

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 535.92

**МЕТОД ВЫЧИТАНИЯ ФАЗОВОГО ШУМА ЛАЗЕРА В КОГЕРЕНТНОМ
ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ НА ОСНОВЕ СЛАБЫХ
БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК¹**

© 2026 г. Р. И. Хан*, С. А. Низельник, А. А. Жирнов, К. В. Степанов,
Г. Б. Сидельников, А. Б. Пнёв

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, с1

**E-mail: khan@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 02.06.2026

Принята к публикации 11.06.2026

Предлагается метод компенсации фазового шума лазера для рефлектометра на слабых брэгговских решетках, основанный на когерентном детектировании прямого и задержанного отраженных сигналов с последующим вычислением их разностной фазы. В отличие от случая рэлеевского рассеяния, такой подход обеспечивает подавление фазовых шумов как зондирующего сигнала, так и гетеродина. Работоспособность метода экспериментально подтверждена для чувствительного элемента длиной 10 км с использованием лазерного диода с распределенной обратной связью LD-PD PL-DFB-1550-A-A81-PA-NL с шириной спектральной линии до 100 кГц. Показано, что применение предложенного метода обеспечивает снижение шумового уровня на 34.5 дБ до –73.36 дБ относительно рад²/Гц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Квазираспределенные датчики на слабых волоконных брэгговских решетках (СВБР) рассматриваются как альтернатива фазочувствительным рефлектометрам рэлеевского рассеяния (ф-OTDR) [1]. В системах данного типа в качестве квазираспределенного чувствительного элемента (ЧЭ) используется одномодовое оптическое волокно (ОВ) с записанным в нем массивом искусственных точечных отражателей [2]. В отличие от рэлеевского рассеяния, имеющего случайный характер, использование детерминированных

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

отражателей хоть и ограничивает бюджет потерь ЧЭ [3], но одновременно позволяет повысить достоверность измерений виброакустических, сейсмических и гидроакустических воздействий за счет априорно известных положений и коэффициентов отражения СВБР.

Виброакустические СВБР-системы могут заменять ϕ -OTDR в задачах, не требующих рекордной протяженности мониторинга, но предъявляющих повышенные требования к достоверности измерений. К таким приложениям относятся контроль состояния инженерных конструкций [4], а также построение гидроакустических [5] и акустических [6, 7] кос и антенных решеток.

Как и в случае когерентной рефлектометрии, в современных СВБР-системах преимущественно используется когерентное детектирование, тогда как системы с прямым детектированием в настоящее время практически выходят из употребления. По этой причине в рамках данной работы они рассматриваться не будут.

В когерентных СВБР-системах возникают проблемы, во многом аналогичные проблемам ϕ -OTDR: интерференционные и поляризационные замирания, влияние фазовых шумов лазерного источника. Поляризационные замирания могут быть устранены путем разложения отраженного поля на две ортогональные поляризационные компоненты. Интерференционные замирания, в свою очередь, устраняются исключением самого механизма их возникновения. Так, в когерентных рефлектометрах на основе СВБР при выборе конфигурации, в которой отраженные от соседних решеток зондирующие импульсы не перекрываются, интерференция между ними отсутствует, а следовательно, отсутствует и связанный с ней механизм возникновения замираний [8].

В отличие от ϕ -OTDR в СВБР-системах при выборе конфигурации, исключающей перекрытие отраженных от соседних решеток зондирующих импульсов, фазовый шум, заключенный в зондирующий сигнал, подавляется при вычислении разности фаз между соседними отражателями [9]. Вместе с тем сохраняется вклад фазовых шумов гетеродина, который увеличивается с ростом расстояния между отражателями, что приводит к повышенным требованиям к ширине спектральной линии лазерного источника.

В известных СВБР-системах компенсация влияния фазового шума гетеродина осуществляется его непосредственной записью с использованием вспомогательного интерферометра или опорного канала [10, 11].

В настоящей работе для детерминированного чувствительного элемента на СВБР предлагается реализовать идею, предложенную в работе [12] для когерентного рефлектометра рэлеевского рассеяния, заключающуюся в когерентном детектировании прямого и задержанного отраженных сигналов с последующим вычислением их разностной фазы. В

отличие от случая рэлеевского рассеяния, такой подход теоретически обеспечивает полное подавление фазовых шумов как зондирующего сигнала, так и гетеродина.

Работоспособность предложенного метода подтверждена экспериментально для дистанции ЧЭ 10 км с использованием лазерного диода с распределенной обратной связью LD-PD PL-DFB-1550-A-A81-PA-NL с шириной спектральной линии до 100 кГц. Показано, что применение предложенного метода обеспечивает снижение шумового уровня на 34.5 дБ до -73.36 дБ относительно $\text{рад}^2/\text{Гц}$.

2. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

На рис. 1 представлена структурная схема устойчивого к замираниям когерентного рефлектометра на СВБР с реализацией предложенного метода вычитания фазового шума.

Рис. 1 Структурная схема устойчивого к замираниям когерентного рефлектометра на СВБР с

В качестве источника излучения (ИИ) используется лазерный диод LD-PD PL-DFB-1550-A-A81-PA-NL. Часть его излучения ответвляется оптическим разветвителем (ОР1) с сохранением состояния поляризации и используется в качестве гетеродина $\tilde{A}_{LO}(t)$. Из оставшейся части излучения с помощью акустооптического модулятора (АОМ), управляемого генератором импульсов (ГИ), формируется зондирующий сигнал $\tilde{A}_p(t)$. Зондирующий сигнал через оптический циркулятор (ОЦ) вводится в квазираспределенный чувствительный элемент с записанным в нем массивом слабых брэгговских решеток (СВБР ЧЭ).

Отраженное поле $\tilde{A}_R(t)$, возвращающееся из ЧЭ, ответвляется циркулятором и с помощью ОР3 разделяется на два канала: прямой $\tilde{A}_{RB}(t)$ и задержанный $\tilde{A}_{RD}(t)$. Оба канала параллельно разделяются поляризационными разветвителями ПР1 и ПР2 на ортогональные компоненты $\tilde{A}_{RB,x}(t)$, $\tilde{A}_{RB,y}(t)$ и $\tilde{A}_{RD,x}(t)$, $\tilde{A}_{RD,y}(t)$, которые далее смешиваются с гетеродином в оптических разветвителях ОР6, ОР7, ОР8 и ОР9 с сохранением состояния поляризации.

Полученные гетеродинные сигналы детектируются балансными фотоприемными устройствами БФПУ1, БФПУ2, БФПУ3 и БФПУ4, в результате чего на их выходах формируются аналоговые сигналы $u_{RB,x}(t)$, $u_{RB,y}(t)$, $u_{RD,x}(t)$ и $u_{RD,y}(t)$, которые затем записываются осциллографом.

Длительность зондирующего импульса определяется расстоянием между решетками Δl_{WFBG} и назначается такой, чтобы отражения от соседних СВБР не пересекались. Введение поляризационного разделения позволяет повысить устойчивость к изменению состояния поляризации отраженного сигнала.

При выполнении условия равенства длины волокна задержки удвоенному расстоянию между соседними СВБР, $\Delta l_D = 2 \cdot \Delta l_{WFBG}$, влияние фазового шума лазерного источника теоретически полностью подавляется. Однако конечная точность задания длины волокна

задержки, и расстояния между решетками, различие показателей преломления вдоль быстрой и медленной осей оптического волокна, а также конечная точность изготовления оптических компонентов не позволяют реализовать этот случай в точности.

Таким образом, предложенная схема обеспечивает детектирование, устойчивое к замираниям поляризационной и интерференционной природы, а также позволяет подавить фазовые флуктуации лазерного источника. Для описания предложенного метода в следующем разделе рассматривается его математическая модель.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ФАЗОВОГО ШУМА

Рассмотрим процесс преобразования сигнала в когерентном рефлектометре на основе СВБР (рис. 1). Для упрощения аналитических выкладок пренебрежем поляризационными преобразованиями зондирующего и рассеянного сигналов в одномодовом оптическом волокне. Кроме того, будем считать, что сами СВБР выполнены в скрученном виде и не обладают поляризационной анизотропией [13].

Представим излучение лазерного источника в оптическом волокне в виде

$$\tilde{A}_{DFB}(t) = A_{DFB} \exp(j\varphi_n(t)), \quad (1)$$

где $A_{DFB} [\sqrt{\text{Вт}}]$ – амплитуда излучения, $\varphi_n(t) [\text{рад}]$ – фазовый шум.

Тогда часть излучения, отведенная на гетеродин, принимает вид

$$\tilde{A}_{LO,B}(t) = \frac{\sqrt{K} \tilde{A}_{DFB}(t)}{\sqrt{2}}, \quad \tilde{A}_{LO,D}(t) = j \frac{\sqrt{K} \tilde{A}_{DFB}(t - \Delta t_{err})}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент ответвления по мощности, Δt_{err} – дополнительная задержка гетеродинного канала, обусловленная погрешностью изготовления оптических разветвителей.

Зондирующий импульс, формируемый АОМ, описывается выражением

$$\tilde{A}_p(t) = \tilde{A}_{DFB}(t) \sqrt{\frac{1-K}{IL}} \text{rect}\left(\frac{t}{\Delta t_p}\right) \exp(j2\pi\nu_{AOM}t), \quad (3)$$

где IL – вносимые потери АОМ, Δt_p – длительность зондирующего импульса, ν_{AOM} – частота АОМ.

Рассмотрим СВБР ЧЭ в виде массива из M точечных отражателей, записанных в ОВ с равномерным шагом Δl_{WFBG} . Тогда его отклик можно представить в виде комплексного коэффициента отражения

$$R(z) = \sum_{m=1}^M \sqrt{r(1-r)^{m-1}} \exp(j2kn_{eff}z_m) \exp(-2\alpha_e z_m) \delta(z - z_m), \quad (4)$$

где r – коэффициент отражения каждой СВБР, $k = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число, $z_m = m\Delta l_{WFBG}$ –

координата m -й решетки, α_e – натуральный коэффициент затухания ОВ.

Комплексная огибающая отраженного сигнала выражается интегралом

$$\tilde{A}_R(t) = \int_0^L \tilde{A}_p \left(t - \frac{2n_{eff}z}{c} \right) R(z) dz. \quad (5)$$

С учетом формул (3) и (4) комплексная огибающая отраженного сигнала принимает вид суммы вкладов от отдельных решеток:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_R(t) = & A_{DFB} \sqrt{\frac{1-K}{IL}} \sum_{m=1}^M \sqrt{r(1-r)^{m-1}} \exp(-2\alpha_e z_m) \times \\ & \times \text{rect} \left(\frac{t - \frac{2n_{eff}z_m}{c}}{\Delta t_p} \right) \exp \left(j2\pi\nu_{AOM} \left(t - \frac{2n_{eff}z_m}{c} \right) \right) \times \\ & \times \exp \left(j\varphi_n \left(t - \frac{2n_{eff}z_m}{c} \right) \right) \exp(j2kn_{eff}z_m). \end{aligned} \quad (6)$$

При выполнении условия

$$\frac{c\Delta t_p}{2n_{eff}} < \Delta l_{WFBG} \quad (7)$$

отражения от соседних СВБР не перекрываются, и в каждый момент времени сигнал определяется вкладом только одной решетки.

Разделим отраженный сигнал на два плеча: прямое и задержанное на длину Δl_D , тогда

$$\tilde{A}_{RB}(t) = \frac{\tilde{A}_R(t)}{\sqrt{2}}, \quad \tilde{A}_{RD}(t) = j \frac{\tilde{A}_R \left(t - \frac{n_{eff}\Delta l_D}{c} \right)}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Тогда сигналы балансного когерентного детектирования в прямом и задержанном каналах принимают вид

$$\begin{aligned} u_{RB}(t) = & k_{BPR} \frac{|\tilde{A}_{RB}(t) + j\tilde{A}_{LO,B}(t)|^2 - |j\tilde{A}_{RB}(t) + \tilde{A}_{LO,B}(t)|^2}{2}, \\ u_{RD}(t) = & k_{BPR} \frac{|\tilde{A}_{RD}(t) + j\tilde{A}_{LO,D}(t)|^2 - |j\tilde{A}_{RD}(t) + \tilde{A}_{LO,D}(t)|^2}{2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где k_{BPR} [В/Вт] – коэффициент преобразования БФПУ.

Введем обозначения

$$\tau_m = \frac{2n_{eff}m\Delta l_{WFBG}}{c}, \quad \tau_D = \frac{n_{eff}\Delta l_D}{c}, \quad C_A = k_{BPR}A_{DFB}^2 \sqrt{\frac{K(1-K)}{IL}}, \quad (10)$$

Тогда выражения (9) с учетом формул (2), (6) и (8) принимают вид

$$\begin{aligned}
u_{RB}(t) &= C_A \sum_{m=1}^M \sqrt{r(1-r)^{m-1}} \exp(-2\alpha_e m \Delta l_{WFBG}) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{\Delta t_p}\right) \times \\
&\times \sin\left(2\pi\nu_{AOM}(t - \tau_m) + 2kn_{eff}m\Delta l_{WFBG} + \varphi_n(t - \tau_m) - \varphi_n(t)\right), \\
u_{RD}(t) &= C_A \sum_{m=1}^M \sqrt{r(1-r)^{m-1}} \exp(-2\alpha_e m \Delta l_{WFBG}) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_D - \tau_m}{\Delta t_p}\right) \times \\
&\times \sin\left(2\pi\nu_{AOM}(t - \tau_D - \tau_m) + 2kn_{eff}m\Delta l_{WFBG} + \varphi_n(t - \tau_D - \tau_m) - \right. \\
&\quad \left. - \varphi_n(t - \Delta t_{err})\right).
\end{aligned} \tag{11}$$

Сигналы (11) путем цифровой обработки могут быть преобразованы в комплексное аналитическое представление с помощью квадратурной демодуляции, односторонней полосовой фильтрации или преобразования Гильберта. Будем считать, что в результате применения одного из этих методов получены комплексные аналитические сигналы $\tilde{u}_{RB}(t)$ и $\tilde{u}_{RD}(t)$.

Рассмотрим идеальный случай, когда для полного подавления фазового шума, вносимого зондирующим сигналом и гетеродином, выполняются условия

$$\tau_D = \tau_{m+1} - \tau_m = \frac{2n_{eff}\Delta l_{WFBG}}{c}, \quad \Delta t_{err} = 0. \tag{12}$$

В этом случае в фазе произведения

$$\Delta\varphi_{WFBG}(t) = \arg(\tilde{u}_{RB}^*(t)\tilde{u}_{RD}(t)) \tag{13}$$

взаимно сокращаются компоненты, обусловленные фазовым шумом лазерного источника, и остается только разность фаз соседних решеток.

Небольшие отклонения от условий (12) обуславливают появление остаточной задержки $\Delta\tau$ и приводят к неполному подавлению фазового шума. В этом случае остаточный фазовый шум определяется выражением

$$\Delta\varphi_n(t) = \varphi_n(t) - \varphi_n(t - \Delta\tau). \tag{14}$$

В классическом методе обработки [8] задержанный канал формируется цифровым способом как сдвинутая во времени копия сигнала прямого канала $\tilde{u}_{RB}(t - \tau_D)$ и вычисляется фаза произведения

$$\Delta\varphi_{WFBG}(t) = \arg(\tilde{u}_{RB}^*(t)\tilde{u}_{RB}(t - \tau_D)). \tag{15}$$

При этом фазовый шум, заключенный в зондирующем сигнале, также сокращается, однако сохраняется слагаемое, обусловленное разностью фазовых шумов гетеродина,

$$\Delta\varphi_n(t) = \varphi_n(t) - \varphi_n(t - \tau_D). \tag{16}$$

Таким образом, в классическом когерентном рефлектометре на СВБР фазовые

флуктуации действуют на задержке τ_D , определяемой удвоенным расстоянием между соседними отражателями, тогда как применение предложенного метода подавления фазового шума позволяет свести действие фазовых флуктуаций к малой остаточной задержке $\Delta\tau$.

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых флуктуаций, дифференцированных на задержке τ , описываемых выражениями вида (14) и (16), определяется произведением СПМ мгновенного фазового шума лазера на спектральную характеристику передачи мощности разностного фазового шума [14]

$$|H_\tau(\nu)| = 4\sin^2(\pi\nu\tau), \quad (17)$$

где τ – время задержки.

Оценим теоретическую эффективность предложенного метода по отношению СПМ остаточного фазового шума при его применении $S_{sub}(\nu)$ к СПМ фазового шума без его применения $S_{basic}(\nu)$. При малых значениях аргумента синуса в выражении (17) данное отношение можно упростить до следующего вида:

$$\frac{S_{sub}(\nu)}{S_{basic}(\nu)} \approx \frac{\Delta\tau^2}{\tau_D^2} = \left(\frac{\frac{n_{eff}\Delta l_{err}}{c}}{\frac{2n_{eff}\Delta l_{WFBG}}{c}} \right)^2 = \left(\frac{\Delta l_{err}}{2\Delta l_{WFBG}} \right)^2. \quad (18)$$

В настоящей работе используется линия СВБР с расстоянием между решетками $\Delta l_{WFBG} = 40$ м. Обеспечение точности формирования волоконной схемы на уровне $\Delta l_{err} = 10$ см представляется практически реализуемым. В этом случае, согласно оценке (18), применение предложенного метода подавления фазового шума должно обеспечивать снижение СПМ остаточного фазового шума более чем в 6400 раз, что соответствует 38 дБ.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

С целью экспериментальной верификации эффективности предложенного метода подавления фазового шума в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, был собран экспериментальный стенд и зарегистрированы сырые данные прямого и задержанного каналов в двух ортогональных поляризациях: $u_{RB,X}(t)$, $u_{RB,Y}(t)$, $u_{RD,X}(t)$ и $u_{RD,Y}(t)$. Для полученных данных выполнена обработка по предложенному методу. Для сравнения на тех же исходных данных проведена классическая обработка. Сопоставление результатов двух подходов проводилось по уровню остаточного фазового шума.

На рис. 2 представлена структура экспериментального чувствительного элемента на основе СВБР. Чувствительный элемент содержит четыре пары СВБР с коэффициентом отражения по мощности 1%. Расстояние между решетками внутри каждой пары составляет

$\Delta l_{WFBG} = 40$ м, а между соседними парами – 200 м. Первая пара отражателей размещена на пьезоэлектрическом кольце, используемом для имитации внешнего возмущения. Для увеличения дистанции измерения перед первой парой СВБР включена катушка оптического волокна длиной 10 км.

Рис. 2. Структура экспериментального чувствительного элемента на слабых брэгговских решетках

Выходная мощность лазера LD-PD PL-DFB-1550-A-A81-PA-NL устанавливалась равной 20 мВт. С помощью оптического разветвителя ОР1 30% излучения направлялось в гетеродинный канал, а оставшиеся 70% подавались на вход акустооптического модулятора с частотой $\nu_{АОМ} = 200$ МГц. Длительность зондирующего импульса в эксперименте определялась из условия (7), она составляла $\Delta t_p = 200$ нс. Пиковая мощность импульса с учетом потерь в модуляторе составляла около 7 мВт, а частота опроса чувствительного элемента – 5 кГц. С учетом потерь в модуляторе пиковая мощность импульса достигала 7 мВт, а частота опроса чувствительного элемента составляла 5 кГц. Требуемая для подавления фазового шума лазера длина волокна задержки, равная удвоенному расстоянию между соседними решетками, составляла 80 м. В эксперименте использовалась вручную намотанная катушка длиной $\Delta l_D = 80 \text{ м} \pm 5 \text{ см}$. Длина катушки контролировалась с использованием метода анализа дифференциального фазового шума, описанного в работе [15].

Сигналы БФПУ записывались на осциллограф с частотой дискретизации 500 МГц и разрешением 8 бит, длительность записи составила 31 мс. На рис. 3а представлены сигналы прямого канала в двух поляризациях, на рис. 3б – сигналы задержанного канала в двух поляризациях, а на рис. 3в, г – их модули после квадратурной демодуляции, $|\tilde{u}_{RB,X}(t)|, |\tilde{u}_{RB,Y}(t)|, |\tilde{u}_{RD,X}(t)|$ и $|\tilde{u}_{RD,Y}(t)|$.

Рис. 3. Данные когерентного рефлектометра на СВБР

После квадратурной демодуляции выполнялась математическая обработка полученных данных с вычитанием фазового шума. Для этого соответствующие поляризационные каналы перемножались с комплексным сопряжением:

$$\begin{aligned}\tilde{u}_{diff,X}(t) &= \tilde{u}_{RB,X}^*(t)\tilde{u}_{RD,X}(t), \\ \tilde{u}_{diff,Y}(t) &= \tilde{u}_{RB,Y}^*(t)\tilde{u}_{RD,Y}(t),\end{aligned}\tag{19}$$

после чего постоянные фазовые составляющие устранялись алгоритмом RVS, предложенным в работе [16]. В результате в фазах сигналов $\tilde{u}_{diff,X,RVS}(t)$ и $\tilde{u}_{diff,Y,RVS}(t)$ сохранялись только разности фаз между соседними решетками, индуцированные возмущением.

Далее поляризационные каналы суммировались:

$$\tilde{u}_{diff}(t) = \tilde{u}_{diff,X,RVS}(t) + \tilde{u}_{diff,Y,RVS}(t), \quad (20)$$

что обеспечивало подавление замираний поляризационной природы. Из суммарного сигнала извлекалась фаза

$$\Delta\varphi_{WFBG}(t) = \arg(\tilde{u}_{diff}(t)). \quad (21)$$

На рис. 4 представлен фазовый водопад когерентного рефлектометра на СВБР при воздействии пьезоэлектрического кольца с частотой 250 Гц на первую пару СВБР, расположенную на расстоянии 10 км от начала ЧЭ. Вертикальная гармоническая структура и три равномерные светлые полосы соответствуют разностям фаз между парами СВБР.

Рис. 4. Фазовый водопад когерентного рефлектометра на СВБР при воздействии пьезоэлектрическим кольцом с применением метода подавления фазового шума лазера

Для сравнения была выполнена классическая обработка данных, в которой задержанный канал формировался цифровым способом:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{diff,X}(t) &= \tilde{u}_{RB,X}^*(t)\tilde{u}_{RB,X}(t - \tau_D), \\ \tilde{u}_{diff,Y}(t) &= \tilde{u}_{RB,Y}^*(t)\tilde{u}_{RB,Y}(t - \tau_D). \end{aligned} \quad (22)$$

В остальном последовательность операций оставалась прежней.

На рис. 5 представлен фазовый водопад когерентного рефлектометра на СВБР без применения метода подавления фазового шума лазера. На данном изображении затруднено выявление детерминированных структур, что обусловлено влиянием остаточного фазового шума лазера.

Рис. 5. Фазовый водопад когерентного рефлектометра на СВБР при воздействии пьезоэлектрического кольца без применения метода подавления фазового шума лазера

На рис. 6а показан акустический срез фазового водопада в зоне первой пары СВБР при воздействии пьезоэлектрическим кольцом, сплошной линией приведен результат обработки с применением метода подавления фазового шума, штриховой – без его применения. На рис. 6б приведены соответствующие спектральные плотности мощности (СПМ). На рис. 6в представлены СПМ акустических срезов в отсутствие воздействия пьезоэлектрического кольца.

Рис. 6. Анализ разности фаз первой пары СВБР

Средняя СПМ шума фазы при классической обработке составила –38.85 дБ, при применении предложенного метода она снизилась на 34.5 дБ, до –73.36 дБ (рис. 6в). Полученное значение несколько ниже теоретической оценки, равной 38 дБ, что может быть связано с неучтенным влиянием амплитудных шумов. Тем не менее экспериментальное исследование подтвердило эффективность предложенного метода.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен метод подавления фазового шума лазерного источника в когерентном рефлектометре на слабых брэгговских решетках, основанный на когерентном детектировании прямого и задержанного отраженных сигналов с последующим вычислением их разностной фазы. Показано, что при согласовании задержки с расстоянием между соседними решетками такой подход обеспечивает подавление фазовых шумов как зондирующего сигнала, так и гетеродина. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенного метода для чувствительного элемента длиной 10 км с использованием лазерного диода с шириной спектральной линии до 100 кГц. В эксперименте применение предложенного метода обеспечило снижение среднего шумового уровня на 34.5 дБ по сравнению с классической схемой когерентного СВБР-рефлектометра. Полученные результаты показывают, что предложенный подход позволяет существенно ослабить влияние фазового шума и тем самым расширить возможности практического применения более доступных лазерных источников в системах на СВБР.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГТУ им. Н. Э. Баумана (тема FSFN-2024-0060).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харасов Д.Р., Бенгальский Д.М., Вяткин М.Ю. и др. Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 5. С. 510. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42903547>
2. Попов С.М., Бутов О.В., Колосовский А.О. и др. Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 12. С. 1101. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48512039>
[Popov S.M., Butov O.V., Kolosovskii A.O. et al. Quantum Electronics. 2021. V. 51. № 12. P. 1101. <https://doi.org/10.1070/QEL17659>]
3. Харасов Д.Р., Бенгальский Д.М., Фомиряков Э.А. и др. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2021. № 3. С. 36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46589883>
[Kharasov D. R., Bengalskii D. M., Fomiryakov E. A. et al. Moscow University Physics Bulletin. 2021. V. 76. № 3. P. 167.]
4. Liu X., Tang Z., Gui X. et al. Sensors. 2024. V. 24. № 23. P. 7637. <https://doi.org/10.3390/s24237637> .

5. Wu S., Huang J., Pang Y., Wang J., Gu H. *Sensors*. 2024. V. 24. № 13. P. 4300.
<https://doi.org/10.3390/s24134300>
6. Бенгальский Д.М., Пономаренко Д.М., Одинцов В.А., Трещиков В.Н. Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2025). Пермь, 2025. С. 746. <https://doi.org/10.22184/9785948367361.746.748>.
7. Luo Z., Lu B., Huang J., Ran Ch., He H. *Opt. Express*. 2023. V. 31. № 19. P. 31342.
<https://doi.org/10.1364/OE.498027>
8. Wang Y., Xu B., Chenet G. *al. Sensors*. 2026. V. 26. № 2. P. 742.
<https://doi.org/10.3390/s26020742>
9. Liu T., Wang F., Zhang X. *et al. IEEE Photon. Technol. Lett.* 2018. V. 30. № 8. P. 677.
<https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2811411>
10. Wu M., Fan X., Liu Q., He Z. *Opt. Lett.* 2018. V. 43. № 15. P. 3594.
<https://doi.org/10.1364/OL.43.003594>
11. Wu M., Xinyu Fan X., Qingwen Liu Q., He Z. *Opt. Lett.* 2019. V. 44. № 24. P. 5969.
<https://doi.org/10.1364/OL.44.005969>
12. Qian H., Liu L., He H. *et al. Opt. Express*. 2025. V. 33. 14. P. 29395.
<https://doi.org/10.1364/OE.564779>
13. Butov O.V., Lopunov A.I., Ulyanov I. *et al. Sensors*. 2026. V. 26. № 1. P. 42.
<https://doi.org/10.3390/s26010042>.
14. Xu D., Yang F., Chen D. *et al.* 2015. V. 23. № 17. P. 22386.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.022386>
15. Ильговская Н.В., Уткин С.Д., Хан Р.И., Бутов О.В., Пнев А.Б. *Фотоника*. 2026. Т. 20. № 3. С. 226. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2026.20.3.226.234> .
16. Chen D., Liu Q., He Z. *Opt. Express*. 2017. V. 25. № 7. P. 8315.
<https://doi.org/10.1364/OE.25.008315>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ:

- Рис. 1.** Структурная схема устойчивого к замираниям когерентного рефлектометра на СВБР с реализацией метода вычитания фазового шума: ИИ – источник излучения; ОРЗ – одномодовый оптический разветвитель; ОР1, ОР2, ОР4–ОР9 – оптические разветвители, сохраняющие состояния поляризации; АОМ – акустооптический модулятор; ГИ – генератор импульсов; ОЦ – оптический циркулятор; СВБР ЧЭ – квазираспределенный чувствительный элемент на основе слабых брэгговских решеток; ПР1, ПР2 – поляризационные разветвители; БФПУ1–БФПУ4 – балансные фотоприемные устройства
- Рис. 2.** Структура экспериментального чувствительного элемента на слабых брэгговских решетках, ПЭК – пьезоэлектрическое кольцо
- Рис. 3.** Данные когерентного рефлектометра на СВБР: **а** – рефлектограммы прямого канала в двух поляризациях без обработки; **б** – рефлектограммы задержанного канала в двух поляризациях без обработки; **в** – модули рефлектограмм прямого канала в двух поляризациях после квадратурной демодуляции; **г** – модули рефлектограмм задержанного канала в двух поляризациях после квадратурной демодуляции
- Рис. 4.** Фазовый водопад когерентного рефлектометра на СВБР при воздействии пьезоэлектрическим кольцом с применением метода подавления фазового шума лазера
- Рис. 5.** Фазовый водопад когерентного рефлектометра на СВБР при воздействии пьезоэлектрическим кольцом без применения метода подавления фазового шума лазера
- Рис. 6.** Анализ разности фаз первой пары СВБР: **а** – акустический срез фазового водопада в зоне первой пары СВБР при воздействии пьезоэлектрическим кольцом; сплошная линия – метод подавления фазового шума применен, штриховая линия – метод не применен; **б** – спектральная плотность мощности фазовых флуктуаций в зоне первой пары СВБР при воздействии пьезоэлектрическим кольцом; сплошная линия – метод подавления фазового шума применен, штриховая линия – метод не применен; **в** – спектральная плотность мощности фазовых флуктуаций в зоне первой пары СВБР в отсутствие воздействия пьезоэлектрическим кольцом; сплошная линия – метод подавления фазового шума применен, штриховая линия – метод не применен

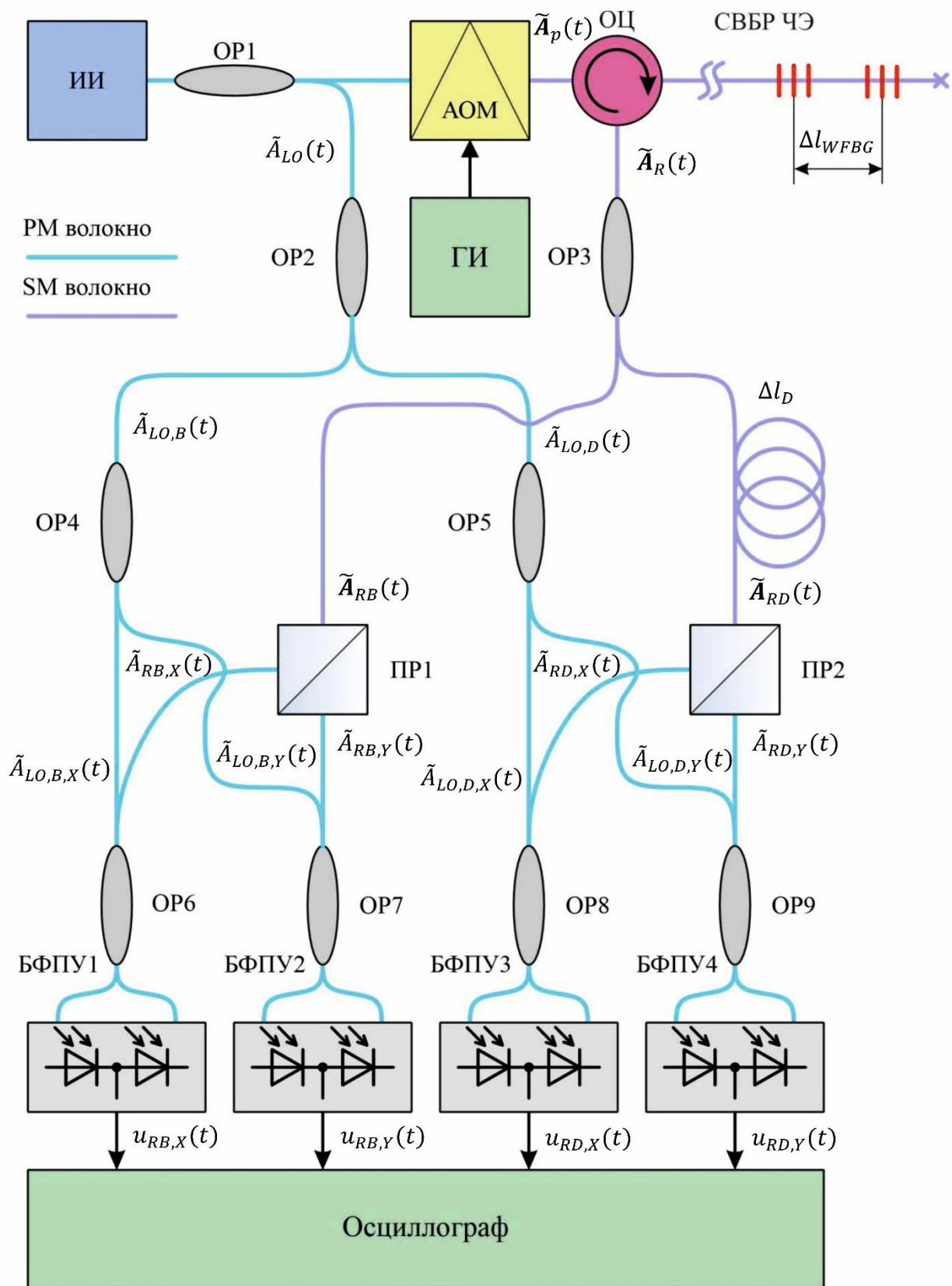


Рис. 1.

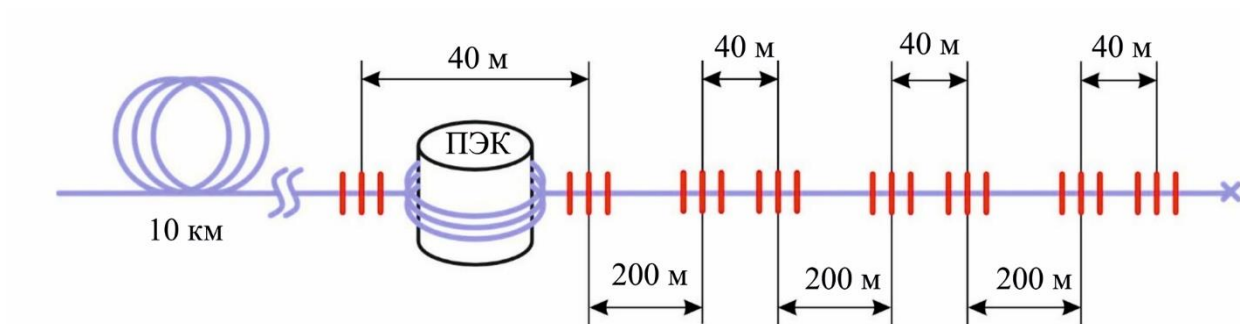


Рис. 2.

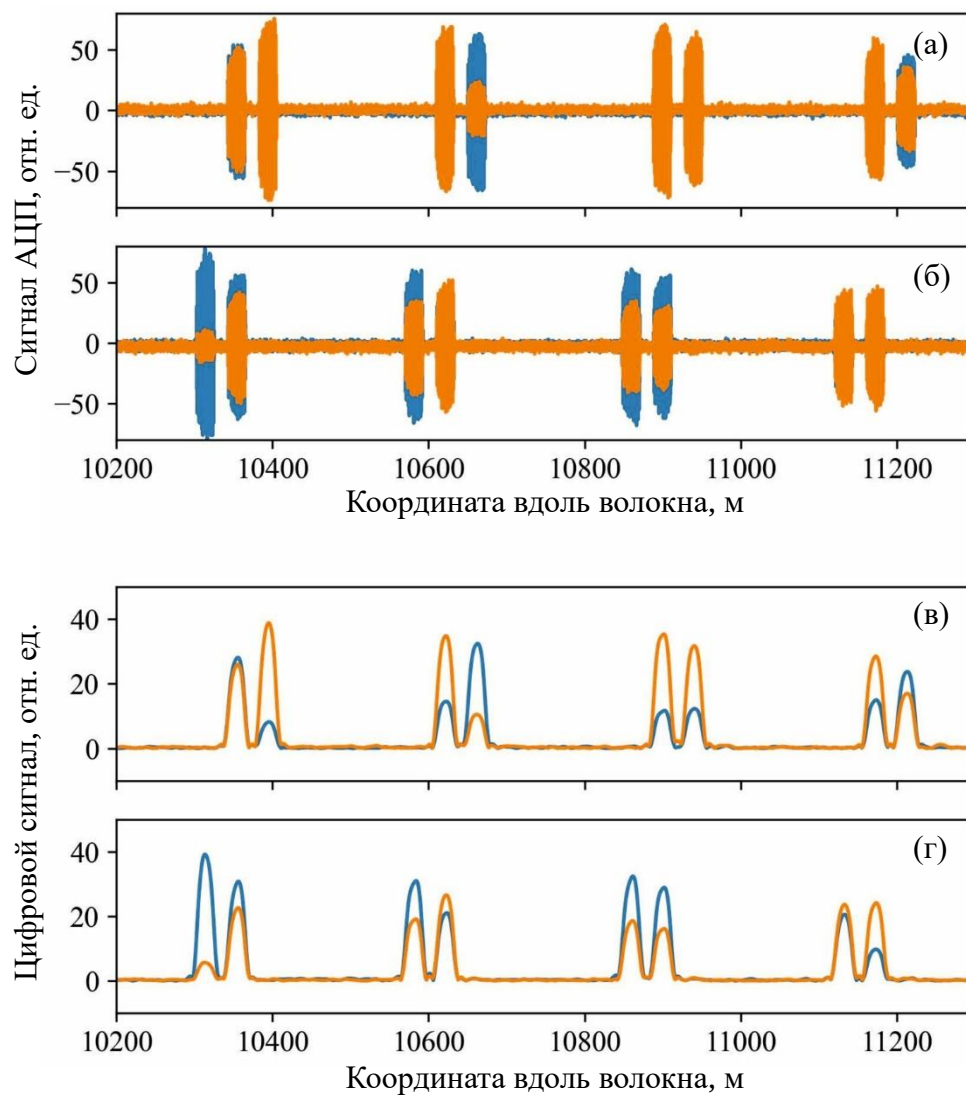


Рис. 3.

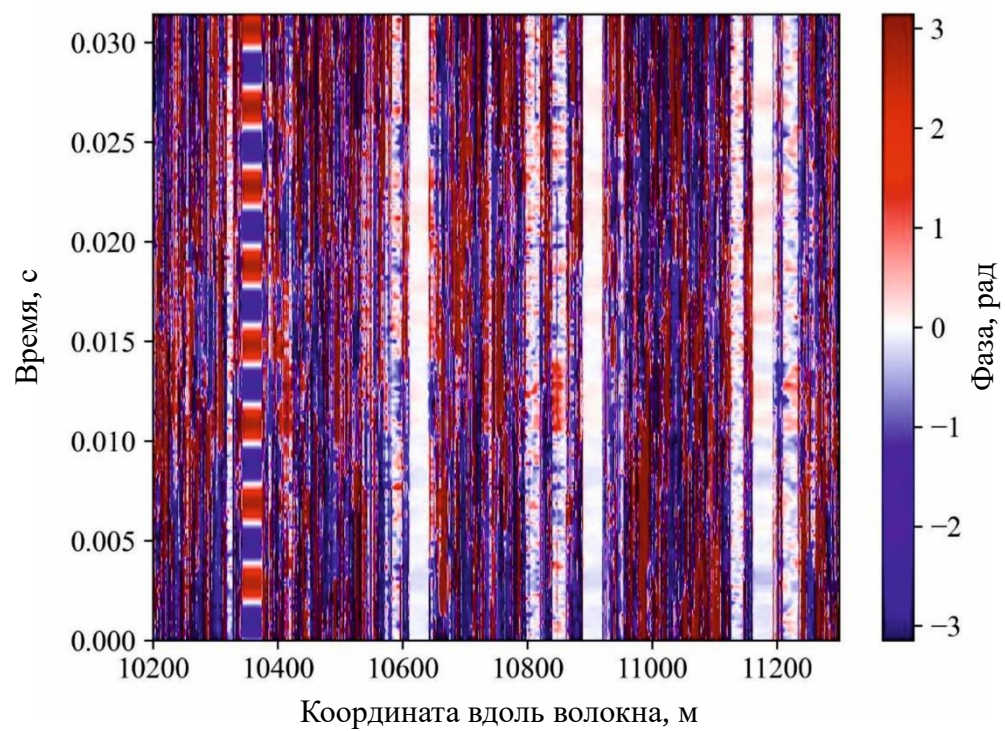


Рис. 4.

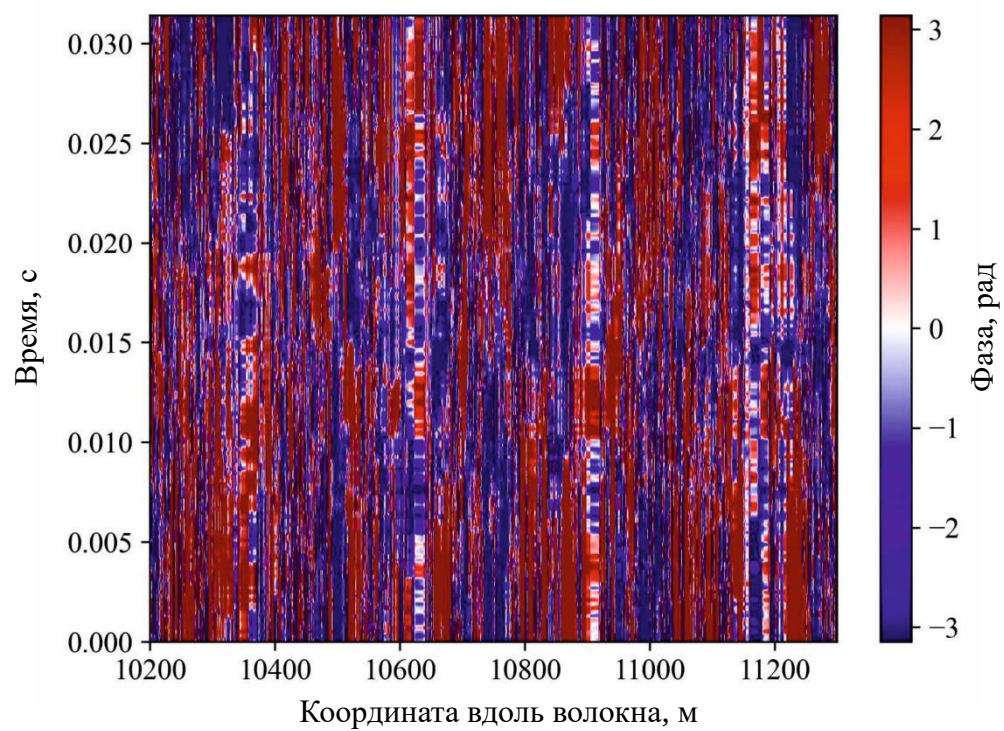


Рис. 5.

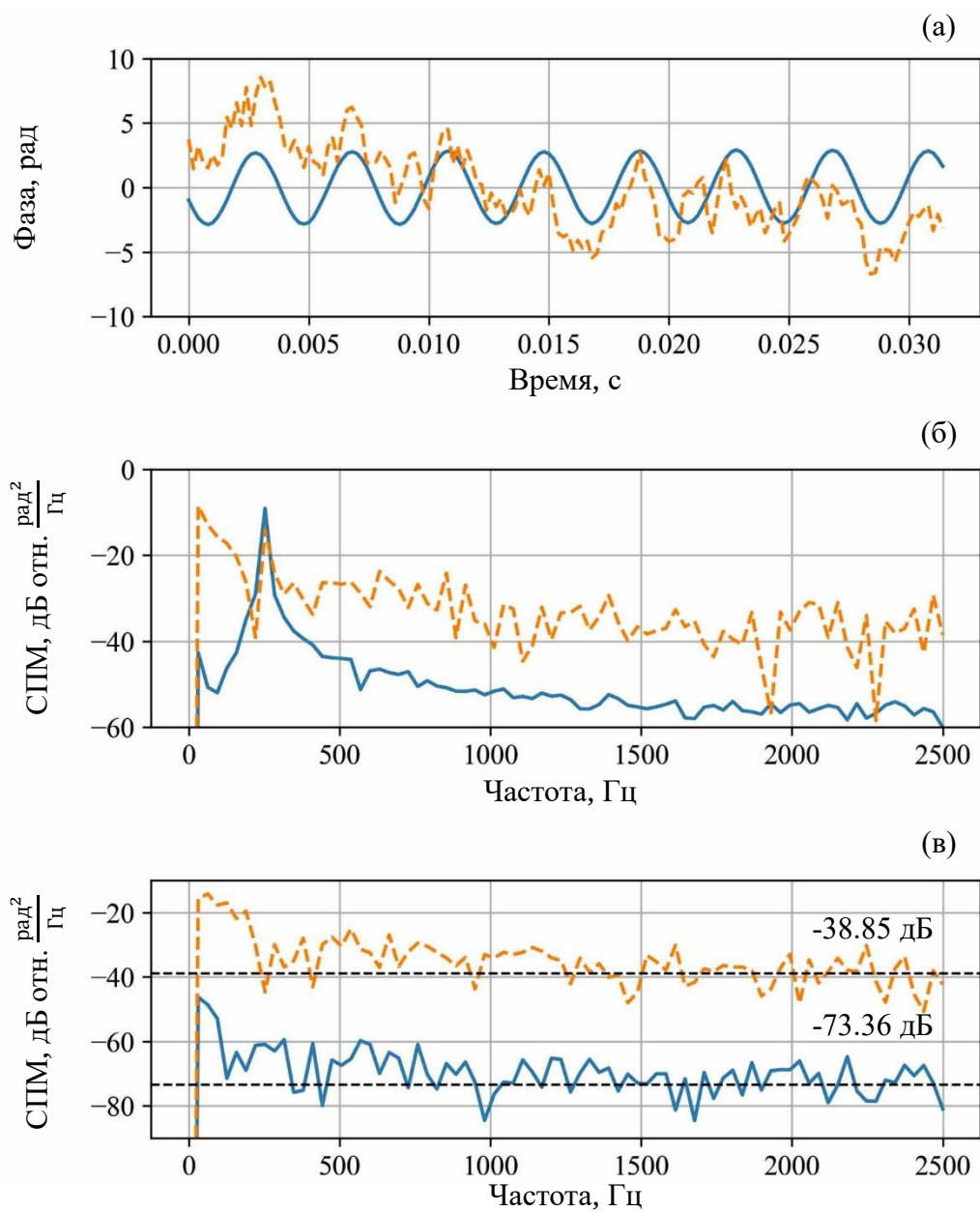


Рис. 6.