

## **О Т З Ы В**

официального оппонента доктора физ.-мат. наук **Лаврова Александра Петровича** на диссертацию **Аронова Леонида Андреевича** на тему «**Исследование гомодинного акустооптического спектроанализатора и оптимизация его параметров**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

### **Актуальность темы диссертации**

Оценка характеристик радиосигналов в спектральной области широко применяется в задачах обнаружения сигналов и их классификации. В настоящее время наиболее широко распространены цифровые варианты спектроанализаторов. Однако известны и оптические процессоры радиосигналов, основанные на применении функциональных элементов – акустооптических модуляторов.

Акустооптические устройства спектрального анализа радиосигналов характеризуются своей широкополосностью, относительной простотой конструкции, компактностью, «классический» пример – акустооптический анализатор спектра (АОС) мощности радиосигналов с пространственным интегрированием. Известен также и недостаток этих АОС, связанный с их относительно низким динамическим диапазоном, обусловленным относительно низким динамическим диапазоном (энергетическим) у многоэлементных фотоприемников, регистрирующих оптическое распределение на выходе АОС.

Диссертационная работа Аронова Леонида Андреевича посвящена исследованию гомодинного акустооптического спектроанализатора радиосигналов, предложенного ранее учеными СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Гомодинирование как частный случай гетеродинирования «прямо» открывает возможность увеличения динамического диапазона спектроанализатора. В диссертации рассматриваются вопросы построения гомодинного акустооптического устройства спектрального анализа радиосигналов с учетом его комплектации компонентами современной элементной базы, обеспечения работы такого спектроанализатора в режиме без пропуска радиосигналов, оценка достижимых параметров и характеристик гомодинного акустооптического спектроанализатора. Таким образом, тема диссертации является актуальной.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация изложена на 122 страницах и состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка сокращений, списка литературы из 73

ссылок на первоисточники, содержит 74 рисунка. Результаты работы были представлены автором на 3-х международных конференциях и опубликованы в 6 рецензируемых статьях в журнале, входящем в перечень ВАК, а также в 4 работах – в сборниках трудов и тезисов конференций.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, отражаются сведения о научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации материалов диссертации; описывается ее структура.

**В первой главе** представлен обзор методов спектрального анализа и устройств, реализующих эти методы с указанием типовых характеристик. Большое внимание уделено цифровым методам и характеристикам спектроанализаторов – измерительных приборов, выпускаемых мировыми ведущими фирмами. Рассмотрены акустооптические спектроанализаторы (АОС) радиосигналов двух типов – с пространственным интегрированием и с временным интегрированием, оцениваются их основные параметры – полоса анализа, частотное разрешение, динамический диапазон. Указывается на перспективность построения на основе АОС с пространственным интегрированием спектроанализаторов гетеродинного типа, и в частности гомодинного типа, позволяющих регистрировать амплитудный спектр, и таким образом существенно увеличить динамический диапазон АОС. Здесь же обоснована актуальность цели диссертации и поставленных задач.

**Во второй главе** представлено описание алгоритма работы гомодинного акустооптического спектроанализатора (ГАОСА), выполненного по схеме интерферометра Юнга с двухканальным акустооптическим модулятором. Один из каналов модулятора используется для ввода в процессор анализируемого радиосигнала, второй канал – для ввода опорного широкополосного радиосигнала – формирования гетеродинной волны. Приведена математическая модель ГАОСА, описывающая преобразование сигналов в его узлах. Эта модель ориентирована на расчет распределений оптических волн в плоскости многоэлементного фотоприемника интегрирующего типа. Модель включает и статистическое описание работы ГАОСА. Здесь рассмотрены факторы, определяющие основные характеристики устройства, алгоритм работы фотоприемника и реализация квадратурной обработки. На основе математической модели и характеристик компонентов ГАОСА получены оценки для полосы анализа, частотного разрешения, количества спектральных каналов, формы аппаратной функции, отношения сигнал/шум, одно- и двухсигнального динамического диапазона устройства.

**В третьей главе** представлены исследования работы ГАОСА с различными видами опорных широкополосных сигналов. Показано, что их структура определяет возможность спектроанализатора работать без пропусков по времени и частоте. В силу значительного времени считывания выходного сигнала из многоэлементного фотоприемника (больше, чем временная апертура акустооптического модулятора) рассмотрены варианты использования в качестве опорного сигнала непрерывной периодической последовательности ЛЧМ-импульсов или радиосигналов с фазовой манипуляцией псевдослучайной последовательностью, но периодичность в опорном сигнале приводит к дискретной структуре АЧХ спектроанализатора. Для избавления от такой дискретности рассмотрены варианты формирования опорных широкополосных сигналов с их дополнительной модуляцией. Численным моделированием показана возможность получить АЧХ с неравномерностью не более 1 дБ при дополнительной фазовой манипуляции опорного сигнала по закону М-последовательности.

**В четвертой главе** представлено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных исследований двух макетов ГАОСА, выполненных ранее на кафедре ТОР СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сравнивались такие параметры спектроанализаторов: односигнальный динамический диапазон ГАОСА и его увеличение при переходе от классической схемы АОС с пространственным интегрированием, аппаратная функция спектроанализатора и ее изменение на краях широкого – 500 МГц рабочего диапазона. Сравнение показало хорошее соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных исследований.

**В заключении** приводятся основные результаты работы, и предлагается рассматривать ГАОСА как эффективную альтернативу цифровым спектроанализаторам реального времени в задачах, где требуются полосы анализа не менее 1 ГГц.

### **Новизна результатов работы**

Научной новизной обладают следующие результаты диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель гомодинного акустооптического спектроанализатора (ГАОСА), построенного по схеме интерферометра Юнга с двухканальным акустооптическим модулятором, в рамках которой

- получено выражение для расчета аппаратной функции ГАОСА – его «отклика» на входной гармонический сигнал;
- дано статистическое описание выходного сигнала устройства;

- получено выражение для оценки отношения сигнал-шум на выходе устройства.

2. Предложен вид опорного радиосигнала в канале ГАОСА, обеспечивающий работу ГАОСА в режиме без пропуска сигналов для широкого диапазона их длительностей (в сравнении с временной апертурой акустооптического модулятора).

3. Показано, что аппаратная функция, в соответствии с которой определяется разрешающая способность ГАОСА по частоте, описывается функцией  $\text{sinc}^2(\cdot)$ .

4. Численным моделированием показано, что для класса акустооптических спектроанализаторов с пространственным интегрированием, к которому относится и ГАОСА, наблюдается ухудшение разрешающей способности по частоте по мере отстройки от центральной частоты рабочего диапазона.

5. Предложен метод последовательного формирования в ГАОСА квадратурных компонент, для реализации которого достаточно использование многоэлементного одномерного фотоприемника. Метод, однако, применим только для анализа сигналов, спектр которых не меняется в течение относительно большого времени (мера – время считывания сигналов из многоэлементного фотоприемника).

### **Практическая значимость результатов работы**

Практическая ценность проведенной работы состоит в следующем:

1. Показано, что на основе современной элементной базы может быть разработан гомодинный акустооптический спектроанализатор со следующими характеристиками:

- полоса одновременно анализируемых частот – 1 ГГц,
- разрешение по частоте – не лучше 1 МГц,
- динамический диапазон в односигнальном режиме – 45 дБ,
- динамический диапазон в двухсигнальном режиме – 71 дБ,
- работа без пропуска сигналов.

2. Предложен вид опорного сигнала в виде периодической последовательности радиоимпульсов с огибающей в форме бинарной псевдослучайной последовательности, применение которого в гомодинном акустооптическом спектроанализаторе обеспечивает возможность его работы без пропуска сигналов.

3. Установлено, что сигнал на выходе гомодинного акустооптического спектроанализатора подчиняется распределению Райса.

## **Достоверность результатов диссертационной работы**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается точностью и обоснованностью математических выкладок, численным моделированием и соответствием оценок параметров устройства, представленных в работе, экспериментальным данным, а также публикацией результатов работы в рецензируемом научном журнале «Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника» и в материалах 3-х международных конференций «Wave Electronics and its application in information and telecommunication systems».

## **Общая оценка диссертационной работы**

Диссертационная работа Аронова Леонида Андреевича выполнена на актуальную тему. Текст диссертационной работы хорошо структурирован и содержит подробное аккуратное описание математической модели гомодинного акустооптического спектроанализатора. В работе даны оценки достижимых характеристик устройства, а также установлено соответствие разработанной математической модели экспериментальным данным. На основе результатов, полученных в работе, может быть разработано устройство спектрального анализа для задач радиомониторинга, радиоэлектронной борьбы и других областей науки и техники.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующие:

1. В главе 1 излишне подробно излагаются алгоритмы работы цифровых спектроанализаторов, а также характеристики промышленных измерительных приборов – спектроанализаторов ведущих мировых производителей (Keysight, Rohde & Schwarz). Задачи у ГАОСА и у этих измерительных приборов разные.

2. В главе 1 при рассмотрении возможностей акустооптических спектроанализаторов следовало бы большее внимание уделить ближайшему аналогу ГАОСА – интерференционному гетеродинному АОС. Гетеродинные АОС были предложены в 80-х годах на пике исследований акустооптических процессоров различного функционального назначения.

3. В главе 2 не объявлена модель входных радиосигналов. Анализ ведется для гармонического сигнала или простых радиоимпульсов различной длительности, и по ним рассчитывается аппаратная функция ГАОСА. Не затрагивается анализ сложных ЛЧМ или ФМн-радиосигналов.

4. В главе 2 при расчете границ динамического диапазона устройства не учитывается нелинейности, присущие самому акустооптическому модулятору.

5. В главе 3 при исследовании работы ГАОСА с временами накопления больше, чем временная апертура модулятора, разные сложные опорные

радиосигналы приводят к изрезанности АЧХ. Большого понимания процессов гомодинирования можно было бы получить при расчете временных реализаций опорной волны в разных частях частотной оси ГАОСА. Однако такие расчеты в работе не проводились.

6. В главе 3 многие результаты расчетов приведены на рисунках без численной разметки их осей, например, Рисунок 3.2, 3.4, 3.5, 3.6 и т. д., а сопровождающий их текст не содержит нужной информации.

7. Диссертация аккуратно оформлена, но она изобилует используемыми обозначениями, их – многие десятки, даже на одной странице, см., например, стр.49. Это обстоятельство затрудняет чтение диссертации. Списка условных обозначений в диссертации нет.

8. В тексте встречаются отдельные орфографические ошибки, например, стр.66, 16-я строка сверху: «незначительной**й**» вместо «незначительное», стр.91, 4-я строка сверху: «структуру» вместо «структур**ы**», то же самое и на стр.98, 3-я строка снизу, стр.103, 1-я строка снизу: предложение не завершено, и др.

Вышеприведенные замечания не снижают общего высокого качества выполненной работы.

### **Заключение**

Диссертация Аронова Леонида Андреевича посвящена актуальной теме разработки устройств спектрального анализа радиосигналов. Она представляет несомненный научный интерес и открывает возможности развития акустооптических систем спектрального анализа радиосигналов с увеличенным динамическим диапазоном. Диссертация является завершенной научной квалификационной работой, автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Диссертация Аронова Леонида Андреевича на тему «Исследование гомодинного акустооптического спектроанализатора и оптимизация его параметров», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», соответствует паспорту специальности (по пунктам 3, 13).

Представленная диссертация полностью соответствует требованиям пункта п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 N 335, от 02.08.2016 N 748, от 29.05.2017 N 650, от 28.08.2017 N 1024), предъявляемым к

кандидатским диссертациям, а ее автор, Аронов Леонид Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
профессор Института электроники и телекоммуникаций  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

**Лавров Александр Петрович**



Дата: 15 мая 2023 г.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 2-й учебный корпус  
Телефон: +7 (812) 552-95-16  
E-mail: lavrov\_ap@spbstu.ru

