



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 4
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(4)

Научная статья
УДК 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-003168
EDN: RGVGLG

Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения шума в выходном сигнале: влияние параметров системы на шумоподавление

Д. М. Спиридонов^{1,2}✉, Т. Е. Вадивасова¹, Д. В. Обухович²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

²ООО НПК «Оптолинк», Саратов, Россия

E-mail: ✉spiridonov_d_m@mail.ru, vadivasovate@yandex.ru, obuhovichdv@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2025, принята к публикации 26.02.2025,
опубликована онлайн 7.03.2025, опубликована 31.07.2025

Аннотация. Цель настоящей работы заключается в определении оптимальных параметров согласования сигналов измерительных каналов системы снижения шума выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа. **Методы.** В работе анализируется схема волоконно-оптического гироскопа с системой снижения уровня шума выходного сигнала на основе вычитания сигнала опорного измерительного канала, содержащего шум интенсивности источника оптического излучения, из сигнала основного измерительного канала, содержащего полезный информационный сигнал и шумовую составляющую. Определено четыре условия согласования сигналов, невыполнение которых может привести к снижению эффективности шумоподавления или увеличению уровня шума. Для каждого из рассматриваемых условий определены параметры системы снижения шума и выведены математические зависимости их влияния на уровень спектральной плотности шума в выходном сигнале гироскопа, проведено математическое моделирование в широком диапазоне изменения рассматриваемых параметров. Для подтверждения полученных результатов проведена компьютерная симуляция работы цифрового волоконно-оптического гироскопа с замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости и системой снижения шума выходного сигнала в условиях варьирования параметров системы снижения уровня шума. **Результаты.** Для каждого рассматриваемого параметра получены форма и степень влияния на уровень шума, а также определено оптимальное значение каждого параметра, при котором наблюдается минимальное значение спектральной плотности шума в выходном сигнале. **Заключение.** Проведенное исследование подтверждает правильность вывода аналитических выражений, описывающих формирование шумовой составляющей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа с системой снижения уровня шума в условиях неполного согласования сигналов основного и опорного измерительных каналов. Получена количественная оценка требований к точности этого согласования по таким параметрам, как согласование во времени, согласование по интенсивности сигнала, по полосе пропускания и по состоянию поляризации оптического излучения.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, шум выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа, компенсация шума, шумоподавление, математическая модель, корреляция.

Для цитирования: Спиридонов Д. М., Вадивасова Т. Е., Обухович Д. В. Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения шума в выходном сигнале: влияние параметров системы на шумоподавление // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 4. С. 497–512. DOI: 10.18500/0869-6632-003168. EDN: RGVGLG

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Fiber optic gyroscope with output signal noise reduction system: effect of system parameters on noise reduction

D. M. Spiridonov^{1,2}✉, T. E. Vadivasova¹, D. V. Obukhovich²

¹Saratov State University, Russia

²RPC “Optolink”, Saratov, Russia

E-mail: ✉spiridonov_d_m@mail.ru, vadivasovate@yandex.ru, obuhovichdv@mail.ru

Received 22.01.2025, accepted 26.02.2025, available online 7.03.2025, published 31.07.2025

Abstract. The purpose of this work is to determine the optimal parameters for matching the signals of the measuring channels of a fiber-optic gyroscope with an output signal noise reduction system. *Methods.* The paper analyzes the circuit of a fiber-optic gyroscope with an output signal noise reduction system based on subtracting the signal of the reference measuring channel containing the intensity noise of the optical radiation source from the signal of the main measuring channel containing the useful information signal and the noise component. Four signal matching conditions are defined, failure to meet which can lead to a decrease in the noise suppression efficiency or an increase in the noise level. For each of the conditions under consideration, the parameters of the noise reduction system are determined and mathematical expressions are derived for the dependence of their influence on the level of spectral density of noise in the output signal of the gyroscope, mathematical modeling is carried out in a wide range of variation of the parameters under consideration. To confirm the obtained results, a computer simulation of the operation of a digital fiber-optic gyroscope with a closed feedback loop for measuring angular velocity and an output signal noise reduction system was carried out under conditions of varying the parameters of the noise reduction system. *Results.* For each parameter under consideration, the shape and degree of influence on the noise level were obtained, and the optimal value of each parameter was determined, at which the minimum value of the spectral density of noise in the output signal was observed. *Conclusion.* The conducted study confirms the correctness of the derivation of analytical expressions describing the formation of the noise component of the output signal of a fiber-optic gyroscope with a noise reduction system under conditions of incomplete matching of the signals of the main and reference measuring channels. A quantitative assessment of the requirements for the accuracy of this matching was obtained for such parameters as: time matching, matching by signal intensity, by bandwidth and by the state of polarization of optical radiation.

Keywords: fiber optic gyroscope, output noise of fiber optic gyroscope, noise compensation, noise suppression, mathematical model, correlation.

For citation: Spiridonov DM, Vadivasova TE, Obukhovich DV. Fiber optic gyroscope with output signal noise reduction system: effect of system parameters on noise reduction. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(4):497–512. DOI: 10.18500/0869-6632-003168

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) на современном уровне развития техники является одним из основных и наиболее перспективных с точки зрения дальнейшего улучшения точностных характеристик, видов датчиков угловой скорости, применяемых в системах ориентации, навигации и стабилизации подвижных объектов [1–3]. Задача уменьшения шумовой составляющей в выходном сигнале ВОГ является одной из приоритетных задач по повышению точностных характеристик изделий, в которых они применяются. Как известно, порог чувствительности ВОГ и долговременная стабильность нулевого сигнала ВОГ в значительной степени зависит от его конструктивных характеристик — длины и диаметра волоконного контура (ВК) интерферометра Саньяка, типа укладки волокна в контур и так далее, а также свойств оптических элементов схемы: ширины спектра источника излучения, отсутствия внутренних дефектов, низкого уровня h — параметра волокна [4] — и качества электронной элементной базы — собственных шумов операционных усилителей, аналого-цифровых преобразователей и так далее. Наиболее оптимальными по сочетанию этих параметров при современном уровне технологий являются ВОГ

с длиной контура 1000...2000 м при диаметре ВК 100...150 мм, намотанные квадрупольным способом из волокна, сохраняющего состояние поляризации, с широкополосным источником оптического излучения: суперлюминисцентным диодом или эрбиевым суперлюминисцентным волоконным источником большой выходной мощности. Анализ технической документации на серийно выпускаемые ВОГ показывает, что в зависимости от перечисленных выше параметров и особенностей, а также применения нестандартных конструктивных, схемотехнических или алгоритмических подходов конкретные значения таких параметров, как спектральная плотность шума (СПШ), случайная составляющая (долговременная стабильность) нулевого сигнала (НС) в среднем находятся в диапазонах значений: СПШ – 0.1...0.03 ($^{\circ}/\text{ч}$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$, случайная составляющая НС в диапазоне рабочих температур (три среднеквадратических отклонения при времени осреднения 100 с) – 0.06...0.15 $^{\circ}/\text{ч}$. В работах [4, 5] рассмотрены основные источники шума в ВОГ и определен источник, вносящий наибольший вклад в результирующий шум выходного сигнала ВОГ. Различные методы уменьшения влияния этого источника шума представлены в работах [6, 7]. В работах [8, 9] были показаны результаты математического моделирования, а также результаты натурных испытаний макета ВОГ с системой снижения уровня шума в выходном сигнале. Данная система основана на вычитании сигнала опорного измерительного канала, содержащего только шумовую составляющую из сигнала основного измерительного канала, содержащего как полезную информационную, так и шумовую составляющие. Было показано, что применение данного метода позволяет понизить уровень спектральной плотности шума выходного сигнала ВОГ приблизительно в два раза. В абсолютных величинах применение данной системы позволило достичнуть значений СПШ на уровне 0.02 ($^{\circ}/\text{ч}$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$, а также улучшить показатель случайной составляющей НС при постоянной температуре [9]. В данной работе определены причины, приводящие к ухудшению работы системы снижения шума при изменении параметров. Получены математические выражения, описывающие зависимость СПШ выходного сигнала ВОГ от параметров сигналов измерительных каналов. Проведено математическое моделирование, позволившее получить количественные оценки влияния различных параметров на эффективность работы системы снижения шума.

1. Обобщенное аналитическое математическое выражение для спектральной плотности шумовой компоненты угловой скорости

К фундаментальным источникам шума, вносящим основной вклад в шумовую составляющую выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа, относятся: 1 – дробовый шум фототока, 2 – дробовый шум темнового тока фотодиода, 3 – тепловой шум нагружочного сопротивления фотодиода, 4 – шум интенсивности источника оптического излучения. Спектральные плотности шумового тока этих источников описываются выражениями (1)–(4) [4, 5, 10]:

$$i_{n1} = \sqrt{e\eta P_0}, \quad (1)$$

$$i_{n2} = \sqrt{ei_d}, \quad (2)$$

$$i_{n3} = \sqrt{\frac{4kT}{R}}, \quad (3)$$

$$i_{n4} = \sqrt{\frac{\lambda^2}{2K_f c \Delta \lambda}} \eta P_0, \quad (4)$$

где i_n – спектральная плотность шума, определяемая как корень из дисперсии в ограниченной полосе частот и приведенной к этой полосе частот [11, 12], А/ $\sqrt{\text{Гц}}$; e – заряд электрона, Кл;

η — эффективность (токовая чувствительность) фотодиода, (0.93 А/Вт); P_0 — мощность оптического излучения, падающего на фотодиод при нулевой разности фаз встречных световых волн (88 · 10⁻⁶ Вт); i_d — темновой ток фотодиода, (20 · 10⁻⁹ А); k — постоянная Больцмана, Дж/К; T — температура окружающей среды, (293 К); R — сопротивление резистора преобразователя ток-напряжение, (5000 Ом); λ — средняя длина волны оптического излучения, (1565 · 10⁻⁹ м); c — скорость света в вакууме, м/с; K_f — коэффициент формы спектра оптического излучения [13], (2); $\Delta\lambda$ — ширина спектра излучения, (35 · 10⁻⁹ м). Численные значения параметров, приведенные в скобках и использованные при дальнейших расчетах, соответствуют значениям параметров в работе [9].

Результирующее выражение шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ, построенного по схеме так называемой «минимальной конфигурации» с учетом (1)–(4), имеет вид:

$$\delta\omega_n = M \frac{\sqrt{i_{n1}^2 \frac{1}{2}(1 + \cos\varphi) + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 + i_{n4}^2 \frac{1}{4}(1 + \cos\varphi)^2}}{\eta \frac{1}{2} P_0 \sin\varphi}, \quad (5)$$

где $\delta\omega_n$ — СПШ угловой скорости, (рад/с)/√Гц; $M = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL}$ — величина, обратная к оптическому масштабному коэффициенту эффекта Саньяка, рад/с; D — диаметр кольцевого многовиткового волоконного контура, (0.135 м); L — длина волоконного контура, (1070 м); φ — разность фаз встречных световых волн, рад.

Множитель в первом и четвертом слагаемых выражения (5) описывает зависимость мощности падающего на фотодиод излучения от разности фаз φ встречных световых волн в интерферометре Саньяка. Знаменатель выражения (5) — функция чувствительности выходного сигнала ВОГ от мощности оптического излучения P_0 и разности фаз φ встречных световых волн. Напомним, что в современных ВОГ с вспомогательной фазовой модуляцией и замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости φ соответствует глубине вспомогательной фазовой модуляции i , как правило, равно $\pi/2$.

Численный анализ выражения (5) и отдельных его составляющих, проведенный в работе [10], показывает, что увеличение мощности оптического излучения P_0 в диапазоне от 5 до 50 мкВт приводит к значительному снижению уровня шума выходного сигнала. В то же время дальнейшее уменьшение шума при росте мощности излучения практически отсутствует, так как ограничено вкладом шума интенсивности источника излучения, не зависящего от мощности P_0 , в результирующий шум.

В работах [8, 9] рассмотрен метод снижения уровня шума в выходном сигнале ВОГ, основанный на вычитании шума интенсивности источника оптического излучения из полезного сигнала. Для этого в схему ВОГ вводится дополнительный измерительный канал, предназначенный для измерения шума интенсивности источника оптического излучения. Сигнал, измеренный этим каналом, после определенной цифровой обработки вычитается из основного информационного сигнала ВОГ. На рис. 1 представлена функциональная блок-схема ВОГ со схемой снижения шума, включающая основной измерительный канал (main measuring channel, ИК1), выполненный по схеме интерферометра Саньяка, выходной сигнал которого включает как полезную составляющую, содержащую информацию об измеренной угловой скорости, так и шумовую составляющую, и дополнительный, опорный, измерительный канал (reference measuring channel, ИК2), выходной сигнал которого содержит только шумовую составляющую.

Как видно из рис. 1, оба измерительных канала имеют общий источник оптического излучения — суперлюминесцентный диод (СЛД), который, согласно [5, 10], вносит основной вклад в результирующий шум выходного сигнала ВОГ (шум источника излучения описывается выражением (4)). Также каждый измерительный канал содержит собственный фотоприемник,

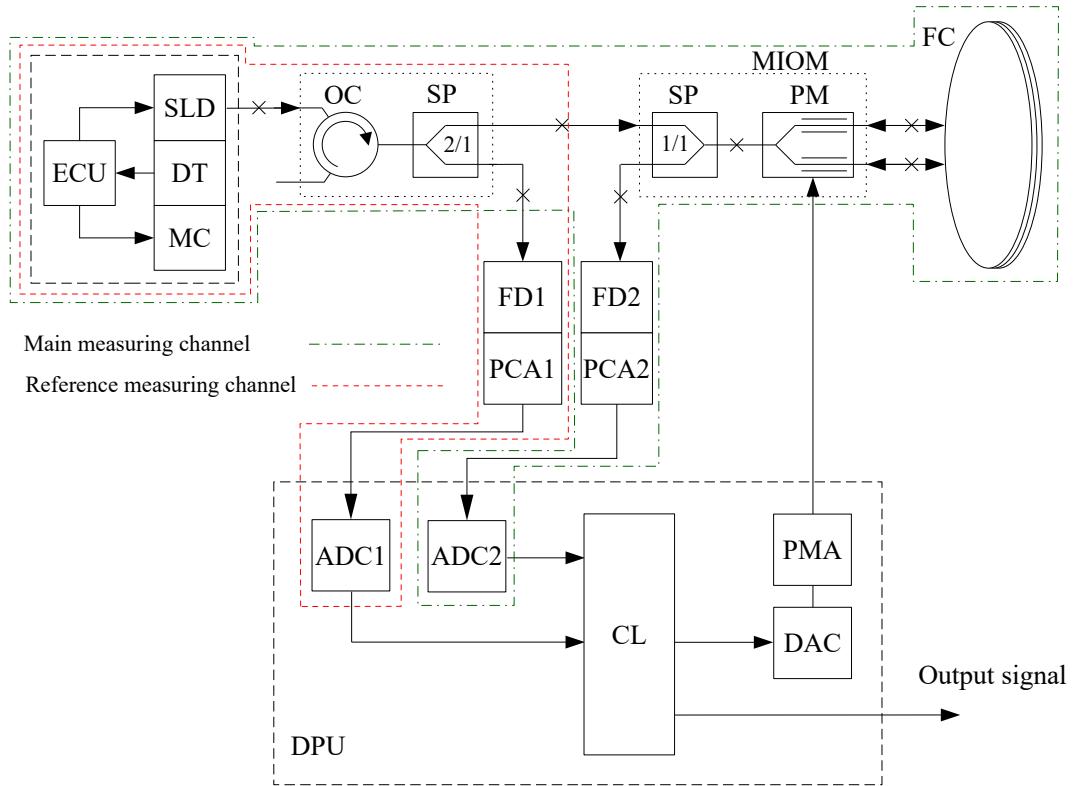


Рис. 1. Блок-схема ВОГ с системой снижения шума выходного сигнала, где ЕСУ – блок управления излучателем (БУИ), СЛД – суперлюминесцентный диод (СЛД), ДТ – датчик температуры (ДТ), МС – микроохладитель (МО), ОС – оптический циркулятор (ОС), СР – разветвитель-поляризатор (РП), FD1,2 – фотодиоды (ФД), PCA1,2 – усилители фототока (УФТ), ADC1,2 – аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), CL – цифровая логика (СЛ), MIOM – многофункциональный интегрально-оптический модуль (МИОМ), РМ – фазовый модулятор (ФМ), РМА – усилитель фазовой модуляции (УФМ), DAC – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), DPU – блок цифровой обработки (БЦО), FC – волоконный контур (ВК) (цвет онлайн)

Fig. 1. Block diagram of a FOG with output signal noise reduction system, where ECU is the emitter control unit, SLD is a superluminescent diode, DT is a temperature sensor, MC is a microcooler, OC is an optical circulator, SP is a splitter-polarizer, FD1,2 are photodiodes, PCA1,2 are photocurrent amplifiers, ADC1,2 are analog-to-digital converters, CL is digital logic, MIOM is a multifunctional integrated optical module, PM is a phase modulator, PMA is a phase modulation amplifier, DAC is a digital-to-analog converter, DPU is a digital processing unit, FC is a fiber optic circuit (color online)

состоящий из фотодиода (ФД) и усилителя фототока (УФТ), являющимся источниками статистически независимых шумов, описываемых выражениями (1)–(3).

Выражение для СПШ угловой скорости выходного сигнала ВОГ с шумоподавлением в общем виде записывается следующим образом:

$$\delta\omega_n = M \frac{\sqrt{i_{n1}^2 \frac{1}{2}(1+\cos\varphi) + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 + K^2(i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2) + \left(i_{n4}^2 \frac{1}{4}(1+\cos\varphi)^2 + i_{n4}^2 K^2\right)(1-K_s)}}{\eta \frac{1}{2} P_0 \sin\varphi}, \quad (6)$$

где K – коэффициент, учитывающий необходимость приведения средней мощности сигнала опорного измерительного канала к средней мощности основного измерительного канала; K_s – коэффициент подавления шума интенсивности.

Зафиксируем значение φ равным $\pi/2$, а коэффициент K примем равным 0.5, тогда выражение для СПШ выходного сигнала ВОГ с шумоподавлением примет более компактный, удобный для дальнейшего анализа вид:

$$\delta\omega_n = M \frac{\sqrt{\frac{1}{2}i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 + \frac{1}{4}(i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2) + \frac{1}{2}i_{n4}^2(1 - K_s)}}{\eta \frac{1}{2}P_0}. \quad (7)$$

2. Условия согласованности сигналов измерительных каналов

Минимальный уровень шума выходного сигнала достигается при значении коэффициента K_s , равном единице, при выполнении условия полного совпадения («одинаковости») компоненты шума, описываемой выражением (4), в сигналах основного и опорного измерительных каналов. Определим смысл и критерии этой «одинаковости».

2.1. Синхронизация во времени. Сигналы измерительных каналов должны быть синхронизированы во времени и поступать в блок, реализующий операцию вычитания сигнала опорного измерительного канала ИК2 из сигнала основного измерительного канала ИК1 одновременно. Согласно схеме, изображенной на рис. 1, оптический сигнал разделяется разветвителем-поляризатором РП 1:2 на две составляющие, одна из которых подается непосредственно на фотодетектор ФД1 (опорный измерительный канал ИК2), другая составляющая проходит оптический путь через интерферометр Саньяка (основной измерительный канал ИК1). Расстояние, которое проходит оптический сигнал в измерительном канале ИК2, составляет порядка одного метра, при этом время распространения излучения в оптическом волноводе длиной 1 метр с показателем преломления $n \approx 1.46$ составляет $4.87 \cdot 10^{-9}$ секунд, в измерительном канале ИК1 оптическое излучение проходит волоконный контур, длина которого может составлять от сотен до тысяч метров, для определенности зададимся конкретной длиной ВК, равной 1070 метров (такая «неровная» длина объясняется конструктивными особенностями ВОГ с цифровой обработкой сигналов), при этом время распространения оптического излучения в ИК1 составляет $5.21 \cdot 10^{-6}$ секунд. Таким образом, рассогласование сигналов по времени составляет $\sim 5.21 \cdot 10^{-6}$ секунд.

Зависимость коэффициента снижения шума K_s от времени рассогласования сигналов Δt может быть выражена с помощью корреляционной функции этих сигналов. Конкретный вид функции определяется видом спектра шума и алгоритмом обработки сигнала в ВОГ, в результате которого исходный широкополосный сигнал подвергается частотному преобразованию, выражающемуся в децимации сигнала до частоты, равной удвоенной частоте ВФМ, и переносе центральной частоты спектра на нулевую частоту.

Исходя из формы спектра сигнала и алгоритма обработки сигнала, была выбрана корреляционная функция полосового шума — $\cos(f_0\Delta t) \frac{\sin(\Delta f\Delta t/2)}{\Delta f\Delta t/2}$, где f_0 — центральная частота спектра, Δf — ширина спектра.

Учитывая, что остальные (кроме шума интенсивности источника излучения, описываемого выражением (4)) источники шума изначально некоррелированы и их временной сдвиг относительно друг друга не влияет на их степень корреляции и, соответственно, на их вклад в результирующий уровень шума, получим следующее выражение для зависимости СПШ выходного сигнала ВОГ от времени рассогласования сигналов измерительных каналов:

$$\delta\omega_n(\Delta t) = M \frac{\sqrt{\frac{1}{2}i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 + \frac{1}{4}(i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2) + \frac{1}{2}i_{n4}^2 \left(1 - \cos(f_0\Delta t) \frac{\sin(\Delta f\Delta t/2)}{\Delta f\Delta t/2}\right)}}{\eta \frac{1}{2}P_0}, \quad (8)$$

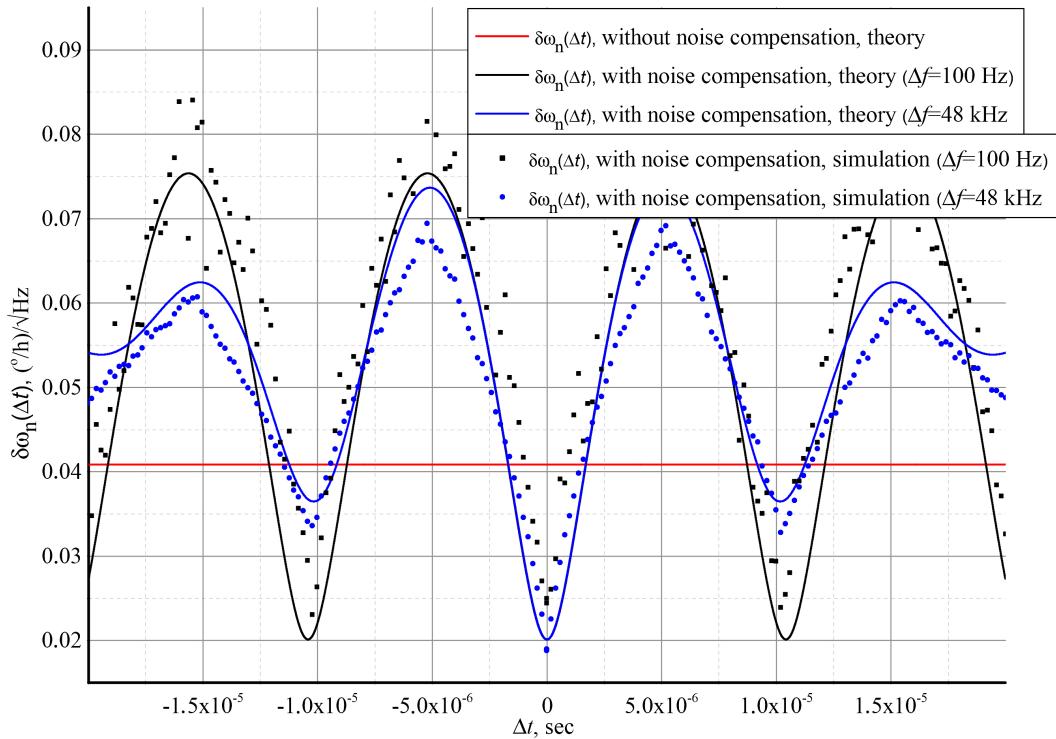


Рис. 2. Зависимость шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума от времени рассогласования сигналов при различной Δf (черный и синий графики), уровень шума выходного сигнала ВОГ без компенсации при тех же параметрах (красный график) (цвет онлайн)

Fig. 2. Dependence of the noise of the output signal of the FOG with noise compensation on the time of signal mismatch at different Δf (black and blue graphs), the noise level of the output signal of the FOG without compensation at the same parameters (red graph) (color online)

где f_0 — частота вспомогательной модуляции, Гц; Δf — ширина спектра в рассматриваемой системе пропорциональна частоте дискретизации выходного сигнала.

На рис. 2 представлены зависимости СПШ от времени рассогласования (взаимного сдвига) сигналов измерительных каналов при различной частоте дискретизации выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума. Сплошными линиями обозначены результаты расчетов по аналитическому выражению (8), а точками — результаты компьютерного моделирования. Компьютерная модель, использованная для этого, подробно описана в работах [9, 10]. Коротко укажем, что данная модель представляет собой компьютерную симуляцию цифрового ВОГ компенсирующего типа с импульсной фазовой модуляцией, разработанную в среде «Octave». В целом из графиков рис. 2 видно, что минимальный уровень шума выходного сигнала достигается в очень узком диапазоне времени рассогласования сигналов измерительных каналов, при этом максимальный уровень шума наблюдается при времени рассогласования порядка 4.5...5.5 мкс (в зависимости от ширины спектра Δf), что соответствует времени задержки распространения оптического излучения в волоконном контуре измерительного канала ИК1.

2.2. Равенство интенсивности сигналов. Рассмотрим схему измерительных каналов ИК1, ИК2, изображенную на рис. 1. Измерительный канал ИК1 содержит волоконный контур ВК, длина которого, как уже было сказано выше, может достигать нескольких тысяч метров. Потери мощности оптического излучения в волноводе в нормальных условиях составляют приблизительно 1.5...2.5 дБ/км. В зависимости от внешних воздействующих факторов (температура, давление и т. д.) потери мощности оптического излучения в оптическом тракте могут значительно меняться,

что приводит к изменению уровня мощности оптического излучения, поступающего на фотодиод ФД2 измерительного канала ИК1. В то же время длина оптической линии измерительного канала ИК2 не превышает одного метра, вследствие чего для нее можно пренебречь потерями мощности оптического излучения, вызываемыми перечисленными выше причинами. Для определения влияния различия мощности оптического излучения в измерительных каналах на эффективность шумоподавления модернизируем выражение (7), введя в него коэффициент K_{OP} , изменяя который будем менять значение мощности оптического излучения в основном измерительном канале.

$$\delta\omega_n(K_{OP}) = M \frac{\sqrt{K_{OP} \frac{1}{2} i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 + \frac{1}{4}(i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2) + \frac{1}{4}i_{n4}^2(1 - K_{OP})^2}}{K_{OP}\eta\frac{1}{2}P_0}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлены графики спектральной плотности шума выходного сигнала ВОГ в зависимости от коэффициента мощности K_{OP} оптического сигнала в основном измерительном канале. Из графиков зависимости $\delta\omega_n$ от K_{OP} видно, что при уровне мощности оптического излучения в ИК1 меньшем, чем в ИК2 (в диапазоне значений K_{OP} от 0 до 1), происходит резкое увеличение уровня шума выходного сигнала, вызванное двумя причинами: снижением соотношения сигнал / шум в ИК1 (это видно также из графика уровня шума для ВОГ без компенсации шума) и увеличением в выходном сигнале «веса» шума ИК2. При уровне мощности оптического излучения в ИК1 большем, чем в ИК2 (в диапазоне значений K_{OP} от 1 до 2), уровень шума

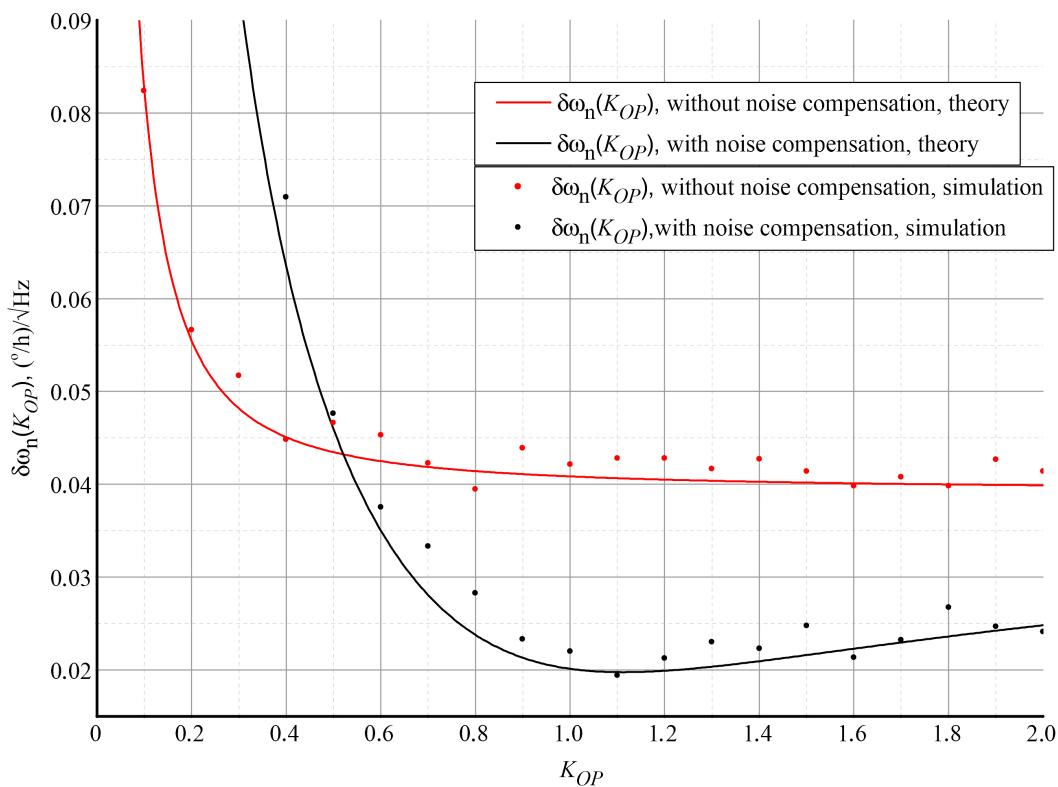


Рис. 3. Зависимость шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума и ВОГ без компенсации шума от величины коэффициента K_{OP} мощности оптического излучения в главном измерительном канале (цвет онлайн)

Fig. 3. Dependence of the output signal noise of the FOG with noise compensation and the FOG without noise compensation on the value of the coefficient K_{OP} of the optical emission power in main measuring channel (color online)

плавно увеличивается за счет снижения коэффициента шумоподавления, вызванного неполным вычитанием коррелированного шума (шума интенсивности источника излучения) измерительных каналов.

В каждом измерительном канале ИК1, ИК2 оптический сигнал поступает на соответствующий фотоприемник, где преобразуется в электрический сигнал, который затем поступает на аналого-цифровой преобразователь и в дальнейшем подвергается цифровой обработке по алгоритмам работы ВОГ. Электрический и цифровой тракт прохождения каждого сигнала характеризуется собственными коэффициентами преобразования / усиления / ослабления, комплексное влияние которых на уровень шумовой составляющей выходного сигнала выражается через соответствующие коэффициенты K_{u1} , K_{u2} выражения (10):

$$\delta\omega_n(\Delta K_u) = M \frac{\sqrt{K_{u1}^2 \left(\frac{1}{2} i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 \right) + \frac{1}{4} K_{u2}^2 (i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2) + \frac{1}{4} i_{n4}^2 \Delta K_u^2}}{K_{u1} \eta \frac{1}{2} P_0}, \quad (10)$$

где K_{u1} , K_{u2} — нормированные коэффициенты (диапазон значений от 0 до 1) преобразования / усиления амплитуды сигналов в фотопреобразующих устройствах и трактах цифровой обработки сигналов, $\Delta K_u = K_{u1} - K_{u2}$ — разность нормированных коэффициентов.

На рис. 4 представлены графики СПШ выходного сигнала ВОГ в зависимости от разности коэффициентов усиления сигналов измерительных каналов ΔK_u . Из графиков зависимости $\delta\omega_n$

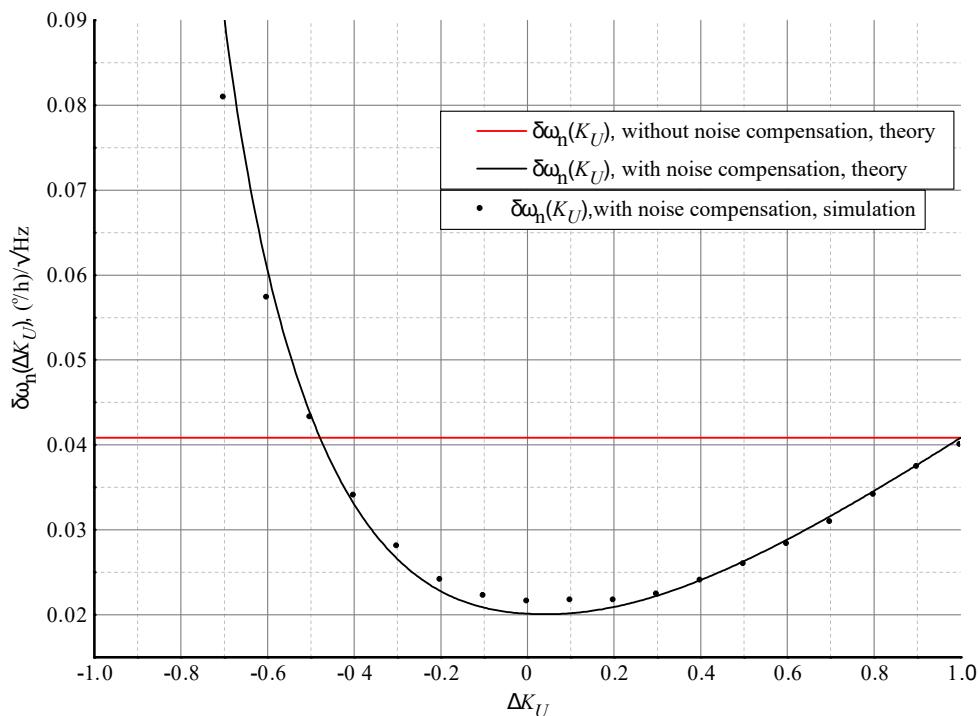


Рис. 4. Зависимость шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума от ΔK_u — соотношения коэффициентов усиления сигналов измерительных каналов (черный график), уровень шума выходного сигнала ВОГ без компенсации при тех же параметрах (красный график) (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependence of the noise of the output signal of the FOG with noise compensation on ΔK_u — the ratio of the gain factors of the signals of the measuring channels (black graph), the noise level of the output signal of the FOG without compensation with the same parameters (red graph) (color online)

от ΔK_u видно, что при уменьшении амплитуды сигнала опорного измерительного канала ИК2 (уменьшение коэффициента K_{u2} в диапазоне значений ΔK_u от 0 до 1) уровень шума увеличивается за счет снижения коэффициента шумоподавления, вызванного неполным вычитанием коррелированного шума измерительных каналов. При уменьшении амплитуды сигнала главного измерительного канала ИК1 (уменьшение коэффициента K_{u1} в диапазоне значений ΔK_u от 0 до -1) дополнительно ухудшается соотношение сигнал / шум, что вызвано относительным увеличением в результате сигнале шума сигнала ИК2.

2.3. Полоса пропускания. В работе [6] было указано, что для максимальной эффективной работы схемы снижения шума должно выполняться условие равенства полосы пропускания фотоприемных устройств основного и опорного измерительных каналов. Рассмотрим, как именно будет выглядеть зависимость уровня шума в выходном сигнале ВОГ от соотношения полос пропускания фотоприемных устройств измерительных каналов. Отметим следующие факты:

- полоса пропускания фотоприемных устройств и частота дискретизации АЦП выбираются достаточно большими (порядка десятков мегагерц), чтобы без искажений воспроизводить исходный сигнал в цифровой форме для его дальнейшей обработки;
- алгоритм обработки сигнала в ВОГ включает в себя осреднение исходного широкополосного оцифрованного сигнала на интервалах времени, равных $1/(2f_0)$, где f_0 — частота импульсной фазовой модуляции сигнала, что приближенно можно считать эквивалентным применению низкочастотного фильтра первого порядка с частотой среза $2f_0$. В зависимости от длины волоконного контура частота f_0 лежит в диапазоне от десятков килогерц до единиц мегагерц.

Таким образом, высокочастотные компоненты спектра шумовой составляющей сигнала отфильтровываются в ходе цифровой обработки сигнала по алгоритмам ВОГ. Заметное влияние различной ширины полосы пропускания фотоприемных устройств будет наблюдаться только при сужении этой полосы до частот порядка f_0 .

Учитывая равномерную спектральную плотность шума в диапазоне полосы пропускания фотоприемных устройств, можно задать нормализованную функцию, описывающую зависимость эффективной полосы пропускания измерительного канала от полосы пропускания фотоприемного устройства для каждого измерительного канала: $\Delta F_1 = 1 - f_0/\Delta f_1$, $\Delta F_2 = 1 - f_0/\Delta f_2$, где Δf_1 , Δf_2 — ширина полосы пропускания фотоприемных устройств измерительных каналов ИК1 и ИК2 соответственно.

Для определения количественного влияния разности ширины полосы пропускания фотоприемных устройств на уровень снижения шума в выходном сигнале ВОГ введем в выражение (7) определенные выше нормированные функции зависимости интенсивности шумовых составляющих сигнала от ширины полосы пропускания фотоприемных устройств:

$$\begin{aligned} \delta\omega_n(\Delta f_1, \Delta f_2) &= \\ &= M \sqrt{\left(1 - \frac{f_0}{\Delta f_1}\right) \left(\frac{1}{2} i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2\right) + \frac{1}{4} \left(1 - \frac{f_0}{\Delta f_2}\right) \left(i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2\right)} + \frac{1}{4} i_{n4}^2 \left| \left(1 - \frac{f_0}{\Delta f_1}\right) - \left(1 - \frac{f_0}{\Delta f_2}\right) \right| \\ &\quad \eta \frac{1}{2} P_0 \end{aligned} \quad (11)$$

Зависимость спектральной плотности шума угловой скорости выходного сигнала ВОГ с системой подавления шума от разности нормированной полосы пропускания фотоприемных устройств измерительных каналов приведена на рис. 5.

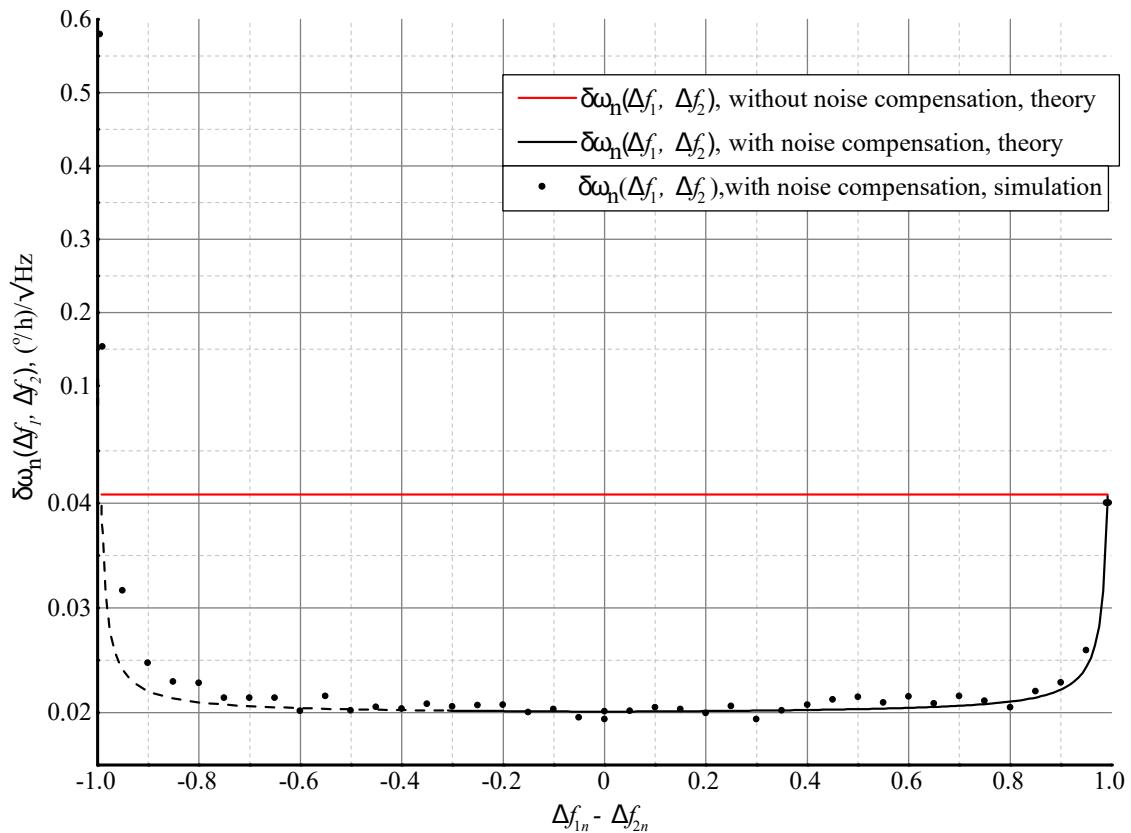


Рис. 5. Зависимость шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума от соотношения нормированных полос пропускания фотоприемных устройств (черный график), уровень шума выходного сигнала ВОГ без компенсации при тех же параметрах (красный график) (цвет онлайн)

Fig. 5. Dependence of the noise of the output signal of the FOG with noise compensation on the ratio of the normalized bandwidth of the photodetectors (black graph), the noise level of the output signal of the FOG without compensation with the same parameters (red graph) (color online)

В целом, как видно из приведенного графика, уменьшение ширины полосы пропускания фотоприемного устройства ИК1 до 0.75 при сохранении максимальной ширины полосы пропускания ИК2 (в диапазоне от 0 до -0.25 ($\Delta f_{1n} - \Delta f_{2n}$)) и уменьшение ширины полосы пропускания фотоприемного устройства ИК2 до 0.5 при сохранении максимальной ширины полосы пропускания ИК1 (в диапазоне от 0 до 0.5 ($\Delta f_{1n} - \Delta f_{2n}$)) не приводит к существенному увеличению уровня шума выходного сигнала.

Отклонение графика компьютерного моделирования от рассчитанного по теоретической формуле в области значений от -0.25 до -1 ($\Delta f_{1n} - \Delta f_{2n}$), то есть при уменьшении полосы пропускания ИК1 в диапазоне от 0.75 до 0 связано с тем, что выражение (11) не учитывает процессы, связанные со снижением быстродействия контура компенсирующей обратной связи при сужении полосы пропускания фотоприемного устройства основного измерительного канала ИК1, приводящие к увеличению СПШ выходного сигнала ВОГ.

2.4. Состояние поляризации. В силу ряда объективных причин в настоящее время большинство ВОГ работают с использованием плоскополяризованного оптического излучения. В зависимости от конкретной реализации ВОГ, это достигается либо использованием источника оптического излучения, конструктивно объединенного с поляризатором, либо применением

отдельных поляризаторов или поляризаторов в составе интегрально-оптических схем (например, когда сигнал источника излучения нужно разделить на несколько измерительных каналов в многоосном ВОГ, это проще сделать с помощью изотропных волоконных разветвителей, а затем поляризовать излучение в каждом измерительном канале).

В рассматриваемой схеме ВОГ применяется источник с линейно-поляризованным излучением с коэффициентом экстинкции не менее 20 дБ. Применение такого источника излучения заведомо обеспечивает практически полное отсутствие отличных от заданного состояний поляризации излучения. Наличие в оптической схеме последовательно установленных поляризаторов в составе разветвителей-поляризаторов (РП) и фазового модулятора (ФМ) с коэффициентом экстинкции каждого не менее 20 дБ, а также применение оптического волокна, сохраняющего состояние поляризации, при изготовлении волоконного контура интерферометра Саньяка обеспечивает сохранение состояния поляризации на всем протяжении оптического тракта ВОГ. В рамках данной работы важным является тот факт, что состояние поляризации излучения, падающего на фотодиоды опорного и основного измерительных каналов, является одинаковым, а значит, в нем не содержится некоррелированных составляющих шума интенсивности источника оптического излучения. В то же время нужно учесть, что в зависимости от точности юстировки плоскости поляризации всех поляризаторов в составе оптического тракта ВОГ (а также сохранения их юстировки во времени) и стабильности h — параметра волновода волоконного контура — зависит сохранение соотношения мощности оптического излучения, падающего на фотоприемники измерительных каналов. Это влияние может быть описано с помощью закона Малюса, $I = I_0 \cos^2 \psi$, выражающего зависимость интенсивности I линейно-поляризованного оптического излучения, прошедшего поляризатор, от интенсивности падающего на поляризатор излучения I_0 и угла ψ между плоскостями поляризации падающего излучения и поляризатора. Введем в выражение (7) спектральной плотности шума угловой скорости выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума зависимость мощности оптического излучения, падающего на фотоприемник основного измерительного канала ИК1 от угла ψ , выражающую суммарную погрешность ориентации плоскости поляризации во всем оптическом тракте:

$$\delta\omega_n(\psi) = M \frac{\sqrt{\cos^2 \psi \frac{1}{2} i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2 + \frac{1}{4}(i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2) + \frac{1}{4} i_{n4}^2 (1 - (\cos^2 \psi))^2}}{\cos^2 \psi \eta \frac{1}{2} P_0}. \quad (12)$$

На рис. 6 представлены графики зависимости спектральной плотности шума выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума (черный график) и без схемы снижения шума (красный график) от изменения угла ψ на $\pm 180^\circ$.

Из приведенных графиков видно, что:

- изменение угла ψ приводит к изменению уровня шума выходного сигнала как в ВОГ со схемой снижения, так и без схемы снижения шума. Это объясняется теми же причинами, что и в случае уменьшения мощности оптического излучения, падающего на фотоприемник основного измерительного канала, рассмотренном в п. 2.2;
- изменение угла ψ в пределах $\pm 10^\circ$ не приводит к заметному увеличению уровня шума выходного сигнала.

В реальных условиях угол ψ , как правило, не превышает единиц градусов. Это позволяет считать, что в ВОГ, использующем линейно-поляризованный источник оптического излучения и построенном по схеме, соответствующей рис. 1, не наблюдается заметного влияния состояния поляризации на уровень спектральной плотности шума, определяемый выражением (12).

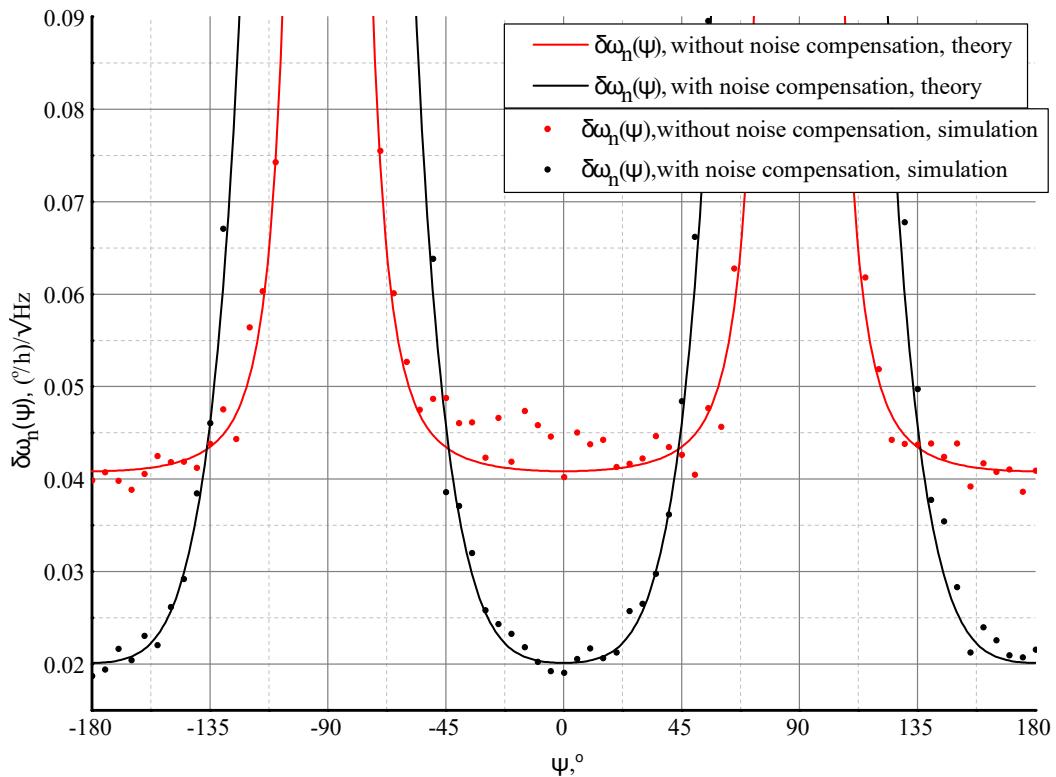


Рис. 6. Зависимость шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума и ВОГ без компенсации шума от величины угла ψ отклонения плоскости поляризации в главном измерительном канале (цвет онлайн)

Fig. 6. Dependence of the output signal noise of the FOG with noise compensation and the FOG without noise compensation on the value of the angle ψ of deviation of the plane of polarization in the main measuring channel (color online)

Заключение

В работе были рассмотрены четыре основных условия, выполнение которых приводит к подавлению шума интенсивности источника оптического излучения в выходном сигнале ВОГ, построенном по схеме, приведенной на рис. 1, и описываемом выражением (6) для определения спектральной плотности шума выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума. Анализ полученных зависимостей уровня СПШ выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума позволяет определить границы точности соблюдения этих условий без значительного ухудшения работы схемы снижения шума. Анализ полученных зависимостей показывает, что для выполнения условия сохранения уровня шума выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума должны выполняться следующие требования:

1. Условие синхронизации сигналов измерительных каналов во времени должно выполняться с точностью не хуже 5% от времени максимального рассогласования, в рассмотренном случае это соответствует примерно ± 200 нс.
2. Условие равенства интенсивностей сигналов измерительных каналов имеет несимметричный вид и, в зависимости от природы отклонения (изменение мощности оптического излучения или различный коэффициент усиления фотоприемных устройств), имеет различное оптимальное соотношение. Отношение средних мощностей оптических сигналов и отношение коэффициентов усиления электрических сигналов в измерительных каналах должно находиться в диапазоне 1...1.1.

3. Условие равенства полосы пропускания измерительных каналов не является критическим, оно должно выполняться с точностью не менее $0.75\Delta f_{1n}$ от нормированной полосы пропускания ИК1 и не менее $0.5\Delta f_{2n}$ от нормированной полосы пропускания ИК2.
4. Условие одинакового состояния поляризации формально выполняется за счет применения в рассматриваемой схеме источника оптического излучения с линейной поляризацией в заданной плоскости, требование к точности выставки и сохранению угла ψ суммарной погрешности ориентации плоскости поляризации должно выполняться с точностью не менее $\pm 10^\circ$.

Список литературы

1. Бронников С. В., Караваев Д. Ю., Рожков А. С. Исследование технологии и средств привязки изображений Земли, полученных на пилотируемом космическом аппарате с помощью свободно перемещаемых камер // Космическая техника и технологии. 2016. № 2. С. 105–115.
2. Бельский Л. Н., Водичева Л. В., Парышева Ю. В. Бесплатформенная инерциальная навигационная система для средств выведения: точность начальной выставки и периодическая калибровка // В сб.: Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов. 28–30 мая 2018 года, Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербург: «Концерн “Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»», 2018. С. 250–253.
3. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П., Коврегин В. Н., Коврегина Г. М., Меркулова И. И. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20, № 1. С. 222–231.
4. Андронова И. А., Малыкин Г. Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 8. С. 849–873. DOI: 10.3367/UFNr.0172.200208a.0849.
5. Спиридонов Д. М., Игнатьев А. А., Обухович Д. В. Математическая модель шумов выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа // В сб.: Проблемы оптической физики и биофотоники SFM-2021: Материалы 9-го Международного симпозиума и 25-ой Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2021. 27 сентября – 01 октября 2021 года, Саратов, Россия. Саратов: Издательство «Саратовский источник», 2021. С. 72–77.
6. Алейник А. С., Дейнека И. Г., Смоловик М. А., Нефоросный С. Т., Рупасов А. В. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 2. С. 20–32. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.2.020-032.
7. Guattari F., Chouvin S., Moluçon C., Lefèvre H. A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope // In: Proceedings of Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). Karlsruhe, Germany. New York: IEEE, 2014. Р. 1–14. DOI: 10.1109/InertialSensors.2014.7049411.
8. Спиридонов Д. М., Игнатьев А. А., Обухович Д. В. Синтез и анализ математической модели шумовой составляющей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа с системой компенсации шума // В сб.: Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2022: Материалы 10-го Международного симпозиума и 26-ой Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2022. 26–30 сентября 2022 года, Саратов, Россия. Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2022. С. 44–48.
9. Спиридонов Д. М., Обухович Д. В. Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения уровня шума в выходном сигнале, математическое моделирование, эксперимент // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 12. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.12.13.

10. Спиридов Д. М., Обухович Д. В. Аналитическая и компьютерная программная математические модели шума выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа, анализ и верификация // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.3.7.
11. Van der Ziel A. Шум: источники, описание, измерение. М.: Советское радио, 1973. 228 с.
12. Lefevre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. Boston: Artech House, 2022. 508 p.
13. Baney D. M., Sorin W. V. Broadband frequency characterization of optical receivers using intensity noise // Hewlett Packard Journal. 1995. Vol. 46, no. 1. P. 6–12.

References

1. Bronnikov SV, Karavaev DYu, Rozhkov AS. Investigation of Geo-tagging technology and capabilities for earth images obtained on human space vehicle using freely movable cameras. Space Engineering And Technology. 2016;2:105–115.
2. Belsky LN, Vodicheva LV, Parysheva YV. A strapdown inertial navigation system for space launch vehicles: Initial alignment accuracy and periodic calibrations. In: 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 28–30 May, 2018, St. Petersburg, Russia. IEEE; 2018. P. 1–4. DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405909.
3. Chernodarov AV, Patrikeev AP, Kovregin VN, Kovregina GM, Merkulova II. Flight development of a distributed inertial satellite micronavigation system for synthetic-aperture radar. Civil Aviation High Technologies. 2017;20(1):222–231.
4. Andronova IA, Malykin GB. Physical problems of fiber gyroscopy based on the Sagnac effect. Phys.-Usp. 2002;45(8):793–817. DOI: 10.1070/PU2002v045n08ABEH001073.
5. Spiridonov DM, Ignat'ev AA, Obukhovich DV. Mathematical model of output signal noise of a fiber-optic gyroscope. In: Problems of Optical Physics and Biophotonics SFM-2021: Proceedings of the 9th International Symposium and the 25th International Youth Scientific School Saratov Fall Meeting 2021. 27 September – 01 October, 2021, Saratov, Russia. Saratov: Publishing House “Saratovsky istochnik”; 2021. P. 72–77.
6. Aleinik AS, Deineka IG, Smolovik MA, Neforosnyi ST, Rupasov AV. Compensation of excess RIN in fiber-optic gyro. Gyroscopy Navig. 2016;7(3):214–222. DOI: 10.1134/S2075108716030020.
7. Guattari F, Chouvin S, Moluçon C, Lefèvre H. A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope. In: Proceedings of Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). Karlsruhe, Germany. New York: IEEE; 2014. P. 1–14. DOI: 10.1109/InertialSensors.2014.7049411.
8. Spiridonov DM, Ignat'ev AA, Obukhovich DV. Synthesis and analysis of the mathematical model of the noise component of the output signal of a fiber-optic gyroscope with a noise compensation system. In: Problems of Optical Physics and Biophotonics. SFM-2022: Proceedings of the 10th International Symposium and the 26th International Youth Scientific School Saratov Fall Meeting 2022. 26–30 September, 2022, Saratov, Russia. Saratov: Publishing House “Saratovsky istochnik”; 2022. P. 44–48.
9. Spiridonov DM, Obukhovich DV. Fiber-optic gyroscope with a noise reduction system in the output signal, mathematical modeling, experiment. Journal of Radio Electronics. 2024;(12) (in Russian). DOI: 10.30898/1684-1719.2024.12.13.
10. Spiridonov DM, Obukhovich DV. Analytical and computer software mathematical models of the noise of the output signal of a fiber-optic gyroscope, analysis and verification // Journal of Radio Electronics. 2024;(3) (in Russian). DOI: 10.30898/1684-1719.2024.3.7.
11. Van der Ziel A. Noise: Sources, Characterization, Measurement. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1970. 184 p.
12. Lefevre HC. The Fiber-Optic Gyroscope. Boston: Artech House; 2022. 508 p.
13. Baney DM, Sorin WV. Broadband frequency characterization of optical receivers using intensity noise. Hewlett Packard Journal. 1995;46(1):6–12.



Спиридонов Дмитрий Михайлович — родился в Саратове (1988). Окончил бакалавриат (2016) и магистратуру (2018) физического факультета Саратовского государственного университета по направлению «Физика». Аспирант Института физики Саратовского государственного университета по направлению «Радиофизика». С 2012 работал в ОАО «Институт критических технологий» (Саратов). С 2017 года работает в Саратовском отделении ООО НПК «Оптолинк». Автор 17 научных статей. Научные интересы — математическое моделирование, волоконно-оптическая гироскопия.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: spiridonov_d_m@mail.ru
AuthorID (eLibrary.Ru): 1220688



Вадивасова Татьяна Евгеньевна — родилась в Саратове (1958). Окончила физический факультет Саратовского государственного университета (1981). Доктор физико-математических наук. В настоящее время — профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики физического факультета СГУ. Научные интересы сосредоточены в области нелинейной динамики и статистической радиофизики: эффекты синхронизации в ансамблях хаотических и стохастических осцилляторов, волновые структуры в активных средах, свойства различных типов нерегулярных аттракторов, влияние шума и стохастические эффекты в нелинейных системах и др. Автор более 130 публикаций в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: vadivasovate@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-8081-2820
AuthorID (eLibrary.Ru): 34840



Обухович Дмитрий Вячеславович — родился в 1980 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника» (2002). С 2002 года работал в ФГУП ПО «Корпус». С 2004 года и по настоящее время работает в отделении ВОГ ООО НПК «Оптолинк» (Саратов). Автор 13 научных статей. Научные интересы — волоконно-оптическая гироскопия.

Россия, 410033 Саратов, проспект имени 50 лет Октября, 101/1
ООО НПК «Оптолинк»
E-mail: obuhovichdv@mail.ru