

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-866-872

УДК 535.015

Уменьшение влияния амплитудных искажений LiNbO_3 фазового модулятора на сигнал волоконно-оптического гироскопа за счет применения дополнительной модуляцииЕвгений Владимирович Востриков¹✉, Ангелина Валерьевна Умнова²,
Артем Сергеевич Алейник³, Григорий Константинович Погудин⁴,
Владимир Евгеньевич Стригалева⁵, Игорь Касьянович Мешковский⁶^{1,2,3,4,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация¹ Innolume GmbH, Дортмунд, 44263, Германия² Hitachi Energy, Людвика, 77131, Швеция¹ e.v.vostrikov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>² aumnova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7027-0178>³ artemal@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>⁴ gkpogudin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>⁵ vestrigalev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>⁶ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

Аннотация

Предмет исследования. Паразитная амплитудная модуляция оптического сигнала в фазовом модуляторе — один из факторов, ограничивающих точность высокочувствительных волоконно-оптических датчиков. Волоконно-оптический гироскоп — датчик угловой скорости, чувствительность которого составляет менее $0,001$ °/ч. Изменение интенсивности оптического излучения при прохождении через фазовый модулятор приводит к возникновению ложного сигнала рассогласования в интерферометре Саньяка, что вносит ошибку в сигнал угловой скорости. Способы подавления паразитной амплитудной модуляции основаны на уменьшении отражений в местах стыковки оптических волокон, изготовлении поглощающих канавок для блокировки оптического излучения от нижней грани фазового модулятора и алгоритмических способов компенсации.

Метод. Представлен новый метод уменьшения влияния паразитной амплитудной модуляции LiNbO_3 фазового модулятора на сигнал волоконно-оптического гироскопа. Особенность метода — применение дополнительной модуляции дифференциальным сигналом с равномерным распределением амплитуд в диапазоне рабочих напряжений фазового модулятора.

Основные результаты. Предложенный метод позволяет уменьшить влияние паразитной амплитудной модуляции фазового модулятора многофункциональной интегрально-оптической схемы на сигнал волоконно-оптического гироскопа более чем в три раза. Для этого применена дополнительная модуляция треугольным сигналом с частотой $f = 200,09$ МГц и мощностью $P = 36$ дБм.

Практическая значимость. Разработанный метод может использоваться для повышения точностных характеристик волоконно-оптических гироскопов. Кроме того, метод может быть применим и к другим волоконно-оптическим датчикам, в которых использованы фазовые модуляторы на основе кристалла ниобата лития. Работа может быть интересна специалистам в области высокочувствительных волоконно-оптических датчиков, волоконной и интегральной оптики.

Ключевые слова

паразитная амплитудная модуляция, фазовый модулятор, волоконно-оптический гироскоп, ниобат лития, модуляция

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание № 2019-0923.

Ссылка для цитирования: Востриков Е.В., Умнова А.В., Алейник А.С., Погудин Г.К., Стригалева В.Е., Мешковский И.К. Уменьшение влияния амплитудных искажений LiNbO_3 фазового модулятора на

сигнал волоконно-оптического гироскопа за счет применения дополнительной модуляции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 866–872. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-866-872

Application of additional high-frequency modulation to reduce influence of residual amplitude modulation LiNbO₃ phase modulator on fiber optical gyroscope signal

Evgenii V. Vostrikov¹, Angelina V. Umnova², Artem S. Aleinik³, Grigorii K. Pogudin⁴, Vladimir E. Strigalev⁵, Igor K. Meschkovskii⁶

^{1,2,3,4,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ Innolume GmbH, Dortmund, 44263, Germany

² Hitachi Energy, Ludvica, 77131, Sweden

¹ e.v.vostrikov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>

² aumnova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7027-0178>

³ artemal@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

⁴ gkpogudin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>

⁵ vestrigalev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

⁶ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

Abstract

Residual amplitude modulation in LiNbO₃ phase modulator is one of the key factors that limit the accuracy of high-sensitive fiber-optical sensors. A fiber-optical gyroscope is an angular velocity sensor whose sensitivity is better than 0.001 °/h. Optical light intensity changes after phase modulator is a reason for wrong phase difference that introduces an error in the angular velocity signal. Most existing residual amplitude modulation suppression methods are based on reduction of back reflections between an optical fiber and integrated optical waveguide, absorbing groove to suppress or reduce reflection on the bottom face, and algorithmic compensation. In this paper, new approach to reduce residual amplitude modulation in LiNbO₃ for fiber optical gyroscope application is presented. Method feature is an application of additional differential signal modulation with uniform amplitude distribution in the input signal voltage range of the phase modulator. The proposed method allows to suppress residual amplitude modulation of the multifunctional integrated optical circuit phase modulator more than 3 times using additional triangle signal modulation with the frequency $f = 200.09$ MHz and power $P = 36$ dBm. This method is suitable for improving fiber optical gyroscope accuracy. Moreover, it could be applied for any fiber-optic sensors based on LiNbO₃ phase modulator. The paper will be of interest to specialists in the field of highly sensitive fiber optical sensors, fiber, and integrated optics.

Keywords

residual amplitude modulation, phase modulator, fiber-optical gyroscope, lithium niobite, modulation

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, goszadanie no. 2019-0923.

For citation: Vostrikov E.V., Umnova A.V., Aleinik A.S., Pogudin G.K., Strigalev V.E., Meschkovskii I.K. Application of additional high-frequency modulation to reduce influence of residual amplitude modulation LiNbO₃ phase modulator on fiber optical gyroscope signal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 866–872 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-866-872

Введение

Волоконно-оптические датчики получили широкое распространение во многих областях науки и техники и до сих пор не теряют актуальность ввиду своих неоспоримых преимуществ [1, 2]. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) — высокочувствительный датчик, способный детектировать значение угловой скорости менее 0,001 °/ч, что соответствует стратегическому классу точности. Фазовый модулятор является неотъемлемой частью ВОГ и необходим для стабилизации его рабочей точки на линейном участке интерферометрической функции [3–5]. Искажения оптического сигнала, возникающие в фазовом модуляторе, служат одним из определяющих факторов, ограничивающим точность ВОГ. В большинстве случаев фазовый модулятор используется в составе многофункциональной интегральной

оптической схемы (МИОС), которая также выполняет функции оптического ответвителя и поляризатора. В научно-технической литературе выделяют фазовые искажения и амплитудные искажения, которые также называют паразитной амплитудной модуляцией (ПАМ) в фазовом модуляторе [6, 7]. Фазовые искажения проявляются в изменении фазы оптического сигнала при прохождении оптического излучения через фазовый модулятор без изменения управляющего напряжения. В то же время ПАМ в фазовом модуляторе проявляется в виде изменения интенсивности оптического излучения при прохождении через него оптического сигнала. Фазовые искажения и ПАМ являются причиной возникновения сигнала ошибки в высокочувствительных волоконно-оптических датчиках. Уменьшение фазовых искажений или ПАМ позволяют увеличить точностные характеристики ВОГ, в частности стабильность мас-

штабного коэффициента и сигнала угловой скорости. В настоящей работе рассмотрена ПАМ оптического сигнала ВОГ. Традиционные способы подавления ПАМ основаны на: уменьшении отражений в местах стыковки оптических волокон; изготовлении поглощающих канавок для блокировки оптического излучения от нижней грани фазового модулятора; алгоритмических способах компенсации [3, 4, 6, 8, 9]. Предложенный новый подход — альтернатива традиционным способам и основан на использовании дополнительной модуляции дифференциальным сигналом.

Постановка задачи

Причины возникновения ПАМ в фазовом модуляторе: обратный пьезоэлектрический, фоторефрактивный и электрооптический эффекты; потери на стыковке; рэлеевское рассеяние; отражение оптического излучения от граней кристалла фазового модулятора; неравномерное распределение электрического поля в кристалле, что является причиной неравномерного показателя преломления в оптическом волноводе [8, 10–12]. Отражения от граней кристалла фазового модулятора, в местах стыковки с оптическими волокнами создают паразитные интерферометрические сигналы, которые вносят ошибку в сигнал угловой скорости ВОГ. Влияние ПАМ на полезный сигнал нелинейно и зависит от формы, частоты и распределения напряжений управляющего сигнала. Также, в связи с эффектами релаксации внутреннего электрического поля МИОС, подвижности заряженных дефектов и ОН-групп в приповерхностном слое кристалла ниобата лития, перезарядки барьерных емкостей на границе электрод-кристалл на ПАМ оптического сигнала МИОС влияет не только текущее состояние управляющего сигнала, но и предыдущее состояние. Применение управляющего сигнала с равномерным распределением напряжений в рабочем диапазоне позволяет усреднить влияние данных эффектов. Кроме того, использование дифференциального сигнала уменьшает влияние паразитных интерферометрических сигналов, возникающих в местах соединения волноводов МИОС с оптическими волокнами волоконно-оптической катушки ВОГ за счет разной фазовой задержки для каждого из сигналов. Применение противофазных сигналов для каждого из двух плеч фазового модулятора МИОС не вносит разность фаз в интерферометрический сигнал. Тем самым использование дополнительной модуляции совместно с основной модуляцией не окажет влияния на полезный сигнал угловой скорости ВОГ. Таким образом, в работе поставлена задача уменьшения влияния ПАМ фазового модулятора МИОС на сигнал ВОГ с применением дополнительной дифференциальной модуляции с равномерным распределением напряжений.

Типовая схема подключения МИОС

Использование интегрально-оптических схем позволяет уменьшить количество компонентов, оптических и электрических соединений и потери в оптической схеме. Для применения в ВОГ и стабилизации рабочей

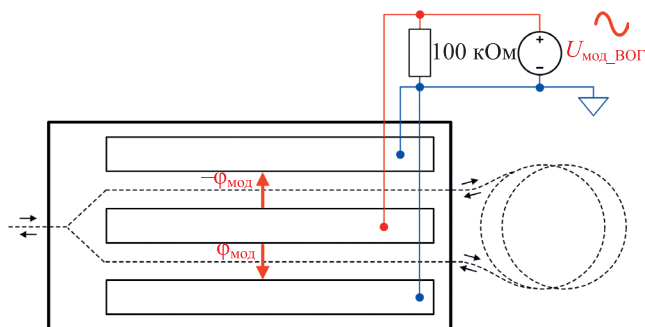


Рис. 1. Типовая схема подключения многофункциональной интегрально-оптической схемы: $U_{\text{мод_ВОГ}}$ — источник сигнала модуляции ВОГ; $\varphi_{\text{мод}}$ — изменение фазы оптического сигнала

Fig. 1. Typical connection scheme of multifunctional integrated optical circuit: $U_{\text{mod_FOG}}$ — modulation signal source of FOG (fiber-optic gyroscope); φ_{mod} — phase shift in optical signal

точки на линейном участке интерферометрической функции в схеме Саньяка применена типовая схема подключения МИОС (рис. 1).

Принцип работы ВОГ известен и описан во многих работах [3, 4]. Выходное излучение оптического источника вводится в интегрально-оптическую схему и разделяется на две равные части посредством планарного Y-ответвителя, далее через каналные волноводы оптическое излучение проходит через фазовый модулятор ($\varphi_{\text{мод}}$) и попадает в волоконно-оптическую катушку. К центральному электроду подключается положительный полюс источника управляющего сигнала ($U_{\text{мод_ВОГ}}$), боковые электроды соединяются между собой, чтобы обеспечить одинаковую напряженность электрического поля для каждого из двух плеч фазового модулятора. Изменение сигнала модуляции в ВОГ происходит с периодом τ , который соответствует времени обхода оптическим сигналом волоконно-оптической катушки. Итоговая разность фаз, вносимая фазовым модулятором МИОС, верна при любом τ и выражается формулой:

$$\Delta\varphi_{\text{м}} = 2\varphi_{\text{мод}}(t) - 2\varphi_{\text{мод}}(t - \tau), \quad (1)$$

где $\Delta\varphi_{\text{м}}$ — итоговая разность фаз; $\varphi_{\text{мод}}(t)$ и $\varphi_{\text{мод}}(t - \tau)$ — фазы, которые добавляются в оптический сигнал в моменты времени (t) и $(t - \tau)$. Параллельно между центральными и боковыми электродами установлен высокоомный резистор с сопротивлением около 100 кОм для разрядки паразитных емкостей и выравнивания потенциалов электродов.

Описание предлагаемого метода

Конфигурация МИОС позволяет изменить способ подключения источника сигнала модуляции к его электродам. В таком случае управляющий сигнал модуляции поступает не на центральный электрод, а на боковые электроды МИОС, что лишь меняет полярность вносимой в оптический сигнал разности фаз. Применение дополнительного сигнала модуляции может быть реализовано с использованием преобразователя униполяр-

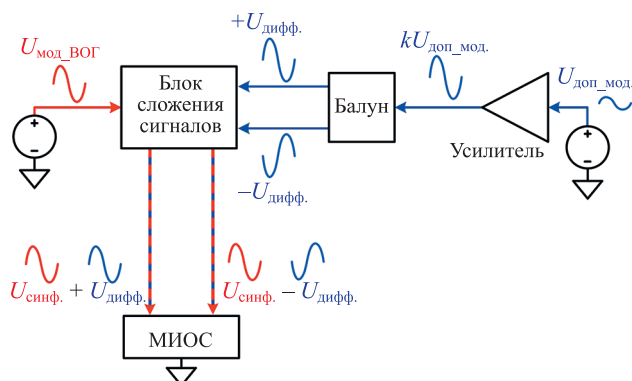


Рис. 2. Блок-схема формирования синфазного и дифференциального сигналов: $U_{\text{мод_ВОГ}}$ — источник сигнала модуляции ВОГ; $U_{\text{синф}}$ — синфазный сигнал модуляции ВОГ; $U_{\text{доп_мод}}$ — источник сигнала дополнительной модуляции, $U_{\text{дифф}}$ — дифференциальный сигнал дополнительной модуляции; k — коэффициент усиления сигнала дополнительной модуляции

Fig. 2. Block diagram of common-mode and differential signals forming: $U_{\text{mod_FOG}}$ — modulation signal source of FOG; $U_{\text{in-phase}}$ — in-phase modulation signal of FOG; $U_{\text{add_mod}}$ — additional modulation signal source; U_{diff} — differential additional modulation signal; k — gain of additional modulation signal

ного сигнала в дифференциальный и схемы сложения каждого из противофазных сигналов дополнительной модуляции с синфазными сигналами для каждого из боковых электродов. Для формирования синфазного и дифференциальных сигналов собрана электрическая схема, блок-схема которой представлена на рис. 2.

В качестве генератора дополнительного сигнала модуляции ($U_{\text{доп_мод}}$) использована отладочная плата ReFLEX Atilia ARRIA 10 с высокочастотным цифро-аналоговым преобразователем прямого синтеза AD9164 с разрядностью 16 бит, частотой дискретизации $F_{\text{д}} = 5$ Гвыб/с, выходной мощностью $P_{\text{вых}} = 7$ дБм, полосой генерирования сигналов $F_{\text{пп}} = 2,5$ ГГц, которая

позволила сформировать сигналы произвольной формы [13]. В связи с широким диапазоном рабочих напряжений МИОС от минус 10 до 10 В выполнено увеличение мощности дополнительного сигнала модуляции с помощью усилительного каскада Усилителя с суммарным коэффициентом усиления 30 дБ и точкой децибельной компрессии $P_{1\text{дБ}} = 36$ дБм. Для формирования дифференциального сигнала применен Балун компании Marki, для преобразования несимметричного сигнала в симметричный. Блок сложения объединил дифференциальный сигнал дополнительной модуляции и синфазный сигнал модуляции ВОГ ($U_{\text{мод_ВОГ}}$).

Сформированные сигналы модуляции поступают на электроды МИОС для дальнейшей модуляции оптического сигнала. Подключение МИОС для применения дополнительной модуляции дифференциальным сигналом представлено на рис. 3. С учетом дополнительного сигнала модуляции выражение (1) приобретает вид:

$$\Delta\varphi_{\text{м}} = [2\varphi_{\text{синф.}}(t) + \varphi_{\text{дифф.}}(t) - \varphi_{\text{дифф.}}(t)] - [2\varphi_{\text{синф.}}(t - \tau) + \varphi_{\text{дифф.}}(t - \tau) - \varphi_{\text{дифф.}}(t - \tau)], \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{синф.}}(t)$ и $\varphi_{\text{синф.}}(t - \tau)$ — фазы, которые добавляются в оптический сигнал синфазной составляющей сигнала модуляции в моменты времени (t) и $(t - \tau)$; $\varphi_{\text{дифф.}}(t)$ и $\varphi_{\text{дифф.}}(t - \tau)$ — фазы, которые добавляются в оптический сигнал дифференциальной составляющей сигнала модуляции в моменты времени (t) и $(t - \tau)$.

Формулы (1) и (2) описывают операцию дифференцирования. Итоговая разность фаз определена разницей между текущим состоянием фазы и состоянием фазы, задержанным на время распространения в волоконно-оптической катушке (τ). В случае равенства противофазных составляющих дифференциального сигнала дополнительной модуляции формулу (2) можно упростить к виду $\Delta\varphi_{\text{м}} = 4\varphi_{\text{синф.}}$, тем самым разность фаз в сигнал угловой скорости ВОГ будет вносить только синфазная составляющая сигнала модуляции.

Для усреднения влияния эффектов, возникающих в фазовом модуляторе МИОС, предложено использовать

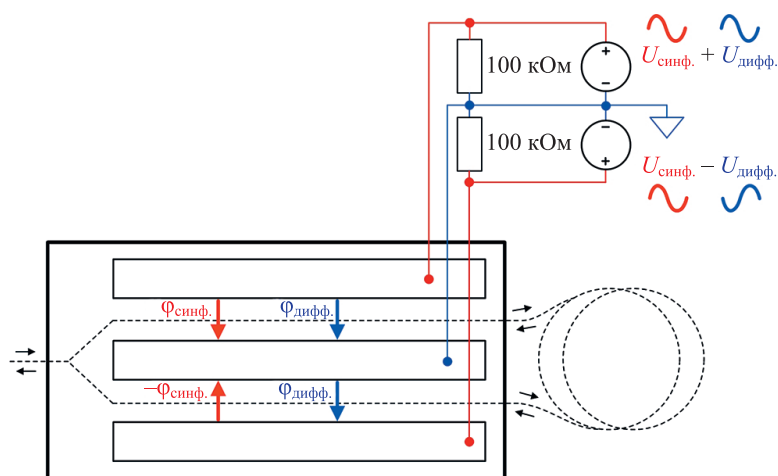


Рис. 3. Схема подключения многофункциональной интегрально-оптической схемы для применения дополнительной модуляции дифференциальным сигналом

Fig. 3. Multifunctional integrated optical circuit connection scheme for additional differential high-frequency modulation

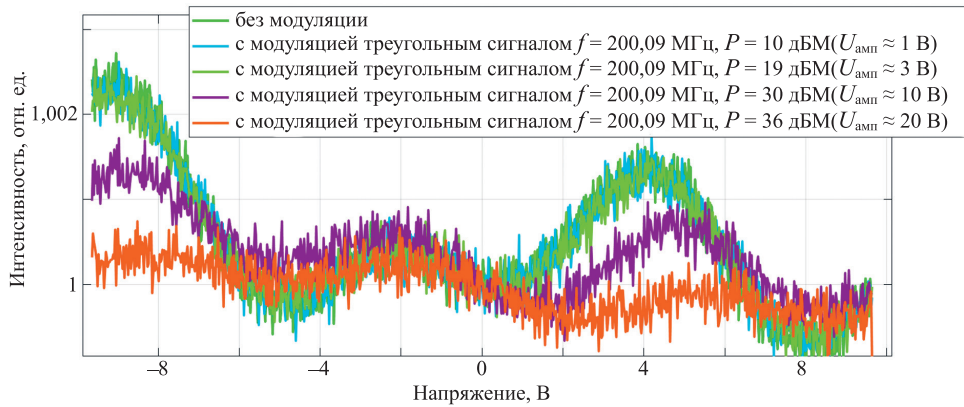


Рис. 4. Оценка паразитной амплитудной модуляции фазового модулятора многофункциональной интегрально-оптической схемы без и с дополнительной модуляцией

Fig. 4. Residual amplitude modulation evaluation of multifunctional integrated optical circuit with additional differential high-frequency modulation and without it

сигнал с равномерным распределением напряжений. Такими сигналами являются: равномерный шум, треугольный и пилообразные сигналы. Преимущества использования треугольного или пилообразного сигналов: относительная простота создания сигналов по сравнению с равномерным шумом, а также возможность изменения их частоты.

Передаточная характеристика интерферометра Саньяка обладает максимумами и минимумами, которые определяются длиной и, следовательно, временем обхода оптического сигнала волоконно-оптической катушки (τ). Частота сигнала модуляции для стабилизации рабочей точки ВОГ соответствует максимуму и определяется выражением:

$$f_p = \frac{1}{2\tau}$$

где f_p — собственная частота волоконно-оптической катушки.

Удвоенная частота $2f_p$, как и все четные частоты ($4f_p$, $6f_p$ и т. д.) соответствуют минимумам передаточной функции интерферометра Саньяка [14, 15]. Таким образом, применение пилообразного или треугольного сигнала с частотой, соответствующей частоте одного из минимумов передаточной функции интерферометра Саньяка, позволяет увеличить ослабление сигнала дополнительной модуляцией в дополнение к применению дифференциального сигнала.

Результаты эксперимента

Оценка ПАМ фазового модулятора МИОС осуществлена в составе ВОГ по методу, подробно описанному в работе [8]. На рис. 4 показаны зависимости нормированной интенсивности оптического излучения на выходе фазового модулятора МИОС от приложенного напряжения при разных мощностях дополнительной модуляции (диагональ ПАМ). Усреднение для каждого измерения составило 3 мин. В качестве дополнительного дифференциального сигнала с равномерным распределением напряжений использован треугольный сигнал частотой $2936 \cdot f_p = 200,09$ МГц (при $f_p = 68,15$ кГц).

Мощность сигнала (P) дополнительной модуляции измерена с помощью спектроанализатора Siglent SVA1015X. Амплитуда рассчитывается как половина размаха напряжения дополнительного сигнала модуляции $U_{амп} = U_{размах}/2$ для импеданса $Z_0 = 50$ Ом.

В ходе анализа представленных данных выявлено, что размах ПАМ в диапазоне рабочих напряжений от минус 10 В до 10 В уменьшился более чем в три раза с применением дополнительной модуляции дифференциальным сигналом с равномерным распределением напряжений и максимальной мощностью 36 дБм ($U_{амп} \approx 20$ В). Таким образом, эффективность предложенного метода по уменьшению ПАМ составила более 60 %.

Заключение

В работе представлен новый метод уменьшения влияния паразитных амплитудных искажений фазового модулятора многофункциональной интегрально-оптической схемы на сигнал волоконно-оптического гироскопа, основанный на введении дополнительной модуляции дифференциальным сигналом с равномерным распределением напряжений. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения данного метода. Предложенный метод позволяет уменьшить влияние паразитной амплитудной модуляции фазового модулятора на сигнал угловой скорости более чем в три раза с применением треугольного сигнала частотой $f = 200,09$ МГц и мощностью $P = 36$ дБм в качестве сигнала дополнительной модуляции. Необходимые требования использования данного метода: наличие дополнительной электрической схемы для преобразования несимметричного сигнала дополнительной модуляции в дифференциальную форму и сложения с сигналом модуляции волоконно-оптического гироскопа. В дальнейших исследованиях планируется оценить влияние данного метода на сигнал угловой скорости волоконно-оптического гироскопа. Метод может быть использован в других волоконно-оптических датчиках, в которых используются фазовые модуляторы на основе кристалла ниобата лития.

Литература

1. Wei L., Tjin S.C. Special issue «Fiber optic sensors and applications»: An overview // *Sensors*. 2020. V. 20. N 12. P. 3400. <https://doi.org/10.3390/s20123400>
2. Волоконно-оптические датчики / под ред. Э.Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
3. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston: Artech House, 2014. 391 p.
4. Lefevre H.C., Martin P., Morisse J., Simonpietri P., Vivenot P., Arditti H.J. High-dynamic-range fiber gyro with all-digital signal processing // *Proceedings of SPIE*. 1991. V. 1367. P. 72–80. <https://doi.org/10.1117/12.24730>
5. Новиков А.В. Принцип работы волоконно-оптического гироскопа // *Гео-Сибирь*. 2006. Т. 4. С. 72–75 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsip-raboty-voikonno-opticheskogo-giroskopa> (дата обращения: 15.03.2022).
6. Wang D., Sheng F. Residuary intensity modulation of the phase modulator in IFOG and its measurement // *Guangdian Gongcheng/ Opto-Electronic Engineering*. 2007. V. 34. N 7. P. 26–29.
7. Wang W., Wang J. Study of modulation phase drift in an interferometric fiber optic gyroscope // *Optical Engineering*. 2010. V. 49. N 11. P. 114401. <https://doi.org/10.1117/1.3509360>
8. Погорелая Д.А. Исследование влияния фазовых и амплитудных искажений оптического сигнала в электрооптическом модуляторе на точностные характеристики волоконно-оптического гироскопа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.01. СПб.: Университет ИТМО, 2019. 155 с.
9. Ishibashi C., Ye J., Hall J.L. Analysis/reduction of residual amplitude modulation in phase/frequency modulation by an EOM. *Proc. of the Summaries of Papers Presented at the Quantum Electronics and Laser Science Conference*. 2002. P. 91–92. <https://doi.org/10.1109/QELS.2002.1031144>
10. Петров В.М., Шамрай А.В. СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 225 с.
11. Mondain F., Brunel F., Hua X., Gouzien E., Zavatta A., Lunghi T., Dautre F., De Micheli M.P., Tanzilli S., D'Auria V. Photorefractive effect in LiNbO₃-based integrated-optical circuits for continuous variable experiments // *Optics Express*. 2020. V. 28. N 16. P. 23176–23188. <https://doi.org/10.1364/OE.399841>
12. Аксарин С.М., Смирнова А.В., Шулепов В.А., Парфенов П.С., Стригалева В.Е., Мешковский И.К. Исследование пироэлектрического спонтанного переключения доменов в межэлектродном зазоре фазового модулятора на основе титан-диффузионных волноводов в кристаллах ниобата лития // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 3. С. 361–373. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-361-373>
13. Кузнецов В.Н., Литвинов Е.В., Востриков Е.В., Дейнека И.Г. Вспомогательный генератор сигнала произвольной формы для волоконно-оптического гироскопа // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. Т. 22. № 2. С. 302–307. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-302-307>
14. Vázquez C., Vargas E.S., Sanchez Pena J.M. Sagnac loop in ring resonators for tunable optical filters // *Journal of Lightwave Technology*. 2005. V. 23. N 8. P. 2555–2567. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.850793>
15. Chan E.H.W., Minasian R.A. Widely tunable, high-FSR, coherence-free microwave photonic notch filter // *Journal of Lightwave Technology*. 2008. V. 26. N 8. P. 922–927. <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.912529>

Авторы

Востриков Евгений Владимирович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, Innolume GmbH, Дортмунд, 44263, Германия, [sc 57219034468](https://orcid.org/0000-0001-5682-5819), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>, e.v.vostrikov@yandex.ru
Умнова Ангелина Валерьевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, Hitachi Energy, Людвика, 771 31, Швеция, [sc 57381228100](https://orcid.org/0000-0001-7027-0178), <https://orcid.org/0000-0001-7027-0178>, aumnova@itmo.ru

References

1. Wei L., Tjin S.C. Special issue «Fiber optic sensors and applications»: An overview. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 12, pp. 3400. <https://doi.org/10.3390/s20123400>
2. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. by E. Udd. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
3. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston, Artech House, 2014, 391 p.
4. Lefevre H.C., Martin P., Morisse J., Simonpietri P., Vivenot P., Arditti H.J. High-dynamic-range fiber gyro with all-digital signal processing. *Proceedings of SPIE*, 1991, vol. 1367, pp. 72–80. <https://doi.org/10.1117/12.24730>
5. Novikov A.V. Operation principle of fiber optic gyroscope. *GEO-Siberia*, 2006, vol. 4, pp. 72–75. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsip-raboty-voikonno-opticheskogo-giroskopa> (accessed: 15.03.2022). (in Russian)
6. Wang D., Sheng F. Residuary intensity modulation of the phase modulator in IFOG and its measurement. *Guangdian Gongcheng/ Opto-Electronic Engineering*, 2007, vol. 34, no. 7, pp. 26–29.
7. Wang W., Wang J. Study of modulation phase drift in an interferometric fiber optic gyroscope. *Optical Engineering*, 2010, vol. 49, no. 11, pp. 114401. <https://doi.org/10.1117/1.3509360>
8. Pogorelaia D.A. *Investigation of phase and amplitude distortions influence of an optical signal in an electro-optic modulator on the accuracy characteristics of a fiber optic gyroscope*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, ITMO University, 2019, 155 p. (in Russian)
9. Ishibashi C., Ye J., Hall J.L. Analysis/reduction of residual amplitude modulation in phase/frequency modulation by an EOM. *Proc. of the Summaries of Papers Presented at the Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2002, pp. 91–92. <https://doi.org/10.1109/QELS.2002.1031144>
10. Petrov V.M., Shamrai A.V. *Microwave Integrated Optical Modulators. Theory and Practice*. Moscow, ITMO University, 2021, 225 p. (in Russian)
11. Mondain F., Brunel F., Hua X., Gouzien E., Zavatta A., Lunghi T., Dautre F., De Micheli M.P., Tanzilli S., D'Auria V. Photorefractive effect in LiNbO₃-based integrated-optical circuits for continuous variable experiments. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 16, pp. 23176–23188. <https://doi.org/10.1364/OE.399841>
12. Aksarin S.M., Smirnova A.V., Shulepov V.A., Parfenov P.S., Strigalev V.E., Meshkovskiy I.K. The study of spontaneous domain nucleation in the interelectrode gap of phase modulator based on titanium indiffused waveguides in lithium niobate crystals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 361–373. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-361-373>
13. Kuznetsov V.N., Litvinov E.V., Vostrikov E.V., Deyneka I.G. Auxiliary arbitrary waveform generator for fiber optic gyroscope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 302–307. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-302-307>
14. Vázquez C., Vargas E.S., Sanchez Pena J.M. Sagnac loop in ring resonators for tunable optical filters. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, no. 8, pp. 2555–2567. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.850793>
15. Chan E.H.W., Minasian R.A. Widely tunable, high-FSR, coherence-free microwave photonic notch filter. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, vol. 26, no. 8, pp. 922–927. <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.912529>

Authors

Evgenii V. Vostrikov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, Innolume GmbH, Dortmund, 44263, Germany, [sc 57219034468](https://orcid.org/0000-0001-5682-5819), <https://orcid.org/0000-0001-5682-5819>, e.v.vostrikov@yandex.ru
Angelina V. Umnova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, Hitachi Energy, Ludvica, 77131, Sweden, [sc 57381228100](https://orcid.org/0000-0001-7027-0178), <https://orcid.org/0000-0001-7027-0178>, aumnova@itmo.ru

Алейник Артём Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 54793978900](https://orcid.org/0000-0002-7682-348X), <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>, artemal@itmo.ru

Погудин Григорий Константинович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>, gkpogudin@itmo.ru

Стригалева Владимир Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vestrigalev@itmo.ru

Мешковский Игорь Касьянович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

Artem S. Aleinik — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 54793978900](https://orcid.org/0000-0002-7682-348X), <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>, artemal@itmo.ru

Grigori K. Pogudin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7280-0985>, gkpogudin@itmo.ru

Vladimir E. Strigalev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vestrigalev@itmo.ru

Igor K. Meschkovskii — D. Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 30.04.2022
Одобрена после рецензирования 23.08.2022
Принята к печати 27.09.2022

Received 30.04.2022
Approved after reviewing 23.08.2022
Accepted 27.09.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»