

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 681.787.22

**ПРИМЕНЕНИЕ SDR-ПРИЕМНИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ
ОПТОВОЛОКОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА**

©2026. М. П. Калаев, А. М. Телегин*

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва
Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34*

**e-mail: talex85@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.01. 2026 г.

После доработки 16.02.2026 г.

Принята к публикации 19 .02.2026 г.

Экспериментально продемонстрирована новая методика построения измерительной системы для опроса оптоволоконных интерферометрических датчиков, основанная на применении программно-определяемого радиоприемника (SDR, аналог PlutoSDR). В качестве исследуемого объекта выступает интерферометр Маха–Цендера, подверженный акустическому воздействию от маломощной динамической головки и шагового двигателя. Ключевая особенность предложенного подхода заключается в использовании одного SDR-устройства в двух функциях: в качестве генератора высокочастотного (ВЧ) модулирующего сигнала для лазерного источника и в качестве приемника-демодулятора сигнала с фотодетектора интерферометра. Экспериментально показана принципиальная работоспособность метода регистрации акустических колебаний путем приема и обработки ВЧ-сигнала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптоволоконные датчики широко применяются на практике. Они отличаются устойчивостью к электромагнитным помехам, а также возможностью создания распределенных и мультиплексированных сенсорных сетей [1–4]. Оптоволоконные интерферометрические датчики (ОИД), в частности интерферометры Маха–Цендера, нашли широкое применение в задачах высокоточной регистрации физических величин: акустических колебаний, вибраций, температуры и деформаций [5–9].

Однако традиционные схемы регистрации сигналов от ОИД, основанные на прямом детектировании низкочастотного (НЧ) сигнала от фотоприемника, сталкиваются с фундаментальной проблемой – высоким уровнем низкочастотного шума (шум $1/f$). Данный шум генерируется как самим лазерным источником, так и усилительной электроникой, что

существенно ограничивает динамический диапазон и пороговую чувствительность системы, особенно при регистрации сигналов в области частот ниже 10–100 Гц.

Целями данной работы являются разработка и исследование метода, позволяющего перенести информационный сигнал из шумной низкочастотной области в менее зашумленную область высоких частот (ВЧ) с последующей его регистрацией и обработкой с помощью SDR-платформы (Software-Defined Radio, программно-конфигурируемое радио). Такой подход позволяет эффективно подавить низкочастотные шумы и задействовать мощный арсенал алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС), доступный в SDR [10–12].

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Оптоволоконный интерферометр Маха–Цендера

Интерферометр Маха–Цендера состоит из лазера, первого оптического сплиттера, разделяющего свет на два плеча (измерительного и опорного), и второго оптического сплиттера, объединяющего световые потоки для формирования интерференционной картины (рис. 1, 2). Акустическое воздействие на измерительное плечо вызывает изменение его длины и, соответственно, фазовый сдвиг ($\Delta\varphi$) между световыми волнами. Этот фазовый сдвиг преобразуется в изменение интенсивности на выходе интерферометра согласно выражению

$$I = I_0 [1 + V \cos(\Delta\varphi)],$$

где I_0 – средняя интенсивность, V – видность интерференционной картины.

Рис. 1. Структурная схема измерительной системы.

Рис. 2. Система регистрации.

Система регистрации работает следующим образом. PlutoSDR 1 на выходе T_X непрерывно генерирует ВЧ-сигнал с несущей частотой 100 МГц и мощностью 20 дБм. Сигнал подается на вход ВЧ-усилителя 2, реализованного на предусилителе SBB0589 (на основе InGaP) и усилителе SHF0589 (AsGa). Максимальная выходная мощность усилителя составляет 34 дБм, что при необходимости позволяет применить более мощный лазер без изменения схемы. Лазер 3 подключен к выходу источника питания 4, обеспечивающего постоянное смещение лазера в середину линейного участка его ватт-амперной характеристики (для используемого лазера это соответствует току 35 мА). Катод лазера подключен к отрицательному полюсу источника питания через резистор величиной 50 Ом, при этом резистор является также нагрузкой для ВЧ-генератора. Оптическое излучение лазера через оптоволоконно 5 поступает на оптоволоконный интерферометр Маха–Цендера, образованный оптическими сплиттерами 6 и 10, а также волоконно-оптическими линиями

связи (ВОЛС) 7 и 8, формирующими опорный и измерительный каналы. Измерительное волокно 8 приклеено к контролируемому объекту (электродвигатель, пьезоизлучатель или другой источник акустических колебаний).

В качестве приемника излучения использован лавинный фотодиод (APD) марки BAPD-50P05X-FA с волоконным входом. Быстродействие фотодиода составляет порядка 2 ГГц, рабочий диапазон частот равен 1000–1680 нм, чувствительность 10 А/Вт, коэффициент лавинного умножения не менее 10.

В качестве источника излучения используется полупроводниковый DFB-лазер (с распределенной обратной связью) с оптоволоконным выходом (LSDLD155-4-S-0-2-SMFA). Данный лазер имеет высокое быстродействие и может применяться в ВОЛС с частотой передачи данных до 1.25 Гб/с. Указанная характеристика позволяет использовать его в радиочастотном диапазоне (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики лазера LSDLD155-4-S-0-2-SMFA

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Длина волны, нм | 1550±20 |
| Минимальный ток накачки, мА | 10 |
| Рабочий ток накачки, мА | 35 |
| Предельный ток накачки, мА | 40 |
| Напряжение, В | 1.2 |
| Номинальная выходная мощность, мВт | 2 |
| Ширина спектра, нм | 0.3 |
| Температурный коэффициент длины волны, нм/°С | 0.1 |
| Время нарастания/спада фронта, нс | 0.3 |

При модуляции тока накачки лазера наблюдаются два процесса.

1. Тепловой нагрев *p-n*-перехода, вызванный увеличением тока. Данный эффект проявляется на низких частотах модуляции (10 кГц и ниже). На более высоких частотах этот эффект ослабляется из-за собственной теплоемкости *p-n*-перехода.

2. Эффект плазменной дисперсии, вызванный изменением концентрации носителей заряда. Он проявляется при высоких частотах модуляции (более 1 МГц) [13].

Теоретически эти механизмы могут приводить к возникновению сопутствующей частотной модуляции на выходе лазера, имеющей негативное влияние на работу интерферометра. Для оценки указанного явления проведены дополнительные исследования с использованием оптоволоконного спектрометра I-MON 512 USB. На рис. 3 приведена зависимость смещения длины волны от постоянного тока накачки. Определено, что коэффициент перестройки лазера по току составляет 0.028 нм/мА. Для среднего тока накачки, равного 30 мА, измерен оптический спектр лазера с использованием модуляции тока

накачки 3 мА с частотой 100 МГц (рис. 4). При имеющейся глубине модуляции и чувствительности спектрометра изменение спектра лазера не выявлено, таким образом сопутствующую оптическую частотную модуляцию можно считать несущественной.

Рис. 3. Зависимость длина волны лазера от тока накачки. Пунктиром обозначена линейная аппроксимация.

Рис. 4. Спектр лазера с модуляцией.

Разрешающая способность спектрометра не позволила выявить смещение, либо расширение спектра при включении модуляции, таким образом, при малых значениях коэффициента M модуляции ($M=0.1$ в данном эксперименте) сопутствующую частотную модуляцию оптического сигнала на выходе лазера можно считать несущественной.

Предлагаемая методика регистрации заключается в следующем.

PlutoSDR на выходе T_X генерирует сигнал с частотой 100 МГц, который подается через внешний усилитель на схему модуляции тока накачки лазера. Лазерное излучение поступает на вход интерферометра Маха–Цендера, где модулируется по амплитуде внешним акустическим воздействием, таким образом, происходит перенос низкочастотного колебания в высокочастотную область. С выхода интерферометра оптический сигнал поступает на вход фотодетектора, подключенного к входу R_X PlutoSDR, который выполняет роль высокочувствительного ВЧ-приемника с последующей цифровой обработкой.

Перенос спектра в ВЧ-область дает несколько преимуществ.

1. Подавление $1/f$ -шума: электронные компоненты (усилители, АЦП) и сам лазер имеют спектр шума, убывающий с ростом частоты. Работа в ВЧ-диапазоне (единицы–десятки МГц) позволяет избежать наиболее шумной области спектра.

2. Упрощение аппаратной части: отпадает необходимость в сложных низкошумящих НЧ-усилителях и фильтрах.

3. Гибкость обработки: в PlutoSDR можно программировать различные алгоритмы демодуляции (амплитудную, фазовую, квадратурную), легко менять полосу пропускания и несущую частоту.

После переноса в ВЧ-область спектр сигнала представляет собой несущую частоту f_c (100 МГц) с двумя боковыми полосами, вызванными акустическим воздействием на оптоволокно.

Если акустическое воздействие имеет частоту f_m в области от 1 до 20 Гц, то выделить столь близко расположенные к несущей частоте спектральные компоненты традиционными методами затруднительно из-за конечной ширины линии лазера и фазового шума генератора PlutoSDR, который "размывает" несущую частоту. Детектирование акустического воздействия

с помощью амплитудного детектора будет неэффективно, так как низкочастотная информация будет "загнана" обратно в шумовую область. В этом случае удобно использовать квадратурное (I/Q) демодулирование.

Алгоритм измерения выглядит следующим образом:

1. Гетеродинное преобразование. В цифровом тракте PlutoSDR входной сигнал $S(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$ умножается на опорные сигналы $\cos(2\pi f_c t)$ и $\sin(2\pi f_c t)$.

2. Выделение I -компоненты и Q -компоненты.

I -компонента: $I(t) = S(t) \cos(2\pi f_c t) = (A(t)/2) \cos(\varphi(t)) + \text{ВЧ-компонента}$,

Q -компонента: $Q(t) = S(t) \sin(2\pi f_c t) = (A(t)/2) \sin(\varphi(t)) + \text{ВЧ-компонента}$.

3. Фильтрация. После умножения сигнал пропускается через цифровой фильтр низких частот (ФНЧ), который подавляет ВЧ-компоненты (на удвоенной несущей частоте) и оставляет только низкочастотные компоненты $I(t)$ и $Q(t)$.

3. Восстановление фазового сигнала: фазовая модуляция $\varphi(t)$, несущая информацию об акустическом воздействии, восстанавливается из квадратурных компонент:

$$\varphi(t) = \arctg(Q(t)/I(t)).$$

Этот метод позволяет извлечь фазовую информацию, которая изначально была "спрятана" в боковых полосах, расположенных вблизи несущей частоты (разница всего 1 Гц). Поскольку информация содержится в фазе, а не в амплитуде сигнала, проблема низкочастотного шума решается при последующей обработке.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки динамического диапазона системы проведено измерение радиочастотного спектра на выходе фотоприемника с помощью PlutoSDR в диапазоне частот 80–420 МГц без акустического воздействия на измерительное плечо интерферометра. В первом случае использована глубина амплитудной модуляции лазера $M=0.1$ (рис. 5а). Динамический диапазон системы, рассчитанный по отношению сигнал/шум для несущей частоты 100 МГц, составил 30 дБ. Несмотря на относительно малую глубину модуляции, нелинейная ВАХ лазера приводит к появлению в радиочастотном спектре высших гармоник (2, 3, 4 на рис. 5а). Далее аналогичные измерения были выполнены для глубины амплитудной модуляции лазера $M=0.02$ (рис. 5б). Уменьшение глубины модуляции пропорционально сокращает уровень полезного сигнала на входе PlutoSDR и, как следствие, отношение сигнал/шум, однако также оно приводит к уменьшению гармонических искажений (высшие гармоники на графике не видны).

Можно отметить, что существующие на данный момент профессиональные системы [14, 15] имеют более высокие метрологические характеристики, однако они проигрывают в стоимости и не имеют такой гибкости обработки данных, которая есть у SDR-систем.

Рис. 5. Радиочастотный спектр на выходе фотоприемника при глубине модуляции лазера $M=0.1$ (а) ...

Верхняя граница измеряемого сигнала ограничена линейностью фотоприемника и глубиной модуляции лазера. При используемой глубине модуляции около 10% и наблюдаемом уровне шума динамический диапазон системы в текущей реализации составил приблизительно 30 дБ.

Для работы системы измерения была написана программа на языке Python, блок-схема алгоритма программы обработки сигнала PlutoSDR представлена ниже.

1. Инициализация системы:

- настройка параметров PlutoSDR, т. е. частоты дискретизации (1 МГц), полосы пропускания и несущей частоты (100 МГц);
- конфигурация усиления передатчика (–20 дБ) и приемника (30 дБ);
- установка размера буфера приема (8192 отсчетов).

2. Формирование сигнала:

- формирование немодулированной несущей частоты для работы с акустическим воздействием;
- циклическая передача сигнала через T_X -выход PlutoSDR.

3. Обработка принятого сигнала:

- децимация с коэффициентом 8 для снижения частоты дискретизации до 125 кГц;
- синхронная квадратурная демодуляция: генерация синфазного (I) и квадратурного (Q) опорных сигналов, умножение принятого сигнала на опорные колебания, фильтрация I - и Q -компонент фильтром Баттерворта четвертого порядка, выделение низкочастотной составляющей, соответствующей акустическому воздействию, применение фильтра Баттерворта шестого порядка с частотой среза 20 кГц.

4. Спектральный анализ:

- расчет спектра радиочастотного сигнала с применением окна Ханна;
- анализ спектра демодулированного акустического сигнала;
- автоматическое обнаружение доминирующих частот в диапазоне 1–20000 Гц.

5. Визуализация и управление:

- отображение спектра радиочастотного сигнала в линейном масштабе;
- создание временных графиков исходного и отфильтрованного акустического сигналов;
- получение спектральных характеристик акустических колебаний,

– интерактивные элементы управления – пауза, масштабирование, переключение отображения сырых данных.

Исследование воздействия тонального сигнала (акустического воздействия) на оптоволоконно (измерительное плечо интерферометра Маха–Цендера) происходило с использованием динамика. Мощность, подводимая к динамической головке, равна 2 мВт, частота 500 Гц (рис. 6).

Рис. 6. Регистрация акустических колебаний с использованием динамика

На рис. 7 показаны сигнал от PlutoSDR (спектр), демодулированный акустический сигнал и его спектр.

Рис. 7. Радиочастотный спектр, принятый PlutoSDR (а), демодулированный акустический сигнал (б), спектр акустического сигнала (в)

Также был проведен эксперимент по исследованию акустических колебаний во время работы шагового двигателя FL42, входящего в состав 3D-принтера. Волокно измерительного плеча двигателя было приклеено к корпусу двигателя (рис. 8). Результаты эксперимента приведены на рис. 9.

Рис. 8. Шаговый двигатель с наклеенным оптоволоконном.

Рис. 9. Радиочастотный спектр, принятый PlutoSDR (а), демодулированный акустический сигнал (б), спектр акустического сигнала (в).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально доказана принципиальная возможность применения SDR-платформы в качестве базового элемента системы опроса интерферометрического оптоволоконного датчика. Продемонстрирована ее универсальность: генерация ВЧ-сигнала для модуляции источника и прием/обработка сигнала от фотоприемника.

Предложенная схема измерения позволила зарегистрировать низкочастотное (500 Гц) акустическое воздействие от динамической головки, а также от вибрации шагового двигателя на оптоволоконный интерферометр Маха–Цендера путем амплитудной модуляции лазерного излучения приема и демодуляции сигнала в радиочастотном диапазоне. Проведен эксперимент по определению влияния глубины модуляции лазера на радиочастотный спектр, принимаемый PlutoSDR с фотоприемником на входе. Сформулированы возможные направления дальнейшего развития системы.

Предложенный подход открывает перспективы для создания компактных, низкобюджетных и высокочувствительных систем мониторинга на основе оптоволоконных сенсоров.

Предлагаемый SDR-метод превосходит прямое детектирование по потенциалу борьбы с низкочастотными шумами и особенно по возможностям мультиплексирования. Предлагаемый SDR-метод лучше прямого детектирования по возможностям мультиплексирования, кроме этого, имеется потенциал по борьбе с низкочастотными шумами, который предполагается подтвердить в ходе дальнейших исследований.

В то же время, на сегодняшний день SDR-метод уступает по чувствительности оптимизированным схемам с фазовой модуляцией, но выигрывает у них в простоте, стоимости и гибкости архитектуры. Таким образом, его основная ниша – это создание многоканальных, распределенных или встраиваемых систем, где критически важны умеренная стоимость, конфигурируемость и возможность работы с массивами датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качура С.М., Постнов В.И. // Труды ВИАМ. 2019. № 5. С. 52. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61> .
2. Парфенов Н.М., Чемоданов В.Б., Ермилина О.В. // Авиакосмическое приборостроение. 2022. № 4. С. 44. <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.4.2022.1276>
3. Борисенков И.Л., Воронов К.Е., Леонович Г.И., Калаев М.П., Телегин А.М. // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 5. С. 247. <https://doi.org/10.17587/nmst.23.247-254>
4. Борисенков И.Л., Леонович Г.И., Крутов А.Ф., Воронов К.Е., Телегин А.М. РФ Патент 2842157 С2, 2025.
5. Беловолов М.И., Пармонов В.М., Беловолов М.М. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 12. С. 1128. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32785095>
6. Мехтиева А.Д., Юрченко А.В., Калытка В.А., Нешина Е.Г., Алькина А.Д., Мадри П.Ш. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 15. С. 30. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.15.53129.19200>
7. Казанский Н.Л., Бутт М.А., Дегтярев С.А., Хонина С.Н. // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 3. С. 295. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-743>.
8. Хадж Бурдусен, Али Ал-Лавати // ПТЭ. 2006. № 3. С. 115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9210863> [*Hadj Bourdoucen, Ali Al-Lawati // Inst. Exp. Tech. 2006. V. 49. № 3. P. 408.*]
9. Каменев О.Т., Кульчин Ю.Н., Петров Ю.С., Хижняк Р.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 3. С. 49. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21311080>

10. *Азаров А.В., Данилов Д.Ю., Зябриков С.Ю.* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2025. Т. 28. № 3. С. 37.
<https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.37-48>
11. *Лащенко И.В., Залицкий Д.А.* // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48301649>
12. *Телегин А.М., Калаев М.П., Воронов К.Е., Николаев Л.В.* // Инженерная физика. 2025. № 12. С. 33. <https://doi.org/10.25791/infizik.12.2025.1521>
13. *Савицкий И.В., Глек П.Б., Алиев Р.М. и др.* // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. 2024. Т. 79. №. 5. С. 2450403.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2450403>
14. *Горбачев О.В., Самохвалов С.Я., Артюхов Д.И.* // Евразийский союз ученых. 2016. №. 30-2. С. 43. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27316070>
15. *Кислицын В.О., Оленев В.А., Миронов О.В. и др.* // ПРОНЕФТЬ. 2025. Т. 10. С. 108.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=80564595>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структурная схема измерительной системы: 1 – PlutoSDR, 2 – ВЧ -усилитель мощности, 3 – оптоволоконный лазер, 4 – источник питания лазера, 5, 11 – ВОЛС, 6, 10 – оптоволоконные сплиттеры 1×2, 7 – опорное плечо интерферометра, 8 – модулируемое плечо интерферометра, 9 – источник акустического сигнала, 12 – оптоволоконный фотоприемник, 13 – источник питания фотоприемника, 14 – ЭВМ.
- Рис. 2.** Система регистрации: 1 – PlutoSDR, 2 – ВЧ- усилитель мощности, 3 – оптоволоконный лазер, 4 – оптоволоконный фотоприемник, 5 – кабельные соединители SMA, 6 – интерфейс Ethernet.
- Рис. 3.** Зависимость длины волны лазера от тока накачки. Пунктиром обозначена линейная аппроксимация.
- Рис. 4.** Спектр лазера с модуляцией.
- Рис. 5.** Радиочастотный спектр на выходе фотоприемника при глубине модуляции лазера $M=0.1$ (а) и $M=0.02$ (б).
- Рис. 6.** Регистрация акустических колебаний с использованием динамика: 1 – маломощная электродинамическая головка; 2 – волокно измерительного канала; 3 – волокно опорного канала; 4 – оптические сплиттеры.
- Рис. 7.** Радиочастотный спектр, принятый PlutoSDR (а), демодулированный акустический сигнал (б), и спектр акустического сигнала (в).
- Рис. 8.** Шаговый двигатель с наклеенным оптоволоконном.
- Рис. 9.** Радиочастотный спектр, принятый PlutoSDR (а), демодулированный акустический сигнал (б), и спектр акустического сигнала (в).

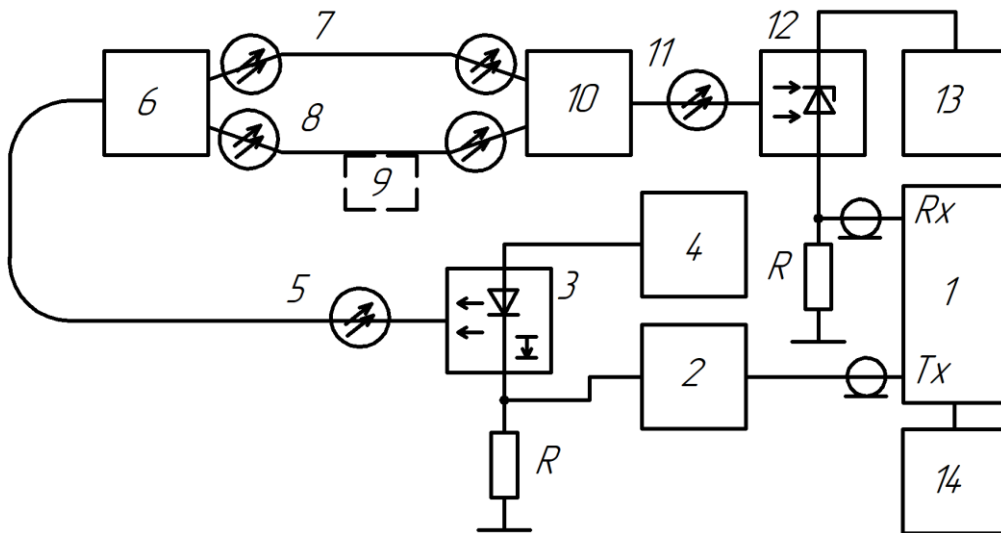


Рис. 1.

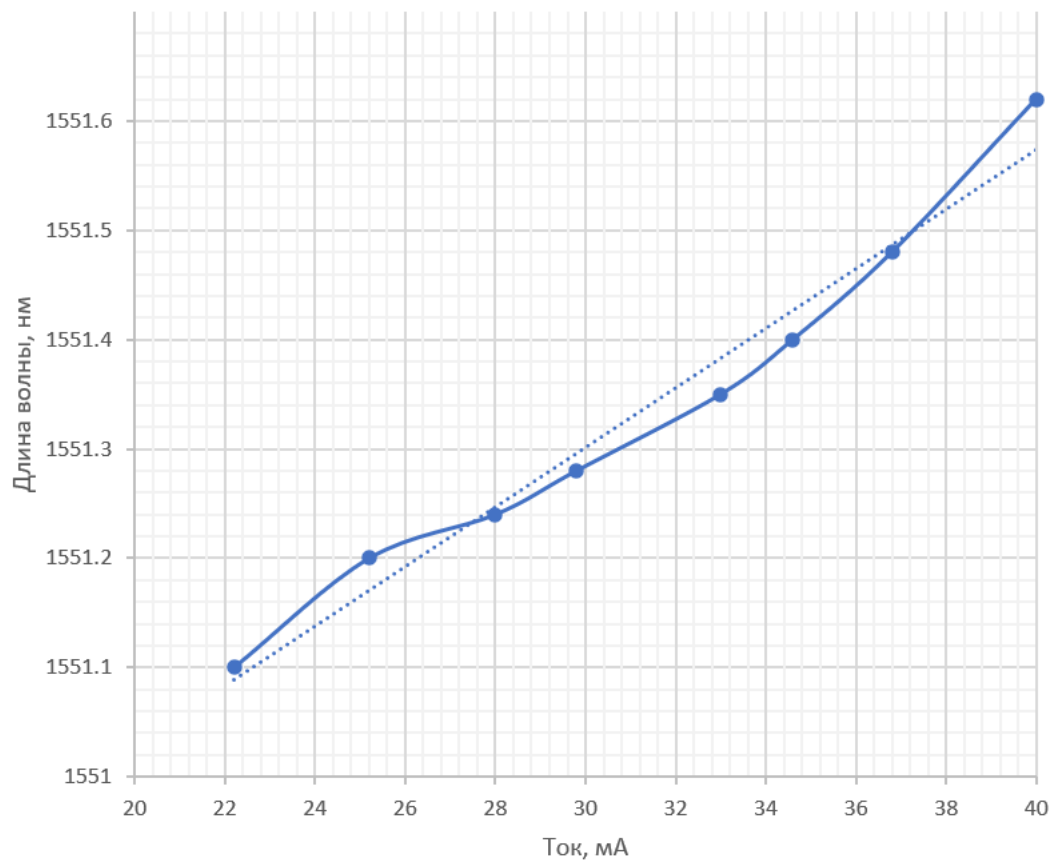


Рис. 3.

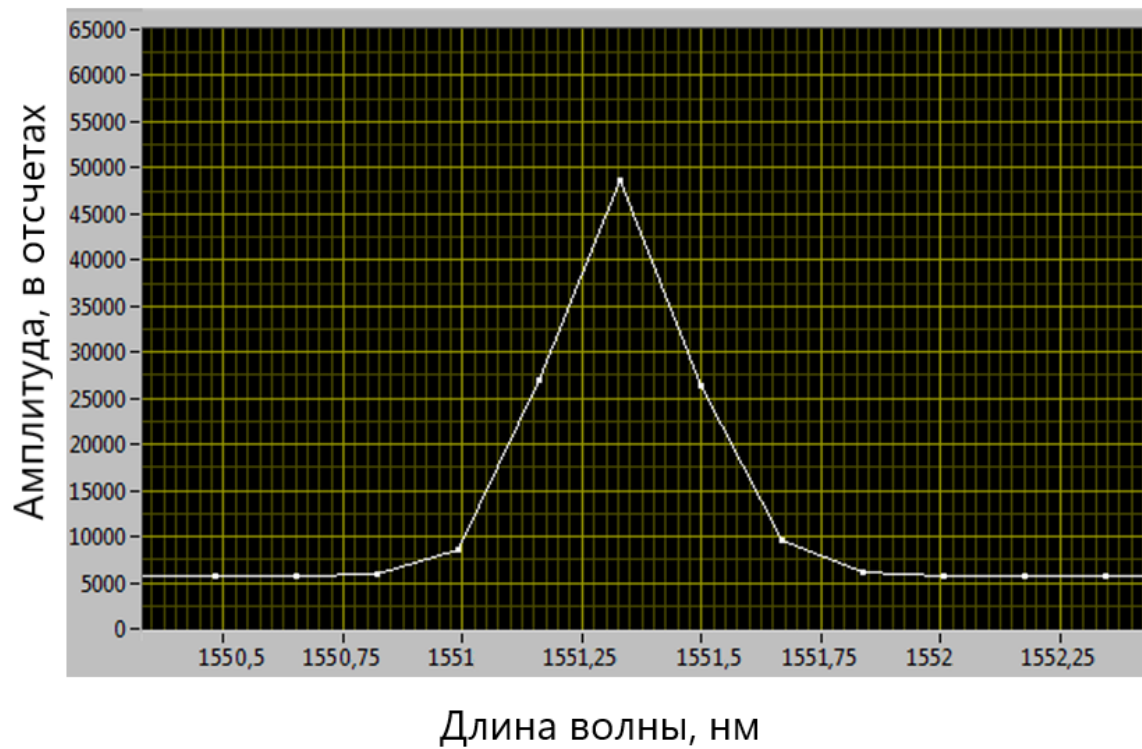
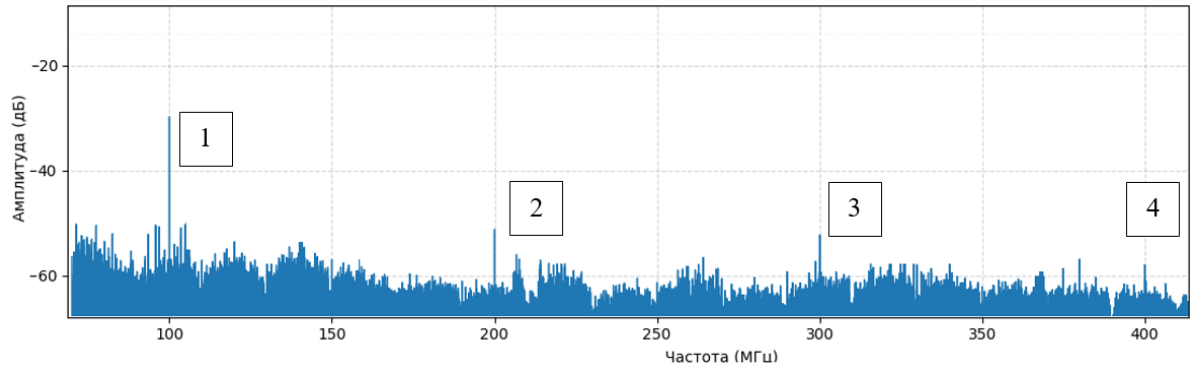
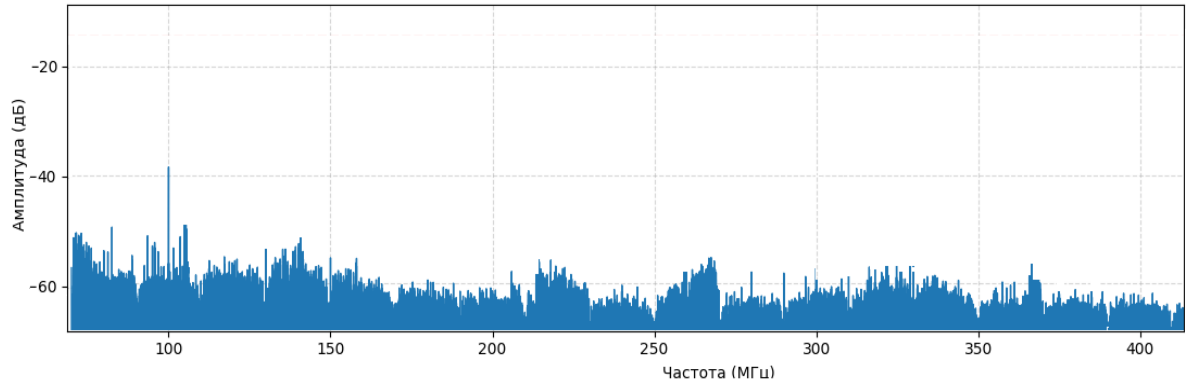


Рис. 4.



(а)



(б)

Рис. 5.

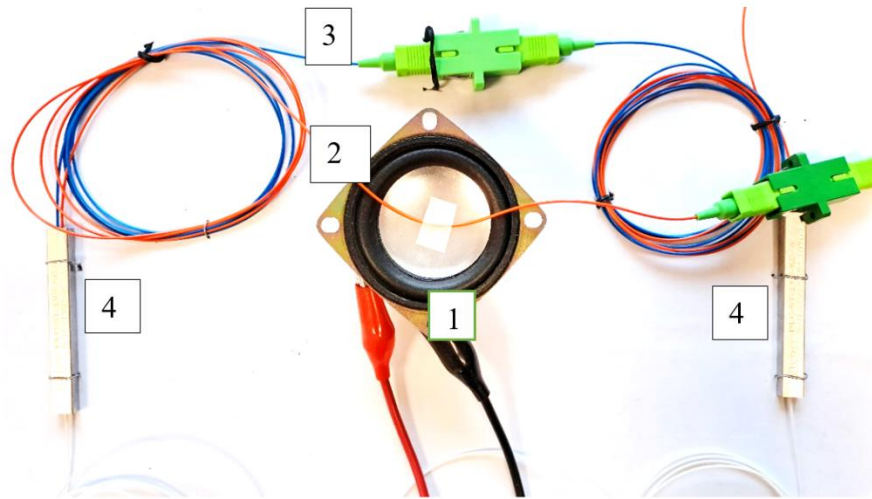


Рис. 6.

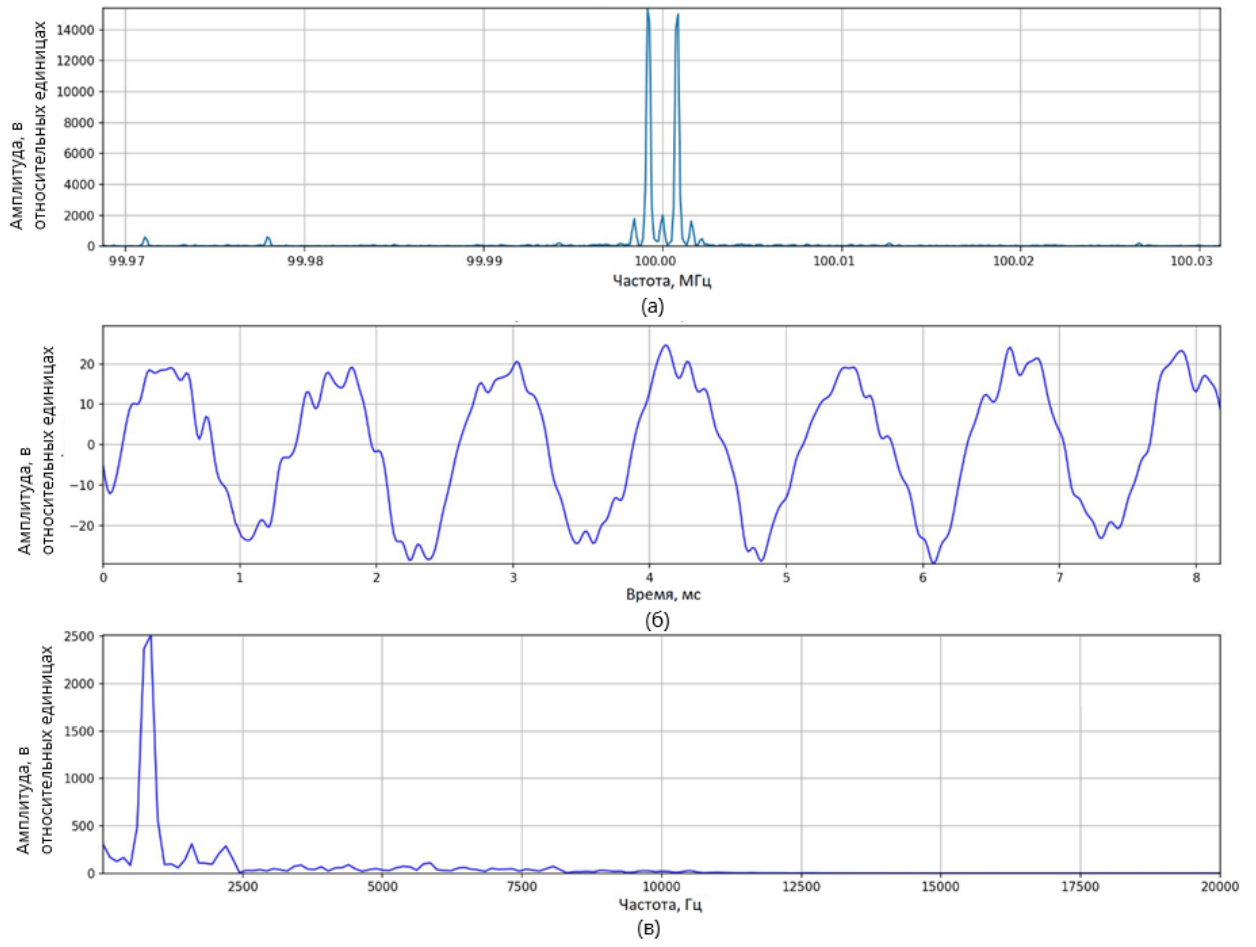


Рис. 7.

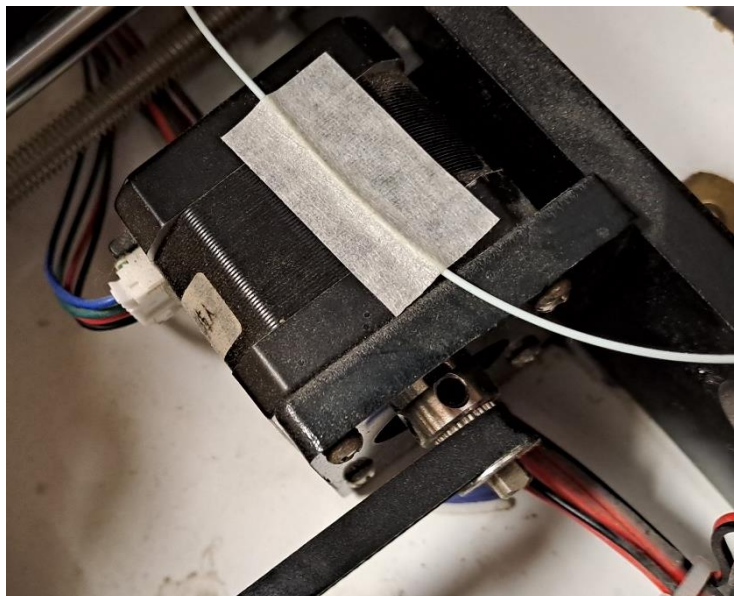


Рис. 8.

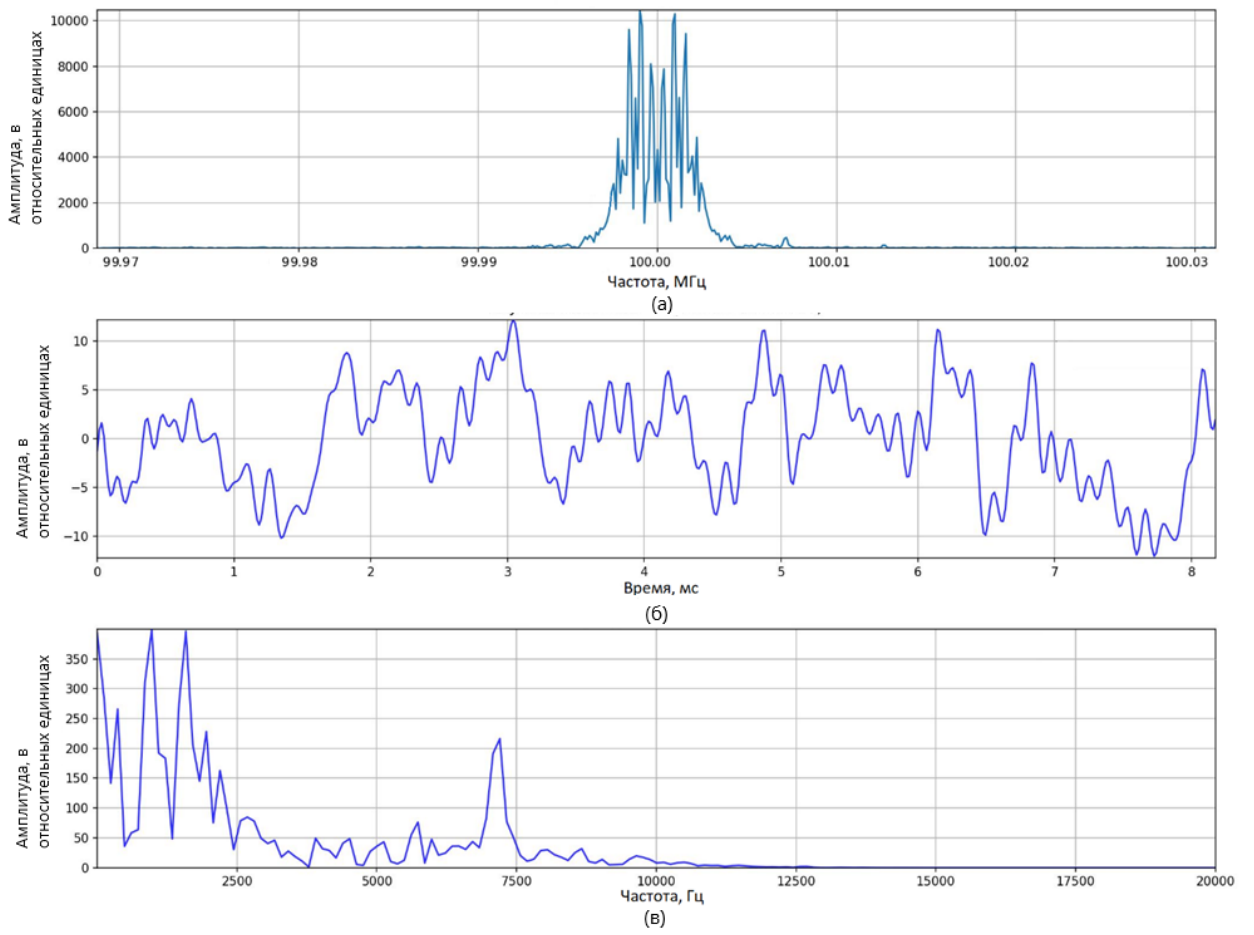


Рис. 9.