

УДК 621.376.9
PACS 42.79.Hr

Волоконно-оптический гироскоп с фазовым информационным сигналом

В. М. Афанасьев^{1†}, Р. С. Пономарев^{2,3‡}

¹ Коломенский институт Московского политехнического университета
140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408

² Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

³ Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
614990, г. Пермь, ул. Ленина, 13а

† vamvitali@yandex.ru

‡ rsponomarev@gmail.com

Проведен обзор способов получения и обработки сигнала ВОГ. Предложен гироскоп с формированием фазового информационного сигнала в интерференционном контуре (на оптическом уровне). Выполнен анализ цифровых измерителей разности фаз. Преимуществами гироскопа с фазовым информационным сигналом и цифровой обработкой сигнала являются линейность масштабного коэффициента, увеличение динамического диапазона и уменьшение влияния внешних факторов на результат измерения.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп; модулирующий сигнал; спектр сигнала; цифровой измеритель разности фаз.

Поступила в редакцию 10.03.2021; после рецензии 17.04.2021; принята к опубликованию 20.04.2021

Fiber-optic gyroscope with a phase information signal

V. M. Afanas'ev¹, R. S. Ponomarev^{2,3}

¹ Kolomna Institute of Moscow Polytechnic University, October Revolution St.408, 140402, Kolomna, Russia

² Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm, Russia

³ Perm Federal Research Center UB RAS, Lenina 13a, 614990, Perm, Russia

† vamvitali@yandex.ru

‡ rsponomarev@gmail.com

A review of the methods of obtaining and processing the VOG signal is carried out. A gyroscope with the formation of a phase information signal in an interference loop (at the optical level) is proposed. The analysis of digital phase difference meters is carried out. The advantages of a gyroscope with a phase information signal and digital signal processing are the linearity of the scale factor, an increase in the dynamic range and a reduction in the influence of external factors on the measurement result.

Keywords: fiber-optic gyroscope; the driver of the modulating signal; signal spectrum; digital measuring instrument of a difference phases.

Received 10.03.2021; revised 17.04.2021; accepted 20.04.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-23-35

1. Введение

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) являются датчиками угловой скорости интерферометрического типа, основанными на эффекте Саньяка [1, 2]. Улучшение характеристик волоконно-оптических гироскопов привело к широкому применению их в системах навигации и стабилизации. К достоинствам ВОГ относятся низкая стоимость, малые габариты и вес, малое время готовности после пуска, низкая потребляемая мощность, отсутствие движущихся частей, большой срок службы, высокая чувствительность. Класс точности лучших образцов ВОГ повысился до класса датчиков навигационной точности [3, 4]. Продолжаются исследования с целью уменьшения дрейфа нулевого сигнала и погрешностей гироскопов, а также увеличения диапазона измеряемых угловых скоростей [5, 6, 7].

Гироскопы второго и третьего классов точности находят применение в авионике, робототехнике, автомобилестроении. При этом достигаются малые габариты, вес и стоимость изделия [8, 9, 10].

Дальнейшее развитие ВОГ лежит как в области уменьшения габаритов и повышения точности, так и в расширении класса объектов, на которые они могут быть установлены.

В статье [4] проведен анализ технических характеристик ВОГ наиболее известных зарубежных и отечественных производителей. Отмечено, что для использования ВОГ в перспективных образцах техники требуется улучшение показателей стойкости параметров ВОГ в рабочем диапазоне угловых скоростей и температур, а также в условиях воздействия внешних факторов.

Данная статья посвящена выбору возможного варианта построения ВОГ с формированием фазового помехоустойчивого информационного сигнала и анализу возможностей цифрового измерения разности фаз.

Предложен и теоретически обоснован ВОГ с формированием фазового информационного сигнала в интерференционном контуре.

2. Волоконно-оптические гироскопы

Эффект Саньяка заключается в возникновении разности времен обхода оптического контура светом, распространяющимся по контуру в противоположных направлениях.

Если контур находится в покое, разность фаз между лучами равна нулю. При вращении ВОГ относительно инерциальной системы отсчета возникает разность фаз φ , пропорциональная угловой скорости вращения оптического контура Ω :

$$\varphi(t) = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega(t), \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ – разности фаз; L – длина волоконного контура (м); D – средний диаметр катушки (м); λ – длина волны источника излучения в вакууме (м); c

– скорость света в вакууме (м/с); $\Omega(t)$ – составляющая угловой скорости параллельная оси катушки.

Коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и фазой Саньяка называется оптическим масштабным коэффициентом преобразователя. Его величина определяется диаметром катушки D , длиной волокна контура L и длиной волны источника излучения λ .

Предприятие ЗАО «Физоптика» (Fizoptika) сочетает исследования, разработку и выпуск ВОГ с высокими эксплуатационными характеристиками по низкой цене [8, 9, 10]. Их гироскопы семейства ВГ относятся к ВОГ разомкнутого типа («open-loop» fiber optic gyro). Предприятие «Физоптика» применяет в ВОГ суперлюминесцентный диод (СЛД) на длине волны 0.83 мкм, анизотропное волокно длиной 200-500 м. Для получения сигнала вращения используется фазовая модуляция за счёт периодического растяжения с частотой 72 кГц участка волокна, намотанного на пьезокерамическое кольцо. Блок электроники содержит синхронный детектор с периодической калибровкой нуля. Основные недостатки таких ВОГ: нелинейная характеристика и ограниченный динамический диапазон.

Предприятие ООО «НПК Оптилинк» изготавливает ВОГ минимальной конфигурации обеспечивающих взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре. Схема состоит из источника света (СЛД с длиной волны 1550 нм), деполаризатора, фотодетектора, волоконного разветвителя света, многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ), волоконного контура (ВК) и блока электроники [3, 11, 12].

Многофункциональный интегрально-оптический элемент выполняет три функции: 1) поляризацию проходящего света с целью уменьшения неустойчивости смещения нуля вследствие поляризационной неустойчивости; 2) расщепление световых волн на распространяющиеся по и против часовой стрелки в ВК с равными мощностями с последующей интерференцией на Y-разветвителе; 3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора. Широкополосные фазовые модуляторы расположены на обоих плечах МИОЭ, используются для внесения пилообразной (ступенчатой) компенсирующей разности фаз Саньяка модуляции, обеспечивая работу прибора в режиме замкнутого контура. Обработка сигнала заключается в преобразовании сигнала фотоприёмника в цифровую форму, с последующей цифровой демодуляцией и интегрированием.

Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПАО «ПНППК») имеет многолетний опыт разработки и производства систем навигации и стабилизации для авиационной, морской и наземной техники, включая волоконно-

оптические гироскопы и компоненты для них [13, 14]. Предприятие производит интегрально-оптические многофункциональные схемы для ВОГ на кристалле ниобата лития с поляризующими канальными волноводами, Y-образным разветвителем и электрооптическим модулятором фазы оптического излучения с рабочей длиной волны 1550 ± 10 нм.

В филиале ФГУП ЦЭНКИ «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова» г. Москва разрабатываются ВОГ для ракетно-космической, авиационной, судостроительной и других видов техники класса точности $0.01\text{--}0.001$ °/ч [7, 15]. Разработаны и используются технологические и конструктивные меры для исключения паразитных эффектов, приводящих к регистрации ложной угловой скорости вращения [7]. Гироскоп содержит три контура обратной связи. Первый контур обратной связи предназначен для компенсации разности фаз Саяньюка, второй контур обратной связи – для стабилизации масштабного коэффициента и третий кон-

тур обратной связи – для компенсации влияния на измерительный тракт постоянной составляющей сигнала фотоприёмника. Для повышения точности гироскопа до уровня 0.001 °/ч в опытном образце введены четвёртый и пятый контуры обратной связи, с помощью которых осуществляется подавление паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах.

Дополнительные контуры обратной связи реализованы на основе двух дополнительных низкоэффективных фазовых модуляторов (рис. 1) в многофункциональном интегрально-оптическом элементе (МИОЭ) [7].

Экспериментальный образец ВОГ с длиной световода чувствительной катушки 2000 м и диаметром 134 мм имеет масштабный коэффициент кольцевого интерферометра равный 0.046 рад на $1^\circ/\text{с}$. При измерении проекции угловой скорости вращения Земли использовался макет ВОГ, который имел чувствительную катушку с масштабным коэффициентом 0.0052 радиан на $1^\circ/\text{с}$.

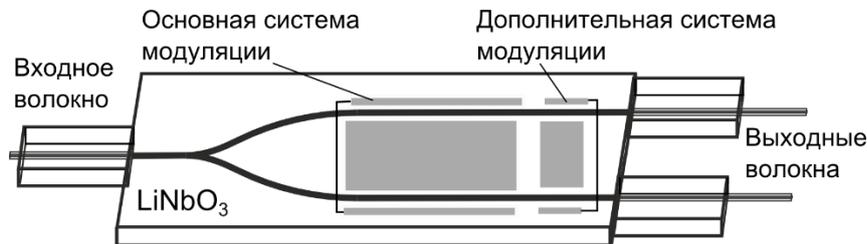


Рис. 1. Топология МИОЭ с основными и дополнительными фазовыми модуляторами

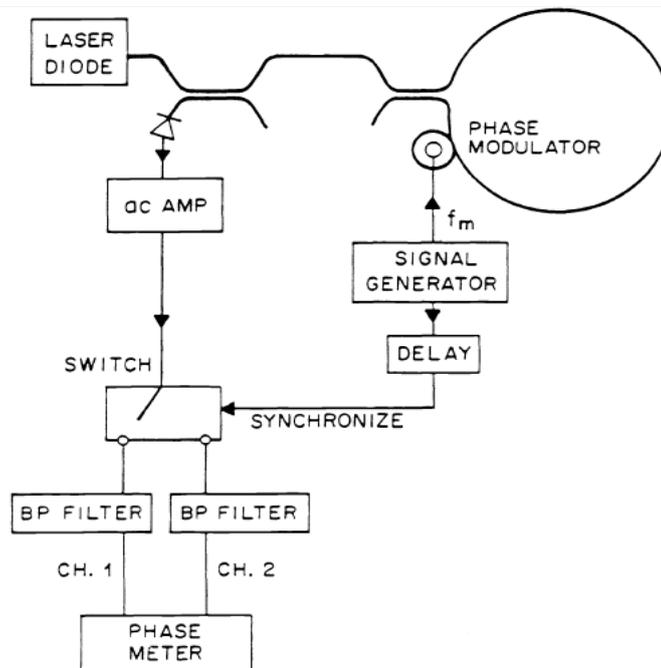


Рис. 2. Функциональная схема ВОГ с линейризацией масштабного коэффициента [17]. Laser diode – источник излучения; Phase modulator – модулятор фазы; Signal generator – генератор модулирующего напряжения частоты f_m ; DELAY – фазовращатель (задержка); AC AMP – полосовой усилитель; Switch – переключатель каналов; BP filter – полосовые фильтры; Phase meter – измеритель сдвига фаз

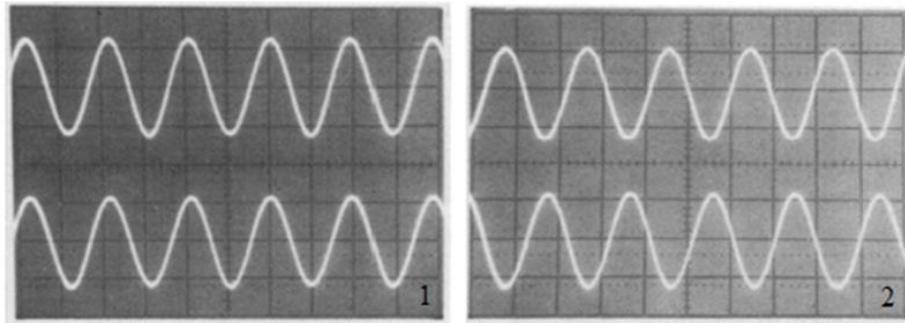


Рис. 3. Формы сигналов на выходах полосовых фильтров при $\Omega=0^\circ/\text{с}$ (1) и $\Omega=40^\circ/\text{с}$ (2) [17]

С целью получения широкого динамического диапазона и линейного масштабного коэффициента в работе [17] предложен ВОГ с открытой петлей и фазовым информационным сигналом. Вариант схемы ВОГ представлен на рис. 2. В гироскопе использован лазерный диод с $\lambda = 830$ нм и кремниевый фотоприёмник. Модулятор фазы – пьезоэлектрический цилиндр с обернутым вокруг него волокном. Модуляция производилась синусоидальным электрическим сигналом на частоте 13 кГц. Электронным переключателем SWITCH осуществляется манипуляция сигналом фотоприёмника. Переключение между каналами производится в моменты времени максимума и минимума модулирующего напряжения.

Информационные сигналы от каналов СН.1 и СН.2 выделяются полосовыми фильтрами на частоте 26 кГц и направляются на цифровой измеритель интервалов времени, который измеряет их разность фаз. Информационные сигналы каналов СН.1 и СН.2 имеют вид:

$$\begin{aligned} I_1 &= K \cos(2\omega t - \varphi), \\ I_2 &= K \cos(2\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где φ – фазовый сдвиг из-за эффекта Саньяка, вызванный вращением; $\omega = 2\pi f_m$ – частота модуляции, K – коэффициент пропорциональности.

Цифровой счётчик интервалов времени измеряет разницу во времени между нулевыми пересечениями двух сигналов (рис. 3). При скорости вращения $\Omega=0$ сигналы от каналов СН.1 и СН.2 совпадают по фазе. При скорости вращения $\Omega=40$ град/сек сдвиг по фазе сигналов от каналов СН.1 и СН.2 составил 180° .

На приведённых осциллограммах виден синусоидальный сигнал без заметных шумов. Получена линейность масштабного коэффициента в диапазоне измерения скоростей до 240 град/сек. Дискретность определения скорости вращения при работе с фильтрами 26 кГц составила 0.82 град/ч.

3. Формирование фазового информационного сигнала в интерференционном контуре

В данной статье авторами предлагается ВОГ с формированием информационного сигнала вида

(2) в интерференционном контуре. Возможные варианты конфигурации одноосных волоконно-оптических гироскопов с фазовым информационным сигналом приведены на рис. 4 и рис. 5.

На рис. 4 представлена оптическая схема ВОГ минимальной конфигурации с многофункциональным интегрально-оптическим элементом. Эта схема обеспечивает взаимность оптических путей (одинаковые оптические пути) для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре. Блок электроники осуществляет энергоснабжение элементов ВОГ, генерацию напряжений модуляции, обработку сигналов с фотодетектора и управление фазовыми модуляторами.

Обозначив интенсивность излучения на выходе лазерного диода I_0 , а также считая, что в схеме и в волоконном контуре отсутствуют потери, и, полагая, что волоконный разветвитель делит энергию точно поровну, получим интенсивность I излучения на фотоприёмнике:

$$I = 0.5I_0(1 + \cos \varphi), \quad (3)$$

где φ – разность фаз световых волн, которая определяется величиной угловой скорости волоконного контура Ω (1).

Напряжение на выходе фотоприёмного устройства с линейной характеристикой пропорционально интенсивности падающего на него излучения:

$$U_{\text{ФП}} = U_m(1 + \cos \varphi). \quad (4)$$

Величина U_m определяется значением мощности излучения лазера, потерями излучения в модуляторе и характеристиками фотоприёмника. Сигнал фотоприёмника без постоянной составляющей равен:

$$U_{\text{ФП}} = U_m \cos \varphi. \quad (5)$$

Подадим на МИОЭ (рис. 4) модулирующее напряжение $U_1 = U_{M1} \sin \omega t$ и напряжение с удвоенной частотой $U_2 = U_{M2} \sin 2\omega t$.

В зависимости от конструкции МИОЭ возможна подача модулирующих напряжений отдельно на оптические каналы. Одновременная подача модулирующих напряжений на оба оптических канала предпочтительна. В этом случае используется

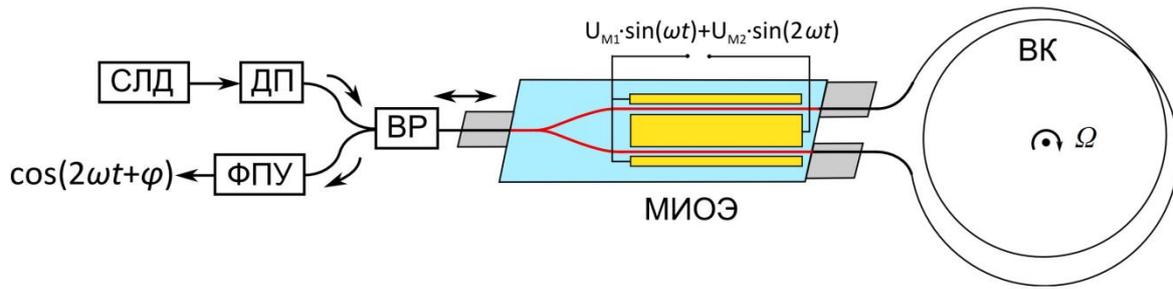


Рис. 4. Оптическая схема одноосного ВОГ минимальной конфигурации: СЛД - суперлюминесцентный диод, ДП – деполаризатор, ВР – волоконный разветвитель, МИОЭ – многофункциональный интегрально-оптический элемент, ВК – волоконный контур, ФПУ – фотоприёмное устройство

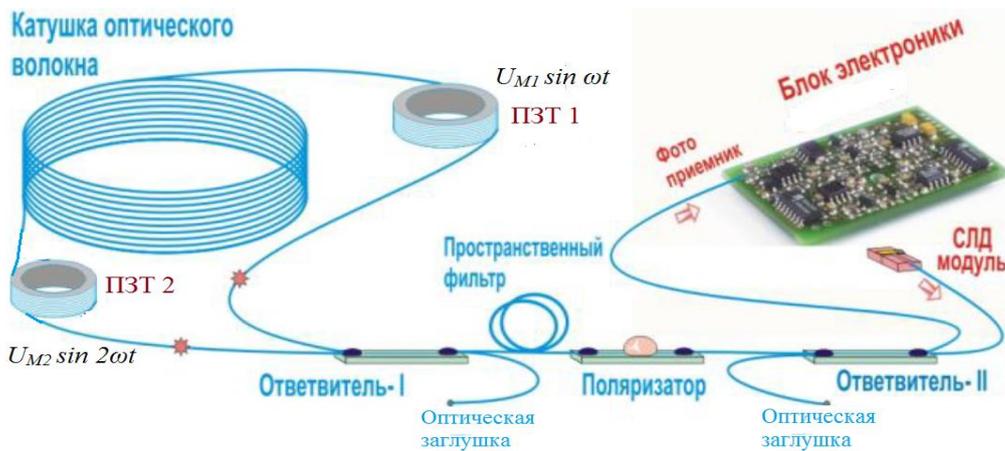


Рис. 5. Волоконно-оптический преобразователь «минимальной конфигурации» ЗАО «Физоптика» [8] с введенным ПЗТ 2 – вторым пьезокерамическим модулятором

серийный МИОЭ и обеспечивается симметричность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре.

Для несимметричной оптической схемы ВОГ (рис. 5) частота модуляции определяется из условия, что время прохождения светом волоконного контура Δt должно быть кратно периоду сигнала модуляции T : $\Delta t = \kappa T$. При этом условии не будет искажений промодулированной интерференционной картины на фотоприёмнике из-за разницы между длинным и коротким путями, связывающими модулятор и разделитель [2, 32].

Волоконно-оптический гироскоп с фазовым информационным сигналом может быть выполнен на базе датчиков вращения прямого преобразования, выпускаемых ЗАО «Физоптика» [8]. Для этого в схему (рис. 5) вводится второй пьезокерамический модулятор ПЗТ 2, отличающийся от ПЗТ 1 резонансной частотой в 2 раза. На модуляторы подаются синусоидальные напряжения, отличающиеся по частоте в 2 раза.

При подаче на МИОЭ рис. 4. (на ПЗТ 1 рис. 5) только модулирующего напряжения $U_1 = U_{M1} \sin \omega t$ на выходе фотоприёмника сигнал равен:

$$U_{\Phi\Pi 1} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t), \quad (6)$$

где индекс модуляции:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_{M1}}{U_{\pi RF1}},$$

$U_{\pi RF1}$ – динамическое полуволновое напряжение на частоте модуляции ω .

В результате преобразований и разложения (6) в ряд Фурье, используя формулу Якоби–Ангера (Jacobi–Anger) получим [2]:

$$\begin{aligned} U_{\Phi\Pi 1} &= U_m \cos \varphi \cos(\Delta\varphi_1 \sin \omega t) - \\ &- U_m \sin \varphi \sin(\Delta\varphi_1 \sin \omega t) = \\ &= U_m J_0(\Delta\varphi_1) \cos \varphi + U_m J_1(\Delta\varphi_1) \times \\ &\times [\cos(\omega t + \varphi) - \cos(\omega t - \varphi)] + \\ &+ U_m J_2(\Delta\varphi_1) [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos(2\omega t - \varphi)] + \\ &+ U_m J_3(\Delta\varphi_1) [\cos(3\omega t + \varphi) - \cos(3\omega t - \varphi)] + \\ &+ U_m J_4(\Delta\varphi_1) [\cos(4\omega t + \varphi) + \cos(4\omega t - \varphi)] + \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

где коэффициенты $J_0(\Delta\varphi_1)$, $J_1(\Delta\varphi_1)$, $J_2(\Delta\varphi_1)$, $J_3(\Delta\varphi_1)$, $J_4(\Delta\varphi_1)$ – функции Бесселя первого рода порядков 0, 1, 2, 3, 4 с $\Delta\varphi_1$ в качестве аргумента. При подаче на МИОЭ рис. 4 (на ПЗТ 2, рис. 5) только модулирующего напряжения $U_2 = U_{M2} \sin 2\omega t$ на выходе фотоприёмника сигнал равен:

$$U_{\Phi\Pi 2} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_2 \sin 2\omega t), \quad (8)$$

где

$$\Delta\varphi_2 = \frac{\pi U_{M2}}{U_{\pi RF2}},$$

$U_{\pi RF2}$ – динамическое полуволновое напряжение на частоте 2ω .

В результате преобразований и разложения (8) в ряд Фурье, используя формулу Якоби–Ангера, получим:

$$\begin{aligned} U_{\Phi\Pi 2} = & \\ = & U_m \cos \varphi \cos(\Delta\varphi_2 \sin 2\omega t) - \\ - & U_m \sin \varphi \sin(\Delta\varphi_2 \sin 2\omega t) = \\ = & U_m J_0(\Delta\varphi_2) \cos \varphi + U_m J_1(\Delta\varphi_2) \times \\ & \times [\cos(2\omega t + \varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)] + \quad (9) \\ + & U_m J_2(\Delta\varphi_2) [\cos(4\omega t + \varphi) + \cos(4\omega t - \varphi)] + \\ & + U_m J_3(\Delta\varphi_2) \times \\ & \times [\cos(6\omega t + \varphi) - \cos(6\omega t - \varphi)] + \dots, \end{aligned}$$

Из анализа спектральных составляющих (7) и (9) следует, что при равенстве коэффициентов составляющих на частоте 2ω можно получить сигнал вида $\cos(2\omega t + \varphi)$. Составляющие $\cos(2\omega t - \varphi)$ в (7) и (9) имеют разные знаки. Информация о скорости вращения ВОГ содержится в сдвиге фазы φ относительно опорного сигнала на частоте 2ω .

Результаты графического решения соотношения (12).

$\Delta\varphi_1$	1.5	1.54	1.59	1.63	1.66	1.69	1.72	1.75
$\Delta\varphi_2$	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
$J_0(\Delta\varphi_1)J_1(\Delta\varphi_2)$	0.2077	0.2153	0.217	0.218	0.2198	0.2188	0.2156	0.21

Амплитуда составляющей сигнала фотоприёмника на частоте 2ω будет максимальна при $\Delta\varphi_1 = 1.63\dots 1.69$ и $\Delta\varphi_2 = 1.2\dots 1.4$. Соотношение (11) является приближенным. При реализации предлагаемого ВОГ с фазовым информационным сигналом напряжения модуляции уточняются при настройке схемы. При этом модулирующие напряжения необходимо получать от одного генератора с использованием делителя или умножителя частоты.

Примечание

1. ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» производит схему интегрально-оптическую многофункциональную для ВОГ с параметрами: длина волны 1550 ± 10 нм; эффективность модуляции (двухтактный режим) 0.9 ± 0.25 рад/В; допустимый уровень постоянного напряжения ≤ 15 В; рабочий диапазон температур от -60 до $+60^\circ\text{C}$. Предприятие изготавливает из радиационно-стойкого оптического волокна типа «Панда» методом квадрупольной или октупольной намотки волоконный контур для ВОГ с длиной волокна от 200 м до 3000 м [14].
2. Компания iXBlue Photonics (Франция) выпускает Y-JPX-LN – многофункциональную ин-

Более точное условие подавления составляющей $\cos(2\omega t - \varphi)$ определяется из описывающего модулированный сигнал выражения:

$$U_{\Phi\Pi} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t + \Delta\varphi_2 \sin 2\omega t). \quad (10)$$

Приближенное условие, не учитывающее из-за малости составляющие с функциями Бесселя третьего и большего порядка, имеет вид:

$$\begin{aligned} J_2(\Delta\varphi_1)J_0(\Delta\varphi_2) + J_2(\Delta\varphi_1)J_2(\Delta\varphi_2) = \\ = J_0(\Delta\varphi_1)J_1(\Delta\varphi_2). \quad (11) \end{aligned}$$

Для более удобного анализа условие (11) приводится к виду:

$$\frac{J_0(\Delta\varphi_2) + J_2(\Delta\varphi_2)}{J_1(\Delta\varphi_2)} = \frac{J_0(\Delta\varphi_1)}{J_2(\Delta\varphi_1)}. \quad (12)$$

Сигнал фотоприемника на выходе фильтра на частоте 2ω при условии (12) равен:

$$\begin{aligned} U_{\Phi\Pi(2\omega)} = \\ = 2U_m J_0(\Delta\varphi_1)J_1(\Delta\varphi_2) \cos(2\omega t + \varphi). \quad (13) \end{aligned}$$

Графическое решение соотношения (12) сведено в таблице. В ней приведены значения $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$, которые обеспечивают равенство (12), и величина амплитуды сигнала фотоприемника (13) на частоте 2ω при $2U_m=1$.

тегрально-оптическую схему (МИОС) для волоконно-оптических гироскопов и интерферометрических датчиков на эффекте Саньяка. Параметры схема Y-JPX-LN: длина волны $1460 \div 1610$ нм; полоса модуляции 30 МГц; полуволновое напряжение 7 В, диапазон рабочих температур от -40 до $+85^\circ\text{C}$ [18].

При фазе у модулирующего напряжения с частотой 2ω равной 180° сигнал на выходе фотоприёмника (10) равен:

$$\begin{aligned} U_{\Phi\Pi} = \\ = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin \omega t - \Delta\varphi_2 \sin 2\omega t). \quad (14) \end{aligned}$$

Сигнал на выходе фильтра с частотой 2ω (13) примет вид:

$$\begin{aligned} U_{\Phi\Pi(2\omega)} = \\ = 2U_m J_0(\Delta\varphi_1)J_1(\Delta\varphi_2) \cos(2\omega t - \varphi). \quad (15) \end{aligned}$$

Информационные сигналы (13) и (15) аналогичны (2). Такие сигналы можно получить в гироскопе, составленном из двух ВОГ с фазовым информационным сигналом (рис. 6). Гироскопы отличаются фазами модулирующего напряжения, на частоте 2ω сдвинутыми на 180° .

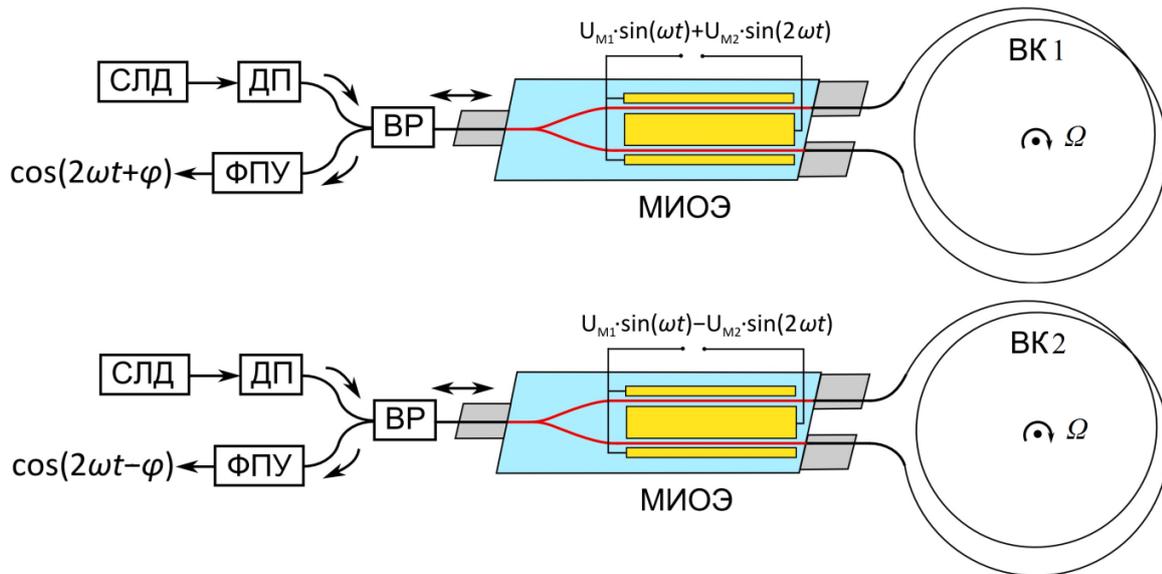


Рис.6. Конфигурация составного волоконно-оптического гироскопа с фазовыми информационными сигналами: СЛД – суперлюминесцентный диод, ДП – деполаризатор, ВР – волоконный разветвитель, МИОЭ – многофункциональный интегрально-оптический элемент, ФПУ – фотоприёмное устройство, ВК 1 и ВК 2 – волоконные контуры

4. Составной волоконно-оптический гироскоп

Информационные сигналы составного волоконно-оптического гироскопа имеют вид (13) и (15), аналогичный (2):

$$\begin{aligned}
 U_{\Phi\Pi1(2\omega)} &= \\
 &= 2U_m J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2) \cos(2\omega t + \varphi), \\
 U_{\Phi\Pi2(2\omega)} &= \\
 &= 2U_m J_0(\Delta\varphi_1) J_1(\Delta\varphi_2) \cos(2\omega t - \varphi). \quad (16)
 \end{aligned}$$

При этом в составном ВОГ можно избежать двойного увеличения габаритов и веса. Для этого следует использовать общие формирователи модулирующих напряжений и один источник лазерного излучения, например, эрбиевый суперлюминесцентный источник оптического излучения. Информационные сигналы (16) обеспечивают двойную чувствительность составного ВОГ, что эквивалентно увеличению в два раза длины волокна катушки или диаметра контура.

При умножении частоты сигналов фотоприёмников, например, удвоение частоты, разность фаз между сигналами (16) увеличится еще в два раза. Умножение частоты сигналов эквивалентно умножению произведения длины оптического волокна катушки на его диаметр (LD). Разность фаз и, соответственно, скорость вращения можно измерить с большей чувствительностью.

5. Серийные измерители разности фаз Ф2-41 и 6000А

Оценить возможности (точность и чувствительность) измерения разности фаз информаци-

онного сигнала (16) можно по параметрам выпускаемых измерителей разности фаз.

Измеритель разности фаз Ф2-41 Краснодарского АО НПК «Мера» предназначен для измерения угла фазового сдвига между синхронными гармоническими сигналами [19]. Прибор может функционировать в составе автоматизированных радиоизмерительных систем. Его параметры: диапазон рабочих частот в режиме «Стандартный» от 20 Гц до 100 МГц; диапазон измерения в режиме «+/-180» от минус 180° до плюс 180°; погрешность измерения при равных уровнях сигналов в частотном диапазоне 20Гц ÷ 20 кГц ±0.05° (3 угл. минуты).

Измерительный блок содержит на входе два аналоговых канала, два АЦП, схемы формирования гетеродинных и тактовых сигналов, управляющий микропроцессор. Работа измерителя основана на использовании метода виртуального вектор-вольтметра (англ. Virtual vector-voltmeter method), дополненной цифровой фильтрацией с применением оконных функций для расчёта разности фаз исследуемых сигналов, представленных в виде отсчётов по времени, полученных с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Фазометр фирмы Clarke-Hess (США) модели 6000А в отличие от фазометров предыдущего поколения не использует традиционный метод измерения «с переходом нуля» (zero-cross-over techniques) [20]. Вместо этого используется преобразование Фурье для выделения фундаментальной частоты из сигналов по обоим входным каналам, а затем вычисляется фазовый сдвиг между ними. Тем самым гармоники и шум эффективно «фильтруются», значительно снижая возможные ошибки измерений.

Фазометр модели 6000А имеет два диапазона измерения: $0 \div 360^\circ$ и $\pm 180^\circ$. Заявленные технические характеристики фазометра: разрешение 0.001° (3.6 угл. сек.); погрешность в полосе $5 \text{ ГГц} \div 2 \text{ кГц} - 0.02^\circ$ (1.2 угл. мин), в полосе $50 \text{ кГц} \div 1 \text{ МГц} - 0.05^\circ$ (3 угл. мин).

Если принять разрешение измерения разности фаз равной погрешности измерения $\Delta\varphi = 0.05^\circ$ (3 угл. мин), то для ВОГ с волоконным контуром с длиной волокна $L = 1000 \text{ м}$ и диаметром контура $D = 100 \text{ мм}$ (0.1 м) с длиной волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$ по формуле (1) получим дискретность измерения скорости вращения $\Delta\Omega$:

$$\Delta\varphi = \Delta\Omega \cdot 2\pi \cdot LD/\lambda c,$$

тогда $\Delta\Omega = \Delta\varphi \cdot \lambda c / 2\pi LD = 0.037^\circ/\text{с} = 0.00065 \text{ рад/с}$.

Следует заметить, что полученная погрешность (чувствительность) измерения угловой скорости вращения не учитывает влияния паразитных факторов [7, 34].

Исходя из максимального сдвига фазы и используя формулу (1), можно вычислить максимальную измеряемую скорость вращения Ω_{max} и выбрать параметры катушки ВОГ (L – длину волоконного контура; D – средний диаметр катушки) при выбранной длине волны источника излучения λ .

6. Цифровая обработка сигналов фотоприемника ВОГ

Развитие техники цифровой обработки сигналов позволило применить оцифровку сигнала фотоприёмника ВОГ с последующей обработкой в сигнальном процессоре.

Компания KVH Industries, Inc. (США) занимается проектированием, изготовлением и продажей волоконно-оптических датчиков скорости по разомкнутой схеме с использованием оптической схемы минимальной конфигурации [21]. Оптическая фазовая модуляция обеспечивается с помощью дискообразного пьезоэлектрического преобразователя, работающего вблизи резонансной частоты 135 кГц. Преобразование излучения в электрический сигнал осуществляет кремниевый фотодиод с трансимпедансным операционным усилителем. До 2002 г. производились ВОГ с использованием аналоговой электроники. С 2003 г. одноосные датчики скорости DSP-3000 используют запатентованную электронику с цифровым процессором обработки сигналов (ЦПОС, DSP). Обработка оцифрованных сигналов значительно улучшила характеристики ВОГ. Гироскоп DSP-3000 в цифровой версии измеряет угловую скорость вращения со скоростью до $\pm 375^\circ/\text{с}$ [22]. Электроника DSP KVH улучшает параметры ВОГ: температурную стабильность; линейность масштабного коэффициента; максимальную измеряемую скорость вращения.

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработал и производит ВОГ замкнутого типа с диапазоном измеряемой угловой скорости $\pm 500^\circ/\text{с}$ при точности до $0.001^\circ/\text{ч}$ (при усреднении $\sim 1000 \text{ с}$). В состав схемы гироскопа входят эрбиевый суперлюминесцентный источник оптического излучения, многофункциональная интегрально-оптическая схема, АЦП, цифровой процессор обработки сигналов и ЦАП [16]. Разработан опытный образец ВОГ уменьшенного габарита. Его среднеквадратическая погрешность за 12 ч при усреднении на 100 с составляет величину менее $0.005^\circ/\text{ч}$.

Особенность волоконно-оптических гироскопов производства АО «Научно-производственное объединение измерительной техники» (АО «НПО ИТ») – отсутствие обратной связи [23]. Для обработки информации волоконно-оптического гироскопа применялась схема синхронного детектирования с контурами стабилизации оптической мощности суперлюминесцентного диода и индекса модуляции $\Delta\varphi$ (амплитуды напряжения модуляции). Основная полоса рабочих частот лежит в диапазоне от 70 до 80 кГц и определяется рабочей частотой применяемого оптического пьезомодулятора. Оптимальное значение индекса модуляции $\Delta\varphi = 1.84$ (при котором масштабный коэффициент слабо чувствителен к внешним воздействиям). В электронном блоке гироскопа оцифровка сигнала производилась сразу после трансимпедансного усилителя с применением цифровой обработки сигнала. Потенциально достижимая точность измерения угловой скорости данным методом составляет 0.01% при частоте дискретизации 50 МГц.

В филиалах компании BEWIS sensing в Китае производятся интерференционные цифровые волоконно-оптические гироскопы с замкнутым контуром серии AgileLight. Они адаптированы к жестким условиям окружающей среды. Широко применяются в гражданских и военных целях [24, 25].

Преимущества гироскопов серии AgileLight:

- оптимальная длина волны увеличивает чувствительность почти на 50% по сравнению с гироскопами с такими же структурой, размером и ценой;

- Self Track technology увеличивает динамический диапазон гироскопа;

- интегрированная технология поляризации волокна уменьшает вносимые потери, увеличивает коэффициент экстинкции и обеспечивает лучшую устойчивость к температуре, механическим ударам и вибрации;

- встроенный высокопроизводительный цифровой чип (технология IntelliProcess) для полной цифровой обработки сигнала и адаптивной технологии фильтрации делает дрейф угловой скорости перемещения на $50 \div 75\%$ ниже, чем у аналоговых гироскопов;

– Технология QuickLaunch реализует мгновенный запуск, не требуя внешней калибровки.

Таким образом, в цифровой версии обработки сигнала современных ВОГ повышаются функциональные возможности блока электроники и улучшаются параметры ВОГ.

7. Цифровые измерители разности фаз

Ранний вариант цифрового измерения фазовых соотношений основан на измерении времени между соответствующими фронтами двух разных сигналов. Погрешности в преобразовании гармонического сигнала в прямоугольный возникают вследствие высокочастотного шума, амплитудной модуляции и смещения нуля. В полученном прямоугольном сигнале информация содержится только во времени фронтов импульса, так как на его формирование влияет только момент пересечения входным сигналом уровня срабатывания компаратора или триггера. В исходном гармоническом сигнале информации намного больше. Современные измерители разности фаз двух сигналов дают более точные результаты.

В радиотехнических системах, таких как локация, навигация и радиоизмерения, используют разность фаз сигналов как первичный источник информации об объекте. Работающие в данных областях специалисты находятся в поиске новых высокоточных методов измерения разности фаз сигналов [26, 27, 28, 29].

В статье [30] детально рассматривается цифровой метод измерения разностей фаз сигналов, содержащих высокочастотные шумы, амплитудную модуляцию и смещение нуля. Устройство содержит два аналого-цифровых преобразователя (АЦП) и микроконтроллер. Микроконтроллер задает частоту работы АЦП, которая приблизительно (но не в точности) в четыре раза превышает частоту входного сигнала. Наличие четырех отсчетов за период позволяет разделить вычислить когерентную и квадратурную компоненты сигнала, т. е. синус и косинус. Фаза сигнала вычисляется микроконтроллером как арктангенс отношения квадратурной компоненты к когерентной.

В работе [31] приведена возможная схема реализации фазометра на отдельных функциональных элементах. От фазометра требуется минимизировать вклад в результат измерения всех мешающих факторов. К ним относят ВЧ и НЧ аддитивный шум, амплитудную модуляцию несущей частоты (мультипликативный шум), смещение нулевого уровня.

Структура каждого из каналов обработки данных содержит АЦП, семь регистров сдвига и два алгебраических сумматора с коэффициентами. В модификации структуры обработки ис-

пользуются низкочастотные фильтры первого порядка на входе каждого канала. В результате такой фильтрации существенно снизились девиации сигнала по амплитуде. Предложенный в статье [31] метод детально исследован путём математического моделирования. Метод обработки кардинально подавляет влияние постоянного смещения, существенно подавляет влияние модуляции, аддитивных гармонических помех и устойчив к воздействию высокочастотного шума.

Возможно использовать как предварительную фильтрацию сигнала, так и окончательную. Предварительная фильтрация производится в полосе исходного сигнала и удаляет шумы сигнала. Окончательная фильтрация применяется к полученному изменению фазы во времени, это низкочастотная фильтрация, ее полоса частот зависит от того, какие частотные девиации интересуют [31].

Высокоскоростные цифровые системы обработки данных позволяют заменить устаревшие аналоговые и цифровые методы измерения разности фаз на более совершенные. Они позволяют с минимальными вычислительными и временными затратами, с большей точностью получить величины измеряемых параметров сигнала.

8. Заключение

Формирование фазового информационного сигнала в интерференционном контуре повышает точность и эксплуатационные параметры предложенного ВОГ.

Современные измерители разности фаз электрических сигналов и возможности их совершенствования позволяют повысить точность и помехозащищенность ВОГ с фазовым информационным сигналом.

Основные преимущества предложенного ВОГ с фазовым информационным сигналом:

1. Частоту модуляции можно выбрать в диапазоне минимальных шумов активных элементов ВОГ («дробовой шум» фотоприёмника, фазовый шум источника излучения [34]). Кроме того, шумы уменьшает настроенный на частоту 2ω фильтр на выходе фотоприёмника.

2. На МИОЭ подаются постоянные и не большие по величине напряжения, что снижает тепловые дрейфовые явления.

3. Характеристика ВОГ линейная.

4. Фазовый информационный сигнал формируется в интерференционном контуре, что обеспечивает максимальное быстродействие ВОГ и устойчивость к значительным ускорениям.

Информационные сигналы составных ВОГ вида (16) позволяют улучшить характеристики устройств измерения скорости вращения объекта:

1. В разомкнутых ВОГ при цифровом синхронном детектировании сигналов (16), один из которых используется как опорное напряжение, выходное напряжение увеличивается в два раза, что эквивалентно увеличению чувствительности датчика также в два раза.

2. В замкнутых системах использование синхронного детектирования сигналов (16) как датчика нулевого значения фазы φ на частотах с минимальными шумами.

3. В составных ВОГ с фазовыми информационными сигналами могут компенсироваться дрейфовые явления, многочисленные сторонние воздействия на ВОГ и паразитные эффекты, приводящие к погрешности измерения угловой скорости вращения [7, 34].

В цифровой версии обработки сигнала ВОГ повышаются функциональные возможности блока электроники и улучшаются параметры ВОГ. Высокоскоростные цифровые системы получения и обработки данных позволяют с минимальными вычислительными и временными затратами получить значения измеряемых параметров сигнала.

Схемы обработки фазового информационного сигнала ВОГ, предложенные в [31, 33], проще и надежнее выпускаемых устройств. Их реализация уменьшит габариты, энергопотребление, массу и температурный дрейф нуля гироскопа.

ВОГ с фазовым информационным сигналом и цифровой обработкой сигнала найдет свою достойную нишу в системах измерения угловой скорости навигационного класса точности.

Исследования выполнены в рамках госзадания №АААА-А19-119042590085-2 «Разработка и создание основ проектирования, диагностики и моделирования оптоэлектронных устройств и их элементов».

Список литературы

1. *Левфер Э. К.* Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы. // Гироскопия и навигация. 2012. № 4 (79). С. 3–9.
2. *Lefevre H.* The Fiber-optic gyroscope. Artech House, 2014. 405 p.
3. *Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е. и др.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2014. № 1 (84). С. 14–25.
4. *Бородина Е. В., Габбасов А. Ф., Парфенов А. Н., Фомин М. Р.* Результаты исследований волоконно-оптического гироскопа. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 46–52
5. *Курбатов А. М.* О новых путях совершенствования волоконно-оптических гироскопов с открытым и закрытым контуром обратной связи // Гироскопия и навигация. 2015. № 1 (88) С. 43–60. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.043-060.
6. *Кробка Н. И., Герди В. Н., Щербицкий Д. С., Горячкин А. М.* Способ расширения области применения волоконно-оптических гироскопов с открытым контуром. // Динамика сложных систем. 2017. Т. 11. № 3. С. 22–26.
7. *Курбатов А. М., Курбатов Р. А., Горячкин А. М.* Повышение точности волоконно-оптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах. // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №2. С. 52–69. DOI: 10.17285/0869-7035.2019.27.2.052-069
8. *Листвин В., Логозинский В.* Миниатюрные волоконно-оптические датчики вращения. Конструкция, технология, характеристики. // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. 2006. № 8 (74). С. 72–77
9. *Логозинский В., Сафутин И., Соломатин В.* Волоконно-оптический датчик вращения с цифровым откорректированным выходом // Гироскопия и навигация. 2001. №3 (34). С. 93–102
10. Волоконно-оптические гироскопы ЗАО «Физоптика» [Электронный ресурс]. URL: <https://fizoptika.ru> (дата обращения: 27.11.2020).
11. НПК «Оптолинк». Каталог продукции. Волоконно-оптические гироскопы. Интегрально-оптические компоненты на LiNbO₃ [Электронный ресурс]. URL: <https://optolink.ru> (дата обращения: 27.11.2020).
12. Прибор ОИУС 1000 ПНСК Инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://scribd.com/document/446547304/Прибор-ОИУС-1000> (дата обращения: 27.11.2020).
13. Гироскопы и навигационные системы [Электронный ресурс]. URL: <https://pnppk.ru> (дата обращения: 09.11.2020).
14. Схема интегрально-оптическая многофункциональная для ВОГ. Волоконный контур для ВОГ [Электронный ресурс]. URL: <http://pnppk.ru> (дата обращения 09.11.2020).
15. *Антонова М. В., Бородулин Д. С., Вольинцев А. А. и др.* Блочный-модульный принцип конструирования бесплатформенных инерциальных блоков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т. 15, № 4. С. 101–110. DOI: 10.14529/ctcr150411
16. *Блажков Б. А., Вольинский Д. В., Рупасов А. В., Степанов А. П., Унтилов А. А.* Высокоточные волоконно-оптические гироскопы. Современное состояние и перспективы развития // Труды ВСПУ-2019, Москва, 2019. С. 1330–1335 [Электронный ресурс] URL:

- <https://vspu2019.ipu.ru/files/Proceedings/1330.pdf> (дата обращения: 14.11.2020)
17. Kim B. Y., Shaw H. J. All- fiber-optic gyroscope with linear scale factor using phase detection // *Fiber Optic and Laser Sensors*. 1984. Vol. 478. P. 142–148.
 18. Y-JPX-LN – интегрально-оптическая схема для ВОГ [Электронный ресурс]. URL: <http://sphotronics.ru> (дата обращения 09.11.2020).
 19. Измеритель разности фаз Ф2-41. Руководство по эксплуатации. МЕРА.411155.005.РЭ, 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npkmera.ru/i/doc/Ф2-41.pdf> (дата обращения: 01.11.2020).
 20. Измеритель фазы (фазометр) Model 6000A фирмы CLARKE-HESS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vltest.ru/catalog/izmeritelnoe/izmeriteli-fazy> (дата обращения: 01.11.2020).
 21. Emge S., Monte T., Brunner J., Rossi J., Miller R., Ganesan K. Advances in open-loop FOG sensors. KVH Industries, Inc., 2006. P. 3–8
 22. DSP-3000 FOG High-performance, Single-axis Fiber Optic Gyro [Электронный ресурс]. URL: <https://canalgeomatics.com/content...2019/11...dsp-3000-fog> (дата обращения: 14.11.2020).
 23. Пестунов А. Н., Ковалева Е. В. Разработка канала измерения угловой скорости на основе цифрового волоконно-оптического гироскопа // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2017. Т. 4. № 1. С.78–83
DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.1.78
 24. Fiber optic gyroscope [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bwsensing.com/product-7.html> (дата обращения: 30.11.2020).
 25. China optic gyroscope factories [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecer.com/china-optic-gyroscope> (дата обращения: 30.11.2020).
 26. Воронов А. С. Измерение разности фаз сигналов. Горизонты образования. 2007. № 9. С. 1–2.
 27. Дамдинова Д. Б., Полетаев А. С., Ченский А. Г. Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов. // *Вестник СибГУТИ*. 2016. № 2. С. 87–97.
 28. Берников Б. О., Бокианский В. Б., Вязовых М. В., Федоров С. В. Методы повышения точности измерения дальности в лазерных фазовых дальномерах. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2012. С. 131–141.
 29. Игнатъев В. К., Никитин А. В., Бернардо-Сапрыкин В. Х., Орлов А. А. Измерение разности фаз квазигармонических сигналов в реальном времени. // *Наука и образование*. 2013. № 7. С. 241–256. [Электронный ресурс] URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/588392.html> (дата обращения: 25.11.2020).
DOI: 10.7463/0713.0588392
 30. Жмудь В. А., Семибаламут В. М., Димитров Л. В. Повышение точности и надежности измерения разности фаз // *Автоматика и программная инженерия*. 2017. №1 (19). С. 83–96.
 31. Жмудь В. А., Семибаламут В. М., Димитров Л. В. Дополнительное повышение точности измерения разности фаз путем вторичной синхронизации отсчетов разностной частоты // *Автоматика и программная инженерия*. 2017. №1(19). С. 97–107.
 32. Merlo S., Norgle M., Donati V. Fiber gyroscope principles / *Electrooptics Group University of Pavia, Italy*. [Электронный ресурс] URL: <http://www.3.unipv.it/donati/papers/2c.pdf> (дата обращения: 18.12.2020)
 33. Папырина Э. Ю., Вольхин И. Л., Никулин К. В. Модернизация устройства первичной обработки данных гироскопа // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2019. № 3. С.45–51. DOI: 10.17072/1994-3598-2019-3-45-51
 34. Стариков С. С., Кель О. Л., Вольхин И. Л. Измерение шумов волоконно-оптических источников излучения // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2019. № 1. С. 66–73. DOI: 10.17072/1994-3598-2019-1-66-73

References

1. Lefèvre H. C. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective. *Gyroscopes and Navigation*. 2012, vol. 3 (4), pp. 223–226.
2. Lefevre H. The Fiber-optic gyroscope, *Artech House*, 2014, 405 p.
3. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Prilutsky V.E., Ponomarev V.G., Moreva I.V., Skripnikov S.F. and others. Strapdown inertial navigation systems based on fiber-optic gyroscopes. *Gyroscopy and Navigation*. 2014. № 1 (84). pp. 14–25
4. Borodina E. V., Gabbasov A. F., Parfenov A. N., Fomina M. R. Research results of the fiber-optic gyro. *Proc. of The Tula State University. Technical science*, 2019, no. 8. pp. 46–52
5. Kurbatov A. M. New methods of improving fogs with open and closed loops. *Gyroscopes and Navigation*. 2015. № 1 (88). pp.43–60. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.043-060.
6. Krobka N. I., Gerdi V. N., Scherbitsky D. S., Goryachkin A. M. A method of extending the scope of open-loop fiber-optic gyroscopes. *Radiotekhnika. Dynamics of complex systems*. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 22–26 (In Russian)
7. Kurbatov A. M., Kurbatov R. A., Goryachkin A. M. Fiber-optic gyroscope accuracy improvement by suppressing the parasitic effects in integrated optic. phase-shift modulators, *Gyroscopes and Navigation*, 2019, vol. 27, no. 2 (105),

- pp. 52–69. DOI: 10.17285/0869-7035.2019.27.2.052-069
8. Listvin V., Logoziński V., Miniature fiber-optic torque transducers. Design, technology, characteristics. *ELECTRONICS: Science, Technology, Business*. 2006. no. 8(74). pp. 72–77.
 9. Logoziński V., Safutin I., Solomatin V. Fiber-optic rotation sensor with digitally corrected output. *Gyroscopes and Navigation*, 2001, no. 3 (34), pp. 93–102
 10. Smallest Fiber Optic Gyros. “Fizoptika” FOGs [Electronic resource]. URL: <https://fizoptika.com> (access date 27.11.2020)
 11. Production company “Optolink”. Single axis fiber-optic gyroscopes. Integrated optical components [Electronic resource]. URL: <https://optolink.ru> (access date 27.11.2020)
 12. Device OIUS 1000 PNSK Operating instructions [Electronic resource]. URL: <https://scribd.com/document/446547304/Device-OIUS-1000> (access date 27.11.2020).
 13. PJSC Perm scientific and production instrument-making company, 2008–2020. *Gyrocompasses and navigation systems*. URL: <http://pnppk.ru> (access date 09.11.2020).
 14. Integrated Optical Circuit for FOG. Fiber Coil for FOG. URL: <http://pnppk.ru> (access date 09.11.2020).
 15. Antonova M.V., Borodulin D.S., Volyntsev A.A., Kovaleva E.Yu., Novikov L.Z., Tereshkin A.I., Zhegalin I.I. Modular Configured Design of Strapdown Inertial Units. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 101–110. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150411
 16. Blazhkov B. A., Volynsky D. V., Rupasov A.V., Stepanov A. P., Untilov A. A. High-precision fiber-optic gyroscopes. *Current state and development prospects. Proc. of XIII All-Russian meeting on control issues*. Moscow, 17–20 June 2019, pp. 1330–1335 [Electronic resource]. URL: <https://vspu2019.ipu.ru/files/Proceedings/1330.pdf> (access date 14.11.2020)
 17. Kim B. Y., Shaw H. J. All- fiber-optic gyroscope with linear scale factor using phase detection. *Fiber Optic and Laser Sensors*, 1984, vol. 478, pp. 142–148.
 18. Y-JPX-LN – Integrated optical circuit for FOG [Electronic resource]. URL: <http://sphotonics.ru> (access date 23.05.2020).
 19. Measuring the phase difference F2-41. User manual [Electronic resource]. URL: <http://www.npkmera.ru/i/doc/Ф2-41.pdf> (access date 01.11.2020).
 20. The phase meter Model 6000A firms CLARKE-HESS. [Electronic resource]. URL: <http://www.vltest.ru/catalog...izmeritelnoe...izmeriteli-fazy/> (access date 01.11.2020).
 21. Emge S., Monte T., Brunner J., Rossi J., Miller R., Ganesan K. *Advances in open-loop FOG sensors*. KVH Industries, Inc., 2006. P. 3–8
 22. DSP-3000 FOG High-performance, single-axis fiber optic gyro [Electronic resource]. URL: <https://canalgeomatics.com...content...2019/11...dsp-3000-fog...> (access date 14.11.2020).
 23. Pestunov A. N., Kovaleva E. V. Development of angular velocity measurement channel based on digital fiber-optic gyroscope. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2017. V. 4. № 1. P.78–83. DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.1.78
 24. Fiber optic gyroscope [Electronic resource]. URL: <http://www.bwsensing.com/product-7.html> (access date 30.11.2020).
 25. China optic gyroscope factories [Electronic resource]. URL: <http://www.ecer.com/china-optic-gyroscope> (access date 30.11.2020).
 26. Voronov A. S. Measuring the phase difference of signals. *Horizons of Education*, 2007, №. 9, pp. 1–2 (In Russian).
 27. Damdinova D. B., Poletaev A. S., Chensky A. G. Accuracy comparison of methods for measuring a phase shift of quasi-harmonic signals. *Bulletin of SibGUTI*, 2016, no. 2, pp. 87–97.
 28. Bernikov B. O., Bokshansky V. B., Vyazov M. V., Fedorov S. V. Methods for improving the accuracy of distance measurement in laser phase range finders. *Bulletin of the Bauman Moscow state technical University. Series: Instrument making*. 2012. pp. 132–142.
 29. Ignat'ev V. K., Nikitin A. V., Bernardo-Saprykin V. H., Orlov A. A. Measuring phase difference of quasi-harmonic signals in real time. *Science and Education*, 2013, no. 7, pp. 241–256. DOI: 10.7463/0713.0588392. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/588392.html> (access date: 25.11.2020)
 30. Zhmud V. A., Semibalamut V. M., Dimitrov L. V. Improving the accuracy and reliability of measuring the phase difference. *Automatics and Software Engineering*, 2017, no. 1 (19), pp. 83–96 (In Russian).
 31. Zhmud V.A., Liapidevsky V.M., Dimitrov L.V. Additional increase in the accuracy of measuring the phase difference by secondary synchronization of samples of the difference frequency. *Automatics and Software Engineering*, 2017, no. 1 (19), pp. 97–107 (In Russian).
 32. Merlo S., Norgle M., Donati V. *Fiber gyroscope principles*. Electrooptics Group University of Pavia, Italy [Electronic resource]. URL: <http://www.3.unipv.it/donati/papers/2c.pdf> (accessed 18.12.2020)

33. Papyrina E. Y., Volkhin I. L., Nikulin K. V. Gyrocompass primary data processing device modernization. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 3, pp. 45–51 (In Russian). DOI: 10.17072/1994-3598-2019-3-45-51
34. Starikov S. S., Kel O. L., Volkhin I. L. Noise measurement of fiber-optical radiation sources. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 1, pp. 66–73 (In Russian). DOI: 10.17072/1994-3598-2019-1-66-73

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Афанасьев В. М., Пономарев Р. С. Волоконно-оптический гироскоп с фазовым информационным сигналом // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 2. С. 23–35. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-23-35

Please cite this article in English as:

Afanas'ev V. M., Ponomarev R. S. Fiber-optic gyroscope with a phase information. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 2, pp. 23–35. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-23-35

Сведения об авторах

1. *Виталий Михайлович Афанасьев*, канд. тех. наук, консультант, Коломенский институт Московского политехнического университета, ул. Октябрьской революции, д. 408, Коломна, 140402
2. *Роман Сергеевич Пономарев*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990

Author information

1. *Vitaliy M. Afanas'ev*, Candidate of Engineering Sciences, Consultant, Kolomna Institute of Moscow Polytechnic University, Ocyabrskoy Revolutsii St. 408, 140402, Kolomna, Russia
2. *Roman S. Ponomarev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm, Russia