

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.54

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПО
СПЕКТРАЛЬНЫМ МИНИМУМАМ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА–ЦЕНДЕРА¹

©2026 г. И. А. Трефилов^{a, b, *}, А. В. Куликов^a, М. Ю. Плотников^a

^a Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики (ИТМО)

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

^b ООО «Инверсия-Сенсор»

Россия, 614002, Пермь, ул. 25 Октября, 106

*E-mail: igortrefilov59@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Исследована распределенная волоконно-оптическая система на основе гибридного интерферометра Маха–Цендера (одноволоконного Саньяка) с непрерывной широкополосной засветкой. Показано, что при широкополосном локальном воздействии координата возмущения определяется по частотам спектральных минимумов фотоприемного сигнала без предварительной фазовой демодуляции. Получена экспериментальная зависимость характеристической частоты от координаты воздействия $\Delta f = 110192.169 \ell^{-1.021}$. Среднее отклонение локализации составило 112.4 м. Установлено, что фазовая демодуляция в режиме гармонического воздействия пригодна для восстановления временного закона сигнала, но не для локализации по спектральным минимумам. Тем самым показано, что локализация широкополосного воздействия и фазовая демодуляция решают разные измерительные задачи.

Ключевые слова: распределенный волоконно-оптический датчик, гибридный интерферометр Маха–Цендера, спектральные минимумы, локализация воздействия, фазовая демодуляция, разветвитель 3×3, пассивная интерферометрическая схема.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные волоконно-оптические датчики вибрации применяются для контроля протяженных объектов, когда необходимо сочетать большую длину контролируемого участка, высокую чувствительность и устойчивость к электромагнитным помехам. Такие системы востребованы при охране периметра, мониторинге трубопроводов и кабельных линий, контроле

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

мостов, тоннелей и иных инженерных сооружений, а также при регистрации техногенных и сейсмических воздействий [1, 2].

Исторически развитие распределенных датчиков шло по двум направлениям. Первое использует интерференционные схемы – интерферометры Саньяка, Маха–Цендера, Майкельсона и их гибриды. Второе основано на обратном рассеянии и включает фазочувствительную рефлектометрию, рефлектометрию в частотной области и их комбинации [1, 2]. Интерференционные схемы привлекательны простотой оптической части, высокой чувствительностью и возможностью построения пассивного тракта, однако пространственная привязка в них обычно извлекается косвенно по частотным или временным признакам сигнала.

В ранних работах для интерферометрических распределенных систем были предложены два разных класса обработки. С одной стороны, для локализации воздействия использовались периодичность спектральных минимумов и ее модификации, включая алгоритм двойного быстрого преобразования Фурье [3, 4]. С другой стороны, активно развивались методы фазовой демодуляции и компенсации фазовых искажений, ориентированные на восстановление временного закона воздействия или на расширение динамического диапазона измерений [5–8].

В опубликованных работах эти два класса задач нередко описываются рядом и без явного разграничения анализируемых сигналов. В результате может создаваться впечатление, что предварительная фазовая демодуляция является обязательным этапом и для локализации. На практике это затрудняет воспроизведение экспериментов: исследователь получает корректно демодулированный фазовый сигнал, но теряет спектральный пространственный признак, по которому выполняется координатная привязка широкополосного воздействия.

Исследуемая оптическая конфигурация содержит встречное распространение излучения в общем волоконном участке и по характеру формирования сигнала близка к схемам, которые в литературе нередко относят к одноволоконным (in-line) интерферометрам Саньяка. Вместе с тем в настоящей работе данная схема рассматривается как модифицированный интерферометр Маха–Цендера с отражающим окончанием линии, поскольку именно такое описание точнее отражает ее конструктивную реализацию и используемый подход к обработке сигнала.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном разграничении двух режимов применения одной и той же пассивной схемы с непрерывной широкополосной засветкой: локализации широкополосного воздействия по частотам спектральных минимумов и восстановления временного закона гармонического воздействия методом фазовой демодуляции. В соответствии с этой целью в статье рассмотрены работа пассивной схемы с разветвителем 3×3 , калибровочная зависимость между характеристической частотой минимумов и координатой воздействия, структура отклонения локализации, локальная

пространственная разрешающая способность и возможные направления дальнейшего развития метода.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

2.1. Пассивная схема и роль разветвителя 3×3

В настоящей работе использована пассивная волоконно-оптическая схема с непрерывной широкополосной засветкой, двумя фотоприемными каналами и гибридной топологией Маха–Цендера. Оптические конфигурации приведены на рис. 1. В базовой конфигурации широкополосный источник WSLs (SLD) подключался к разветвителю 3×3 , два выходных сигнала регистрировались фотоприемными модулями PD1 и PD2. Одно из плеч включало линию задержки TDF1 длиной 3 км. Далее плечи объединялись разветвителем 2×2 и подключались к исследуемому волоконному участку FUT, который оканчивался отражателем FRM. В рабочей конфигурации локальное воздействие вводилось либо пьезокерамическим модулятором, либо как внешнее акустическое воздействие на исследуемый участок.

Разветвитель 3×3 является ключевым элементом пассивной схемы. В идеализированном случае его три выхода содержат интерференционные сигналы, сдвинутые по фазе приблизительно на 120° относительно друг друга. Это свойство широко используется в пассивных интерферометрических датчиках, поскольку оно позволяет формировать набор каналов с разными фазовыми чувствительностями без введения внешней фазовой несущей [9, 10]. Для симметричного 3×3 -разветвителя сигналы можно записать в виде

$$I_k(t) = B_k + A_k \cos[\varphi(t) + \delta_k], \quad k = 1, 2, 3,$$

где B_k – постоянные составляющие, A_k – амплитуды, $\varphi(t)$ – результирующий интерференционный фазовый сдвиг, а $\delta_k \approx 0, \pm 2\pi/3$ – фазовые добавки, задаваемые самим разветвителем. В нашем эксперименте регистрировались два канала, что достаточно для сопоставления двух режимов обработки. В режиме локализации анализировался спектр фотоприемного сигнала до восстановления фазы. В режиме демодуляции эти же каналы после нормирования использовались для построения суммарно-разностных сигналов и вычисления арктангенса.

В настоящей работе применение 3×3 -разветвителя важно по двум причинам. Во-первых, он реализует пассивное формирование каналов с различными фазовыми чувствительностями без фазового модулятора в измерительном тракте [11]. Во-вторых, он делает возможным сравнение двух режимов обработки на одной и той же оптической конфигурации: пространственный признак локализации извлекается из спектральной структуры сырого сигнала, а временной закон гармонического воздействия – из демодулированной фазы.

Рис. 1. Экспериментальные конфигурации гибридной схемы Маха–Цендера

2.2. Источник излучения, типы воздействий и параметры эксперимента

Спектр излучения источника контролировался оптическим анализатором спектра. По данным измерений центральная длина волны составляла 1543.59 нм, а ширина спектра на уровне 3 дБ равна 46.17 нм. Источник имеет гладкую огибающую без узких выраженных линий, что позволяет интерпретировать периодические минимумы в спектрах фотоприемного канала как следствие интерференционного механизма, а не как артефакт узкополосных резонансов самого источника (рис. 2.).

Рис. 2. Спектр широкополосного источника излучения, использованного в эксперименте

Основные параметры эксперимента приведены в табл. 1. В режиме локализации на пьезокерамическое кольцо подавался широкополосный сигнал типа белого шума в полосе 0–70 кГц. Реальная спектральная огибающая механического воздействия определялась собственной частотной характеристикой модулятора и имела выраженный максимум в области 32 кГц. Именно в этой области отношение сигнал/шум было наибольшим, поэтому рабочая полоса для выделения спектральных минимумов выбиралась вблизи резонансной области.

Таблица 1. Основные параметры эксперимента

Параметр	Значение
Центральная длина волны источника	1543.59 нм
Ширина спектра на уровне 3 дБ	46.17 нм
Длина линии задержки TDF1	3 км
Частота дискретизации	117 кГц
Тип волокна	SMF-28
Максимальная исследованная длина линии	80 км
Типы локального воздействия	Широкополосный шум 0–70 кГц с резонансом в области 32 кГц; гармонический сигнал 3.55 кГц

Такой режим возбуждения использовался целенаправленно, поскольку задача локализации по спектральным минимумам требует непрерывно заполненного спектра воздействия. Только в этом случае в спектре фотоприемного сигнала проявляется квазипериодическая структура минимумов, связанная с пространственно-зависимой задержкой между встречными волнами.

Отдельная серия экспериментов была выполнена в режиме гармонического возбуждения. В этом случае на модулятор подавался одночастотный сигнал с частотой около 3.55 кГц. Данный режим не предназначался для локализации по спектральным минимумам, он

использовался для сопоставления результатов: восстановления временного закона фазового воздействия после демодуляции и оценки того, сохраняется ли при такой обработке спектральный признак, необходимый для локализации.

Таким образом, широкополосный и гармонический режимы в работе применялись не как взаимозаменяемые способы возбуждения, а как два различных измерительных режима. Первый использовался для формирования спектрального признака локализации, второй – для сопоставления с результатами фазовой демодуляции и проверки пригодности этого подхода для определения координаты воздействия.

3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПО ЧАСТОТАМ СПЕКТРАЛЬНЫХ МИНИМУМОВ ПРИ ШИРОКОПОЛОСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Для локализации воздействия использовалось широкополосное возбуждение пьезокерамического модулятора. После регистрации сигнала фотоприемным каналом выполнялся переход к частотной области и анализировалась спектральная структура выходного сигнала. Пространственная информация извлекалась непосредственно из положения спектральных минимумов без предварительной фазовой демодуляции.

Возникновение спектральных минимумов связано с тем, что при локальном воздействии на расстоянии l между встречными волнами формируется эффективная временная задержка τ . В результате в спектре фотоприемного сигнала появляется квазипериодическая структура, шаг которой зависит от координаты воздействия. В качестве рабочей оценки использовались соотношения

$$\Delta f \approx \frac{1}{\tau}, \quad \tau \approx \frac{2n\ell}{c}, \quad \ell \approx \frac{c}{2n \cdot \Delta f},$$

где n – эффективный показатель преломления волокна, c – скорость света в вакууме, ℓ – координата или локализация воздействия, Δf – характеристическая частота, представляющая собой интервал по частоте между соседними спектральными минимумами. На практике минимумы выделялись не по всей полосе спектра, а в рабочем диапазоне вблизи основного спектрального максимума, где уровень сигнала был достаточным, а вероятность ложных минимумов, обусловленных шумовым фоном, была ниже.

3.1. Спектральные проявления пространственного признака

Спектры выходных сигналов для различных положений источника и различных длин линии приведены на рис. 3. Во всех случаях сохраняется широкая амплитудная огибающая с максимумом в области 32–33 кГц, что соответствует резонансной частоте пьезомодулятора. Положение этого максимума почти не меняется при изменении координаты воздействия.

Следовательно, пространственная информация кодируется не смещением основного пика, а шагом квазипериодической системы минимумов, накладывающейся на общую огибающую. Аналогичный подход к использованию спектральных особенностей интерферометрического сигнала для пространственной локализации воздействий рассматривался и в других волоконно-оптических сенсорных системах [12].

Рис. 3. Спектры фотоприемного сигнала при широкополосном возбуждении для разных положений воздействия и различных длин линии

При $\ell = 0$ выраженные спектральные минимумы отсутствуют: наблюдается только широкая огибающая с максимумом около 32 кГц. Это соответствует нечувствительной зоне схемы, где воздействие почти симметрично воспринимается встречными волнами, и пространственная информация практически не проявляется в частотной области. При переходе к $\ell = 10$ км появляются первые отчетливые минимумы с большим шагом по частоте. Для $\ell = 20, 30$ км число минимумов увеличивается, а расстояние между ними уменьшается. При длинах 50–70 км минимумы еще различимы, однако их контраст падает. При $\ell = 80$ км спектральная структура практически исчезает на фоне шума. Таким образом, в исследованной конфигурации признаки локализации уверенно наблюдаются в интервале 10–70 км.

На рис. 4 показан типичный пример автоматического выделения минимумов по сглаженной спектральной кривой. Минимумы определялись в рабочей полосе вокруг основного максимума, где амплитуда сигнала достаточна, а ложные минимумы от шумового фона появляются реже. Именно неопределенность выбора частоты минимума в дальнейшем определяет существенную часть погрешности локализации.

Рис. 4. Пример автоматического выделения спектральных минимумов в рабочей полосе спектра

3.2. Калибровочная зависимость и структура отклонений

Экспериментальная зависимость характеристической частоты Δf от координаты воздействия ℓ приведена на рис. 5. По экспериментальным точкам получена аппроксимация

$$\Delta f = 110192.169 \ell^{-1.021},$$

где частота Δf задана в герцах, а длина ℓ – в километрах. Показатель степени -1.021 близок к -1 , что соответствует ожидаемой обратной зависимости $\Delta f \sim 1/\ell$ для интерференционной схемы с пространственно-зависимой задержкой. Для эффективного показателя преломления $n \approx 1.46$ теоретический коэффициент зависимости $c/(2n\ell)$ составляет около $1.02 \cdot 10^5$, т. е. он на 7.9% ниже экспериментального коэффициента. Это подтверждает интерференционную природу наблюдаемого эффекта и одновременно указывает на вклад реальной частотной характеристики

модулятора и измерительного тракта. Сходные зависимости между пространственным положением воздействия и параметрами интерференционного сигнала наблюдались и в других распределенных интерферометрических системах [13].

Рис. 5. Логарифмическая калибровочная зависимость характеристической частоты спектральных минимумов от координаты воздействия. Экспериментальные данные представлены черными кружками, красной линией показана степенная аппроксимация $\Delta f = 110192.169 \ell^{-1.021}$

Распределение отклонения локализации приведено на рис. 6. Среднее отклонение составило 26.7 м, среднеквадратичное отклонение равно 425.8 м, максимальное отклонение составляет 1.0 км. Небольшое среднее смещение по сравнению со среднеквадратичным отклонением указывает на преобладание случайной составляющей отклонений над систематической и наличие отдельных крупных выбросов.

Рис. 6. Распределение отклонения определения координаты по экспериментальной калибровочной зависимости. Среднее отклонение составляет 267 м,

Для подробного анализа отклонений на рис. 7 показана разность между экспериментально измеренной длиной и значениями, полученными по аппроксимационной зависимости. Максимальное отклонение, оказывающее наибольшее влияние на среднеквадратичное отклонение и среднее отклонение локализации, наблюдается при $l=70$ км.

Данный выброс можно отнести к грубой погрешности измерения. Его причиной может являться некорректно определенная длина подключаемой волоконной катушки, измерение которой проводилось с использованием когерентного рефлектометра. Кроме того, причиной выброса может быть неустойчивое выделение спектральных минимумов в условиях низкого отношения сигнал/шум.

При обработке данных без учета грубых выбросов среднее отклонение составило 112.4 м, а среднеквадратичное отклонение было равно 175.6 м.

Рис. 7. Отклонение экспериментально измеренной длины от значений, полученных по аппроксимационной зависимости

Дополнительное сопоставление с простой теоретической зависимостью $\ell = c/(2n \cdot \Delta f)$ приведено на рис. 8. Среднее отклонение между экспериментально определенной координатой и теоретической оценкой составляет –23 м, а среднеквадратичное отклонение равно 416.5 м. Следовательно, уже простая известная модель корректно описывает основную закономерность, а уточняющая степенная аппроксимация нужна прежде всего для уменьшения систематического смещения и практической калибровки конкретной установки.

Рис. 8. Сопоставление экспериментальной зависимости с простой теоретической зависимостью

3.3. Пространственная чувствительность и разрешающая способность

Из полученной калибровочной зависимости была оценена локальная пространственная чувствительность метода. Дифференцирование выражения $\Delta f = 110192.169 \ell^{-1.021}$ дает $d(\Delta f)/d\ell = -1.021 \cdot 110192.169 \ell^{-2.021}$.

Отсюда следует, что абсолютная чувствительность $|d(\Delta f)/d\ell|$ быстро уменьшается с увеличением длины линии. В координатных единицах это означает, что смещение локализации воздействия на 1 км изменяет характеристическую частоту примерно на 1.07 кГц при $\ell = 10$ км, на 116 Гц при $\ell = 30$ км и лишь на 16 Гц при $\ell = 80$ км.

Для оценки локальной пространственной разрешающей способности использовалось соотношение $\Delta \ell \approx |d\ell/d(\Delta f)| \cdot \Delta(\Delta f)$. После преобразования оно принимает вид

$$\Delta \ell \approx 8.89 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta(\Delta f) \ell^{2.021},$$

где величина $\Delta \ell$ выражена в метрах, $\Delta(\Delta f)$ – отклонение определения характеристической частоты в герцах, а длина ℓ задана в километрах. Пространственное разрешение ухудшается с расстоянием почти квадратично. На рис. 9 приведен расчет $\Delta \ell(\ell)$ для $\Delta(\Delta f) = 1$ Гц. Полученная оценка описывает именно локальную чувствительность калибровочной кривой, а не полную экспериментальную погрешность, в которую дополнительно входят шум, неопределенность положения минимумов и деградация отношения сигнал/шум на дальних участках.

Из табл. 2 следует, что собственная чувствительность калибровочной зависимости остается высокой на ближних и средних участках линии. Например, при неопределенности определения частоты 1 Гц ожидаемая локальная разрешающая способность составляет около 0.93 м на 10 км и 8.59 м на 30 км. Однако фактическое среднеквадратичное отклонение локализации равно 425.8 м, и оно существенно превышает эти величины. Следовательно, конечная неопределенность в данной реализации определяется не столько видом зависимости $\Delta f(\ell)$, сколько практической устойчивостью выделения минимумов и падением отношения сигнал/шум. Аналогичное ухудшение точности локализации на удаленных участках вследствие снижения отношения сигнал/шум отмечается и в современных распределенных волоконно-оптических датчиках [14].

Рис. 9. Локальная пространственная разрешающая способность, вычисленная по

Таблица 2. Оценка локальной пространственной чувствительности и разрешающей способности

ℓ , км	Δf , Гц	$ d(\Delta f)/d\ell $, Гц/км	$\Delta \ell$ при $\Delta(\Delta f) = 1$ Гц, м
10	10499.0	1071.95	0.93
30	3419.9	116.39	8.59
50	2030.0	41.45	24.12
70	1439.8	21.00	47.62
80	1256.3	16.03	62.37

4. ФАЗОВАЯ ДЕМОДУЛЯЦИЯ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Для исследования фазовой демодуляции использовалось гармоническое воздействие на пьезокерамический модулятор. В этом случае задача состояла не в локализации по спектральным минимумам, а в восстановлении временного закона фазового воздействия в той же пассивной оптической схеме.

Обработка выполнялась по последовательности, приведенной на рис. 10. Сигналы двух фотоприемных каналов предварительно нормировались, после чего из них формировались сумма и разность. Затем применялась полосовая фильтрация, вычислялась функция арктангенса и выполнялась развертка фазы. Используемая последовательность обработки соответствует классическим алгоритмам гомодинной демодуляции фазовых волоконно-оптических сенсоров [15]. В результате восстанавливался фазовый сигнал, по которому далее определялись его временной ход и спектральный состав.

Принципиально важно, что такой способ обработки ориентирован на восстановление фазового закона воздействия. При этом спектральная структура, используемая для локализации широкополосного воздействия по минимумам, в данном случае не сохраняется в виде, пригодном для определения координаты.

Рис. 10. Последовательность цифровой обработки в режиме фазовой демодуляции

Для оценки возможностей системы в режиме восстановления временного закона воздействия использовалось гармоническое возбуждение с частотой около 3.55 кГц. Результаты обработки для трех положений источника воздействия приведены на рис. 11. В левом части представлены исходные данные, снятые с фотоприемных модулей и измеренные в вольтах, а справа – демодулированная фаза, полученная по методике демодуляции, представленной выше.

Исходные сигналы двух каналов существенно отличаются от чистой синусоиды. Это закономерно, поскольку фотоприемник регистрирует не фазу, а интерференционную интенсивность, нелинейно зависящую от мгновенного фазового сдвига. При изменении координаты воздействия изменяются как форма колебаний, так и относительный сдвиг между каналами. Следовательно, анализ одного фотоприемного сигнала без совместной обработки двух каналов не обеспечивает достоверного восстановления фазового закона.

После демодуляции, развертки фазы и сглаживания получаются квазигармонические зависимости, близкие к задаваемому воздействию. Паразитная нелинейность интенсивностного сигнала подавляется, а временной закон воздействия становится существенно ближе к синусоидальному.

Рис. 11. Результаты обработки при гармоническом воздействии для координат 10, 20 и 30 км.

Сравнение спектров на рис. 12 принципиально важно для интерпретации результатов. При гармоническом возбуждении спектр исходного фотосигнала превращается в дискретный набор линий с выраженными гармониками. В то же время при широкополосном возбуждении формируется непрерывный спектр, на котором проявляются периодические минимумы, используемые для локализации. Это означает, что пространственная задержка как физический параметр сохраняется и в гармоническом режиме, однако она не проявляется в виде устойчивой квазипериодической последовательности минимумов из-за отсутствия непрерывного спектрального заполнения.

Рис. 12. Сравнение спектров, полученных в результате обработки исходных данных, при

Спектры восстановленной фазы, представленные на рис. 13, содержат отчетливую доминирующую линию в области 3.55 кГц для всех трех локализаций воздействия. По сравнению со спектрами исходных сигналов набор гармоник заметно подавлен, что подтверждает работоспособность выбранного алгоритма обработки. Также наблюдается сдвиг основной частоты, достигающий 5 Гц, что может быть связано с погрешностью управляющего генератора, а также с алгоритмами детектирования и обработки сигналов. Однако данное смещение не является критичным, поскольку оно составляет около 0.14 % от частоты воздействия.

Вместе с тем локализация в данном режиме невозможна: после фазовой демодуляции не возникает величины, эквивалентной периоду спектральных минимумов и однозначно связанной с координатой воздействия. Следовательно, в данной схеме фазовая демодуляция решает задачу восстановления временной структуры сигнала, но не задачу координатной привязки воздействия.

Рис. 13. Сравнение спектров и их увеличенных фрагментов, полученных в результате

5. ОБСУЖДЕНИЕ, НАУЧНАЯ НОВИЗНА И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Разграничение двух измерительных задач

Полученные результаты следует рассматривать как экспериментальное разделение двух физических режимов работы одной и той же интерферометрической системы, сравнение которых представлено в табл. 3. В широкополосном режиме измеряется частотная передаточная функция участка, содержащая пространственно-зависимую задержку, поэтому координата извлекается из периода расположения спектральных минимумов. В гармоническом режиме измеряется временная фаза локального воздействия, а сама частотная характеристика схемы сворачивается в конечное число дискретных линий.

Отсюда следует главный методический вывод работы: предварительная фазовая демодуляция не является обязательным этапом локализации широкополосного воздействия в линии. Напротив, в исследованной схеме пространственный признак локализации проявляется в спектре фотоприемного сигнала до демодуляции, тогда как после фазовой обработки этот признак исчезает в пригодном для координатного анализа виде. Именно это обстоятельство, по нашему мнению, недостаточно отчетливо акцентируется в ряде публикаций, где методы локализации и фазовой демодуляции обсуждаются без явного разграничения анализируемых сигналов и измерительных целей.

Таблица 3. Области применимости двух режимов работы системы

Признак	Широкополосный режим	Гармонический режим
Наличие спектральных минимумов	Да	Нет
Определение координаты воздействия	Да	Нет
Восстановление частоты воздействия	Ограничено	Да
Восстановление фазового закона	Нет	Да
Основное ограничение	Нечувствительная зона вблизи зеркала; падение отношения сигнал/шум при увеличении линии более 70 км	Отсутствие пространственного признака в спектре

5.2. Научная новизна работы

Научная новизна настоящей работы состоит в следующем. Во-первых, экспериментально показано на одной и той же пассивной схеме, что локализация широкополосного воздействия по спектральным минимумам и фазовая демодуляция гармонического сигнала относятся к разным режимам измерения и не являются взаимозаменяемыми. Во-вторых, получена и количественно подтверждена калибровочная зависимость $(\Delta f)(\ell)$ для исследованной гибридной схемы Маха–Цендера с разветвителем 3×3 , включая оценку локальной пространственной чувствительности и разрешающей способности. В-третьих, показано, что главный фактор ограничения погрешности в данной реализации связан не с видом зависимости $(\Delta f)(\ell)$, а с устойчивостью выделения спектральных минимумов и ухудшением отношения сигнал/шум на удаленных участках.

С практической точки зрения, статья дает воспроизводимую методику работы с пассивной схемой: описаны типы воздействий, структура оптического тракта, роль разветвителя 3×3 , области применимости двух режимов обработки и ограничения по нечувствительной зоне вблизи зеркала и длине линии. Тем самым, работа ориентирована не только на демонстрацию эффекта, но и на возможность его независимой верификации.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследована распределенная волоконно-оптическая система на основе гибридного интерферометра Маха–Цендера с непрерывной широкополосной засветкой и разветвителем 3×3 . Показано, что при широкополосном возбуждении локального модулятора в спектре фотоприемного канала формируется последовательность пространственно-зависимых минимумов, пригодная для определения координаты воздействия. Для исследованной установки характеристическая частота этой последовательности описывается зависимостью $\Delta f = 110192.169 \cdot \ell^{-1.021}$. Среднее отклонение локализации составило 26.7 м, среднеквадратичное отклонение 425.8 м, максимальное отклонение 1.0 км. При обработке данных без учета грубых выбросов среднее отклонения составило 112.4 м, а среднеквадратичное отклонение 175.6 м.

Установлено, что при $l = 0$ спектральные минимумы отсутствуют вследствие нечувствительной зоны, а при длине линии 80 км они перестают надежно выделяться из-за ухудшения отношения сигнал/шум. Выражение для локальной пространственной разрешающей способности $\Delta l \approx 8.89 \cdot 10^{-3} \Delta(\Delta f) l^{2.021}$ м показывает, что собственная чувствительность метода остается высокой на ближних и средних участках, а конечная погрешность определяется главным образом практической устойчивостью выделения минимумов.

Для гармонического воздействия с частотой около 3.55 кГц реализован алгоритм фазовой демодуляции, включающий нормировку каналов, формирование суммы и разности,

полосовую фильтрацию, вычисление арктангенса и развертку фазы. Показано, что алгоритм обеспечивает устойчивое восстановление временного закона воздействия и его основной частоты, однако не формирует спектрального признака, пригодного для локализации.

Главный методический результат работы состоит в следующем: одна и та же гибридная пассивная схема может использоваться либо как средство локализации широкополосного воздействия по спектральным минимумам, либо как средство восстановления частотных и фазовых характеристик гармонического воздействия. Эти режимы не заменяют друг друга, а решают разные измерительные задачи. Такой вывод важен для корректной интерпретации литературных данных и для построения воспроизводимых экспериментальных методик в последующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liu X., Jin B., Bai Q., Wang Y., Wang D., Wang Y.* Sensors. 2016. V. 16. № 8. P. 1164. <https://doi.org/10.3390/s16081164>.
2. *Liu K., Jin X., Jiang J., et al.* IEEE Sens. J. 2022. V. 22. № 22. P. 21428. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3213036>.
3. *Sun Q., Liu D., Wang J., Liu H.* Opt. Commun. 2008. V. 281. № 6. P. 1538. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.11.055>.
4. *Wang H., Sun Q., Li X., Wo J., Shum P.P., Liu D.* Opt. Express. 2014. V. 22. № 7. P. 7587. <https://doi.org/10.1364/oe.22.007587>.
5. *Jiang Y., Tang C., Guo G.* Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 046108. <https://doi.org/10.1063/1.3397255>.
6. *Wu Y., Li C., Tang H., Jia B., Wang C.* IEEE Access. 2022. V. 10. P. 15487. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146854>.
7. *Zhirnov A.A., Choban T.V., Stepanov K.V. et al.* Sensors. 2022. V. 22. № 7. Art. 2772. <https://doi.org/10.3390/s22072772>.
8. *Jin R., He C., Li C., et al.* J. Lightwave Technol. 2025. V. 43. P. 2438. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3486815>.
9. *Brown D.A.* Optical fiber interferometric acoustic sensors using ellipsoidal shell transducers: PhD Dissertation. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 1991.
10. *Koo K.P., Tveten A.B., Dandridge A.* Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. № 7. P. 616. <https://doi.org/10.1063/1.93626>.
11. *Brown D.A., Cameron C.B., Keolian R.M., Gardner D.L., Garrett S.L.* Fiber Optic and Laser Sensors IX. Proc. SPIE. 1991. V. 1584. P. 328.
12. *Wang Q., Han L., Fan X., Zhu J.* J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control. 2017. V. 37. № 3. P. 468. <https://doi.org/10.1177/1461348417725949>.

13. Huang Y., Wang Q., Shi L., Yang Q. Appl. Opt. 2016. V. 55. № 2. P. 242.
<https://doi.org/10.1364/AO.55.000242>.
14. Li Y., Wang Y., Xiao L. et al. IEEE Sens. J. 2022. V. 22. № 3. P. 1842.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3135909>.
15. Плотников М.Ю., Куликов А.В. Алгоритмы гомодинной демодуляции в фазовых волоконных акустооптических сенсорах. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2018.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Экспериментальные конфигурации гибридной схемы Маха–Цендера: **а** – базовая, **б** – с пьезокерамическим модулятором, **в** – с внешним воздействием на исследуемый участок FUT
- Рис. 2.** Спектр широкополосного источника излучения, использованного в эксперименте
- Рис. 3.** Спектры фотоприемного сигнала при широкополосном возбуждении для разных положений воздействия и различных длин линии
- Рис. 4.** Пример автоматического выделения спектральных минимумов в рабочей полосе спектра
- Рис. 5.** Логарифмическая калибровочная зависимость характеристической частоты спектральных минимумов от координаты воздействия. Экспериментальные данные представлены черными кружками, красной линией показана степенная аппроксимация $\Delta f = 110192.169 \ell^{-1.021}$
- Рис. 6.** Распределение погрешности определения координаты по экспериментальной калибровочной зависимости. Среднее отклонение составляет 0.0267 км, среднеквадратичное отклонение 0.4258 км, максимальное отклонение 1.0 км
- Рис. 7.** Отклонение экспериментально измеренной длины от значений, полученных по аппроксимационной зависимости $\Delta f = 110192.169 \ell^{-1.021}$
- Рис. 8.** Сопоставление экспериментальной зависимости с простой теоретической зависимостью $\ell = c/(2n\Delta f)$ и распределение отклонений между ними. На левой панели черными точками показаны экспериментальные данные, синей линией – аппроксимационная зависимость, полученная по уравнению $L = (\Delta f / 110192.17)^{(1/-1.02)}$, красной линией – теоретическая зависимость $L = c/(2n\Delta f)$. На средней панели показана разность между экспериментальными данными и теоретической зависимостью, на правой – распределение этих отклонений
- Рис. 9.** Локальная пространственная разрешающая способность, вычисленная по калибровочной зависимости для погрешности определения характеристической частоты 1 Гц
- Рис. 10.** Последовательность цифровой обработки в режиме фазовой демодуляции
- Рис. 11.** Результаты обработки при гармоническом воздействии для координат 10, 20 и 30 км. Слева представлены исходные сигналы, зарегистрированные первым (синяя линия) и вторым (красная линия) фотоприемными каналами, справа – результаты фазовой демодуляции

Рис. 12. Сравнение спектров, полученных в результате обработки исходных данных, при гармоническом (синяя линия) и широкополосном (красная линия) возбуждениях для координат воздействия 10, 20 и 30 км

Рис. 13. Сравнение спектров и их увеличенных фрагментов, полученных в результате обработки демодулированных фаз сигналов при гармоническом возбуждении с частотой 3.55 кГц для координат воздействия 10, 20 и 30 км

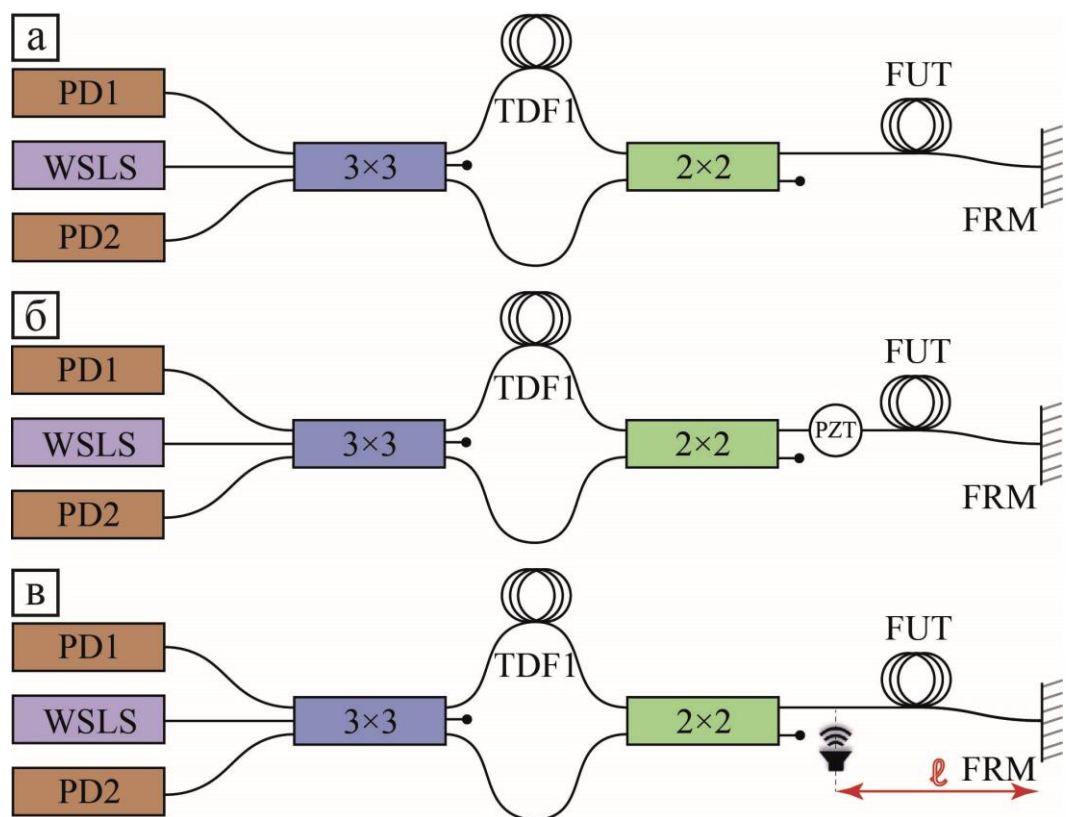


Рис. 1.

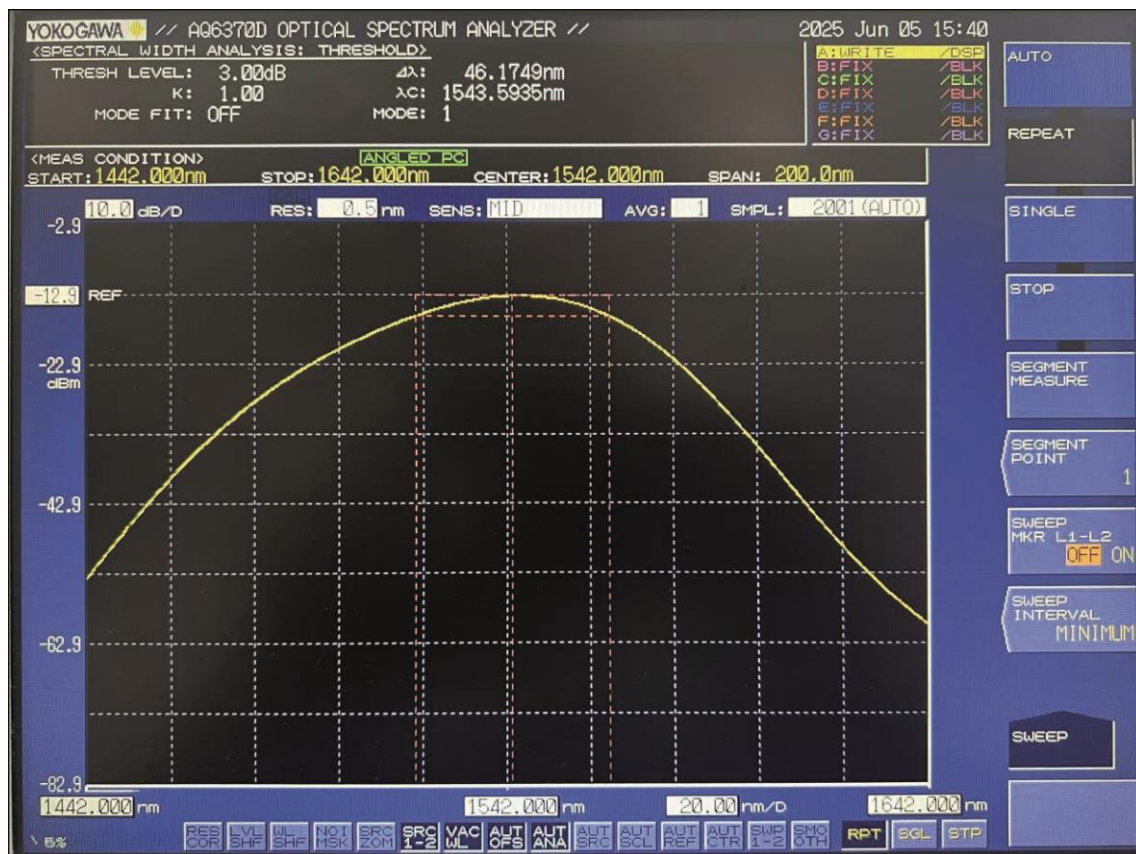


Рис. 2.

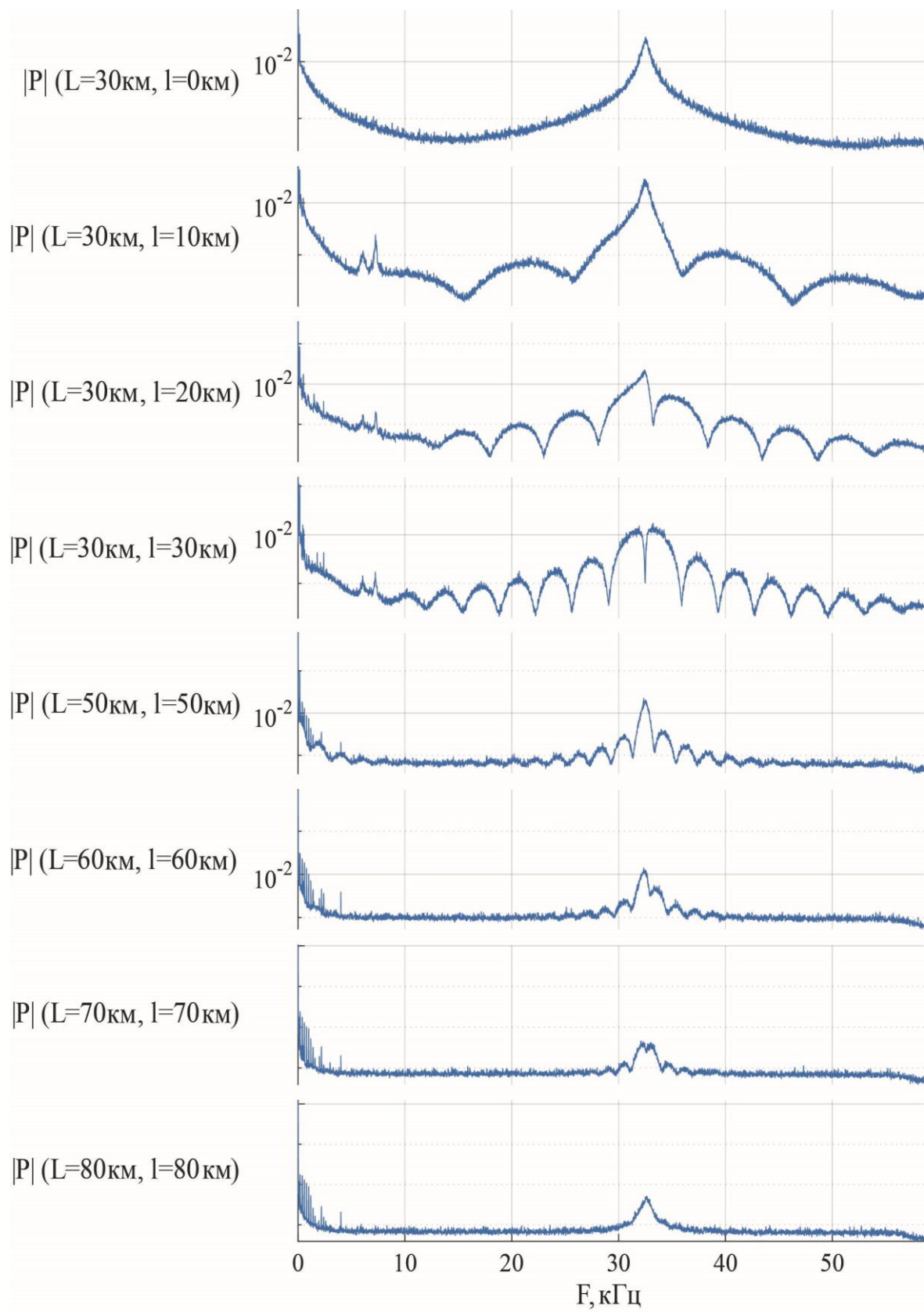


Рис. 3.

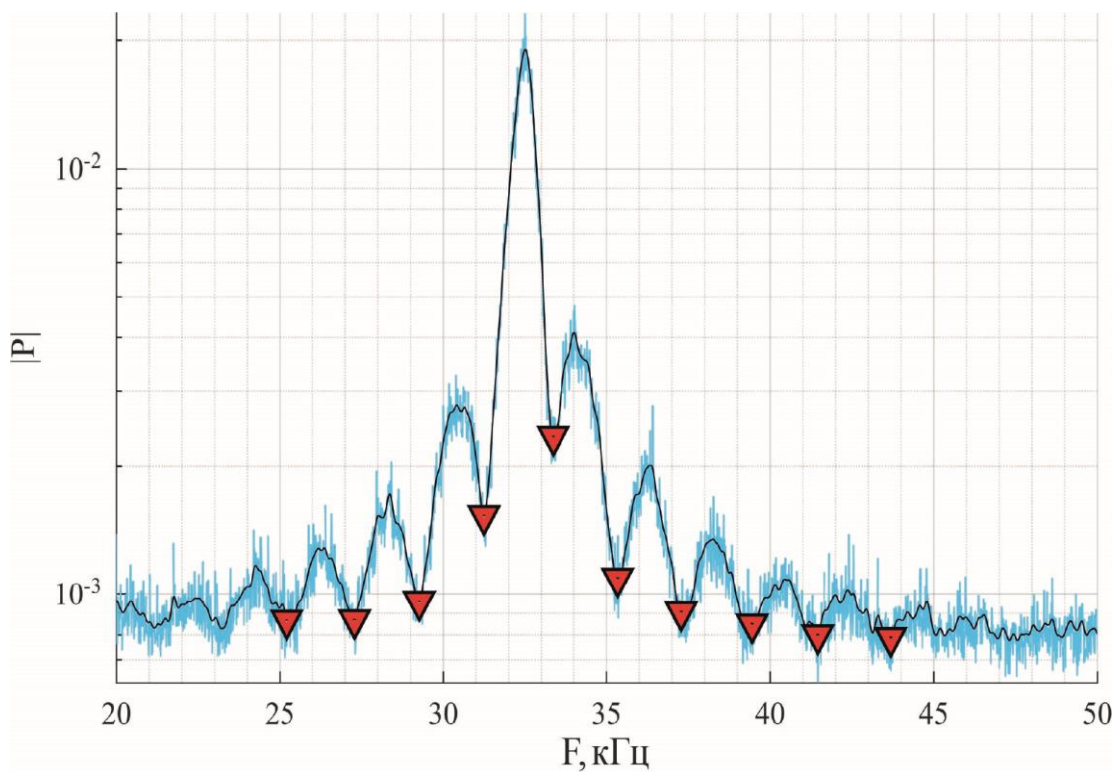


Рис. 4.

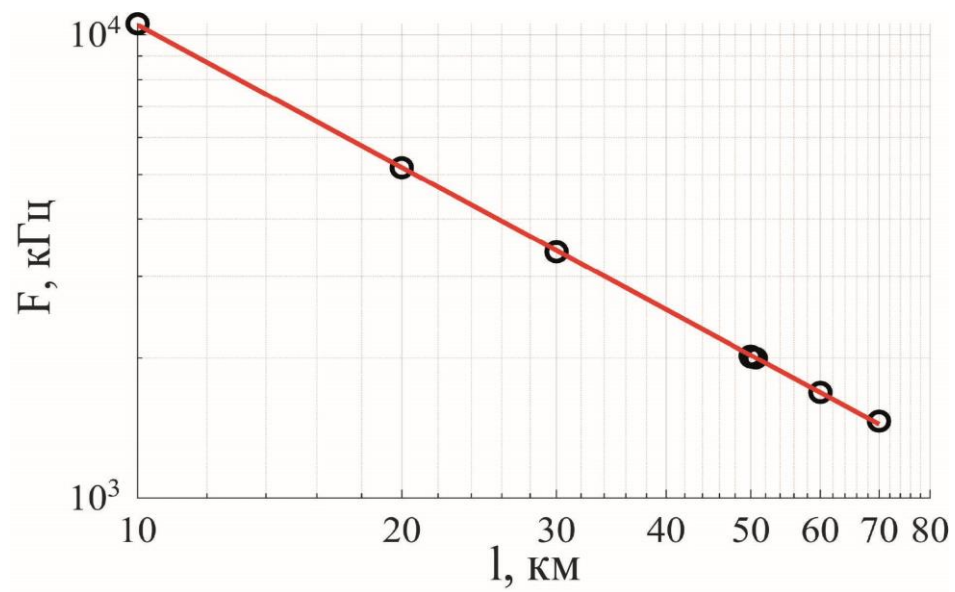


Рис. 5.

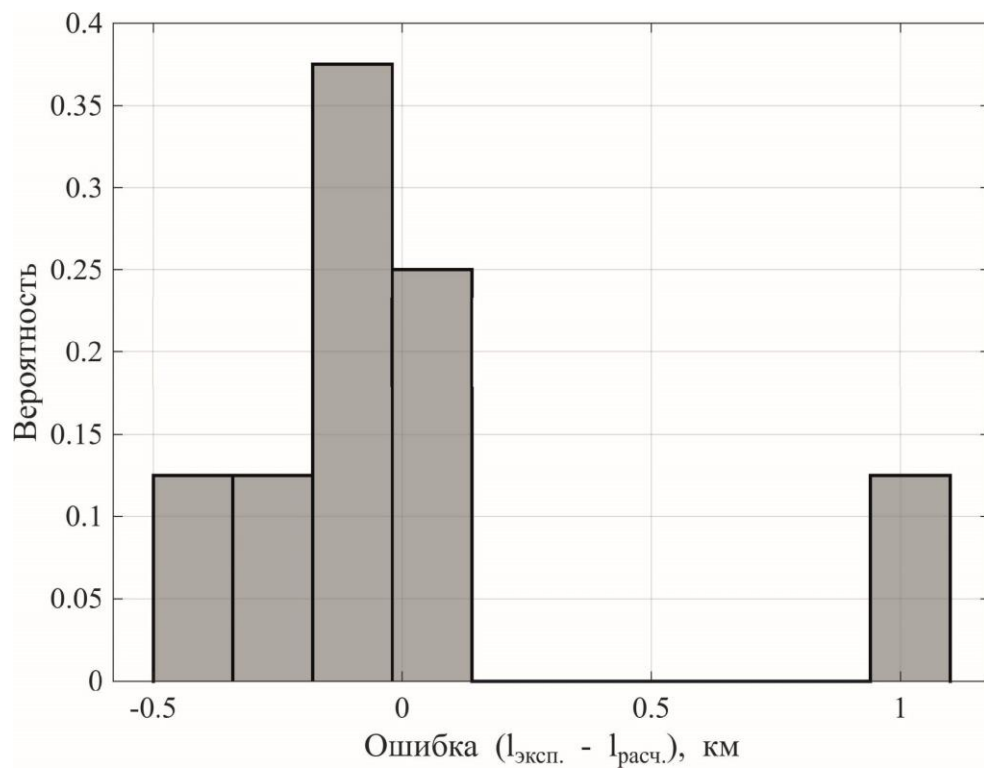


Рис. 6.

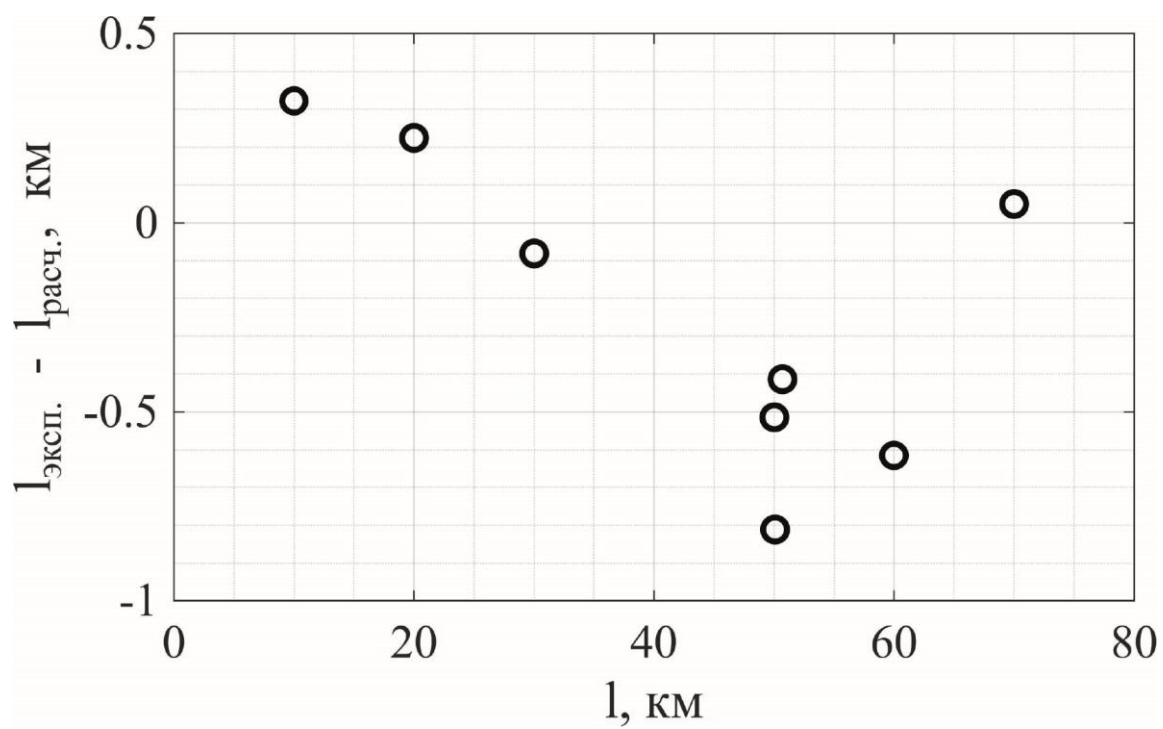


Рис. 7.

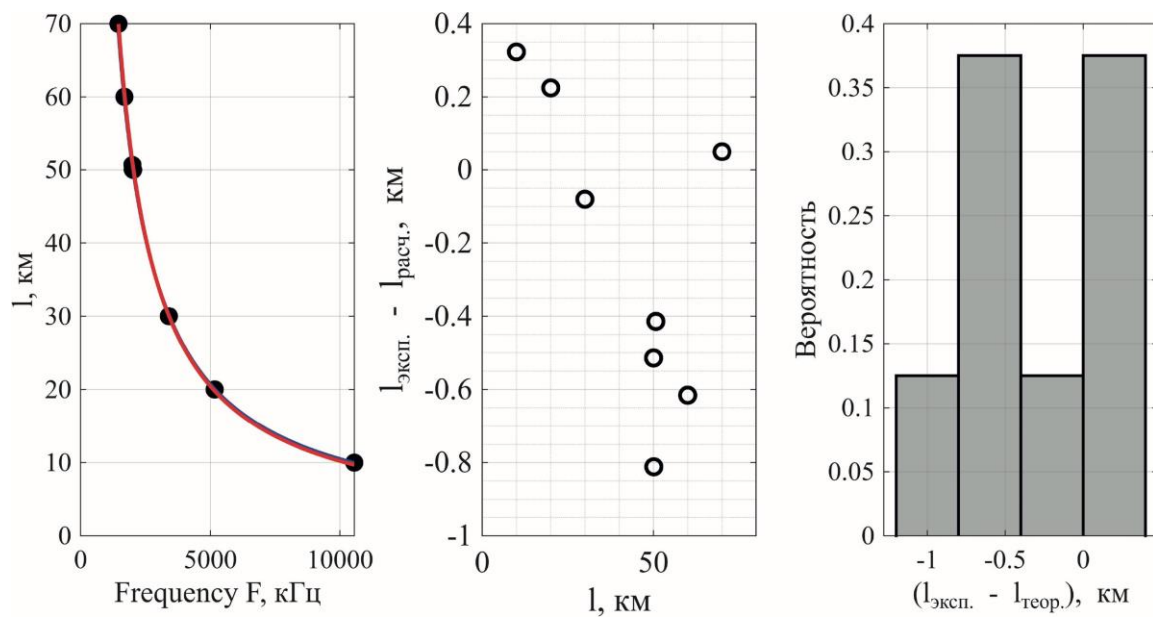


Рис. 8.

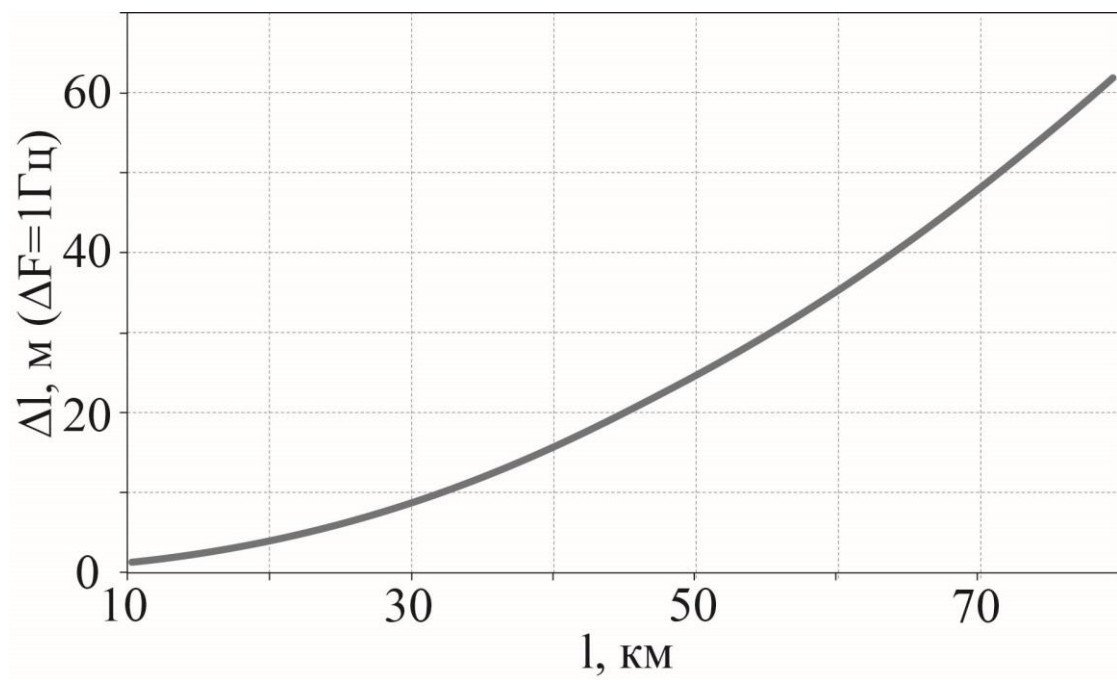


Рис. 9.



Рис. 10.

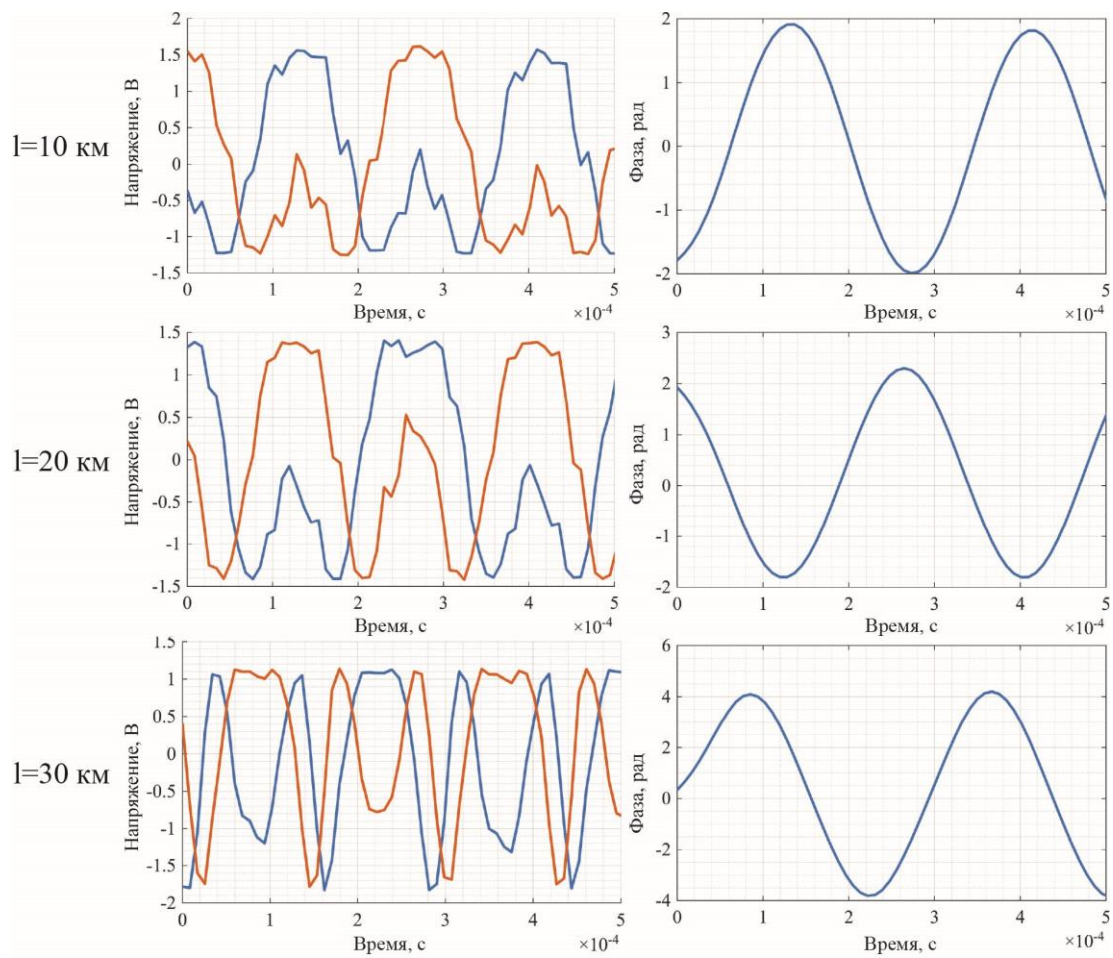


Рис. 11.

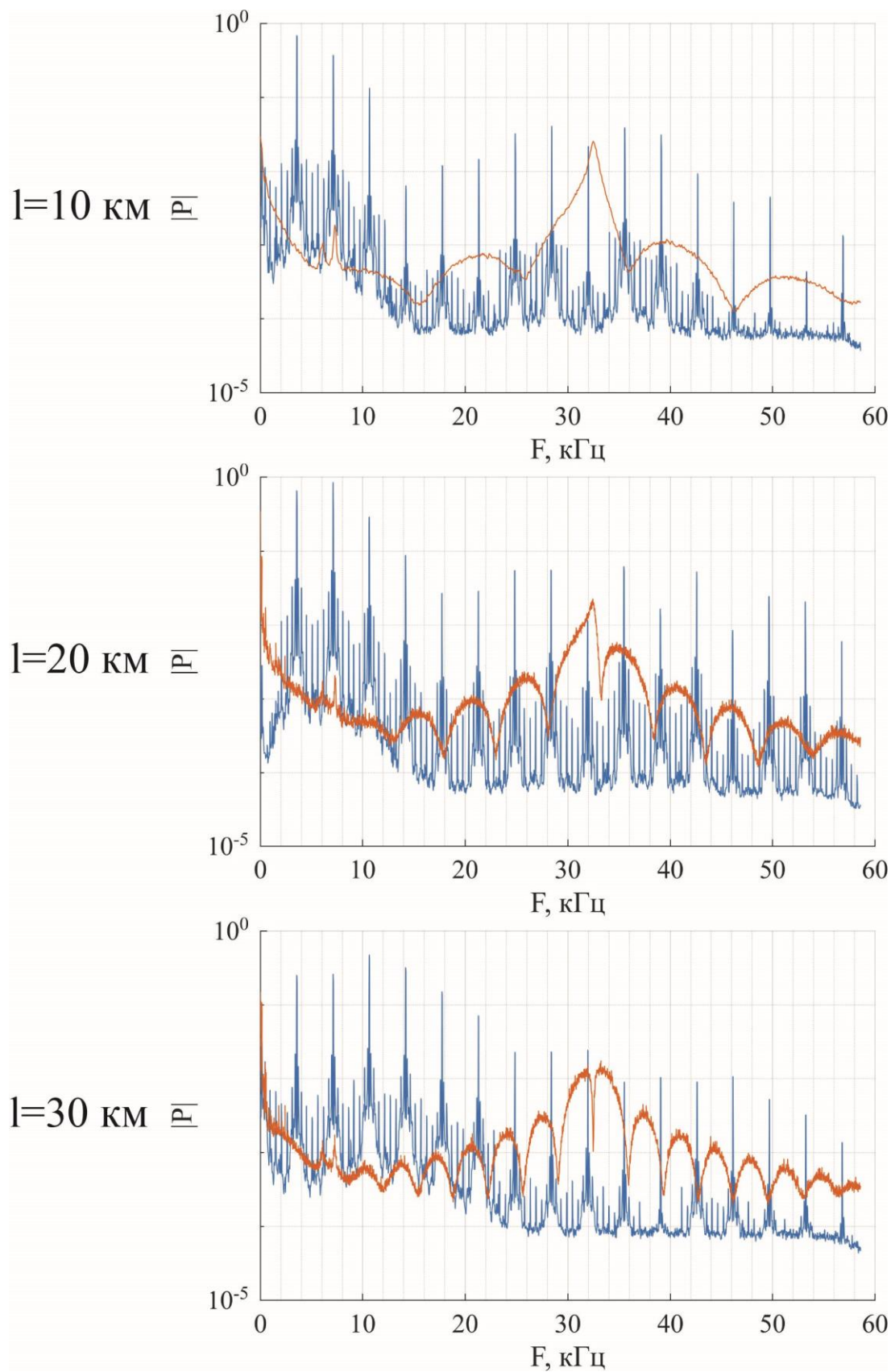


Рис. 12.

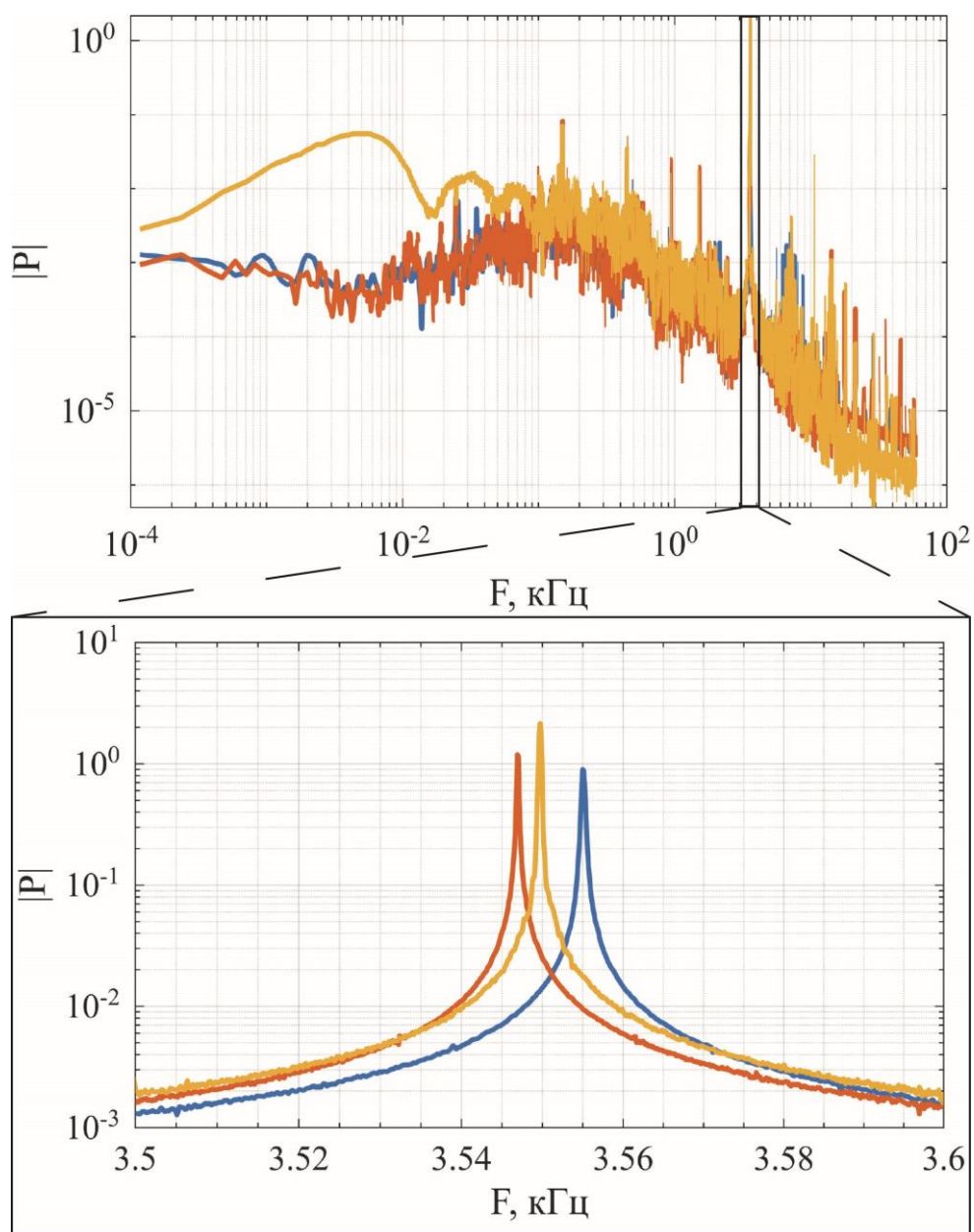


Рис. 13.