

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.13>

УДК: 531.383; 681.7

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП
С СИСТЕМОЙ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ШУМА
В ВЫХОДНОМ СИГНАЛЕ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТ**

Д.М. Спиридонов ^{1,2}, Д.В. Обухович ²

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

² «НПК «Оптолинк», 124489, Москва, Зеленоград, Сосновая аллея, 6А стр.5

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2024 г.

Аннотация. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка результатов теоретического исследования, посвященного вопросу снижения уровня шума в выходном сигнале волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) путем подавления избыточного шума источника оптического излучения. Наряду с уже имеющейся аналитической математической моделью шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума была разработана компьютерная модель в программной среде «Octave», моделирующая работу ВОГ со схемой шумоподавления, вспомогательной импульсной фазовой модуляцией и замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости. Также был спроектирован и изготовлен макет ВОГ с системой шумоподавления. Проведен анализ поведения аналитической и компьютерной моделей при изменении значений параметров ВОГ, расхождение в результатах моделирования не превышает 10%. Проведена верификация моделей путем сравнения результатов моделирования с результатами, полученными экспериментальным путем на макете. Методом отклонения

Аллана определено, что включение системы шумоподавления приводит к близкому к двукратному снижению шума выходного сигнала. Результаты моделирования и натурального эксперимента отличаются не более чем на 15%, что говорит о достаточно высоком уровне адекватности моделей. Полученный на практике коэффициент шумоподавления хорошо согласуется с теоретической оценкой, что говорит о практически полном подавлении избыточного шума источника оптического излучения.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, ВОГ, избыточный шум, шум интенсивности, суперлюминесцентный диод, СЛД, шумоподавление, моделирование, отклонение Аллана.

Автор для переписки: Спиридонов Дмитрий Михайлович,
spiridonov_d_m@mail.ru

Введение

Прогнозирование и определение технической возможности реализации точностных характеристик остаются важной задачей при моделировании и проектировании волоконно-оптических гироскопов на базе эффекта Саньяка. В работе [1] было проведено математическое и компьютерное моделирование, результаты которого позволяют оценить структуру и общий вид зависимости уровня шума выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) от параметров его схемы. При этом было установлено, что в большинстве рассмотренных случаев главным источником шума является источник оптического излучения. В работе [2] была выведена аналитическая модель шума выходного сигнала ВОГ с системой шумоподавления. При этом за основу была взята одна из известных схем шумоподавления, описанная, например, в работе [3]. Для выведенной модели были определены наиболее оптимальные параметры схемы ВОГ, позволяющие получить максимальное шумоподавление исходя из реальных параметров используемой при разработке и изготовлении ВОГ компонентной базы. В настоящей работе описываются и анализируются результаты компьютерного моделирования ВОГ со схемой шумоподавления,

а также результаты, полученные при макетировании ВОГ со схемой шумоподавления.

1. Аналитическая и компьютерная модели

Шумовая составляющая выходного сигнала интерферометра Саньяка формируется в основном четырьмя источниками: дробовым шумом фототока, дробовым шумом темнового тока фотодиода, тепловым шумом усилителя-преобразователя фототока и избыточным шумом источника оптического излучения. При этом наибольший вклад в шум дает избыточный шум источника излучения [1].

При разработке макета ВОГ со схемой шумоподавления был выявлен еще один потенциальный источник шума – схема усиления напряжения фазовой модуляции. Величина этого шума определяется характеристиками самого усилителя (спектральная плотность напряжения и тока шума, приведенных к входу, сопротивление резисторов в цепи обратной связи), его коэффициентом усиления и коэффициентом эффективности широкополосного электрооптического фазового модулятора. Например, для симметричного дифференциального операционного усилителя, примененного в макете, выражение, определяющее его вклад в общий уровень шума угловой скорости, будет выглядеть следующим образом:

$$\delta\omega_{ш.УФМ} = \frac{\lambda c}{2\pi DL} \sqrt{2 \left(\left(e_n \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \right)^2 + 2(i_n R_f)^2 + 8kTR_g \left(\frac{R_f}{R_g} \right)^2 + 8kTR_f \right) \frac{\pi}{v_{pi}}}, \quad (1)$$

где $\delta\omega_{ш.УФМ}$ – спектральная плотность шума угловой скорости от усилителя фазовой модуляции, (рад/с)/ $\sqrt{\text{Гц}}$; λ – средняя длина волны оптического излучения, м; c – скорость света в вакууме, м/с; D – диаметр кольцевого многовиткового волоконного контура, м; L – длина волоконного контура, м; e_n – спектральная плотность дифференциального напряжения шума, приведенного ко входу усилителя, В/ $\sqrt{\text{Гц}}$; R_f – сопротивление резистора обратной связи, Ом; R_g – сопротивление входного резистора усилителя, Ом; i_n – спектральная плотность тока шума, приведенного ко входу усилителя,

$A/\sqrt{\Gamma_{\Sigma}}$; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура окружающей среды, К; $\frac{\pi}{V_{pi}}$ – коэффициент эффективности электрооптического фазового модулятора, рад/В.

Множитель перед знаком корня в правой части выражения (1) – величина, обратная масштабному коэффициенту эффекта Саньяка. Сумма под знаком корня определяет спектральную плотность напряжения шума на выходе усилителя. Ее удвоение указывает на статистическую независимость шума, действующего на оптический сигнал при прохождении модулятора в прямом и в обратном направлении.

Суть рассматриваемого метода шумоподавления заключается в том, чтобы в реальном времени вычитать из сигнала измерительного канала (ИК) ВОГ шумовую составляющую, формируемую источником оптического излучения. Для этого в схему ВОГ вводится дополнительный (опорный) ИК, предназначенный специально для измерения шумовой составляющей источника излучения. Реализация такого метода подразумевает выполнение ряда условий, обеспечивающих максимальное шумоподавление, а именно, точное согласование сигналов измерительных каналов во времени, амплитудное, спектральное и поляризационное равенство сигналов измерительных каналов. Выполнение этих условий должно приводить, к значительному снижению уровня шума в выходном сигнале ВОГ за счет полного подавления избыточного шума источника излучения. В то же время результирующий уровень шума должен увеличиваться на некоторую величину за счет добавления шумов фотоприемного устройства опорного ИК. Для количественной оценки возможностей данной схемы шумоподавления была выведена аналитическая математическая модель шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ со схемой шумоподавления.

Аналитическая математическая модель (2) выведена в предположении о том, что при вычитании сигнала опорного ИК из сигнала основного ИК избыточный шум будет полностью подавляться. При этом некоррелированные дробовые шумы, шумы темновых токов фотоприемников и тепловые шумы

фотоприемников, а также шум усилителя сигнала фазовой модуляции, описываемые соответствующими слагаемыми подкоренной части выражения (2) будут суммироваться по закону сложения дисперсий случайных величин:

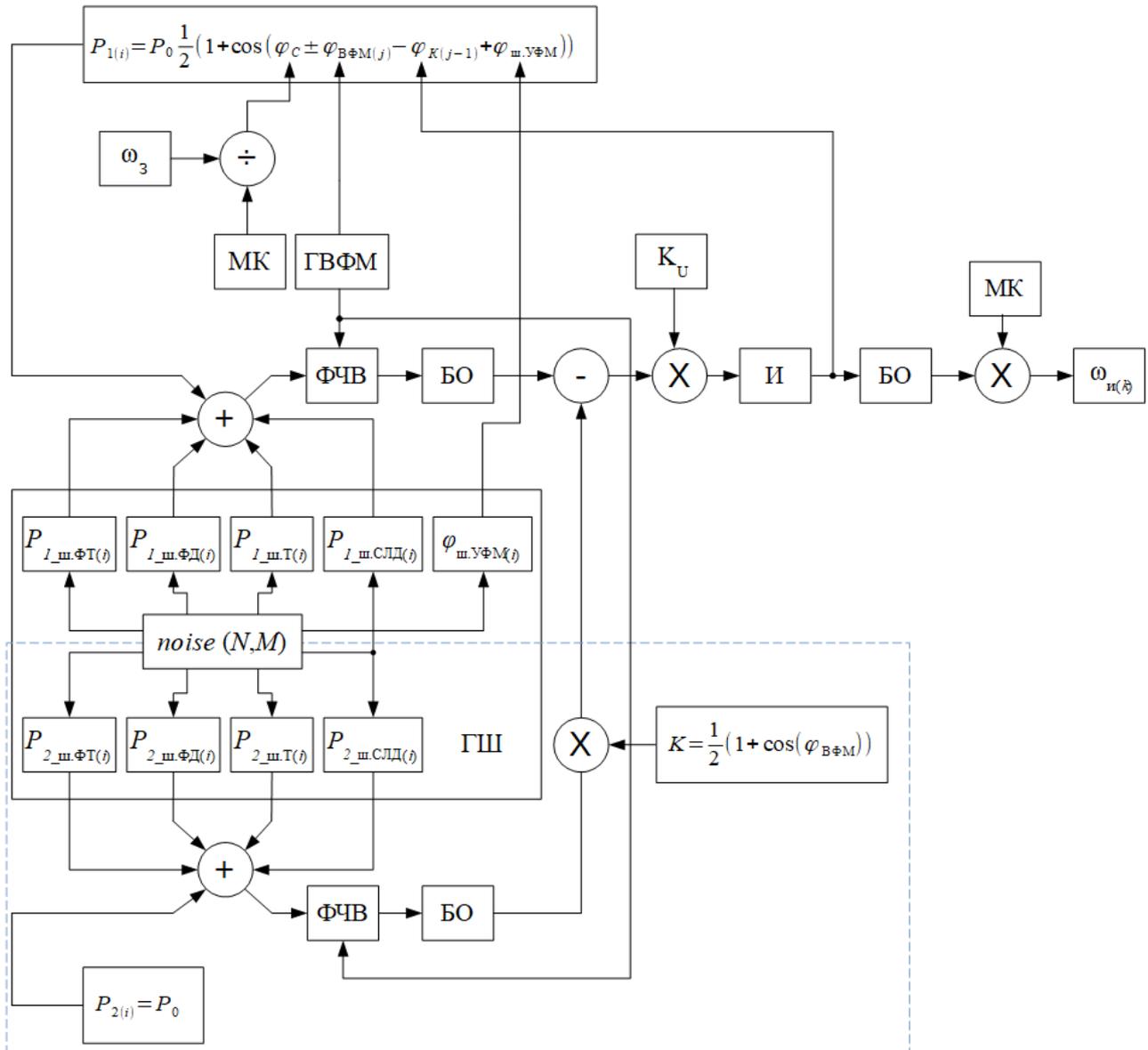
$$\delta\omega_{ш.} = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL} \sqrt{\frac{e\eta\frac{1}{2}P_0(1+\cos\varphi)+ei_d+\frac{4kT}{R}+K^2(e\eta P_0+ei_d+\frac{4kT}{R})}{(\eta\frac{1}{2}P_0\sin\varphi)^2}} + U_{ш.УФМ} \left(\frac{\pi}{V_{pi}}\right)^2, \quad (2)$$

где $\delta\omega_{ш.}$ – суммарная спектральная плотность шума угловой скорости, (рад/с)/ $\sqrt{\text{Гц}}$; e – заряд электрона, Кл; η – квантовая эффективность фотодиода, А/Вт; P_0 – мощность оптического излучения, падающего на фотодиод при нулевой разности фаз встречных световых волн, Вт; φ – разность фаз встречных световых волн, рад; i_d – темновой ток фотодиода, А; R – сопротивление резистора преобразователя ток-напряжение, Ом; K – коэффициент, учитывающий необходимость приведения средней мощности сигнала опорного измерительного канала к средней мощности основного измерительного канала; $U_{ш.УФМ}$ – подкоренная часть выражения (1).

Подробный анализ модели (2) был проведен ранее, в работе [2], здесь отметим только, что далее, при анализе выражения (2) в зависимости от глубины фазовой модуляции, – величины, оказывающей, наиболее сильное и нелинейное влияние на спектральную плотность шума, коэффициент K определяется следующим образом: $K = \frac{1}{2}(1 + \cos\varphi)$.

Компьютерная модель ВОГ разработана в программной среде «Octave». Она моделирует поведение интерферометра Саньяка и цифровой схемы ВОГ компенсирующего типа во времени с учетом влияния источников шума. Общий принцип работы этой модели с одним измерительным каналом достаточно подробно изложен в работе [1]. В приведенной ниже на рисунке 1 схеме модели ВОГ с шумоподавлением помимо основного добавлен опорный измерительный канал (обведен синей пунктирной линией). Он включает в себя три независимых источника шума, собственный фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), блок осреднения (БО) и блок умножения на коэффициент выравнивания

средней мощности измерительных каналов в зависимости от глубины вспомогательной фазовой модуляции в основном измерительном канале.



«+» – блок суммирования, «÷» – блок деления, МК – масштабный коэффициент Саньяка, ГВФМ – генератор вспомогательной фазовой модуляции, ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель, ГШ – генератор шума, БО – блок осреднения, «-» – блок вычитания, K_U – коэффициент усиления контура компенсирующей обратной связи, «×» – блок умножения, И – интегратор.

Рис. 1. Блок-схема компьютерной модели ВОГ с системой снижения шума.

Значения отдельных шумовых составляющих при выполнении каждой итерации главного цикла модели определяются выражениями (3) – (11) для дробового шума фототока $P_{1_ш.ФТ}$, Вт, шума темнового тока фотодиода $P_{1_ш.ФД}$, Вт, теплового шума трансимпедансного усилителя фототока $P_{1_ш.Т}$, Вт, избыточного шума источника излучения $P_{1_ш.СЛД}$, Вт, шума усилителя фазовой

модуляции $\varphi_{ш.УФМ}$, рад, основного ИК и дробового шума фототока $P_{2_ш.ФТ}$, Вт, шума темного тока фотодиода $P_{2_ш.ФД}$, Вт, теплового шума трансимпедансного усилителя фототока $P_{2_ш.Т}$, Вт, избыточного шума источника излучения $P_{2_ш.СЛД}$, Вт опорного ИК, соответственно

$$P_{1_ш.ФТ(i)} = \sqrt{\frac{2eP_{1(i)}\Delta f}{\eta}} noise(i, 1), \quad (3)$$

$$P_{1_ш.ФД(i)} = \sqrt{\frac{2ei_d\Delta f}{\eta^2}} noise(i, 2), \quad (4)$$

$$P_{1_ш.Т(i)} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R\eta^2}} noise(i, 3), \quad (5)$$

$$P_{1_ш.СЛД(i)} = \sqrt{\frac{\lambda^2\Delta f}{K_f c \Delta \lambda}} P_0 \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi_{ВФМ}) noise(i, 4), \quad (6)$$

$$\varphi_{ш.УФМ(i)} = \sqrt{2 \left(\left(e_n \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \right)^2 + 2(i_n R_f)^2 + 8kTR_g \left(\frac{R_f}{R_g} \right)^2 + 8kTR_f \right) \frac{\pi}{V_{pi}}} noise(i, 5), \quad (7)$$

$$P_{2_ш.ФТ(i)} = \sqrt{\frac{2eP_{2(i)}\Delta f}{\eta}} noise(i, 6), \quad (8)$$

$$P_{2_ш.ФД(i)} = \sqrt{\frac{2ei_d\Delta f}{\eta^2}} noise(i, 7), \quad (9)$$

$$P_{2_ш.Т(i)} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R\eta^2}} noise(i, 8), \quad (10)$$

$$P_{2_ш.СЛД(i)} = \sqrt{\frac{\lambda^2\Delta f}{K_f c \Delta \lambda}} P_0 noise(i, 4). \quad (11)$$

где Δf – заданная ширина полосы пропускания шума, Гц; $i = 1 \dots N$; K_f – коэффициент влияния формы спектра оптического излучения; $\Delta \lambda$ – ширина спектра оптического излучения, м; $noise(N, M)$ – числовой массив, имитирующий восемь независимых источников белого (в ограниченной полосе частот) Гауссового шума с нулевым средним значением и единичной дисперсией. Число случайных значений N выбирается равным количеству итераций главного цикла модели.

Шум в измерительном канале вводится как аддитивная составляющая к сигналу $P_{I(i)}$, формируемому на выходе интерферометра Саньяка, в опорном канале как аддитивная составляющая к постоянному уровню мощности P_2 .

Вычитание сигнала опорного канала происходит в цикле основного контура ВОГ, для чего сигнал опорного канала предварительно подвергается

фазочувствительному выпрямлению и осреднению аналогично сигналу основного измерительного канала.

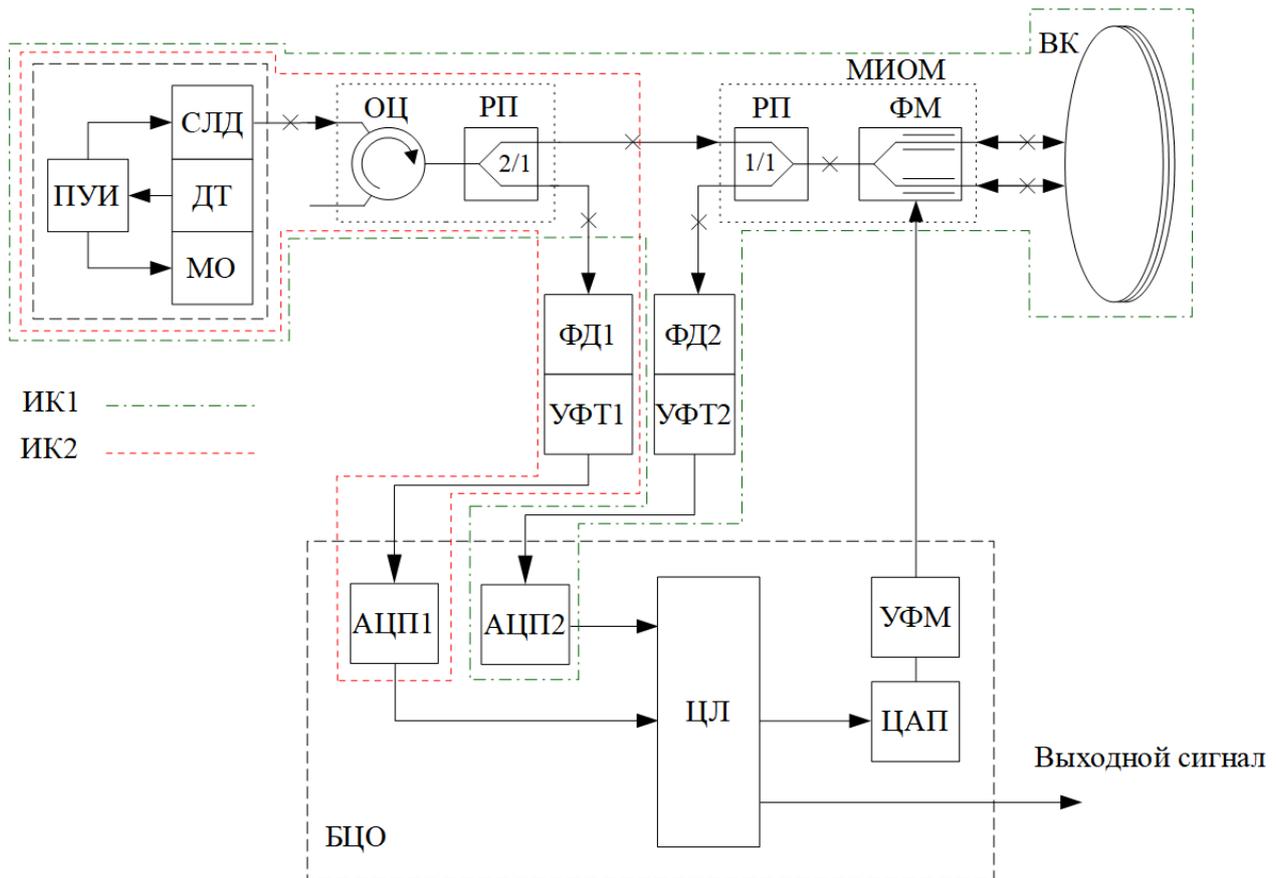
Входной информацией для модели является заданная постоянная угловая скорость ω_3 . Выходной информацией модели является массив вычисленных с заданным временем осреднения значений угловой скорости $\omega_{И(k)}$, где k – счетчик осредненных значений в массиве. Для полученного массива выполняются операции вычисления среднего значения, среднеквадратического отклонения (СКО) и спектральной плотности шума.

2. Макет и верификация моделей

Для экспериментальной проверки описанного метода шумоподавления, проверки адекватности моделей при различных заданных значениях параметров и определения реально достижимого коэффициента снижения шума был изготовлен макет ВОГ. Функциональная схема макета представлена на рис. 2.

Макет состоит из основного измерительного канала, включающего интерферометр Саньяка со схемой обработки сигналов, опорного канала для измерения шума источника оптического излучения, блока цифровой обработки сигналов (БЦО), платы управления источником оптического излучения (ПУИ). Оптическая схема макета состоит из следующих элементов:

- суперлюминисцентного диода – источника оптического излучения;
- циркулятора (ОЦ), защищающего СЛД от обратного излучения, конструктивно выполненного в общем корпусе с разветвителем-поляризатором (РП) с коэффициентом деления 2/1;
- многофункционального интегрально-оптического модуля (МИОМ), конструктивно объединяющего второй разветвитель-поляризатор с коэффициентом деления 1/1 и фазовый модулятор (ФМ);
- волоконного контура (ВК) длиной 1070 метров из волокна, сохраняющего состояние поляризации.



ПУИ – плата управления излучателем, СЛД – суперлюминесцентный диод, ДТ – датчик температуры, МО – микроохладитель, ОЦ – оптический циркулятор, РП – разветвитель-поляризатор, ФД_{1,2} – фотодиоды, УФТ_{1,2} – усилители фототока, АЦП_{1,2} – аналого-цифровые преобразователи, ЦЛ – цифровая логика, МИОМ – многофункциональный интегрально-оптический модуль, ФМ – фазовый модулятор, УФМ – усилитель сигнала фазовой модуляции, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, БЦО – блок цифровой обработки, ВК – волоконный контур

Рис. 2. Блок-схема макета ВОГ с шумоподавлением.

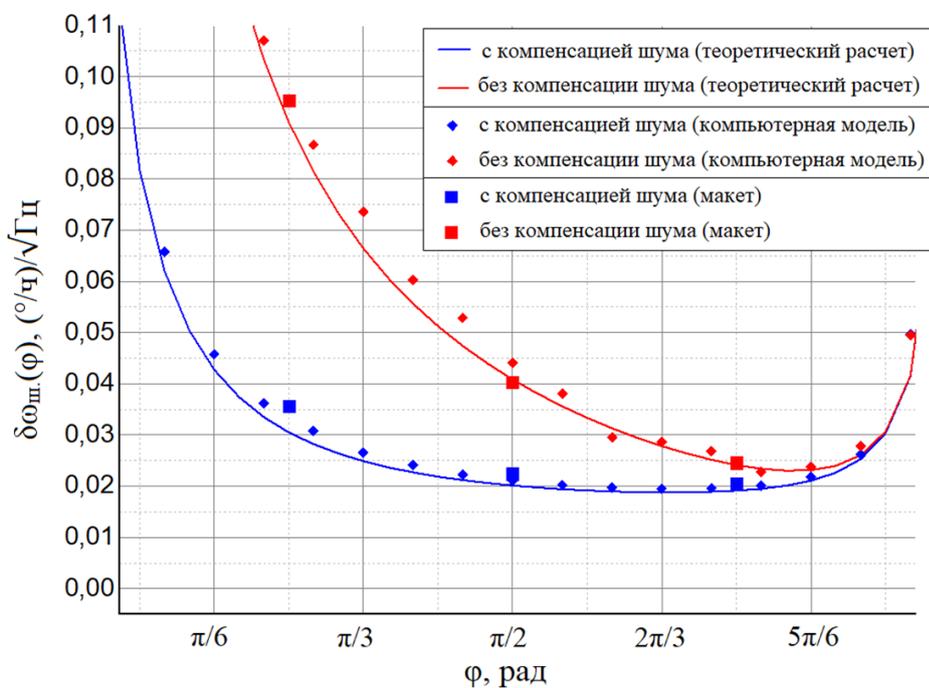
Логика работы блока цифровой обработки сигналов макета, в целом, соответствует приведенной на рисунке 1 компьютерной модели. Среди отличий можно выделить наличие в опорном измерительном канале цифровой линии задержки, выполненной в виде блока запоминания и хранения, необходимой для компенсации времени обхода оптической волной волоконного контура основного измерительного канала. Помимо этого, в цифровой схеме обработки сигналов присутствует второй интегратор для формирования сигнала пилообразной фазовой модуляции и второй контур обратной связи для регулирования амплитуды фазовой модуляции в зависимости от эффективности

фазового модулятора (напомним, что эффективность фазового модулятора в значительной степени зависит от его температуры).

Эксперимент по измерению шумовой составляющей выходного сигнала был проведен при трех значениях глубины вспомогательной фазовой модуляции: $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$ при включенной и выключенной системе шумоподавления. Макет при этом был установлен на неподвижное основание, проводился опрос и запись средних за время опроса с частотой 10 Гц значений измеренной угловой скорости. Для каждого полученного массива данных проводилось вычисление спектральной плотности шума (СПШ). На рисунке 3 приведены графики зависимостей СПШ выходного сигнала ВОГ:

- 1) Сплошными линиями – результат теоретического расчета по формуле (2);
- 2) Символами «♦» – результат компьютерного моделирования;
- 3) Символами «■» – результат обработки экспериментальных данных, измеренных с помощью макета.

Справа от рисунка 3 приведены значения параметров макета, использованные при моделировании.



- $R = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$
- $\eta = 0,93 \text{ А/Вт}$
- $P_0 = 88 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$
- $I_d = 20 \cdot 10^{-9} \text{ А}$
- $D = 0,135 \text{ м}$
- $L = 1070 \text{ м}$
- $T = 293 \text{ К}$
- $\lambda = 1556 \cdot 10^{-9} \text{ м}$
- $\Delta\lambda = 35 \cdot 10^{-9} \text{ м}$
- $K_f = 2$

Рис. 3. Зависимость шума выходного сигнала ВОГ от глубины вспомогательной фазовой модуляции.

Величина глубины вспомогательной фазовой модуляции была выбрана в качестве изменяемого параметра при проверке моделей, поскольку из основных параметров, величиной которых можно управлять в макете и которые приводят к изменению величины спектральной плотности шума согласно работе [1], ее изменение приводит к наиболее сильному и нелинейному изменению спектральной плотности шума.

Как видно из графика рисунка 3 максимальное расхождение между данными, полученными при теоретическом расчете и результатами компьютерного моделирования не превышает 10 %. Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента с макетом, также подтверждают правильность построенных моделей, расхождение не превышает 15 %.

3. Анализ экспериментальных результатов

С целью оценки полученных результатов при различном времени осреднения выходных данных был проведен эксперимент, включавший в себя измерения выходного сигнала макета ВОГ, установленного на неподвижном основании в течение 5,5 часов при частоте опроса данных, равной 70 Гц. Измерения проводились в двух режимах, – с включенной и с выключенной системой подавления избыточного шума источника излучения. Для минимизации промышленных шумов и помех измерения проводились в ночное время.

Одним из признанных методов оценки параметров случайной составляющей выходного сигнала ВОГ является метод отклонения (или вариации) Аллана, также известный как среднеквадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО). Ознакомиться с сущностью и алгоритмом метода можно в работах [4, 5, 6, 7]. Согласно статистической модели случайной составляющей выходного сигнала ВОГ, описанной, например, в стандарте [6] и работе [7], график зависимости отклонения Аллана от времени осреднения может быть аппроксимирован полиномом (12), где каждому из слагаемых соответствует участок графика с определенным наклоном и временем осреднения.

$$\sigma_A(\tau) = \sqrt{R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}}, \quad (12)$$

где σ_A – корень из вариации Аллана случайной величины; τ – время осреднения; R , K , B , N , Q – коэффициенты, определяющие вклад каждой компоненты случайной составляющей выходного сигнала ВОГ.

Далее в работе мы будем использовать коэффициенты Q – коэффициент шума квантования, N – коэффициент шума, B – коэффициент нестабильности нулевого сигнала.

Численная оценка коэффициента шума N из графика отклонения Аллана определяется как значение линейной аппроксимации продолжения участка с наклоном $-1/2$ в точке, соответствующей времени осреднения, равному 1 час.

На рисунке 4 представлен график зависимости отклонения Аллана от времени осреднения для макета ВОГ с отключенной схемой шумоподавления (красный график) и с включенной схемой шумоподавления (синий график). Пунктирные линии соответствуют графикам линейной аппроксимации участков с наклоном $-1/2$ соответствующих графиков случайной составляющей выходного сигнала ВОГ.

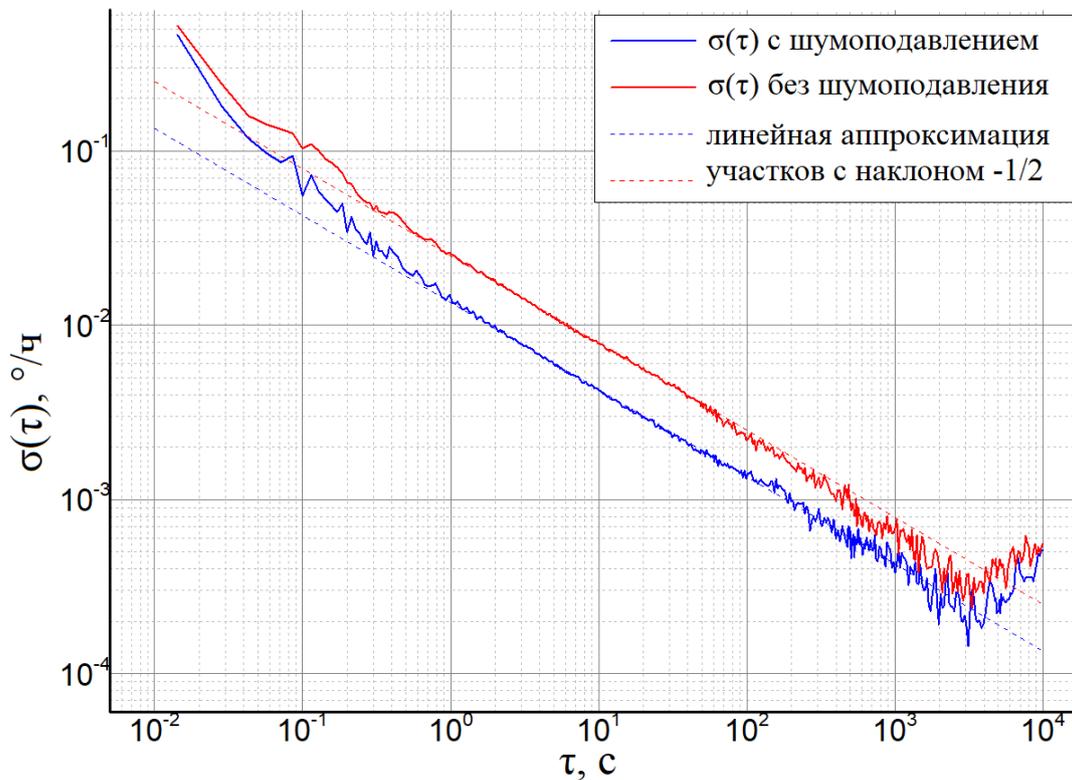


Рис. 4. График зависимости отклонения Аллана от времени осреднения.

Численное значение коэффициента шума, вычисленное по методу СКДО, составляет $0,00042 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ при выключенном шумоподавлении и $0,00022 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ при включенном шумоподавлении. Коэффициент шумоподавления при этом составляет 1,91 раз. Теоретическое значение коэффициента шумоподавления, вычисленное с помощью модели (2) при значениях параметров, соответствующих макету, составляет 2,03 раза. Полученное расхождение составляет 6%, что является хорошим результатом и подтверждает состоятельность разработанных моделей и практическую реализуемость и значимость проведенной работы.

Из графиков также видно, что при уменьшении времени осреднения (или, что в данном случае будем эквивалентно, при увеличении частоты опроса данных) коэффициент шумоподавления уменьшается. Это происходит за счет присутствия в сигнале спектральных компонент, отвечающих шуму квантования, описываемому коэффициентом Q в модели (12).

При увеличении времени осреднения графики рисунка 4 проходят горизонтальный участок, соответствующий коэффициенту B (нестабильность нулевого сигнала) в модели (12). При этом видно, что на графике сигнала с шумоподавлением значение нестабильности нулевого сигнала несколько меньше чем на графике без шумоподавления. Это свидетельствует о важном факте частичной маскировки величины коэффициента нестабильности нулевого сигнала присутствующим в сигнале шумом.

Заключение

Анализ других работ, посвященных вопросу снижения избыточного шума в выходном сигнале ВОГ показывает, что значения коэффициента шумоподавления, полученные их авторами, значительно превосходят полученные нами результаты, например в работе [3] коэффициент шумоподавления составил 2,82 раз, а в работе [8] – 4 раза. Здесь нужно обратить внимание, что в рассматриваемых работах в качестве источника излучения используется эрбиевый суперлюминисцентный волоконный

источник оптического излучения (ЭСВИОИ). Они обладают более узким спектром оптического излучения по сравнению с используемым в нашем макете СЛД (15...25 нм у ЭСВИОИ, 30...60 нм у СЛД), что, согласно выражению (6), приводит к повышенному избыточному шуму. Подавление более высокого исходного уровня шума логично приводит к более высокому коэффициенту шумоподавления. Кроме того, в работе [8] в схеме не используется дополнительный фотоприемник опорного измерительного канала, что так же приводит к увеличению коэффициента шумоподавления.

Таким образом, представленная работа подтверждает правильность разработанных математических моделей и их адекватность при различных значениях параметров системы, а также возможность и целесообразность технической реализации данного метода шумоподавления в случае ВОГ с суперлюминисцентным диодом в качестве источника оптического излучения.

Литература

1. Спиридонов Д.М., Обухович Д.В. Аналитическая и компьютерная программная математические модели шума выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа, анализ и верификация // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 3.
2. Спиридонов Д.М., Игнатъев А.А., Обухович Д.В. Синтез и анализ математической модели шумовой составляющей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа с системой компенсации шума // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2022. – 2022. – С. 44-48.
3. Алейник А.С. и др. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24. – №. 2. – С. 20-32.
4. Кучерков С.Г. и др. Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2003. – №. 2. – С. 98-104.

5. Сирая Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация. – 2010. – №. 2. – С. 29-36.
6. Board I. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros // IEEE std. – 1998. – С. 952-1997.
7. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. – Artech house, 2022.
8. Guattari F. et al. A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). – IEEE, 2014. – С. 1-14.

Для цитирования:

Спиридонов Д.М., Обухович Д.В. Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения уровня шума в выходном сигнале, математическое моделирование, эксперимент // Журнал радиоэлектроники. – 2024. №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.13>