

На правах рукописи



Аронов Леонид Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОМОДИННОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО
СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре теоретических основ радиотехники.

Научный руководитель:

Ушаков Виктор Николаевич,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Оппоненты:

Лавров Александр Петрович,

доктор физико-математических наук, профессор Института электроники и телекоммуникаций ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Манцевич Сергей Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «31» мая 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.387.01 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «30» марта 2023 года

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.387.01

к.т.н., доцент

 Шевченко М. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Спектральный анализ является важным видом анализа сигналов различной природы. В радиотехнике данный вид анализа является ключевым при обнаружении радиосигналов и исследовании их характеристик. Для устройств, формирующих оценку спектра сигнала, важнейшими являются такие характеристики, как полоса анализа, разрешающая способность, возможность работы в реальном времени без пропусков сигналов как по частоте, так и по времени. При решении задач радиомониторинга, радиоэлектронной борьбы, а также при обработке сигналов в радиоастрономии полоса одновременного анализа играет ключевую роль. Цифровые спектроанализаторы реального времени способны охватывать полосы анализа до сотен МГц и обладают гибкостью в выборе режимов работы, что обеспечило им широкое распространение. Полоса анализа таких устройств ограничена быстродействием полупроводниковых процессоров и АЦП. С другой стороны, существуют акустооптические спектроанализаторы, в которых преобразование Фурье может быть реализовано с помощью цилиндрической линзы и участка пространства. Полоса анализа таких устройств может достигать 3 ГГц и ограничена характеристиками устройства ввода радиосигнала в оптический тракт, роль которого выполняет акустооптический модулятор. Акустооптические спектроанализаторы проще в реализации, обладают меньшими габаритами и потреблением, что проявляется в еще большей степени при интегральном исполнении.

Степень разработанности темы.

Схемы акустооптических спектроанализаторов и алгоритмы их работы изучены достаточно подробно. По способу реализации преобразования Фурье акустооптические процессоры принято разделять на устройства с временным и пространственным интегрированием. Последние более просты, обладают большей полосой анализа, но в одноканальном исполнении формируют только оценку энергетического спектра. Эта особенность приводит к тому, что одноканальные акустооптические спектроанализаторы с пространственным интегрированием обладают низким динамическим диапазоном, который не превышает половины выраженного в дБ динамического диапазона обычно используемого фотоприемного устройства на основе ПЗС. Введение дополнительного (опорного) канала и переход к схемам интерферометров позволяет получать оценку амплитудного и фазового спектров и, как следствие, увеличить динамический диапазон. Такой подход может рассматриваться как оптическое гетеродинамирование. Вариант гетеродинамического спектроанализатора с переносом информационного сигнала на некоторую ненулевую разностную частоту и фотоприемником мгновенного действия был рассмотрен Вандер Люгтом и др. в 1981 году. В то

время фотоприемники с накоплением обладали малым количеством элементов и низким по сравнению с лавинными фотодиодами динамическим диапазоном. При этом фотоприемник мгновенного действия требовал наличия тракта усиления, фильтрации и детектирования для каждого отдельного фотодиода. В 2003 году после появления матричных фотоприемников с накоплением, обладающих большим числом элементов и относительно высоким динамическим диапазоном, на кафедре ТОР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» был предложен спектроанализатор с фотоприемником на основе ПЗС и переносом на нулевую разностную частоту. Схема была названа гомодинным акустооптическим спектроанализатором (ГАОСА). Был проведен эксперимент, подтвердивший возможность формирования амплитудного спектра и увеличения динамического диапазона. В такой схеме требовался только один тракт усиления и фильтрации, но для выделения амплитудного спектра требовалась организация квадратурных каналов.

Схема ГАОСА позволяет сочетать широкую полосу одновременного анализа и высокий динамический диапазон, обладая при этом простотой реализации. Улучшение характеристик данной схемы требует построения более точной теоретической модели, что обуславливает актуальность работы.

Цель и задачи работы.

Цель диссертационной работы состоит в определении достижимых характеристик гомодинного акустооптического спектроанализатора с учетом алгоритма формирования спектра входного сигнала и характеристик узлов, входящих в схему.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Разработка математической модели ГАОСА, учитывающей собственные шумы устройства и нелинейности его узлов.
- 2) Определение зависимости основных характеристик ГАОСА от характеристик и параметров узлов схемы с учетом современной элементной базы.
- 3) Оптимизация алгоритма работы ГАОСА, в т.ч. в части выбора вида опорного сигнала.
- 4) Определение способов улучшения характеристик ГАОСА на основе технических решений с учетом разработанной теоретической модели.

Научная новизна.

- 1) Разработана математическая модель ГАОСА, учитывающая собственные шумы устройства.
- 2) Представлено более точное в сравнении с [1] описание сигнала на выходе ГАОСА, несущего информацию о спектре анализируемого сигнала.
- 3) Установлена зависимость динамического диапазона ГАОСА в односигнальном и двухсигнальном режимах от параметров узлов схемы. Оценка динамического диапазона согласно

полученной зависимости лучше согласуется с результатами эксперимента, представленными в [1], чем предложенная там же математическая модель.

4) Показано, что аппаратная функция ГАОСА имеет вид $\text{sinc}^2(\cdot)$ несмотря на то, что в схеме формируется оценка амплитудного, а не энергетического спектра.

5) Установлено, что вид опорного сигнала определяет возможность работы спектроанализатора без пропусков сигнала. При использовании одиночного широкополосного импульса наблюдаются пропуски по времени, при использовании квазипериодической последовательности импульсов наблюдаются пропуски по частоте.

6) Предложен класс опорных сигналов, обеспечивающих работу ГАОСА без пропусков сигналов независимо от их длительности.

7) Предложен метод получения спектра сигнала, требующий меньшего в сравнении с [1] времени анализа.

8) Показано, что на краях диапазона рабочих частот имеет место ухудшение разрешающей способности по частоте, что подтверждается экспериментально.

Теоретическая и практическая значимость.

1) Предложенная в работе теоретическая модель ГАОСА позволяет более точно определить значения основных параметров и характеристик устройства, чем это было возможно ранее [1].

2) Показано, что ожидаемое в результате перехода к интерференционной схеме удвоение выраженного в дБ односигнального динамического диапазона недостижимо.

3) Установлено, что ограничение односигнального динамического диапазона фотоприемником происходит только за счет максимально возможного заряда насыщения.

4) Предложен класс опорных сигналов, обеспечивающих работу ГАОСА без пропусков сигналов по частоте и по времени.

5) Даны рекомендации по улучшению разрешающей способности по частоте на краях диапазона рабочих частот.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании спектроанализаторов радиосигналов на основе схемы ГАОСА.

Методология и методы исследования.

Для решения сформулированных задач используется скалярная теория дифракции света, математический аппарат статистической радиотехники, теория вероятностей, математический анализ, а также численное моделирование на ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту.

1) Гомодинный акустооптический спектроанализатор (ГАОСА) позволяет увеличить односигнальный динамический диапазон, выраженный в дБ, в сравнении с акустооптическим спектроанализатором с пространственным интегрированием (АОСПИ), формирующим оценку энергетического спектра, не более, чем в 1,5 раза.

2) Применение в ГАОСА опорного сигнала в виде непрерывной периодической последовательности широкополосных радиоимпульсов позволяет анализировать без потери информации сигналы с длительностью не более временной апертуры акустооптического модулятора (АОМ).

3) Для обеспечения анализа сигналов произвольной длительности без потери информации в ГАОСА в качестве опорного сигнала должна быть использована специальная структура непрерывной последовательности широкополосных радиоимпульсов.

4) Аппаратная функция ГАОСА, определяющая его разрешающую способность по частоте, описывается зависимостью вида $\text{sinc}^2(\cdot)$ подобно АОСПИ, формирующему оценку энергетического спектра.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в работе результатов определяется использованием апробированных методов теоретического анализа и эксперимента, а также согласованностью теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования и экспериментов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, доложены и обсуждены на следующих всероссийских и международных конференциях: XIII, XIV, XV International Conference for young researchers «Wave Electronics and its application in information and telecommunication systems» St. Petersburg, Russia, 2010, 2011, 2013. Также полученные результаты обсуждены на научных семинарах кафедры Теоретических основ радиотехники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на семинаре Дома ученых им. Горького, секция «Радиоэлектроника».

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 10 статьях и материалах конференций, из которых 6 статей опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК, и 4 работы – в сборниках трудов и тезисов конференций.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем составляет 122 страницы, 74 рисунка, список цитируемой литературы включает 73 позиции.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Представлен обзор методов спектрального анализа и устройств, реализующих эти методы с указанием типовых характеристик, формулируется цель диссертационной работы.

Основной метод реализации спектрального анализа на сегодняшний день основан на возможностях методов цифровой обработки сигналов. Цифровые спектроанализаторы представлены двумя основными классами: сканирующие спектроанализаторы и спектроанализаторы на основе БПФ. Первые обладают высоким динамическим диапазоном (ДД): типовое значение односигнального ДД - 107 дБ, двухсигнального ДД – 115 дБ. Разрешение по частоте, обеспечиваемое методами цифровой фильтрации, может быть выбрано из широкого диапазона значений от единиц до сотен Гц, большие значения обеспечиваются, как правило, аналоговыми фильтрами. При этом сочетание высокого разрешения и большой полосы анализа требует значительного времени анализа. Так при разрешении по частоте 1 кГц потребуется 2,5 с для анализа спектра в полосе 1 МГц. При этом сканирующие анализаторы характеризуются пропусками сигналов по времени.

Анализаторы на основе БПФ позволяют существенно сократить время анализа. При указанных ранее параметрах анализа время развертки БПФ-анализатора займет не более 6 мс. Возможность рассматривать БПФ как операцию фильтрации сигнала гребенкой фильтров позволяет довести разрешение по частоте до 1 мГц. При этом для ограниченного числа элементов разрешения по частоте возможна работа в реальном времени без пропуска сигналов. Выпускаемые фирмой Keysight Technologies спектроанализаторы реального времени имеют полосу анализа 509,47 МГц, при лучшем доступном разрешении в 287 кГц это дает 1739 элементов разрешения в спектре. Динамический диапазон спектроанализатора составляет 78 дБ. Устройства фирмы Rohde&Schwarz обеспечивают 400 элементов разрешения в полосе 40 МГц и динамический диапазон не менее 70 дБ.

Цифровые спектроанализаторы предоставляют широкий выбор режимов измерений: набор разрешающих фильтров широкого диапазона, возможность оконного взвешивания, дополнительная обработка и анализ сигнала по отсчетам спектра и др.

Следует отметить, что существуют и иные методы нахождения спектра радиосигнала, кроме сканирования по частоте и метода БПФ. Среди реализуемых в цифровом виде применяются алгоритм Z-преобразования с использованием ЛЧМ-фильтрации и алгоритм Блюстейна, также основанный на ЛЧМ-фильтрации.

Одной из альтернатив цифровым устройствам являются акустооптические спектроанализаторы. Среди них можно выделить два основных типа: устройства с временным и с пространственным интегрированием. Первые обеспечивают высокое разрешение по частоте от единиц Гц до десятков кГц, которое определяется временем накопления в фотоприемнике.

Полоса анализа при этом зависит от разрешения и ограничена числом элементов разрешения в спектре, которое определяется базой акустооптического модулятора (АОМ) и составляет 1000 и более точек. Существуют оптические схемы, которые позволяют существенно повысить это число, но их практическая реализация сложна, требует большого числа АОМ и других оптических элементов. Динамический диапазон акустооптических спектроанализаторов с временным интегрированием составляет порядка 30-40дБ. Данные устройства относятся к классу спектроанализаторов реального времени.

Акустооптические спектроанализаторы с пространственным интегрированием (АОСПИ) обладают широкой полосой анализа, которая ограничена рабочей полосой АОМ и может достигать единиц ГГц. Число элементов разрешения в спектре определяется базой АОМ и также может составлять 1000 и более точек. Разрешение по частоте, связанное с полосой анализа числом элементов разрешения, может составлять от сотен кГц до единиц МГц. Однако, простые оптические схемы формируют только энергетический спектр и обладают принципиально низким односигнальным динамическим диапазоном, который составляет не более 35 дБ. Переход к интерференционным схемам за счет введения дополнительного опорного оптического канала позволяет устранить этот недостаток без существенного усложнения оптической схемы. Гетеродинный акустооптический спектроанализатор с учетом доступной элементной базы не позволяет реализовать весь потенциал такого подхода, т.к. для регистрации продуктов интерференции требуется матрица фотоприемников мгновенного действия, на выходе каждого из которых должен быть организован свой тракт фильтрации, усиления и детектирования, что значительно ограничивает число элементов разрешения в спектре. Гомодинный акустооптический спектроанализатор (ГАОСА) лишен этого недостатка и обладает всеми достоинствами простого АОСПИ и относительно высоким динамическим диапазоном. Данная работа посвящена исследованию, оптимизации структуры и оценке достижимых параметров и характеристик ГАОСА с учетом современной элементной базы.

Глава 2. Представлено описание алгоритма работы ГАОСА и его математическая модель, включающая статистическое описание. Определены факторы, задающие основные характеристики устройства. Формулируется вопрос о возможности работы спектроанализатора с периодическим опорным сигналом.

Реализация ГАОСА может быть выполнена на основе двух оптических схем (рис.1). В схемах приняты следующие обозначения: ЛИ – лазерный источник, К – коллиматор, З – зеркало, АОМ – акустооптический модулятор, СД – светоделитель, ЛФ – линза Фурье, ФП – фотоприемник, $s_{вх}(t)$ – анализируемый сигнал, $r(t)$ – опорный сигнал. Схема интерферометра Маха-Цандера подразумевает использование двух одноканальных АОМ, организацию двух оптических каналов с последующим сведением световых потоков в плоскости фотоприемника с

помощью зеркал и светоделителей. Характеристики АОМ должны быть идентичны, что может вызвать сложности при их практической реализации. Оптические каналы могут быть расположены в одной плоскости, что увеличивает коэффициент использования излучения лазера. Схема интерферометра Юнга содержит один двухканальный АОМ, более проста по структуре, но менее эффективна в части использования мощности лазера, т.к. оптические каналы разнесены по вертикальной координате.

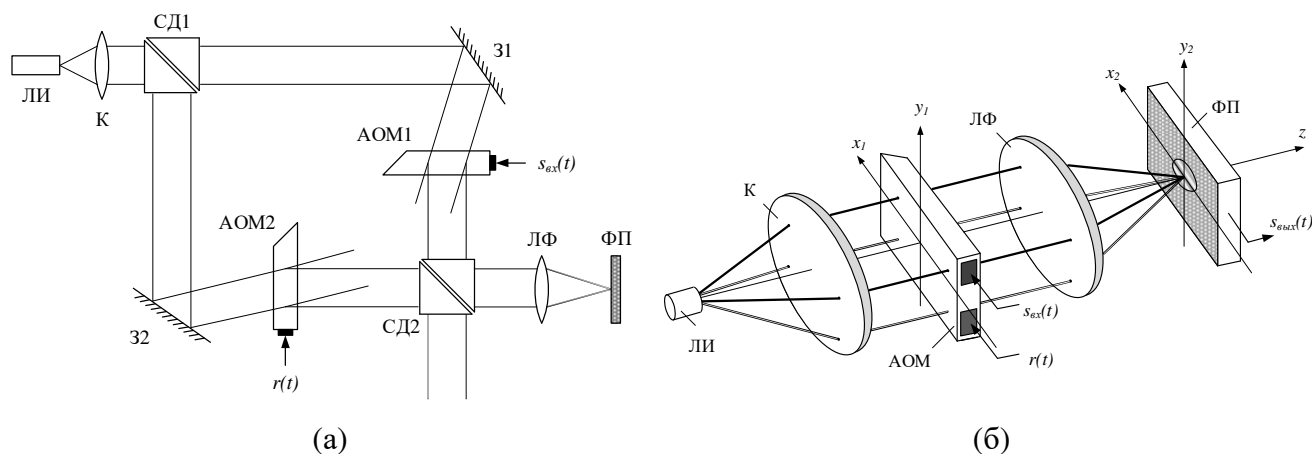


Рис. 1. Оптические схемы реализации ГАОСА: (а) - интерферометр Маха-Цандера, (б) - интерферометр Юнга

Принцип работы ГАОСА подразумевает формирование квадратурных компонент для выделения амплитудного спектра анализируемого сигнала. Эта операция может быть выполнена двумя способами. Первый заключается в считывании трех дополнительных строк по вертикали с соблюдением необходимых фазовых соотношений между распределениями поля. Выделение информации об амплитудном спектре требует дополнительных вычислений, которые целесообразно выполнять цифровыми методами, дополняя ГАОСА устройством постобработки. В работе предлагается модифицированный вариант этого способа, требующий считывания только двух дополнительных строк вместо трех. Уменьшение количества строк позволяет сократить время вывода данных из фотоприемника и объем данных, обрабатываемых цифровым блоком. Второй способ предложен в работе впервые и заключается в последовательном формировании необходимых для вычисления квадратурных компонент данных. Для этого необходимо выполнить три цикла накопления, каждый раз изменяя начальную фазу опорного сигнала на $\pi/2$. При этом не требуется матричный фотоприемник, который может быть заменен на линейный с вытянутыми по вертикали пикселями, более высоким динамическим диапазоном и скоростью вывода. Последовательный вывод позволяет обновлять оценку спектра после каждого цикла накопления, т.к. для квадратурной обработки могут быть использованы любые три последних цикла накоплений. Недостатком предложенного способа является требование к стационарности спектра входного сигнала в течение трех циклов накопления.

Определено, что аппаратная функция (АФ) ГАОСА имеет вид функции $\text{sinc}^2(\cdot)$, несмотря на то, что устройство формирует амплитудный спектр входного сигнала, а не энергетический. Такая АФ в сравнении с $\text{sinc}(\cdot)$ обеспечивает более высокое разрешение по частоте и характеризуется меньшим уровнем боковых лепестков. В ГАОСА также может быть реализовано оконное взвешивание. Для этого в плоскости АОМ необходимо с помощью пространственного транспаранта сформировать соответствующее распределение интенсивности оптического излучения. Полоса анализа, разрешение по частоте и число разрешимых в спектре элементов ГАОСА определяется характеристиками АОМ – его рабочей полосой частот, временной апертурой и их произведением, соответственно. Типовыми можно считать полосу анализа 500..1000 МГц, частотное разрешение 0,5..1 МГц, число точек разрешения до 2000. Известен АОМ в одноканальном исполнении с полосой анализа 3 ГГц, обеспечивающий частотное разрешение 1 МГц.

Исследована форма АФ в зависимости от частоты анализируемого сигнала для различных значений фокусного расстояния линзы Фурье и полос анализа. При этом в расчетах не применялось параксиальное приближение.

На рис. 2 представлена зависимость относительной ширины главного лепестка аппаратной функции спектроанализатора по уровню 0,5 от абсолютной отстройки от центральной частоты анализируемого диапазона при двух значениях фокусного расстояния F линзы Фурье. Временная апертура акустооптического модулятора принята равной 1 мкс.

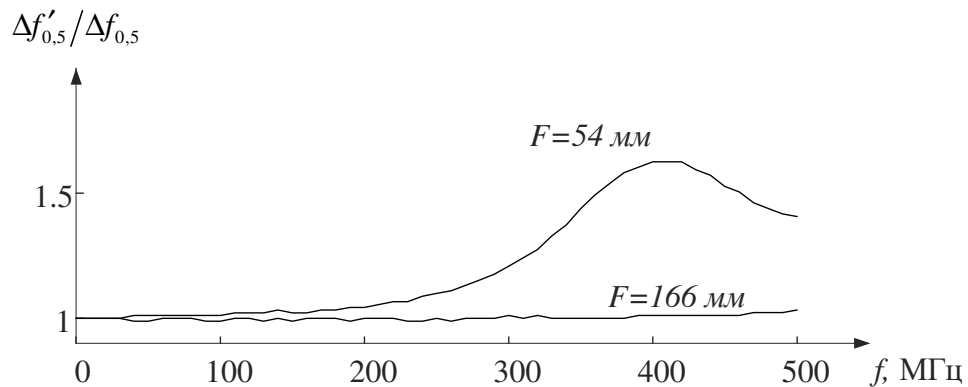


Рис. 2. Изменение ширины главного лепестка АФ при отстройке от центральной частоты анализируемого диапазона

В работе показано, что при полосах анализа от 1 ГГц и фокусном расстоянии ЛФ $F=54 \text{ мм}$ по мере приближения к краям диапазона рабочих частот разрешающая способность по частоте падает в 1,5 раза. Решением этой проблемы может быть увеличение фокусного расстояния линзы или применение объектива с компенсацией сферических aberrаций.

Представлен анализ влияния ширины линии излучения ЛИ на разрешающую способность ГАОСА по частоте (рис. 3). Показано, что относительное уширение $\Delta f'_{0,5} / \Delta f_{0,5}$ главного лепестка АФ по уровню 0,5 при ширине линии излучения лазера 1 нм составляет не более 30%.

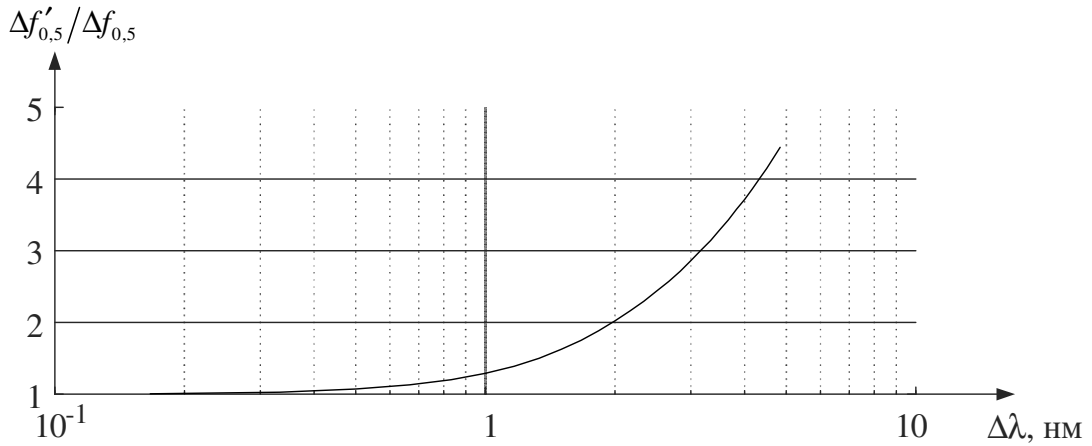


Рис. 3 Относительное уширение АФ ГАОСА при отстройке по частоте на 500 МГц из-за некогерентности лазерного излучения в зависимости от ширины линии излучения

Построена модель ГАОСА, учитывающая собственные шумы устройства: шумы фотоприемника и фотонные шумы от равномерной засветки, необходимой для работы спектроанализатора. Показано, что после выделения квадратурных составляющих предложенными методами выходной сигнал описывается распределением Райса. На основе этого получены выражения для отношения сигнал-шум на выходе устройства, односигнального и двухсигнального динамических диапазонов. Анализ односигнального ДД $DR^{(1)}$ показал, что основным ограничивающим фактором является возможность ячеек фотоприемника (ФП) накапливать большой заряд (1), нелинейность акустооптического взаимодействия при типовых значениях параметров узлов ГАОСА не ограничивает данную характеристику.

$$DR^{(1)} = 20 \log \left(\frac{Q_{\max}}{2 \sqrt{\frac{Q_{\max}/2 + 2\sigma_q^2}{\pi} \left(2SNR_{\text{вых min}} + \sqrt{4SNR_{\text{вых min}}^2 + 2\pi SNR_{\text{вых min}} \left(2 - \frac{\pi}{2} \right)} \right)}} \right), \quad (1)$$

где Q_{\max} - максимальный заряд накопления фотоприемника, выраженный в количестве электронов, σ_q - среднеквадратичное число электронов теплового шума электрической схемы вывода заряда из фотоприемника, $SNR_{\text{вых min}}$ - минимальное требуемое значение отношения сигнал-шум. При этом абсолютные значения граничных мощностей входного сигнала стоит относить к занимаемой ими полосе частот, т.к. ограничения возникают в области спектров. На рис. 4 представлена зависимость односигнального динамического диапазона от заряда насыщения фотоприемника.

Наличие в ГАОСА шумов, порожденных равномерной засветкой, обуславливает невозможность удвоения выраженного в дБ односигнального динамического диапазона по сравнению со схемой АОСПИ, формирующего оценку энергетического спектра.

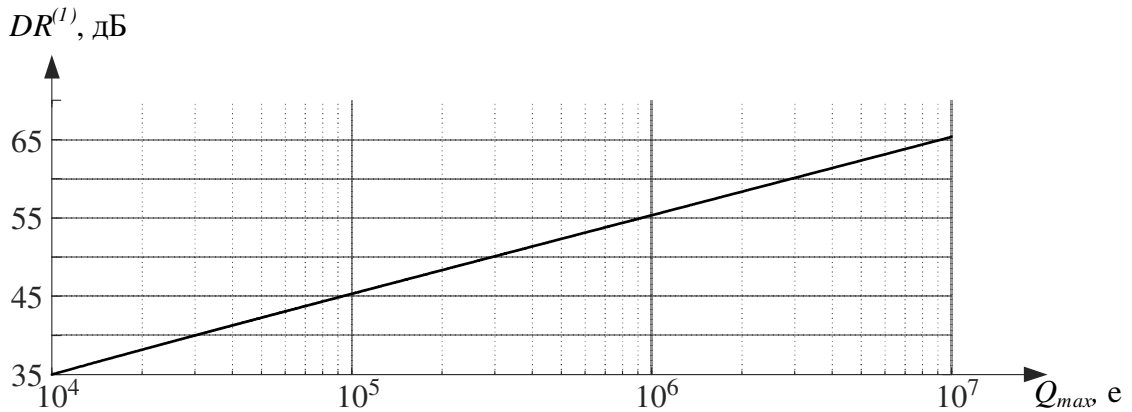


Рис. 4. Зависимость односигнального динамического диапазона от заряда насыщения фотоприемника

Двухсигнальный ДД, напротив, ограничен лишь нелинейностью дифракции света на акустической волне и может быть расширен за счет увеличения мощности излучения лазера или времени накопления, что позволяет накапливать необходимый заряд на ФП при меньших уровнях входного сигнала. Оценки при типовых значениях характеристик лазера, ФП и АОМ дают следующие значения: односигнальный ДД – 45 дБ при заряде насыщения ФП 10^5 е, двухсигнальный ДД – 71 дБ при мощности лазера порядка 100 мВт и эффективности ее использования 1%. На рис. 5 представлена зависимость двухсигнального динамического диапазона от мощности излучения лазера

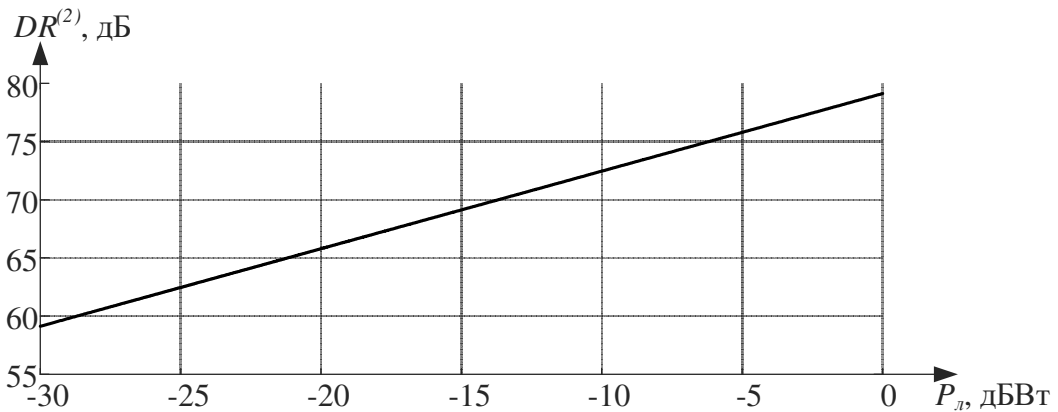


Рис. 5. Двухсигнальный динамический диапазон в зависимости от мощности излучения лазера при коэффициенте использования мощности 1%

ГАОСА, как и любой акустооптический спектроанализатор с пространственным интегрированием, дает искаженную оценку амплитудного спектра импульсных сигналов, длительность которых сравнима с временной апертурой АОМ.

Использование достижений в области методов расширения динамического диапазона ФП позволяет дополнительно расширить односигнальный динамический диапазон ГАОСА на 40-60 дБ, что в свою очередь потребует увеличения мощности лазера или времени накопления.

Также были сформулированы требования к опорному сигналу: его спектр должен быть равномерным в полосе анализа. Предполагается возможным использовать в качестве опорного сигнала периодическую последовательность ЛЧМ-импульсов или псевдослучайных сигналов. Однако исследования работы ГАОСА с такими сигналами ранее не проводились.

Глава 3. Представлены исследования работы ГАОСА с различными видами опорных сигналов. Показано, что структура сигнала определяет возможность спектроанализатора работать без пропусков по времени и частоте.

В качестве опорного сигнала может быть использована непрерывная периодическая последовательность ЛЧМ-импульсов или радиосигналов с фазовой манипуляцией псевдослучайной последовательностью. Длительность ЛЧМ-импульса при этом должна быть равна временной апертуре АОМ. Формирование такого опорного сигнала может быть затруднено в случае широкой относительной полосы и малой временной апертуры АОМ. Сигнал на основе псевдослучайной последовательности целесообразно сделать непрерывным с длительностью радиоимпульса равной временной апертуре АОМ. Для его формирования могут быть использованы быстродействующие регистры сдвига или иные цифровые схемы.

Использование в качестве опорного сигнала короткого радиоимпульса нецелесообразно, т.к. приводит к существенному снижению эффективности использования излучения лазера, что может привести к снижению двухсигнального ДД до значений, меньших односигнального ДД. Также узкополосность сигнала подразумевает использование АОМ с узкой относительной полосой рабочих частот.

Использование в качестве опорного сигнала квазипериодической последовательности импульсов приводит к дискретизации АЧХ спектроанализатора (рис. 6) в случае анализа сигналов длительностью больше времени анализа, что соответствует пропускам по частоте.

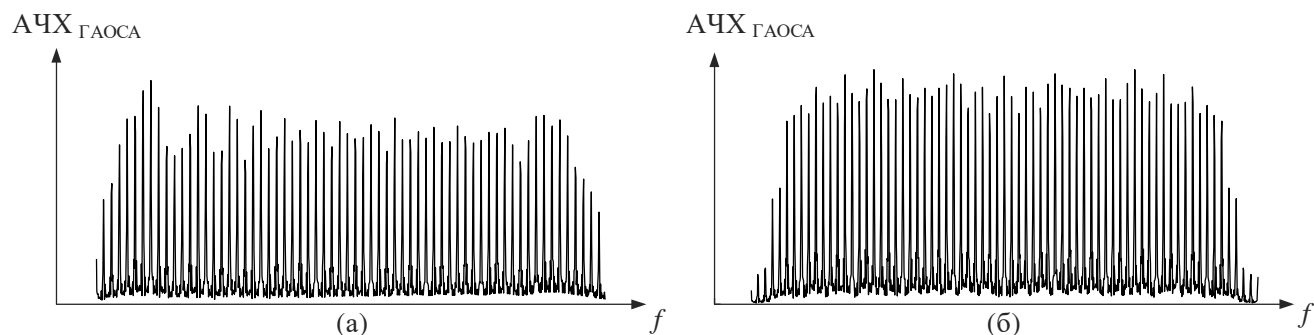


Рис. 6. АЧХ ГАОСА, полученная путем сканирования по частоте, с опорным сигналом в виде квазипериодической последовательности (а) ЛЧМ-импульсов, (б) импульсов на основе М-последовательности

Избавиться от этого недостатка позволяет применение непериодического опорного сигнала. Он может быть сформирован на основе квазипериодической последовательности с применением одного из методов расширения спектра. Оконное взвешивание функцией вида $\text{sinc}(\cdot)$ в значительной степени устраняет дискретную структуру АЧХ, но при этом получение неискаженной оценки спектра коротких по сравнению с временем анализа импульсов становится невозможным. Расширение спектра с помощью сложных сигналов – ЛЧМ-импульс, фазовая манипуляция по закону М-последовательности – позволяет осуществлять регистрацию спектра как коротких, так и длительных сигналов. При этом расширение ЛЧМ-импульсом приводит к появлению провалов в оценке спектра коротких широкополосных импульсов. Расширение спектра на основе фазовой манипуляции лишено данного недостатка и является предпочтительным вариантом. Численное моделирование показало возможность получить АЧХ с неравномерностью не более 1 дБ.

Класс сигналов, формируемых цифровыми методами, не ограничивается псевдослучайными последовательностями. Генераторы сигналов произвольной формы позволяют формировать практически любой сигнал. Дополнительным преимуществом данного метода является присущая всем цифровым устройствам высокая точность повторения генерируемого сигнала. Существующие быстродействующие ЦАП позволяют записывать выборку сигнала в память и формировать на ее основе электрический сигнал произвольной формы. Такой генератор может сформировать ЛЧМ-импульс, радиосигнал с фазовой манипуляцией псевдослучайной последовательностью и любой другой, в том числе с заданной формой спектра в широкой полосе частот. Формирование опорного сигнала методом прямого цифрового синтеза является отдельным вопросом и может рассматриваться как перспективное направление исследований в области интерферометрических схем акустооптических спектроанализаторов.

В качестве опорного сигнала возможно использовать также широкополосный случайный сигнал, но из-за принципиальной нестационарности его спектра такой подход приведет к существенному повышению шумов устройства, что снизит динамический диапазон.

Глава 4. Представлено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. В силу наличия готовых экспериментальных данных для односигнального динамического диапазона повторный эксперимент не проводился.

Первый эксперимент был выполнен на кафедре ТОР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [2]. В нем исследовался макет низкочастотного ГАОСА.

В рамках эксперимента для сравнения ГАОСА и АОСПИ макет включался в одноканальном режиме, что соответствовало спектроанализатору, формирующему оценку энергетического спектра. В этом режиме односигнальный динамический диапазон составил

15 дБ. Переход к схеме ГАОСА осуществлялся путем подачи на второй канал АОМ опорного сигнала в виде короткого радиоимпульса. В таком режиме односигнальный динамический диапазон макета составил 22 дБ. Таким образом, увеличение односигнального динамического диапазона, выраженного в дБ, составило около 47%, что соответствует представленной в диссертационной работе математической модели.

Второй эксперимент также был выполнен на кафедре ТОР «СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [1]. В нем исследовался высокочастотный ГАОСА.

Мощность опорного сигнала при проведении эксперимента выбиралась такой, чтобы заряд, соответствующий энергетическому спектру опорного сигнала, составлял половину от заряда насыщения. При отношении сигнал-шум, равном 1, в эксперименте было получено значение односигнального динамического диапазона 46 дБ.

Для оценки односигнального динамического диапазона согласно представленной в диссертационной работе математической модели ГАОСА был учтен сделанный авторами [1] выбор уровня опорного сигнала. Для этого было получено выражение для односигнального динамического диапазона для уровня опорного сигнала, обеспечивающего заряд накопления в половину Q_{\max} :

$$DR^{(1)} = 20 \lg \left(\frac{Q_{\max} (\sqrt{2} - 1)}{\sqrt{\frac{Q_{\max} + 2\sigma_q^2}{\pi} \left(2SNR_{\text{вых min}} + \sqrt{4SNR_{\text{вых min}}^2 + 2\pi SNR_{\text{вых min}} \left(2 - \frac{\pi}{2} \right)} \right)}} \right). \quad (2)$$

При отношении сигнал-шум, равном 1, можно записать выражение для приближенной оценки односигнального динамического диапазона:

$$DR^{(1)} \cong 10 \lg \left(\frac{Q_{\max}}{1 + \frac{\sigma_q^2}{Q_{\max}}} \right) - 9,3.$$

Расчет по (2) для условий, описанных в [1], и $Q_{\max} \gg \sigma_q^2$ дает значение односигнального динамического диапазона 44,12 дБ, что отличается от экспериментального результата на 4,04%.

Также было исследовано ухудшение разрешающей способности ГАОСА по частоте при относительно малом фокусном расстоянии ЛФ и широком диапазоне анализируемых частот. Экспериментальные исследования были выполнены на базе акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием (АОСПИ), формирующего спектр

мощности. Он также имеет аппаратную функцию вида $\text{sinc}^2(..)$, что позволяет обобщить результаты экспериментов на случай ГАОСА.

Для проведения эксперимента был собран стенд, структурная схема которого представлена на рис. 7. В состав стенда входили: 1 – генератор гармонических сигналов Г4-79, 2 – АОСПИ, 3 – блок цифровой обработки (БЦО), 4 – персональный компьютер.

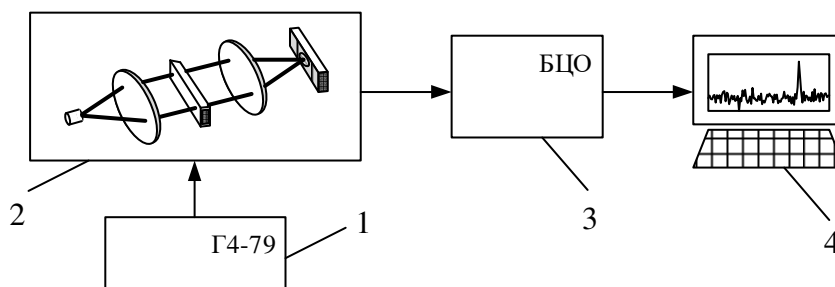


Рис. 7 Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований

Полоса анализа составляла 500 МГц в диапазоне частот от 1250 МГц до 1750 МГц. Фокусное расстояние ЛФ было равно 20 мм. Исследование аппаратной функции проводилось в центре и на краях диапазона рабочих частот. Ширина аппаратной функции по уровню 0,5 от максимума составила 1,3 МГц на нижней частоте 1250 МГц рабочего диапазона и 2,1 МГц на верхней частоте 1750 МГц.

Также наблюдалось смещение максимума аппаратной функции относительно ожидаемого значения. Абсолютное смещение оценки частоты сигнала составило ~ 1 МГц на краях рабочего диапазона частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акустооптические спектроанализаторы отличаются простотой реализации, малыми габаритами, потреблением и массой. Они позволяют иметь полосы анализа 1 ГГц и больше, чем превосходят цифровые устройства.

В работе построена теоретическая модель гомодинного акустооптического спектроанализатора. На ее основе выполнена оптимизация и оценка достижимых параметров устройства. Основные результаты работы сводятся к следующему.

1) Установлено, что аппаратная функция спектроанализатора описывается функцией вида $\text{sinc}^2(..)$ несмотря на то, что он формирует оценку амплитудного спектра входного сигнала.

2) Построение модели ГАОСА с учетом собственных шумов показало принципиальную невозможность удвоения выраженного в дБ односигнального динамического диапазона по сравнению с одноканальным акустооптическим спектроанализатором с пространственным интегрированием.

3) Определено, что оценка амплитудного спектра, формируемая гомодинным спектроанализатором, подчиняется распределению Райса.

4) Получены выражения для оценки динамического диапазона по одному сигналу и по интермодуляционным искажениям третьего порядка. Пример расчета этих характеристик с использованием типовой современной элементной базы дает значения 45 дБ для односигнального и 71 дБ для двухсигнального режимов.

5) При выборе фотоприемника из промышленно выпускаемых моделей для максимизации односигнального динамического диапазона ГАОСА следует выбирать устройство с наибольшим зарядом насыщения.

6) Расширение односигнального динамического диапазона также возможно за счет применения специализированных матричных фотоприемников, а также устройств со сжатием динамического диапазона по логарифмическому закону, представленных в настоящее время только в виде экспериментальных образцов.

7) Установлено, что при широкой полосе анализа и малых габаритах устройства применение в теоретической модели приближения Френеля дает ошибку при оценке разрешающей способности по частоте на краях рабочего диапазона, что подтверждено экспериментально.

8) Показано, что вид опорного сигнала в значительной степени определяет работу спектроанализатора. Опорный сигнал в виде периодической последовательности широкополосных радиоимпульсов приводит к пропускам по частоте сигналов с длительностью, превышающей временную апертуру АОМ. Подобный опорный сигнал эффективен лишь в случае анализа коротких одиночных радиоимпульсов.

9) Универсальным с точки зрения длительности анализируемых сигналов является непериодический опорный сигнал со специальной структурой.

Таким образом, гомодинный акустооптический спектроанализатор может рассматриваться как эффективная альтернатива цифровым спектроанализаторам реального времени, а в задачах, где требуются полосы анализа не менее 1 ГГц, является уникальным по совокупности характеристик вариантом решения. Дополнительную обработку выходного сигнала фотоприемника с целью формирования оценки амплитудного или фазового спектров на основе квадратурных компонент целесообразно выполнить цифровыми средствами. Это приводит к гибридной оптико-цифровой схеме, в которой преобразование Фурье выполняется естественным для оптических процессоров методом, а формирование выходных данных осуществляется цифровым процессором.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи, опубликованные в изданиях, включённых в перечень ВАК:**

1. Аронов Л.А., Ушаков В.Н. Гомодинный акустооптический спектроанализатор с ЛЧМ-импульсом в качестве опорного сигнала. Известия вузов России. Радиоэлектроника. Вып. 5, 2013г., с. 42-47.
2. Аронов Л.А., Ушаков В.Н. Гомодинный акустооптический спектроанализатор с непрерывным бинарным фазоманипулированным радиосигналом в качестве опорного сигнала. Известия вузов России. Радиоэлектроника. Вып. 6, 2014г, с. 13-16.
3. Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Метод формирования квадратурных компонентов спектра в гомодинном акустооптическом спектроанализаторе. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 2. С. 53–61. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-53-61
4. Л. А. Аронов, Ю. С. Доброленский, В. Н. Ушаков. О возможности использования периодического опорного сигнала в гомодинном акустооптическом спектроанализаторе. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 97–105. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-97-105
5. Аронов Л.А., Дубов П.А. Анализ работы акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием в условиях расходимости оптического пучка. Известия вузов России. Радиоэлектроника. Вып. 5, 2012г., с59-65.
6. Аронов Л.А., Доброленский Ю. С., Г. В. Кулак. Статистическая модель гомодинного акустооптического спектроанализатора. Известия вузов России. Радиоэлектроника. Т. 23, №1, 2020г, с. 52-62. doi:10.32603/1993-8985-2020-23-1-52-62

Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

1. L.A. Aronov, P.A. Dubov. Optic beam divergence effect on functioning of space integration acousto-optic spectrum analyzer. Proceedings of XV International Conference for young researchers: Wave Electronics and its application in information and telecommunication systems. / St. Petersburg state university of aerospace instrumentation. St. Petersburg, 2013, p. 32-35.
2. Aronov L.A., Lazarev M.V., Ushakov V.N. Using two-dimensional instrumental function for extension of space integration acousto-optic spectrum analyzer's dynamic range. XIV International Conference for young researchers: Wave Electronics and its application in information and telecommunication systems. Preliminary program and abstracts / St. Petersburg state university of aerospace instrumentation. St. Petersburg, 2011, p. 12.
3. L.A. Aronov, S.V. Grachev, V.N. Ushakov. Dynamic range extension methods for space integration acousto-optic spectrum analyzer. XIII International Conference for young researchers: Wave

Electronics and its application in information and telecommunication systems. Preliminary program and abstracts / St. Petersburg state university of aerospace instrumentation. St. Petersburg, 2010, p. 21.

4. Л.А. Аронов, М.В. Лазарев. Акустооптический спектроанализатор с расширенным динамическим диапазоном. «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Вып. 7, 2012г. с.3-7

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачев С.В., Рогов А.Н., Ушаков В.Н. Гомодинный акустооптический анализатор спектра с пространственным и временным интегрированием // Радиотехника, 2003, №4, с. 23–28.
2. Grachev S.V., Kamochkin P.S., Rogov A.N., Ushakov V.N. Experimental studies of interference space-time-integrating acousto-optic spectrum analyzer // Proc. International Conf. For Young Researchers on Acoustoelectronic and Acoustooptic Information Processing / St-Petersburg. 1998. P. 404–408