

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 535.92

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ЕМА-RVS ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ
ЭФФЕКТА ЗАМИРАНИЯ В КОГЕРЕНТНОМ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ
РЕФЛЕКТОМЕТРЕ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ¹**

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

Представлен метод подавления эффекта замирания ЕМА-RVS в когерентных рефлектометрах рэлеевского рассеяния, основанный на линейной частотной модуляции зондирующего сигнала, поляризационном разделении рассеянного поля и объединении спектральных и поляризационных каналов с использованием алгоритма адаптивного выравнивания по дифференциальной фазе. Экспериментально продемонстрировано, что применение предложенного метода ЕМА-RVS при частоте зондирования 1 кГц позволяет устранить слепые зоны на дистанции 100 км распределенного чувствительного элемента и обеспечить пороговую чувствительность 4 пЕ/√Гц при пространственном разрешении 10 м, 14 пЕ/√Гц при 5 м, 57 пЕ/√Гц при 2.5 м и 250 пЕ/√Гц при 1.25 м.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день когерентная рефлектометрия рэлеевского рассеяния (φ-OTDR) является одним из наиболее перспективных направлений волоконно-оптической сенсорики. В системах φ-OTDR оптическое волокно (ВО) служит одновременно средой распространения зондирующего сигнала и пространственно распределенным чувствительным элементом (РЧЭ), взаимодействующим с анализируемым объектом. Благодаря этому φ-OTDR находит применение в задачах охраны периметров, обнаружения утечек трубопроводов, контроля

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

состояния инженерных конструкций и мониторинга трафика вдоль транспортной инфраструктуры [1, 2].

Одним из ключевых ограничений ф-OTDR является эффект замирания, обусловленный случайным характером рэлеевского рассеяния. Он приводит к пространственной неравномерности пороговой чувствительности вдоль РЧЭ вплоть до возникновения слепых зон, что существенно ограничивает практическую чувствительность волоконно-оптических систем мониторинга (ВОСМ) виброакустических воздействий. Повышение чувствительности таких систем возможно как за счет использования в качестве РЧЭ специальных кабелей и волокон [3], так и за счет снижения собственного шума когерентного рефлектометра, определяющего порог чувствительности.

По этой причине в настоящее время активно разрабатываются методы и алгоритмы подавления эффекта замирания. Одной из основополагающих работ в данной области является работа [4], в которой предложен подход, включающий линейную частотную модуляцию зондирующего сигнала, когерентное детектирование, спектральное разделение рассеянного сигнала и алгоритм сложения спектральных каналов с предварительным выравниванием по фазе, названный RVS (Rotated Vector Sum). Идея метода RVS заключается в одновременном когерентном детектировании нескольких откликов сигнала рэлеевского рассеяния в различных каналах, их выравнивании по квазистатической фазе и последующем когерентном суммировании. Перед сложением векторов сигналов каналов на комплексной плоскости, соответствующие одной и той же координате волокна, подвергаются фазовому повороту, обеспечивающему их коллинеарность, а их амплитуды выполняют роль весовых коэффициентов. В результате фазовая информация не искажается, неравномерность амплитуды подавляется, что приводит к уменьшению пространственной неравномерности пороговой чувствительности, обратно пропорциональной отношению сигнал/шум.

В работах [5–7] алгоритм RVS был применен к сигналам классического когерентного рефлектометра с прямоугольным зондирующим импульсом. Спектр такого импульса имеет sinc-образную форму и содержит главный и боковые лепестки, отдельная полосовая фильтрация которых позволяет сформировать несколько спектральных каналов. Полученные компоненты затем совместно обрабатывались алгоритмом RVS.

В работе [8] предложен когерентный рефлектометр с частотным мультиплексированием зондирующего сигнала, формируемого с помощью волоконного IQ-модулятора. В последующей работе [9] предложен метод RAT (Rotation Angle Tracking), в котором, в отличие от методов работ [5–7], выравнивание выполняется не по углу первой

рефлектограммы, а по среднему углу в скользящем временном окне. Такая модификация позволяет реализовать алгоритм RVS в непрерывном режиме и в реальном времени.

Метод RVS применим не только в спектральном домене. Так, в работе [10] предложен подход, основанный на одновременном опросе нескольких сердцевин многосердцевинного волокна. В работе [11] аналогичная идея реализована за счет одновременного опроса нескольких мод распределенного чувствительного элемента на основе маломодового волокна. В работе [12] в качестве независимых каналов используются отдельные волокна, расположенные в одном кабеле.

В настоящей работе предлагается развитие метода подавления эффекта замирания EMA-RVS на основе схемы с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала [4], включающее поляризационное разделение рассеянного поля и новый адаптивный алгоритм объединения спектральных и поляризационных каналов на основе RVS и экспоненциального скользящего усреднения (EMA, Exponential Moving Average) комплексных рефлектограмм с дифференциальной по пространственной базе измерения фазой для отслеживания углов поворота в реальном времени.

Экспериментально продемонстрировано, что применение предложенного метода EMA-RVS при частоте зондирования 1 кГц позволяет устранить слепые зоны на дистанции 100 км РЧЭ и обеспечить пороговую чувствительность 4 пс/√Гц при пространственном разрешении 10 м, 14 пс/√Гц при 5 м, 57 пс/√Гц при 2.5 м и 250 пс/√Гц при 1.25 м.

2. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА С РЕАЛИЗОВАННЫМ МЕТОДОМ ПОДАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА ЗАМИРАНИЯ

На рис. 1 представлена структурная схема когерентного рефлектометра рэлеевского рассеяния с реализацией предложенного метода подавления эффекта замирания.

Рис. 1 Структурная схема когерентного рефлектометра рэлеевского рассеяния с реализацией метода подавления эффекта замирания

В качестве источника излучения (ИИ) используется одночастотный лазер. Часть его излучения ответвляется оптическим разветвителем (ОР1) с сохранением состояния поляризации и используется в качестве гетеродина $\tilde{A}_{Lo}(t)$. Оставшаяся часть излучения усиливается волоконным эрбиевым усилителем (ВЭУ), после чего с помощью акустооптического модулятора (АОМ), управляемого цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) через радиочастотный усилитель (РЧУ), формируется зондирующий сигнал $\tilde{A}_p(t)$ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Зондирующий сигнал через оптический циркулятор (ОЦ) вводится в распределенный чувствительный элемент (РЧЭ). Рассеянное поле $\tilde{A}_{RS}(t)$,

возвращающееся из РЧЭ, ответвляется циркулятором и разделяется поляризационным разветвителем (ПР) на ортогональные компоненты $\tilde{A}_{RBS,X}(t)$ и $\tilde{A}_{RBS,Y}(t)$. Компоненты $\tilde{A}_{RBS,X}(t)$ и $\tilde{A}_{RBS,Y}(t)$ смешиваются с гетеродином в оптических разветвителях с сохранением состояния поляризации ОР3 и ОР4. Полученные гетеродинные сигналы детектируются балансными фотоприемными устройствами БФПУ1 и БФПУ2, в результате чего на их выходах формируются аналоговые сигналы $u_{RBS,X}(t)$ и $u_{RBS,Y}(t)$, которые затем преобразуются в цифровую форму аналого-цифровыми преобразователями АЦП X и АЦП Y.

Формирование ЛЧМ-сигнала обычно осуществляется с помощью квадратурных электрооптических модуляторов (ЭОМ) на основе двух параллельных интерферометров Маха–Цендера. Однако лучевая прочность ЭОМ существенно уступает лучевой прочности АОМ. Поэтому применение ЭОМ потребовало бы их установки перед ВЭУ, что привело бы к нелинейным искажениям, обусловленным динамикой усилителя. Во избежание трудностей, связанных с необходимостью предварительного искажения управляющего сигнала, в данной работе для формирования ЛЧМ-сигнала используется АОМ, управляемый ЦАП, установленный после ВЭУ.

Таким образом, предложенная схема обеспечивает формирование нескольких спектральных и поляризационных каналов при использовании ЛЧМ-зондирования и приемного тракта без оптического предусилителя. Это позволяет реализовать последующее фазовое выравнивание и комплексное объединение каналов с целью подавления эффекта замирания. Для описания принципа работы метода в следующем разделе рассматривается его математическая модель.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ЗАМИРАНИЙ

3.1. Математическое описание процесса преобразования сигналов в когерентном рефлектометре рэлеевского рассеяния

Рассмотрим процесс преобразования сигнала в когерентном рефлектометре, представленном на рис. 1. Для упрощения аналитических выкладок пренебрежем поляризационными преобразованиями зондирующего и рассеянного сигналов в одномодовом оптическом волокне, а также фазовыми и амплитудными шумами лазерного источника.

Модель рэлеевского обратного рассеяния может быть описана случайным комплексным коэффициентом отражения

$$RSC(z) [1/m] = a_{RSC}(z) \exp(j\varphi_{RSC}(z)), \quad (1)$$

где $a_{RSC}(z)$ [1/м] – случайный амплитудный коэффициент отражения, а $\varphi_{RSC}(z)$ [рад] – случайная начальная фаза рассеяния. Статистические свойства $\rho(z)$ известны, действительная $\text{Re}(RSC(z))$ и мнимая $\text{Im}(RSC(z))$ части являются независимыми и подчиняются нормальным законам распределения с нулевым математическим ожиданием.

Корреляционная длина флуктуаций диэлектрической проницаемости оптического волокна существенно меньше длины волны распространяющегося оптического излучения (1550 нм). В то же время в системах оптической рефлектометрии обычно применяются зондирующие импульсы длительностью не менее 1 нс, что соответствует пространственной длине импульса порядка 0.1 м. Следовательно, зондирующий импульс охватывает большое число неоднородностей, а корреляция флуктуаций показателя преломления в пределах такого интервала практически отсутствует. В рамках используемого приближения распределение неоднородностей в оптическом волокне можно считать некоррелированным. Таким образом, процесс $RSC(z)$ может рассматриваться как стационарный комплексный белый гауссов шум со спектральной плотностью мощности $S_{RSC}(\nu_z) = S_{RSC}$, где ν_z [1/м] – пространственная частота.

Комплексная огибающая рассеянного сигнала выражается интегралом

$$\tilde{A}_{RBS}(t)[\sqrt{\text{ВТ}}] = \int_0^L \tilde{A}_p\left(t - \frac{2n_{eff}z}{c}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_0}z\right) RSC(z) \exp(-2\alpha_e z) dz, \quad (2)$$

где L – длина РЧЭ [м], $\tilde{A}_p(t)[\sqrt{\text{ВТ}}]$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала, c – скорость света в вакууме, $\lambda_0=1550$ нм – длина волны лазерного излучения, n_{eff} – эффективный показатель преломления ОВ, α_e – натуральный коэффициент поглощения ОВ.

Выполнив замену переменной

$$\tau = \frac{2n_{eff}z}{c}, \quad z = \frac{c\tau}{2n_{eff}}, \quad dz = \frac{c}{2n_{eff}} d\tau, \quad T = \frac{2n_{eff}L}{c},$$

мы приводим интеграл (2) к каноническому виду свертки:

$$\tilde{A}_{RBS}(t) = \frac{c}{2n_{eff}} \int_0^T \tilde{A}_p(t - \tau) h(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $h(\tau)$ – импульсный отклик, определяемый выражением

$$h(\tau) = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda_0}c\tau\right) RSC\left(\frac{c\tau}{2n_{eff}}\right) \exp\left(-\alpha_e \frac{c\tau}{n_{eff}}\right). \quad (4)$$

На рис. 2 представлены мощности синтезированных численно рефлектограмм $|\tilde{A}_{RBS}(z)|^2$, полученных при фильтрации шумоподобного отклика оптического волокна дельта-функцией (а), что соответствует $|RSC(z)|^2$, прямоугольным зондирующим импульсом

длительностью 100 нс (б) и прямоугольным зондирующим импульсом длительностью 1 мкс (в).

Рис. 2 Мощность сигнала обратного рэлеевского рассеяния при различных длительностях зондирующего импульса

Таким образом, процесс зондирования может быть интерпретирован как линейная фильтрация шумоподобного отклика оптического волокна $h(\tau)$ фильтром с импульсной характеристикой, определяемой формой зондирующего сигнала $\tilde{A}_p(t)$. Как видно на рис. 2, результирующий сигнал также имеет шумоподобный характер, что и обуславливает возникновение эффекта замирания.

Положим, что внешнее воздействие на РЧЭ вызывает локальную продольную относительную деформацию $\varepsilon(z)$ без изгиба и кручения. Тогда накопленный фазовый сдвиг рассеянного из точки z сигнала, индуцированный деформацией волокна на участке от 0 до z , описывается выражением

$$\Delta\varphi_\varepsilon(\varepsilon(z)) = \frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_0} (1 - \rho_\varepsilon) \int_0^z \varepsilon(l) dl, \quad (5)$$

где $\rho_\varepsilon = 0.22$ упругооптический коэффициент [13].

Тогда модель рефлектограммы рэлеевского рассеяния деформированного волокна может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \tilde{A}'_{RBS}(t) = & \int_0^L \tilde{A}_p\left(t - \frac{2n_{eff}z}{c}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_0}z\right) RSC(z) \times \\ & \times \exp(-2\alpha_e z) \exp(j\Delta\varphi_\varepsilon(\varepsilon(z))) dz. \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 3а представлены фазы рефлектограмм недеформированного $\arg(\tilde{A}_{RBS}(z))$ и деформированного $\arg(\tilde{A}'_{RBS}(z))$ волокон. На рис. 3б показана разница фаз

$$\Delta\varphi_{RBS}(z) = \arg(\tilde{A}'_{RBS}(z)) - \arg(\tilde{A}_{RBS}(z)),$$

а на рис. рис. 3в – дифференциальная по базе l_{GL} фаза

$$\Delta\varphi_{GL}(z) = \Delta\varphi_{RBS}(z) - \Delta\varphi_{RBS}(z - l_{GL}).$$

Рис. 3. Фазы рефлектограм деформированного и недеформированного волокон

Рассмотрим возмущение, локализованное в окрестности точки $z = z_\varepsilon$ на участке длиной l_ε . Условно разделим РЧЭ на три области: первую – до зоны возмущения,

$$z < z_\varepsilon - \frac{l_\varepsilon}{2},$$

вторую – в окрестности зоны возмущения,

$$z_\varepsilon - \frac{l_\varepsilon}{2} \leq z \leq z_\varepsilon + \frac{l_\varepsilon}{2}, \text{ т}$$

третью – после нее,

$$z > z_\varepsilon + \frac{l_\varepsilon}{2}.$$

В первой области фазовый сдвиг, индуцированный деформацией, отсутствует, поэтому

$$\tilde{A}'_{RBS}(z) = \tilde{A}_{RBS}(z), z < z_\varepsilon - \frac{l_\varepsilon}{2}. \quad (7)$$

Во второй области дополнительный фазовый набег изменяется по координате, поэтому деформированная рефлектограмма не может быть представлена в виде недеформированной, умноженной на единый фазовый множитель, и связь между $\tilde{A}'_{RBS}(t)$ и $\tilde{A}_{RBS}(t)$ не имеет простого аналитического вида.

В третьей области, расположенной после зоны возмущения, дополнительный фазовый набег становится постоянным, что приводит к сдвигу фазы рефлектограммы на постоянную величину, интегральную по участку от $z_\varepsilon - l_\varepsilon/2$ до $z_\varepsilon + l_\varepsilon/2$:

$$\Delta\varphi_{const} = \frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_0} (1 - \rho_\varepsilon) \int_{z_\varepsilon - \frac{l_\varepsilon}{2}}^{z_\varepsilon + \frac{l_\varepsilon}{2}} \varepsilon(l) dl. \quad (8)$$

Поскольку $\Delta\varphi_{const}$ не зависит от z , фазовый член, индуцированный деформацией, может быть вынесен за знак локального интеграла, соответствующего формированию отклика после зоны возмущения. Тогда справедливо соотношение

$$\tilde{A}'_{RBS}(z) = \tilde{A}_{RBS}(z) \exp(j\Delta\varphi_{const}), \quad z > z_\varepsilon + \frac{l_\varepsilon}{2}. \quad (9)$$

Рассмотрим зондирующий сигнал как сумму M отдельных компонент:

$$\tilde{A}_p(t) = \sum_{m=1}^M \tilde{A}_{p,m}(t), \quad (10)$$

тогда в силу линейности свертки справедливо равенство

$$\begin{aligned} \tilde{A}'_{RBS}(t) = \sum_{m=1}^M \int_0^L \tilde{A}_{p,m} \left(t - \frac{2n_{eff}z}{c} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_0} z \right) RSC(z) \times \\ \times \exp(-2\alpha_e z) \exp(j\Delta\varphi_\varepsilon(\varepsilon(z))) dz. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, разделение зондирующего сигнала в некотором домене, согласно формулам (11) и (9), позволяет получить несколько реализаций метода оптической рефлектометрии обратного рэлеевского рассеяния с одинаковыми фазовыми изменениями, индуцированными возмущением на участке после зоны воздействия, и различными амплитудными характеристиками.

В настоящей работе предлагается использовать разделение зондирующего сигнала в спектральном домене на основе линейной частотной модуляции. В отличие от FDM-модуляции, ЛЧМ позволяет устранить компромисс между длительностью зондирующего сигнала и пространственным разрешением системы. ЛЧМ-сигнал формируется акустооптическим модулятором и описывается выражением

$$\tilde{A}_p(t) = A_p \exp \left(j \left(2\pi \left(\nu_{AOM} t + \frac{bt^2}{2} \right) \right) \right), \quad (12)$$

где $A_p [\sqrt{\text{Вт}}]$ – амплитуда зондирующего сигнала, ν_{AOM} – частота сдвига АОМ, $b = \Delta\nu_{LFM}/\Delta t_{LFM}$ – скорость ЛЧМ, $\Delta\nu_{LFM}$ [Гц] – ширина частотной перестройки, Δt_{LFM} – длительность частотной перестройки.

Когерентно детектированная рефлектограмма рэлеевского рассеяния определяется выражением

$$\begin{aligned} u_{RBS}(t) &= |\tilde{A}_{RBS}(t) + j\tilde{A}_{LO}(t)|^2 - |j\tilde{A}_{RBS}(t) + \tilde{A}_{LO}(t)|^2 = \\ &= 4A_{RBS}(t)A_{LO} \cos(2\pi\nu_{AOM}t + \varphi_{RBS}(t)). \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку процесс зондирования сводится к линейной операции свертки (3), для сигнала $u_{RBS}(t)$ справедливы соотношения Крамерса–Кронига [14]. Тогда путем цифровой обработки с использованием преобразования Гильберта односторонней полосовой фильтрации или квадратурной демодуляции сигнал $u_{RBS}(t)$ может быть преобразован в комплексный аналитический сигнал $\tilde{u}_{RBS}(t)$, сохраняющий как амплитудную, так и фазовую информацию о сигнале $\tilde{A}_{RBS}(t)$.

3.2. Описание алгоритма объединения спектральных и поляризационных каналов EMA-RVS

Ранее в анализе для упрощения аналитических выкладок не учитывались поляризационные преобразования зондирующего и рассеянного сигналов в одномодовом оптическом волокне, а также фазовые шумы одночастотных лазеров. Указанные факторы приводят к медленному изменению во времени случайной, но квазистатичной в отсутствие внешних воздействий фазы. Для компенсации этого эффекта фазовые сдвиги, используемые при выравнивании каналов, должны адаптивно отслеживаться, как это предложено в работе [9].

Выравнивание путем поворота на угол, противоположный углу скользящего среднего, фактически представляет собой операцию устранения тренда, эквивалентную высокочастотной фильтрации. При этом длительность прямоугольного окна простого скользящего среднего ограничена доступным объемом быстрой оперативной памяти

вычислителя, в качестве которого обычно используется ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема). Поэтому на практике либо метод RAT [9] трудно реализуем в реальном времени, либо его реализация сопровождается существенным подавлением низкочастотных компонент, что недопустимо в сейсмических приложениях. Вместо этого предлагается использовать ЕМА, для реализации которого при обработке одного спектрального канала достаточно хранить состояние с размером памяти, равным размеру рефлектограммы. Вычитание тренда, формируемого ЕМА, позволяет за счет выбора коэффициента сглаживания сместить область подавления низкочастотных компонент в субгерцевый диапазон.

По мере увеличения расстояния вдоль РЧЭ возрастает влияние разности фазовых шумов гетеродина и рассеянного сигнала. Это приводит к тому, что от одного зондирования к другому фазы, соответствующие удаленным участкам волокна, испытывают все большие случайные повороты в комплексной плоскости. Вследствие этого результат усреднения случайно вращающихся комплексных отсчетов на удаленных участках РЧЭ стремится к нулю, что ограничивает эффективную дальность применения метода ЕМА RVS. Для ослабления данного эффекта в настоящей работе предлагается выполнять выравнивание и усреднение не сырых рефлектограмм, а рефлектограмм с фазой, продифференцированной по пространственной базе l_{GL} . В этом случае влияние фазовых девиаций определяется не полной длиной двойного прохода до анализируемой точки РЧЭ, а длиной базы l_{GL} .

В результате алгоритм объединения спектральных каналов сводится к следующей последовательности операций.

Аналитический сигнал $\tilde{u}_{RBS_i}(t)$ с ЛЧМ сжимается согласованной фильтрацией

$$\tilde{u}_{comp_i}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_{RBS_i}(\tau) \tilde{A}_p^*(\tau - t) d\tau, \quad (14)$$

где i – номер рефлектограммы.

Далее сжатый сигнал симметрично разделяется полосовыми фильтрами на M каналов, после чего в каждом канале выполняется перенос несущей частоты на нулевую:

$$\tilde{u}_{m_i}(t) = \tilde{u}_{m,comp_i}(t) \exp(-j2\pi\nu_m t), \quad (15)$$

где $\tilde{u}_{m,comp_i}(t)$ – сигнал m -го канала, ν_m – несущая частота m -го канала.

Для каждого канала выполняется дифференцирование фазы по пространственной базе l_{GL} :

$$\tilde{u}_{mGL_i}(t) = \tilde{u}_{m_i}^*(t) \tilde{u}_{m_i} \left(t - \frac{2n_{eff} l_{GL}}{c} \right). \quad (16)$$

От зондирования к зондированию для каждого канала вычисляется ЕМА:

$$\tilde{u}_{m_{EMA_i}}(t) = \alpha \tilde{u}_{m_{GL_i}}(t) + (1 - \alpha) \tilde{u}_{m_{EMA_{i-1}}}(t), \quad (17)$$

где α – коэффициент сглаживания.

После этого каждая рефлектограмма выравнивается по фазе относительно соответствующего ЕМА-оценивания:

$$\tilde{u}_{m_{rot_i}}(t) = \tilde{u}_{m_{GL_i}}^*(t) \tilde{u}_{m_{EMA_i}}(t). \quad (18)$$

Выровненные рефлектограммы всех M каналов затем суммируются:

$$\tilde{u}_{SUM_i}(t) = \sum_{m=1}^M \tilde{u}_{m_{rot_i}}(t). \quad (19)$$

Каждая i -я суммарная рефлектограмма $\tilde{u}_{SUM_i}(t)$ фильтруется простым скользящим средним [15], либо любым другим фильтром с конечной импульсной характеристикой с неотрицательными вещественными коэффициентами так, чтобы не ограничивать практическое пространственное разрешение, определяемое величиной l_{GL} :

$$\tilde{u}_{SAW_i}(t) = \int_0^T \tilde{u}_{SUM_i}(\tau) \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{\Delta t_w}\right) d\tau, \quad (20)$$

где Δt_w – длительность прямоугольного окна.

Из суммарного сглаженного сигнала $\tilde{u}_{SAW_i}(t)$ извлекается фаза i -й рефлектограммы:

$$\varphi_{\varepsilon_i}(t) = \arg\left(\tilde{u}_{SAW_i}(t)\right). \quad (21)$$

Далее формируется фазовый водопад, в котором номер зондирования интерпретируется как временная координата с частотой дискретизации, равной частоте опроса РЧЭ, а время t пересчитывается в координату z вдоль РЧЭ.

При поляризационном разделении рассеянного поля шаги (14)–(18) выполняются независимо для ортогональных поляризационных компонент, после чего на этапе (19) объединяются как спектральные, так и поляризационные каналы.

Эффективность предложенного метода подавления эффекта замирования подтверждается результатами экспериментального исследования, представленными в следующем разделе.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В соответствии со схемой, представленной на рис. 1, был собран экспериментальный стенд для верификации предложенного метода подавления эффекта замирования. Состав стенда приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав экспериментального стенда

Обозначение	Наименование
ИИ	NKT Photonics Koheras BASIK X15, 30 мВт
ОР1	PM FBT 90/10
ВЭУ	IPG Photonics, 30 дБм
ЦАП	Xilinx Zynq RFSoc; 14 разрядов, 5 GSpS
АЦП	Xilinx Zynq RFSoc; 14 разрядов; 9.85 GSpS
БФПУ	Собственной разработки; 500 МГц
РЧУ	Собственной разработки; 2 Вт
РЧЭ	Составная линия длиной 100 км, волокно G.652

С помощью ЦАП формировался зондирующий импульс с ЛЧМ шириной $\Delta\nu_{LFM} = 80$ МГц, длительностью $\Delta t_{LFM} = 10$ мкс и пиковой мощностью 100 мВт. Частота зондирования составляла 1 кГц. Для имитации возмущения в РЧЭ были установлены два пьезоэлектрических кольца на расстояниях 10 и 51 км. Длина намотки волокна на каждое кольцо составляла 20 м. Аналоговые сигналы с выходов БФПУ с помощью встроенных в АЦП квадратурных демодуляторов переносились на нулевую частоту, преобразовывались в комплексную форму, децимировались до 500 MSpS и в таком виде сохранялись для последующей цифровой обработки. Были записаны данные как при отсутствии возмущения РЧЭ, так и при имитации гармонического воздействия с частотой 10 Гц с помощью пьезоэлектрических колец.

Предварительная обработка данных включала сжатие согласованным фильтром (19) и компенсацию затухающего тренда рефлектограмм. Компенсация ослабления осуществлялась путем деления на модуль рефлектограммы, сглаженной по пространству и усредненной по времени, и применялась исключительно для предотвращения переполнения амплитудных значений при последующей цифровой обработке, связанного с расширением динамического диапазона сигнала.

Далее проведем обработку данных при отсутствии возмущения в соответствии с операциями (21)–(26) с коэффициентом сглаживания ЕМА $\alpha = 0.001$ для двух поляризационных каналов в четырех режимах: без спектрального разделения при базе $l_{GL} = 1.25$ м, при спектральном разделении на 2 канала с базой $l_{GL} = 2.5$ м, на 4 канала с базой $l_{GL} = 5$ м и на 8 каналов с базой $l_{GL} = 10$ м.

На рис. 4 представлены значения среднеквадратического отклонения (СКО) восстановленной фазы для каждой пространственной точки z . Слепыми зонами будем считать

участки РЧЭ, в которых СКО фазы превышает 0 дБ. В режиме без спектрального разделения (рис. 4а) протяженность участка РЧЭ, свободного от слепых зон, составляет 40 км. При спектральном разделении на два канала (рис. 4б) эта величина увеличивается до 77 км, на четыре канала (рис. 4в) – до 90 км, а на восемь каналов (рис. 4г) — до 100 км.

Рис. 4. Стандартные отклонения фазы при использовании метода ЕМА-RVS и частоте опроса РЧЭ 1 кГц

Вопрос о выборе метрики, количественно описывающей влияние остаточного эффекта замирания на неравномерность пороговой чувствительности вдоль волокна, в настоящее время остается открытым. В документе [16] предпринята попытка предложить методику измерения и представления данного эффекта, однако, по нашему мнению, данный подход в недостаточной степени связан как с физической природой замираний, так и с практическими методами их подавления. В ряде работ для характеристики замираний используются гистограммы амплитуды рэлеевского рассеяния, однако такой подход также не представляется применимым в рамках настоящей работы, поскольку в методе ЕМА-RVS амплитуда исходного рэлеевского рассеяния существенно искажается на этапах обработки, предшествующих вычислению фазы. Поэтому ограничимся качественным анализом, показывающим, что увеличение числа мультиплицируемых каналов приводит к уменьшению дисперсии порога чувствительности, как видно на рис. 4.

На рис. 5 показаны характеристики пороговой чувствительности NES (Noise Equivalent Strain) в $\text{пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$ для различных расстояний вдоль РЧЭ. В режиме без спектрального разделения (рис. 5а) средняя по участку длиной 1 км в начале РЧЭ пороговая чувствительность составляет $250 \text{ пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$. При спектральном разделении на два канала (рис. 5б) эта величина снижается до $57 \text{ пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$, на четыре канала (рис. 5в) – до $14 \text{ пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$, а на восемь каналов (рис. 5г) – до $4 \text{ пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Поскольку при анализе картины водопада вдоль медленной временной оси фактически выполняется прореживание сигнала для каждой фиксированной координаты, происходит алиасинг широкополосного шума. Вследствие этого с уменьшением частоты зондирования возрастает спектральная плотность собственного фазового шума, а вместе с ней и порог чувствительности. В первом приближении порог чувствительности должен уменьшаться пропорционально $\sqrt{f_s}$, поэтому при увеличении частоты опроса с 1 до 50 кГц ожидается ее улучшение в $\sqrt{50}$ раз.

Рис. 5. Пороговая чувствительность при использовании метода ЕМА-RVS и частоте опроса РЧЭ 1 кГц

Рассмотрим данные, полученные при включенной имитации возмущения с помощью пьезоэлектрических колец. Поскольку длина намотки волокна на каждое кольцо составляла 20

м, для выхода на линейный участок фазовой характеристики с линейной зависимостью от деформации (см. рис. 2в) необходимо чтобы длина измерительной базы была не менее указанной длины. В связи с этим для всех режимов обработки принимается $l_{GL} = 25$ м. В остальном обработка осуществляется аналогично предыдущему случаю.

На рис. 6а показан фазовый водопад в зоне первого пьезоэлемента, на рис. 6б – в зоне второго пьезоэлемента.

Рис. 6. Фазовый водопад в режиме обработки без спектрального разделения

На рис. 7 представлены виброакустические срезы фазовых водопадов, полученных в четырех режимах обработки: синий – без спектрального разделения, оранжевый – со спектральным разделением на 2 канала, зеленый – со спектральным разделением на 4 канала, красный – со спектральным разделением на 8 каналов, и в двух зонах оптического волокна: в точке первого пьезоэлемента (рис. 7а) и в точке второго пьезоэлемента (рис. 7б). Наблюдаемое совпадение гармонических колебаний свидетельствует о сохранении деформационно-индуцированной фазовой информации при применении метода ЕМА-RVS.

Рис. 7. Виброакустические срезы фаз сигналов, полученные в четырех режимах

Основные технические характеристики экспериментального стенда, реализующего метод подавления эффекта замирования ЕМА-RVS, сведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные технические характеристики экспериментального стенда

Параметр	Спектральное разделение			
	Без разделения	2 канала	4 канала	8 каналов
Пространственное разрешение	Не менее 1.25 м	Не менее 2.5 м	Не менее 5 м	Не менее 10 м
Пороговая чувствительность при частоте опроса 1 кГц	250 пε/√Гц	57 пε/√Гц	14 пε/√Гц	4 пε/√Гц
Дальность измерения, свободная от слепых зон	40 км	77 км	90 км	100 км

Для корректного сравнения эффективности предложенного метода ЕМА-RVS, предназначенного для подавления эффекта замирования, необходимо учитывать различия в пространственном разрешении и частоте зондирования. Из табл. 2 следует, что при ухудшении пространственного разрешения минимально обнаруживаемая деформация уменьшается, что связано с увеличением эффективной длины измерительного участка. Как упоминалось ранее, снижение частоты опроса РЧЭ приводит к алиасингу широкополосного

шума, поэтому при сравнении результатов, полученных при различных частотах зондирования, необходимо учитывать соответствующее изменение уровня шумов.

Тем не менее в работе [5] при использовании простого прямоугольного зондирующего сигнала, частоте опроса РЧЭ 43 кГц и пространственном разрешении 10 м была достигнута пороговая чувствительность $23.4 \text{ пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$, что, несмотря на более высокую частоту опроса, уступает результату, полученному в настоящей работе.

В работе [9], наиболее близкой к настоящему исследованию, при использовании частотного мультиплексирования, частоте опроса РЧЭ 6.667 кГц и пространственном разрешении 5 м был достигнут шумовой уровень выходного фазового сигнала -61 дБ относительно $\text{рад}^2/\text{Гц}$. Согласно пересчету по работе [16], это соответствует пороговой чувствительности около $19 \text{ пЕ}/\sqrt{\text{Гц}}$, что также уступает результатам настоящей работы, несмотря на более высокую частоту опроса РЧЭ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен метод подавления эффекта замирования ЕМА-RVS, развивающий подходы [4, 9]. По сравнению с классическим методом RVS предложенный алгоритм обеспечивает непрерывную работу в реальном времени. По сравнению с методом RAT [9] применение экспоненциального скользящего усреднения для адаптивной оценки углов поворота векторов на комплексной плоскости существенно снижает требования к объему быстрой оперативной памяти ПЛИС, что позволяет использовать более длительные временные окна и сместить границу подавления низких частот в субгерцевую область. Переход от оценки абсолютных фаз сырых рефлектограмм к дифференциальным измерениям по пространственной базе позволяет снять ограничение по эффективной дальности работы алгоритма RVS, а дополнительное поляризационное разделение обеспечивает устойчивость к изменениям состояния поляризации.

При этом представленные в табл. 2 технические характеристики достигаются в минимальной структурной схеме, не требующей применения дорогостоящих широкополосных фотодетекторов или электрооптических модуляторов. По нашим оценкам, алгоритм ЕМА-RVS реализуем на ПЛИС среднего класса, например, из семейства Xilinx Kintex UltraScale+, что открывает возможность его практического применения в реальных системах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О. и др. ПТЭ. 2023. № 5. С. 153. <https://doi.org/10.31857/S0032816223050191>
2. Gorshkov B.G., Ilinskiy D.A., Simikin D.E., Taranova M.A. Seism. Instrum. 2024. V. 60. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.3103/S0747923925700070>
3. Turov A.T., Konstantinov Yu.A., Claudeet D. et al. Appl. Sci. 2024. V. 14. № 22. P. 10147. <https://doi.org/10.3390/app142210147>
4. Chen D., Liu Q., He Z. Opt. Express. 2017. V. 25. № 7. P. 8315. <https://doi.org/10.1364/OE.25.008315>
5. Wu Y., Wang Z., Xiong J., Jiang J., Lin S., Chen Y. J. Lightwave Technol. 2019. V. 37. № 13. P. 3381. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2916682>
6. Cui K., Liu F., Wang K. et al. IEEE Photon. J. 2021. V. 13. № 6. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3121064>
7. Cheng Y., Wang H., Liet D. al. IEEE Photon. J. 2023. V. 15. № 5. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3316350>
8. Wakisaka Y., Iida D., Oshida H., Honda N. J. Lightwave Technol. 2021. V. 39. № 13. P. 4279. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3071159>
9. Wakisaka Y., Takahashi H., Iida D., Ishimaru T., Koshikiya Y. J. Lightwave Technol. 2024. V. 43. № 2. P. 886. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3460829>
10. Zhang Y., Liu J., Xiong F. et al. Sensors. 2021. V. 21. № 5. P. 1694. <https://doi.org/10.3390/s21051694>
11. Zhao Z., Wu H., Hu J. et al. Opt. Express. 2021. V. 29. № 10. P. 15452. <https://doi.org/10.1364/OE.422608>
12. Симикин Д.Е., Алексеев А.Э., Горшков Б.Г. Потапов В.Т., Таранов М.А. Краткие сообщения по физике ФИАН. 2025. Т. 52. Приложение № 1. С. S51. [Simikin D.E., Simikin D.E., Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A. Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2025. V. 52. №. Suppl 1. P. S51.]
13. Cruz J.L., Barmenkov Y.O., Díez A., Andres M.V. Appl. Opt. 2021. V. 60. № 10. P. 2824. <https://doi.org/10.1364/AO.418049>
14. Jiang Jialin, Wang Zinan, Wang Zitan et al. J. Lightwave Technol. 2019. V. 37. № 18. P. 4799. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2920530>
15. Кривошеев А.И., Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Поддубровский Н.Р., Лобач И.А. Автометрия. 2025. Т. 61. № 5. P. 93. <https://doi.org/10.15372/AUT20250511>

16. Measuring Sensor Performance DAS Parameter Definitions and Tests (SEAFOM-MSP-02 V2.0)
SEAFOM. 2022. URL: <https://seafom.com/published-documents>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структурная схема когерентного рефлектометра рэлеевского рассеяния с реализацией метода подавления эффекта замирания: ИИ – источник излучения, ОР1–ОР4 – оптические разветвители с сохранением состояния поляризации, ВЭУ – волоконный эрбиевый усилитель, АОМ – акустооптический модулятор, РЧУ – радиочастотный усилитель, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ОЦ – оптический циркулятор, РЧЭ – распределенный чувствительный элемент, ПР – поляризационный разветвитель; БФПУ1, БФПУ2 – балансные фотоприемные устройства; АЦП X, АЦП Y – аналого-цифровые преобразователи
- Рис. 2.** Мощность сигнала обратного рэлеевского рассеяния при различных длительностях зондирующего импульса: **а** – зондирующий импульс представляет собой дельта-функцию; **б** – прямоугольный зондирующий импульс длительностью 100 нс; **в** – прямоугольный зондирующий импульс длительностью 1 мкс
- Рис. 3.** Фазы рефлектограм деформированного и недеформированного волокон: **а** – абсолютные фазы рефлектограмм недеформированного $\arg(\tilde{A}_{RBS}(z))$ и деформированного $\arg(\tilde{A}'_{RBS}(z))$ волокон, **б** – разница фаз рефлектограмм недеформированного и деформированного волокон $\Delta\varphi_{RBS}(z) = \arg(\tilde{A}'_{RBS}(z)) - \arg(\tilde{A}_{RBS}(z))$; **в** – дифференциальная по пространственной базе фаза $\Delta\varphi_{GL}(z) = \Delta\varphi_{RBS}(z) - \Delta\varphi_{RBS}(z - l_{GL})$
- Рис. 4.** Стандартные отклонения фазы при использовании метода ЕМА-RVS и частоте опроса РЧЭ 1 кГц: **а** – без спектрального разделения, **б** – со спектральным разделением на 2 канала, **в** – со спектральным разделением на 4 канала, **г** – со спектральным разделением на 8 каналов
- Рис. 5.** Пороговая чувствительность при использовании метода ЕМА-RVS и частоте опроса РЧЭ 1 кГц: **а** – без спектрального разделения, **б** – со спектральным разделением на 2 канала, **в** – со спектральным разделением на 4 канала, **г** – со спектральным разделением на 8 каналов
- Рис. 6.** Фазовый водопад в режиме обработки без спектрального разделения: **а** – в зоне первого пьезоэлектрического кольца (10 км), **б** – в зоне второго пьезоэлектрического кольца (51 км)

Рис. 7. Виброакустические срезы фаз сигналов, полученные в четырех режимах обработки: синий – без спектрального разделения, оранжевый – со спектральным разделением на 2 канала, зеленый – со спектральным разделением на 4 канала, красный – со спектральным разделением на 8 каналов, и в двух зонах оптического волокна: **а** – в точке первого пьезоэлектрического кольца (10 км), **б** – в точке второго пьезоэлектрического кольца (51 км)

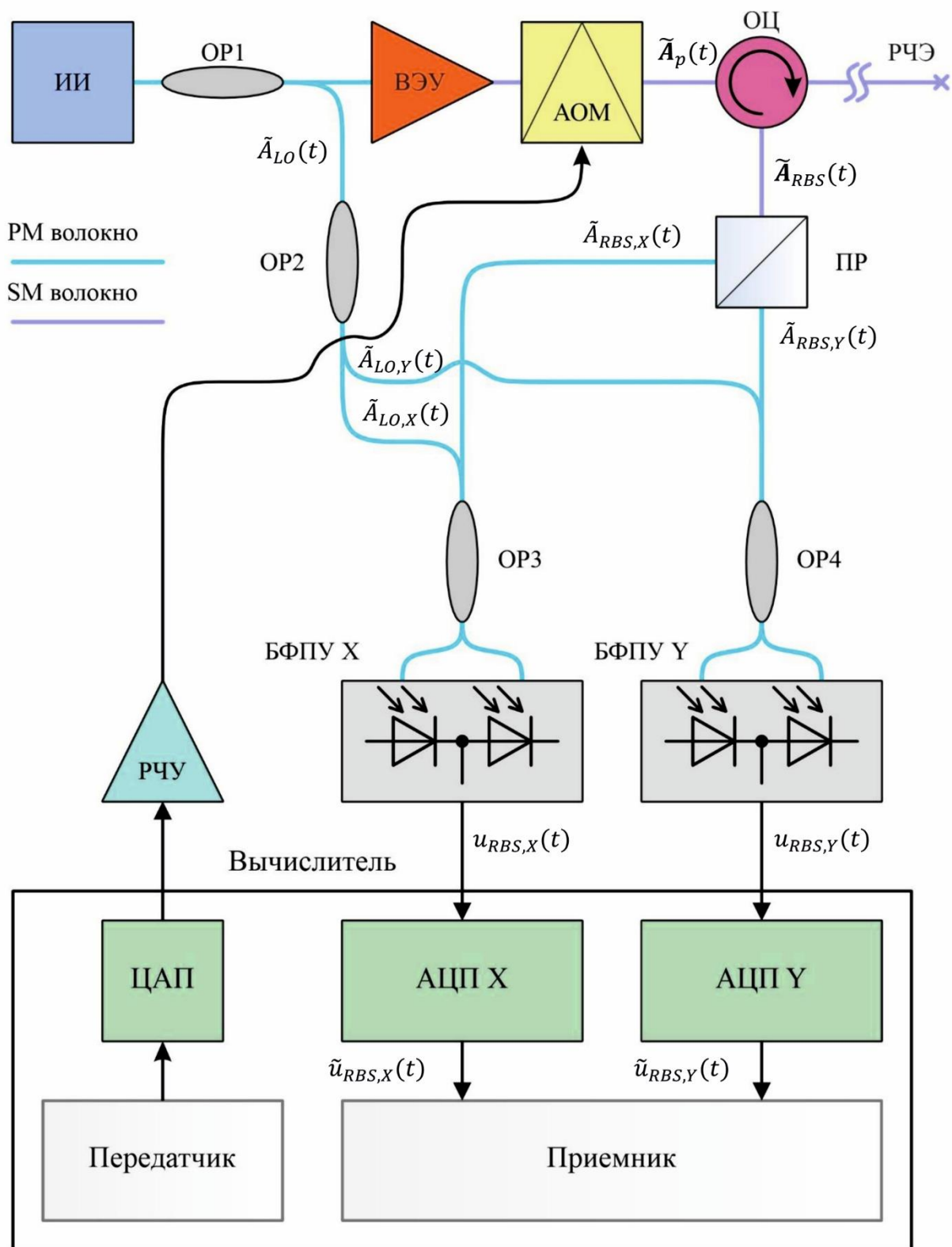


Рис. 1.

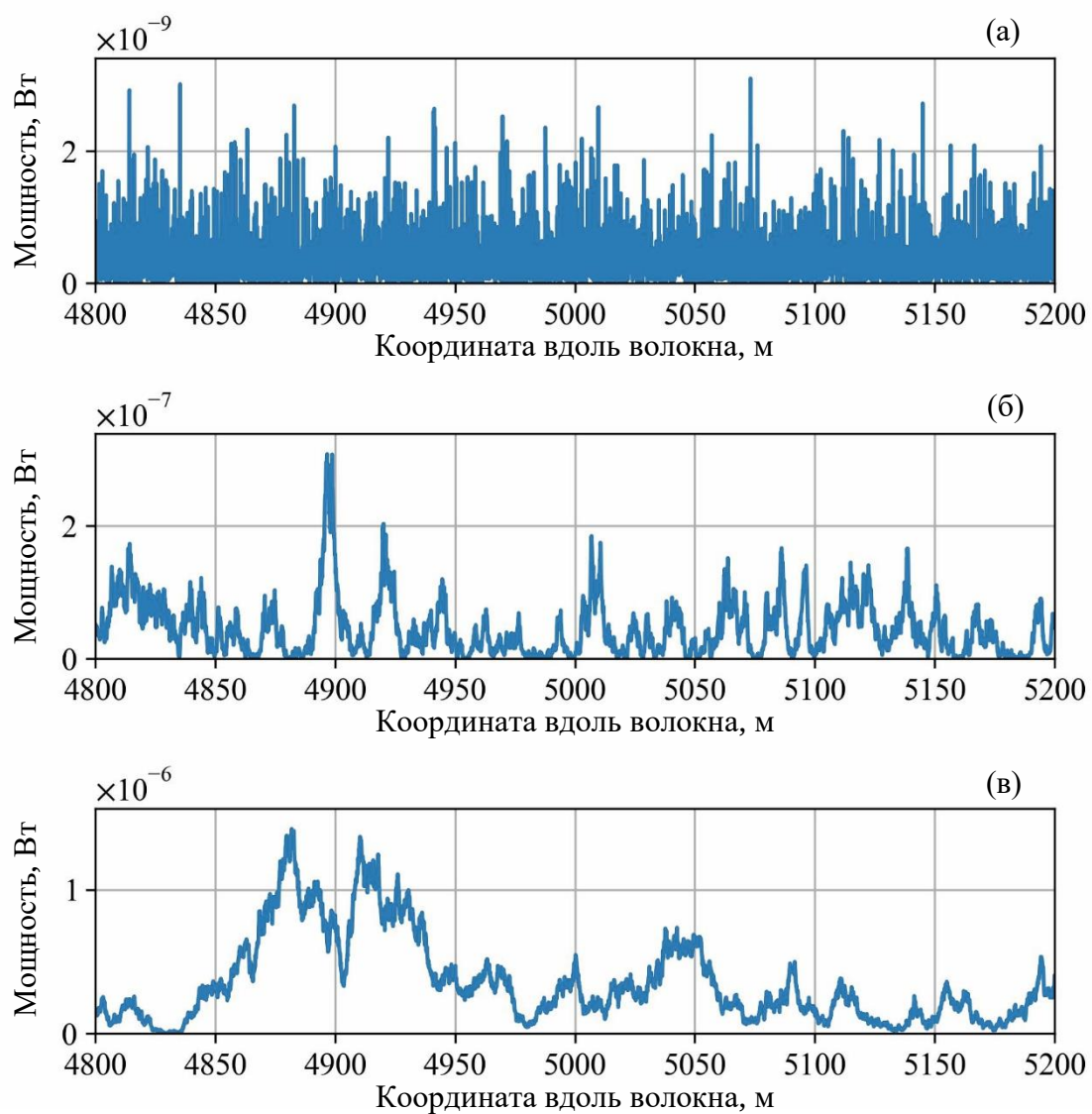


Рис. 2.

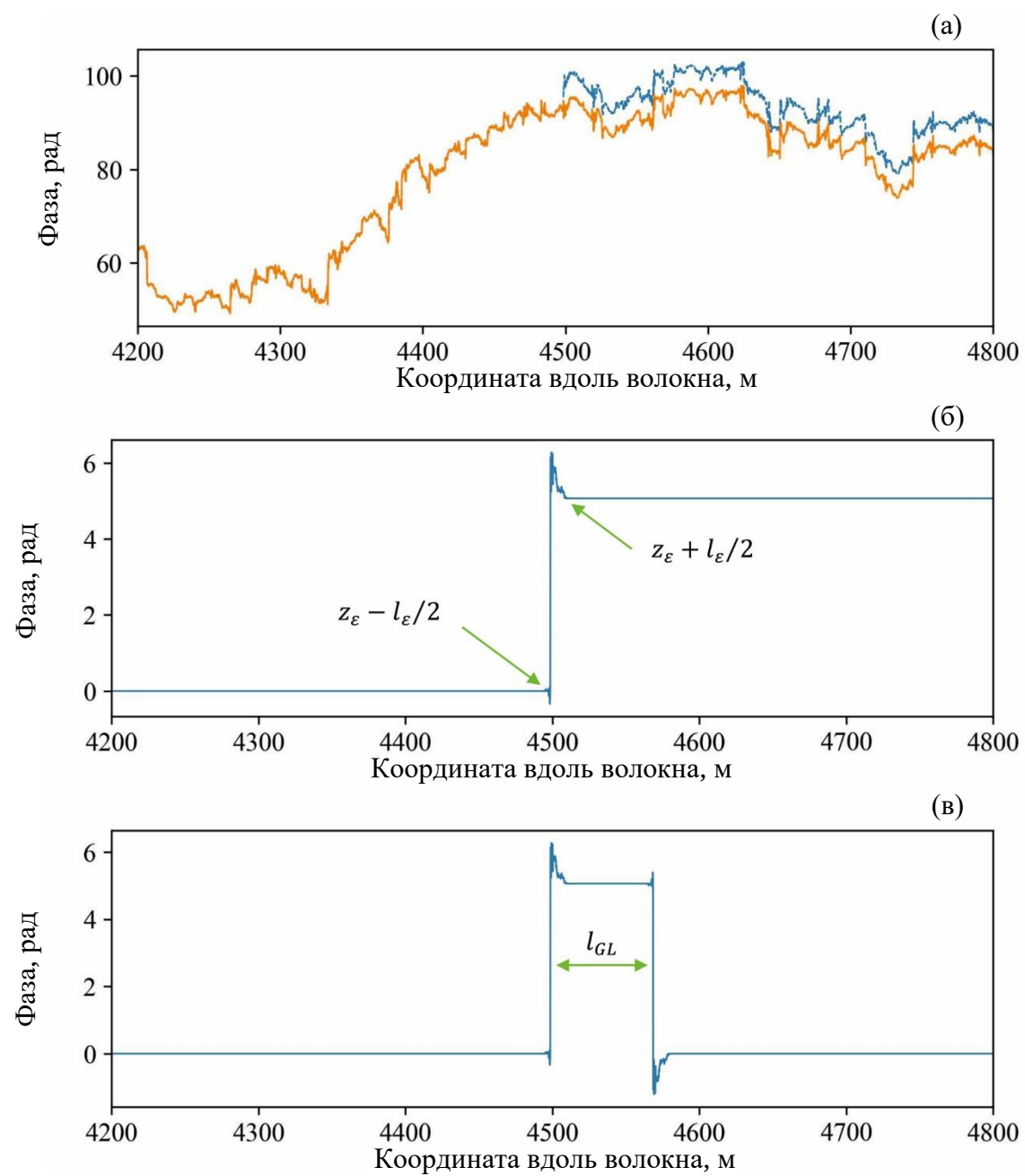


Рис. 3.

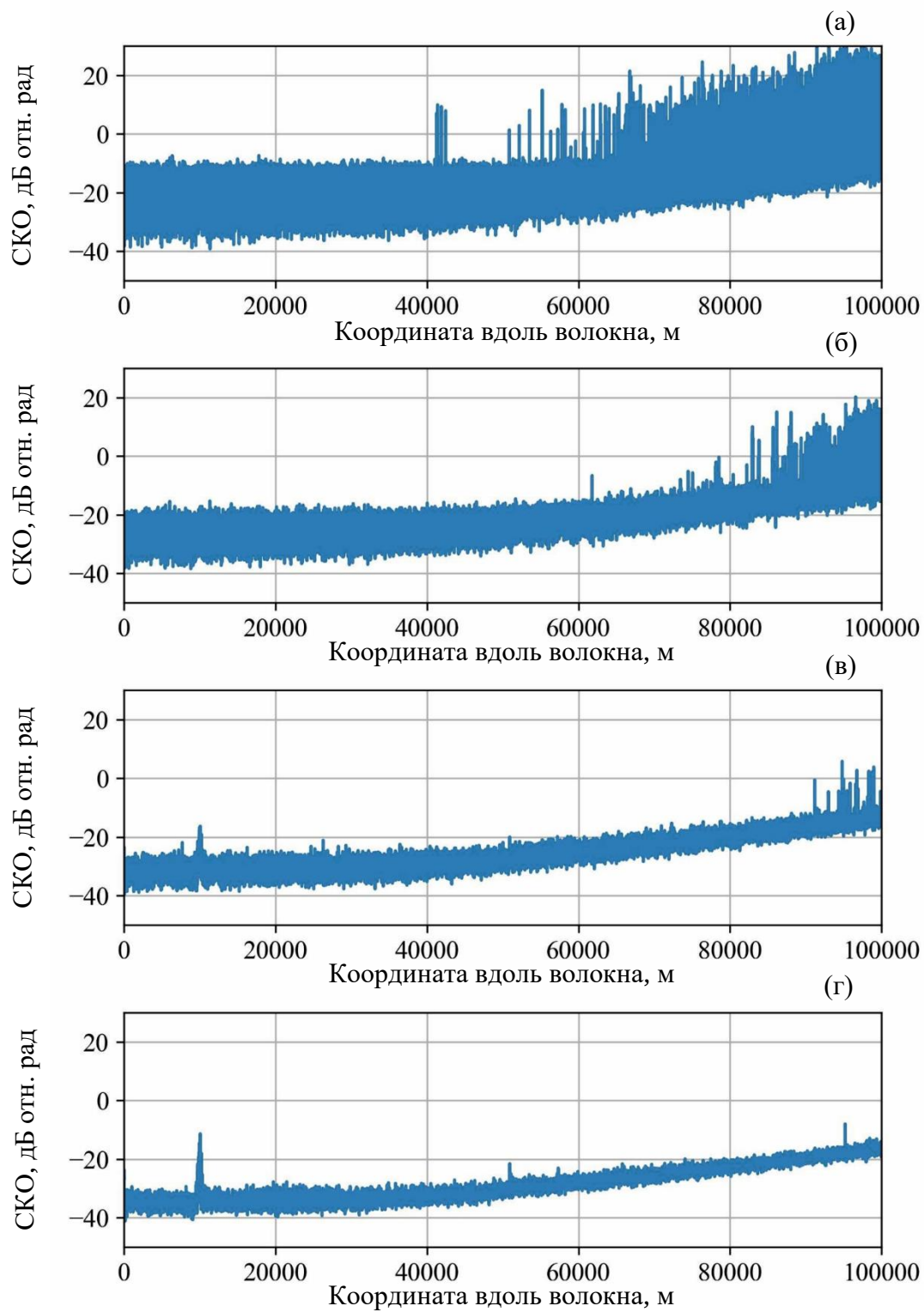


Рис. 4.

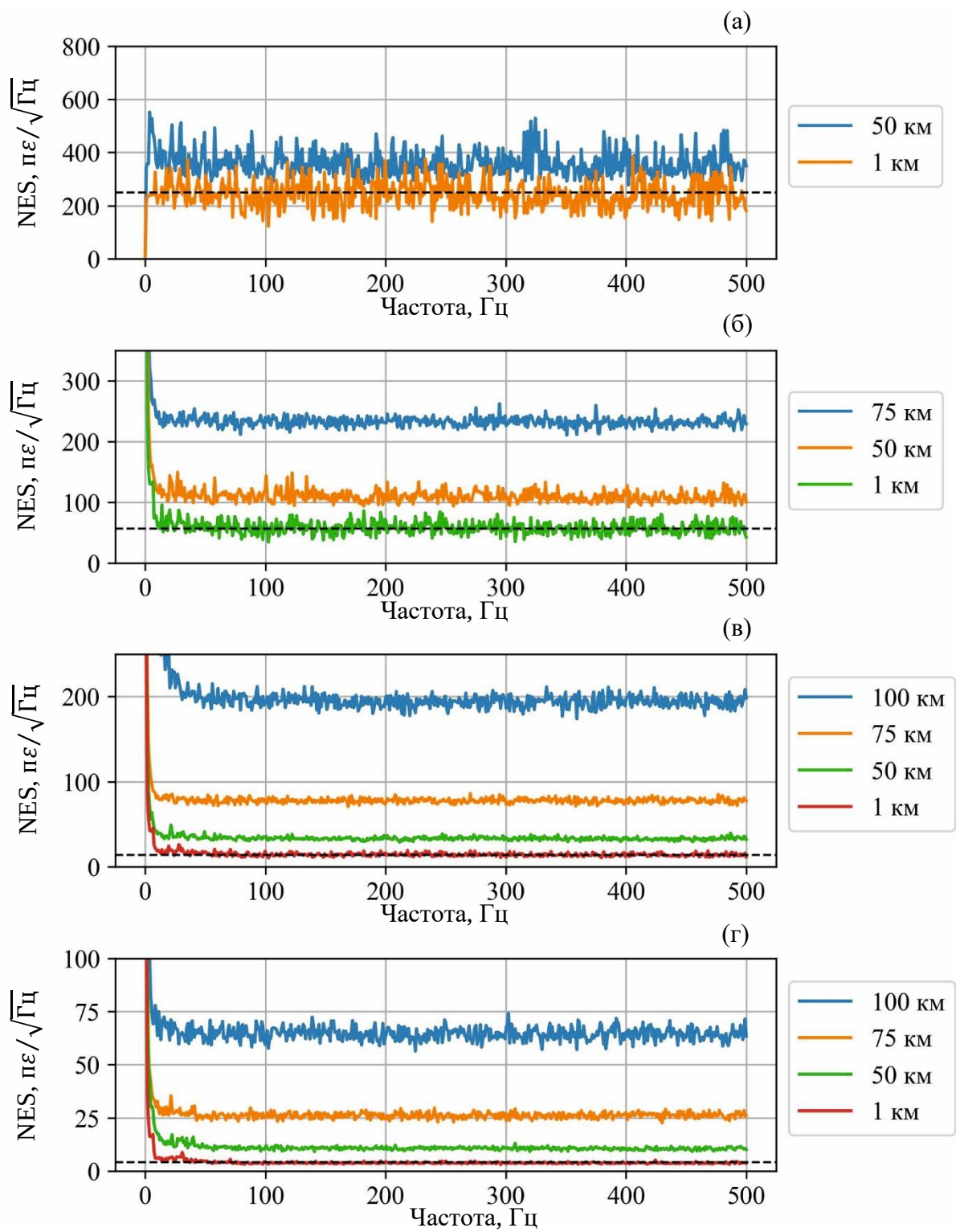


Рис. 5.

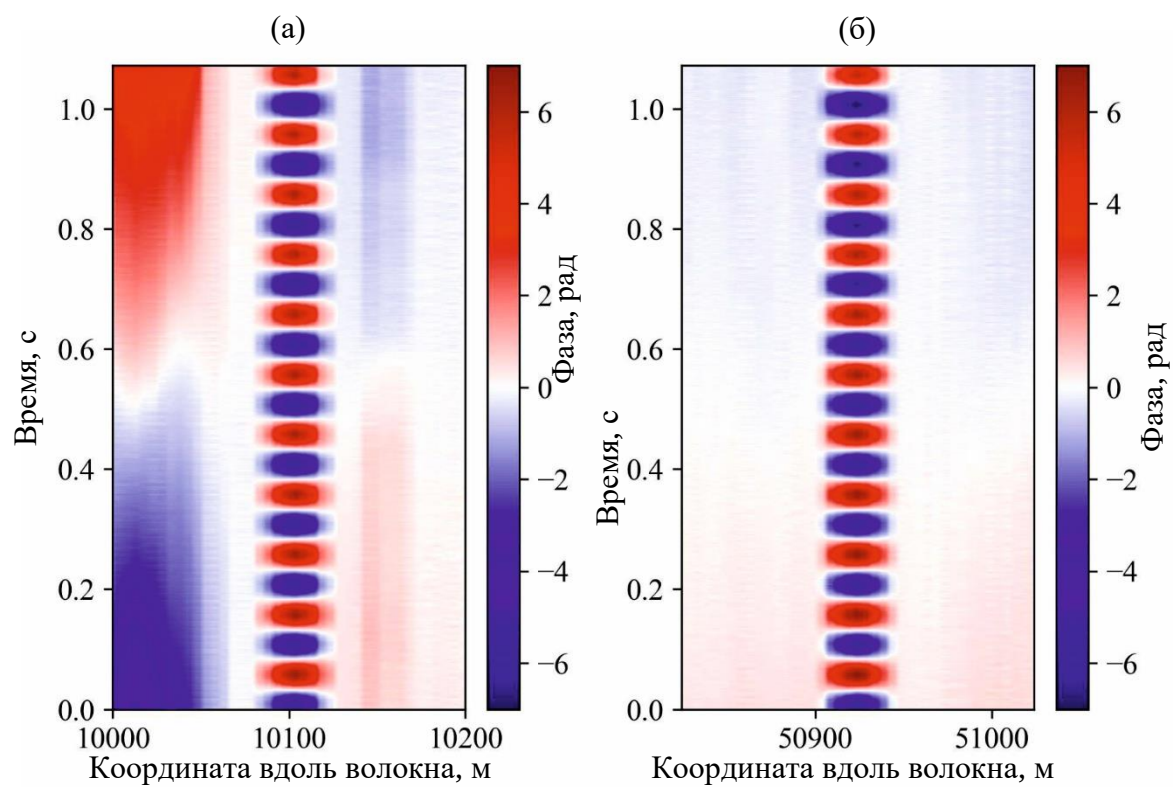


Рис. 6.

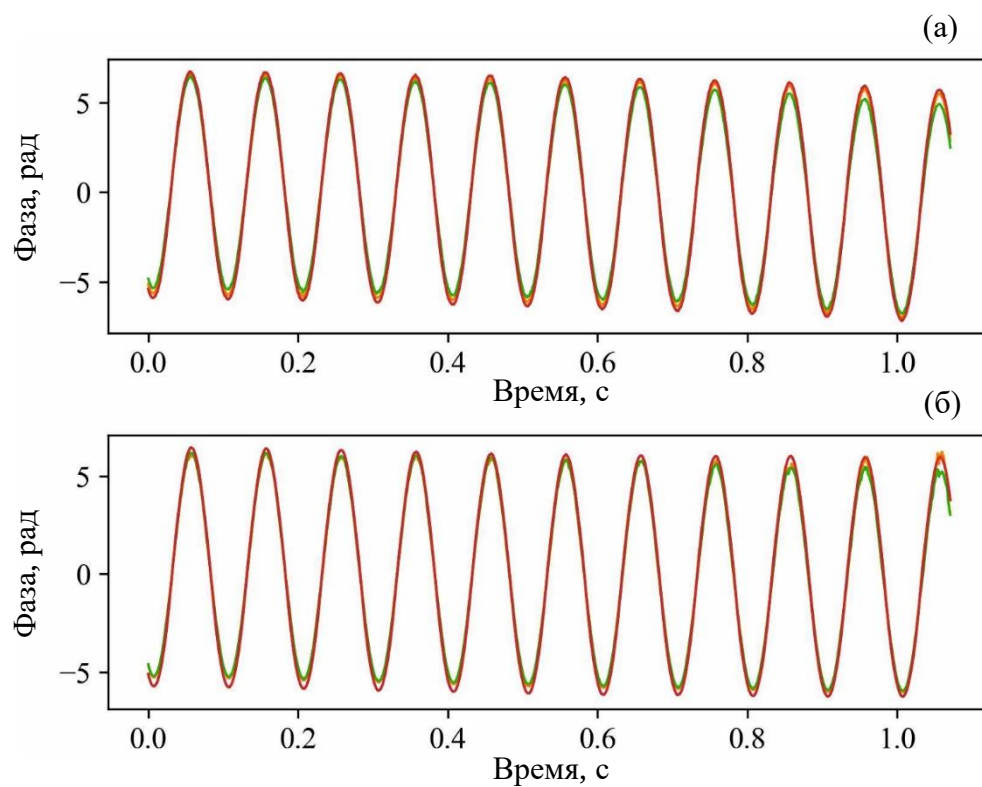


Рис. 7.