

И. Л. КУБЛАНОВА, В. А. ШУЛЕПОВ, А. В. КУЛИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С МОДУЛЯТОРОМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ

В статье описывается интерферометрический волоконно-оптический гироскоп (ИВОГ) новой конфигурации – с модулятором двулучепреломления (ИВОГ-МДЛП). В соответствии с разработанной схемой собран макет прибора, на котором проведены испытания по оценке его дрейфа на неподвижном основании. Определена зависимость дрейфа ИВОГ-МДЛП от температуры. По результатам испытаний погрешность оценки угловой скорости вращения составила 0,05°/ч, однако при этом выявлена повышенная чувствительность прибора к изменению абсолютной температуры.

Ключевые слова: интерферометрический волоконно-оптический гироскоп, модулятор двулучепреломления, диффузия титана, дрейф ИВОГ-МДЛП, температурная чувствительность.

Введение

Гироскопы, способные измерять угловую скорость вращения основания, на котором они размещены, используются для навигации и гиростабилизации. При этом волоконно-оптические гироскопы характеризуются большей надежностью, чем роторные, по причине отсутствия у них движущихся деталей. В ИВОГ угловая скорость вращения определяется на основании фазового сдвига (эффект Саньяка) между волнами [1–7], встречно распространяющимися по волоконно-оптическому контуру гироскопа. Информация о фазовом сдвиге содержится в результирующей картине интерференции и при соответствующих параметрах ИВОГ обеспечивает высокоточное определение угловой скорости. Тем не менее при прохождении излучения по волоконно-оптическому контуру могут возникать паразитные фазовые сдвиги, снижающие точность измерений ИВОГ.

Одним из наиболее вероятных источников возникновения паразитного фазового сдвига является фазовый модулятор. Для обеспечения модуляции посредством наведения электрического поля модулятор выполняется на электрооптическом кристалле, чаще всего на ниобате лития (LiNbO_3), где возникают пироэлектрический и пьезоэлектрический эффекты, влияющие на модуляцию и вносящие неизвестный по величине паразитный фазовый сдвиг. Такой фазовый сдвиг суммируется с информационным фазовым сдвигом и вносит погрешность в измерения угловой скорости.

Кубланова Ида Леонидовна. Инженер, Университет ИТМО (С.-Петербург). ORCID 0000-0002-6721-5124.
Шулепов Владимир Андреевич. Инженер-исследователь, инженер, Университет ИТМО. ORCID 0000-0003-2168-8046.

Куликов Андрей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, директор института «Высшая инженерная школа», заместитель директора Научно-исследовательского центра световодной фотоники, Университет ИТМО. ORCID 0000-0001-8882-7253.

В настоящей статье предложен способ, позволяющий устранить влияние указанных факторов на измерение угловой скорости вращения с использованием ИВОГ.

Постановка задачи

Как указывалось ранее, кристаллы ниобата лития подвержены пьезоэлектрическому и пьезоэлектрическому эффектам. При изменении температуры или при механических воздействиях на поверхности кристалла возникают свободные электрические заряды, что влияет на напряженность электрического поля и, соответственно, изменяет модулирующий фазовый сдвиг.

Свободные электрические заряды распределены по поверхности кристалла неравномерно, а значит, имеют разное воздействие на модулирующее напряжение в зависимости от положения на кристалле.

В наиболее часто применяемой на практике оптической схеме высокоточного ИВОГ [3–9] (рис. 1 [4]) в состав многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС) входят два фазовых модулятора.

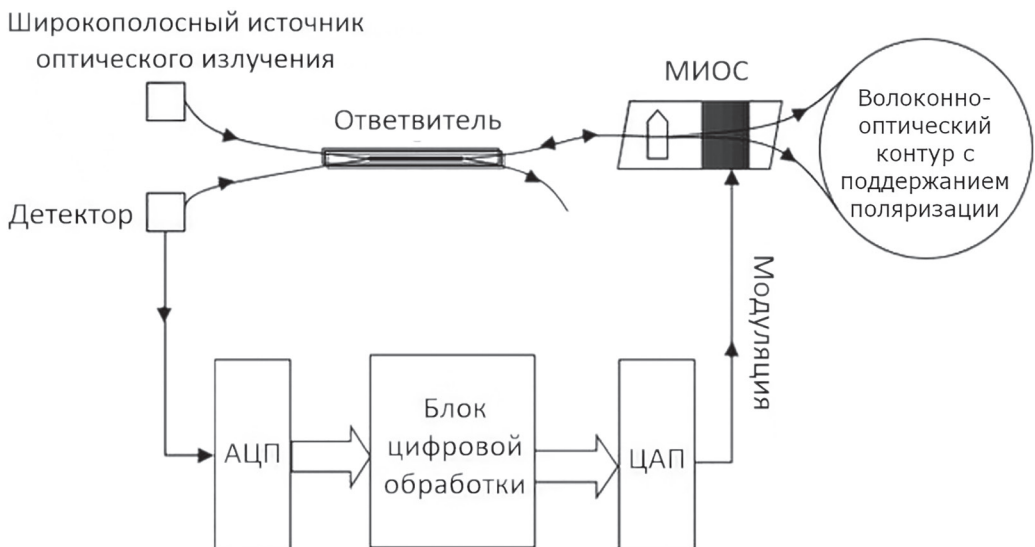


Рис. 1. Схема ИВОГ с фазовыми модуляторами [4]

Модуляция наводится за счет разности фаз между волнами, распространяющимися по разным волноводам, следовательно, пьезоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты действуют на модулируемые волны в неизвестном соотношении и вызывают неизвестный фазовый сдвиг, который и приводит к погрешности при измерении гироскопом угловой скорости вращения.

Влияние указанного паразитного фазового сдвига можно уменьшить, если попытаться скомпенсировать его для встречных волн. Этого можно добиться, если производить модуляцию двух волн, одновременно распространяющихся по одному волноводу, но по ортогональным осям двулучепреломления с отличающимся электрооптическим коэффициентом. В ниобате лития при напряжении, приложенном вдоль оси z , электрооптический коэффициент r_{33} для излучения, поляризованного

вдоль оси z , равен $30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, а электрооптический коэффициент r_{13} для излучения, поляризованного вдоль оси x , $-8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В [10]. Тогда пьезоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты будут влиять на модулируемые волны пропорционально соотношению электрооптических коэффициентов, а значит, их можно будет скомпенсировать. Описанное устройство можно назвать модулятором двулучепреломления [11] (рис. 2).

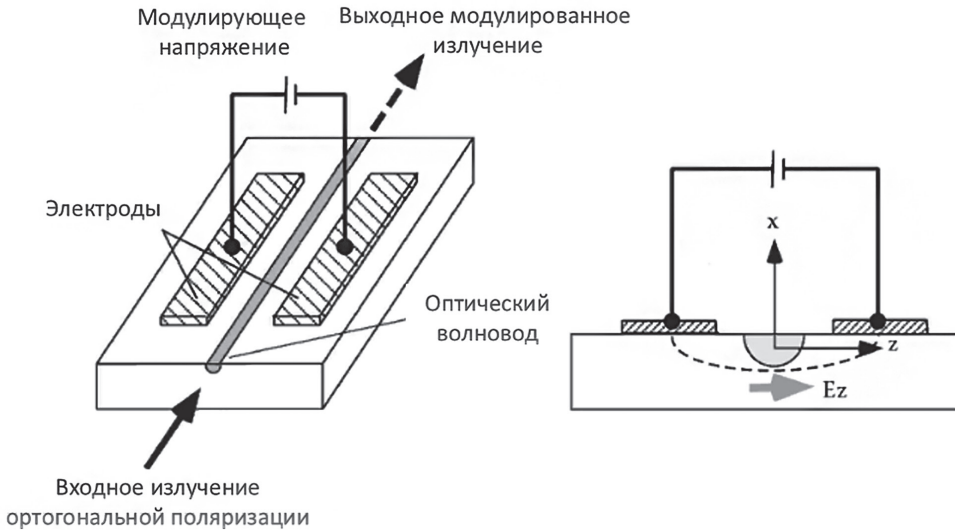


Рис. 2. Схема модулятора двулучепреломления [10]

В настоящей работе предложена оптическая схема и исследован макет ИВОГ-МДЛП (рис. 3).

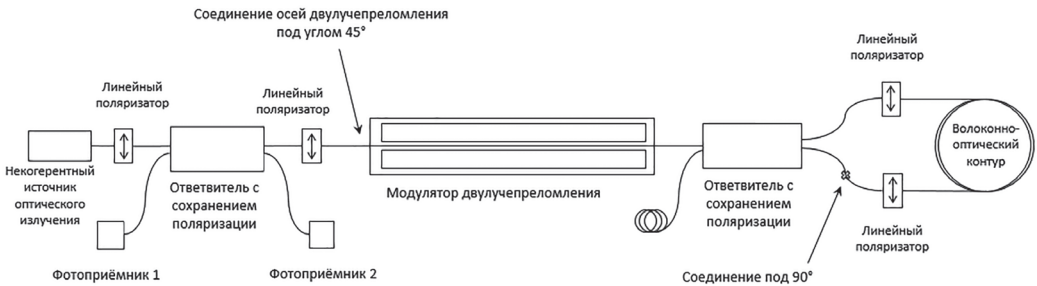


Рис. 3. Схема макета ИВОГ-МДЛП

Описание установки

Предложенная оптическая схема макета ИВОГ-МДЛП отличается от оптической схемы ИВОГ с фазовыми модуляторами тем, что вместо МИОС с двумя фазовыми модуляторами использован модулятор двулучепреломления. Модуляция наводится между волнами, распространяющимися по ортогональным осям двулучепреломления. В волоконно-оптическом контуре ИВОГ-МДЛП по-разному модулированные волны должны распространяться по одной оси двулучепреломления, для чего после

ответвителя располагаются в одном плече интерферометра Саньяка соединение под 90° и по одному линейному поляризатору в каждом его плече.

Модулятор двулучепреломления состоит из волновода, выполненного по технологии диффузии титана [10–14] на кристалле ниобата лития, и двух электродов, закрепленных на X-срезе кристалла [15] слева и справа от волновода. Для того чтобы линейно поляризованное излучение распространялось по двум осям двулучепреломления волновода, он соединен с линейным поляризатором, ориентация осей двулучепреломления которого составляет 45° .

Стоит отметить, что в настоящей схеме используется большое количество сварочных соединений, а также стыковка волокна с поддержанием поляризации двулучепреломления под 45° , погрешности реализации которых влияют на контраст интерференционной картины. Кроме того, из-за большого количества соединений возрастает риск возникновения паразитных интерференций в связи с обратными отражениями. Тем не менее схема ИВОГ-МДЛП взаимна.

Принцип работы

Макет ИВОГ-МДЛП работает следующим образом. Из широкополосного эрбиевого волоконного источника неполяризованное оптическое излучение попадает в линейный поляризатор, пропускающий излучение по медленной оси двулучепреломления. Здесь и далее излучение распространяется преимущественно по медленной оси двулучепреломления. Медленная и быстрая оси двулучепреломления отличаются эффективным показателем преломления, причем медленная ось двулучепреломления в оптическом волокне считается рабочей за счет меньших потерь. При этом альтернативным вариантом построения схемы ИВОГ-МДЛП является использование преимущественно быстрой оси двулучепреломления. Обязательное условие – согласование осей пропускающих всех поляризаторов с используемой осью двулучепреломления волокна.

Линейно поляризованное излучение распространяется в ответвителе с сохранением поляризации, где распределяется по интенсивности. Часть излучения попадает на фотоприемник 2, сигнал которого используется для компенсации флуктуаций мощности источника. Другая часть излучения с ориентацией под углом 45° попадает в двулучепреломляющий волновод модулятора. Таким образом, излучение в модуляторе распространяется как по медленной, так и по быстрой оси.

К электродам модулятора прикладывается напряжение, оказывающее влияние на излучение. Происходит фазовый сдвиг, одна часть которого связана с разницей электрооптических коэффициентов, а другая – с разницей показателей преломления вдоль быстрой и медленной осей.

Далее излучение распространяется через второй ответвитель с сохранением поляризации, также разделяющий излучение по интенсивности. Часть излучения распространяется через линейный поляризатор, пропускающий излучение по медленной оси. Линейно поляризованное излучение распространяется по волоконно-оптическому контуру по часовой стрелке (рис. 3). Другая часть излучения с ориентацией под углом 90° – из-за чего волны, распространяющиеся по медленной и быстрой осям, меняются местами – попадает в линейный поляризатор, пропускающий излучение по медленной оси. Линейно поляризованное излучение в этом случае распространяется по волоконно-оптическому контуру против часовой стрелки (рис. 3).

Выходящие из волоконно-оптического контура волны приобретают фазовый сдвиг, пропорциональный угловой скорости вращения.

Излучение, распространявшееся по часовой стрелке (рис. 3), с ориентацией под углом 90° (теперь оно распространяется по быстрой оси) попадает в ответвитель. Излучение, распространявшееся против часовой стрелки (рис. 3), также попадает в ответвитель. Из ответвителя излучение, распространяющееся по быстрой и медленной осям, попадает в двулучепреломляющий волновод модулятора. Знак прикладываемого к электродам модулятора напряжения меняется. В модуляторе фазовый сдвиг, связанный с разницей электрооптических коэффициентов, удваивается, а фазовый сдвиг, связанный с постоянной разницей показателей преломления, компенсируется.

После выхода из модулятора излучение с ориентацией под углом 45° попадает в линейный поляризатор. Далее обе волны оказываются с одной поляризацией. Происходит интерференция. Линейно поляризованное излучение попадает в фотоприемник 1, который выдает сигнал, пропорциональный угловой скорости вращения волоконно-оптического контура.

Экспериментальное исследование дрейфа ИВОГ-МДЛП и его температурной зависимости

В соответствии со схемой, представленной на рис. 3, был собран макет ИВОГ-МДЛП (рис. 4), на котором проведен ряд экспериментов для определения его дрейфа и влияния на него температурных изменений элементов новой оптической схемы.

По сигналу «широкой» и «узкой» пилы [5] (рис. 5) на выходе макета ИВОГ-МДЛП видно, что гироскоп функционирует. Экспериментально выяснено, что волновое напряжение макета ИВОГ-МДЛП $U_{2\pi}$ составляет 10,8 В [16].

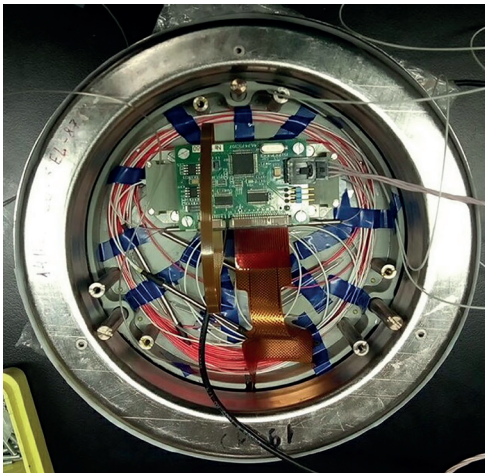


Рис. 4. Макет ИВОГ-МДЛП

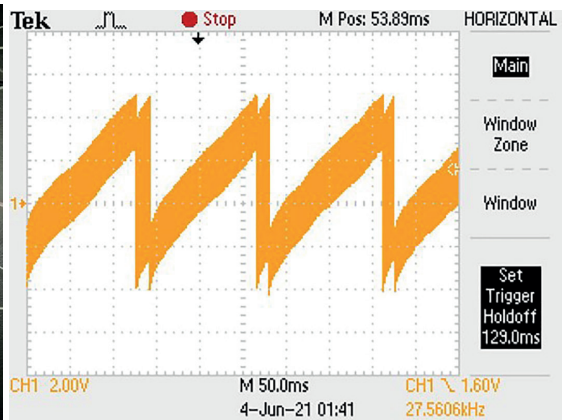


Рис. 5. Выходной сигнал интерференции с несущим сигналом фазовой модуляции макета ИВОГ-МДЛП

Была проведена оценка дрейфа макета ИВОГ-МДЛП во времени на неподвижном основании. В ходе эксперимента для сравнения на неподвижном основании также был размещен ИВОГ с фазовыми модуляторами. Результаты эксперимента (рис. 6) показали, что дрейф макета ИВОГ-МДЛП при постоянной температуре составляет не более $0,05^\circ/\text{ч}$.

Из рис. 6 видно, что абсолютная температура окружающей среды большее воздействие оказывает на значение угловой скорости вращения, измеряемой с использованием макета ИВОГ-МДЛП, чем с помощью ИВОГ с фазовыми модуляторами.

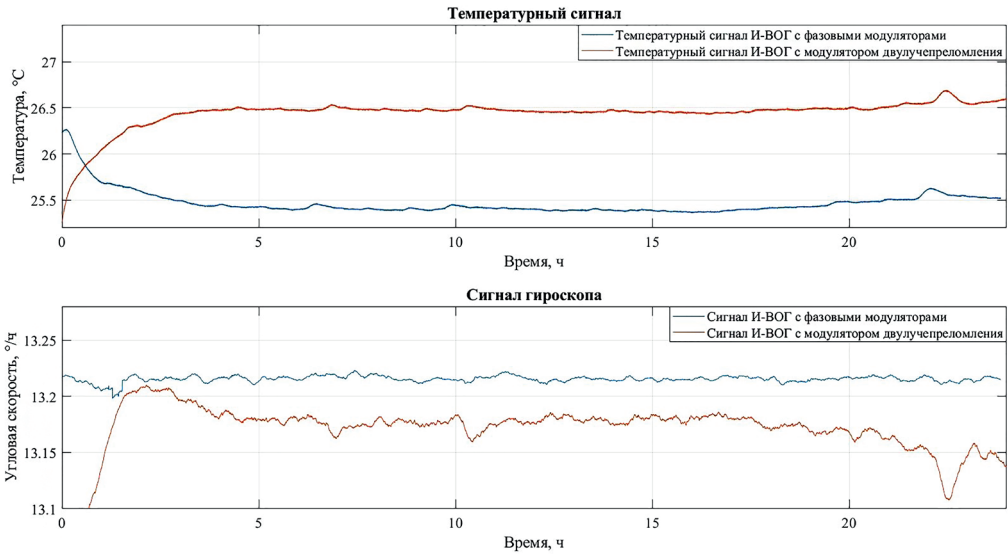


Рис. 6. Графики температуры модулятора и сигнала для ИВОГ с фазовыми модуляторами и для макета ИВОГ-МДЛП

Было проведено термоциклирование макета ИВОГ-МДЛП, в ходе которого макет был помещен в термокамеру в соответствии с представленным термоциклом (рис. 7, а). При этом дополнительное вращение макета вокруг оси чувствительности не осуществлялось и производилось измерение угловой скорости, обусловленной вращением Земли. Целью эксперимента было определить зависимость измеренной с помощью макета ИВОГ-МДЛП угловой скорости вращения от изменения температуры. Результаты эксперимента (рис. 7, в) показывают, что измеренная угловая скорость вращения имеет нелинейные участки в областях температурных изменений.

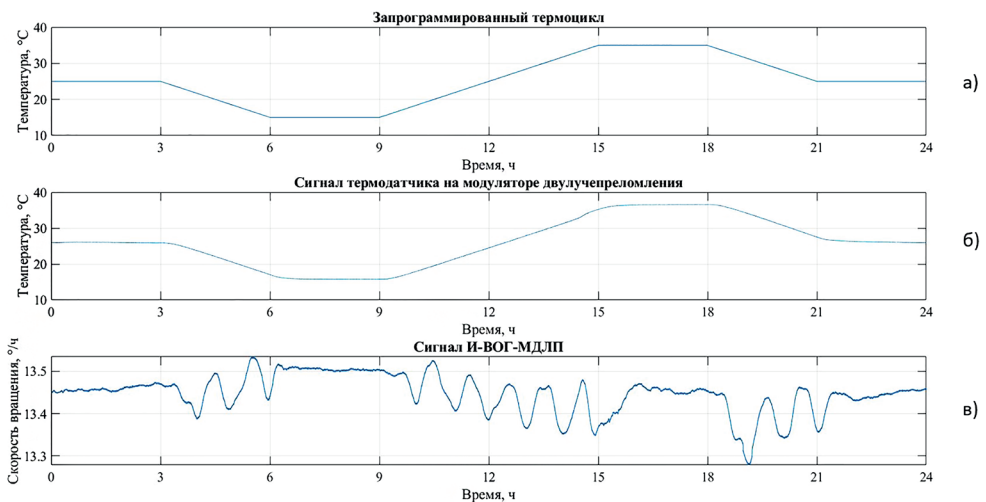


Рис. 7. Графики запрограммированного термоцикла, сигналов термодатчика на модуляторе двулучепреломления, сигнала макета ИВОГ-МДЛП при представленном термоцикле

Обсуждение

Выходной сигнал макета снимался с помощью аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 1-2 MSPS и разрядностью 18 бит следующим образом. На одной «полке» (отрезке выходного сигнала, соответствующем половине периода модулирующего сигнала (рис. 8 [5])) бралось 8 отсчетов, эта группа осреднялась до одного значения с частотой следования 120 кГц. Полученный сигнал демодулировался с целью определения угловой скорости, отсчеты которой также идут на частоте 120 кГц. Далее сигнал осреднялся и децимировался с целью понижения частоты выдачи до 100 Гц.

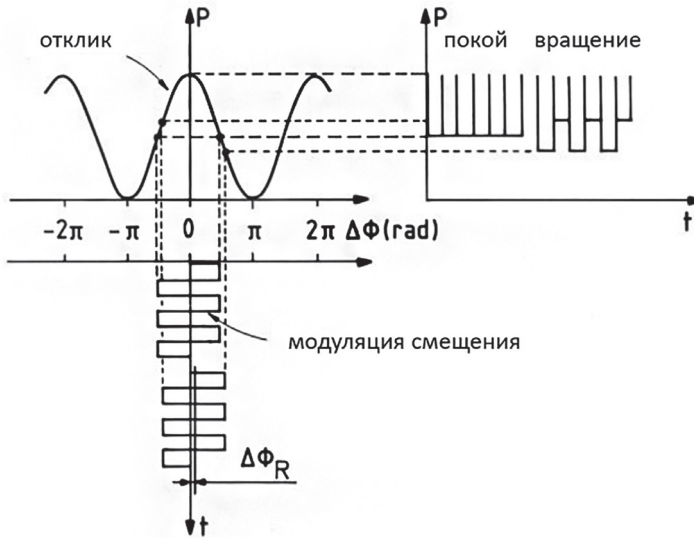


Рис. 8. Прямоугольная модуляция [5]

Как видно из результатов экспериментов, макет ИВОГ-МДЛП при постоянной температуре показывает дрейф не более $0,05^\circ/\text{ч}$, что говорит о работоспособности предлагаемой схемы, но сигнал имеет явные нелинейные участки в областях изменения температуры. Для практического применения устройства необходимо выявить источники нелинейности, а также создать систему термокомпенсации.

Одной из причин возникновения нелинейности может быть паразитная интерференция, вызванная обратными отражениями от соединений в волокнах и в других элементах. Наиболее вероятными источниками являются модулятор, второй ответвитель и волокно между ними.

Нелинейности в модуляторе могут быть вызваны акустическими явлениями в ниобате лития, паразитной фазовой или амплитудной модуляцией, паразитной засветкой при вводе и выводе из кристалла. Перечисленные явления влияют на форму «полки» (рис. 9) сигнала ИВОГ-МДЛП, а поскольку аналого-цифровой преобразователь снимает лишь несколько отсчетов на каждой «полке», ее форма может ощутимо повлиять на получаемые данные.

Волоконный сплавной ответвитель с сохранением поляризации является спектрально зависимым, его коэффициент деления не только отличается для медленной и быстрой осей, но и по-разному изменяется в зависимости от температуры.

В настоящий момент идет работа по исследованию источника нелинейности в выходном сигнале ИВОГ-МДЛП с целью ее минимизации. По результатам этой работы предполагается написание отдельной статьи.

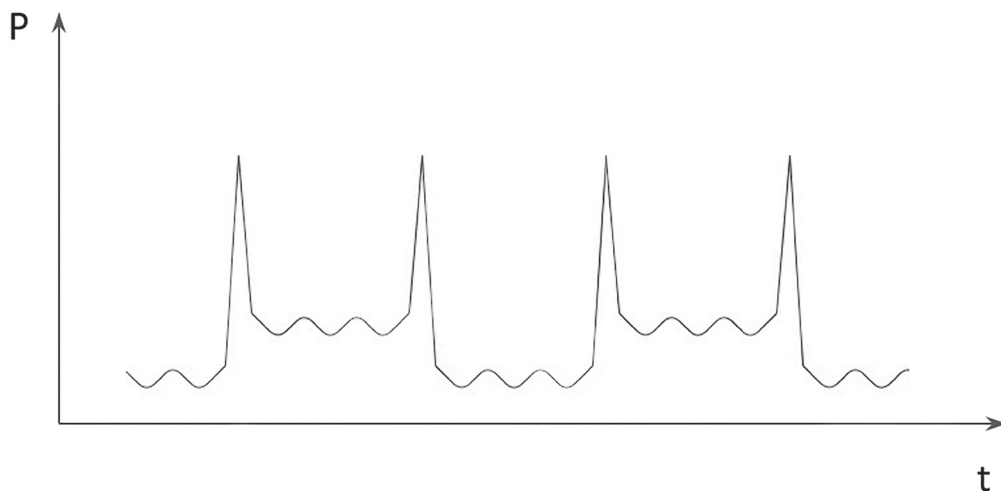


Рис. 9. Сигнал на выходе фотоприемника 1 ИВОГ-МДЛП. Разность высоты «полок» соответствует скорости вращения

Заключение

В настоящей статье вместо двух фазовых модуляторов в схеме ИВОГ предложено использовать модулятор двулучепреломления и исследован макет ИВОГ-МДЛП. При этом дрейф такого ИВОГ не превысил $0,05^\circ/\text{ч}$, и были выявлены нелинейности в его выходном сигнале на участках изменения температуры. Было определено, что, возможно, потребуется создание системы термокомпенсации.

Неоспоримым преимуществом предложенной схемы ИВОГ-МДЛП является отсутствие сложного МИОС, содержащего линейный поляризатор, двулучепреломляющий ответвитель и два фазовых модулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sagnac, G., L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1913, vol. 95, pp. 708–710.
2. Sagnac, G., Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interféromètre tournant, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1913, vol. 95, pp. 1410–1413.
3. Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б. и др. Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты разработки и предварительных испытаний // *Гироскопия и навигация*. 2011. №3 (74). С. 67–74.
4. Lin, X. et al., On the Development and Application of FOG, *Gyroscopes Principles and Applications*, IntechOpen, 2020.
5. Lefevre, H.C., *The fiber-optic gyroscope*, Artech house, 2014.
6. Korkishko, Y.N. et al., Fiber optic gyro for space applications, Results of R&D and flight tests, *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, 2016, pp. 37–41.
7. Yang, B. et al., Results and flight tests of high precision photonic crystal fiber optic gyroscope, *Optical Fiber Technology*, 2020, vol. 60, p. 102365.

8. Wang, Z. et al., Research on Three-Dimensional Magnetic Induced Error Model of Interferometric Fiber Optic Gyro, *IEEE Photonics Journal*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1–12.
9. He, J., Song, N., Jin, J., Parameter Optimization for Noise Performance in Time-Division Multiplexing Fiber Optic Gyroscopes, *Optik*, 2021, p. 168366.
10. Kip, D., Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications, *Applied Physics B: Lasers & Optics*, 1998, vol. 67, no. 2.
11. Noguchi, K., Lithium niobate modulators, *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*, 2011, pp. 151–172.
12. Fang, X. et al., A subnanosecond polarization-independent tunable filter/wavelength router using a Sagnac interferometer, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, vol. 9, no. 11, pp. 1490–1492.
13. Karavaev, P.M. et al., Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates, *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 5, pp. 513–516.
14. Schmidt, R.V., Kaminow, I.P., Metal-diffused optical waveguides in LiNbO₃, *Applied Physics Letters*, 1974, vol. 25, no. 8, pp. 458–460.
15. Toney, J.E., *Lithium Niobate Photonics*, Norwood, MA. Artech House, 2015, p. 288.
16. Кубланова И.Л. и др. Исследование модулятора двулучепреломления на основе ниобата лития // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. №4. С. 613–617.

Kublanova, I.L., Shulepov, V.A., and Kulikov, A.V. (TMO University, St. Petersburg, 196191 Russia) Study of an Interferometric Fiber-Optic Gyroscope with a Birefringence Modulator, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 4 (115), pp. 134–142.

Abstract. The paper describes an interferometric fiber-optic gyroscope (IFOG) of a new configuration, i.e., with a birefringence modulator (IFOG-BRM) is proposed. According to the proposed scheme, a prototype model of the device has been assembled and tested to estimate its drift on a stationary base. Dependence of the IFOG-BRM drift on the temperature has been determined. According to the test results, the error of angular rate estimation is 0.05 deg/h; however, high sensitivity of the device to the absolute temperature variations has been revealed.

Key words: interferometric fiber-optic gyroscope, birefringence modulator, titanium diffusion, IFOG-BRM drift, temperature sensitivity.

Материал поступил 09.09.2021