

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА НА
ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РОС-ДИОДА С
САМОЗАХВАТОМ ЧАСТОТЫ НА ВЫСОКОДОБРОТНОМ
ВОЛОКОННОМ РЕЗОНАТОРЕ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА¹

© 2026 г. А. Т. Туров ^{a,b,c,*}, И. С. Паняев ^a, П. А. Итрин ^a,
Е. Е. Тотмина ^{b,c}, Ю. А. Константинов ^b, Д. Клод ^b, Д. А. Коробко ^a,
А. А. Фотиади ^{a,d}

^a Ульяновский государственный университет,
Россия, 432017, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

^b Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

^c Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

^d Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
*E-mail: artemtur442@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 07.05.2026

Принята к публикации 23.07.2026

Исследована применимость недорогого лабораторного источника узкополосного излучения на основе полупроводникового РОС-диода, работающего в режиме самозахвата частоты на внешнем волоконном резонаторе, в прототипе волоконно-оптического распределенного акустического датчика. Сопоставлены характеристики датчика при использовании серийно выпускаемого узкополосного лазера, лабораторного источника в простейшей конфигурации и того же источника в конфигурации с активной стабилизацией. Предложены методы оценки качества регистрируемых данных, основанные на анализе коэффициента корреляции и усреднении рефлектограмм. Разработаны алгоритмы выявления данных с пониженной достоверностью, обусловленной нестабильностью источника излучения, и методы повышения их качества.

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

Определены предельные возможности и области эффективного применения исследуемого источника в системах распределенного акустического зондирования.

Ключевые слова: DAS, РОС-лазер, волоконный датчик, кольцевой волоконный резонатор.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные волоконные датчики широко применяются для мониторинга протяженных объектов: от нефтегазовой инфраструктуры и транспортных систем до сейсмологии и охраны периметров [1–5]. В последние годы интерес смещается в сторону специализированных решений, адаптированных под конкретные задачи [6–11]. Одним из главных сдерживающих факторов масштабного внедрения распределенных акустических датчиков (DAS) остается высокая стоимость компонентов, прежде всего узкополосного когерентного лазера. Перспективным подходом к снижению стоимости является сочетание более доступных лазерных источников с методами постобработки сигнала, позволяющими компенсировать их недостатки вычислительным путем [12, 13].

В качестве такого источника может выступать стандартный полупроводниковый РОС-лазер, работающий в режиме самозахвата частоты на внешнем резонаторе. Известно, что этот режим позволяет на несколько порядков сузить линию генерации обычных телекоммуникационных лазерных диодов [14]. Реализация на высокочастотных волоконных резонаторах, собранных из стандартных компонентов с сохранением поляризации, дает простое и экономичное решение [15–18]. В наших предыдущих работах [19, 20] простейший источник такого типа демонстрировал пассивное сужение линии до 2.4 кГц и обеспечивал обнаружение и локализацию динамических возмущений на расстоянии свыше 9 км, а также восстановление спектра акустических воздействий в диапазоне 350–5600 Гц с отношением сигнал/шум, сопоставимым с системой на коммерческом ультраузкополосном лазере. В дальнейшем было показано, что даже без системы стабилизации недостатки такого источника можно компенсировать специализированными алгоритмами обработки рефлектограмм [21].

Вместе с тем простейшая конфигурация источника сохраняет остаточную нестабильность, проявляющуюся в эпизодических перескоках мод внешнего резонатора, которые приводят к кратковременной деградации качества данных. В настоящей статье мы продолжаем исследование применимости РОС-лазеров в режиме самозахвата частоты и представляем экспериментальные результаты, позволяющие установить, каким образом эти нестабильности проявляются непосредственно в DAS-рефлектограммах. Исследуется влияние скачков мод на регистрируемые картины обратного рассеяния и анализируются признаки, по которым такие искажения могут быть обнаружены и в дальнейшем скомпенсированы.

Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого источника излучения:

2. ЗАДАЮЩИЙ МАСТЕР-ЛАЗЕР

В качестве исследуемого источника излучения в работе использовался рабочий прототип узкополосного лазерного источника, основанного на оптическом сопряжении РОС-лазера с внешним волоконным резонатором. Конфигурация была полностью собрана путем сварки стандартных телекоммуникационных компонентов. Использование компонентов на волокнах с сохранением поляризации (РМ-компоненты) снижает чувствительность системы к температурным, вибрационным и акустическим возмущениям. Самозахват частоты полупроводникового РОС-лазера на моде внешнего высокочастотного кольцевого резонатора обеспечивает узкополосный режим лазерной генерации. Для стабилизации режима самозахвата в схему введена активная оптоэлектронная обратная связь²¹.

Конкретная оптическая схема лазерной конфигурации представлена на рис. 1. Источником излучения служит РОС-лазерный диод LasersCom (LDS-1550-DFB-2.5G-15/50-BFT-2-SMP13-FA-CW-1.0), работающий при температуре 25 °С и генерирующий мощность до 15 мВт на длине волны около 1550 нм. Диод выдает линейно поляризованное излучение вдоль медленной оси выходного волокна. Излучение от лазера через оптический циркулятор поступает в волоконный кольцевой резонатор. Резонатор изготовлен путем сварки концов волоконного ответвителя 99/1 с поворотом осей поляризации волокна на 90° относительно друг друга. Направления распространения сигнала и поляризации на схеме показаны стрелками: синяя стрелка – вдоль медленной оси, красная – вдоль быстрой. Общая длина резонатора составляет около 2 м. Резонатор обеспечивает спектральную фильтрацию поступающего излучения, а поляризатор на выходе из резонатора разделяет поляризации. Одна из них является выходом лазера, а вторая направляется в тракт обратной связи и возвращается в РОС-лазер, формируя высокоселективную оптическую обратную связь. Мощность сигнала обратной связи регулируется переменным оптическим аттенуатором, работающим в диапазоне 0–60 дБ.

Сужение линии генерации РОС-лазера происходит за счет эффекта самозахвата частоты в присутствии оптической обратной связи. Однако воздействие на лазер внешнего шума, в частности тепловых флуктуаций и акустических вибраций, приводят к изменениям собственной частоты кольцевого резонатора. Когда эффект захвата частоты не в состоянии компенсировать наиболее быстрые отклонения частоты, это приводит к скачкам лазерной генерации с одной кольцевой моды на другую и, как следствие, к кратковременным срывам узкополосной генерации.

Для стабилизации работы лазера в режиме захвата частоты волоконная конфигурация снабжена системой активной (оптоэлектронной) обратной связи, компенсирующей смещение резонансной частоты кольцевого резонатора путем изменения фазовой задержки в оптической петле обратной связи. Для этого в петлю был включен перестраиваемый термооптический волоконный фазосдвигатель Phoenix Photonics VPS150-15-PM-2-1. Управление фазосдвигателем осуществлялось недорогим USB-DAQ-контроллером на базе платы Arduino, подключенным к персональному компьютеру и формирующим управляющее напряжение. Сигнал ошибки вырабатывался быстрым фотодетектором LasersCOM PDI-80-P10-2G-K (2 ГГц, 800–1700 нм). Программа микроконтроллера минимизировала этот сигнал, подавая через USB-DAQ соответствующее напряжение на фазосдвигатель.

Рис. 2. Характерные осциллограммы (а) и самогетеродинные спектры

На рис. 2 представлены характерные осциллограммы сигналов от выходов лазерной конфигурации, записанные в режиме лазерной генерации с выключенной системой активной стабилизации. Устойчивые интервалы одночастотной генерации прерываются сравнительно короткими событиями перескока мод. Между скачками амплитуда резонансного излучения, накопленного в кольце, медленно флуктуирует между максимальным и минимальным значением. Эти флуктуации коррелированы с флуктуациями ширины линии генерации лазера, приведенными на рис. 2. В эксперименте они определялись по измерениям самогетеродинного спектра (схема несбалансированного интерферометра Маха–Цендера с фазовым модулятором частотой 80 МГц и линией задержки около 50 км) [22]. Временные промежутки между скачками соответствуют относительно стабильной узкополосной генерации, где ширина линии флуктуирует в пределах примерно от 3 до 8 кГц в соответствии с уровнем выходного сигнала. Во время скачка происходит изменение частоты генерации лазера, что приводит к кратковременному уширению спектра самогетеродина и возникновению нестабильности сигнала. Характерное время возврата системы к стабильному режиму генерации составляет меньше, чем примерно 0.5 с.

Алгоритм работы схемы оптоэлектронной обратной связи состоит в том, чтобы сделать сигнал ошибки, регистрируемый фотодетектором на выходе лазера, как можно меньше, задавая правильную фазовую задержку в оптической петле обратной связи. Работающая оптоэлектронная обратная связь переводит лазер в режим постоянного samozaxvata частоты кольцевого резонатора. Медленные изменения частоты кольцевого резонатора, вызванные лабораторным шумом (в основном температурным), приводят к синхронному изменению частоты РОС-лазера. Любые отклонения частоты РОС-лазера от

резонансной частоты кольцевого резонатора увеличивают выходную мощность лазера, регистрируемую фотодетектором. Таким образом, при работающей системе стабилизации частота РОС-лазера всегда синхронизирована с резонансом кольцевого резонатора, что обеспечивает стабильную обратную связь. Весь процесс перевода системы в стабилизированный режим после подачи управляющего напряжения на фазосдвигатель занимает, как правило, менее секунды. Гауссовская ширина линии генерации лазера при включенной обратной связи регистрируется на уровне 2.5 кГц, в то время как ширина линии по Лоренцу не превышает 100 Гц.

Необходимо отметить, что в ходе экспериментов исследуемый источник намерено не был изолирован от естественных температурных и вибрационных воздействий, которые могли вызывать отдельные скачки мод и последующие нестабильности работы лазерной конфигурации даже при включенной системе стабилизации. Такой подход был выбран сознательно, поскольку дополнительная термическая и вибрационная изоляция неизбежно привела бы к усложнению конструкции лазера и увеличению ее стоимости, что противоречило бы задаче исследования предельно простой и дешевой конфигурации источника. Именно в таком виде он рассматривается здесь как рабочий прототип, предназначенный для изучения влияния лазерных нестабильностей на качество регистрации акустических воздействий распределенным акустическим датчиком. Для наших целей существенно, что при выключенной активной обратной связи тестируемый источник представляет собой простейшую конфигурацию, состоящую только из РОС-лазера и высокодобротного волоконного резонатора, а при включенной – более сложную систему со средствами стабилизации генерации. В обоих режимах большую часть времени лазер работает в узкополосном режиме, однако наличие кратковременных интервалов нестабильной работы требует оценки возможности применения таких источников в качестве задающего генератора в системах распределенных акустических измерений, а также изучения возможности выявления и компенсации таких интервалов средствами последующей обработки данных.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Лабораторная установка волоконно-оптического распределенного акустического мониторинга представлена на рис. 3.

Рис. 3. Лабораторный макет волоконно-оптического распределенного акустического датчика

Конструкция установки предусматривала возможность быстрой и простой замены узкополосного источника излучения. Эффективность применения разработанного

лабораторного лазерного источника в качестве задающего генератора распределенного акустического датчика исследовалась в двух режимах: без активной стабилизации, соответствующей простейшей конфигурации, и с активной стабилизацией, реализованной в более сложной и дорогой конфигурации, включающей цепь активной обратной связи и волоконный фазосдвигатель. Полученные результаты сопоставлялись с характеристиками системы при использовании серийно выпускаемого лазера Connet COSF D-ER-M-1550-10-SMF-FA с шириной линии не более 5 кГц, который рассматривался в качестве эталонного источника. Для каждого из исследованных режимов работы и каждого используемого источника излучения регистрировались наборы экспериментальных данных. Эффективность оценивалась по качеству записанных рефлектограмм и по отношению сигнал/шум при регистрации акустического воздействия.

В целях упрощения конструкции и снижения стоимости волоконно-оптического акустического датчика в экспериментальной установке использовалось прямое детектирование сигнала. Простота такого подхода сопровождается существенным недостатком: главным образом из-за так называемых поляризационных замираний [22] отношение сигнал/шум при регистрации акустического воздействия, локализованного в сравнительно малой области чувствительного элемента, например в пределах нескольких отсчетов данных, может хаотически изменяться более чем на 50%. По этой причине для надежной регистрации сигнала в подобных установках требуется многократный сбор данных с последующим усреднением. Тем не менее это не ограничивает их применение в задачах, где не требуется быстрая реакция на событие, а регистрируемые акустические сигналы существенно не изменяются в течение, по крайней мере, нескольких минут. Количество собираемых и усредняемых данных может быть уменьшено в тех случаях, когда полезный сигнал допускает пространственное усреднение, т. е. когда воздействие не является точечным по сравнению с длиной чувствительного участка волокна, длительностью зондирующего импульса и шагом дискретизации аналого-цифрового преобразователя.

С целью снижения влияния указанного эффекта в настоящем исследовании акустическое воздействие прикладывалось к 200-метровому участку оптического волокна. Волокно плотно укладывалось в виде спирали и закреплялось на виниловой пластинке диаметром 30 см. Пластика с волокном размещалась на металлической полке лабораторной стойки, а на обратной стороне полки крепился вибродинамик. Акустическое воздействие осуществлялось на частоте 2700 Гц. Эта частота была выбрана потому, что, с одной стороны, она уверенно разрешается системой, а с другой – находится вне области низкочастотных помех, создаваемых расположенным поблизости оборудованием.

Для последующей обработки при каждой исследуемой конфигурации установки регистрировалось 200 выборок данных, каждая из которых содержала 762 рефлектограммы, записанные непрерывно. Зондирующие световые импульсы, запускавшиеся в волокно, имели длительность 40 нс и период повторения 10 мкс. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя ЛА-n1usb (Руднев–Шиляев) составляла 500 МГц. Используемая модель АЦП не позволяла записывать сигнал непрерывно в течение более длительного времени. Выходная мощность излучения как исследуемого прототипа лазера, так и коммерческого источника составляла 6 мВт.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В тех случаях, когда в интервал записи данных не попадал перескок моды, все непрерывно зарегистрированные рефлектограммы хорошо совпадали друг с другом при наложении (рис. 4а). Если же в процессе записи происходил перескок моды, то совпадение рефлектограмм заметно ухудшалось (рис. 4б). Для количественного описания этого эффекта использовался коэффициент корреляции Пирсона: в случае положительных значений коэффициента чем ниже его величина, тем меньше сходство между сравниваемыми кривыми.

С целью выявления тех наборов данных, в которых присутствовали перескоки моды, для каждого из 200 пакетов, содержащих по 762 рефлектограммы, рассчитывалась средняя, т. е. для каждой точки вдоль волокна определялось среднее значение сигнала. Затем в скользящем окне длиной 10 отсчетов вычислялся коэффициент корреляции Пирсона между каждыми двумя соседними средними рефлектограммами из последовательности 200 пакетов. После этого полученные коэффициенты корреляции усреднялись по длине рефлектограммы, т. е. в пространственной области.

Рис. 4. 16-й и 17-й пакеты данных при использовании прототипа лазера без стабилизации:

Таким образом, для каждого исследованного случая (коммерческий лазер, лабораторный лазер со стабилизацией и лабораторный лазер без стабилизации) получалось по 199 значений коэффициента корреляции между соседними по времени средними рефлектограммами. Соответствующие зависимости представлены на рис. 5. Видно, что при использовании прототипа лазера без стабилизации перескоки мод, проявляющиеся в данном случае как уменьшение коэффициента корреляции вплоть до нуля, возникают регулярно. Применение схемы активной стабилизации работы лазера позволило существенно уменьшить число перескоков моды вплоть до пяти за время регистрации 200 пакетов данных, т. е. примерно за 3 мин, либо ослабить их влияние на качество выходных данных.

Хорошо видно, что, по сути, приведенные зависимости характеризуют степень сходства данных, зарегистрированных в соседние моменты времени. Поэтому они позволяют установить, что перескок моды произошел между двумя последовательными сеансами записи, но не дают возможности определить, имел ли он место непосредственно внутри отдельного пакета рефлектограмм и каким образом он повлиял на качество регистрации акустического сигнала.

Для оценки влияния типа источника излучения и режима его работы на качество регистрации акустического воздействия каждый из 200 пакетов рефлектограмм обрабатывался по следующей схеме. Сначала данные представлялись в виде таблицы, где ее строки соответствовали отдельным рефлектограммам, а столбцы – временным отсчетам интенсивности обратного рассеяния для фиксированных точек вдоль волокна. Затем для столбцов этой таблицы вычислялось быстрое преобразование Фурье. При необходимости обработанные данные визуализировались в виде трехмерной поверхности в координатах “частота воздействия – расстояние вдоль волокна – амплитуда воздействия” (рис. 6). Далее в области локализации воздействия в координатах “расстояние – частота” определялась средняя величина полезного сигнала, а за пределами этой области – среднее значение шумового фона. После этого рассчитывалось отношение сигнал/шум (SNR). Вычисленные значения SNR для всех пакетов данных приведены на рис. 7.

Рис. 5. Корреляция соседних средних рефлектограмм для 200 пакетов данных

Рис. 6. Зарегистрированное акустическое воздействие на частоте 2700 Гц

Рис. 7. Отношение сигнал/шум для 200 пакетов данных при использовании

Видно, что режим работы лабораторного лазера без стабилизации характеризуется регулярными “выбросами” отношения сигнал/шум в область малых значений. В отличие от этого, при использовании коммерческого лазера, а также лабораторного лазера в режиме стабилизации, столь выраженных провалов SNR не наблюдается. Количественно эти различия подтверждаются анализом статистических характеристик выборки, в частности дисперсии и стандартного отклонения (табл. 1). Как и следовало ожидать, наименьший разброс значений SNR обеспечивается применением коммерческого узкополосного лазера, а наибольший – использованием лабораторного прототипа без стабилизации. Включение системы стабилизации позволяет заметно уменьшить разброс значений SNR, хотя и не дотягивает до уровня, характерного для коммерческого (эталонного) источника излучения.

Таблица 1. Основные критерии разброса значений SNR в экспериментальных данных

Лазер	Дисперсия	Стандартное отклонение	Средняя величина
Connet	0.2237	0.4730	6.4433
Лабораторный прототип со стабилизацией	0.4933	0.7023	6.3777
Лабораторный прототип без стабилизации	1.2290	1.1086	6.1582

При этом среднее значение отношения сигнал/шум существенно не зависит ни от типа используемого источника излучения, ни от режима его работы. Следовательно, в первом приближении телекоммуникационный лазер с внешним резонатором может использоваться для распределенного акустического мониторинга даже без системы стабилизации, если условия применения допускают накопление данных в течение примерно 3 мин с последующим усреднением.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для получения достоверной информации об акустических воздействиях за время, меньшее нескольких минут, целесообразно использовать схемы DAS с когерентным детектированием и извлечением фазы [23]. Однако при работе с лабораторным прототипом лазера без стабилизации критически важной становится задача оценки надежности каждого отдельного пакета рефлектограмм. Сопоставление данных на рис. 5, 7 показывает, что низкая корреляция между соседними пакетами не обязательно означает низкое значение SNR для каждого из них, поэтому необходим анализ внутренней структуры пакета – корреляции отдельных рефлектограмм, как показано на рис. 4.

Рис. 8. Отношение сигнал/шум для 200 пакетов рефлектограмм, записанных при помощи лабораторного лазера без стабилизации.

Анализ пакетов, в которых предположительно был зафиксирован перескок моды (№17, №64 и №164, выделенные на рис. 8), показал, что перескок по-разному влияет на корреляцию рефлектограмм в зависимости от продолжительности и момента возникновения (рис. 9). В большинстве случаев он приводит к снижению средней корреляции и одновременному росту дисперсии и стандартного отклонения коэффициента корреляции (табл. 2), что позволяет использовать эти характеристики в качестве индикаторов снижения достоверности. Численные значения порогов, полученные на ограниченной выборке, отражают особенности конкретной конфигурации установки; в отсутствие формальной статистической валидации их не следует считать

универсальными, однако устойчивая связь между аномалиями корреляционных характеристик и деградацией SNR прослеживается отчетливо.

Рис. 9. Корреляция между соседними рефлектограммами в пакетах данных

Табл. 2. Основные критерии количественной оценки качества данных в пакете

Пакет рефлектограмм, №	Средний коэффициент корреляции по Пирсону	Дисперсия коэффициента корреляции	Стандартное отклонение коэффициента корреляции
16	0.0938	$7.3542 \cdot 10^{-7}$	0.0009
17	0.0699	$9.4990 \cdot 10^{-5}$	0.0097
18	0.0928	$1.0379 \cdot 10^{-6}$	0.0010
63	0.0878	$1.1067 \cdot 10^{-6}$	0.0011
64	0.0750	$4.4185 \cdot 10^{-5}$	0.0066
65	0.0862	$1.4720 \cdot 10^{-6}$	0.0012
163	0.0936	$1.0149 \cdot 10^{-6}$	0.0010
164	0.0906	$1.1873 \cdot 10^{-5}$	0.0034
165	0.0904	$1.4722 \cdot 10^{-6}$	0.0012

Для пакетов, не затронутых перескоком, средний коэффициент корреляции составлял около 0.09; при попадании перескока в интервал записи он снижался до 0.07 и ниже (табл. 2), что позволяет рассматривать значение порядка 0.08 как ориентировочную границу. Еще более чувствительными индикаторами служат дисперсия и стандартное отклонение, возрастающие приблизительно на два порядка. Особого внимания заслуживает пакет №163 (рис. 9в), где перескок произошел в течение времени записи одной рефлектограммы. В этом случае рефлектограммы, записанные до перескока, практически не коррелируют с рефлектограммами после него, что позволяет разделить пакет на две независимо обрабатываемые части. Как видно на рис. 10, такая процедура повышает SNR более чем на 190% по сравнению с обработкой пакета как единого целого. Однако если скачок моды пришелся на середину отдельной рефлектограммы, разделение невозможно и такой пакет подлежит отбраковке.

Рис. 10. Вид записанного акустического воздействия на частоте 2700 Гц

Таким образом, даже при использовании нестабильного задающего лазера качество данных может быть количественно оценено, а в ряде случаев искажения, вызванные перескоком моды, частично компенсируются постобработкой. Это подтверждает перспективность сочетания недорогого лазерного источника с алгоритмами анализа и отбора данных для задач, где допустимо накопление сигнала в течение нескольких минут. Дальнейшие исследования должны включать формальную статистическую валидацию предложенных критериев на расширенной выборке и разработку адаптивных порогов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены качественные и количественные данные, характеризующие эффективность применения лабораторного узкополосного лазера в прототипе волоконно-оптического распределенного акустического датчика. Исследуемый источник мог использоваться как с системой стабилизации параметров выходного излучения, так и без нее, и его работа была проанализирована в обоих режимах. Параметры функционирования установки и характеристики собираемых данных были сопоставлены с результатами, полученными при использовании серийно выпускаемого узкополосного лазера.

Показано, что среднее отношение сигнал/шум при времени накопления данных порядка 3-4 мин для лабораторного узкополосного источника без стабилизации не отличается существенно от соответствующего значения для коммерческого образца. Вместе с тем при однократном измерении без усреднения вероятность получения данных с низкой достоверностью максимальна именно для лабораторного узкополосного лазера без стабилизации, поскольку в этом случае наблюдается наибольший разброс значений отношения сигнал/шум. Использование системы стабилизации позволяет существенно уменьшить этот разброс, хотя пока не приводит его к уровню, характерному для коммерческого источника. Такое поведение обусловлено особенностями конструкции прототипа лазера с внешним волоконным резонатором, для которой характерны спонтанные и индуцированные внешними воздействиями переключения мод.

В работе предложена методика выявления таких переключений, основанная на усреднении данных и вычислении коэффициента корреляции Пирсона в скользящем окне. Данный подход позволяет идентифицировать переключения мод, происходящие как между последовательными записями пакетов данных, так и непосредственно в процессе записи конкретного набора рефлектограмм. На этой основе предложен алгоритм оценки надежности каждого пакета данных в отдельности, опирающийся на анализ средней корреляции рефлектограмм и статистического разброса коэффициента корреляции. Показано также, что в ряде случаев данные, искаженные переключением моды, могут быть частично сохранены, и качество их может быть существенно повышено за счет дополнительной обработки.

Полученные результаты показывают, что применение лабораторного узкополосного лазера возможно даже в системах волоконно-оптического распределенного акустического мониторинга, предъявляющих сравнительно высокие требования к быстродействию, при условии использования методов контроля качества и последующей обработки данных. Кроме того, на основании проведенных экспериментов можно заключить, что такой прототип может использоваться в распределенных акустических датчиках и без системы стабилизации в тех приложениях, где допустимы накопление и

усреднение данных в течение нескольких минут. К числу таких приложений могут относиться, например, задачи раннего выявления заражения деревьев личинками вредителей [24], а также контроль качества деталей и сборок на основе распределенного мониторинга их акустической эмиссии [25]. В подобных задачах применение источника излучения предлагаемой конструкции может оказаться особенно целесообразным благодаря его существенно меньшей стоимости по сравнению с традиционными серийно выпускаемыми решениями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №23-79-30017 (разд. 1, 2), грант №25-72-10174 (разд. 4, 6). Разделы 3, 5 выполнены в рамках государственного задания № 122031100058-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудин А.С., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Никитин С.П., Наний О.Е., Трещиков В.Н. ПТЭ. 2023. № 5. С. 153.
<https://doi.org/10.31857/S0032816223050191>
2. Lim T.K., Fujimoto A., Kobayashi T., Tcherkashnev S., Mondanos M. Distrib. Acoust. Sens. Borehole Geophys. 2024. P. 239. <https://doi.org/10.1002/9781394179275.ch12>
3. Gritsenko T.V., Chesnokov G.Yu., Koshelev K.I., Khan R.I., Stepanov K.V., Valba O.V., Chernutsky A.O., Svelto C., Zhirnov A.A., Pnev A.B., Karasik V.E. IEEE Int. Conf. Metrol. eXtended Real. Artif. Intell. Neural Eng. (MetroXRINE). 2023. P. 383.
<https://doi.org/10.1109/MetroXRINE58569.2023.10405703>
4. Zhan Z. Seismol. Res. Lett. 2019. V. 91. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.1785/0220190112>
5. Zhang G., Song Z., Osotuyi A.G., Lin R., Chi B. Front. Earth Sci. 2022. V. 10. Art. 990837.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.990837>
6. Chen Z., Zhang C.-C., Shi B., Xie T., Wei G., Guo J.-Y. Water Res. 2024. V. 250. Art. 121069.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121069>
7. Bouffaut L., Taweesintananon K., Kriesell H.J., Rørstadbotnen R.A., Potter J.R., Landrø M., Johansen S.E., Brenne J.K., Haukanes A., Schjelderup O., Storvik F. Front. Mar. Sci. 2022. V. 9. Art. 901348. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.901348>
8. Choban T.V., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Sazonkin S.G., Tikhomirov S.V., Pnev A.B., Novikov A.O., Yagodnikov D.A., Svelto C. Int. Conf. Laser Opt. (ICLO). 2022. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839951>

9. Turov A.T., Konstantinov Yu.A., Totmina E.E., Votnova A.G., Masich G.F., Korobko D.A., Fotiadi A.A. *Sensors*. 2025. V. 25. Art. 2101. <https://doi.org/10.3390/s25072101>
10. Glaser D.R., Costley R.D., Hathaway K.K., Boitnott G.L., Weale J. *Symp. Appl. Geophys. Eng. Environ. Probl. (SAGEEP 2021)*. 2021. P. 262.
11. Ashry I., Mao Y., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Al-Bagshi M., Al-Brahim S., Ng T.K., Ooi B.S. *Sci. Rep.* 2020. V. 10. Art. 3155. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60171-7>
12. Olcer I., Oncu A. *Sensors*. 2017. V. 17. Art. 1288. <https://doi.org/10.3390/s17061288>
13. Turov A.T., Konstantinov Yu.A., Barkov F.L., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A. *Algorithms*. 2023. V. 16. Art. 217. <https://doi.org/10.3390/a16050217>
14. Galiev R.R., Pavlov N.G., Kondratiev N.M., Koptyaev S., Lobanov V.E., Voloshin A.S., Gorodnitskiy A.S., Gorodetsky M.L. *Opt. Express*. 2018. V. 26. № 23. P. 30509. <https://doi.org/10.1364/OE.26.030509>
15. Geng J., Yang L., Liang J., Liu S., Zhang Y. *Opt. Commun.* 2022. V. 505. Art. 127531. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127531>
16. Luo J., Zhang X., Yang S., Blanc W., Yan Z., Yu X. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2023.
17. Ousaid S.M., Bourcier G., Fernandez A., Llopis O., Lumeau J., Moreau A., Bunel T., Conforti M., Mussot A., Crozatier V., Balac S. *Opt. Lett.* 2024. V. 49. № 8. P. 1933. <https://doi.org/10.1364/OL.514778>
18. Zhang Y., Jiang Z., Wang Y., Zhang Y., Gao C. *Opt. Express*. 2025. V. 33. № 18. P. 38886.
19. Spirin V.V., Kellerman J., Swart P.L., Fotiadi A.A. *Opt. Express*. 2006. V. 14. № 18. P. 8328. <https://doi.org/10.1364/OE.14.008328>
20. Lopez-Mercado C.A., Spirin V.V., Bueno Escobedo J.L., Jason J., Fotiadi A.A. *Rev. Mex. Fís.* 2020. V. 66. № 5. P. 637. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.66.637>
21. Panyayev I.S., Itrin P.A., Korobko D.A., Fotiadi A.A. *J. Lightwave Technol.* 2024. V. 42. № 8. P. 2928. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3348994>
22. Chen M., Meng Z., Wang J., Chen W. *Opt. Express*. 2015. V. 23. № 5. P. 6803. <https://doi.org/10.1364/OE.23.006803>
23. Masoudi A., Belal M., Newson T.P. *Meas. Sci. Technol.* 2013. V. 24. № 8. Art. 085204. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/8/085204>
24. Ashry I., Wang B., Mao Y., Sait M., Guo Y., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Ng T.K., Ooi B.S. *Sensors*. 2022. V. 22. Art. 6491. <https://doi.org/10.3390/s22176491>
25. Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Sazonkin S.G., Pnev A.B., Bobrov A.N., Yagodnikov D.A. *Sensors*. 2022. V. 22. Art. 4781. <https://doi.org/10.3390/s22134781>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схематическое изображение исследуемого источника излучения: РОС – лазерный диод с распределенной обратной связью, ЦИР – циркулятор, КР – кольцевой волоконный резонатор, ОИ – оптический изолятор, ПС – поляризационный светоделитель, ПФ – переменный фазосдвигатель, ФД – фотодетектор, Усил – усилитель электрического сигнала, USBDAQ – плата управления активной стабилизацией. Элементы, обведенные черной рамкой, помещены в виброизолирующий бокс
- Рис. 2.** Характерные осциллограммы (**а**) и самогетеродинные спектры (**б, в**) излучения с выходов лазерной конфигурации, записанные в режиме генерации с выключенной системой активной стабилизации
- Рис. 3.** Лабораторный макет волоконно-оптического распределенного акустического датчика
- Рис. 4.** 16-й и 17-й пакеты данных при использовании прототипа лазера без стабилизации: **а** – все рефлектограммы, полученные в 16-м пакете данных установкой, перескоки моды не были зарегистрированы; **б** – все рефлектограммы, полученные в 17-м пакете данных, во время записи произошел перескок моды
- Рис. 5.** Корреляция соседних средних рефлектограмм для 200 пакетов данных при использовании различных источников излучения
- Рис. 6.** Зарегистрированное акустическое воздействие на частоте 2700 Гц при использовании прототипа лазера без стабилизации: **а** – пакет рефлектограмм №16; **б** – пакет рефлектограмм №17, во время записи произошел перескок моды
- Рис. 7.** Отношение сигнал/шум для 200 пакетов данных при использовании различных источников излучения
- Рис. 8.** Отношение сигнал/шум для 200 пакетов рефлектограмм, записанных при помощи лабораторного лазера без стабилизации. Цифрами обозначены номера пакетов с наименьшим SNR, подлежащих дальнейшему анализу
- Рис. 9.** Корреляция между соседними рефлектограммами в пакетах данных №№16–18 (**а**), №№63–65 (**б**), №№163–165 (**в**)
- Рис. 10.** Вид записанного акустического воздействия на частоте 2700 Гц с перескоком моды резонатора источника излучения: **а** – до обработки, **б** – после обработки с использованием рефлектограмм №№1–363, **в** – после обработки с использованием рефлектограмм №№364–762

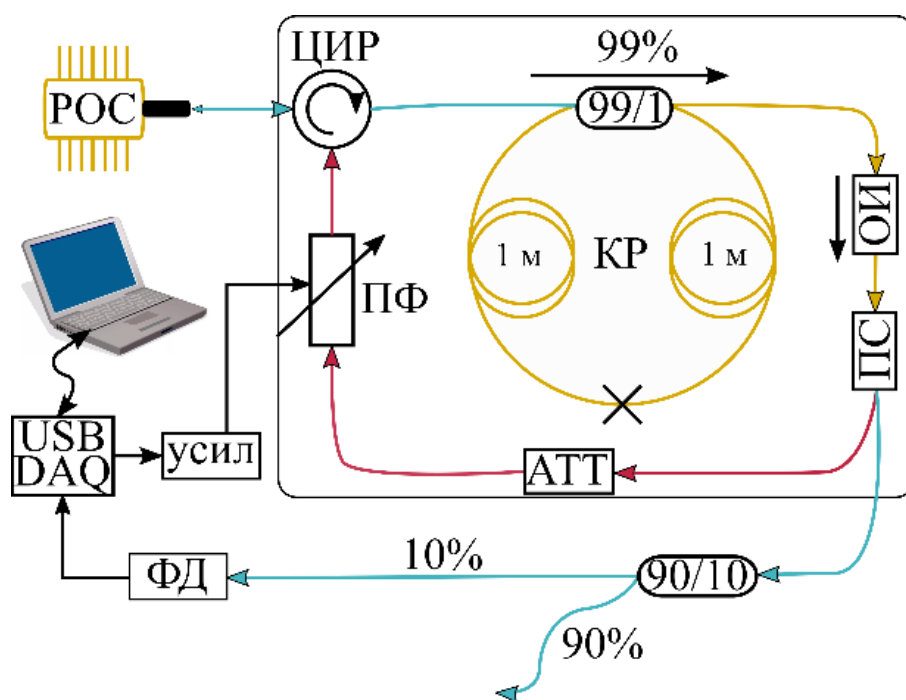


Рис. 1.

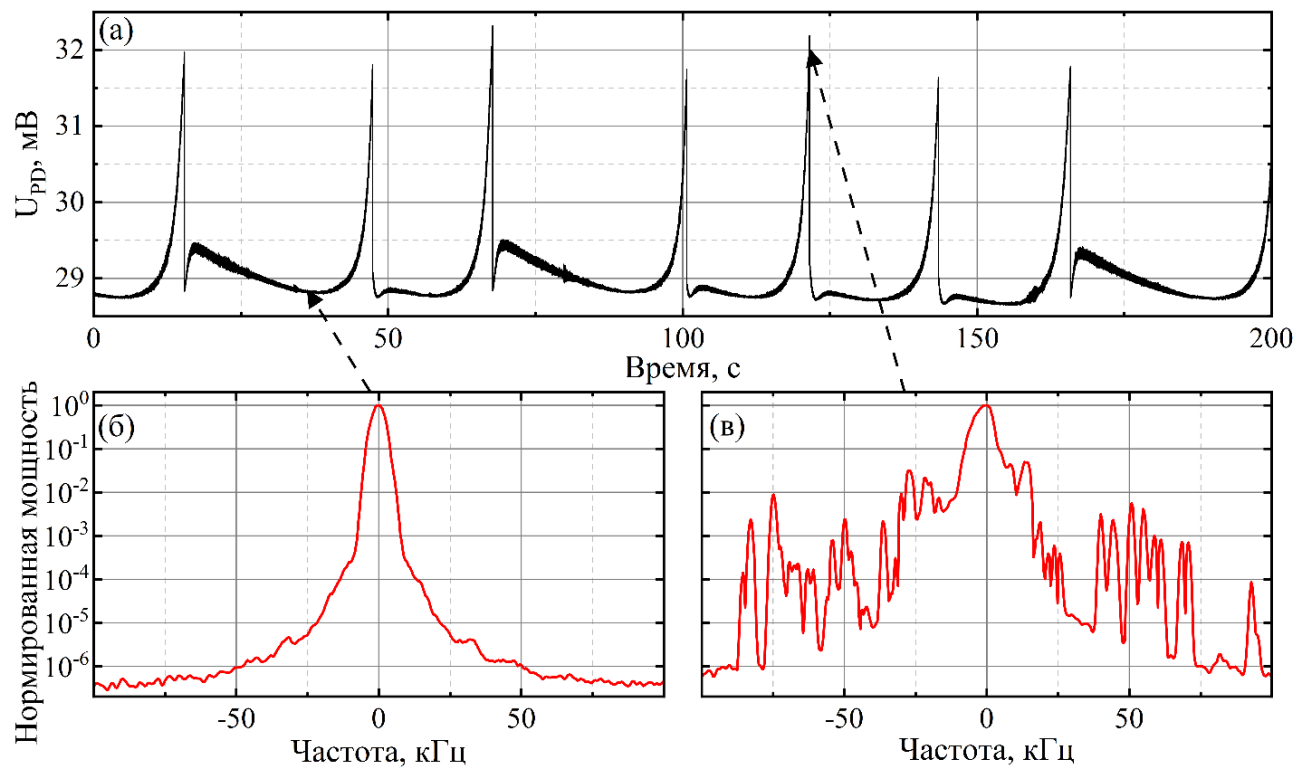


Рис. 2.

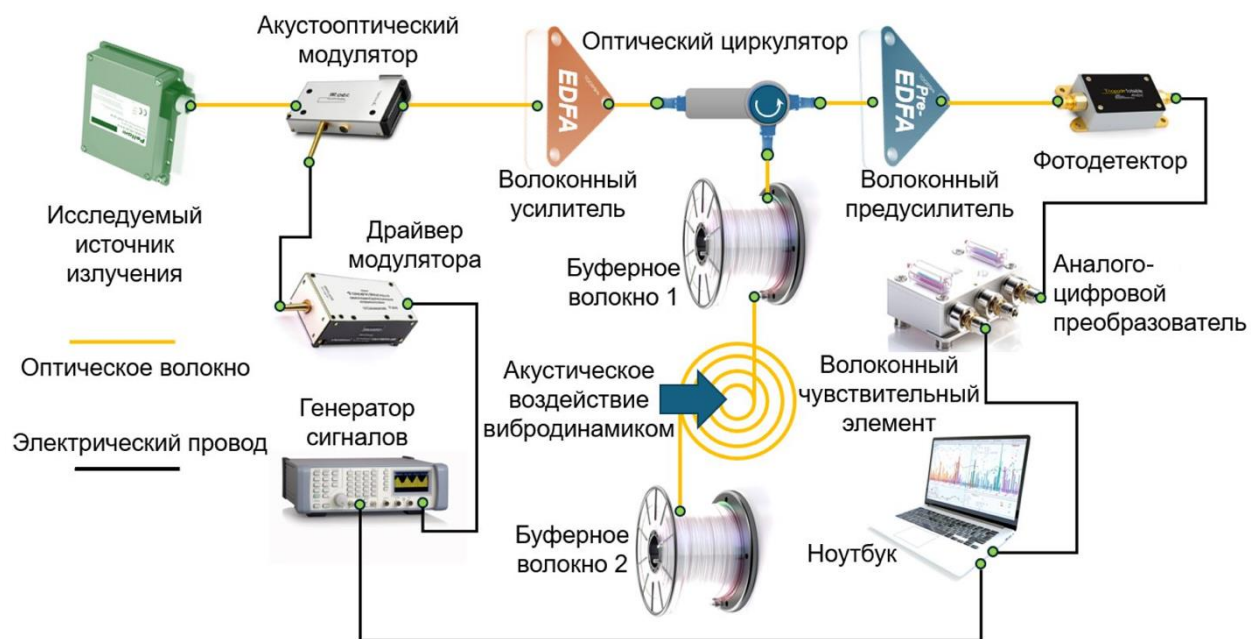


Рис. 3.

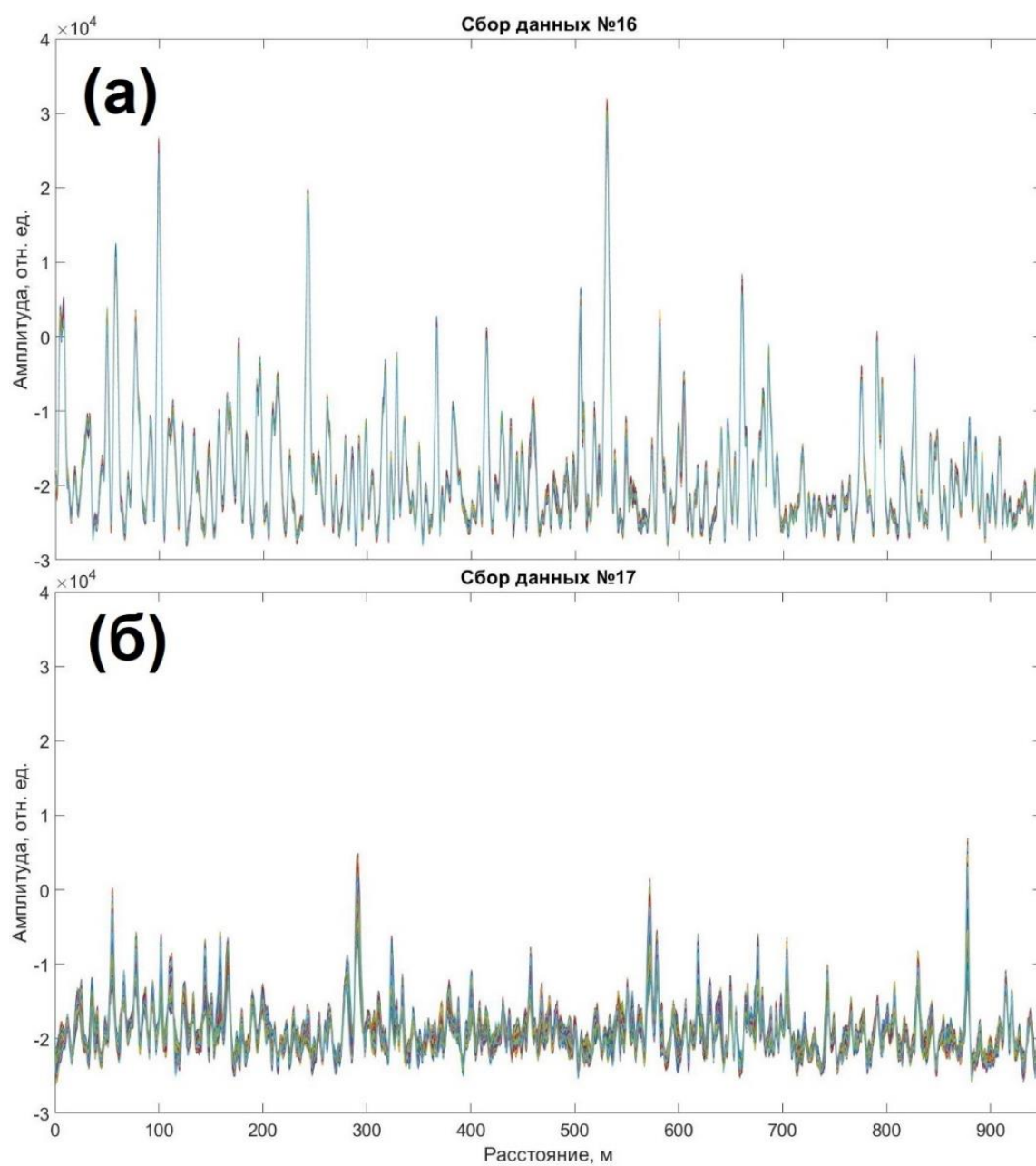


Рис. 4.

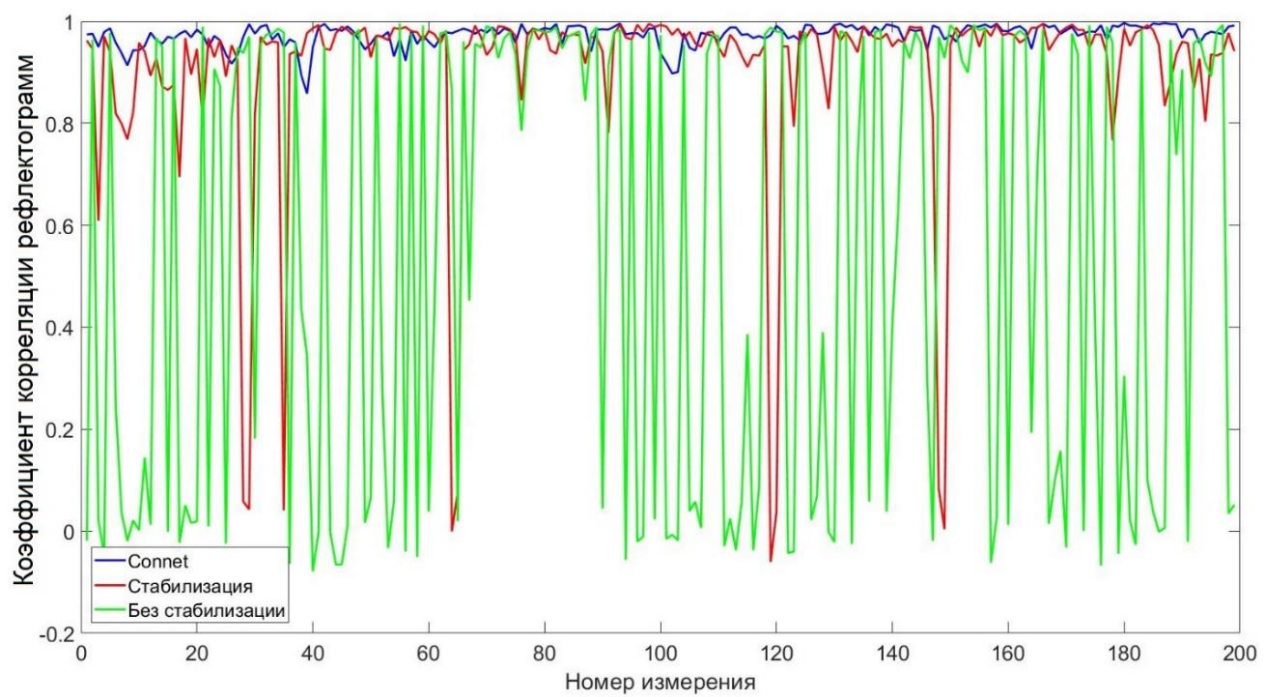
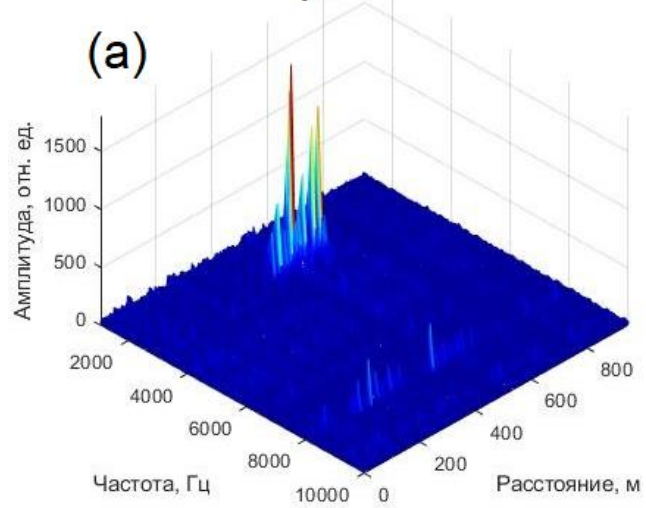


Рис. 5.

Измерение №16



Измерение №17

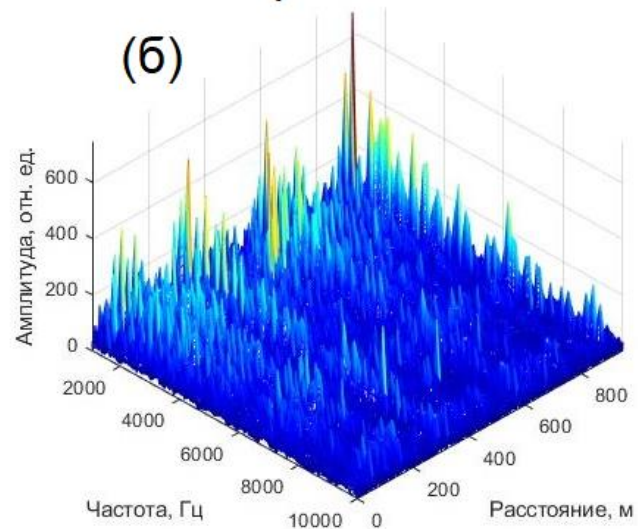


Рис. 6.

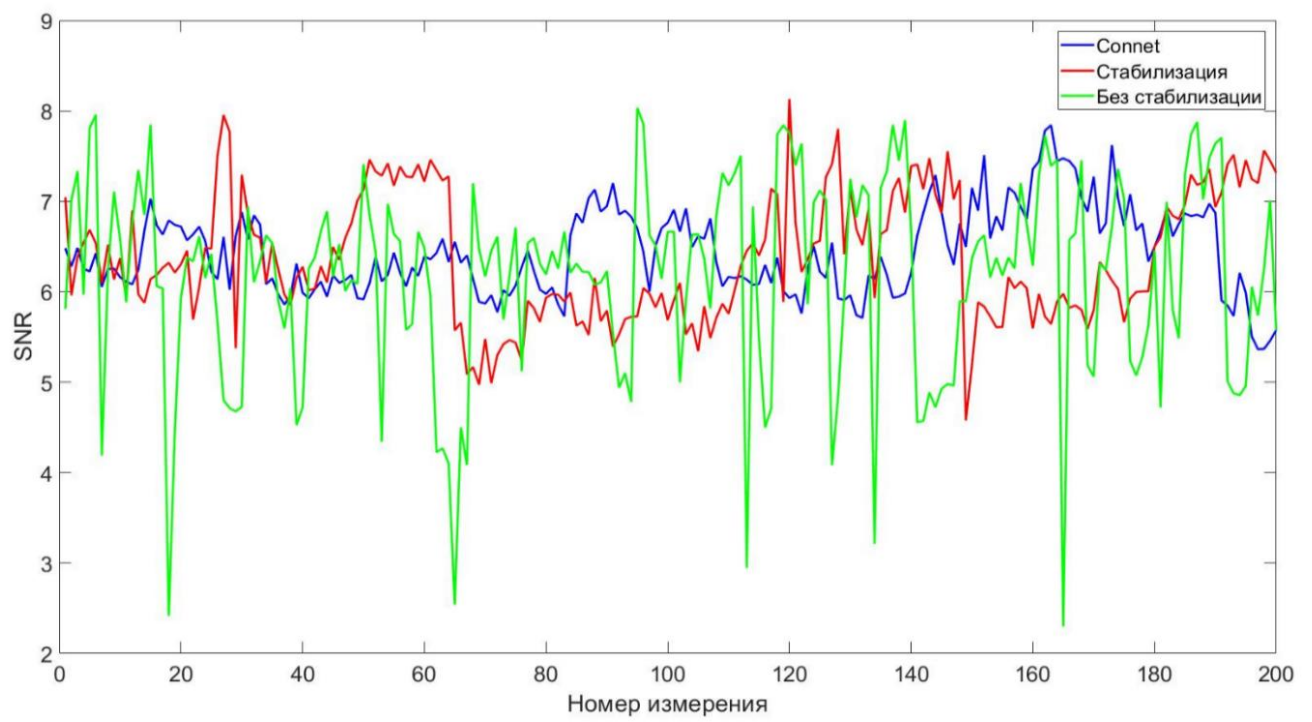


Рис. 7.

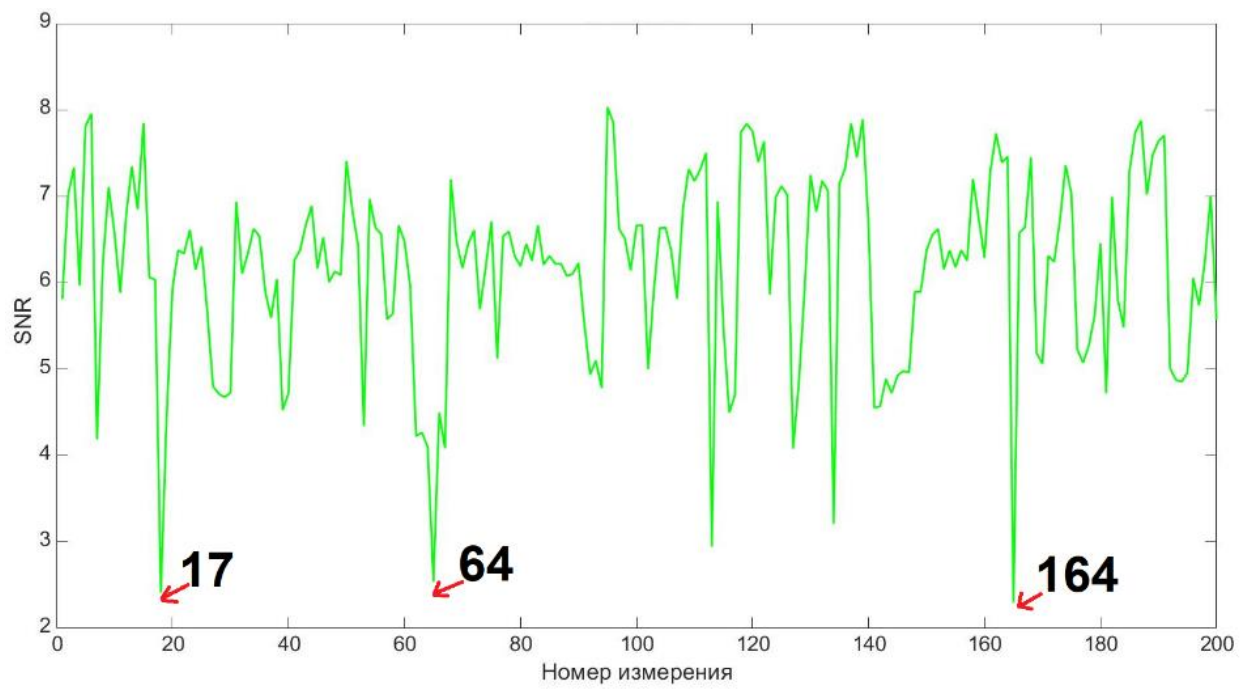


Рис. 8.

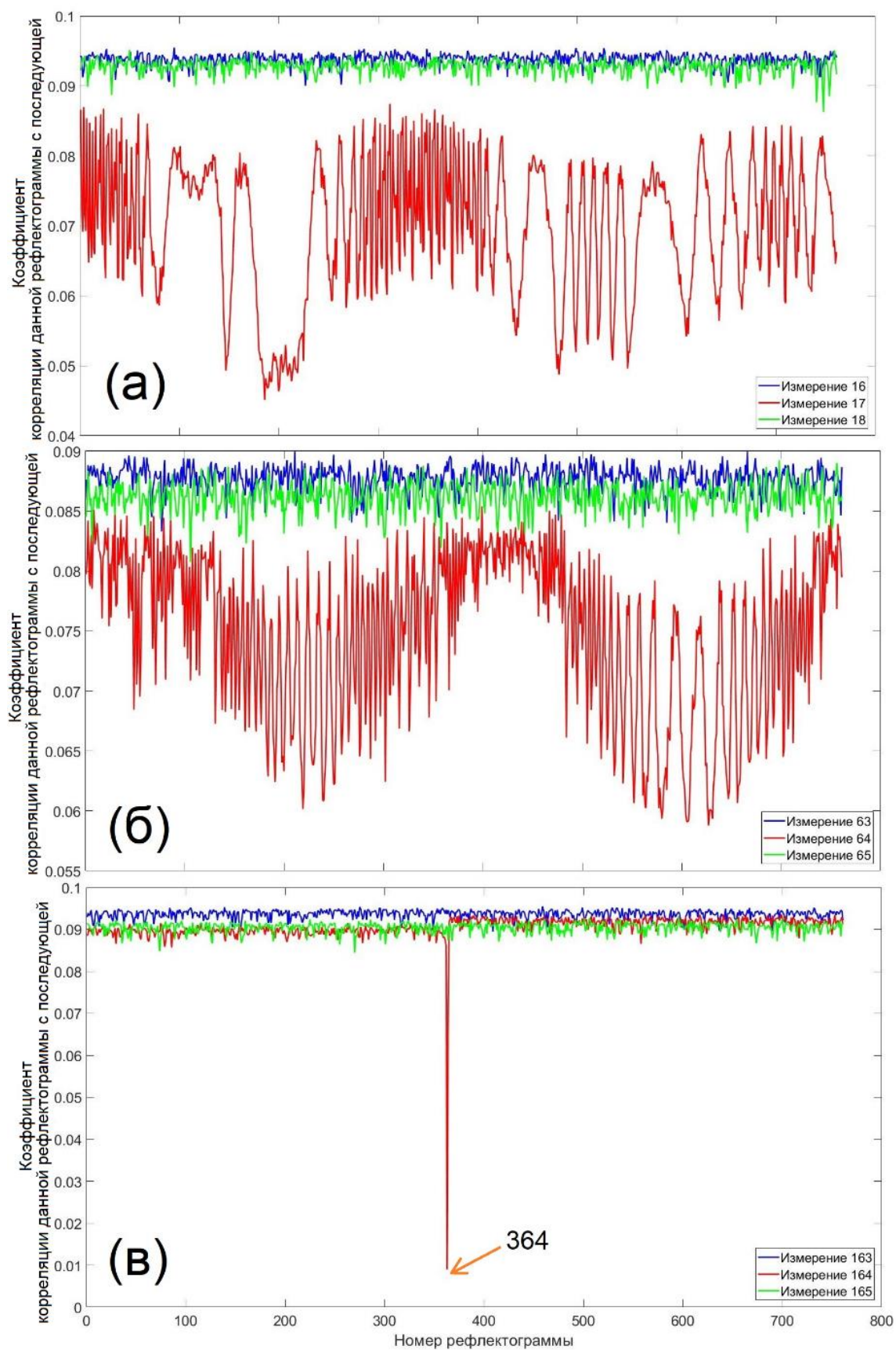


Рис. 9.

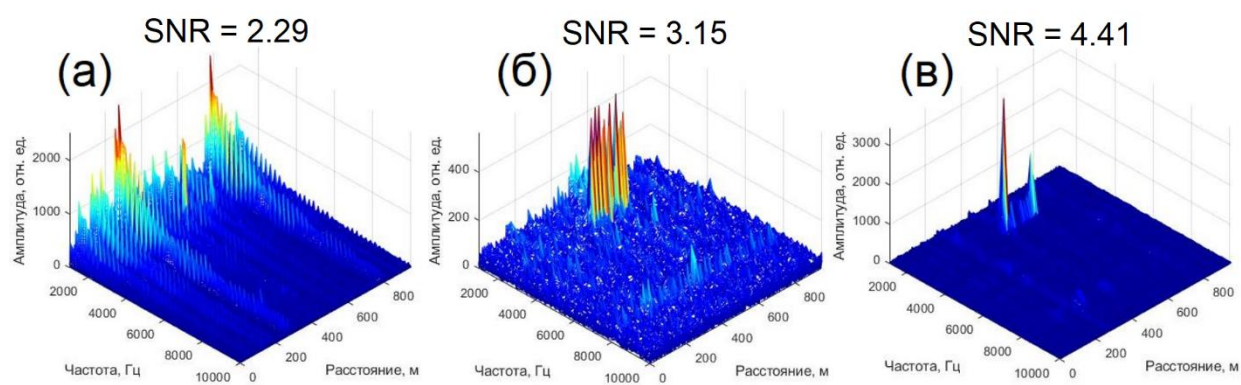


Рис. 10.