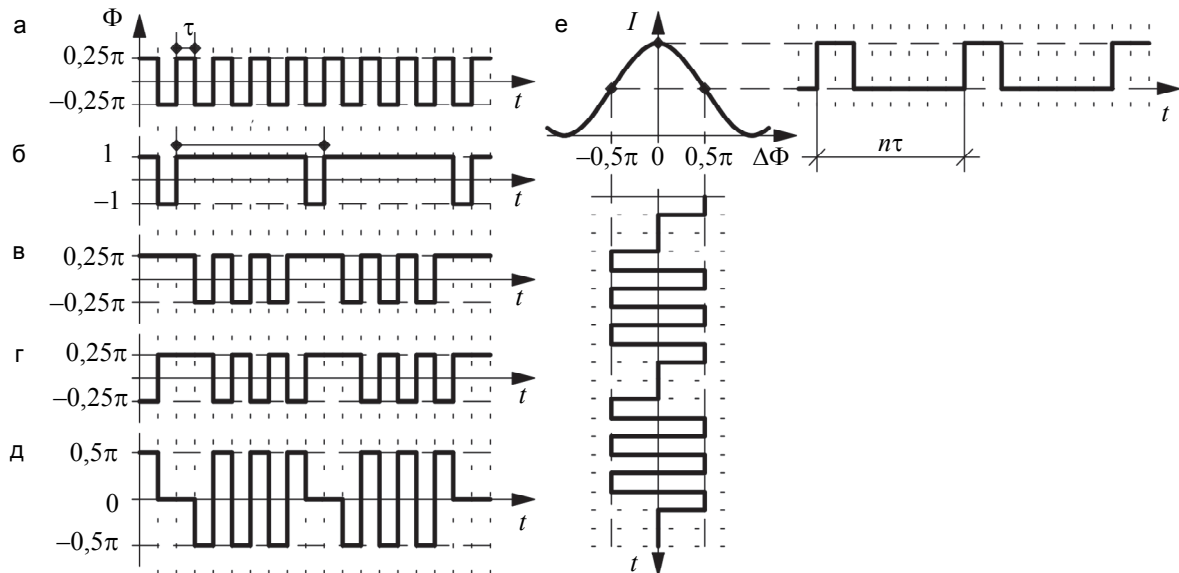


Рис. 4. Механизм формирования модулирующего сигнала для исследования паразитных эффектов электрооптического модулятора: вспомогательный сигнал  $\Phi_{b1}$  (а); вспомогательный сигнал  $\Phi_{b2}$  скважностью  $n$  (б); итоговый вспомогательный сигнал – произведение  $\Phi_{b1}$  и  $\Phi_{b2}$  (в); итоговый сигнал с задержкой  $\tau$  (г); сигнал фазовой разности (д); выходной сигнал интенсивности (е)

Зарегистрированный фотоприемным устройством уровень интенсивности  $I$  в максимуме можно интерпретировать как результат произведения уровня интенсивности  $I_0$  при отсутствии эффектов паразитной модуляции и коэффициента  $K_{IM}$ , зависящего от последовательности предшествующих напряжений (3). Истинный уровень интенсивности  $I_0$  можно оценить, наблюдая конструктивную интерференцию ВОГ при отсутствии вращения и при нулевом напряжении на модуляторе:

$$I = I_0 K_{IM}, \quad (3)$$

где  $K_{IM} = f(U_t, U_{t-\tau}, U_{t-2\tau} \dots U_{t-m\tau})$ .

Каждый из полученных коэффициентов  $K_{IM}$  соответствует точке в пространстве напряжений размерностью  $m$ , при этом величина  $m$  определяется инерционностью процессов в модуляторе, приводящих к проявлению паразитных эффектов. Чем медленнее протекают процессы в модуляторе, тем длиннее последовательность уровней напряжения, влияющих на текущий уровень интенсивности, и тем больше необходимая величина  $m$ . Определение величины  $K_{IM}$  для всех возможных сочетаний из  $m$  предшествующих напряжений позволяет сформировать массив поправочных коэффициентов и компенсировать влияние паразитных эффектов модулятора в процессе эксплуатации.

Следует отметить, что определение величины  $K_{IM}$  представляет собой техническую задачу, вычислительная сложность которой экспоненциально возрастает с увеличением  $m$ . В случае анализа эффекта ПМИ результаты наиболее информативны при  $m = 2$ , поскольку предполагается, что эффекты, вызывающие ПМИ, практически безынерционны. Как следствие, влияние на интенсивность оказывают уровни напряжения, непосредственно формирующие фазоразностный сигнал.

### Применение метода в программной модели ВОГ

Рассмотрим реализацию метода оценки эффекта ПМИ на программной модели ВОГ для случая  $m = 2$ . В данной модели влияние на уровень интенсивности оказывает последовательность из двух напряжений – текущего  $U_t$  и предыдущего  $U_{t-\tau}$ . Функциональная зависимость величины  $K_{IM}$  в рамках моделирования задана искусственно и имеет вид (4):

$$K_{IM} = 1 + 0,01U_tU_{t-\tau} \exp(-0,2(U_t + 0,5)^2 - 0,1(U_{t-\tau} - 0,2)^2). \quad (4)$$

Сигнал входной угловой скорости представляет собой синусоиду амплитудой  $\Omega_\pi$ , частотой 1 Гц и продолжительностью 1 с, скважность сигнала  $\Phi_{b2}$  равна 10. На рис. 5 показано множество точек, соответствующих отношению уровня интенсивности на фотоприемном устройстве в момент инвертирования вспомогательного сигнала  $\Phi_{b2}$  к уровню интенсивности в отсутствие эффекта ПМИ. Полученные точки достаточно точно укладываются на исходную поверхность коэффициентов, что говорит об эффективности предлагаемого метода оценки в рамках модели.

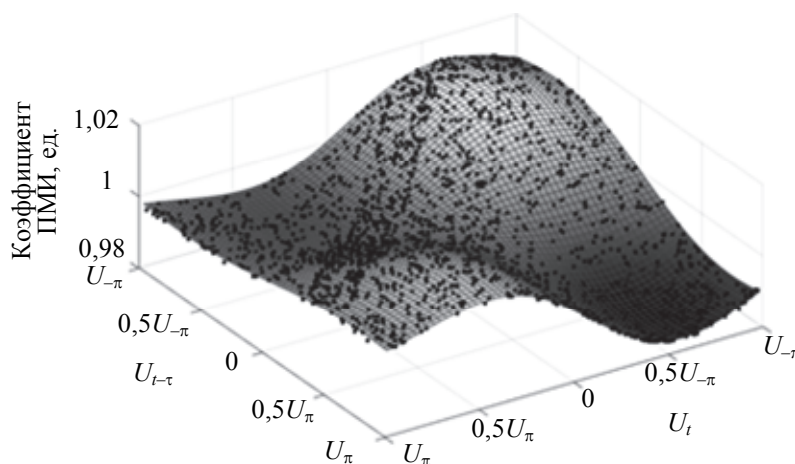


Рис. 5. Поверхность коэффициентов  $K_{IM}$  в диапазоне напряжений фазовой модуляции  $U_{-\pi} \dots U_\pi$  для случая  $m = 2$ ; точки соответствуют коэффициентам, полученным в результате использования предложенного метода

При демодуляции выходного сигнала из последовательности уровней интенсивности необходимо исключать отсчет, соответствующий моменту инвертирования вспомогательного сигнала  $\Phi_{b2}$ . С точки зрения стандартной схемы демодуляции данный уровень эквивалентен скачкообразному изменению величины фазы Саньяка и может на некоторое время дестабилизировать систему регулирования ВОГ. Следует отметить, что в результате исключения из демодулированного сигнала отсчетов, соответствующих моментам инвертирования сигнала сдвигающей модуляции, происходит падение частоты формирования полезного сигнала ВОГ, что приводит к увеличению ошибки регулирования ВОГ и может стать причиной утраты стабильности компенсационной схемы при возникновении угловых ускорений. По этой причине предложенный способ предлагается использовать в качестве инструмента диагностики на этапе подготовки прибора к эксплуатации.

### Эксперимент на серийном образце ВОГ

Результат использования предложенного метода оценки для случая  $m = 2$  на серийном образце ВОГ приведен на рис. 6, а. Сигнал входной угловой скорости в этом случае представляет собой синусоиду частотой около 1 Гц и продолжительностью 120 с, скважность сигнала  $\Phi_{b2}$  равна 20. Сечение плоскостью  $U_t = U_{t-\tau}$  частично согласуется с результатами прямого измерения эффекта ПМИ, суть которого заключается в приложении постоянного напряжения к модулятору и регистрации соответствующего уровня интенсивности (рис. 6, б). Расхождение экспериментальных кривых при увеличении абсолютной величины напряжения может быть обусловлено влиянием эффекта инерционности модулятора: переходные процессы, сопутствующие смене величины напряжения, могут приводить к ошибкам компенсации фазы и снижению точности попадания сигнала фазовой разности в максимум интерференции.

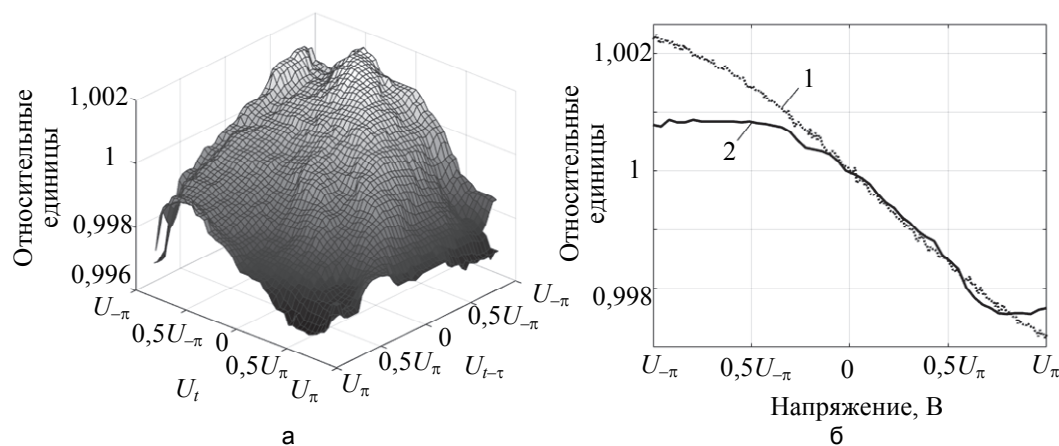


Рис. 6. Результаты эксперимента на действующем волоконно-оптическом гироскопе; экспериментальная поверхность коэффициентов (а); сравнение экспериментальных зависимостей: кривая (1) получена в результате прямой оценки эффекта паразитной модуляции интенсивности, кривая (2) – сечение поверхности коэффициентов плоскостью  $U_t = U_{t-\tau}$  (б)

Характер полученной эмпирической зависимости свидетельствует о наличии выраженного эффекта ПМИ – диапазон значений коэффициента  $K_{IM}$  составляет 0,4%, при этом за единичный принят коэффициент, соответствующий центру полученной поверхности с координатами  $U_t = 0, U_{t-\tau} = 0$  – предполагается, что при отсутствии напряжения на модуляторе эффект ПМИ не оказывает влияния на величину интенсивности.

#### Перспективы дальнейшего развития метода

Главной задачей дальнейших исследований является определение величины вклада различных паразитных эффектов модулятора в форму полученной поверхности и оценка эффективности системы компенсации паразитных эффектов на основе эмпирически полученных зависимостей.

Другим направлением развития идеи предложенного метода оценки может стать его адаптация к четырехступенчатой схеме фазовой модуляции, при использовании которой возможно совмещение двух вспомогательных сигналов модуляции в пределах каждого  $\tau$ -интервала [15–17]. В качестве одного из вспомогательных предлагается использовать сигнал, предназначенный для обеспечения нулевой разности фаз и смещения рабочей точки в максимум интерференции, при этом другой вспомогательный сигнал предлагается использовать для непрерывной регистрации фазового рассогласования, вызванного вращением ВОГ. Преимуществом подобного подхода является возможность применять предложенный метод оценки непосредственно в процессе эксплуатации ВОГ.

#### Заключение

В работе предложен оригинальный метод оценки эффекта паразитной модуляции интенсивности в электрооптическом модуляторе волоконно-оптического гироскопа на основе модифицированной схемы серродинной модуляции. Метод позволяет производить оценку общего влияния паразитных эффектов модулятора на уровень сигнала интенсивности серийного гироскопа и может служить инструментом диагностики или исследования приборов на финишных этапах производства. По результатам оценки серийного образца прибора предложенным методом диапазон значений коэффициента паразитной модуляции интенсивности составил 0,4%, что хорошо согласуется с ранее полученными данными. Предполагаемым направлением дальнейшего развития метода является реализация на его основе системы компенсации эффекта паразитной модуляции в эксплуатационном режиме волоконно-оптического гироскопа, а также определение величины вклада каждого из паразитных эффектов в итоговый уровень интенсивности.

#### Литература

1. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Окуси Т., Окамото К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
3. Lefevre H.C. Fiber Optic Gyroscope. 2<sup>nd</sup> ed. London: Artech House, 2014. 416 p.
4. Pavlath G.A. Closed-loop fiber optic gyros // Proc. SPIE. 1996. V. 2837. P. 46–60. doi: 10.1117/12.258198
5. Nagata H., Ichikawa J. Progress and problems in reliability of Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical intensity modulators // Optical Engineering.

#### References

1. Busurin V.I., Nosov Yu.R. *Fiber Optic Sensors: Physical Basics, Calculation and Application*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 256 p.
2. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kuma K., Hatate K. *Fiber-Optic Sensors*. Leningrad, Energoatomidat Publ., 1990, 256 p. (in Russian)
3. Lefevre H.C. *Fiber Optic Gyroscope*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Artech House, 2014, 416 p.
4. Pavlath G.A. Closed-loop fiber optic gyros. *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2837, pp. 46–60. doi: 10.1117/12.258198
5. Nagata H., Ichikawa J. Progress and problems in reliability of

- 1995, V. 34, N 11, P. 3284–3293.
6. Ishibashi C., Ye J., Hall J.L. Analysis/reduction of residual amplitude modulation in phase/frequency modulation by an EOM // Proc. Quantum Electronics and Laser Science. Long Beach, USA, 2002. V. 74. P. 91–92.
  7. Jin W., Culshaw B. Signal-feedback induced intensity modulation in a fibre optic gyro system // IEE Proceedings. Part J, Optoelectronics. 1992. V. 139. N 5. P. 318–324.
  8. Salvestrini J.P., Guilbert L., Fontana M., Abarkan M., Gille S. Analysis and control of the DC drift in LiNbO<sub>3</sub>-based Mach-Zehnder modulators // Journal of Lightwave Technology, 2011, V. 29, N 10, P. 1522–1534. doi: 10.1109/JLT.2011.2136322
  9. Chong K.H., Choi W.S., Chong K.T. Analysis of dead zone sources in a closed-loop fiber optic gyroscope // Applied Optics. 2016, V. 55, N 1. P. 165–170. doi: 10.1364/AO.55.000165
  10. Seino M., Nakazawa T., Kubota Y. et al. A low DC-drift Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator assured over 15 years // Proc. OSA Optical Fiber Communications Conf. 1992. P. 321–324. doi: 10.1364/OFC.1992.PD3
  11. Nagata H., Honda H., Akizuki K. Initial bias dependency in dc drift of z-cut LiNbO<sub>3</sub> optical intensity modulators // Optical Engineering, 2000, V. 39, N 4, P. 1103–1105.
  12. Yamada S., Minakata M. DC drift phenomena in LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide devices // Japanese Journal of Applied Physics, 1981, V. 20, N 4, P. 733–737. doi: 10.1143/JJAP.20.733
  13. Sun F., Wang L., Wang G., Liu G. Study on the drift of modulated phase in interference fiber optic gyroscope // Journal of Computers, 2010, V. 5, N 3, P. 394–400. doi: 10.4304/jcp.5.3.394-400
  14. Курбагов А.М. Способ стабилизации масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа. Патент RU2160885, 1999.
  15. Lefevre H., Martin F. Optical-Fiber Measuring Device, Gyrometer, Central Navigation and Stabilizing System. Patent US 5141316, 1992.
  16. Lefevre H., Martin F. Optical Fiber Measuring Device using Phase Difference. Patent US 5337142, 1994.
  17. Urgell A., Willemenot E., Gaiffé T. Method and Power-Assisted Optic-Fiber Measuring Device and Gyro. Patent US 7777890, 2010.
- Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical intensity modulators. *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, no. 11, pp. 3284–3293.
6. Ishibashi C., Ye J., Hall J.L. Analysis/reduction of residual amplitude modulation in phase/frequency modulation by an EOM. *Proc. Quantum Electronics and Laser Science*. Long Beach, USA, 2002, vol. 74, pp. 91–92.
  7. Jin W., Culshaw B. Signal-feedback induced intensity modulation in a fibre optic gyro system. *IEE Proceedings. Part J, Optoelectronics*, 1992, vol. 139, no. 5, pp. 318–324.
  8. Salvestrini J.P., Guilbert L., Fontana M., Abarkan M., Gille S. Analysis and control of the DC drift in LiNbO<sub>3</sub>-based Mach-Zehnder modulators. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 10, pp. 1522–1534. doi: 10.1109/JLT.2011.2136322
  9. Chong K.H., Choi W.S., Chong K.T. Analysis of dead zone sources in a closed-loop fiber optic gyroscope. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 1, pp. 165–170. doi: 10.1364/AO.55.000165
  10. Seino M., Nakazawa T., Kubota Y. et al. A low DC-drift Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator assured over 15 years. *Proc. OSA Optical Fiber Communications Conf.*, 1992, pp. 321–324. doi: 10.1364/OFC.1992.PD3
  11. Nagata H., Honda H., Akizuki K. Initial bias dependency in dc drift of z-cut LiNbO<sub>3</sub> optical intensity modulators. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, no. 4, pp. 1103–1105.
  12. Yamada S., Minakata M. DC drift phenomena in LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide devices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 20, no. 4, pp. 733–737. doi: 10.1143/JJAP.20.733
  13. Sun F., Wang L., Wang G., Liu G. Study on the drift of modulated phase in interference fiber optic gyroscope. *Journal of Computers*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 394–400. doi: 10.4304/jcp.5.3.394-400
  14. Kurbatov A.M. *Method of Stabilization of the Scale Factor of Fiber Optic Gyroscope*. Patent RU 2160885, 1999.
  15. Lefevre H., Martin F. *Optical-Fiber Measuring Device, Gyrometer, Central Navigation and Stabilizing System*. Patent US 5141316, 1992.
  16. Lefevre H., Martin F. *Optical Fiber Measuring Device using Phase Difference*. Patent US 5337142, 1994.
  17. Urgell A., Willemenot E., Gaiffé T. *Method and Power-Assisted Optic-Fiber Measuring Device and Gyro*. Patent US 7777890, 2010.

#### Авторы

**Волковский Сергей Александрович** – ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zivotnoe1941@mail.ru

**Алейник Артём Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, yartemal@yandex.ru

**Никитенко Александр Николаевич** – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.n.nikitenko.l@gmail.com

**Смоловик Михаил Андреевич** – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ma.smolovik@gmail.com

**Погорелая Дарья Андреевна** – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, pdaria@mail.ru

#### Authors

**Sergey A. Volkovskiy** – assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zivotnoe1941@mail.ru

**Artyom S. Aleynik** – PhD, Associate professor, Head of laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, yartemal@yandex.ru

**Alexander N. Nikitenko** – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.n.nikitenko.l@gmail.com

**Mikhail A. Smolovik** – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ma.smolovik@gmail.com

**Daria A. Pogorelaya** – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, pdaria@mail.ru