

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-899-906

УДК 681.787

Разработка и исследование способов подавления аддитивных шумов в волоконно-оптических интерферометрических датчиках

Антон Валерьевич Волков¹✉, Алексей Павлович Малмакин²,
Святослав Анатольевич Ушанов³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ hi-teching@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>

² apmalmakin@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5383-1780>

³ saushanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследования и разработки способов подавления аддитивных шумов в волоконно-оптических интерферометрических датчиках, оптическая схема которых основана на двулучевом интерферометре Майкельсона. Предложенные решения предназначены для уменьшения уровня аддитивных шумов и увеличения соотношения сигнал-шум в фазовом сигнале волоконно-оптического интерферометрического датчика. Первый предложенный способ предполагает введение в оптическую схему дополнительного фотоприемника, что позволяет осуществить одновременную регистрацию одного и того же интерференционного сигнала дважды. В оптическую схему второго предложенного способа включается дополнительная волоконная линия задержки, которая позволяет опрашивать один и тот же датчик два раза. **Метод.** Для подавления аддитивных шумов применены методы математического анализа, основанные на когерентном усреднении сигналов. Когерентное усреднение сигналов позволяет без искажения полезной составляющей фазового сигнала уменьшить уровень аддитивных шумов на величину, пропорциональную квадратному корню из количества сигналов, участвующих в усреднении. **Основные результаты.** Экспериментальное исследование предложенных способов подавления аддитивных шумов показало уменьшение уровня шумов в 1,4 раза и увеличение соотношения сигнал-шум в фазовом сигнале волоконно-оптического интерферометрического датчика в среднем на 2,87 дБ в полосе частот от 250 до 2250 Гц. **Обсуждение.** Предложенные способы подавления аддитивных шумов могут быть использованы для увеличения соотношения сигнал-шум в волоконно-оптических измерительных системах, построенных на основе массивов интерферометрических датчиков, таких как волоконно-оптические буксируемые и донные сейсмические косы, системы охраны периметра, волоконно-оптические навигационные системы и комплексы.

Ключевые слова

волоконно-оптический фазовый датчик, двулучевой интерферометр, обработка сигналов, аддитивные шумы, шумы электроники, когерентное усреднение

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Волков А.В., Малмакин А.П., Ушанов С.А. Разработка и исследование способов подавления аддитивных шумов в волоконно-оптических интерферометрических датчиках // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 899–906. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-899-906

Development and investigation of the suppressing additive noises methods in fiber-optic interferometric sensors

Anton V. Volkov^{1✉}, Aleksei P. Malmakin², Sviatoslav A. Ushanov³

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

¹ hi-teching@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>

² apmalmakin@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5383-1780>

³ saushanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>

Abstract

The results of the investigation and develop of the suppressing additive noise methods in fiber-optic interferometric sensors, in which optical scheme is based on a two-beam Michelson interferometer, are presented. The proposed solutions are designed to reduce the level of additive noise and to increase the signal-to-noise ratio in the fiber-optic interferometric sensor phase signal. The first proposed method assumes the insertion of an additional photodetector into the optical scheme of the sensor, which allows simultaneous registration of the same interference signal twice. In the optical scheme of the second proposed method, an additional fiber delay line is included, which allows to interrogate the same sensor twice. Mathematical analysis based on the coherent averaging of signals is applied for the suppressing of the additive noises. Coherent averaging of signals allows, without changing the useful component of the phase signal, to reduce the additive noise level by the value which is proportional to the square root of the averaged signals number. The experimental study of the proposed suppressing additive noise methods presented a decrease of the noise level by factor of 1.4 and an increase of the signal-to-noise ratio on an average by 2.87 dB in the frequency range from 250 to 2250 Hz in the phase signal of the fiber-optic interferometric sensor. The proposed methods of the suppressing additive noise can be used to increase the signal-to-noise ratio in fiber-optic measuring systems based on the interferometric sensors arrays, such as fiber-optic towed and bottom seismic streamers, perimeter security systems, fiber-optic navigation systems and complexes.

Keywords

fiber optic phase sensor, dual-beam interferometer, signal processing, additive noise, electronics noise, coherent averaging

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSER-2024-0006).

For citation: Volkov A.V., Malmakin A.P., Ushanov S.A. Development and investigation of the suppressing additive noises methods in fiber-optic interferometric sensors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 899–906 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-899-906

Введение

На сегодняшний день волоконно-оптические датчики широко применяются в гироскопии и навигации, системах охраны периметра, геофизической разведке полезных ископаемых на морском шельфе, в измерениях деформации композитных материалов, а также в качестве высокотемпературных сенсоров для измерения состояния газотурбинных двигателей [1–3].

Волоконно-оптические фазовые датчики, основанные на интерференции оптических сигналов, обладают высокой чувствительностью к измеряемым физическим воздействиям и могут быть использованы для создания оптических интерферометрических измерительных приборов. При прохождении света через интерферометр происходит преобразование разности фаз оптических лучей в его плечах в изменение интенсивности света на его выходе. Разность фаз оптических лучей в интерферометре отражает разницу в оптической длине волокна между его плечами, которая изменяется под действием физических величин, таких как температура, давление и т. д. По этой причине, основным преимуществом интерферометрических датчиков является их высокая чувствительность, позволяющая регистрировать изменения оптической длины волокна порядка нескольких сотен фемтометров (примерно 10^{-13} м) [4, 5].

Однако, из-за высокой чувствительности интерферометрических датчиков к изменениям под действием

физических величин, они также имеют высокую чувствительность к шумам, возникающим в волоконно-оптической системе, таким как фазовые шумы источника излучения, шумы интенсивности оптического излучения, дробовой шум фотоприемников (ФП), шумы аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и каскадов усилителей, тепловой фазовый шум волокна и т. д. [6–10]. Совокупность таких шумов формирует уровень собственных шумов в фазовом сигнале датчика и определяет его соотношение сигнал-шум и нижний предел динамического диапазона [10, 11].

Наиболее значимый вклад в ухудшение соотношения сигнал-шум интерферометрического датчика в составе волоконно-оптической измерительной системы, вносят: фазовый шум источника излучения, шум интенсивности и шумы электроники [8–10]. Фазовые шумы источника излучения могут быть значительно уменьшены при использовании узкополосного лазерного источника с высокой длиной когерентности и согласованного интерферометра, т. е. интерферометра, длины плеч которого равны между собой [9, 10, 12–15]. Шумы интенсивности являются мультипликативными компонентами интерферометрического сигнала и устраняются при использовании алгоритма гомодинной демодуляции интерферометрических сигналов на основе вычисления значений функций арктангенса (PGC-Atan) [16–18] или с помощью нормирования информационного сигнала на опорный канал, содержащего

только шумовую компоненту сигнала [10, 11, 19, 20]. Следовательно, последний значимый источник собственных шумов — шумы электроники, представляющие собой аддитивную добавку к интерференционному сигналу датчика, т. е. аддитивный шум. Широко распространенной практикой является проектирование печатной платы и выбор электронных компонентов таким образом, чтобы обеспечить минимизацию уровня аддитивного шума в разрабатываемом устройстве [7–9]. Однако использование способов, компенсирующих аддитивный шум в режиме реального времени, позволит увеличить соотношение сигнал-шум не только в новых разрабатываемых системах, но также и в уже готовых устройствах.

Цель настоящей работы — исследование и разработка способов подавления аддитивных шумов в сигнале волоконно-оптической интерферометрической измерительной системы (ВОИС), повышение соотношения сигнал-шум и уменьшение нижнего порога динамического диапазона в сигнале волоконно-оптического фазового датчика.

Принцип работы предложенных способов подавления аддитивных шумов

Один из способов построения ВОИС — оптическая схема на основе пространственного разделения плеч двулучевого интерферометра Майкельсона, так называемая оптическая схема на основе разностной

интерферометрии с согласованными траекториями (Path-Matched Difference Interferometry, PMDI) [1, 2, 10]. Схема ВОИС на основе PMDI и временная диаграмма, поясняющая принцип ее работы, представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, *a*, основной особенностью построения представленной схемы является разделение в пространстве опорного и сигнального путей двулучевого интерферометра Майкельсона: опорное плечо располагается в КИ рядом с электроникой в блоке обработки сигналов, а измерительное плечо находится в ВОИД, который может быть размещен на любом расстоянии от обрабатывающей электроники. КИ и ВОИД изготавливаются так, чтобы разница их длин плеч была одинакова, обеспечивая тем самым минимальный уровень фазовых шумов источника оптического излучения и максимальный размах интерференционного сигнала [9, 10, 12, 13].

Согласно рис. 1, *b*, ИИ формирует оптический импульс, который попадая в КИ, разделяется на два импульса, временная задержка между которыми пропорциональна разнице длин плеч КИ. Полученные импульсы после КИ попадают в ВОИД, где из них формируются две пары импульсов, приходящих от обоих плеч ВОИД. Как было отмечено, из-за обеспечения равной разности хода между плечами КИ и ВОИД импульсы, прошедшие по разным плечам КИ и ВОИД, будут интерферировать и приходить на ФП в один и тот же момент времени. Таким образом, на входе ФП фор-

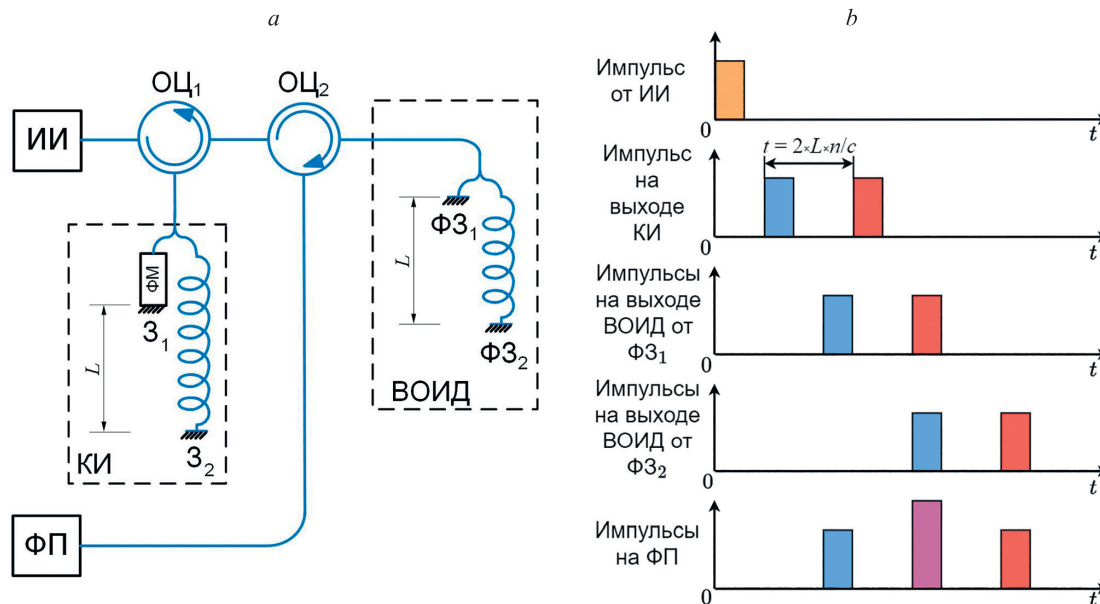


Рис. 1. Схема волоконно-оптической интерферометрической измерительной системы на основе PMDI:

ИИ — источник излучения; ОЦ — оптический циркулятор; ФМ — фазовый модулятор; З — зеркало; КИ — компенсационный интерферометр; ФЗ — зеркало Фарадея; ВОИД — волоконно-оптический интерферометрический датчик; ФП — фотоприемник (*a*). Временная диаграмма, показывающая принцип работы схемы волоконно-оптической интерферометрической измерительной системы на основе PMDI: t — временная задержка между оптическими импульсами на выходе КИ; L — разница длин плеч КИ; n — показатель преломления волокна, c — скорость света в вакууме (*b*)

Fig. 1. Fiber-optic interferometric measurement system PMDI-based scheme (*a*): ИИ — light source, ОЦ — optical circulator, ФМ — phase modulator, З — mirror, КИ — compensation interferometer, ФЗ — Faraday mirror, ВОИД — fiber-optic interferometric sensor, ФП — photodetector, and a timing diagram showing fiber-optic interferometric measurement system PMDI-based scheme operating principle; t — time delay between optical pulses at the KI output, L — path length difference in KI, n — fiber refractive index, c — speed of light in vacuum (*b*)

мируется интерференционный импульс, содержащий в себе информацию о фазовом сигнале.

В разделе «Введение» отмечено, что интерферометрический сигнал ВОИД будет состоять не только из информационного сигнала, но и содержать шумы различной природы. Одними из основных источников шумов для такой схемы будут являться шумы электроники, основной вклад в которые вносят шумы приемного каскада усилителей и шумы АЦП. Шумы электроники в интерференционном сигнале являются аддитивной компонентой и имеют нормальное (гауссовское) распределение [7–9].

Для уменьшения уровня аддитивных шумов в интерференционном сигнале ВОИД в настоящей работе предложены два способа их подавления, основанные на когерентном усреднении сигналов [21]. При когерентном усреднении полезная оставляющая фазовых сигналов остается неизменной, а уровень усредненной шумовой компоненты уменьшается из-за случайной природы аддитивного шума. Следовательно, среднеквадратичное отклонение усредненного сигнала аддитивных шумов можно описать следующим выражением [21–23]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение сигнала без усреднения; $\bar{\sigma}$ — среднеквадратичное отклонение усредненного сигнала; n — количество сигналов, участвующих в усреднении.

Согласно выражению (1), уровень аддитивных шумов в измеряемом фазовом сигнале будет уменьшаться пропорционально квадратному корню из количества когерентно усредненных фазовых сигналов. На рис. 2 представлены два способа подавления аддитивных

шумов в сигнале ВОИД на основе рассмотренного математического анализа по формуле (1).

Схема, показанная на рис. 2, а, является модификацией схемы, изображенной на рис. 1, а, в которую установлены дополнительный ФП и оптический разветвитель 50:50. Таким образом, один и тот же интерференционный сигнал разделяется и приходит одновременно на оба ФП, далее каждый сигнал обрабатывается независимо с помощью алгоритма РГС-Атап. Полученные фазовые сигналы усредняются и формируют результирующий сигнал, который можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{рез}}(t) &= \frac{\varphi_1(t) + \varphi_2(t)}{2} = \frac{2\varphi(t) + n_1(t) + n_2(t)}{2} = \\ &= \varphi(t) + \frac{n(t)}{\sqrt{2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{рез}}(t)$ — результат усреднения двух сигналов $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$; $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ — первый и второй фазовые сигналы, представляющие собой сумму измеряемого полезного фазового сигнала и аддитивных шумов; $\varphi(t)$ — измеряемый полезный фазовый сигнал; $n_1(t)$ и $n_2(t)$ — сигналы аддитивных шумов; $n(t)$ — сумма сигналов $n_1(t)$ и $n_2(t)$.

Согласно формуле (2), каждый приемный тракт является уникальным источником аддитивных шумов, некоррелированных между собой, что приводит к тому, что усредненный сигнал будет состоять из измеряемого фазового сигнала и аддитивного шума, уменьшенного в $\sqrt{2}$ раз. Следует отметить, что для достижения максимально возможного уменьшения уровня аддитивных шумов, во-первых, ФП, приемные каскады усилителей и АЦП должны быть одинаковыми. Во-вторых, интерференционный сигнал должен захватываться на обоих

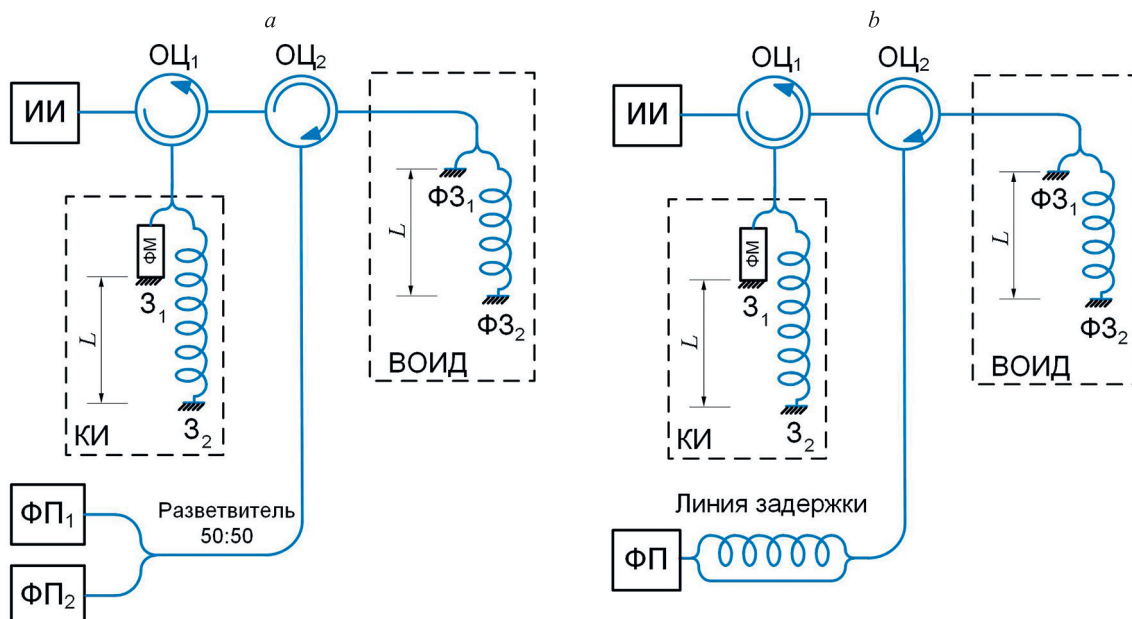


Рис. 2. Схема волоконно-оптической интерферометрической измерительной системы для двух способов подавления аддитивных шумов на основе: двух фотоприемников (а) и линии задержки и разделения интерференционного сигнала (б)

Fig. 2. Fiber-optic measurement system scheme of the suppressing additive noise method based on: two photodetectors (a) and a delay line and interference signal separation (b)

АЦП в один и тот же момент времени и уровень его мощности на ФП должен совпадать.

Второй способ подавления аддитивных шумов, представленный на рис. 2, *b*, использует один и тот же тракт электроники для приема интерференционных сигналов, задержанных относительно друг друга по времени. Для обеспечения приема интерференционных сигналов одним ФП, в предложенную схему добавляется дополнительный путь к ФП через линию задержки и пару оптических разветвителей 50:50. Основным преимуществом данного способа перед схемой, изображенной на рис. 2, *a*, является использование одной и той же приемной электроники, что позволяет обеспечить идентичность параметров интерференционных сигналов, таких как постоянное смещение АЦП и коэффициенты преобразования трансимпедансного усилителя и ФП. Результирующий фазовый сигнал на выходе рассмотренной схемы, а также ограничения при ее реализации аналогичны результирующему сигналу и ограничениям, получаемым при использовании схемы с двумя ФП.

Результаты экспериментального исследования

Для проверки работы предложенных способов подавления аддитивных шумов на практике была собрана экспериментальная установка, изображенная на рис. 3.

Согласно рис. 3, источник излучения, установленный на плате обработки сигналов, генерирует оптические импульсы длительностью 10 нс и частотой 1 МГц. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser — вертикально излучающий лазер) фирмы Optilab с центральной длиной волны оптического излучения 1550 нм и шириной спектральной линии 0,02 нм. Полученный импульс попадает в одну из предложенных схем (рис. 2), после чего на входе ФП PDI-40

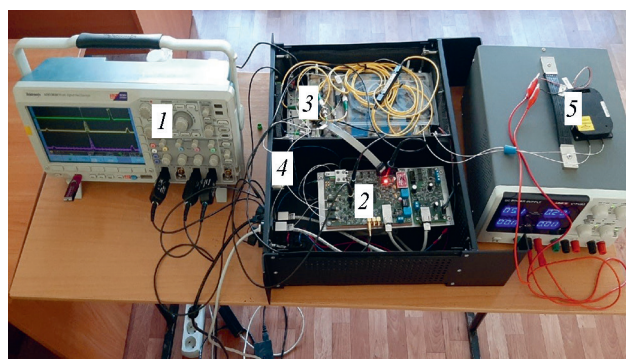


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования способов подавления аддитивных шумов:

1 — цифровой осциллограф MSO 3034; 2 — плата обработки сигналов; 3 — схема волоконно-оптической интерферометрической измерительной системы; 4 — блок обработки сигналов; 5 — блок питания UTP3303

Fig. 3. Experimental setup for researching of the suppressing additive noise methods: 1 — MSO 3034 digital oscilloscope; 2 — signal processing board; 3 — fiber-optic interferometric measurement system scheme; 4 — signal processing unit; 5 — UTP3303 power supply

фирмы Laserscom формируются интерферометрические сигналы, которые оцифровываются с помощью 16-битной АЦП AD9266 фирмы Analog Devices и попадают на вход программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Cyclone V фирмы Intel FPGA. ПЛИС на плате обработки сигналов выполняет ряд важных функций: синхронизирует момент отправки оптического импульса в схему с моментом регистрации полученных интерференционных сигналов на АЦП, генерирует сигнал вспомогательной модуляции, осуществляет обработку полученных интерференционных сигналов согласно алгоритму гомодинной демодуляции сигналов PGC-Atan и обеспечивает выдачу итогового результирующего сигнала на персональный компьютер (ПК) через Ethernet.

В схемах, изображенных на рис. 2, разница длин плеч в КИ и ВОИД составила 15 м. Длина линии задержки во второй предложенной схеме составила 31,25 м. Выбор такой длины линии задержки позволяет опрашивать оба интерференционных импульса за один и тот же период опроса. Одномодовое волокно с сохранением поляризации (PM) марки ESC-4 и производства ЦНИИ «Электроприбор» использовалось для подключения оптических компонент до второго ОЦ (рис. 2), а стандартное одномодовое волокно (SM) стандарта ITU-T G.657.A1 и производства компании OFC — для подключения компонент после второго ОЦ.

Для контроля интерференционных сигналов, а также момента их регистрации на АЦП, данные сигналы дополнительно были подключены к цифровому осциллографу MSO 3034 фирмы Tektronix. Полученные осциллограммы интерференционных сигналов с выхода предложенных схем подавления аддитивных шумов изображены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, *a*, для достижения максимального соотношения сигнал-шум в результирующем фазовом сигнале, размах обоих интерференционных сигналов обеспечивался одинаковым (примерно 1 В) путем добавления оптического усилителя, основанного на оптическом волокне, легированном ионами эрбия фирмы INST и дополнительных аттенюаторов в оптическую схему. Аналогичным способом регулировалась мощность интерференционных импульсов в схеме способа подавления аддитивных шумов на основе линии задержки (рис. 4, *b*).

В рамках экспериментального исследования, с блока обработки сигналов на ПК синхронно записывались три измеряемых фазовых сигнала: пара фазовых сигналов, получаемых непосредственно после алгоритма PGC-Atan, и итоговый усредненный фазовый сигнал. В процессе эксперимента на ВОИД не оказывалось никакого внешнего воздействия, т. е. на ПК записывались сигналы, содержащие только аддитивные шумы и внешние помехи, представляющие собой шум окружающей среды. Полученные измеряемые фазовые сигналы и их спектральные плотности мощности для предложенных способов подавления аддитивных шумов представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, *a*, *b*, средние уровни аддитивных шумов в измеряемых фазовых сигналах 1 и 2 составили соответственно 92,4 мкрад/√Гц и 97,3 мкрад/√Гц в

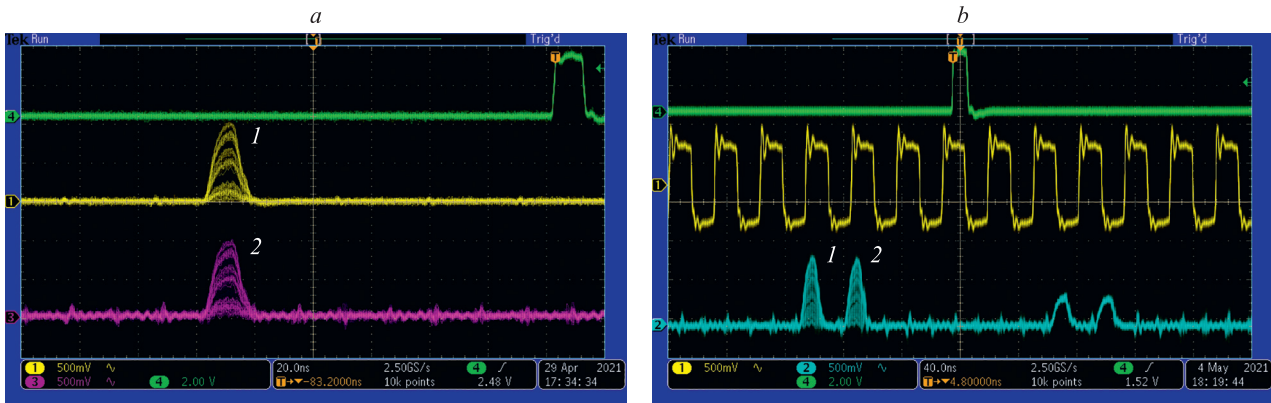


Рис. 4. Осциллограммы интерференционных сигналов предложенной схемы на основе двух фотоприемников: 1 — сигнал с ФП 1, 2 — сигнал с ФП 2 (а) и линии задержки: 1 — импульс, прошедший напрямую до ФП, 2 — импульс, прошедший через линию (б)

Fig. 4. Interference signals oscillograms of the proposed optical scheme based on two photodetectors (a): 1 — signal from FP 1, 2 — signal from FP 2, and a delay line: 1 — pulse that passed directly to the FP, 2 — pulse passed through the delay line (b)

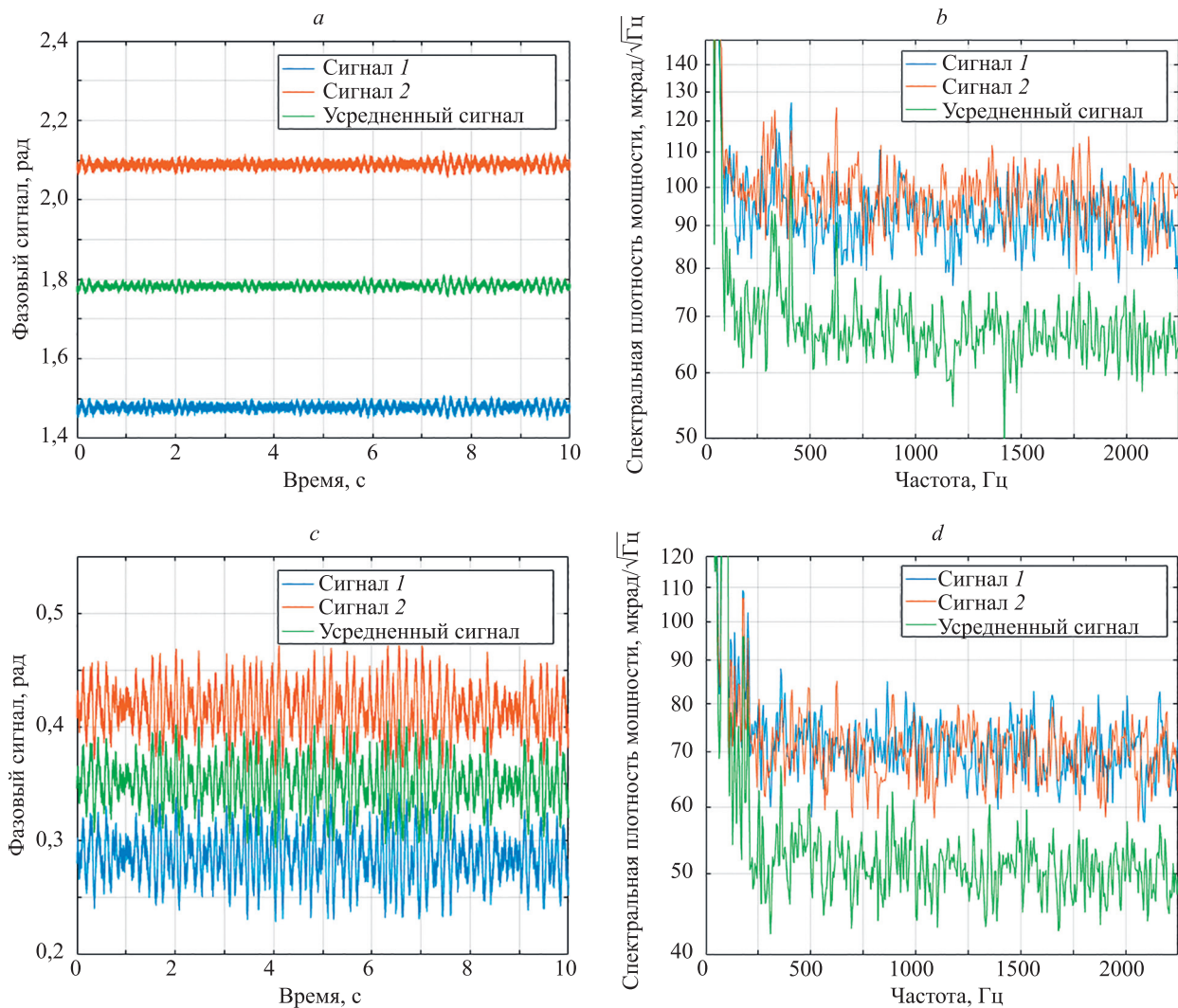


Рис. 5. Фазовые сигналы предложенной схемы на основе двух фотоприемников (а) и линии задержки (с); спектральные плотности мощностей фазовых сигналов предложенной схемы на основе двух фотоприемников (б) и линии задержки (д)

Fig. 5. Phase signals of the proposed optical scheme based on two photodetectors (a) and a delay line (c); power spectral densities of phase signals of the scheme based on two photodetectors (b) and a delay line (d)

полосе частот от 250 до 2250 Гц для схемы подавления аддитивных шумов на основе двух ФП. Средний уровень аддитивных шумов в схеме на основе двух ФП в усредненном фазовом сигнале равен 67,5 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в полосе частот от 250 до 2250 Гц, что соответствует уменьшению уровня аддитивных шумов в среднем в 1,4 раза и увеличению соотношения сигнал-шум по сравнению с измеряемыми фазовыми сигналами 1 и 2 в среднем на 2,95 дБ.

Согласно рис. 5, с, b, для схемы подавления аддитивных шумов на основе волоконной линии задержки средние уровни аддитивных шумов в измеряемых фазовых сигналах 1 и 2 оказались равны 70,5 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и 70 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в полосе частот от 250 до 2250 Гц соответственно, а средний уровень аддитивных шумов в усредненном фазовом сигнале составил 51 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Таким образом, предложенный способ подавления аддитивных шумов на основе линии задержки уменьшает уровень аддитивных шумов в усредненном фазовом сигнале в среднем в 1,38 раза, что соответствует увеличению соотношения сигнал-шум в среднем на 2,78 дБ.

Заключение

В настоящей работе предложены два способа подавления аддитивных шумов в фазовом сигнале волоконно-оптической интерферометрической измерительной системы. Способы представляют собой модификации схемы волоконно-оптической интерферометрической

измерительной системы на основе пространственного разделения плеч двулучевого интерферометра Майкельсона. В первом способе подавления аддитивных шумов одинаковый интерференционный сигнал подается на вход двух фотоприемников и опрашивается независимо обоими аналого-цифровыми преобразователями. Второй способ использует только один фотоприемник и разделяет интерференционный сигнал на две его копии, одна из которых приходит напрямую к фотоприемнику, а вторая проходит через волоконную линию задержки. Далее, в алгоритме обработки сигналов полученные интерференционные сигналы преобразуются в пару фазовых сигналов, из которых затем формируют результирующий усредненный сигнал.

Согласно результатам экспериментального исследования, предложенные способы подавления аддитивных шумов в результирующем фазовом сигнале волоконно-оптического интерферометрического датчика обеспечивают уменьшение аддитивных шумов в среднем в 1,4 раза, что позволяет увеличить соотношение сигнал-шум в усредненном сигнале и понизить нижнюю границу динамического диапазона датчика в среднем на 2,87 дБ в полосе частот от 250 до 2250 Гц. Более того, для достижения большего подавления аддитивных шумов предложенные схемы могут быть дополнительно модифицированы путем добавления в них дополнительных фотоприемников или волоконных линий задержек, или комбинированием обоих способов друг с другом.

Литература

1. Udd E., Spillman W.B., Jr. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011. 506 p.
2. Yu F.T.S., Ruffin P.B., Yin S. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 494 p.
3. Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П. Волоконная оптика и приборостроение. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
4. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory // *Washington Academic Science Journal*. 2004. V. 90. N 3. P. 18.
5. Jackson D.A., Dandridge A., Sheem S.K. Measurement of small phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer // *Optics Letters*. 1980. V. 5. N 4. P. 139–141. <https://doi.org/10.1364/ol.5.000139>
6. Leach W.M. Fundamentals of low-noise analog circuit design // *Proceedings of the IEEE*. 1994. V. 82. N 10. P. 1515–1538. <https://doi.org/10.1109/5.326411>
7. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing // *Applied Physics*. 2004. V. 37. N 18. P. R197–R216. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/18/r01>
8. Blotekjaer K. Fundamental noise sources that limit the ultimate resolution of fiber optic sensors // *Proceedings of SPIE*. 1998. V. 3555. P. 1–12. <https://doi.org/10.1117/12.318192>
9. Киреевков А.Ю. Волоконно-оптические интерферометрические методы для построения измерительных систем на основе поверхностно-излучающего лазера: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / НИУ ИТМО. СПб., 2017. 155 с.
10. Волков А.В. Способы подавления фазовых шумов и помех в массиве волоконно-оптических интерферометрических датчиков: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / НИУ ИТМО. СПб., 2019. 177 с.
11. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation

References

1. Udd E., Spillman W.B., Jr. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011, 506 p.
2. Yu F.T.S., Ruffin P.B., Yin S. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, 494 p.
3. Butusov M.M., Galkin S.L., Orobinskii S.P. *Fiber Optics and Instrument Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 328 p. (in Russian)
4. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory. *Washington Academic Science Journal*, 2004, vol. 90, no. 3, pp. 18.
5. Jackson D.A., Dandridge A., Sheem S.K. Measurement of small phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer. *Optics Letters*, 1980, vol. 5, no. 4, pp. 139–141. <https://doi.org/10.1364/ol.5.000139>
6. Leach W.M. Fundamentals of low-noise analog circuit design. *Proceedings of the IEEE*, 1994, vol. 82, no. 10, pp. 1515–1538. <https://doi.org/10.1109/5.326411>
7. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing. *Applied Physics*, 2004, vol. 37, no. 18, pp. R197–R216. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/18/r01>
8. Blotekjaer K. Fundamental noise sources that limit the ultimate resolution of fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3555, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1117/12.318192>
9. Kireenkov A.Iu. *Fiber-optic interferometric methods for constructing the measuring systems based on a surface-emitting laser*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2017, 155 p. (in Russian)
10. Volkov A.V. *Methods for suppressing phase noise and interference in an array of fiber-optic interferometric sensors*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2019, 177 p. (in Russian)
11. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique. *Advances in Optical Technologies*, 2014, vol. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/81510>

- technique // *Advances in Optical Technologies*. 2014. V. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/81510>
12. Dandridge A. Zero path-length difference in fiber-optic interferometers // *Journal of Lightwave Technology*. 1983. V. 1. N 3. P. 514–516. <https://doi.org/10.1109/jlt.1983.1072134>
 13. Kersey A.D., Berkoff T.A. Passive laser phase noise suppression technique for fiber interferometers // *Proceedings of SPIE*. 1991. V. 1367. P. 310–319. <https://doi.org/10.1117/12.24759>
 14. Плотников М.Ю., Волков А.В. Способ измерения фазового сигнала двухлучевого волоконно-оптического интерферометра. Патент RU2719635C1. Бюл. 2020. № 12.
 15. Plotnikov M.Y., Volkov A.V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. V. 39. N 14. P. 4853–4860. <https://doi.org/10.1109/jlt.2021.3075781>
 16. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors // *Proceedings of SPIE*. 1994. V. 2191. P. 324–337. <https://doi.org/10.1117/12.173962>
 17. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 6292. P. 62921E. <https://doi.org/10.1117/12.678455>
 18. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Y., Volkov A.V., Mekhregin M.V., Kireenkov A.Y. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2018. V. 18. N 5. P. 1985–1992.
 19. Dandridge A., Tveten A.B. Properties of diode lasers with intensity noise control // *Applied Optics*. 1983. V. 22. N 2. P. 310–312. <https://doi.org/10.1364/ao.22.000310>
 20. Bennett S.M. Apparatus and method for electronic RIN reduction in fiber-optic sensors. Patent US6370289B1. 2002.
 21. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / пер с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 652 с.
 22. Johnson R.A., Miller I., Freund J.E. *Probability and Statistics for Engineers*. London: Pearson Education, 2000. 642 p.
 23. Spiegel M.R., Stephens L.J. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Statistics*. McGraw-Hill, 1999. 538 p.
 24. Dandridge A. Zero path-length difference in fiber-optic interferometers. *Journal of Lightwave Technology*, 1983, vol. 1, no. 3, pp. 514–516. <https://doi.org/10.1109/jlt.1983.1072134>
 25. Kersey A.D., Berkoff T.A. Passive laser phase noise suppression technique for fiber interferometers. *Proceedings of SPIE*, 1991, vol. 1367, pp. 310–319. <https://doi.org/10.1117/12.24759>
 26. Plotnikov M.Yu., Volkov A.V. *Method of measuring phase signal of double-beam fibre-optic interferometer*. Patent RU2719635C1, 2020. (in Russian)
 27. Plotnikov M.Y., Volkov A.V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 14, pp. 4853–4860. <https://doi.org/10.1109/jlt.2021.3075781>
 28. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2191, pp. 324–337. <https://doi.org/10.1117/12.173962>
 29. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6292, pp. 62921E. <https://doi.org/10.1117/12.678455>
 30. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Y., Volkov A.V., Mekhregin M.V., Kireenkov A.Y. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1985–1992.
 31. Dandridge A., Tveten A.B. Properties of diode lasers with intensity noise control. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 2, pp. 310–312. <https://doi.org/10.1364/ao.22.000310>
 32. Bennett S.M. *Apparatus and method for electronic RIN reduction in fiber-optic sensors*. Patent US6370289B1, 2002.
 33. Lyons R.G. *Understanding Digital Signal Processing*. Addison Wesley Publishing Company, 1997, 517 p
 34. Johnson R.A., Miller I., Freund J.E. *Probability and Statistics for Engineers*. London, Pearson Education, 2000, 642 p.
 35. Spiegel M.R., Stephens L.J. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Statistics*. McGraw-Hill, 1999, 538 p.

Авторы

Волков Антон Валерьевич — кандидат технических наук, начальник группы, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57194565170](https://orcid.org/0000-0002-7988-5854), <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>, hi-teching@yandex.ru

Малмакин Алексей Павлович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-5383-1780>, apmalmakin@itmo.ru

Ушанов Святослав Анатольевич — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>, saushanov@itmo.ru

Authors

Anton V. Volkov — PhD, Head of Group, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57194565170](https://orcid.org/0000-0002-7988-5854), <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>, hi-teching@yandex.ru

Aleksei P. Malmakin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-5383-1780>, apmalmakin@itmo.ru

Sviatoslav A. Ushanov — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>, saushanov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 10.04.2024

Одобрена после рецензирования 05.10.2024

Принята к печати 22.11.2024

Received 10.04.2024

Approved after reviewing 05.10.2024

Accepted 22.11.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»