

СЕТЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ONLINE SCIENTIFIC JOURNAL

ISSN 2782-5507

12+

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА И КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ELECTRONICS, PHOTONICS
AND CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Т 4 | № 3 / 2024 | Казань

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ)**

Сетевой научный журнал

**ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА И
КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

Том 4 | №3

Выпуск 13

2024

Казань

Сетевой научный журнал "Электроника, фотоника и киберфизические системы» создан для публикации результатов оригинальных научных исследований в области электроники, фотоники и их приложений в технических и живых киберфизических системах. Журнал ставит перед собой цель повышения научного, образовательного и методического уровня специалистов в различных областях, связанных с электроникой и оптикой различных диапазонов частот и длин волн.

Журнал издается с 2021 года.

Регистрационный номер Эл № ФС77-82193 от 26 октября 2021г.

Журнал индексируется в РИНЦ: Договор №109-03/2022 от 31.03.2022г., e-Library ID: 79523.

К публикации принимаются научные статьи, аналитические обзоры, оригинальные учебно-методические материалы, обзоры научных событий, соответствующие тематике журнала по следующим научным специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 2.2.7. Фотоника
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность
- 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы

Главный редактор - *Морозов Олег Геннадьевич*, д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Заместитель главного редактора - *Сахабутдинов Айрат Жавдатович*, д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Редакционный совет:

Виноградова Ирина Леонидовна – д.т.н., доц., УГАТУ, Уфа

Багманов Валерий Хусаинович – д.т.н., проф., УГАТУ, Уфа

Бурдин Антон Владимирович – д.т.н., доц. НПО ГОИ им. С.И.Вавилова, СПбГУТ, г.Санкт-Петербург; ПГУТИ, Самара;

Иванов Дмитрий Владимирович – д.ф.-м.н., проф. ПГТУ, г. Йошкар-Ола

Надеев Адель Фирадович - КНИТУ-КАИ

Раевский Алексей Сергеевич - д.ф.-м.н., проф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Рябова Наталья Владимировна - д.ф.-м.н., проф., ПГТУ, г. Йошкар-Ола

Султанов Альберт Ханович - д.т.н., проф. УГАТУ, Уфа

Файзуллин Рашид Робертович - КНИТУ-КАИ

Редакционная коллегия:

Аникин Игорь Вячеславович - д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Гизатуллин Зиннур Марселевич - д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Данилаев Максим Петрович - д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Данилаев Дмитрий Петрович - д.т.н., доц. КНИТУ-КАИ

Катасев Алексей Сергеевич - д.т.н., доц. КНИТУ-КАИ

Козлов Сергей Владимирович - д.т.н., доц. КНИТУ-КАИ

Муслимов Эдуард Ринатович - д.т.н., КНИТУ-КАИ

Нагуллин Константин Юрьевич - д.т.н., доцент КНИТУ-КАИ

Нуреев Ильнур Ильдарович - д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Солдаткин Вячеслав Владимирович - д.т.н., профессор КНИТУ-КАИ

Спирина Елена Александровна - д.т.н., доц. КНИТУ-КАИ

Шалагин Сергей Викторович - д.т.н., доц. КНИТУ-КАИ

Ответственный секретарь - *Хайрова Венера Садыковна*, КНИТУ-КАИ

Учредитель:

Казанский национальный исследовательский
технический университет им.А.Н.Туполева –КАИ

Издатель:

Казанский национальный исследовательский
технический университет им.А.Н.Туполева –КАИ

Издание выходит 4 раза в год

Адрес: 420111, Казань, К.Маркса ул., 10

Телефон: +7 (843) 231 59 33

E-mail: vskhayrova@kai.ru

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Колонка главного редактора</i>	5	Editor's column
<i>Д.А. Веденькин</i> ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ АНТЕННЫ, СФОКУСИРОВАННЫЕ В ЗОНЕ БЛИЖНЕГО ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ	7	<i>D.A. Vedenkin</i> BROADBAND LINEAR DISCRETE ANTENNAS FOCUSED IN THE NEAR RADIATE FIELD ZONE
<i>А.Ф. Гильфанова, Д.А. Веденькин</i> МУЛЬТИСФОКУСИРОВАННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ АНТЕННЫ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИЕ В РЕЖИМЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ	18	<i>A.F. Gilfanova, D.A. Vedenkin</i> MULTIFOCUSED LINEAR DISCRETE ANTENNAS FUNCTIONING IN THE ENERGY CONCENTRATION MODE

ФОТОНИКА

<i>А.И. Гордеева, Д.И. Нурмухаметов, Р.С. Пономарев</i> ОПТОВОЛОКОННЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ ДАТЧИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА 5СВ	26	<i>A.I. Gordeeva, D.I. Nurmuhametov, R.S. Ponomarev</i> FIBER-OPTIC AMPLITUDE SENSOR OF ELECTROMAGNETIC FIELDS BASED ON 5SV LIQUID CRYSTAL
<i>В.В. Пуртов, А.Н.Д. Альхуссейн</i> МАЛОСЕНСОРНЫЕ РАДИОФОТОННЫЕ АДРЕСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАНОМЕТРИИ ВЫСОКО РАЗРЕШЕНИЯ	33	<i>V. Purtoov, Alhussein Alaa Naji Dakhal</i> LOW-SENSOR MICROWAVE PHOTONICS ADDRESSABLE MEASUREMENT SYSTEMS FOR HIGH-RESOLUTION MANOMETRY
<i>Е.В. Куликов, Р.Ш. Мисбахов</i> ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДА	46	<i>Rus.Sh. Misbakhov, E.V. Kulikov</i> SELECTION OF DESIGN AND SENSORS OF FIBER-OPTIC ACCELEROMETERS FOR PIPELINE LEAK MONITORING
<i>Е.В. Куликов, Р.Ш. Мисбахов</i> ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ НА ОСНОВЕ ДВУХ КОМБИНИРОВАННЫХ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР С ВОЛНОВОЙ И ФАЗО-ВОЛНОВОЙ КОМПОНЕНТАМИ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	61	<i>Rus.Sh. Misbakhov, E.V. Kulikov</i> FIBER-OPTIC ACCELEROMETER FOR CONTROL OF PIPELINE LEAKAGES BASED ON TWO COMBINED ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURES WITH WAVE AND PHASE-WAVE COMPONENTS. MATHEMATICAL MODELS

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

<i>Е.С. Анисимова, И.В. Аникин</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ	77	<i>E.S. Anisimova, I.V. Anikin</i> COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORK MODELS FOR HANDWRITTEN SIGNATURE DYNAMICS RECOGNITION
---	----	--

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ДАТЫ

Р.В. Даутова
КАЗАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ И ИСТОРИЯ
МИРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

86 *R. V. Dautova*
KAZAN UNIVERSITY AND THE HISTORY OF
WORLD TELEVISION

Редколлегия
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ
«РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ»
СООБЩАЕТ...

98 *Editorial board*
PUBLISHING HOUSE “RADIOTECHNICAL
FACULTY” REPORTS...

Уважаемые читатели!



**Олег Геннадьевич
МОРОЗОВ**
главный редактор

По данным журнала «IEEE Spectrum» сети 5G включают спектральные диапазоны с более высокими частотами, чем у 4G, что означает, что базовые станции 5G обслуживают меньшие индивидуальные зоны покрытия. Другими словами, требуется больше базовых станций по сравнению с количеством, необходимым для 4G. Из-за нехватки мест установки (особенно в городских районах) и высокой стоимости развертывания сетей 5G операторы в Японии совместно используют мобильную инфраструктуру.

Но существуют и более наукоемкие решения. По данным этого же журнала в августе 2024 г. токийская коммуникационная компания JTower объявила о развертывании эксплуатации новой стеклянной антенны, созданной частично производителем стекла AGC (одним из крупнейших в мире) и оператором мобильной связи NTT Docomo. Первая антенна была установлена на окне офиса в районе Синдзюку в Токио. Продукт является первой в мире антенной, которая превращает обычное окно в базовую станцию, крепится к окну здания изнутри и превращает улицу в зону доступа, не портя городской пейзаж или внешний вид здания. NTT Docomo утверждает, что в качестве основы для своей антенны она использует прозрачные проводящие материалы, помещая проводники вместе с прозрачной смолой (такой, которая используется в ламинированных ветровых стеклах) между двумя листами стекла. Толщина стекла может быть спроектирована так, чтобы уменьшить затухание и отражение радиосигналов, принимаемых и передаваемых устройством.

Второе интеллектуальное решение по данным журнала «Фотоника» для антенн сетей 5G и качественной характеристики узконаправленных сеансов радиосвязи приемопередающих устройств диапазона миллиметровых волн сверхплотных сетей радиодоступа 5G NR в последних зарубежных публикациях появился термин Pencil Beamforming, что дословно означает "формирование луча на кончике карандаша". Данный факт отражает продолжающуюся в последние годы тенденцию сужения ширины диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности до единиц градусов как по азимуту, так и по углу места при трехмерном диаграммообразовании.

Последняя задача может быть решена и с помощью технологий фокусировки и мультифокусировки лучей в зоне ближнего излученного поля. Настоящий номер открывают две статьи к.т.н., доцента КНИТУ-КАИ Веденькина Д.А. на указанную тему «Широкополосные линейные дискретные антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля» и «Мультифокусированные линейные дискретные антенны, функционирующие в режиме концентрации энергии». В первой статье показано, что основные свойства широкополосных электромагнитных полей с непрерывным спектром, фокусируемых в различных режимах линейными дискретными антеннами в зоне ближнего излученного поля для режима концентрации в случае симметричного спектра совпадают со свойствами сфокусированных монохроматических электромагнитных полей на центральной частоте, а для случая несимметричного спектра также могут быть оценены по свойствам монохроматического поля, частота которого совпадает с частотой наиболее интенсивной компоненты неравномерного спектра. Во второй статье, написанной совместно с аспиранткой Гильфановой А.Ф., показано, что моделирование процесса формирования мультифокусированного излучения в две точки пространства доказало, что с увеличением фокусного расстояния размер области фокусировки увеличивается, но при фокусном расстоянии, равном или большем двух размеров апертуры антенны, эффект

фокусировки исчезает. При значениях расстояния между точками фокусировки по поперечной координате, равных или больших размера апертуры антенны, эффект фокусировки также пропадает.

Раздел настоящего номера «Фотоника» представляют наши коллеги из Перми, Санкт-Петербурга и Москвы. По тематике представленные ими статьи охватывают различные вопросы радиофотонной сенсорики электромагнитных полей, манометрии высокого разрешения и вибраций.

В статье Гордеевой А.Ф., к.ф.-м.н., доцента, Нурмухаметова Д.И., м.н.с. и Пономарева Р.С., к.ф.-м.н., доцента, представляющих ПГНИУ и ПНИПУ, «Оптоволоконный амплитудный датчик электромагнитных полей на основе жидкого кристалла 5СВ» представлены результаты его исследования, которые с одной стороны оказались отрицательными, а с другой позволили сформулировать требования к структуре перспективного датчика близкой конструкции, но уже на основе фотонно-кристаллического волокна с сохранением поляризации. В статье Пуртова В.В., к.т.н., директором ООО "Инфоком-СПб", написанной в соавторстве с аспирантом А.А.Н. Дахалом «Малосенсорные радиофотонные адресные измерительные системы для манометрии высокого разрешения» решена задача малосенсорных манометрических измерений с высоким разрешением на примере мониторинга сфинктеров пищевода с помощью спектрально-адресных волоконных брэгговских решеток. Во-первых, последние по своей конструктивной форме адаптированы к уже применяющимся в гастроскопии приборам, во-вторых, позволяют использовать унифицированную, доступную по стоимости, элементную базу для опроса, в-третьих, позволяют производить точные замеры за счет радиофотонной обработки сигнала. В двух статьях Куликова Е.В., представителя 3 ЦНИИ МО РФ и Мисбахова Рус.Ш., к.т.н., доцента Альметьевского филиала КНИТУ-КАИ «Выбор конструкции и чувствительных элементов волоконно-оптического акселерометра для контроля утечек трубопровода» и «Волоконно-оптический акселерометр для контроля утечек в трубопроводах на основе двух комбинированных адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазо-волновой компонентами. Математические модели» обсуждаются вопросы применения новых адресных волоконных брэгговских структур. В первой статье анализируются их преимущества, а во второй - вопросы применения.

Продолжая разговор о представлении данного номера журнала коснемся раздела «Киберфизические системы». В статье Аникина И.В., д.т.н., профессора КНИТУ-КАИ и Анисимовой Э.С., к.т.н., доцента Елабужского института К(П)ФУ «Сравнительный анализ нейросетевых моделей для распознавания динамики рукописных подписей» показаны преимущества свёрточной нейронной сети (CNN) по сравнению с полносвязной (MLP) и LSTM моделями нейронных сетей.

В обзорном разделе представлена статья Даутовой Р.В., д.и.н., доцента К(П)ФУ «Казанский университет и история мирового телевидения», которая продолжает развитие тематики, затронутой нами в предыдущем номере при представлении монографии «Телевидение Татарстана: от телефота до цифровых технологий», и детализирует ряд рассмотренных в ней вопросов.

Информационный раздел «Издательский дом «Радиотехнический факультет» сообщает...» представлен новой монографией «Полигауссовы модели. Теория и практика» в трех томах, которая предлагает всесторонний обзор как теоретических основ полигауссовых моделей, так и прикладных аспектов их использования.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ АНТЕННЫ, СФОКУСИРОВАННЫЕ В ЗОНЕ БЛИЖНЕГО ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ

Д.А. Веденькин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В работе обсуждаются широкополосные линейные дискретные антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Показано, что при учете свойств сфокусированных электромагнитных полей необходимо учитывать способы использования энергии сфокусированного электромагнитного поля в различных режимах функционирования. Показано, что для различных режимов функции пространственного распределения сфокусированных электромагнитных полей различны. Предложены основные свойства сфокусированных в зоне ближнего излученного поля электромагнитных полей и даны их количественные оценки для различных режимов применения.

Ключевые слова: фокусировка электромагнитного поля; зона ближнего излученного поля; широкополосное электромагнитное поле; сфокусированная дискретная антенна.

Введение

Сфокусированные антенные системы находят широкое применение в различных задачах, начиная от задач нагрева материалов в микроволновых технологиях и заканчивая задачами радиосвязи с удаленными объектами. Обзор существующих работ, посвященных сфокусированным в зоне ближнего излученного поля электромагнитным колебаниям, например, [1-5] показывают, что в основном объеме работ рассматриваются процессы фокусировки монохроматического электромагнитного поля и для них же вводятся и оцениваются основные свойства. При этом использование широкополосных фокусируемых электромагнитных полей формирует еще одну степень свободы при решении практических задач. Таким образом, исследование основных свойств, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля широкополосных электромагнитных полей, является актуальной задачей.

Особенности оценки свойств широкополосных антенн

Под широкополосными (диапазонными) принято понимать антенны, предназначенные для работы в относительных полосах частот $\Delta f / f_0$, составляющих величину порядка нескольких десятков процентов. В этих случаях, как правило, антенны используются в составе радиосредств с относительно узкополосными сигналами и должны обеспечивать их излучение и прием при перестройках несущей частоты в пределах требуемого диапазона частот. Изменения в поведении антенн в пределах полосы частот Δf в этом случае также незначительны и не учитываются при оценках направленных свойств, рассматриваемых также как при монохроматическом сигнале. Обеспечение требуемой широкополосности антенн в таком случае понимается, главным образом, как обеспечение согласования в пределах заданного частотного диапазона. При излучении и приеме электромагнитных полей, занимающих весь широкополосный спектр используемых частот приходится считаться с частотными зависимостями диаграммы направленности антенны, характеристики согласования и параметров фидерных трактов.

Категорию сверхширокополосных антенн составляют две принципиально различные группы. Первая из них представлена антеннами, сохраняющими постоянство характеристик направленности и согласования в широкой полосе частот. Фундаментальные принципы обеспечения частотной независимости характеристик таких антенн, установленные еще в 50-е годы прошлого века, хорошо известны [6]. В большинстве практических применений такие сверхширокополосные антенны также используются в составе радиосредств, осуществляющих передачу или прием радиосигналов с невысокими или умеренными значениями относительной ширины спектра, но с возможностями изменения его центральной частоты в широких пределах. Вторую группу составляют антенны для сверхширокополосных радиосредств, принципиальной особенностью которых является высокое значение абсолютно ширины спектра радиосигнала, составляющей для них значение порядка 0,5 ГГц и более. Такие радиосигналы могут создаваться с несущими частотами, соответствующими сантиметровому или миллиметровому диапазонам волн. Тогда антенны, обеспечивающие излучение и (или) прием, могут быть оказаться в классе относительно узкополосных. В тех случаях, когда несущие частоты сдвинуты в более низкочастотную область, антенны должны обеспечивать работу с радиосигналами, относительная ширина полосы частот которых порядка единицы и более. Антенны, используемые в таких радиосредствах, обладают рядом существенных отличий от традиционных.

Основным принципиальным отличием свойств антенн в составе широкополосных и сверхширокополосных радиосредств является следующее. Любой антенне свойственно наличие частотных изменений характеристик излучения и приема. Для относительно узкополосных радиоустройств этими изменениями в полосе частот, соответствующих спектру радиосигнала, можно пренебречь. По этой причине такие показатели как диаграмма направленности антенны, коэффициент направленного действия и др. считаются постоянными в полосе частот сигнала и, соответственно, вводятся для монохроматического сигнала. Для антенн широкополосных и сверхширокополосных радиоустройств эти изменения могут быть столь значительными, что пренебрегать ими невозможно и приходится изначально считаться с наличием заметной частотной зависимости характеристик направленности $F(\theta, \varphi, f)$ так и пространственных распределений поля излучения в зоне ближнего излученного поля $E(x, y, z, f)$. В этих условиях становится невозможным определить направленные свойства антенны в отрыве не только от спектрального состава излучаемого радиосигнала, но и от способа его «использования» в точке наблюдения. Поэтому само определение пространственного распределения электромагнитного поля для случая несинусоидального (широкополосного) сигнала, как и диаграммы направленности антенны в составе широкополосных и сверхширокополосных радиоустройств становится неоднозначным.

Электромагнитное поле протяженного источника несинусоидальных колебаний

Пусть в точке пространства с координатами (x, y, z) гармонический источник излучения частотой f создает поле $E(x, y, z, f)$. При возбуждении широкополосным сигналом со спектром $G(f)$ поле в точке наблюдения можно представить как $E(x, y, z, f) \cdot G(f)$. Для того, чтобы представить эту величину, как функцию пространственных координат (x, y, z) необходимо предварительно определить каким именно образом значения $E(x, y, z, f) \cdot G(f)$ «используются» в каждом конкретном случае.

Рассмотрим случай работы в режиме передачи. Условная схема организации радиолинии со сфокусированной антенной, функционирующей в режиме передачи показана на рис. 1.

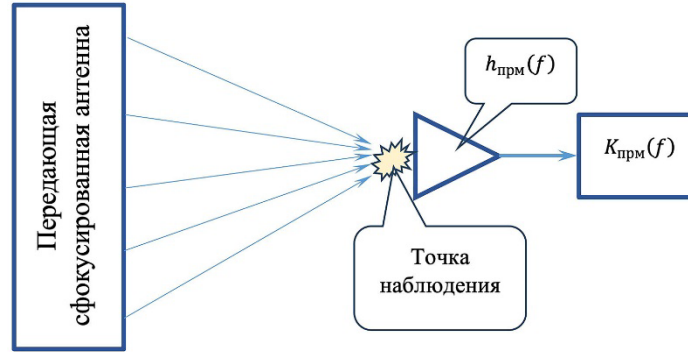


Рис. 1. Широкополосная сфокусированная антенна в режиме передачи

В режиме передачи возможны, по крайней мере, два характерных случая. Во-первых, речь может идти о величине соответствующей поглощенной мощности в точке (x, y, z)

$$P_{пол}(x, y, z) = \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} \sigma(x, y, z, f) |E(x, y, z, f)|^2 df.$$

Соответственно, для случая однородной среды показателем пространственного распределения широкополосной антенны в режиме передачи энергии может служить

$$|E_{ин}^{прд.эн}(x, y, z)|^2 = \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} |E(x, y, z, f)|^2 df, \quad (1)$$

где f_0 и Δf – средняя частота и полоса частот излучаемого сигнала соответственно. Данный случай назовем «режимом концентрации энергии».

Во-вторых, речь может идти о случае, когда в точке с координатами (x, y, z) расположено приемное устройство и, следовательно, характеристикой пространственного распределения является величина мощности «принимаемого» сигнала. Иллюстрирующая структурная схема приемной части приведена на рис. 2.

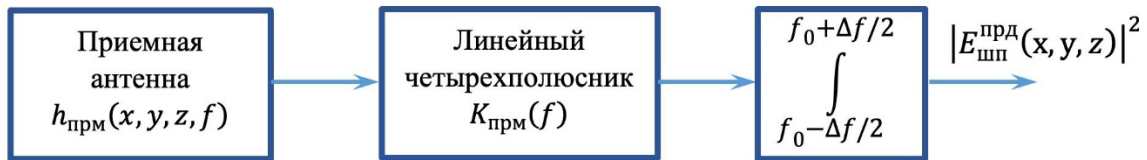


Рис. 2. Структурная схема приемной части

Тогда мощность «принимаемого» сигнала может быть выражена

$$|E_{ин}^{прд}(x, y, z)|^2 = \left| \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} E(x, y, z, f) h_{прм}(x, y, z, f) G(f) K_{прм}(f) df \right|^2, \quad (2)$$

где $h_{прм}(x, y, z, f)$ – действующая высота приемной антенны заданной пространственной ориентации, $K_{прм}(f)$ – коэффициент передачи линейного четырехполюсника в составе приемного устройства. Данный случай назовем «режимом передачи сигнала».

Отличие пространственных распределений сфокусированного в зоне ближнего излученного поля широкополосного электромагнитного поля в формулах (1) и (2) очевидно. Хорошо просматривается и другой факт: направленные свойства антенны в режиме передачи в известной мере зависят от свойств приемного устройства.

Рассмотрим работу в режиме приема. Условная схема радиолинии со сфокусированной широкополосной антенной, функционирующей в режиме приема показана на рис. 3.

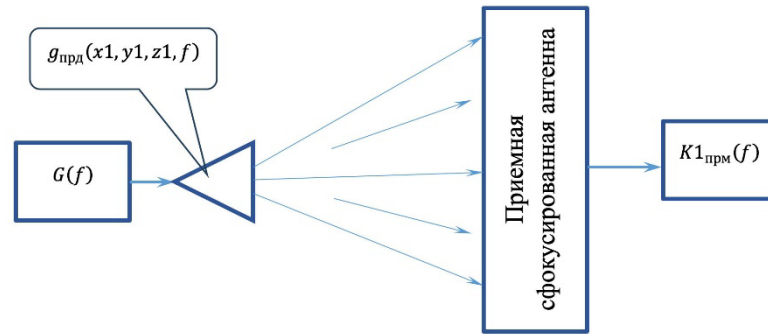


Рис. 3. ШП сфокусированная антенна в режиме приема

Пусть в точке передачи находится источник, которым в области нахождения приемной антенны создается поле, пропорциональное $g_{прд}(x1, y1, z1, f)$. Если прием осуществляется линейным приемником с частотной характеристикой $K1_{прм}(f)$, а рассматриваемой антенной в режиме передачи создавалось бы, в силу принципа взаимности, поле $E_{прд}(x1, y1, z1, f)$, то выходной сигнал с точностью до постоянной имеет вид

$$\left| E_{ин}^{прм}(x1, y1, z1) \right|^2 = \left| \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} E_{прд}(x1, y1, z1, f) h_{прд}(x1, y1, z1, f) G(f) K1_{прм}(f) df \right|^2. \quad (3)$$

В общем случае значения $h_{прм}(x, y, z, f)$ и $g_{прд}(x1, y1, z1, f)$, а также $K_{прм}(f)$ и $K1_{прм}(f)$ не совпадают, что может трактоваться как неравенство функций, характеризующих пространственные распределения в режиме приема и передачи. Это обстоятельство ни коим образом не является нарушением принципа взаимности, а означает лишь различие в «использовании» частотных составляющих широкополосного сигнала.

В дальнейшем, при рассмотрении свойств сфокусированных в зоне ближнего излученного поля электромагнитных полей, для простоты, примем значения $h_{прм}(x, y, z, f)$ и $g_{прд}(x1, y1, z1, f)$, $K_{прм}(f)$ и $K1_{прм}(f)$ равными друг другу и не зависящими от частоты и пространственного положения.

Заметим, что в общем случае может оказаться нецелесообразно разделение на свойства сфокусированных широкополосных антенн в режиме приема и передачи, а можно переходить непосредственно к введению представления радиолинии содержащей передающую и приемную части, характеризуемые параметрами передающей антенны,

среды распространения и приемной части, содержащей приемную антенну и тракт обработки, характеризующиеся спектром передаваемого сигнала, частотной характеристикой среды и параметрами линейного приемника.

Приведем некоторые формулы и подходы к оценкам свойств, характеризующих функционирование широкополосных антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля. Коэффициент направленного действия, как интегральный показатель антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля с использованием широкополосных электромагнитных полей, вводится аналогично случаю фокусировки монохроматического излучения, как отношение значений характеристик $E_{ин}(x_0, y_0, z_0)$, рассчитанных в соответствии с (1)-(3) к соответствующему значению для излучения ненаправленного источника $E_{ин.из}(x_0, y_0, z_0)$ совпадающего спектрального состава, расположенного в точке апертуры, ближайшей к точке наблюдения. В точке фокуса (x_0, y_0, z_0) коэффициент направленного действия может быть определен как

$$КНД_{ин}(x_0, y_0, z_0) = \frac{|E_{ин}(x_0, y_0, z_0)|^2}{|E_{ин.из}(x_0, y_0, z_0)|^2}. \quad (4)$$

Размеры области фокусировки энергии для сфокусированного в зоне ближнего излученного поля широкополосного электромагнитного поля могут быть оценены по уровню 0,5 от значения энергии электромагнитного поля в точке фокусировки.

Ниже приводятся некоторые результаты моделирования линейных дискретных антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля в режиме концентрации энергии и режиме передачи сигнала с использованием широкополосных электромагнитных полей с непрерывными спектрами различной ширины.

Основные свойства линейных дискретных антенн, сфокусированных в режиме концентрации энергии

Рассмотрим модель широкополосной сфокусированной линейной дискретной антенны со следующими параметрами:

- центральная частота – $f_0 = 1500$ МГц;
 - количество излучателей – 16 шт.;
 - шаг излучателей – $d = 0,1$ м.;
 - длина дискретной антенны – 1.5 м.;
 - координаты точки фокусировки, м. – $(0, 0, 2)$;
 - ширина спектров моделируемых сигналов – 1000 МГц;
 - законы моделируемых спектров – равномерный, спадающий, нормальный, Релея;
- Спектры излучаемых широкополосных сигналов показаны на рис. 4.

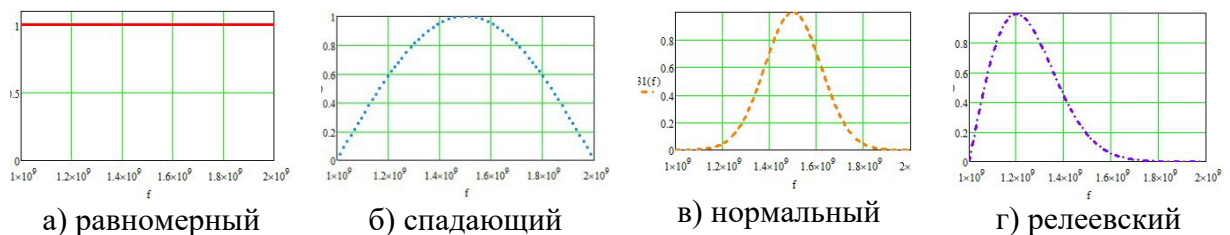


Рис. 4. Спектры излучаемых ШП электромагнитных полей

Нормированные осевые распределения энергии электромагнитного поля, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля на расстоянии 2 м. рассчитаны по формуле (1) и показаны в логарифмическом масштабе на рис. 5. Цвет графиков соответствует цвету спектральных распределений на рис. 4. Темно-зеленая сплошная линия – распределение, соответствующее монохроматическому сигналу, коричневая штрихпунктирная линия соответствует энергии широкополосного электромагнитного поля, излучаемой одиночным излучателем.

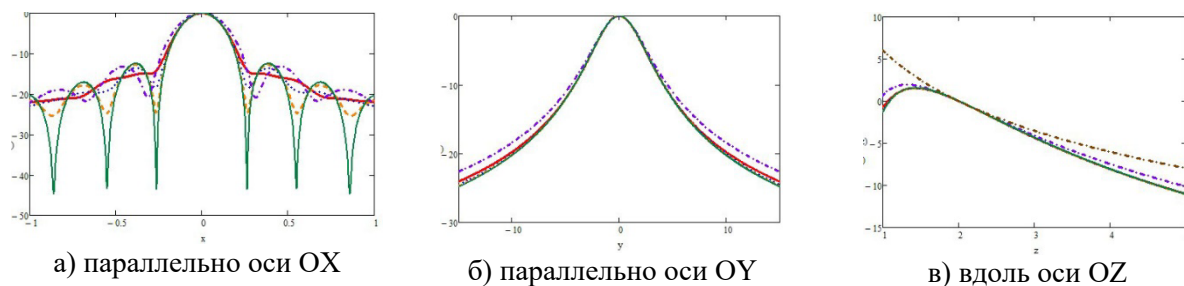


Рис. 5. Нормированные осевые распределения энергии электромагнитного поля, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля с непрерывным спектром шириной 1000 МГц

Как видно из графиков осевых распределений энергии, сфокусированным широкополосным электромагнитным полям свойственно хорошее совпадение значений в точке фокусировки и ее окрестности, а также эффект «заплывания нулей», приводящий к сглаживанию боковых лепестков. Для фокусировки в режиме концентрации энергии также характерно смещение максимума энергии поля в направлении к дискретной антенне, как и для сфокусированных монохроматических полей.

В таблице 1 представлены значения КНД, рассчитанные для различных фокусных расстояний. Видно, что численно значение КНД стремится к числу излучателей N .

Таблица 1. КНД сфокусированной дискретной антенны

№	Тип спектрального распределения	КНД при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
2.	Спадающий	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
3.	Нормальный	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
4.	Релеевский	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
5.	Монохроматический	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992

В таблицах 2 и 3 приведены поперечный и продольный размеры области фокусировки.

Таблица 2. Поперечный размер области фокусировки

№	Тип спектрального распределения	Поперечный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	0,24	0,36	0,58	1,12	2,24
2.	Спадающий	0,24	0,36	0,56	1,12	2,24
3.	Нормальный	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22
4.	Релеевский	0,24	0,4	0,66	1,32	2,6
5.	Монохроматический	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22

Таблица 3. Продольный размер области фокусировки

№	Тип спектрального распределения	Продольный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	5,38	8,24	13,98	28,2	56,54
2.	Спадающий	1,82	8,26	13,98	28,2	56,54
3.	Нормальный	1,79	8,26	13,98	28,2	56,54
4.	Релеевский	5,46	8,32	14,04	28,24	56,24
5.	Монохроматический	1,78	8,26	13,98	28,2	56,54

Размеры области фокусировки для широкополосных электромагнитных полей с симметричным спектром совпадают с размерами, рассчитанными для центральной частоты монохроматического электромагнитного поля. В случае несимметричного спектра предварительная оценка также может быть проведена для монохроматического сигнала с частотой, соответствующей наиболее интенсивной частотной компоненте широкополосного несимметричного спектра. При расстояниях до точки фокусировки порядка пяти – шести размеров апертуры эффект фокусировки деградирует и при больших расстояниях практически утрачивается.

Для пространственных распределений энергии широкополосных электромагнитных полей, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля характерен эффект «заплывания» нулей, приводящий к сглаживанию боковых лепестков. В связи с этим оценка уровня боковых лепестков, как максимального значения энергии сфокусированного широкополосного электромагнитного поля за пределами области фокусировки затруднительно. Однако существует возможность интегрально оценить уровень побочного излучения широкополосного сфокусированного электромагнитного поля проводя сравнение с пространственным распределением энергии широкополосного электромагнитного поля от одиночного ненаправленного излучателя, располагающегося в центре сфокусированной линейной дискретной антенны. Оценку будем проводить при равенстве излучаемых мощностей. Тогда коэффициент скрытности равен:

$$K_{скр} = 10 \lg \frac{\int_{x_0}^{x_{zp}} \int_{z_0}^{z_{zp}} |E_{ин.эн}^{прд.эн}(x, y_0, z)|^2 dz dx}{\int_{x_0}^{x_{zp}} \int_{z_0}^{z_{zp}} |E_{ин.из}^{прд.эн}(x, y_0, z)|^2 dz dx}, \quad (5)$$

где x_{zp} выбирается из условия $|E_{ин.из}^{прд.эн}(x, y_0, z_0)|^2 = 0.1$, а z_{zp} из условия $|E_{ин.из}^{прд.эн}(x_0, y_0, z)|^2 = 0.1$. Результаты приведены в таблице 4 и на рис. 6.

Таблица 4. Коэффициент скрытности сфокусированной дискретной антенны

№	Тип спектрального распределения	$K_{скр}$, дБ при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	-11,65	-11,82	-11,91	-11,95	-11,96
2.	Спадающий	-11,75	-11,92	-12,01	-12,05	-12,06
3.	Нормальный	-11,80	-11,97	-12,06	-12,10	-12,11
4.	Релеевский	-11,12	-11,29	-11,37	-11,41	-11,42
5.	Монохроматический	-11,81	-11,98	-12,08	-12,11	-12,12

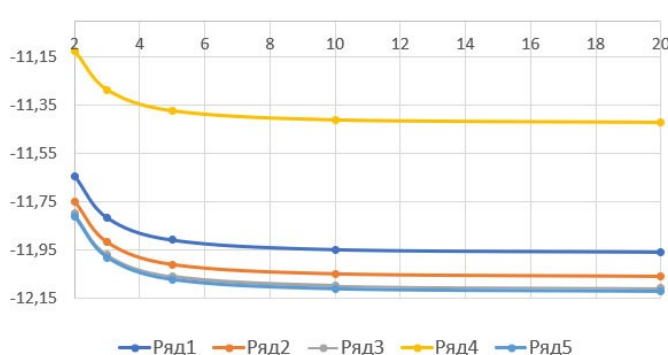


Рис. 6. Зависимость $K_{скр}$ линейной СФДА от расстояния до точки фокусировки

По данным из таблицы 4 можно сделать вывод, что по мере увеличения фокусного расстояния коэффициент скрытности снижается и стремится к значению $10\lg \frac{1}{N}$ где N – количество излучателей линейной дискретной антенны. Для несимметричного спектра с преобладанием низкочастотных компонент наблюдается повышение величины $K_{скр}$. В качестве предельной оценки $K_{скр}$ может быть использована величина, рассчитанная для монохроматического сигнала.

Основные свойства линейных дискретных антенн, сфокусированных в режиме передачи сигнала

Рассмотрим линейную дискретную антенну, сфокусированную в режиме передачи сигнала. Исходные данные линейной дискретной антенны и виды спектральных распределений идентичны рассмотренным ранее. Осевые распределения энергии представлены на рис. 7.

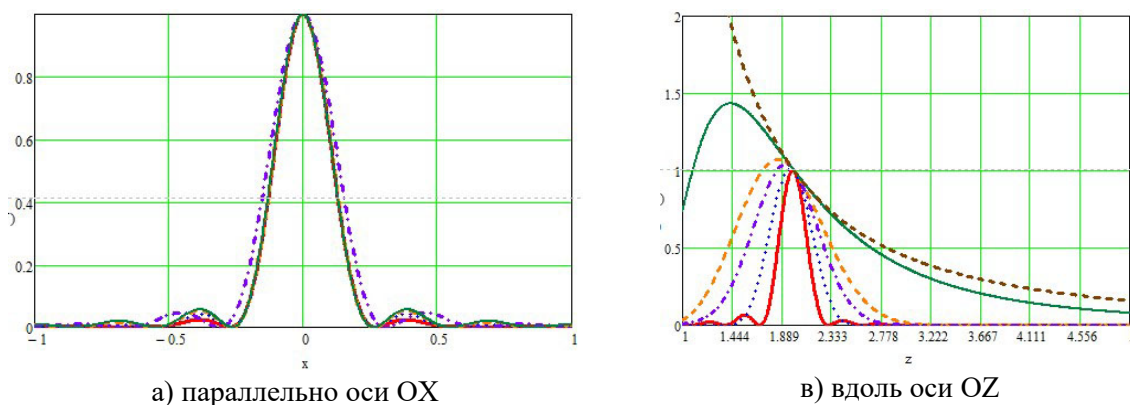


Рис. 7. Нормированные осевые распределения энергии широкополосного сигнала, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля в режиме передачи сигнала с непрерывным спектром шириной 1000 МГц

Как видно из графиков на рис. 7 смещение максимума энергии, сфокусированного в режиме передачи сигнала, электромагнитного поля практически отсутствует.

Коэффициент направленного действия, по мере увеличения фокусного расстояния, стремится к величине, численно равной количеству излучателей, аналогично случаю функционирования в режиме концентрации энергии. В таблице 5 приведены поперечные

размеры области фокусировки, а в таблице 6 – продольные размеры для различных фокусных расстояний.

Таблица 5. Поперечный размер области фокусировки,

№	Тип спектрального распределения	Поперечный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	0,24	0,34	0,56	1,1	2,16
2.	Спадающий	0,24	0,34	0,56	1,12	2,2
3.	Нормальный	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22
4.	Релеевский	0,28	0,4	0,66	1,3	2,58
5.	Монохроматический	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22

Таблица 6. Продольный размер области фокусировки,

№	Тип спектрального распределения	Продольный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	0,28	0,28	0,27	0,28	0,28
2.	Спадающий	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44
3.	Нормальный	0,95	0,98	0,97	0,95	0,95
4.	Релеевский	0,7	0,69	0,69	0,68	0,68
5.	Монохроматический	1,78	8,26	13,98	28,2	56,54

Как видно из данных таблиц 5 и 6, поперечный размер возрастает по мере увеличения фокусного расстояния и его численная оценка близка поперечному размеру монохроматического сфокусированного поля. В свою очередь продольный размер для различных фокусных расстояний остается примерно одинаковым и значительно отличается от случая монохроматического сфокусированного поля, зависит от ширины спектра сигнала. Продольный размер может быть оценен как $c/\Delta f_{0,5}$, где c - скорость электромагнитной волны, $\Delta f_{0,5}$ - ширина спектра по уровню 0,5.

Коэффициент скрытности в режиме передачи сигнала несколько меньше, чем в режиме концентрации энергии. Численные значения приведены в таблице 7.

Таблица 7. $K_{скр}$ сфокусированной линейной дискретной антенны

№	Тип спектрального распределения	$K_{скр}$, дБ при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	-22,72	-24,58	-26,90	-30,10	-33,37
2.	Спадающий	-21,04	-22,89	-25,19	-28,35	-31,59
3.	Нормальный	-17,89	-19,63	-21,81	-24,83	-27,94
4.	Релеевский	-18,48	-20,27	-22,51	-25,61	-28,80
5.	Монохроматический	-12,14	-12,31	-12,41	-12,45	-12,46

Как видно по данным таблицы 7, коэффициент скрытности при различных фокусных расстояниях меньше на величину порядка -10 -20 дБ по сравнению со сфокусированным монохроматическим электромагнитным полем. Чем больше ширина спектра по половинному уровню, тем меньше коэффициент скрытности.

Выводы

В работе представлены основные свойства широкополосных электромагнитных полей с непрерывным спектром, фокусируемых в различных режимах линейными дискретными антеннами в зоне ближнего излученного поля. Показано, что для режима концентрации энергии все предложенные свойства широкополосных электромагнитных полей с симметричным спектром совпадают со свойствами сфокусированных монохроматических электромагнитных полей на центральной частоте, для случая несимметричного спектра также можно оценить основные свойства для случая монохроматического поля, частота которого совпадает с частотой наиболее интенсивной компоненты неравномерного спектра. Для случая функционирования в режиме передачи сигнала такие свойства, как КНД, поперечный размер области фокусировки также могут быть оценены для случая монохроматического сфокусированного поля. Продольный размер для различных фокусных расстояний остается постоянным и оценивается по формуле $c/\Delta f_{0,5}$, в качестве верхней оценки коэффициента скрытности для режима передачи сигнала может быть использована оценка для случая сфокусированного монохроматического электромагнитного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы ПРИОРИТЕТ-2030 и за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10059, <https://rscf.ru/project/23-79-10059/>.

Список литературы

1. Седельников Ю.Е. Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах / В.С. Кубланов, О.В. Потапова, Ю.Е. Седельников и др. // Журнал радиоэлектроники. - 2012. - №4. - С. 1-27.
2. Веденькин Д. А. Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего радиоволнового контроля / Д. А. Веденькин, Ю. Е. Седельников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 131-146. – DOI 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146. – EDN UEXGUJ.
3. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения / под общ. ред. Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т: Красноярск. - 2015. - 308 с.
4. Vedenkin D. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum-Difference Signal Processing / D. Vedenkin, O. Morozov, Y. Sedelnikov et al. // Electronics. – 2023. – 12. – № 2. – 436. <https://doi.org/10.3390/electronics12020436>
5. Buffi A. A Focused Planar Microstrip Array for 2.4 GHz RFID Readers / A. Buffi, A. A. Serra, P. Nepa et al. // in IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - V. 58, no. 5. - P. 1536-1544, May 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044331.
6. Сверхширокополосные антенны. Пер. с англ. под ред. Л.С. Бененсона. - М.: Мир, 1964. - 416 с.

BROADBAND LINEAR DISCRETE ANTENNAS FOCUSED IN THE NEAR RADIATE FIELD ZONE

D.A. Vedenkin

Kazan National Research University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The paper discusses broadband linear discrete antennas focused in the near radiated field zone. It is shown that when taking into account the properties of focused electromagnetic fields, it is necessary to take into account the methods of using the energy of the focused electromagnetic field in various operating modes. It is shown that for different modes, the spatial distribution functions of focused electromagnetic fields are different. The main properties of electromagnetic fields focused in the near radiated field zone are proposed and their quantitative estimates are given for various application modes.

Keywords: focusing of electromagnetic field; near radiated field zone; broadband electromagnetic field; focused discrete antenna.

Статья отправлена в редакцию 16 декабря 2024 г.

МУЛЬТИСФОКУСИРОВАННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ АНТЕННЫ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИЕ В РЕЖИМЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ

А.Ф. Гильфанова, Д.А. Веденькин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В статье представлены результаты исследования эффекта мультифокусировки в режиме концентрации энергии. Приведены параметры модели, рассмотрены различные случаи формирования максимумов пространственного распределения поля. В статье обсуждаются результаты моделирования линейной дискретной антенны, способной сформировать максимумы излучения в двух точках пространства. Проведен анализ влияния расстояний на возможность фокусировки, размеры области фокусировки и уровень боковых лепестков, а также представлена возможность формирования максимумов излучения при несимметричных точках фокусировки.

Ключевые слова: математическое моделирование, дискретная антенна, мультифокусированное излучение, двухчастотное излучение, распределение поля.

Введение

В настоящее время существует множество задач, в которых возникает необходимость формирования электромагнитных полей в локализованной области пространства [1], расположенной в зоне ближнего излученного поля [2]. Примером таких приложений может быть локальный нагрев, радиоволновая диагностика и т.д. При этом в ряде практических приложений может ставиться задача формирования несколько отдельных локальных максимумов, т.е. осуществить так называемый эффект мультифокусировки. Использование эффекта мультифокусировки может позволить уменьшить время проведения технологических процессов, повысить эффективность функционирования микроволновых технологических комплексов, функционирующих в зоне ближнего излученного поля.

Существует несколько методов формирования мультифокусированного излучения: разделение крупной дискретной антенны на ряд менее крупных, каждая из которых может быть сфокусирована в отдельную область пространства, и формирование многочастотного излучения каждым излучателем дискретной антенны и дальнейшая фокусировка электромагнитного поля на нескольких частотах в несколько отдельных точек [3].

В данной работе исследуем формирование мультифокусированного излучения с помощью двухчастотного излучения, например, сгенерированного по методу Ильина – Морозова [4], в режиме концентрации энергии. В этом случае распределение энергии электромагнитного поля, излучаемого N излучателями линейной дискретной антенны, расположенной вдоль оси OY , может быть записано как:

$$|E(x, y, z)|^2 = |E_1(x_1, y_1, z_1)|^2 + |E_2(x_2, y_2, z_2)|^2$$

или

$$|E(x, y, z)|^2 = \sum_{i=1}^2 \left| \sum_{n=1}^N I_{0i} \frac{\exp[-j \cdot k_i (R_{\varphi_{jn}} - R(x, y, z)_n)]}{R(x, y, z)_n} \right|^2, \quad (1)$$

где I_{0i} – амплитуды излучающих токов;

k_i – волновые числа;

$R_{\varphi i}$ – расстояния от каждого излучателя до точек фокусировки;

$R(x, y, z)$ – расстояния от каждого излучателя до точки наблюдения.

Моделирование антенны

Рассмотрим модель линейной сфокусированной антенной решётки со следующими параметрами [5]:

- количество излучателей — $N = 21$;
- расстояние между излучателями — 0.3 м;
- значения частот двухчастотного излучения — $f_1 = 0.95$ ГГц и $f_2 = 1.05$ ГГц;
- расстояния до точек фокусировки — 9 м;
- расстояние между точками фокусировки — 1.8 м.

Пространственное распределение энергии электромагнитного поля, построенное на основе данных моделирования, приведено на рисунке 1. На представленном рисунке имеются два ярко выраженных максимума, которые соответствуют заданным точкам фокусировки $F_1 = (9 \text{ м}, -0.9 \text{ м})$ и $F_2 = (9 \text{ м}, 0.9 \text{ м})$ для частот $f_1 = 0.95$ ГГц и $f_2 = 1.05$ ГГц, соответственно.

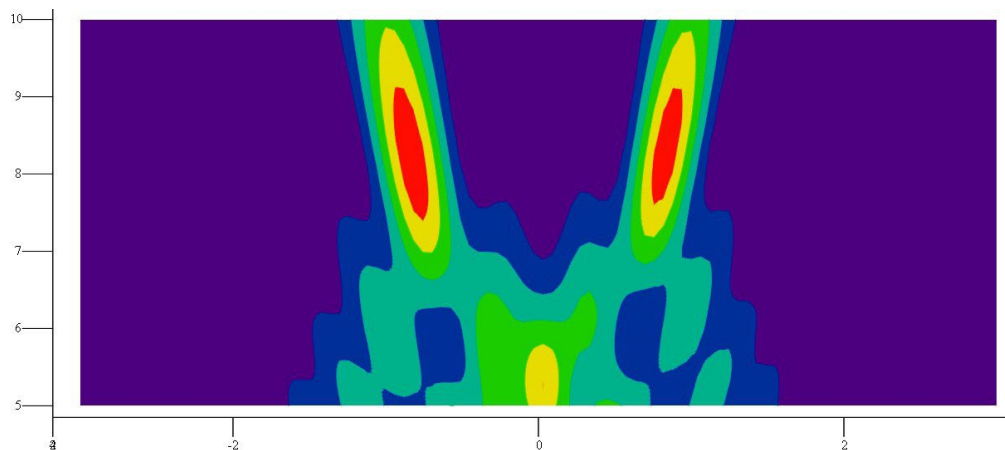


Рис. 1. Пространственное распределение энергии электромагнитного поля, сфокусированного в две точки пространства F_1 и F_2 на частотах f_1 и f_2 , соответственно

На рисунке 2 представлено распределение энергии электромагнитного поля по поперечной координате вдоль оси, проходящей через обе точки фокусировки и параллельной линейной дискретной антенне, где отчетливо видны два максимума энергии поля в точках фокусировки F_1 и F_2 , расположенные симметрично относительно оси Ox ; синим и зеленым цветами обозначены распределения энергии электромагнитного поля на частотах f_1 и f_2 , соответственно, а красным — суммарное распределение энергии поля в заданной области.

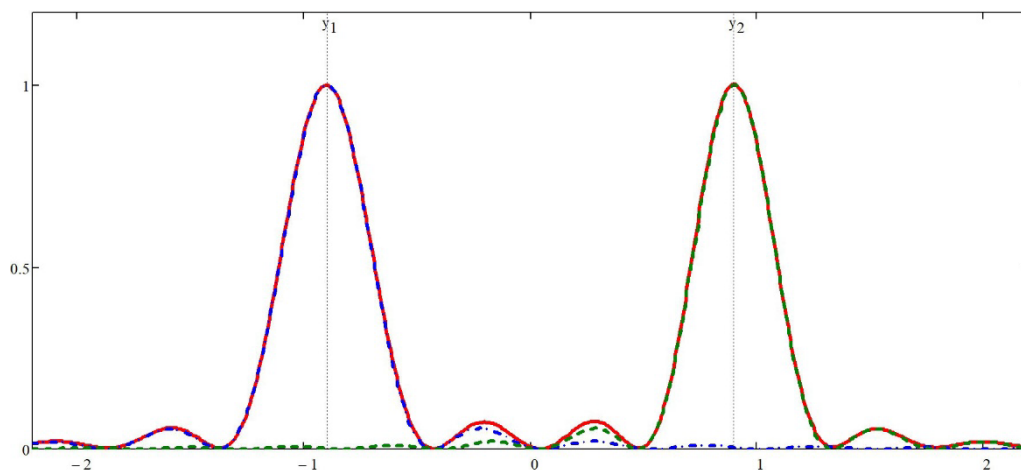


Рис. 2. Распределение энергии электромагнитного поля по поперечной координате

Рассмотрим осевые распределения энергии сфокусированного поля вдоль двух осей X, y_1 и X, y_2 , параллельных нормали к середине антенны и характеризующие продольные распределения энергии поля для каждой точки фокусировки.

На рисунке 3 представлены распределения энергии электромагнитного поля в точках фокусировки F_1 и F_2 по продольной координате. Можно заметить, что наблюдается эффект смещения точки фокусировки по продольной координате в сторону дискретной антенны. Этот эффект объясняется тем, что при движении от точек фокусировки в сторону дискретной антенны по продольной координате энергия сфокусированного поля по мере уменьшения расстояния в выражении (1) возрастает быстрее, чем убывает из-за все более несинфазного сложения парциальных полей от излучателей, следовательно результирующая величина энергии в данной точке оказывается больше энергии в точке фокусировки. Также можно отметить, что распределение поля получилось сглаженное и уровень боковых лепестков достаточно низкий.

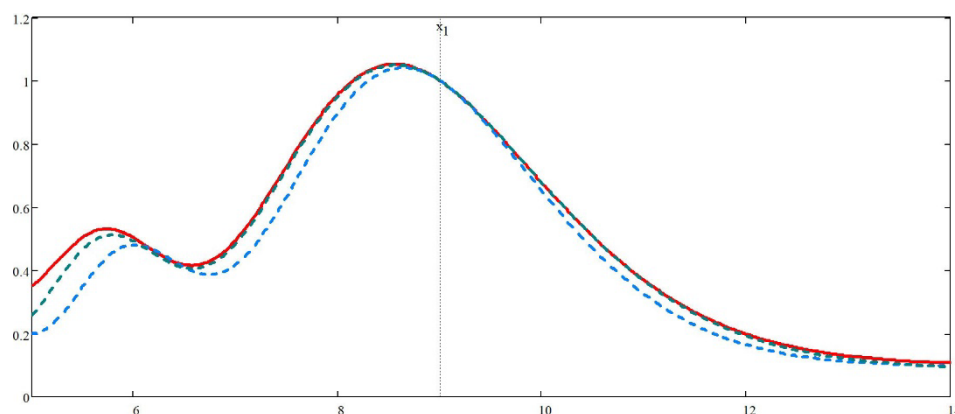


Рис. 3. Распределение энергии электромагнитного поля по продольной координате

Оценка размеров области фокусировки

Проведем оценку размеров области фокусировки при изменении расстояния до точек фокусировки R_Φ (при условии, что точки фокусировки равноудалены от апертуры антенны и от нормали к центру апертуры). В таблице приведены значения фокусного расстояния и значения размеров области фокусировки относительно оси OX (вдоль

направления излучения) и относительно оси OY (в поперечном направлении), определяемые по уровню 0.5 от максимума энергии сфокусированного электромагнитного поля.

Таблица – Зависимость размеров области фокусировки от фокусного расстояния

Фокусное расстояние, м	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12
Размер области фокусировки по оси OX для F_1 , м	0.724	1.177	1.791	2.574	3.512	4.604	6.16
Размер области фокусировки по оси OX для F_2 , м	0.658	1.068	1.627	2.325	3.199	4.196	5.922
Размер области фокусировки по оси OY для F_1 , м	0.092	0.12	0.149	0.18	0.212	0.242	0.277
Размер области фокусировки по оси OY для F_2 , м	0.092	0.12	0.15	0.181	0.213	0.242	0.278

В соответствии с таблицей построим зависимость размеров областей фокусировки от фокусного расстояния до точки фокусировки R_f , рисунок 4. По мере удаления от дискретной антенны, размер области фокусировки увеличивается, причем вдоль оси OX область фокусировки возрастает быстрее, чем вдоль оси OY . Однако, при фокусном расстоянии, равном или большем двум размерам апертуры антенны, значение размера области фокусировки по продольной координате увеличивается настолько, что эффект фокусировки сильно деградирует. Также можно отметить, что размер области фокусировки в первой точке фокусировки F_1 немного больше, чем во второй точке фокусировки F_2 , что хорошо видно при проведении измерения вдоль оси OX (рисунок 4а), что касается измерений вдоль оси OY (рисунок 4б), в этом случае размеры областей фокусировки практически одинаковые.

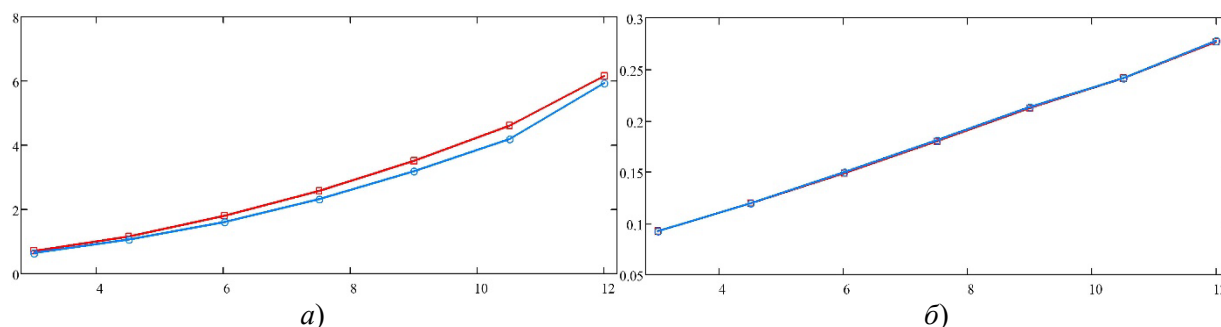


Рис. 4. Зависимость размеров области фокусировки вдоль разных осей от фокусного расстояния R_f : а) вдоль оси OX для F_1 (красная линия) и F_2 (синяя линия), б) вдоль оси OY

Рассмотрим отклонение максимума распределения энергии электромагнитного поля в поперечном направлении при фиксированном значении координаты точек фокусировки в продольном направлении. На рисунке 1 видно, что основная ось фигуры фокусировки ориентирована под углом к нормали, это значительно затрудняет оценку области фокусировки по обеим координатам. Ограничимся рядом пространственных распределений поля, по которым можно визуальнo оценить эффективность фокусировки энергии электромагнитного поля. При изменении расстояния между точками фокусировки F_1 и F_2 до значения 0.7 от размера апертуры антенны, что составляет 4.2 м, получим следующую картину распределения энергии электромагнитного поля, рисунок 5.

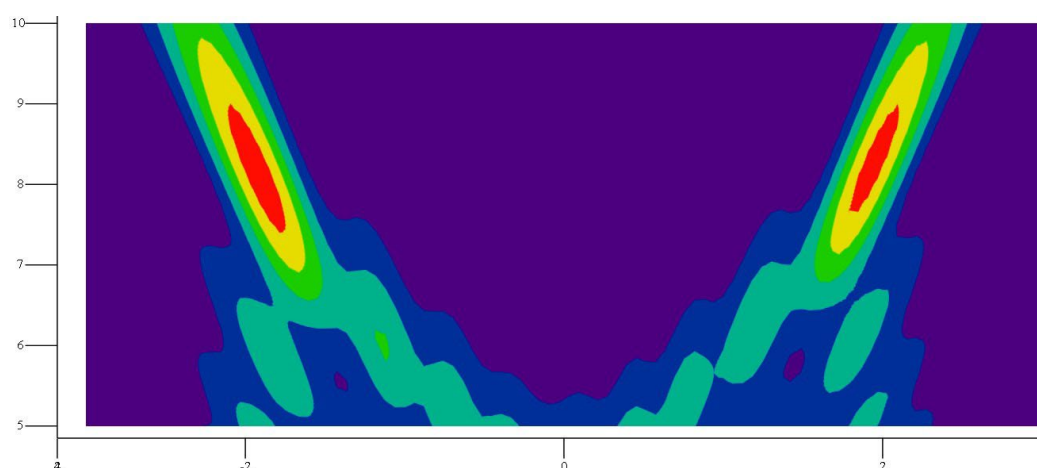


Рис. 5. Пространственное распределение энергии электромагнитного поля при расстоянии между точками фокусировки 4.2 м

При расстоянии между точками фокусировки F_1 и F_2 , равном размеру апертуры, что составляет 6 м, получим распределение энергии электромагнитного поля, представленное на рисунке 6. Можно заметить, что в заданных областях отсутствуют выраженные максимумы распределения энергии поля.

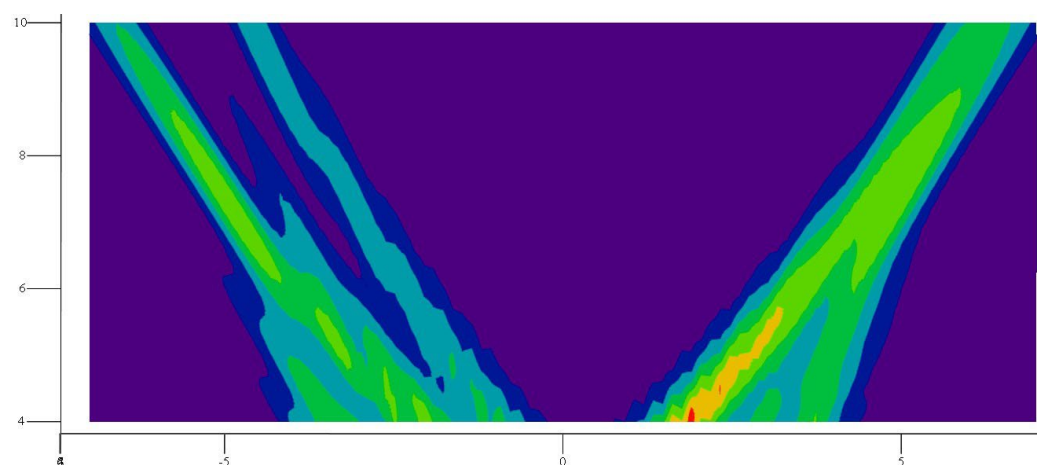


Рис. 6. Пространственное распределение энергии электромагнитного поля при расстоянии между точками фокусировки 6 м

Формирование мультисфокусированного излучения в продольном направлении

Рассмотрим формирование двух максимумов энергии электромагнитного поля, сфокусированных на одной прямой вдоль направления излучения. На рисунке 7 представлено распределение энергии электромагнитного поля в продольном направлении, сфокусированного в точках $x_1 = 3$ м и $x_2 = 6$ м, синим цветом обозначено поле на частоте f_2 , зеленым цветом — поле на частоте f_1 и красным — суммарное распределение поля в заданной области.

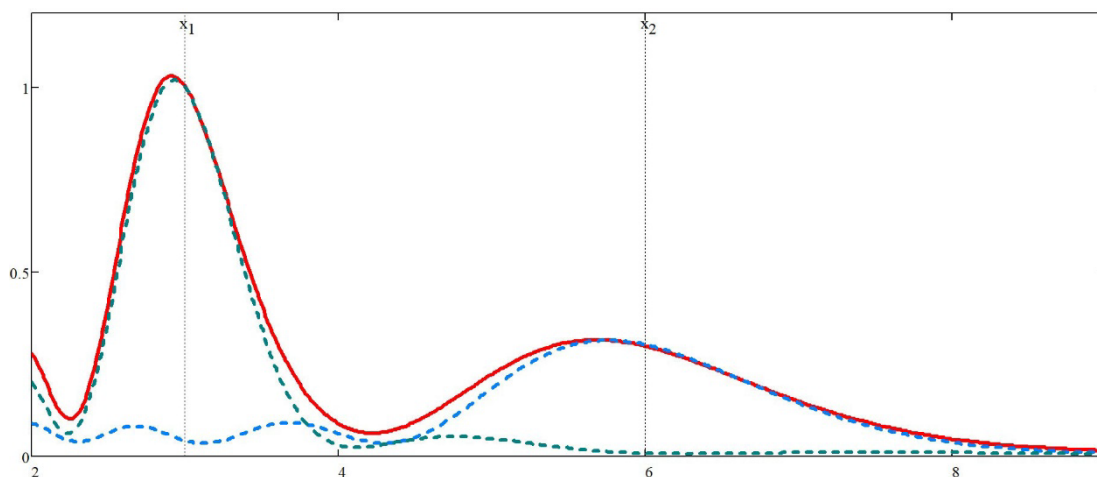


Рис. 7. Распределение энергии электромагнитного поля в поперечном направлении излучения

При формировании мультисфокусированного излучения таким способом формируются два ярко выраженных максимума, при этом достигается достаточно низкий уровень боковых лепестков.

Формирование асимметричной картины поля

Рассмотрим формирование мультисфокусированного излучения таким образом, когда точки фокусировки несимметричны относительно одной из осей. В этом случае, если значения амплитуд излучающих токов являются равными для обеих заданных частот излучения, формируется распределение энергии электромагнитного поля, представленное на рисунке 8.

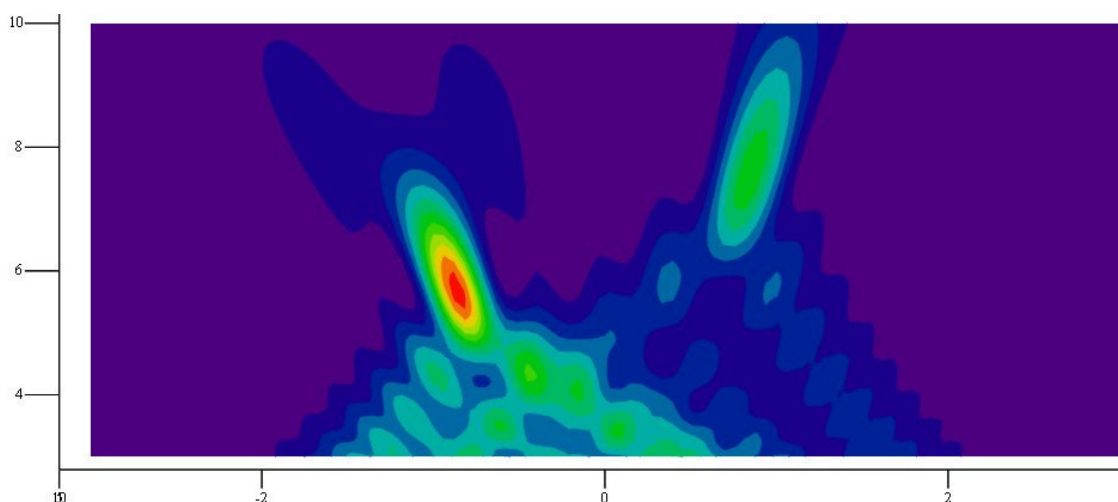


Рис. 8. Пространственное распределение энергии электромагнитного поля при асимметричном расположении точек фокусировки

Отметим, что в точке фокусировки $F_1 = (6 \text{ м}, -0.9 \text{ м})$ значение сфокусированной энергии выше, чем в точке $F_2 = (9 \text{ м}, 0.9 \text{ м})$. Это связано с тем, что расстояние до первой точки фокусировки меньше, чем до второй, и, согласно (1), суммарное значение энергии выше.

Дополнительно увеличить значение энергии, сфокусированной в точку F_2 , возможно при использовании разных амплитуд парциальных токов для различных частот излучения. Например, если, при формировании сфокусированного излучения с частотой f_2 , увеличить значение тока, обеспечивающего формирование второй точки фокусировки, в 1.3 раз, можно получить распределение энергии электромагнитного поля, представленное на рисунке 9.

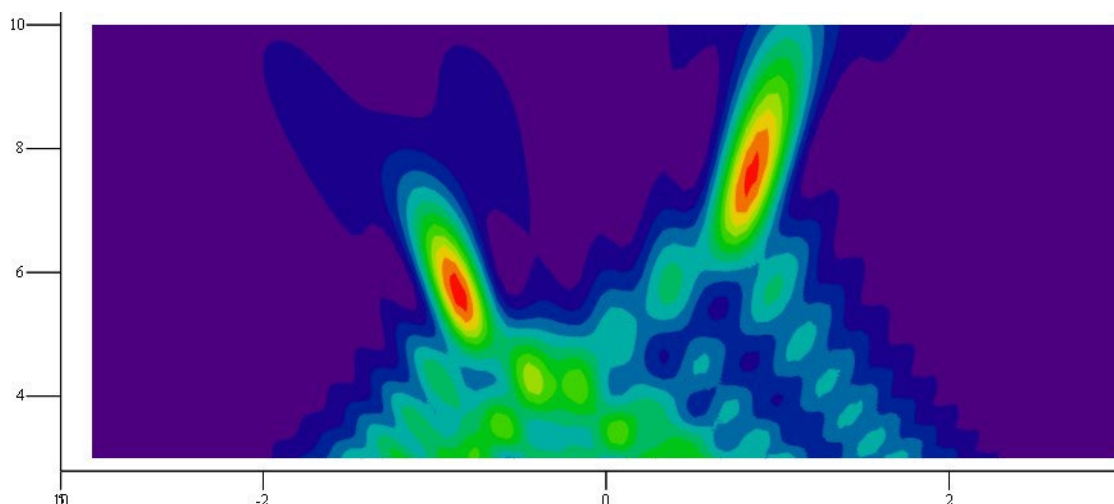


Рис. 9. Пространственное распределение энергии электромагнитного поля при асимметричном расположении точек фокусировки и увеличенном значении амплитуды парциальных токов, формирующих поле в точке F_2

Выводы

Проведенное моделирование формирования сфокусированного излучения в две точки пространства показало, что с увеличением фокусного расстояния размер области фокусировки увеличивается, но при фокусном расстоянии, равном или большем двух размеров апертуры антенны, эффект фокусировки исчезает. При значениях расстояния между точками фокусировки по поперечной координате равных или больших размера апертуры антенны пропадает эффект фокусировки.

Литература

1. Веденькин, Д. А. Свойства сфокусированных волновых полей в промежуточной зоне излучения / Д. А. Веденькин, Ю. Е. Седельников // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2016. – № 1(29). – С. 18-31. – EDN VUZXEL.
2. Сфокусированные антенны в задачах обработки загрязненных грунтов электромагнитным полем / Д. А. Веденькин, Ю. Е. Седельников, Н. А. Чикляев, И. Д. Филареева // Вестник НЦБЖД. – 2019. – № 1(39). – С. 135-143. – EDN XPVRWF.
3. Гильфанова А.Ф. Формирование мультисфокусированного излучения // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2024: Сборник тезисов докладов XI Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 300-летию со дня основания Российской Академии наук, 90-летию со дня рождения первых космонавтов СССР Ю.А. Гагарина

и А.А. Леонова, 90-летию первого выпуска КАИ, 65-летию начала регулярного телевизионного вещания в Республике Татарстан, Казань, 11-12 апреля 2024 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2024. – С. 69-70.

4. Веденькин, Д. А. Метод мультифокусировки в фазированных антенных решетках / Д. А. Веденькин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2021. – Т. 77, № 3. – С. 88-91. – EDN SSPIXQ.
5. Гильфанова А.Ф. Метод мультифокусировки электромагнитного поля в две точки пространства // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодежной научно конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 3690-3695.

MULTIFOCUSED LINEAR DISCRETE ANTENNAS FUNCTIONING IN THE ENERGY CONCENTRATION MODE

A.F. Gilfanova, D.A. Vedenkin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupoleva-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The paper presents the results of the study of the multifocusing effect in the energy concentration mode. The model parameters are given, different cases of formation of maximum spatial field distribution are considered. The paper discusses the results of modeling a linear discrete antenna capable of forming radiation peaks in two points of space. The influence of distances on the focusing capability, the size of the focusing area and the level of side lobes is analyzed, and the possibility of forming radiation peaks at asymmetric focusing points is presented.

Keywords: Mathematical modeling, discrete antenna, multifocus radiation, dual-frequency radiation, field distribution.

Статья отправлена в редакцию 18 декабря 2024 г.

ОПТОВОЛОКОННЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ ДАТЧИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА 5СВ

А.И. Гордеева¹, Д.И. Нурмухаметов^{1,2}, Р.С. Пономарёв¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Аннотация. В работе предложен и экспериментально протестирован амплитудный оптоволоконный датчик электромагнитного поля, изготовленный на основе полости микронного размера, заполненной жидким нематическим кристаллом 5СВ. Определена его чувствительность. Предложены варианты дальнейшей модификации.

Ключевые слова: оптоволоконный датчик, магнитное поле, жидкий кристалл.

Введение

Измерение магнитных и электрических полей в настоящее время является неотъемлемой частью построения электромагнитных устройств. В отличие от электрических датчиков, оптические датчики, основанные на оптоволоконных технологиях, обладают рядом значительных преимуществ: высокая частота сигнала и скорость передачи, электрическая пассивность и устойчивость к электромагнитным помехам. В настоящее время микрорезонаторные оптоволоконные датчики пользуются наибольшей популярностью благодаря простоте изготовления, дешевизне и малым размерам [1, 2]. В некоторых случаях для производства чувствительных элементов таких датчиков используют жидкие кристаллы (ЖК), которые меняют свои оптические свойства под действием внешних электромагнитных или температурных полей [3-8].

Многочисленные работы по использованию жидких кристаллов для изготовления датчиков электромагнитных полей описаны в работе [9]. В частности, представлен датчик высокого напряжения, который позволяет напрямую измерять электрическое поле до 800 кВ/м в распределенных точках вдоль линий электропередачи с точностью 0,1% при расстоянии измерения от 0,02 м до 200 м. В работе [10] подробно описана методика формирования волоконно-оптического датчика температуры на основе микрорезонатора. В работах [11, 12] представлены датчики электрического поля на основе фотонно-кристаллического волокна (ФКВ) с чувствительностью к электрическому полю в 1,1 нм/Vrms.

В работе [13] описано электрически перестраиваемое волоконно-оптическое устройство на основе интерферометра Маха-Цендера, который формируется путем сваривания участка полого волокна, заполненного ЖК Е7, с входным и выходным одномодовым волокном. Резонансная длина волны спектра, отраженная от чувствительной части датчика, модулируется приложенным электрическим полем переменного тока. Такой датчик дешев и прост в изготовлении, имеет малые размеры, высокую чувствительность

и хорошую повторяемость измерений. В работе [14] представлены результаты исследований статического двулучепреломления в нематическом жидком кристалле MBVA. Данные демонстрируют, что в зависимости от температуры среды в системе наблюдается сдвиг спектра поглощения, который может быть использован для оценки параметра порядка ЖК, а также для измерения температуры и электромагнитных полей.

В настоящей работе предложен и экспериментально протестирован амплитудный оптоволоконный датчик электромагнитного поля, изготовленный на основе полости микронного размера, заполненной ЖК 5СВ.

1. Экспериментальная методика

1.1. Изготовление чувствительного элемента

Создание чувствительного элемента амплитудного датчика электромагнитных полей осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе на торце оптического волокна формировалась полость диаметром порядка 100 мк, которая образуется при сваривании волокна-диффузора с одномодовым волокном SMF. В результате действия электрической дуги пузырьки газа внутри диффузора объединяются, образуя в месте сварки каверну объемом около $7 \cdot 10^4$ мкм³. Скалывание волокна позволяет обеспечить доступ к внутреннему объему полости для её дальнейшего заполнения различными жидкостями в том числе ЖК. Подробнее этапы создания полости, режимы сварки и итоговый размер формирующейся полости описан в работе [15]. В настоящей работе было изготовлено и заполнено две полости с диаметром устья 68 и 125 мкм.

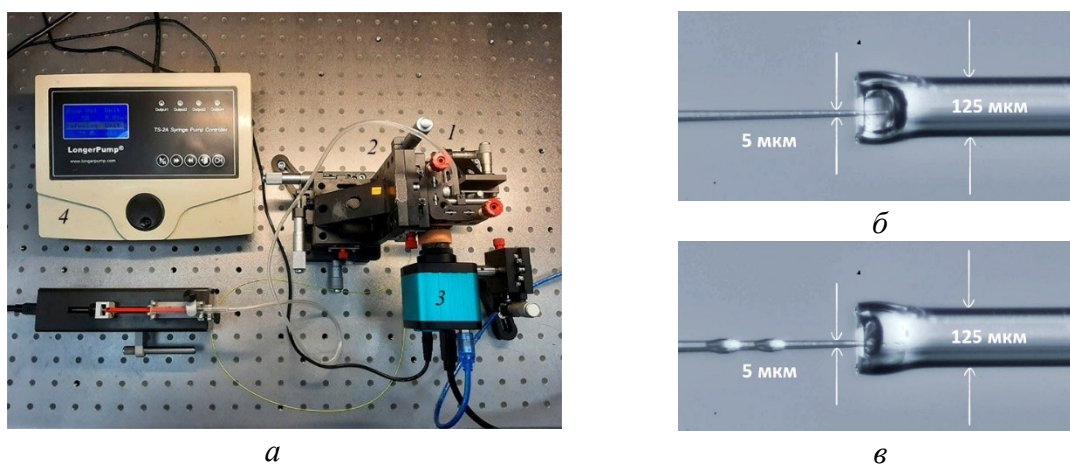


Рис. 1. Фото установки (а): 1 – микрокапилляр, 2 – трехосный позиционер, 3 – видеокамера, 4 – шприцевой насос; этапы заполнения полости ЖК (б, в)

Для контролируемого ввода ЖК в рабочую полость использовалась установка, фото которой приведено на рис. 1. Микрокапилляр 1 Femtotip Eppendorf (Германия) внешним диаметром 2 мкм фиксировался в держателе трехосного позиционера 2. Напротив капилляра располагался торец оптического волокна. С помощью позиционера под контролем видеокамеры 3 осуществлялась настройка соосности элементов. После юстировки кончик капилляра вводился в полость (рис. 1б) и с помощью шприцевого насоса 4 LongerPump TS-2A (UK) осуществлялось заполнение каверны ЖК заданного объема (рис. 1в).

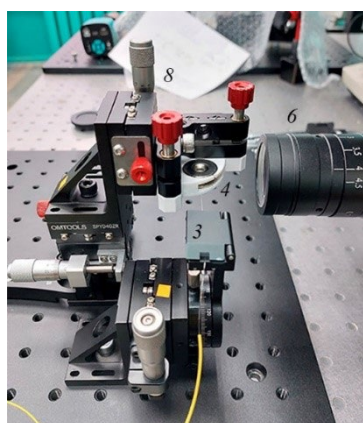
В качестве рабочего вещества в исследованиях использовался нематический жидкий кристалл 5CB ($T_{NI}=35,5^{\circ}\text{C}$, $\rho=1,0065\text{ г/см}^3$, $n_e=1,7$, $n_o=1,5$, $K=6,5 \cdot 10^{-7}\text{ дин}$, $\chi_a=1,7 \cdot 10^{-7}\text{ СГСЭ}$ взяты при $T=20^{\circ}\text{C}$), молекулы которого под действием внешнего магнитного поля значением H выше критического ориентируются по полю, меняя свои оптические свойства. В случае слабых полей силы упругости превосходят действие внешнего поля и нематик остается однородно ориентированным. Переориентация молекул носит название эффекта Фредерикса, а условие, определяющее критическое значение поля H_c , рассчитывается по формуле

$$H_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K}{\chi_a}},$$

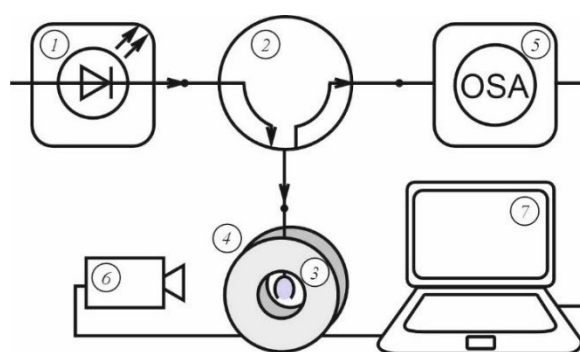
где K – это среднее значение трех модулей Франка, d – толщина слоя ЖК, $\chi_a = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ – разность магнитной восприимчивости [16]. Оценка порога напряженности магнитного поля 5CB, заполняющего полость диаметром 125 мкм, показала, что величина H_c равна 12,4 кА/м.

1.2. Тестирование чувствительного элемента

Проверка датчика и определение его чувствительности к воздействию внешнего магнитного поля осуществлялась на установке, фото и оптическая схема которой приведены на рис. 2. В ходе эксперимента лазерное излучение длиной волны 1550 нм от перестраиваемого узкополосного источника 1 Golight (США) при помощи циркулятора 2 направлялось в исследуемую полость 3.



а



б

Рис. 2. Фото установки (а); оптическая схема установки по тестированию чувствительного элемента амплитудного датчика электромагнитных полей: 1 – источник лазерного излучения, 2 – циркулятор, 3 – полость, заполненная ЖК, 4 – кольцевые магниты, 5 – оптический спектроанализатор, 6 – видеокамера, 7 – ПК, 8 – трехосный позиционер (б)

Полость, заполненная ЖК, помещалась в область однородного магнитного поля, создаваемого двумя соосно расположенными постоянными кольцевыми магнитами 4 (рис. 2а). Магниты (внешний диаметр 25 мм, внутренний – 10 мм, высота 2 мм) были зафиксированы в оснастке на расстоянии 3 мм друг от друга. Картина силовых линий магнитного поля для данной конструкции приведена на рис. 3а. Известно, что в центре системы существует зона однородного магнитного поля в виде цилиндра, в которой

величина неоднородности не превышает 2 % [17]. В работе для системы используемых магнитов была измерена индукция магнитного поля тесламетром с помощью датчика Холла. Рассчитаны значения напряженности магнитного поля H для точек, обозначенных на рис. 3а, которые равны $H_2= 191$ кА/м, $H_3= 159$ кА/м, $H_4=29,5$ кА/м.

В ходе эксперимента положение полости между точками варьировалось с помощью трехкоординатной подвижки 8. Оптический сигнал, прошедший через волокно и полость и отраженный от границы раздела ЖК-воздух, детектировался оптическим спектроанализатором 5 EXFO (США). Визуальный контроль за перемещением и прозрачностью ЖК осуществлялся видеокамерой 6. Запись видео и обработка сигнала велась на ПК 7.

2. Результаты и их анализ

В ходе эксперимента в работе были измерены значения мощности отраженного сигнала (рис. 3б) для трех положений полости относительно системы постоянных магнитов: 1 – в области с $H_1= 0$ А/м, в точке 2, где H_2 имело значение 191 кА/м, и точке 3 с $H_3= 159$ кА/м (рис. 3а). Точка 4 с аномально низким значением $H_4=29,5$ кА/м в экспериментах не рассматривалась. Графики $P(\lambda)$ для чувствительных элементов с диаметрами устья 68 и 125 мкм приведены на рис. 3б и рис. 3в соответственно.

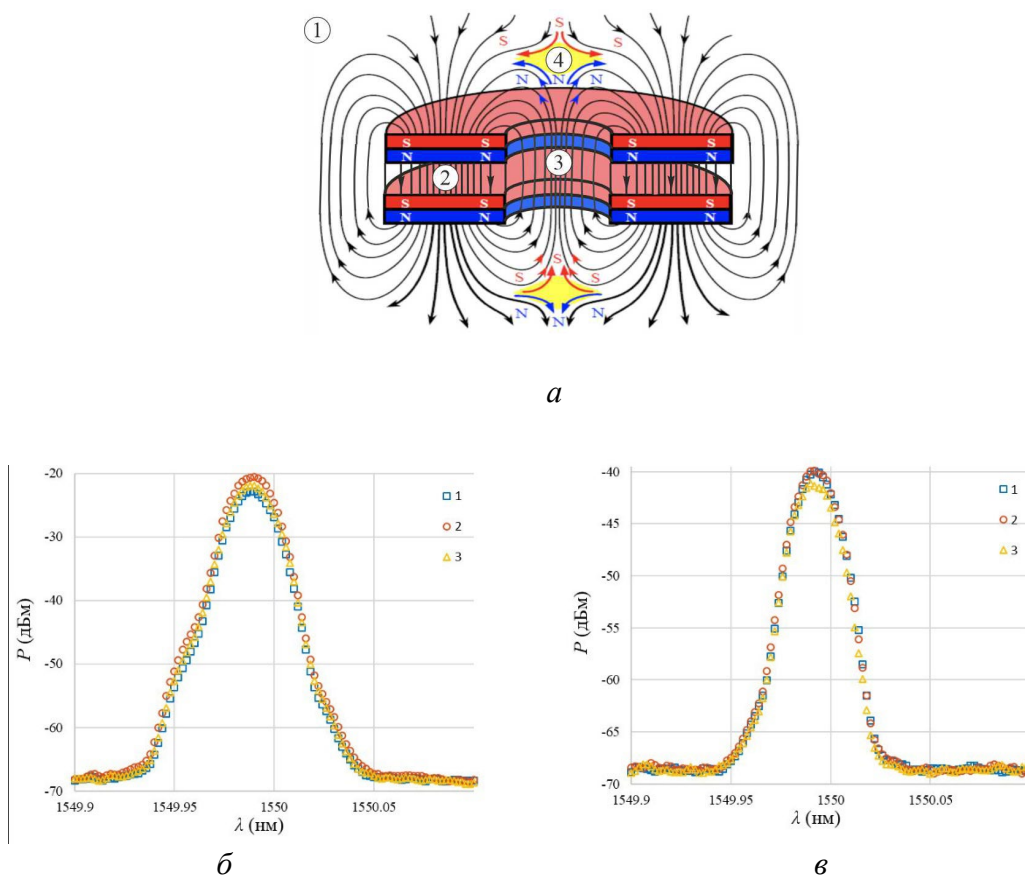


Рис. 3. Силовые линии в системе кольцевых магнитов (а); результаты измерения $P(\lambda)$ для полости с диаметром устья $d=68$ мкм (б), $d=125$ мкм (в)

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что различное позиционирование полости относительно магнитов не влияет на форму и положение пиков оптического спектра. На графиках наблюдается лишь незначительный рост амплитуды мощности отраженного сигнала с ростом напряженности магнитного поля (Таблица 1). При этом большее значение амплитуды детектировалось при использовании полости с меньшим диаметром устья. Также необходимо отметить тот факт, что визуально полость оставалась прозрачной не зависимо от положения чувствительного элемента в системе магнит-волокно во время всего проведения эксперимента.

Таблица 1. Значение мощности сигнала от величины магнитного поля

H , кА/м	P , дБм, $d=68$, мкм	P , дБм, $d=125$, мкм
0	– 22,828	– 40,939
191	– 21,937	– 40,762
159	– 20,615	– 38,824

Заключение

В работе описан процесс изготовления амплитудного оптоволоконного датчика электромагнитного поля в полости микронного размера с использованием жидкого нематического кристалла 5CB. Ожидалось, что молекулы ЖК, слой которого при нормальных условиях толщиной ≥ 100 мкм обычно слабо прозрачны, под действием внешнего магнитного поля будут менять свои оптические свойства в широких пределах. Однако, в работе было показано незначительное изменение амплитуды сигнала $P(\lambda)$, детектируемого при измерении величины напряжённости магнитного поля. Эффект можно объяснить тем, что введение вещества в каверну на торце волокна микронного размера через иглу диаметром 2 мкм могло механически выстроить вектор директора вдоль стенок полости. Ориентация молекул привела к тому, что кристалл стал прозрачен, а рабочий элемент датчика при этом потерял чувствительность к воздействию внешнего магнитного поля.

В качестве модификации разработанного устройства предлагается заменить нематик 5CB на холестерик. Для изготовления полости планируется использовать фотонно-кристаллические волокна с сохранением поляризации. Измерения проводить, основываясь на существовании в системе эффекта Фарадея, который вызывает вращение плоскости поляризации света при его распространении через чувствительный к магнитному полю кристалл.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FSNF-2024-0001.

Список литературы

1. Chen W. Recent Progress of Optical Fiber Fabry-Perot Sensors / W. Chen, L. Xiaohua, W. Zhang, L. Xianming, L. Changrong // Acta Optica Sinica. – 2018. – 38(3). – P. 0328010.
2. Islam M.R. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review / Islam M.R., Ali M., Lai M.-H., Lim K.-S., Ahmad H. // Sensors. – 2014. – 14. – P. 7451–7488.

3. Ki D. Oh Fiber-optic extrinsic Fabry–Perot dc magnetic field sensor / K.D. Oh, A. Wang, R.O. Claus // *Optics Letters*. – 2004. – 29(18). – P. 2115–2117.
4. Mozafari M. Design and fabrication of piezo-optical Fabry-Perot voltage sensor / Mozafari M., Sanjabi Z., Granpayeh N. // *Proceedings of the Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology* – 2008. – P. 39–40.
5. Chen Y. Recent Progress in MEMS Fiber-Optic Fabry–Perot Pressure Sensors / Y. Chen, D. Lu, H. Xing, H. Ding and et al // *Sensors* – 2024. – 24(4). – P.1079;
6. Humar M. Liquid-crystal-droplet optical microcavities / Humar M. // *Liquid Crystals* – 2016. – 43:13-15. – P. 1937-1950.
7. Chen X. Liquid Crystal-Embedded Tilted Fiber Grating Electric Field Intensity Sensor / Chen X., Du F., Guo T., Lao J. and et al. // *Journal of Lightwave Technology* – 2017. – 35(16).
8. Ma M. Highly sensitive temperature sensor based on Sagnac interferometer with liquid crystal photonic crystal fibers / Ma M., Chen H., Li S-G. and et al. // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics* – 2019. – 179. – P. 665–671.
9. Kaur Bal H. Optical Fiber Refractive Index, Voltage and Strain Sensors: Fabrication and Applications / Kaur Bal H. // *Centre for Telecommunication and Microelectronics Faculty of Health, Engineering and Science Victoria University* – 2011. – P. 98 –121.
10. Zhou D. Liquid crystal optical fiber sensor based on misaligned core configuration for temperature and mixed volatile organic compound detection / Zhou D., Lan Z., Cao W. and et al. // *Optics & Laser Technology* – 2022. – 156. – 108545.
11. Zhao C. An optical fiber electric field sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber selectively filled with liquid crystal / Zhao C., Cai L., Zhao Y. // *Microelectronic Engineering* – 2021. – 250. – 111639.
12. Liu Y. Fiber Optic Electric Field Intensity Sensor Based on Liquid Crystal-Filled Photonic Crystal Fiber Incorporated Ring Laser / Liu Y., Lin W., Vai M. I and et al. // *IEEE Photonics Journal* – 2022. – 14(1).
13. Liu Y. Electrically tunable optical fiber device based on hollow-core fiber infiltrated with liquid crystal / Liu Y., Zhao C., Zhang Ya-nan and et al. // *Sensors and Actuators A: Physical* – 2021. – 318. – 112500
14. Гилев В.Г. Температурная зависимость двулучепреломления в нематическом жидком кристалле MBVA / Гилев В.Г., Платунова А.С. // *Вестник пермского университета. Физика*. – 2012. – 2(20). – С. 64-68.
15. Нурмухаметов Д.И. Формирование открытой полости на торце оптического волокна, как элемент чувствительной части универсального датчика Фабри-Перо / Нурмухаметов Д.И., Луценко А.С., Пономарев Р.С., Шмырова А.И. и др. // *Фотон-Экспресс* – 2023. – 5(189).
16. Романов В.П. Пороговые эффекты в жидких кристаллах / Романов В.П. // *Соровский образовательный журнал* – 2001. – 7(1). – С. 96-101.
17. https://imlab.narod.ru/M_Fields/2R_Magnets/2R_Magnets.htm.

FIBER-OPTIC AMPLITUDE SENSOR OF ELECTROMAGNETIC FIELDS BASED ON 5SV LIQUID CRYSTAL

A.I. Gordeeva¹, D.I. Nurmuhametov^{1,2}, R.S. Ponomarev¹

¹ Perm State University

15, Bukireva St., Perm, 614068, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University

29 Komsomolsky pr., Perm, 614990, Russian Federation

Abstract. A new amplitude fiber-optic electromagnetic field sensor based on a micron-sized cavity filled with 5SB liquid nematic crystals has been proposed and tested experimentally. The sensitivity of the sensor has been determined, and options for further improvement have been suggested.

Keywords: fiber optic sensor, magnetic field, liquid crystal.

Статья представлена в редакцию 02.12.2024

МАЛОСЕНСОРНЫЕ РАДИОФОТОННЫЕ АДРЕСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАНОМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В.В. Пуртов¹, А.Н.Д. Альхуссейн²

¹ ООО «Инфоком-СПБ», Российская Федерация,
Российская Федерация, 194156, г. Санкт-Петербург,
пр. Энгельса, д. 27, лит. БУ, корпус 40

² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, К. Маркса, 10

Аннотация. В работе представлены результаты исследования оптомеханики узкополосных классических волоконных брэгговских решеток (ВБР) с малым коэффициентом связи мод и записанной в них различными методами спектрально-адресной информации путем введения в их структуру двух симметричных фазовых π -сдвигов. Проведен анализ прохождения широкополосного лазерного излучения через спектрально-адресные ВБР (адресные-ВБР, А-ВБР) в малосенсорных приложениях. Приведено теоретическое обоснование способов измерения давления и температуры, в том числе для компенсации влияния температуры в манометрии. Предложена методика радиофотонного измерительного преобразования и определение его основных методических погрешностей. Дана постановка задачи контроля давления в верхнем и нижнем сфинктерах пищевода (по три датчика на каждый сфинктер с расстоянием между датчиками в 0,5–1 см). В качестве чувствительных элементов предложено использование массива А-ВБР с малым коэффициентом связи мод и спектрально-адресной информацией, определенной наличием двух симметричных дискретных фазовых π -сдвигов. Обосновывается теоретическая и математическая основа метода измерительного преобразования. В дополнение к математической модели предложена методика обеспечения равномерности шкалы измерений во всем диапазоне смещения центральных длины волн датчиков и методика компенсации флуктуаций мощности оптического излучения во всей системе в целом. Оптико-электронная схема измерительной системы, включает в себя шесть датчиков, сгруппированных в две группы по месту их размещения и в три группы по топологии их подключения. Обоснована корректность предложенной схемы и ее соответствие постановке задачи и методу измерительного преобразования, включая требование к однозначности определения амплитуд на адресных частотах датчиков.

Ключевые слова: математическое моделирование, адресная волоконная брэгговская решетка, манометрия высокого разрешения, радиофотоника.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу непрерывного контроля давления в верхнем и нижнем сфинктерах пищевода. Конструкция катетера предусматривает установку двух групп датчиков (по три датчика на каждую группу) в верхней и нижней частях катетера для контроля верхнего и нижнего сфинктеров пищевода, рисунок 1а), б).

Датчики в каждой группе расположены на расстоянии 0,5–1 см между собой, что позволяет проводить измерения в области обоих сфинктеров одновременно с учетом анатомических особенностей каждого пациента. В область действия каждого из сфинктеров попадает по одному датчику давления, что обеспечивает возможность одновременного съема информации с обоих сфинктеров одновременно, получая информацию с одного верхнего и одного нижнего датчиков.

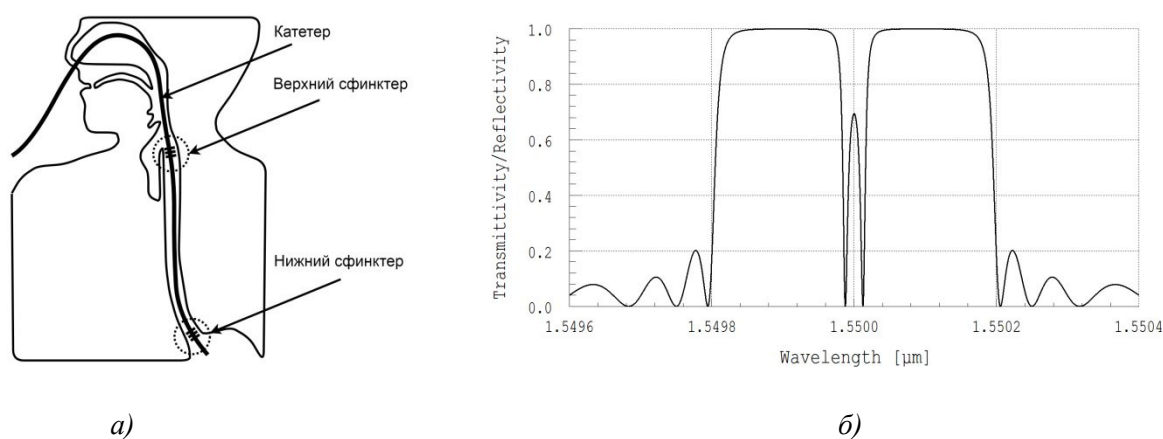


Рис. 1. Схема установки малосенсорного катетера (а) и спектральная характеристика используемых в катетере А-ВБР (б)

На рисунке 1 а), б) показан чувствительный элемент датчика – А-ВБР с малым коэффициентом связи мод и спектрально-адресной информацией, определенной двумя симметричными π -сдвигами, записанными в ней.

Таким образом, измерительная система представляет собой зонд (катетер), вводимый перорально, который содержит шесть датчиков давления, объединенных в две группы. В рабочем режиме показания снимаются с двух датчиков по одному из каждой группы, показания других датчиков могут быть использованы в качестве датчиков температуры. Фактически, имеется мало (шесть) сенсорная измерительная система. Диапазон измерения давления от 0 до 13,3 кПа, частота регистрации сигнала не менее 8 Гц с разрешающей способностью 2–10 Па.

В работе решается задача максимального упрощения и удешевления системы опроса, как одиночного оптоволоконного датчика на основе ВБР, так и массива таких датчиков. Задача исследовательской работы заключается в возможности объединить радиофотонные методы опроса с волоконными решетками Брэгга, настроенными на одну центральную длину волны. Прежде чем перейти к моделированию всей измерительной системы, приведем метод измерительного преобразования, используемый для определения центральной длины волны одиночной и двояной А-ВБР.

Метод измерительного преобразования

Основная идея заключается в том, чтобы перенести формирование двухчастотного радиофотонного сигнала с лазерного источника на ВБР структуру и, сделав ее разностную частоту уникальной характеристикой, сохранить за ней возможность оставаться чувствительным элементом измерительной системы [1–3]. Определим требования к спектральной форме адресной волоконной брэгговской структуре и оптико-электронной схеме опроса.

Разность частот между спектральными компонентами ВБР с двумя дискретными фазовыми π -сдвигами является инвариантной особенностью, что позволяет определить ее как адрес такой ВБР, а саму ВБР структуру с внесенной в нее адресной частотой, определить, как спектрально-адресную А-ВБР. Рассмотрим спектр прохождения лазерного излучения через А-ВБР структуру, которая сформирована волоконной брэгговской решеткой с двумя дискретными фазовыми π -сдвигами. Спектр А-ВБР выберем согласно приведенным в [4] рекомендациям.

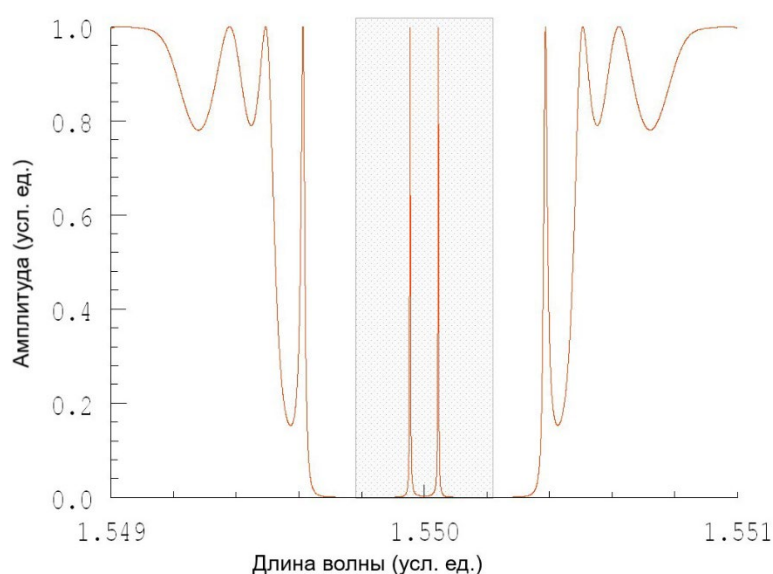


Рис.2. Спектр прохождения для А-ВБР с двумя дискретными фазовыми π -сдвигами. Заштрихованной областью на спектре обозначена часть излучения, поступающая на фотоприемник

Область спектра А-ВБР выберем таким образом, чтобы в область фотоприемника попадал свет только от двух центральных спектральных компонент при любом смещении центральной длины волны А-ВБР (заштриховано на рисунке 2).

Абсолютные значения частот, формируемых А-ВБР, много больше разностной частоты между ними, следовательно, на фотоприемнике будут возникать биения мощности сигнала, прошедшего через А-ВБР структуру, с частотой, равной разностной частоте между оптическими несущими. Глубина и амплитуда модуляции этих биений несут в себе информацию о центральной длине волны А-ВБР структуры.

Для того, чтобы разностную частоту А-ВБР можно было бы использовать в качестве уникальной характерной особенности, необходимо потребовать, чтобы в измерительной системе адрес не менялся при сдвиге центральной длины волны и в системе не было бы А-ВБР структур с совпадающими адресами. Оптико-электронная схема опроса А-ВБР приведена на рисунке 3.

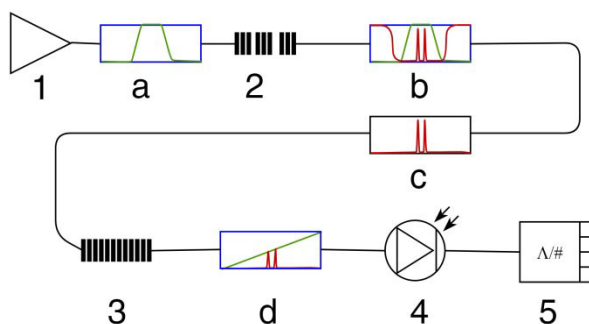


Рис.3. Оптико-электронная схема опроса одиночной А-ВБР на прохождение сигнала: 1 – широкополосный лазерный источник; 2 – А-ВБР; 3 – фильтр с наклонной АЧХ; 4 – фотоприемник; 5 – АЦП

Широкополосный лазерный источник – 1 формирует широкополосное непрерывное лазерное излучение, которое проходит через А-ВБР – 2 с формированием двухчастотного непрерывного лазерного излучения (с), которое, проходя через фильтр с наклонной

АЧХ – 3, образует двухчастотное лазерное излучение (d) с модифицированными амплитудами. Полученное излучение принимается на фотоприемнике – 4, оцифровывается на АЦП – 5, и обрабатывается в блоке обработки цифрового сигнала, который на схеме не показан.

Спектральные формы окон прозрачности в А-ВБР описываются лоренцевским контуром.

$$\aleph(\omega) = \frac{\aleph_0}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma} \right)^2}, \quad (1)$$

где $\aleph_0$ – амплитудный коэффициент, γ – добротность, ω_0 – центральная длина волны контура. Излучение, формируемое одним из таких окон прозрачности с лоренцевым контуром, можно записать как предельную сумму – интеграл – излучений на частотах, входящих в этот контур:

$$A(t) = A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma} \right)^2} d\omega, \quad (2)$$

где ω_0 – центральная частота гармоники, φ – ее начальная фаза, A_0 – амплитуда.

Сумма колебаний двух излучений описывает математическую модель светового отклика, центральной части А-ВБР, которая пропорциональна:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{A \cos(\omega t + \varphi_A)}{1 + \left(\frac{\omega - (\omega_0 - \Omega / 2)}{\gamma} \right)^2} + \frac{B \cos(\omega t + \varphi_B)}{1 + \left(\frac{\omega - (\omega_0 + \Omega / 2)}{\gamma} \right)^2} \right] d\omega. \quad (3)$$

В (3) использованы обозначения ω_0 – центральная длина волны А-ВБР, Ω – разностная (адресная) частота, φ_A и φ_B – начальные фазы, A и B – амплитуды левой и правой частотных компонент, γ – добротность контуров. При засветке А-ВБР широкополосным когерентным лазерным излучением можно считать, что $\varphi_A \cong \varphi_B$ с высокой степенью точности, обозначим их за φ и перепишем (3) в виде:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{A}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0 + \Omega / 2}{\gamma} \right)^2} + \frac{B}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0 - \Omega / 2}{\gamma} \right)^2} \right] \cos(\omega t + \varphi) d\omega. \quad (4)$$

С уменьшением γ резонансный контур, описываемый лоренцевской кривой, становится уже, рисунок .4.

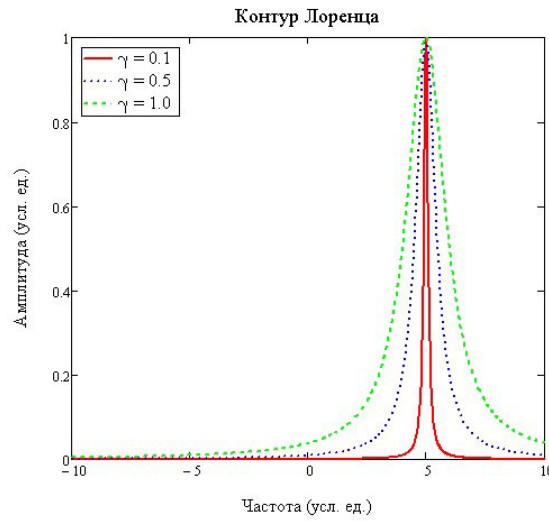


Рис.4. Зависимость лоренцевского контура от его добротности

В предельном случае, для сверхузких резонансных контуров, лоренцевский контур можно описать дельта-функцией:

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} A(t) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left(A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma} \right)^2} d\omega \right) = A_0 \delta(\omega_0) \sin(\omega_0 t + \varphi) . \quad (5)$$

Суммарный двухчастотный отклик, следовательно, может быть записан как сумма колебаний на несущих частотах:

$$F(t) = A e^{j\left(\left(\omega_0 - \frac{\Omega}{2}\right)t + \varphi\right)} + B e^{j\left(\left(\omega_0 + \frac{\Omega}{2}\right)t + \varphi\right)} . \quad (6)$$

Исследуем ток на фотоприемнике, который возникает при приеме излучения, возникающего при прохождении широкополосного лазерного излучения через А-ВБР. Несущие частоты узкополосных оптических излучений лежат в оптической частотной области, а разностная адресная частота А-ВБР расположена в радиочастотной области электромагнитного спектра излучения. Широкополосное непрерывное излучение, направленное на адресную А-ВБР структуру, формирует двухчастотное лазерное излучение, математическая запись отклика которого представляется в виде алгебраической суммы двух колебаний на характерных оптических частотах в виде (7):

$$R(t) = A \cdot e^{j(\omega \cdot t + \varphi_A)} + B \cdot e^{j((\omega + \Omega) \cdot t + \varphi_B)} , \quad (7)$$

где A – амплитуда колебаний на частоте ω , B – амплитуда колебаний на частоте $\omega + \Omega$, Ω – разность частот между правой и левой составляющей двух частотного отклика А-ВБР, определяемая как адресная частота А-ВБР. Выражение (7) переписано в терминах частот, описывающих положение левой и правой частот А-АБР, где ω – определяет положение левой частотной компоненты, а $\omega + \Omega$ – правой частотной компоненты.

В условиях математической модели потребуем равенство амплитуд $A = B$ на частотах ω и $\omega + \Omega$ для А-ВБР структуры при направлении на нее равномерного спектрального излучения с прямоугольной спектральной формой.

Фотодетектор, входящий в состав фотоприёмника, является нелинейным квадратичным элементом, выходной ток которого пропорционален квадрату амплитуды падающего на него оптического поля, следовательно, суммарный отклик имеет вид (8):

$$F(t) = |R(t)|^2, \quad (8)$$

где $R(t)$ – световой поток, описываемый (7).

Предел чувствительности фотоприемника находится в радиочастотном диапазоне, в то время как несущие частоты лежат в оптическом частотном диапазоне. Исключив из (8) все высокие частоты, получим колебаний интенсивности светового потока:

$$P(t) = A(\omega)^2 + B(\omega)^2 + 2A(\omega)B(\omega) \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi_B - \varphi_A). \quad (9)$$

Если при смещении центральной частоты А-ВБР не происходит изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ ее частотных компонент (что в общем случае справедливо для А-ВБР), то как можно заметить из (9), изменение центральной частоты ($\omega_B = \omega + \Omega/2$) для А-ВБР не влечет за собой изменение колебаний интенсивности выходного тока фотоприемника. Для того, чтобы обеспечить возможность определения смещения центральной частоты А-ВБР, необходимо обеспечить монотонное изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ в зависимости от смещения ее центральной частоты. Для чего установим перед фотоприемником частотный фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, обеспечив тем самым изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ при смещении центральной частоты А-ВБР. На рисунке 5 приведена схема взаимодействия а-ВБР и фильтра с наклонной АЧХ.

Фильтр с наклонной АЧХ опишем линейной зависимостью вида:

$$L(\omega) = u \cdot \omega + v. \quad (10)$$

Тогда, изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ при прохождении оптического излучения от А-ВБР после фильтра с наклонной АЧХ запишется как:

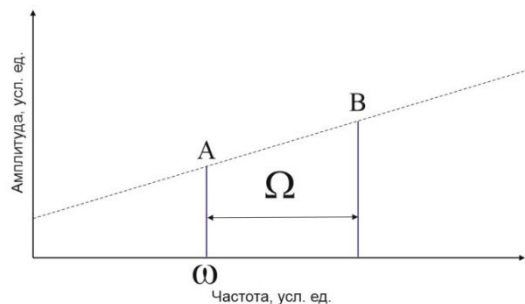


Рис. 5. Схема пояснение к взаимодействию А-ВБР с наложенным на нее частотным фильтром с наклонной АЧХ: сплошная линия – оптические составляющие А-ВБР, штриховая линия – фильтр с наклонной АЧХ

$$A(\omega) = L(\omega) = u \cdot \omega + v \text{ и } B(\omega) = L(\omega + \Omega) = u \cdot (\omega + \Omega) + v. \quad (11)$$

Зависимость интенсивности выходного тока фотоприемника от смещения центральной частоты а-ВБР примет вид:

$$P(t) = (u \cdot \omega + v)^2 + (u \cdot (\omega + \Omega) + v)^2 + 2(u \cdot \omega + v)(u \cdot (\omega + \Omega) + v) \cdot \cos(\Omega t) . \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет ввести единственный измеряемый параметр – коэффициент модуляции, который связывает параметры колебания интенсивности выходного тока фотоприемника со смещением центральной частоты А-ВБР.

Коэффициент модуляции колебаний интенсивности выходного тока фотоприемника записывается классическим выражением отношения разности максимальной и минимальной амплитуд колебаний к их сумме, что в свою очередь равно отношению амплитуды гармонической части (12) к постоянному уровню мощности:

$$M(\omega) = \frac{2A(\omega)B(\omega)}{A(\omega)^2 + B(\omega)^2} = \frac{2(u \cdot \omega + v)(u \cdot (\omega + \Omega) + v)}{(u \cdot \omega + v)^2 + (u \cdot (\omega + \Omega) + v)^2} . \quad (13)$$

Характерная зависимость величины коэффициента модуляции от смещения центральной частоты а-ВБР приведена на рисунке 6.

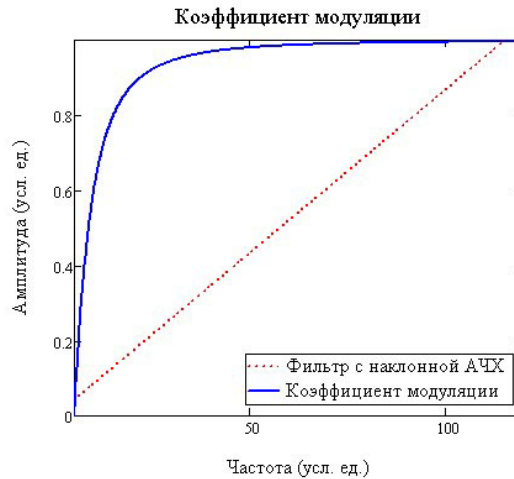


Рис. 6. Зависимость коэффициента модуляции на фотоприемнике от смещения центральной частоты А-ВБР

Как видно из рисунка 6, коэффициент модуляции монотонно меняется при смещении центральной частоты А-ВБР. То есть, можно однозначно определить обратную функцию $\omega(M)$, которая позволит определить смещение центральной частоты А-ВБР в зависимости от измеренного значения коэффициента модуляции $M(\omega)$.

Зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной частоты А-ВБР, разностной частоты А-ВБР и параметров фильтра с наклонной АЧХ является калибровочной характеристикой каждого такого сенсора и поставляется вместе с датчиком. Решение задачи обеспечения равномерности шкалы измерений и независимости определения центральной частоты от возможных флуктуаций мощности светового потока, не связанных с изменением ее центральной частоты, решены в [1] и в данной работе не рассматриваются. Отметим только, что первая задача решается за счет использования фильтра с нелинейной наклонной характеристикой в амплитудно-частотной плоскости, а вторая задача решается за счет введения опорного светового канала, независимо принимающего световой поток до фильтра с наклонной АЧХ, а вычисления ведутся с отношением мощностей в опорном и измерительном каналах.

Таким образом мы показали, что задача опроса одиночной А-ВБР структуры сложности не представляет и решается однозначно. Вместе с тем, включение

в измерительную систему второго А-ВБР датчика может существенно усложнить метод измерительного преобразования, поскольку на фотоприемнике будут происходить перекрестные биения уже не двух частотных составляющих, образующих адрес одиночной А-ВБР, а уже четырех частотных составляющих, две из которых формируют адрес первой А-ВБР, а две других адрес второй. В этом случае в электрическом сигнале после фотоприемника будут присутствовать не только адресные частоты, но и частоты, соответствующие перекрестным биениям левой частотной составляющей первого датчика с левой и правой частотными составляющими второго датчика, и соответственно правой частотной составляющей первого датчика с левой и правой частотными составляющими второго датчика. Всего же на фотоприемнике будет формироваться шестичастотный сигнал, две частоты из которых являются адресными частотами, а четыре остальные являются следствием двухчастотной природы А-ВБР. Сама по себе обработка шести частотного сигнала с фильтрацией его на адресных частотах не представляет особой проблемы, но только до тех пор, пока четыре дополнительные частоты случайно не совпадут с адресными частотами или не произойдет случайного совпадения оптических частот, формирующих адреса А-ВБР. Покажем, что и в этом случае информационной коллизии не происходит и задача может быть решена.

Рассмотрим математическую модель измерительной системы, содержащей два (А-ВБР₁ и А-ВБР₂) датчика с адресными частотами Ω_1 и Ω_2 . Без потери общности примем:

$$\Omega_1 > \Omega_2 . \quad (14)$$

На рисунке 7 приведена оптико-электронная схема опроса двух А-ВБР структур, где использованы обозначения: 1 – лазерный источник с частотой излучения эквивалентной диапазону изменения оптических частот; 6, 9 – оптоволоконные разветвители и 10 – объединитель мощности; 2.1 и 2.2 – А-ВБР датчики; 3 – фильтр с наклонной АЧХ; 4, 7 – измерительный и опорный фотоприемники; 5, 8 – измерительный и опорный АЦП.

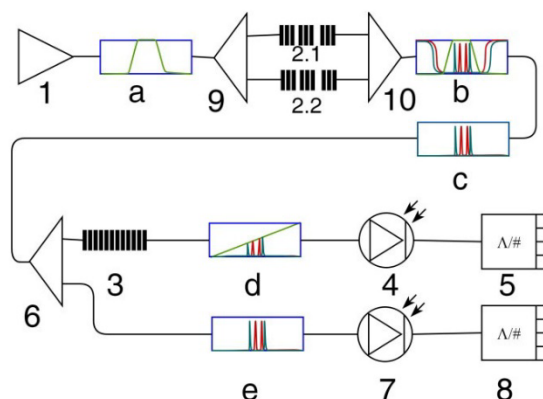


Рис. 7. Оптико-электронная схема опроса двух А-ВБР структур

Лазерный источник с частотным диапазоном, эквивалентным диапазону изменения оптических частот А-ВБР – 1, формирует лазерное излучение (а), которое делится на два одинаковых по мощности потока (на разветвителе – 9) и проходит через две А-ВБР структуры – 2.1 и 2.2; двухчастотное адресное излучение, сформированное в А-ВБР объединяется (сумматор – 10), а затем делится (разветвитель – 6) на измерительный и опорный световые потоки. Измерительный световой поток пропускается через фильтр с наклонной АЧХ – 3, затем оба потока принимаются каждый на свой фотоприемник – 4, 7 и оцифровываются – 5, 8. Измерительное преобразование производится для отношения мощностей в измерительном и опорном каналах.

Оптический сигнал, полученный от прохождения излучения через два датчика а-ВБР и попадающий на фотоприемник, можно записать в виде:

$$F(t) = \left| A_1 \cdot e^{j\omega_1 \cdot t} + B_1 \cdot e^{j(\omega_1 + \Omega_1) \cdot t} + A_2 \cdot e^{j\omega_2 \cdot t} + B_2 \cdot e^{j(\omega_2 + \Omega_2) \cdot t} \right|^2, \quad (15)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды левых и B_1 и B_2 – амплитуды правых частотных составляющих, формирующих адрес а-ВБР, ω_1 и ω_2 – частоты левых и $\omega_1 + \Omega_1$ и $\omega_2 + \Omega_2$ – частоты правых частотных компонент а-ВБР.

Электрический сигнала на выходе фотоприемника пропорционален:

$$P(t) = \left(\frac{A_1^2 + B_1^2 + A_2^2 + B_2^2}{2} \right) + (A_1 B_1 \cos(\Omega_1 t) + A_2 B_2 \cos(\Omega_2 t)) + \left[A_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2) t + A_1 B_2 \cos(\omega_1 - \omega_2 - \Omega_2) t + B_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1) t + B_1 B_2 \cos(\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1 - \Omega_2) t \right]. \quad (16)$$

Выражение (14) позволяет однозначно определить положение А-ВБР₁ и А-ВБР₂ структур почти всегда, кроме двенадцати случаев, когда частоты, возникающие в одном из четырех слагаемых в квадратных скобках, совпадают с адресными частотами Ω_1 или Ω_2 А-ВБР₁ и А-ВБР₂ структур. В [1] решена задача определения положения каждой А-ВБР как в общем случае, так и в случае возникновения в измерительной системе частот, совпадающих с адресными. Алгоритм, приведенный выше, может быть с успехом применим и в данном случае.

Существует еще один подход к построению двухсенсорной системы, позволяющий однозначно определить положение каждого из А-ВБР датчиков и заключается он в том, чтобы за счет подбора параметров А-ВБР, не допустить в измерительной системе частот, которые могут случайно совпасть с адресными частотами. На рисунке 8 приведена схема амплитудно-частотной характеристики прохождения светового излучения через две А-ВБР структуры, центральные частоты которых разнесены друг относительно друга на значительное расстояние.

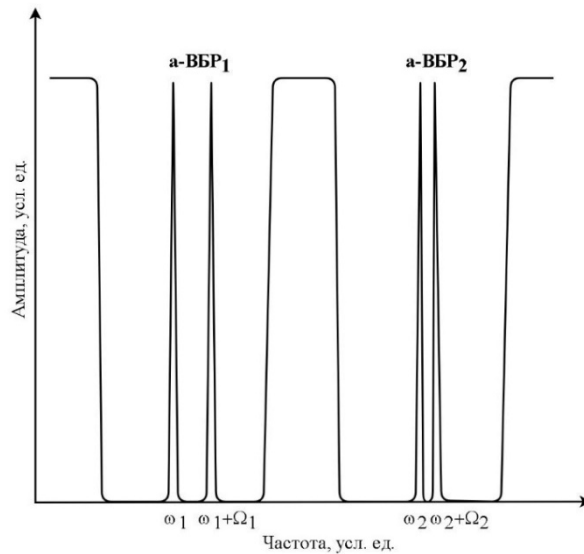


Рис. 8. Схема амплитудно-частотной характеристики прохождения широкополосного лазерного излучения через две А-ВБР структуры

Разнос центральных частот А-ВБР между собой на значительное расстояние (свыше 1,0–1,2 ТГц) при полной ширине А-ВБР на половине высоты (0,3–0,54 ТГц) и адресных частотах до 40 ГГц, позволяет избежать коллизий, связанных с возникновением в (16) совпадающих частот с адресными.

Дополнительно к этому, разнос центральных частот А-ВБР между собой на значительное расстояние позволяет проводить последовательное включение двух (а в общем случае и более) А-ВБР структур в одно оптическое волокно, что было бы невозможно в случае близких центральных частот А-ВБР. При близких центральных частотах на засветку адресных частотных компонент А-ВБР, следующей за первой, не хватало бы света, поскольку он блокировался бы предыдущей А-ВБР.

Исключение в третьем слагаемом (в квадратных скобках) (16) возникновения частот, совпадающих с адресными частотами Ω_1 и Ω_2 , позволяет использовать фильтрацию (16) на адресных частотах без риска попадания в амплитуду сигналов на адресных частотах посторонних, не связанных с воздействием давления, вкладов.

На рисунке 9 приведена оптико-электронная схема катетера высокого разрешения, включающего в себя внешний модуль и погружную часть зонда с датчиками. Датчики объединены в две группы по месту их расположения – три на одном конце зонда, три на другом и в три группы по топологии их подключения.

Определим диапазон изменения центральной длины волны оптоволоконного датчика в 2 нм, получим, что требуемая разрешающая способность определения центральной длины волны составит 0,3–1,5 пм для определения центральной частоты, что является вполне достижимой величиной для радиофотонных методов измерений.

Лазерный источник ЛИ (рисунок 9) направляет широкополосное лазерное излучение, которое, проходя через полосовой фильтр ПФ, формирует излучение, эквивалентное частотным диапазонам смещения центральных частот, входящих в измерительную систему А-ВБР датчиков. Сформированное излучение делится делителем СД на три оптических канала, в каждом из которых располагаются по два А-ВБР датчика (первый на одном, второй на другом конце зонда).

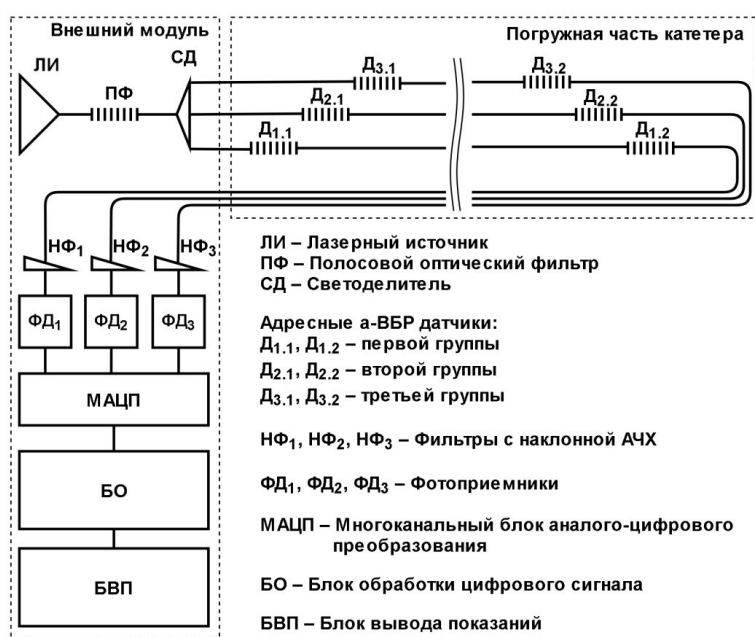


Рис. 9. Оптико-электронная схема катетера высокого разрешения

В каждом оптическом канале лазерное излучение, проходит через два А-ВБР датчика и проходит через фильтр с наклонной АЧХ, который асимметрично меняет амплитуды

частотных компонент, формирующих адресные частоты, после чего принимается на фотоприемнике. Электрический сигнал с каждого фотоприемника независимо оцифровывается на многоканальном АЦП и поступает в блок обработки, где осуществляется фильтрация сигналов в каждом канале на адресных частотах А-ВБР. После фильтрации сигнала на адресных частотах в режиме реального времени производится определение центральных частот А-ВБР датчиков согласно методике измерительного преобразования, описанной в разделе 2.2 настоящей главы, и вычисление показаний давления с выводом данных на монитор исследователя БВП.

Центральные и адресные частоты А-ВБР датчиков в каждом оптическом канале подбираются таким образом, чтобы, во-первых, исключить совпадение адресных частот, во-вторых, исключить пересечение спектров А-ВБР, так, чтобы их можно было включать последовательно вдоль одного участка волокна и одновременно избежать возникновения после фотоприемника частот, совпадающих с адресными.

Поскольку прием, обработка и анализ данных в каждом оптическом канале производится независимо, адресные и центральные частоты А-ВБР в каждом из оптических каналов могут быть выбраны одинаковыми, чтобы унифицировать элементную базу. То есть, можно допустить, а еще лучше потребовать, совпадения центральных и адресных частот между собой у $D_{1.1}$, $D_{2.1}$, $D_{3.1}$ и между собой у $D_{1.2}$, $D_{2.2}$, $D_{3.2}$.

Для каждой из двух А-ВБР, входящей в один оптический канал, может быть использован как собственный фильтр с наклонной АЧХ, так и один общий фильтр с наклонной АЧХ. А можно в качестве фильтра с наклонной АЧХ использовать специальным образом синтезированную ВБР, каждый из склонов которой будет использован в качестве наклонного фильтра отдельно для А-ВБР (рисунок. 10,а), что обеспечивает прием на фотодетекторе светового потока, спектр которого представляет собой четырехчастотное излучение, приведенное на рисунке. 10,б. Причем, выполнение требования исключения совпадения перекрестных частот адресным частотам А-ВБР позволяет обеспечить не только непересечение спектров А-ВБР₁ и А-ВБР₂, но и гарантировать то, что расстояние между ними всегда будет больше любой из адресных частот, входящих в оптический измерительный канал.

Заметим, что в качестве полосового фильтра, входящего в измерительную систему, могут быть использованы специальным образом структурированные волоконные брэгговские решетки.

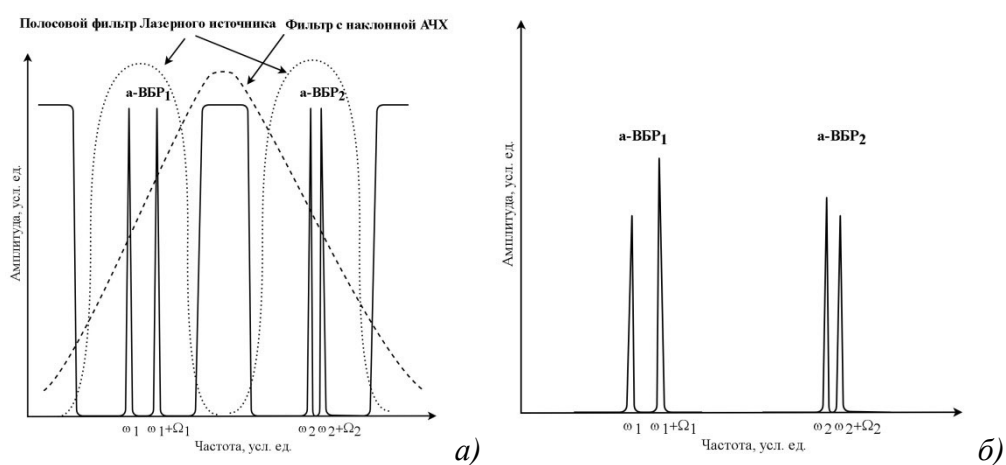


Рис. 10. Схема амплитудно-частотной характеристики прохождения широкополосного лазерного излучения через две А-ВБР структуры с наложенным фильтром с наклонной АЧХ и полосовым фильтром после лазерного источника

Требование унификации параметров датчиков в каждом из трех оптических каналов, автоматически ведет к тому, что и фильтры с наклонной АЧХ (НФ₁, НФ₂ и НФ₃, рисунок 9) должны быть одинаковы. Что не только упрощает требования к их созданию, но и упрощает задачу их температурной стабилизации.

Унифицированные А-ВБР структуры, фильтры с наклонной АЧХ и фотоприемники позволяют в рамках компьютерного и математического моделирования каждый из оптических каналов рассматривать отдельно, поскольку прием и обработка сигналов с них производится независимо. Более того, разнесение центральных частот А-ВБР в одном измерительном канале позволяет рассматривать каждый А-ВБР датчик независимо.

Заключение

В работе проанализированы особенности построения малосенсорных измерительных систем на базе адресных волоконных брэгговских структур с радиофотонным методом их опроса. Сделана постановка задачи малосенсорной измерительной системы манометрии высокого разрешения с двумя группами датчиков.

Приведен метод измерительного преобразования и математическая модель на его основе, описывающие прохождение широкополосного лазерного излучения через спектрально-адресную ВБР и включающие в себя оптико-электронную схему опроса одиночной спектрально-адресной ВБР. Рассмотрена математическая модель излучения, формируемого окнами прозрачности спектрально-адресной ВБР, и упрощение этой модели для сверх узких окон прозрачности. Обсуждается использование единственного измеряемого параметра, величина которого монотонно зависит от смещения центральной частоты спектрально-адресной ВБР. предложен подход к опросу двух А-ВБР структур с последовательным включением их в одно оптическое волокно, с одновременным устранением проблем, связанных с возникновением в измерительной системе ложных частот, совпадающих с адресными частотами А-ВБР.

Предложена оптико-электронная схема малосенсорной измерительной системы, учитывающей группировку датчиков по месту их расположения и по оптическим измерительным каналам. Показано, что в оптических измерительных каналах можно использовать два последовательно включенных спектрально-адресных А-ВБР датчика с разнесенными центральными частотами. Решена задача унификации элементной базы в малосенсорной измерительной системе. Показано, что за счет унификации элементной базы в системе могут быть использованы только два типа А-ВБР структур в качестве чувствительных элементов датчиков, один тип фильтров с наклонной АЧХ и один тип полосовых фильтров, накладываемых на исходное излучение. Показано, что предложенная оптико-электронная схема малосенсорной измерительной системы может быть расширена до многосенсорной измерительной системы путем простого увеличения количества измерительных каналов, фотоприемников, фильтров с наклонной АЧХ и каналов оцифровки данных. Показано, что ограничение это связано только с ограничением на энергетический бюджет всей оптической системы в целом. Предложенная оптико-электронная схема опроса является универсальной и может быть использована для построения измерительных систем для любых приложений.

Таким образом, решена задача малосенсорных манометрических измерений с высоким разрешением на примере мониторинга сфинктеров пищевода с помощью спектрально-адресных ВБР. Во-первых, они по своей конструктивной форме адаптированы к уже применяющимся в гастроскопии приборам. Во-вторых, позволяют использовать унифицированную доступную по стоимости элементную базу. В-третьих, позволяют производить точные замеры за счет радиофотонной обработки сигнала.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках программы «Приоритет 2030».

Литература

1. Сахабутдинов, А.Ж. Радиоволновые сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Казань, 2018.
2. Мисбахов, М. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей/ М. Мисбахов; Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. - 2017. - 46, 24.
3. Патент № RU 179264 U1 Российская Федерация, Волоконно-оптический термометр: № 2017139611; заявл. 14.11.2017: опубл. 07.05.2018 / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, А.А. Кузнецов.
4. Морозов, О.Г.; Сахабутдинов, А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиоволновых сенсорных системах / Морозов О.Г.; Сахабутдинов А.Ж. // Компьютерная оптика. - 2019. - 43, 535–543.

LOW-SENSOR MICROWAVE PHOTONICS ADDRESSABLE MEASUREMENT SYSTEMS FOR HIGH-RESOLUTION MANOMETRY

V.V. Purtov ¹, A.N.D. Alhussein ²

¹ Infocom-SPB LLC

40, 27-BU, Engels Avenue, St. Petersburg, 194156, Russian Federation,

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420011, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of a study of the optomechanics of narrow-band classical fiber Bragg gratings (FBGs) with a small mode coupling coefficient and spectrally-addressable information recorded in them by various methods by introducing two symmetric phase π -shifts into their structure. An analysis of the passage of broadband laser radiation through spectrally-addressable FBGs (addressable-FBGs, A-FBGs) in low-sensor applications is carried out. A theoretical substantiation of the methods for measuring pressure and temperature is given, including compensation for the effect of temperature in manometry. A technique for radiophotonic measuring conversion and determination of its main methodological errors are proposed. The problem of pressure monitoring in the upper and lower sphincters of the esophagus is stated (three sensors for each sphincter with a distance of 0.5–1 cm between the sensors). The proposed sensitive elements are an A-FBG array with a small mode coupling coefficient and spectral-address information determined by the presence of two symmetric discrete phase π -shifts. The theoretical and mathematical basis of the measuring transformation method is substantiated. In addition to the mathematical model, a method is proposed to ensure the uniformity of the measurement scale in the entire range of the central wavelength shift of the sensors and a method for compensating for fluctuations in the optical radiation power in the entire system as a whole. The optical-electronic circuit of the measuring system includes six sensors grouped into two groups by their location and into three groups by their connection topology. The correctness of the proposed circuit and its compliance with the problem statement and the measuring transformation method are substantiated, including the requirement for the unambiguous determination of the amplitudes at the address frequencies of the sensors.

Keywords: mathematical modeling, address fiber Bragg structures, high resolution manometry, microwave photonics.

Статья отправлена в редакцию 25 ноября 2024 г.

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДА

Рус.Ш. Мисбахов^{1,3}, Е.В. Куликов²

¹ ООО "ТатАИСнефть"

Российская Федерация, 423458, г. Альметьевск, ул. Ризы Фахретдина, д. 62

²ФГБУ «3-й Центральный научно-исследовательский институт»

Министерства обороны Российской Федерации

Российская Федерация, 107564, г. Москва, Погонный проезд, д.10

³ Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева-КАИ (Альметьевский филиал)

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Разрабатываемый метод контроля утечек в трубопроводе (ТП) предполагает использование ряда волоконно-оптических акселерометров, установленных по длине ТП, для непрерывного квазираспределенного мониторинга его динамического поведения. Для выбора конструкции волоконно-оптического акселерометра поставлена задача анализа существующих методов и средств контроля вибрации, вызванных утечками, основанных на использовании в них чувствительных элементов типа волоконной брэгговской решетки (ВБР), как наиболее перспективных: устойчивых к электромагнитным помехам и имеющих оптомеханику, работоспособную в широком диапазоне температур. По результатам анализа можно принять решение о влиянии чувствительного элемента на метрологические и технико-экономические характеристики акселерометра в целом, и в частности, на характеристики, определяющие его конструкцию. Общую постановку задачи анализа можно разделить на три основные части: возможность обнаружения утечек (чувствительность), пространственные характеристики анализа – устойчивость к поперечным и произвольным воздействиям, отличающихся от осевых, и, наконец, реализация функции контроля рабочей точки акселерометра. Исходя из результатов анализа по указанным критериям был выбран одноосный акселерометр с двумя параллельными волокнами, в которые встроены по одной ВБР до инерционной массы и после. В ходе анализа было обращено внимание на переход от оптоэлектронных методов опроса акселерометров к радиофотонным. Возможность такого решения подтверждается применением в акселерометре не ВБР, а нового типа чувствительного элемента – адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС) волновой λ или фазовой π с одним адресом, а также их многоадресных вариантов $N\lambda$ и $N\pi$. Для опроса АВБС должен быть построен адресный радиофотонный интеррогатор, существенно более дешевый по параметру массогабаритных показателей РВСИМ (размер, вес, стоимость и потребляемая мощность), по сравнению с оптоэлектронным, а также лучший по метрологическим и технико-экономическим характеристикам. В развитие такого типа акселерометров в работе предложено использование новых АВБС комбинированного типа – $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, основная адресная частота которых явно не выражена, т.е. не может быть определена по измерениям только на пропускание или только на отражение. Это подтверждает возможность построения линеек квазираспределенных акселерометров или их массивов сложной топологии ТП, что трудно реализуемо при использовании одно- и многоадресных АВБС, не допускающих комбинированного включения.

Ключевые слова: трубопровод, утечка, акселерометр, волоконная брэгговская решетка, одноадресная волоконная брэгговская структура, многоадресная волоконная брэгговская структура, комбинированная адресная волоконная брэгговская структура, обобщенная структурная схема.

Введение

Для перехода непосредственно к выбору конструкции акселерометра определим постановку задачи анализа, после которого можно принять решение. Общую постановку задачи анализа можно разделить на три основные части: методы обнаружения утечек, пространственные характеристики анализа и локализация точки утечки. Методы обнаружения утечек можно разделить на программные [1]–[7], и аппаратные [7], [8]–[12], при этом последние будут влиять на выбор конструкции. Программные методы используют различное компьютерное программное обеспечение для обнаружения утечек и их локализации. Они, как правило, универсальны и требуют сигнальной информации с аппаратной части, в которой используются соответствующие измерения по определенному физическому методу и соответствующие чувствительные элементы (например, метод БПФ [13], метод корреляции [14]), при этом конструкции акселерометров могут быть различны. Пространственные характеристики анализа прямым образом влияют на конструкцию акселерометров, например, на количество осей измерений. Вибрационные датчики имеют разные характеристики обнаружения ускорения шумовых вибраций от утечек.

Акселерометры, которые могут содержать несколько осей измерения и высокую чувствительность к гравитации, превосходят другие типы датчиков. По мере увеличения количества осей точность датчика будет увеличиваться. Однако, выбор конструкции можно начинать с одноосной. Как правило, это ось, параллельная оси ТП. Если по одной оси невозможно определить состояние ТП, только тогда должны быть проанализированы информационные составляющие акселерометров с двух других осей или акселерометр должен представлять единую многоосную конструкцию.

Обычно акселерометры имеют маятниковый тип и работают как система масса-пружина, где инерционная масса прикреплена к основанию акселерометра с помощью упругой пружины. Движение базы под действием динамических внешних сил вызывает движение массы относительно базы, пропорциональное приложенному внешнему воздействию. В традиционных акселерометрах движения инерционных масс измеряются пьезоэлектрическими, резистивными, пьезорезистивными или емкостными элементами [13]. Измерение амплитуды вибрации происходит в результате индукции электрических токов в устройстве под действием внешних сил. Этот тип технологии оказался очень интересным и полезным во многих приложениях. Однако эти устройства при применении в больших масштабах, как это требуется в более крупных и сложных структурных системах, как ТП, требуют огромного количества проводов и могут подвергаться воздействию электромагнитных помех, ограничивающих результаты.

Научная исследования и практические результаты последних лет, подчеркнули преимущества датчиков, основанных на оптических технологиях, например, при измерении относительных и абсолютных смещений, температуры и давления [14, 15]. Эти датчики имеют явные преимущества перед традиционными для применения в суровых условиях или при высоком риске, когда безопасное использование электрических датчиков невозможно.

1 Акселерометры на волоконных брэгговских решетках

ВБР имеет особенности, которые позволяют использовать ее в акселерометрах, имея преимущества перед традиционными датчиками, основанными на других технологиях. К ним относятся возможность мультиплексирования большого количества датчиков, невосприимчивость к электромагнитным полям и способность передавать сигналы на большие расстояния без необходимости использования дополнительных усилителей [16–19]. Эти преимущества также приводят к снижению стоимости внедрения.

Типовой одноосный акселерометр с одной ВБР представлен на рис. 1 [20].

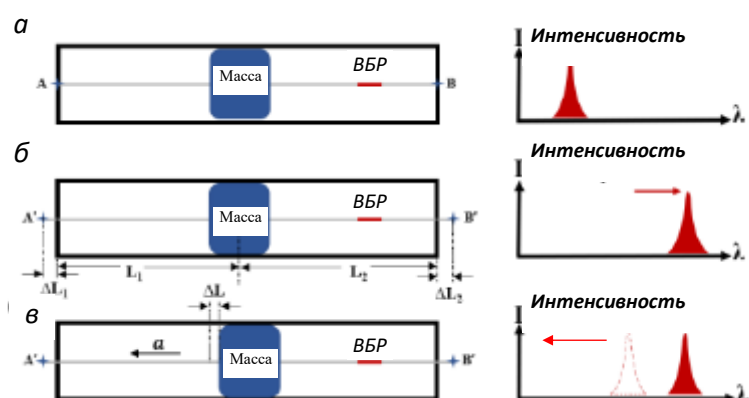


Рис. 1. Иллюстрация работы акселерометра. Центральная длина волны: до предварительного натяжения (а); предварительное натяжение с переходом в рабочее состояние (б); осевое ускорение a (в) [20]

ВБР фиксировалась с помощью инерционного блока (масса) в алюминиевой полости. Блок представлял собой симметричный цилиндр, который мог свободно колебаться внутри полости и формировать различное натяжение ВБР. На рис. 1, в показана диаграмма расположения центральной длины волны ВБР, когда структура блока подвергается осевой вибрации, что приводит к ее сдвигу влево. Волокно фиксировали сначала в точках А до В полости (рис. 1, а), а после предварительного натяжения удлинняли до точек А' до В' (рис. 1, б) для перевода в рабочий режим с отсутствием провисания волокна (рабочая точка). При любом ускорении a волокно будет натянутым без провисания, а центральная длина волны ВБР будет перемещаться пропорционально натяжению и его направлению.

В эксперименте [20] резонансные частоты акселерометров изменялись в последовательности 820, 500, 460, 440, 460 и 500 Гц соответственно начальному положению P инерционного блока. Зависимость между резонансной частотой и параметром P имеет квадратичную форму, при которой по мере увеличения параметра P резонансная частота постепенно снижается от 820 до 440 Гц, а затем увеличивается до 500 Гц. Такой акселерометр удобен для проведения исследований, но не для установки на эксплуатирующийся ТП с жесткой фиксацией и калибровкой, несмотря на очень простую конструкцию.

В [21] предложен консольный акселерометр на одной ВБР, который можно настроить для регулировки чувствительности и резонансной частоты в зависимости от объекта измерений. Механическая конструкция акселерометра представляет собой одинарную консольную балку с блоком на конце, подвешенным на определенной высоте внутри кожуховой конструкции. ВБР устанавливается и фиксируется перпендикулярно поверхности вибрирующей консольной балки через отверстие, выполненное в ограждающей конструкции.

Принципиальная схема предлагаемого консольного измерителя ускорения на основе массы [21] представлена на рис.2. В ней ВБР используется в качестве пружины, повышающей собственную частоту консоли и равномерно деформирующей решетку для повышения чувствительности системы к вибрациям. Предварительное натяжение ВБР достигается путем склеивания двух точек на конце консольной балки и ограждающей конструкции с помощью эпоксидной смолы. Эта эпоксидная смола в основном используется в качестве структурного клея для обеспечения высокой химической и температурной стойкости.

Акселерометр изготовлен с помощью аддитивных технологий. Одним из ограничений его применения является хрупкость датчиков ВБР, поэтому при установке этих датчиков следует соблюдать осторожность.

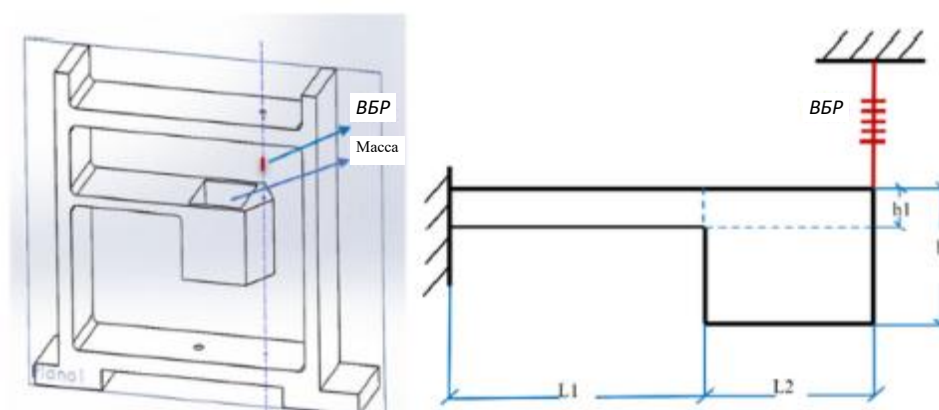


Рис. 2. Структура консольного датчика с одной ВБР: 3D изображение (а); схематический разрез (б) [21]

Несмотря на это ограничение, способность мультиплексирования датчиков ВБР, невосприимчивость к электромагнитным помехам и способность системы опроса обрабатывать больше датчиков за один раз увеличивают преимущество использования таких систем вместо традиционных. Для устранения этого недостатка можно использовать резервирование ВБР.

В [22] предложена детальная конструкция предлагаемого среднечастотного акселерометра с резервированием на двух ВБР, которая показана на рис. 3.

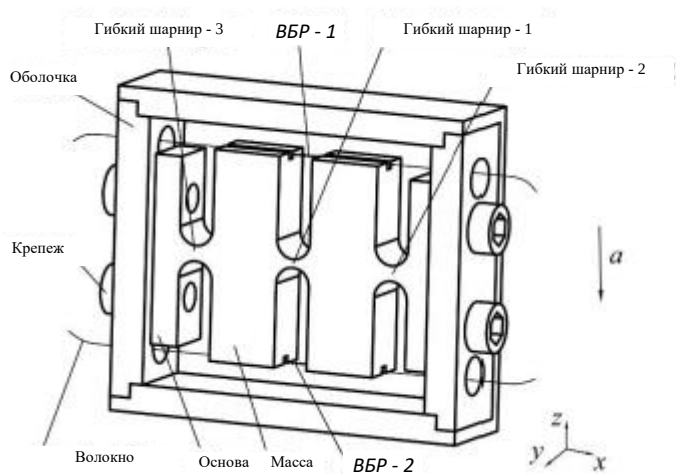


Рис. 3. Структурная схема резервированного акселерометра на двух ВБР [22]

Этот датчик в основном состоит из двух инерционных масс, трех прямых гибких шарниров, двух ВБР и основания. Датчик симметричный, размеры гибкого шарнира-2 и шарнира-3 абсолютно одинаковы. Два конца массы снабжены канавками для оптоволокон. Два конца предварительно натянутой ВБР фиксируются в пазах клеем. ВБР подвешивается над гибким шарниром-1, а основание и оболочка пакета соединяются резьбой. Таким образом, датчик одноосный, состоит из двух подобных.

Когда возбуждение ускорения в направлении измерения генерируется извне, две массы будут слегка вращаться вокруг центра гибкого шарнира-2 и гибкого шарнира-3 соответственно, заставляя ВБР растягиваться или сжиматься и преобразовывать вибрационное ускорение в деформации и сдвиги длин волн двух ВБР. Сигналы вибрации могут быть

получены из сдвигов длин волн двух ВБР. В этой конструкции три прямых круглых гибких шарнира соединяют две массы и основание в единое целое. Конструкция шарнир-масса-шарнир может повысить общую жесткость датчика по сравнению со структурой шарнир-масса. Между тем, две конструкции ВБР удваивают чувствительность датчика, обеспечивая при этом температурную самокомпенсацию.

Более простая конструкция, близкая к консольной, предложена в [23]. Предлагаемый оптоволоконный акселерометр основан на двух ВБР, расположенных в противоположных положениях. Акселерометр изготовлен из цельной латунной детали, а его конструкция состоит из концентрированной инерционной массы, поддерживаемой Г-образной консольной балкой, соединенной с основанием тонким анизотропно-упругим элементом (толщиной 1,1 мм) и двумя ВБР. Под действием внешних ускорений инерционная масса движется по вертикальной оси, вызывая сжатие в одной из ВБР и растяжение в другой. Движение инерционной массы происходит не исключительно по вертикальной оси, но за счет ограниченной возможности движения по другим осям, его можно считать таковым.

Схема и размеры акселерометра показаны на рис. 4. ВБР1 и ВБР2 закреплены между точками, обозначенными А и Б соответственно.

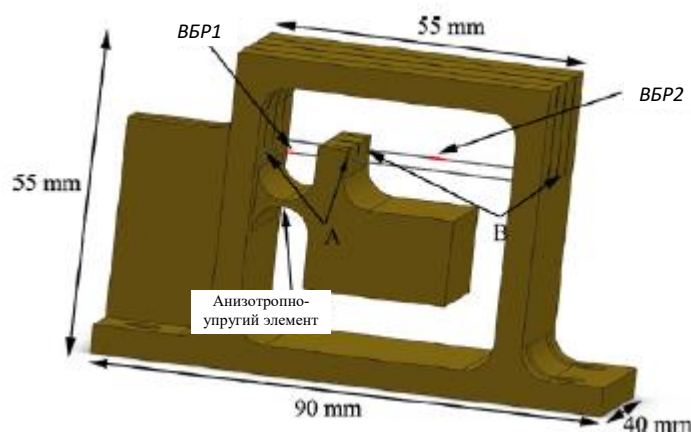


Рис. 4. Схема и размеры акселерометра на двух встречных ВБР [23]

Размеры анизотропно-упругого тонкого элемента определяют диапазон и чувствительность акселерометра и минимизируют поперечную чувствительность [24]. Резонансная частота также зависит от модуля Юнга оптического волокна [25]. Такая компоновка позволяет акселерометру быть нечувствительным к поперечной чувствительности и колебаниям температуры окружающей среды. При наличии этих эффектов обе ВБР подвергаются одинаковому воздействию.

Воспользуемся решением (рис. 4) и простотой конструкции решения (рис. 1) и предложим конструкцию для горизонтального одноосного акселерометра, которую будем рассматривать в статье. Подобная конструкция предложена в [26] и рассматривалась в [27-29] в рамках работ школы радиофотоники КНИТУ-КАИ, в которых выполнялись эти работы, но с другими типами чувствительных элементов на основе ВБР. В результате было определено, что тип чувствительных элементов существенно влияет на метрологические характеристики акселерометров.

Схема конструкции акселерометра приведена на рис. 5. Измерение ускорения a проводится вдоль оси OB , в предположении, что на неё существует проекция F действующей силы $\mathbf{F}$, как совокупности инерциальной, гравитационной и центробежной сил.

Между двумя боковыми бортами П-образного профиля 1, являющегося жесткой основой датчика, размещается инерционный блок 4. Конструкция анизотропно-упругого элемента 2 инерционного блока 4 реализована так, чтобы исключить или минимизировать любое ее относительное поперечное смещение от измерительной оси $ОВ$.

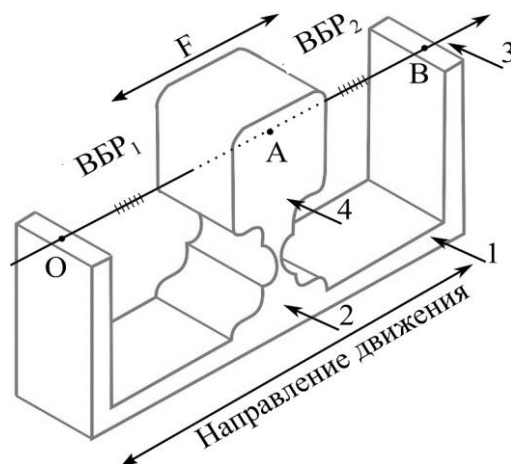


Рис. 5. Выбранная для исследований схема акселерометра:

- 1 – основа, выполненная в виде П-образного профиля;
2 – анизотропно-упругий элемент; 3 – оптические волокна; 4 – инерционный блок (масса)

В инерционной массе 4 выполняется сквозное отверстие, через которое пропускается и в которой закрепляется оптическое волокно 3 со сформированными в нем ВБР с одинаковыми центральными длинами волн. Под действием ускорения происходит отклонение инерционной массы 4 от положения равновесия, что влечет за собой, например, растяжение волокна, содержащего ВБР₁, и одновременное уменьшение предварительного натяжения волокна, содержащего ВБР₂. Конструкция датчика предусматривает термостатированный корпус, который обеспечивает равномерное поле температуры внутри корпуса датчика. Любое температурное воздействие приводит к одновременному и одинаковому растяжению/сжатию участков волокна, содержащих ВБР₁ и ВБР₂, при условии равенства расстояний $ОА$ и $АВ$ и одинаковых начальных натяжений участков волокна, содержащих ВБР. При одновременном и одинаковом смещении брэгговских частот ВБР₁ и ВБР₂ разностная частота между ними, определяющая смещение нулевого уровня, также будет оставаться неизменной.

Центральная длина волны датчиков на основе ВБР₁ и ВБР₂, по которой определяется ускорение, требует соответствующих методов опроса для демодуляции сигнала датчика. В последние годы было предложено несколько методов, в частности, основанных на простой интерферометрии [30], фильтрах Фабри-Перо [31], согласованных решетках [32], акустооптических перестраиваемых фильтрах [33], длиннопериодных решетках [34,35], петли Саньяка на основе чирпированных ВБР [36] или многопортового волоконного интерферометра Маха-Цендера для опроса нескольких датчиков [37]. Эти решения обеспечивают высокое разрешение в области длин волн, но представляют собой относительно сложные системы с высокими затратами на внедрение [38]. Метод согласованных решеток обычно использует одну ВБР в качестве эталона отдельно от датчика.

В данной работе мы будем использовать радиофотонный интеррогатор, существенно более дешевый по параметру массогабаритных показателей РВСиМ (размер, вес, стоимость и потребляемая мощность). Возможность такого использования определяется типом чувствительного элемента, а именно, АВБС, что будет рассмотрено в следующем подразделе.

2. Акселерометры на адресных волоконных брэгговских структурах

Схема отражательного акселерометра на ВБР [26], работающих на отражение (назовем их λ -ВБР), приведенная на рис. 5, была использована далее в работах Казанской школы радиофотоники для построения акселерометров различного назначения, работающих на пропускание, с использованием ВБР с фазовым π -сдвигом (π -ВБР), АВБС с двумя, тремя и четырьмя фазовыми π -сдвигами (2π -АВБС, 3π -АВБС, 4π -АВБС соответственно). Для оценки их достоинств и преимуществ проведен сравнительный анализ, результаты которого сведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ обобщенных характеристик акселерометров, использующих две ВБР/АВБС различных типов

Тип ВБР/АВБС	Анализируемый сигнал	Определение РТ	Точность	Сложность
λ -ВБР	Отражение	—	—	+
π -ВБР	Пропускание	—	$\pm$	+
2π -АВБС	Пропускание	+	+	$\pm$
3π -АВБС	Пропускание	+	++	—
4π -АВБС	Пропускание	+	++	—
$(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС	Отражение	+	++	++
$(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС	Пропускание	+	++	++

Применение для ВБР₁ и ВБР₂ π -ВБР позволяет регистрировать колебания инерционной массы на частоте биений между составляющими излучения, прошедшими на фотоприемник через окна прозрачности. Это впервые позволило проводить обработку сигнала вибраций на радиочастотах, в области минимальных шумов фотоприемника, что позволяет избавиться от влияния низкочастотных шумов фотоприемника. Однако максимальное отклонение инерционной массы от рабочей нулевой точки, которая определяется уровнем по постоянному току, требует применения широкополосного фотоприемника диапазона в десятки ГГц. Второй недостаток заключается в неопределенности положения инерционной массы от рабочей точки при измерении частоты биений, которая будет одинакова при ее одинаковом отклонении вправо и влево.

Устранить эти недостатки позволило применение вместо ВБР₁ и ВБР₂ 2π -АВБС – АВБС на базе ВБР с двумя фазовыми сдвигами. Для использования преимуществ решения (рис. 4) в конструкцию (рис. 5) внесены изменения, выделенные цветом. АВБС установлены на разных волокнах (рис. 6), что дополнительно позволяет увеличить устойчивость акселерометра к поперечным ускорениям.

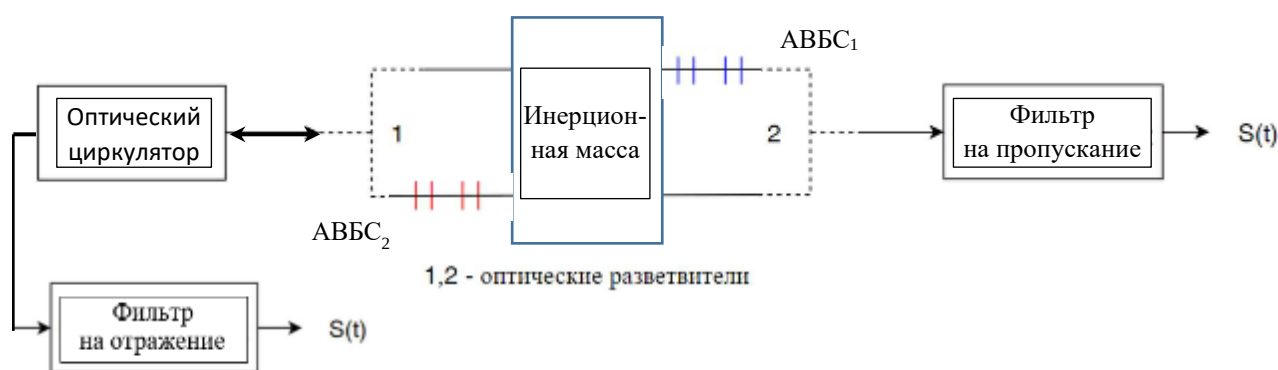


Рис. 6. Обобщенная схема модернизированного акселерометра

Обработка вибрационного сигнала осуществляется по сигналам частоты биений адресных компонент на выходе узкополосных фильтров (100 кГц) настроенных на адресную частоту каждой 2π -АВБС.

Положение инерционной массы определяется по их амплитудам в соотношении с АЧХ фильтра, имеющей линейный наклонный вид. Тем самым всегда можно сказать сжата (минимальная амплитуда) или растянута (максимальная амплитуда) 2π -АВБС с уникальной адресной частотой. Проблемой в акселерометре такого типа является достаточно широкий диапазон частот требуемого фотоприемника при регистрации крайних положений инерционной массы. Кроме того, в ряде ситуаций, возникающих в области малых колебаний могут возникнуть коллизии, связанные с совпадением разностных частот между двумя 2π -АВБС и их адресных частот. Избежать последнего недостатка можно при использовании 3π -АВБС и 4π -АВБС, в которых число таких коллизий приближается к нулю в рамках рассмотрения только массива акселерометров. Для одно акселерометра таких коллизии в случае 3π -АВБС и 4π -АВБС не существует. Основным условием устранения коллизий является асимметричное положение адресных компонент. Таким образом, если для одной пары компонент коллизия есть, то для другой она отсутствует, а анализ ведется аналогично акселерометрам с 2π -АВБС.

Несомненно, устранение коллизий является важным фактором повышения точности измерения вибрационных сигналов, однако, вызывает и дополнительные усложнения конструкции акселерометра: увеличение числа узкополосных микроволновых фильтров, обеспечение работы акселерометров на пропускание АВБС, особенно в массиве, требующее множества оптических волокон, необходимость применения АЧХ фильтров со сложными наклонными или более сложными, например, «двугорбыми» характеристиками.

Предложенная в [39] двухкомпонентная волновая АВБС комбинированного типа работает только на отражение. В отличие от ВБР, наличие в структуре $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС компоненты с фазовым π -сдвигом предположительно позволит избавиться от снижения точности измерения, вызванной достаточно широкой полосой отражения ВБР-компоненты. Фактически $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС относится к трехкомпонентным, для которых характерна устойчивость, к рассмотренным ранее коллизиям. Применение компоненты с фазовым π -сдвигом позволит применить и узкополосный фотоприемник, что позволит снизить стоимость акселерометра. Этому же будет способствовать простота организации работы по массиву акселерометров в топологии «точка-многоточка». Применение анализа полного массива сигналов для 3π - или 3λ -АВБС, рассмотренное в [40-44], позволит упростить алгоритмическую основу и программное обеспечение для их обработки. Особое внимание следует обратить на то, что для предложенной в этой работе $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС основная адресная частота явно не выражена, т.е. не может быть определена по измерениям только на пропускание или только на отражение. Это еще раз подтверждает необходимость анализа полного спектра сигналов как на отражение, так и на пропускание, что было рассмотрено в [45].

3 Структурные схемы для квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП

Для реализации квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП, можно использовать радифотонный метод реализованный на основе фотонных методов микроволновых преобразований сдвига центральной длины волны компонент последовательности $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в оптической области в изменение частоты микроволнового сигнала в электрической области [45].

Обеспечение высокой скорости опроса чувствительных элементов акселерометров, при использовании рассматриваемого метода, достигается за счет использования блока радиофотонного адресного интеррогатора (РФАИ) и цифровой обработки сигналов, позволяющий обнаружить частоту микроволнового сигнала с высокой скоростью [46, 47].

На рис. 7 представлена функциональная схема метода опроса $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС акселерометров-отражения с использованием широкополосного лазерного излучения с полосой излучения, равной максимальному хождению АВБС акселерометров в силу изменения температуры, которые существенно превышают отклик вибраций (около 10 нм).

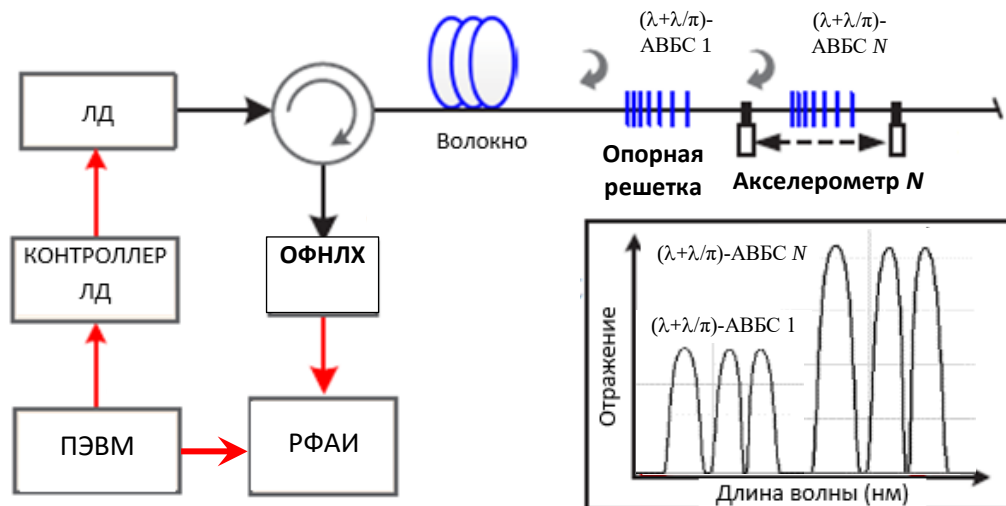


Рис. 7. Функциональная схема радиофотонной системы мониторинга на акселерометрах-отражения: ЛД – лазерный диод; ОФНЛХ – оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой; ФД – фотодетектор; ПЭВМ – управляющий компьютер; РФАИ – радиофотонный адресный интеррогатор

В данном методе опроса первая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС 1 используется в качестве чувствительного элемента опорного датчика для контроля мощности лазера и его стабильности. Вторая и последующие $N-1$ $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС используются в качестве чувствительных элементов. Каждая из них отличается увеличением коэффициента отражения с увеличением номера и уникальными адресами между компонентами $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

Отражение лазерного излучения от всех $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС приводит к формированию отраженных сигналов с разными расстояниями между частотными компонентами и разными их амплитудами, которые далее поступают на ФД через дисперсионный элемент ОФНЛХ. На фотодетекторе генерируется микроволновый сигнал биений с частотами, пропорциональными адресным.

Физическое воздействие, прикладываемое к чувствительному элементу волоконно-оптического датчика, оценивается за счет измерения амплитуд и частот сигналов биений.

На рис. 8 представлена функциональная схема метода опроса $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС акселерометров-пропускания также с использованием широкополосного лазерного излучения с полосой излучения, равной максимальному хождению АВБС акселерометров в силу изменения температуры, которые существенно превышают отклик вибраций (около 10 нм).

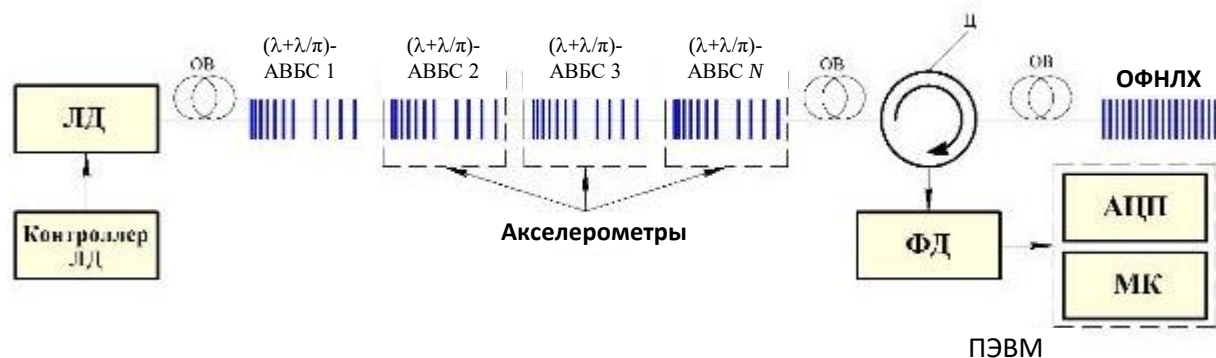


Рис. 8. Функциональная схема радиофотонной системы мониторинга на акселерометрах-пропускания: Ц – циркулятор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер

Число последовательно соединенных акселерометров будет зависеть от коэффициентов отражения компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС. Как вариант на рис. 9 показаны вариации λ/π компоненты при ее разной длине и заданном наведенном коэффициенте преломления волокна ($L_\lambda=L_1<L_2<L_3$).

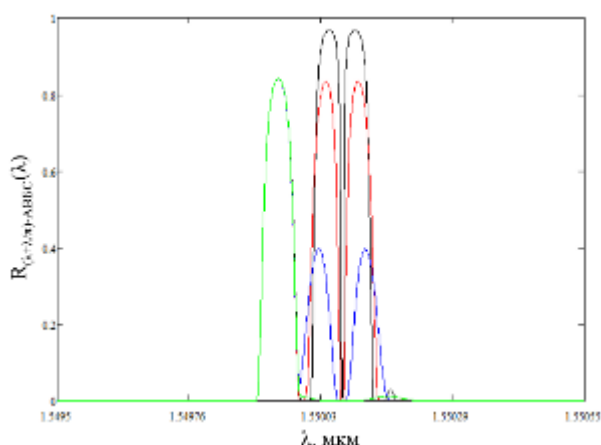


Рис. 9. Спектры компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при изменении длины λ/π -ВБР ($L_1<L_2<L_3$): L_λ (зеленая линия); L_1 (синяя линия); L_2 (красная линия); L_3 (черная линия)

На рис. 10 представлен вариант, когда компоненты $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС записаны при различных значениях величины наведенного показателя преломления.

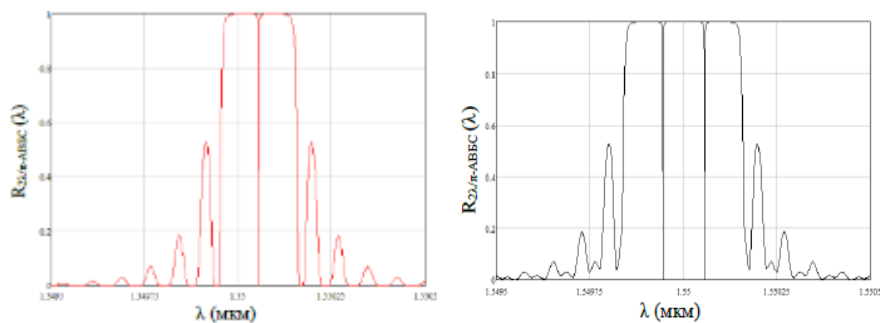


Рис. 10. Спектры компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при изменении наведенного показателя преломления: λ/π -ВБР компонента (а); дописанная к ней слева λ -ВБР компонента

Таким образом, при создании систем квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП в случае появления утечек выбор типа чувствительного элемента становится более сложной задачей. Однако ее решения могут быть найдены. В заключении данного раздела надо отметить, что мы рассматривали последовательность $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС для одного волокна акселерометра, чтобы не усложнять представление материала.

Общей проблемой предложенных систем являются перекрестная чувствительность $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС к температуре. Следовательно, в их структуре должен находиться узел компенсации температуры. Как правило, компенсация температуры осуществляется последовательной установкой дополнительного датчика в любом, наиболее приемлемом месте этой последовательности, но, как правило, в начале после лазера. На рис. 7 и рис. 8 представлены функциональные схемы радиофотонных систем мониторинга на акселерометрах-отражения/пропускания первая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в качестве опорной для компенсации ухода лазера, но может быть использована и для компенсации температуры. Для этого в определенные периоды времени должна проводиться калибровка по температуре между ней и АВБС акселерометров при знании априори об отсутствии утечек на участке мониторинга ТП.

Заключение

Приведены постановки и предложены варианты решения задачи анализа существующих методов и средств контроля вибрации, вызванных утечками, основанных на использовании в них чувствительных элементов типа волоконной брэгговской решетки (ВБР), как наиболее перспективных: устойчивых к электромагнитным помехам и имеющих оптомеханику, работоспособную в широком диапазоне температур. По результатам анализа принято решение о влиянии чувствительного элемента на метрологические и технико-экономические характеристики акселерометра в целом, и в частности, на характеристики, определяющие его конструкцию.

Выбраны комбинированные волновые и фазо-волновые АВБС как наиболее перспективные чувствительные элементы для построения радиофотонных систем мониторинга на акселерометрах-пропускания (вариант 1) и акселерометрах-пропускания (вариант 2). Решение подобных задач как на отражение, так и на пропускание невозможно при построении аналогичных систем на основе других некомбинированных типов.

Полученные решения позволяют судить о возможности измерений в таких системах по наличию составляющих биений между адресными компонентами встречно включенных $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в структуре одного акселерометра. Дополнительными к адресному признаку являются коэффициенты отражения АВБС и ширина их полосы отражения или окна прозрачности, которые могут изменяться за счет изменения их физических длин при записи и наведенного коэффициента преломления волокна. Таким образом, при создании систем квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП в случае появления утечек выбор типа чувствительного элемента становится более сложной задачей. Однако ее решения могут быть найдены.

Общей проблемой предложенных систем являются перекрестная чувствительность $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС к температуре. Следовательно, в их структуре должен находиться узел компенсации температуры. Как правило, компенсация температуры осуществляется последовательной установкой дополнительного датчика в любом, наиболее приемлемом месте этой последовательности, но, как правило, в начале после лазера. Кроме того, условиях инерционных процессов изменения температуры на несколько порядков выше, чем в задачах мгновенного изменения частоты вибраций.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Chamran M. K. A Non-Invasive Air-Coupled V-Type Ultrasonic Leak Detection System / M. K. Chamran and S. Shae // Journal of Purity, Utility Reaction and Environment. – 2015. – V.4. – P.99-107.
2. Almeida F. On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: An experimental investigation / F. Almeida, M. Brennan, P. Joseph et all. // Sensors. – 2014. – V. 14, no. 3. – P. 5595-5610.
3. Duan H.-F. Leak detection in complex series pipelines by using the system frequency response method/ H.-F. Duan, P. J. Lee, M. S. Ghidaoui et all. // Journal Hydraulic Research. – V. 49, no. 2. – P. 213-221. DOI:10.1080/00221686.2011.553486.
4. Ghazali M. Comparative study of instantaneous frequency based methods for leak detection in pipeline networks / M. Ghazali, S. B. M. Beck, J. D. Shucksmith, et all.// Mechanical Systems Signal Processing. – 2012. – V. 29, P. 187-200.
5. Ghazali M. F. Leak detection using instantaneous frequency analysis. Ph. D. dissertation, Univ. Shefeld, Shefeld, U.K., 2012.
6. Ghazali F. Instantaneous phase and frequency for the detection of leaks and features in a pipeline system / F. Ghazali, W. J. Staszewski, J. D. Shucksmith et al. / Structural Health Monitoring. – 2010. – V. 10, no. 4, P. 351-360.
7. Wang X.-J. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients / X.-J. Wang, M. F. Lambert, A. R. Simpson et all. // Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers. – 2002. – V. 128, no. 7, P. 697-711, 2002, doi: 10.1061/ (ASCE) 0733-9429(2002)128:7(697).
8. Hester J. Enabling sustainable sensing in adverse environments /J. Hester, T. King, A. Propst, K. Piratla et all. // in Proc. IEEE Int. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), Jun. 2013. – P. 249251. DOI:[10.1109/SAHCN.2013.6644989](https://doi.org/10.1109/SAHCN.2013.6644989)
9. Hester J. Enabling sustainable water distribution networks through sensor-based monitoring / J. Hester, T. King, A. Propst // Tech. Rep.
10. Shinozuka M., Nondestructive monitoring of a pipe network using a MEMS-based wireless network / M. Shinozuka, Pai H. Chou, Sehwan Kim et al.// Proc. SPIE. – 2020. – V. 7649, Art. no. 76490P, DOI:10.1117/12.848808.
11. Shinozuka M. Non-invasive acceleration-based methodology for damage detection and assessment of water distribution system / M. Shinozuka, D. Karmakar, P. H. Chou, et all. // Smart Structures and Systems. – 2010. – V.6, no. 10. – P. 545-559, 2010.
12. Hunaidi O. Leak detection methods for plastic water distribution pipes / O. Hunaidi, W. T. Chu, A. Wang, and W. Guan // Nat. Res. Council Canada, Winnipeg, MB, Canada, Tech. Rep. – 2000, P. 249-270.
13. Srirangarajan S. Wavelet-based burst event detection and localization in water distribution Systems / S. Srirangarajan, M. Allen, A. Preis et all. // Journal Signal Processing System. – 2013. – V. 72. – N.1. – P. 116.
14. Au-Yang M. K. Flow-induced vibration test of an advanced water reactor model Part 1: turbulence-induced forcing function / M. K. Au-Yang, B. Brenneman, and D. Raj // Nuclear Engineering and Design /1995. – V. 157. – №.12. – P. 93-109.
15. Lu, Y. Damage monitoring of reinforced concrete frames under seismic loading using cement-based piezoelectric sensor / Y. Lu, Z. Li, W.I. Liao // Materials and Structures. – 2011. – V.44. – P. 1273–1285.
16. Jackson D.A. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network / D.A. Jackson, A.L. Ribeiro, L. Reekie at all. // Optics Letters – 1993. – 18. – P. 1192–1194.
17. Berkoff T. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer / T. Berkoff, A. Kersey // IEEE Photonics Technology Letters. – 1996. – V.8. – P.1677–1679.

18. Spero R.E. The Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) / R.E. Spero, S.E. Whitcomb // Opt. Photonics New. - 1995. - V.6. - P. 35–39.
19. Gutiérrez, N. Low weight additive manufacturing FBG accelerometer: Design, characterization and testing / N. Gutiérrez, P. Galvin, F. Lasagni // Measurement. – 2018. – V.117. – P. 295–303.
20. Xiao, X. Sensitivity-Tunable Oscillator-Accelerometer Based on Optical Fiber Bragg Grating / X. Xiao, J. Tao, Q. Song, Y. Sun, J. Yang, Z. Yan // Photonics. – 2021. – V.8. – P. 223. <https://doi.org/10.3390/photonics8060223>
21. Reghuprasad, A.E. Serially Connected Cantilever Beam-Based FBG Accelerometers: Design, Optimization and Testing / A.E. Reghuprasad, C. Colombero, A. Godio // Sensors. – 2023. – V. 23. –P. 3188, <https://doi.org/10.3390/s23063188>
22. Li Z. A Medium-Frequency Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Flexible Hinges/ Z. Li, L. Liang, H. Wang, et all. – 2021. – Sensors. – 21. – P.6968. <https://doi.org/10.3390/s21216968>
23. Antunes P. Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity / P. Antunes, H. Varum, P. Andre // Measurement. - 2011. – V. 44. – P. 55-59.
24. Csipkes F.A. The Maturing of Optical Sensing Technology for Commercial Applications / F.A. Csipkes et all. // Micron Optics Inc., 2005.
25. Antunes P. Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres / P. Antunes et all. // Microwave and Optical Technology Letters. - 2008. - V.50. – Is.9. – P. 2467-2469.
26. Sakhabutdinov A. Zh. Fiber-optic acceleration sensor on duplex fiber Bragg structures / A.Zh. Sakhabutdinov, V.V. Chistyakov, O.G. Morozov et all. // Journal of Computational and Engineering Mathematics. - 2018. -Т. 5. - № 4.- С. 16-32.
27. Сахабутдинов А.Ж. Радиофотонный дифференциальный акселерометр на двух адресных волоконных брэгговских решетках / А.Ж. Сахабутдинов, В.В. Пуртов, О.Г. и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 5 (157). - С. 7-15.
28. Мисбахов Р.Ш. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплексных распределительных устройствах /Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2019. - Т. 15. - № 3. - С. 101-110.
29. Липатников К.А. Волоконно-оптический датчик вибрации "ВИБ-А" / К.А. Липатников, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев et all. // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 4 (51). - С. 26.
30. Kersey A.D. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection, A.D. Kersey, T.A. Berkoff, W.W. Morey, Optics Letters 18 (1) (1993) 72-74.
31. Kersey A.D. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter / A.D. Kersey, T.A. W.W. Berkoff / Morey Optics Letters. – 1993. – V. 18 (16). – P. 1370-1372.
32. Jackson D.A. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network / D.A. Jackson et all. // Optics Letters. – 1993. V.18 (14). – P. 1192-1194.
33. Volanthen M. Simultaneous monitoring of multiple fibre gratings with a single acousto-optic tunable filter / M. Volanthen et all. // Electronics Letters. – 1996. - 32 (13). - P.1228-1229.
34. Jung J. Novel interrogation system for dynamic strain measurement based on fiber Bragg grating sensor using long period grating pair and EDF / J. Jung, Y.W. Lee, B. Lee// in: Leos 2000 - IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. – 2000. - V.1. - P. 679-680.

35. Zhang L. Large-dynamic-range and high-resolution from a strain sensing system using long-period grating interrogating FBG strain sensor / L. Zhang et al. // in: 24th European Conference on Optical Communication. – 1998. – V.1. – P. 609-610.
36. Zhao D.H. Sensor interrogation technique using chirped fibre grating based Sagnac loop / D.H. Zhao et al. // Electronics Letters. – 2002. – 38 (7). – P. 312- 313.
37. Jiang Y. Four-element fiber Bragg grating acceleration sensor array / Y. Jiang // Optics and Lasers in Engineering. – 2008. – V. 46 (9). – P. 695-703.
38. Antunes P.F.C. et al., Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring / P.F.C. Antunes et al. // Sensors Journal, IEEE. – 2009. – Antunes P.F.C. et al., V. 9 (11). – P. 1347-1354.
39. Мисбахов Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Мисбахов Р.Ш., Артемьев В.И., Морозов О.Г. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 2 (62). – С. 57-73.
40. Мисбахов Р. Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р. Ш. Мисбахов, Р. Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
41. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.
42. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.
43. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 6–13.
44. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov et al. // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – P. 2693.
45. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.
46. Муслимов Э.Р. Спектрографы с высокой дисперсией для радиофотонных сенсорных систем / Э.Р. Муслимов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6 (158). – С. 318-319.
47. Muslimov E. Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach / E. Muslimov, I. Nureev, O. Morozov et al. // Optical Engineering. – 2018. – Vol. 57. – № 12. –P. 125104.

SELECTION OF DESIGN AND SENSORS OF FIBER-OPTIC ACCELEROMETERS FOR PIPELINE LEAK MONITORING

Rus.Sh. Misbakhov^{1,3}, E.V. Kulikov²

¹ LLC "TatAISneft"

62, st. Riza Fakhretdina, Almet'yevsk, 423458, Russian Federation

²FSBI "3rd Central Research Institute" Ministry of Defense
of the Russian Federation

10, Pogonny proezd, Moscow, 107564, Russian Federation

³ Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI (Almet'yevsk branch)

10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The developed method of monitoring pipeline (PL) leaks involves the use of a number of fiber-optic accelerometers installed along the PL for continuous quasi-distributed monitoring of its dynamic behavior. To select the design of a fiber-optic accelerometer, the task was set to analyze the existing methods and means of monitoring vibration caused by leaks, based on the use of sensitive elements of the fiber Bragg grating (FBG) type, as the most promising: resistant to electromagnetic interference and having optomechanics operating in a wide range of temperatures. Based on the analysis results, it is possible to make a decision on the influence of the sensitive element on the metrological and technical and economic characteristics of the accelerometer as a whole, and in particular, on the characteristics determining its design. The general formulation of the analysis problem can be divided into three main parts: the possibility of leak detection (sensitivity), spatial characteristics of the analysis - resistance to transverse and arbitrary effects different from axial ones, and, finally, the implementation of the accelerometer operating point control function. Based on the analysis results, a uniaxial accelerometer with two parallel fibers was selected according to the specified criteria, into which one FBG is built in before and after the inertial mass. During the analysis, attention was paid to the transition from optoelectronic methods of accelerometer interrogation to microwave photonic ones. The possibility of such a solution is confirmed by the use in the accelerometer of a new type of sensitive element instead of FBG - an addressable fiber Bragg structure (AFBS) of wave – or phase π with one address, as well as their multi-address versions $N\lambda$ and $N\pi$. To interrogate the AFBS, an addressable microwave photonic interrogator should be built, which is significantly cheaper in terms of the mass-dimensional parameters of the size, weight, cost and power consumption, compared to the optoelectronic one, and also better in terms of metrological and technical-economic characteristics. In the development of this type of accelerometers, the paper proposes the use of new AFBS of a combined type - $(\lambda+\lambda/\pi)$ -AFBS, the main address frequency of which is not clearly expressed, i.e. cannot be determined by measurements only for transmission or only for reflection. This confirms the possibility of constructing lines of quasi-distributed accelerometers or their arrays of complex PL topology, which is difficult to implement when using single- and multi-address AFBS that do not allow combined inclusion.

Keywords: pipeline, leak, accelerometer, fiber Bragg grating, single-address fiber Bragg structure, multi-address fiber Bragg structure, combined address fiber Bragg structure, generalized structural diagram.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ НА ОСНОВЕ ДВУХ КОМБИНИРОВАННЫХ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР ВОЛНОВОЙ И ФАЗО-ВОЛНОВОЙ КОМПОНЕНТАМИ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Рус.Ш. Мисбахов¹, Е.В. Куликов²

¹ ООО "ТатАИСнефть"

Российская Федерация, 423458, г. Альметьевск, ул. Ризы Фахретдина, д. 62

²ФГБУ «3-й Центральный научно-исследовательский институт»

Министерства обороны Российской Федерации

Российская Федерация, 107564, г. Москва, Погонный проезд, д.10

Аннотация. Обнаружение утечек в трубопроводах (ТП) по-прежнему остается важной проблемой, особенно для развития интеллектуальной энергетики. Различные методы неразрушающего контроля для обнаружения утечек ТП, активно развиваются с конца прошлого века. Тем не менее, потребности в исследованиях и технологические проблемы все еще остаются, особенно на стадии их внедрения в практику тепловых и атомных электростанций. Большой интерес был проявлен исследователями к вибрационному методу обнаружения утечек. Сигнал собственной частоты колебаний трубы контролируется с помощью акселерометра, параметры которого меняются при появлении утечек. В последнее время такие акселерометры строятся на основе волоконно-оптических технологий с использованием одной или нескольких волоконных брэгговских решеток (ВБР) с хорошо известными преимуществами и недостатками. Последние связаны в основном с необходимостью применения дорогостоящего оптического спектрального устройства для их опроса – интеррогатора. Намечившийся путь к устранению этого недостатка – переход к бюджетным радиотонным интеррогаторам, работающим в области радиочастот, и адаптированных к ним чувствительным элементам – адресным волоконным брэгговским структурам (АВБС). В простейшем случае АВБС это две ВБР, разнесенные спектрально на уникальную и неизменяющуюся при любых условиях частоту, также лежащую в диапазоне радиочастот. В статье последовательно рассмотрены вопросы синтеза функциональной оптико-электронной схемы радиотонного акселерометра, на основе двух комбинированных АВБС с волновой и фазоволновой компонентами, работающими на отражение, математическая модель процесса юстировки акселерометра в области его рабочей точки, а также математическая модель процесса измерения вибраций с помощью их частотной локализации по известной шкале оптического фильтра с наклонной линейной характеристикой через разность компонент двух АВБС, причем взаимное положение компонент внутри АВБС заранее известно.

Ключевые слова: трубопровод, утечка, акселерометр, волоконная брэгговская решетка, адресная волоконная брэгговская структура, комбинированная адресная волоконная брэгговская структура, математическая модель контроля рабочей точки; математическая модель измерения вибраций.

Введение

В настоящее время трубопроводный транспорт, как экономичный, стабильный и надежный метод транспортировки ресурсов, является основным средством снабжения и соединения между собой отдельных агрегатов тепловых и атомных электростанций (ТАЭС). Однако выход трубопроводов (ТП) из строя, вызванный их старением, механическими повреждениями, коррозией, растрескиванием кольцевой сварки и т.п., не только приводит к огромным потерям электроэнергии, но и серьезно угрожает окружающей среде и безопасности жизни, и имуществу людей.

Поэтому для ТАЭС крайне важно разработать практичные, осуществимые и эффективные методы и системы мониторинга структурной целостности ТП, преимущественно работающие в режиме реального времени.

Автоматизированные системы мониторинга и технического диагностирования должны осуществлять оперативное диагностирование текущего технического состояния ТП, своевременное выявление возникающих дефектов и прогнозирование их развития [1-2]. Мониторинг должен своевременно передавать информацию о критических значениях наблюдаемых параметров. Для различных видов и типов ТП должен выбираться оптимальный перечень ключевых параметров мониторинга. Необходима разработка и внедрение достоверных методологических подходов и решений в техническом диагностировании состояния ТП по ключевым параметрам мониторинга и динамике их изменения [3].

На протяжении многих лет основное внимание исследователей в отношении волоконно-оптических технологий мониторинга, как наиболее устойчивым к помехам в условиях работы на ТАЭС, было сосредоточено на разработке волоконных брэгговских решеток (ВБР) или структур (ВБС) с повышенной чувствительностью и низкой стоимостью систем их опроса – интеррогаторов – на разных длинах волн [4,5]. Для относительно низкочастотных приложений, таких как тепловые, это не самый важный фактор. В то время как правильный динамический отклик, соответствующая упаковка ВБР и ВБС, а также их сетевые возможности (мультиплексирование, адресность) являются гораздо более важными проблемами. Более того, в некоторых приложениях ТАЭС датчики должны выдерживать чрезвычайно высокие температуры, давления и вместе с тем быть высокочувствительными к слабым вибрационным сигналам, возникающим в случаях формирования утечек [3]. Следовательно, существует острая потребность в разработке удобных и недорогих инструментов мониторинга для оценки структурной целостности ТП на основе инновационных сквозных цифровых технологий, к которым относятся технологии фотоники и радиофотоники, а также технологии адресных ВБС (АВБС), адаптированных к ним [6,7].

Научные исследования и практические результаты последних лет, подчеркнули преимущества датчиков, основанных на оптических технологиях, например, при измерении относительных и абсолютных смещений, температуры и давления [8-11]. Эти датчики имеют явные преимущества перед традиционными для применения в суровых условиях или при высоком риске, когда безопасное использование электрических датчиков невозможно. В том числе рассмотрены технологии АВБС, датчики на их основе и методы установки датчиков на ТП. Современные АВБС могут обнаруживать широкий спектр возмущений, таких как температура, деформация, давление, акустические колебания, скорость течения и др. Рассматриваемые нами три ключевых параметра для онлайн мониторинга могут быть сведены к давлению и его изменениям.

Приведенный анализ достоинств и недостатков различных типов ВБР и АВБС позволил выбрать структуру акселерометра, построенного на комбинированных АВБС с волновой и фазоволновой компонентами [12], разработать принцип юстировки его рабочей точки и измерения вибраций, вызванных собственными колебаниями ТП и утечками, что последовательно рассмотрено в настоящей статье.

1. Структурная схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами

На рис. 1 представлена обобщенная оптическая схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазоволновой компонентами, работающих на отражение и пропускание.

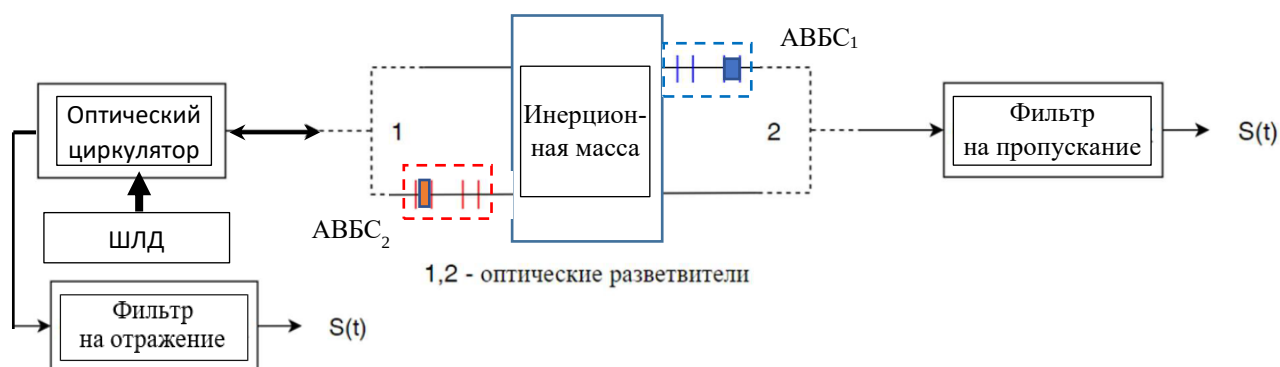


Рис. 1. Обобщенная оптическая схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС_{1,2} с волновой (заполненный квадрат) и фазо-волновой (две параллельные линии) компонентами, работающих на отражение и пропускание

На рис. 2 представлена структура и спектральная характеристика основного чувствительного элемента акселерометра - комбинированной АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами.

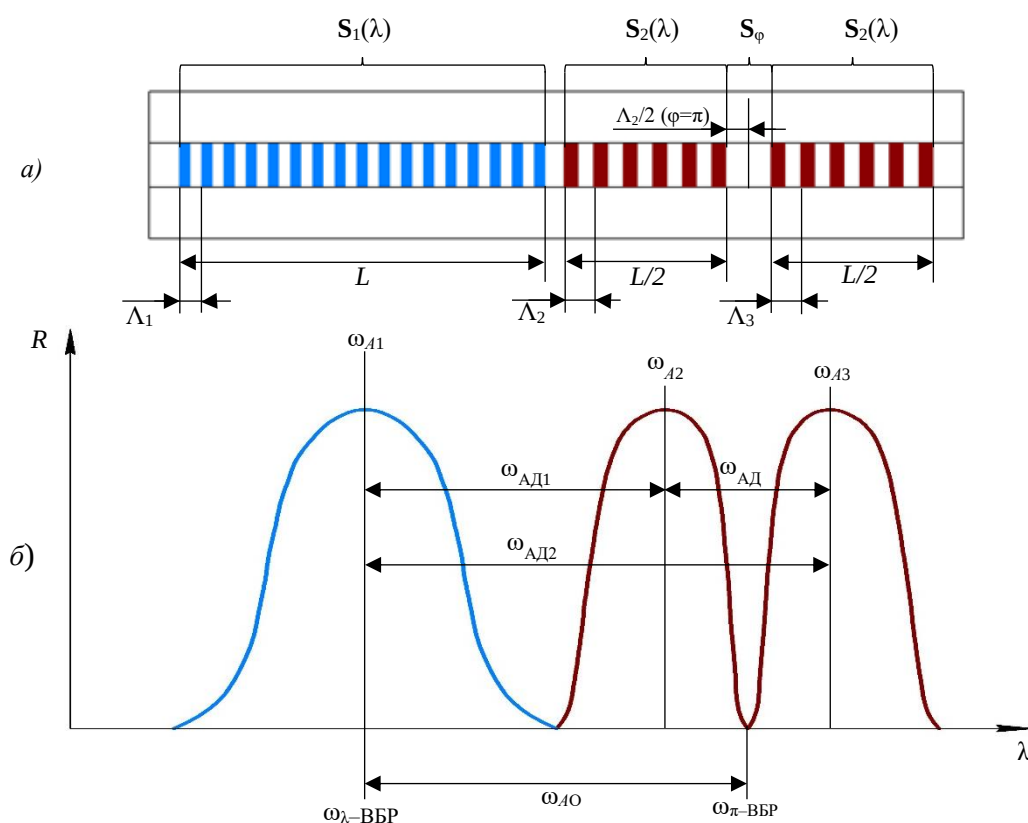


Рис. 2. Комбинированная АВБС с волновой (слева) и фазо-волновой (справа) компонентами: а) – структура, б) – условная спектральная характеристика отражения

Синтезированная структурная оптико-электронная схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами представлен на рис. 3. Широкополосный лазерный диод (ШЛД)

формирует непрерывное лазерное излучение, которое через оптический циркулятор поступает на два волоконных луча акселерометра, каждый из которых содержит одну из АВБС включенных встречно друг к другу фазо-волновыми компонентами (рис. 1,2).

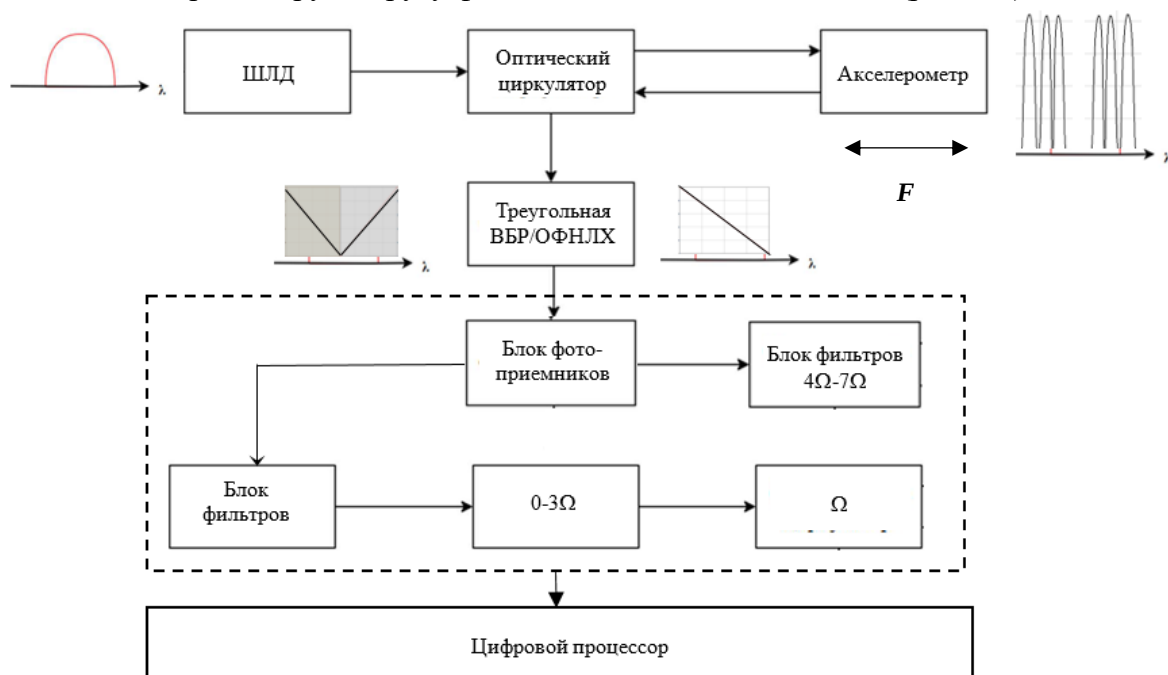


Рис. 3. Структурная опто-электронная схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами, работающими на отражение

Для упрощения дальнейшего описания будем использовать следующие обозначения: волновая компонента - λ -ВБР, фазо-волновая компонента - λ/π -ВБР, комбинированная АВБС - $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

Под действием внешней силы F , действующей в направлении оптического волокна, происходит смещение инерционной массы (рис. 1), которая растягивает (сжимает) АВБС₁ и одновременно сжимает (растягивает) АВБС₂. Оптический сигнал, отраженный от АВБС, попадает на треугольную ВБР и оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой (ОФНЛХ), работающие на пропускание, и далее на узкополосный и широкополосный фотоприемники соответственно, входящие в блок фотоприемников. Первый канал – из треугольной ВБР и узкополосного фотоприемника используется для контроля рабочей точки акселерометра и контроля утечек малой интенсивности. Второй канал из ОФНЛХ и широкополосного фотоприемника используется для определения положения каждой компоненты АВБС с учетом их адресных частот для дальнейшего определения направления и величины приложенной силы F .

На узкополосный фотоприемник поступит два двухчастотных лазерных излучения, сформированных частотными откликами λ/π -ВБР $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂, с парно симметричными и одинаковыми амплитудами. В общем случае амплитуда составляющих будет зависеть от положения АВБС относительно положения и параметров спектральной характеристики треугольной ВБР, а разнос частот в каждой паре будет определяться адресной частотой.

На широкополосный фотоприемник поступит два трехчастотных лазерных излучения, сформированных частотными откликами λ -ВБР и λ/π -ВБР $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂, с амплитудами, зависящими от положения АВБС относительно положения и параметров спектральной характеристики ОФНЛХ.

При этом центральные длины волн треугольной ВБР и ОФНЛХ, работающих на пропускание, совпадают.

Данные с фотоприемников поступают на два блока фильтров – один, соединенный с выходом узкополосного, а второй с выходом широкополосного фотоприемников.

Фильтры настроены так, чтобы выделять сигналы биений от компонент АВБС и далее в цифровом процессоре преобразовывать их в параметры рабочей точки и вибрации.

2. Математическая модель процесса юстировки рабочей точки акселерометра и измерения малоинтенсивных вибраций в ее области

Зададим начальные условия:

- $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС включены встречно друг другу λ/π -ВБР компонентами;
- λ/π -ВБР компоненты обеих $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС одинаковы по амплитудным и спектральным характеристикам, имеют одинаковую адресную частоту $\omega_{АД,1}=\omega_{АД,2}=\Omega$;
- за счет преднатяжения волокна λ/π -ВБР компоненты находятся на противоположных с ВБР компонентами сторонах от рабочей точки на частотном расстоянии друг от друга, равном Ω ;
- при приложении силы F (вектор силы направлен влево) левая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС1 сдвигается влево (сжимается), правая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС2 сдвигается вправо (растягивается), если вектор силы направлен вправо все движения АВБС обратны;
- спектральные компоненты излучения лазера, отраженные от компонент АВБС, для удобства анализа представим как одночастотные;
- для анализа используем треугольную ВБР, работающую на пропускание с центральной длиной волны, расположенной по середине между λ/π -ВБР компонентами.

Ситуационно спектральное положение компонент АВБС показано на трех следующих рисунках. Рис. 4 представляет стадию преднатяжения волокон акселерометра.

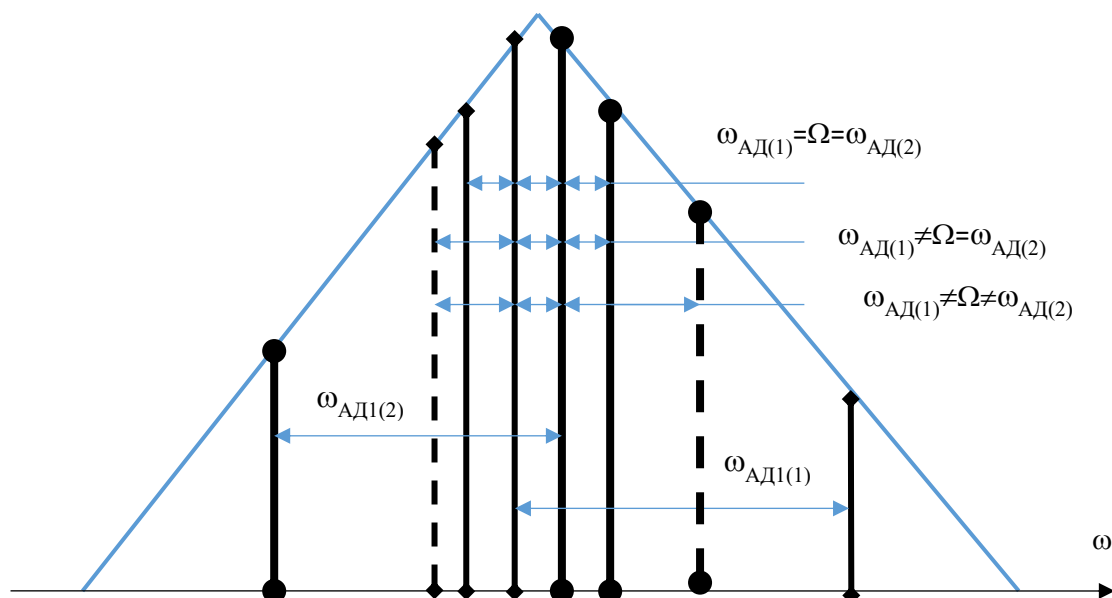


Рис. 4. Ситуационный частотный план для стадии преднатяжения

1. Математическая запись излучения отраженного от обеих $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС для анализа определения положения рабочей точки и вибраций от утечек малого уровня представляет собой колебания оптических составляющих на частотах $\omega_{А2}$ и $\omega_{А3}$ (рис. 2) $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂, которые прямо связаны с центральными и адресными частотами

λ/π -ВБР компонент $(\omega_{A2(1,2)} + \omega_{A3(1,2)})/2 = \omega_{AD(1)}/2 = \omega_{AD(2)}/2 = \omega_{\pi\text{-ВБР}(1,2)}$. Сумма указанных колебаний для случая преднатяжения (рис. 4) имеет вид:

$$S(t) = A_{A3(2)} \sin(\omega_{A3(2)} t + \phi_{A3(2)}) + A_{A2(2)} \sin(\omega_{A2(2)} t + \phi_{A2(2)}) + A_{A2(1)} \sin(\omega_{A2(1)} t + \phi_{A2(1)}) + A_{A3(1)} \sin(\omega_{A3(1)} t + \phi_{A3(1)}) \quad (1)$$

где $A_{A2(1,2)} = A_{A3(1,2)}$ – амплитуды отраженного излучения от компонент, определяющих адресные частоты $\omega_{AD(1)}$ и $\omega_{AD(2)}$, а $\phi_{A2(1,2)}$ и $\phi_{A3(1,2)}$ – их фазовые компоненты.

Напомним, что после оптического циркулятора и перед узкополосным фотоприемником установлена треугольная ВБР со спектральной характеристикой, который изменяет амплитуды частотных откликов от адресных составляющих $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₂. Параметры угла наклона q при основании треугольной ВБР и смещения ее центральной частоты b , выбираются, исходя из параметров измерительной системы, и считаются известными. Изменение спектральных характеристик откликов двух АВБС, прошедших через треугольную ВБР отражены на рис. 4.

Спектральную характеристику треугольной ВБР зададим в виде линейной зависимости ее склонов:

$$L(\omega) = q|\omega - \omega_{PT}| + b, \quad (2)$$

где q и b – параметры, описывающие левый и правый склоны треугольной ВБР, ω_{PT} – частота рабочей точки акселерометра.

Амплитуды $A_{A3(1,2)}$ и $A_{A2(1,2)}$ адресных составляющих λ/π -ВБР компонент, сформированных ими после прохождения треугольной ВБР изменятся в соответствии с их смещением по оси частот:

$$A'_{A3(1,2)} = A_{A3(1,2)} [q(\omega_{PT} \pm 3\Omega/2) + b], \quad (3.1)$$

$$A'_{A2(1,2)} = A_{A2(1,2)} [q(\omega_{PT} \pm \Omega/2) + b], \quad (3.2)$$

где переменная $\Omega = \omega_{AD1} = \omega_{AD2}$ и определяет величину преднатяжения (рис. 4).

На узкополосном фотоприемнике будут сформированы колебания биений для составляющих всех частот, указанных в (3.1) и (3.2), из которых с помощью блока фильтров будут выделены составляющие на частотах Ω , 2Ω и 3Ω .

Итоговое выражение, связывающее мощность микроволнового сигнала после фотоприемника с попадающим на него оптическим излучением и микроволновых фильтров, примет вид:

$$P(t) = S(t) S^*(t) \sim \left\{ \begin{aligned} & A_{A3(2)}'^2 + A_{A2(2)}'^2 + A_{A2(1)}'^2 + A_{A3(1)}'^2 + \\ & \left[A_{A3(2)}'^2 A_{A2(2)}'^2 + A_{A2(2)}'^2 A_{A2(1)}'^2 + A_{A2(1)}'^2 A_{A3(1)}'^2 \right] \cos \Omega t + \\ & + \left[A_{A3(2)}'^2 A_{A2(1)}'^2 + A_{A2(2)}'^2 A_{A3(1)}'^2 \right] \cos 2\Omega t + \\ & \left[A_{A3(2)}'^2 A_{A3(1)}'^2 \right] \cos 3\Omega t \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $\Re$ – коэффициент, учитывающий потери в фильтрах и коэффициент преобразования фотоприемника.

На основе анализа параметров огибающих биений (4), прошедших через микроволновые фильтры, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\pi\text{-ВБР}(2)}$ для случая преднатяжения $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} акселерометра.

Условием выполненной процедуры преднатяжения являются равенство 1 коэффициентов модуляции огибающей биений на частотах Ω , 2Ω и 3Ω при равенстве $\omega_{\text{АД}(1)} = \omega_{\text{АД}(2)} = \Omega$. При выполнении условия $\omega_{\text{АД}(1)} \neq \omega_{\text{АД}(2)} = \Omega$ или $\omega_{\text{АД}(1)} \neq \omega_{\text{АД}(2)} \neq \Omega$ основным условием выполнения стадии преднатяжения является равенство коэффициента модуляции огибающей биений на частоте Ω :

$$P(t) = S(t)S^*(t) \sim \Re \left\{ \begin{array}{c} \dots + \\ A_{2(2)}'^2 A_{2(1)}'^2 \cos \Omega t + \\ + [\dots] \cos \dots t + \\ [\dots] \cos \dots t \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Для простоты изложения другие компоненты биений в (5) мы не указываем.

2. Рассмотрим смещение инерционной массы под воздействием силы $\mathbf{F}$ влево на величину равную в частотном выражении Ω (рис. 5) при начальных условиях задачи. Исходя из начальных условий при приложении силы $\mathbf{F}$ левая $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС1 сдвигается влево (сжимается), правая $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС2 сдвигается вправо (растягивается) – вектор силы направлен влево. При этом λ/π -ВБР компоненты $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} спектрально совпадут: для $A_{\text{А}2(1,2)} = A_{\text{А}3(1,2)}$ одинаковое спектральное положение будут иметь $A_{\text{А}2(1)}$ и $A_{\text{А}3(2)}$, а также $A_{\text{А}3(1)}$ и $A_{\text{А}2(2)}$.

В дальнейшем данное положение $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} будем считать определяющим «нулевую рабочую точку» акселерометра. Сумма колебаний, соответствующих отраженным от адресных π -ВБР компонент для случая нулевой рабочей точки (рис. 5) имеет вид:

$$S(t) = 2A_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]} \sin(\omega_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]}t + \phi_{\text{А}3(2)} + \phi_{\text{А}2(1)}) + \\ + 2A_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]} \sin(\omega_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]}t + \phi_{\text{А}2(2)} + \phi_{\text{А}3(1)}). \quad (6)$$

Амплитуды $A_{\text{А}3(1,2)}$ и $A_{\text{А}2(1,2)}$ адресных составляющих π -ВБР компонент, сформированных ими после прохождения треугольной ВБР изменятся в соответствии с их смещением по оси частот и будут определяться как (3.1) и (3.2):

$$A_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]}'' = A_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]} [q(\omega_{\text{РТ}} + \Omega/2) + b], \\ A_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]}'' = A_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]} [q(\omega_{\text{РТ}} - \Omega/2) + b]. \quad (7)$$

Итоговое выражение, связывающее мощность микроволнового сигнала после прохождения (6) треугольной ВБР (7), фотоприемника с попадающим на него оптическим излучением и микроволновых фильтров, примет вид:

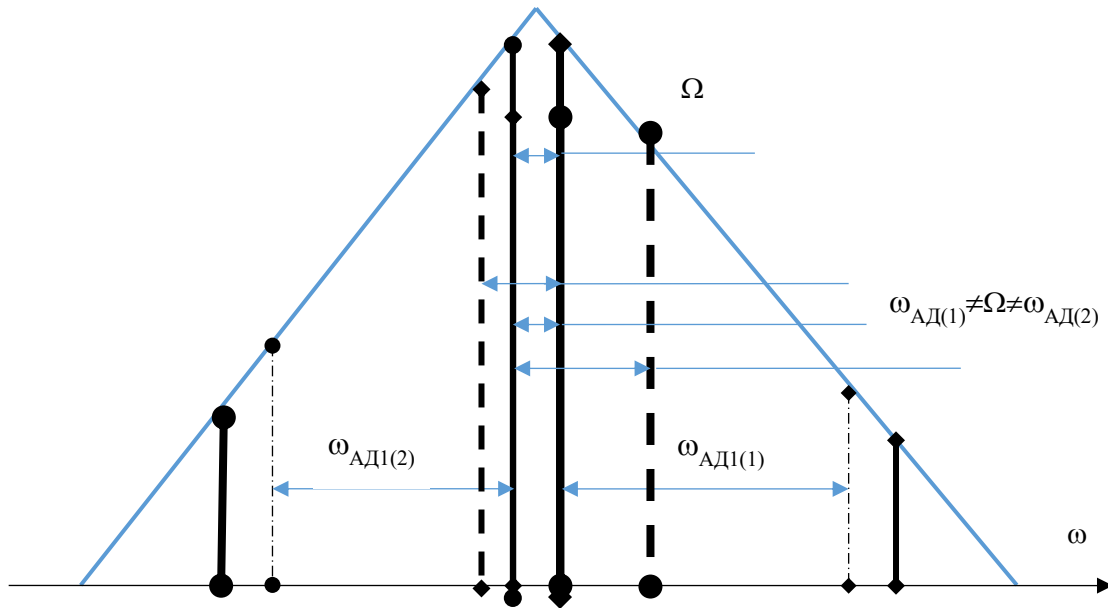


Рис. 5. Ситуационный частотный план для «нулевой рабочей точки»

$$P(t) = S(t)S^*(t) \sim \sim \Re \left\{ \begin{aligned} &2A_{A3(2)}''^2 + 2A_{A2(2)}''^2 + 2A_{A2(1)}''^2 + 2A_{A3(1)}''^2 \\ &\left[(A_{A3(2)}'' + A_{A2(1)}'')(A_{A3(1)}'' + A_{A2(2)}'') \right] \cos \Omega t \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

На основе анализа параметров огибающих биений (8), прошедших через микроволновые фильтры, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\pi\text{-ВБР}(2)}$ для случая «нулевой рабочей точки» $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} акселерометра. В данном случае значащий сигнал будет только на выходе микроволнового фильтра, настроенного на разностную частоту $\Omega = \omega_{AD(1)} = \omega_{AD(2)}$.

«Нулевая рабочая точка» фиксируется при равенстве 1 коэффициента модуляции огибающей биений на частоте Ω .

При выполнении условия $\omega_{AD(1)} \neq \omega_{AD(2)} = \Omega$ или $\omega_{AD(1)} \neq \omega_{AD(2)} \neq \Omega$ основным условием выполнения стадии «нулевой рабочей точки» является равенство коэффициента модуляции огибающей биений на частоте Ω , но для компонент :

$$P(t) = S(t)S^*(t) \sim \Re \left\{ \begin{aligned} &2A_{A2(2)}''^2 + 2A_{A2(1)}''^2 \\ &+ A_{A2(1)}'' A_{A2(2)}'' \cos \Omega t \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

с амплитудой отличной от (8).

3. Рассмотрим дальнейшее смещение инерционной массы под воздействием силы F влево на величину равную в частотном выражении Ω (рис. 6) при начальном условии задачи. Опуская порядок действий, аналогичный п. 1, получим на выходе

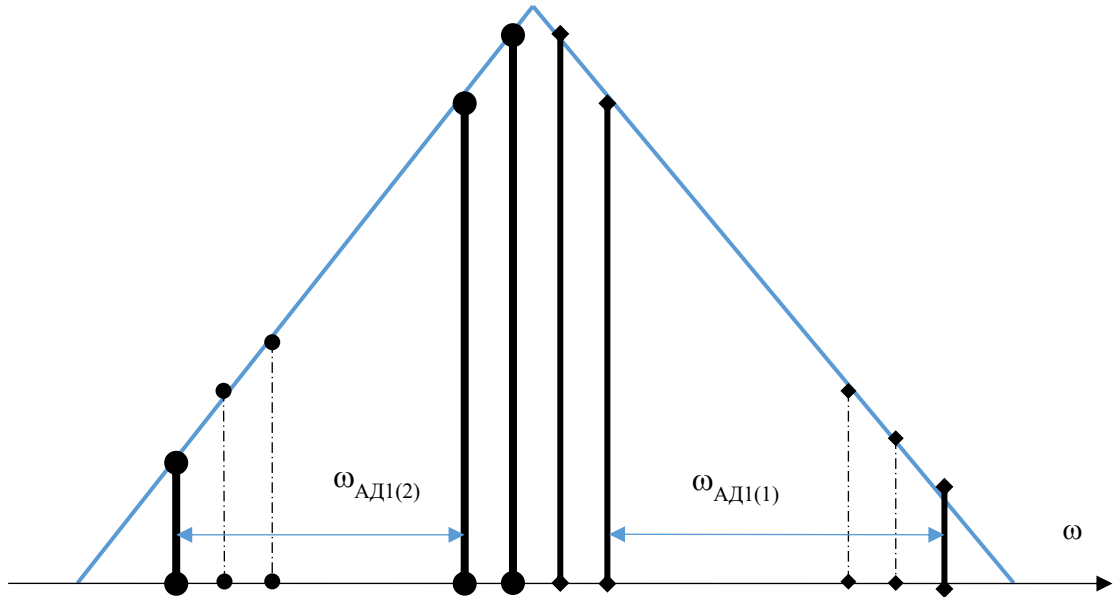


Рис. 6. Ситуационный частотный план для перевода измерений на широкополосный фотоприемник

$$\begin{aligned}
 P(t) &= S(t) S^*(t) \sim \\
 &\sim \Re \left\{ \begin{aligned} &A_{2(1)}'''^2 + A_{3(1)}'''^2 + A_{3(2)}'''^2 + A_{2(2)}'''^2 + \\ &\left[A_{2(1)}'''^2 A_{3(1)}'''^2 + A_{3(1)}'''^2 A_{3(2)}'''^2 + A_{3(2)}'''^2 A_{2(2)}'''^2 \right] \cos \Omega t + \\ &+ \left[A_{2(1)}'''^2 A_{3(2)}'''^2 + A_{3(1)}'''^2 A_{2(2)}'''^2 \right] \cos 2\Omega t + \\ &\left[A_{2(1)}'''^2 A_{2(2)}'''^2 \right] \cos 3\Omega t \end{aligned} \right\}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

На основе анализа параметров огибающих биений (10), прошедших через микроволновые фильтры, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\pi\text{-ВБР}(2)}$ для случая линейных измерений $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} акселерометра, без пересечения нулевой рабочей точки. Отличие заключается в том, что в (10) огибающую биений определяю компоненты A_2 , а в (4) компоненты A_3 .

4. Таким образом, в данном разделе рассмотрен вопрос прохождения $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} нулевой рабочей точки акселерометра. Факт прохождения сопровождается наличием сигнала огибающей биений на частоте, равной разностной частоте λ/π -ВБР компонент, на выходе соответствующего фильтра. Выходные сигналы других микроволновых фильтров будут равны 0 при равенстве адресных частот $\omega_{AD(1)} = \omega_{AD(2)}$. При неравенстве адресных частот можно использовать процедуры слежения за коэффициентом модуляции огибающей на частоте Ω , который будет равен 1 в этот момент.

Учитывая равенство амплитуд λ/π -ВБР компонент и симметричность треугольной ВБР случаи в п.1 и п.3 дадут идентичные результаты. Для определения местоположения каждой $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС необходимо использовать их адресную компоненту по λ -ВБР компонентам, расположенные асимметрично π -ВБР компонентам. В этом случае необходимо использовать ОФНЛХ и широкополосный фотоприемник или делать λ/π -ВБР компоненты с

разными адресными частотами и коэффициентами отражения (рис. 2). При максимальной частоте биений в ФВЧ больше, чем $\omega_{\text{АД1(1)}} + \omega_{\text{АД1(2)}}$ можно переходить к измерениям.

3. Математическая модель процесса локализации АВБС по наклонной линейной АЧХ оптического фильтра

Зададим начальные условия:

- $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} включены встречно друг другу λ/π -ВБР компонентами;
- λ/π -ВБР компоненты обеих $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} отличны по спектральным характеристикам, имеют разную адресную частоту $\omega_{\text{АД1}} \neq \omega_{\text{АД2}}$;
- ситуационно λ/π -ВБР компоненты с λ -ВБР компонентами находятся от положения рабочей точки на произвольном расстоянии;
- для анализа используется ОФНЛХ, работающий на пропускание с центральной длиной волны, расположенной по середине между λ/π -ВБР компонентами в положении, соответствующему рассмотрению задачи (разд. 2).

Ситуационно произвольное спектральное положение компонент $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} показано на рис. 7.

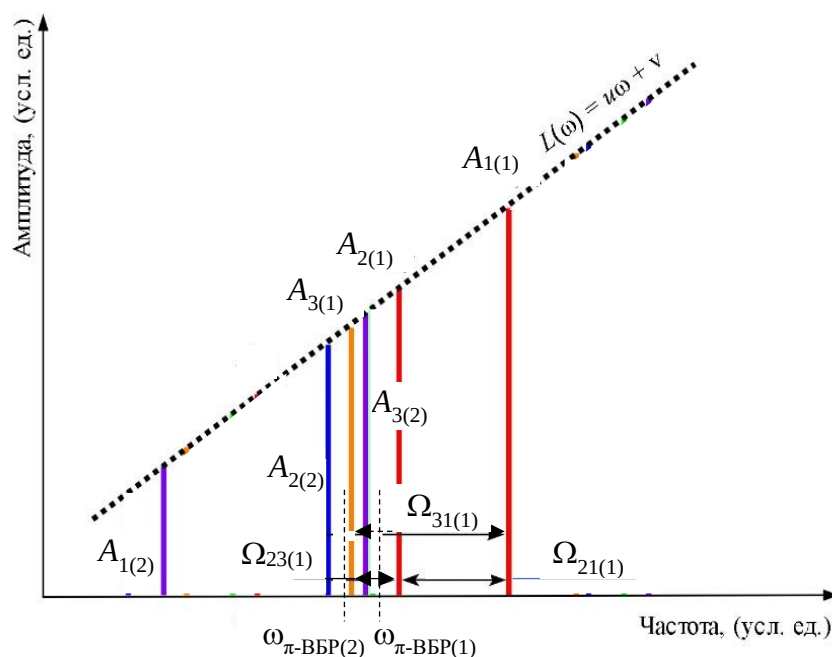


Рис. 7. Ситуационное положение $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} для решения задач измерения вибраций

Смещение центральной частоты каждой $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} вдоль ОФНЛХ ведет к изменению взаимного отношения амплитуд их адресных компонент, что влечет за собой изменение параметров огибающей биений, например, как показано на рис. 7 для адресных компонент на частотах $\Omega_{21(1)}$, $\Omega_{23(1)}$ и $\Omega_{31(1)}$ первой АВБС.

Задача однозначного определения центральной частоты одной АВБС по параметрам огибающих биений компонент на адресных частотах была решена нами ранее в [11]. Для $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС с учетом разного характера компонент такая задача не решалась. На первом этапе решим эту задачу используя упрощенное представление компонент в виде бесконечно узких адресных составляющих. Ввести понятие «центральной частоты (длины волны)»

$(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} можно любым способом, позволяющим ее вычисление, для чего используем брэгговскую частоту их средней (второй) компоненты, которую обозначим как $\omega_{2(1,2)}$:

$$\omega_{(1,2)} = \omega_{A2(1,2)}. \quad (11)$$

Задача состоит в определении «центральной частоты» $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} в амплитудно-частотной плоскости для дальнейшего определения их изменений для вычисления амплитуды и частоты вибрации, вызванных утечками в ТП.

Отраженное от $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} лазерное излучение, поступающее на ОФНЛХ (рис. 1), записывается в виде:

$$S(t) = A_{1(1)} \sin(\omega_{A1(1)} t) + A_{2(1)} \sin(\omega_{A2(1)} t) + A_{3(1)} \sin(\omega_{A3(1)} t) + \\ + A_{1(2)} \sin(\omega_{A1(2)} t) + A_{2(2)} \sin(\omega_{A2(2)} t) + A_{3(2)} \sin(\omega_{A3(2)} t). \quad (12)$$

Левая и правая оптические компоненты $A_{1(1,2)}$ и $A_{3(1,2)}$ могут быть выражены через центральную брэгговскую (оптическую) частоту и адресные (радио) частоты $\Omega_{21(1,2)}$, $\Omega_{23(1,2)}$:

$$\omega_{A1(1,2)} = \omega_{(1,2)} \pm \Omega_{21(1,2)}; \omega_{A3(1,2)} = \omega_{(1,2)} \mp \Omega_{23(1,2)}. \quad (13)$$

При внимательном анализе (16) и (13) с учетом встречного включения $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2}, можно сделать вывод о том, что не только индексы 1 и 2 меняются местами, но и компоненты A и C находятся с разных сторон от центральной компоненты, что свидетельствует о «комбинированной симметрии».

Известными величинами в (16) и (13) являются адресные частоты $\Omega_{21(1,2)}$, $\Omega_{23(1,2)}$, а неизвестными величинами являются все амплитуды адресных компонент $A_{1(1,2)}$, $A_{2(1,2)}$ и $A_{3(1,2)}$ (6 величин) и положения центральных частот $\omega_{(1,2)}$ (2 величины) $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2}.

Добавим шесть требований, что точки $(\omega_{A1(1,2)}; A_{1(1,2)})$, $(\omega_{(1,2)}; A_{2(1,2)})$, $(\omega_{A3(1,2)}; A_{3(1,2)})$ связаны соотношениями:

$$A_{1(1,2)} = A_{2(1,2)} \pm u\Omega_{21(1,2)}; A_{2(1,2)} = u\omega_{(1,2)} + v; A_{3(1,2)} = A_{2(1,2)} \mp u\Omega_{23(1,2)}, \quad (14)$$

поскольку они все проходят через один и тот же фильтр с известной наклонной амплитудно-частотной характеристикой:

$$L(\omega) = u\omega + v. \quad (15)$$

Выражение для выходного тока фотоприемника для (12) с учетом (14) будет содержать:

- квадратичные составляющие компонент (12) – 6 штук;
- составляющие биений компонент на адресных частотах $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ – 3 штуки;
- составляющие биений компонент на адресных частотах $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ – 3 штуки;
- составляющие биений между компонентами $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ на произвольных частотах, вызванных вибрациями и соответствующим положением обеих АВБС по длине ОФНЛХ – 9 штук.

Принимая во внимание наличие «комбинированной симметрии», учитывая соотношения для связи адресных компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} выражение для выходного тока фотоприемника можно переписать в виде (16).

Подставив (14) в (16), получим зависимость выходного тока фотоприемника, от двух неизвестных величин ω_1 и ω_2 .

$$\begin{aligned}
 I(t) = & \sum_{i=1}^2 (A_{1,i}^2 + A_{2,i}^2 + A_{3,i}^2) + \\
 & + 2 \sum_{i=1}^2 A_{1,i} A_{2,i} \cos(\Omega_{21i} t) + A_{2,i} A_{3,i} \cos(\Omega_{23i} t) + A_{1,i} A_{3,i} \cos((\Omega_{21i} + \Omega_{23i}) t) + \\
 & + 2 \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} & A_{1,i} A_{1,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{1,i} A_{1,i+1}}\right) t\right] + A_{1,i} A_{2,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{1,i} A_{2,i+1}}\right) t\right] + A_{1,i} A_{3,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{1,i} A_{3,i+1}}\right) t\right] + \\ & A_{2,i} A_{1,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{2,i} A_{1,i+1}}\right) t\right] + A_{2,i} A_{2,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{2,i} A_{2,i+1}}\right) t\right] + A_{2,i} A_{3,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{2,i} A_{3,i+1}}\right) t\right] + \\ & A_{3,i} A_{1,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{3,i} A_{1,i+1}}\right) t\right] + A_{3,i} A_{2,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{3,i} A_{2,i+1}}\right) t\right] + A_{3,i} A_{3,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{3,i} A_{3,i+1}}\right) t\right] \end{aligned} \right\}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

В силу громоздкости записи итогового уровня предложим более простой вариант. Введем функцию $F(\Omega_F, \Omega)$ частотного полосового фильтра, близкую к функции нормального распределения за исключением нормирующего множителя, так чтобы функция полосового фильтра почти везде равнялась нулю, за исключением окрестности точек адресных частот обеих $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2}:

Обозначим объединенное множество значений: 0 (постоянный уровень сигнала), множество адресных частот $\Omega_{21,i}$, $\Omega_{23,i}$ и множество сумм адресных частот $\Omega_{31,i}$ (рис. 7):

Отфильтровав сигнал (16), на частотах $F(\Omega_F, \Omega)$, получим переопределенную систему из семи уравнений для нахождения двух неизвестных ω_1 и ω_2 .

$$\{\Omega_{F,n}\}_{n=1,3N+1} = \{0\} \cup \{\Omega_{21i}\} \cup \{\Omega_{23i}\} \cup \{\Omega_{21i} + \Omega_{23i}\}, \forall i = \overline{1, N}, N=2. \quad (17)$$

Решение переопределенной системы уравнений можно проводить методом наименьших квадратов. Данную систему уравнений можно решить только численно. В качестве начальных условий можно взять те значения ω_i , которые являются решением системы уравнений в которых предполагается, что последних трех двойных сумм в ней не существует (рабочая точка акселерометра). После чего система уравнений, дополненная начальными значениями, решается любым хорошо сходящимся итерационным методом, например, Левенберга-Маргквардта или Ньютона-Рафсона.

4. Математическая модель процесса измерения вибрации

Ускорение (вибрация) – физическая величина, определяющая быстроту изменения скорости тела, то есть первая производная от скорости по времени, вызванной возникновением как собственных колебаний ТП при течении в нем жидкости, так и дополнительных колебаний, вызванных утечками.

В рамках применяемой модели акселерометра ускорение a вдоль оси волокон с записанными в них $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} может быть выражено как:

$$a = F/m, \quad (17)$$

где m – инерционная масса.

Пренебрегая упругим сопротивлением анизотропно-упругого подвеса, будем учитывать только модуль упругости волокна k . Тогда для обеих волокон по закону Гука получим:

$$F = k\Delta l, \quad (18)$$

где Δl – абсолютное удлинение волокна для $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ со знаком плюс и укорочение для $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ со знаком минус.

Относительное изменение длины волокна будет равно $\Delta l/l$, следовательно, точно так же относительно изменится и период решеток и их компонент. Учитывая связь периодов средних компонент $\Lambda_{1,2}$ и их брэгговских частот $\omega_{1,2}$ или длин волн $\lambda_{1,2}$ в невозмущенном состоянии, получим:

$$\lambda_1 + \Delta\lambda_1 = 2n_{\text{eff}} \Lambda_1 \left(1 + \frac{F}{kl}\right), \quad (19)$$

$$\lambda_2 - \Delta\lambda_2 = 2n_{\text{eff}} \Lambda_2 \left(1 - \frac{F}{kl}\right), \quad (20)$$

где l – длина участка волокна между точками крепления в акселерометре.

Как видно, смещение брэгговских длин волн, а, следовательно, и частот $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ зависит от действующей силы $\mathbf{F}$ и в общем случае температуры, справедливо выразить эту зависимость функциональной зависимостью:

$$\omega_1 = \omega_1(\mathbf{F}, T), \quad \omega_2 = \omega_2(\mathbf{F}, T). \quad (21)$$

Дифференциальная схема исполнения акселерометра, согласно предъявленным требованиям к измерительной системе и дифференциальной схеме его исполнения, позволяет минимизировать влияние дрейфа температуры на разность брэгговских частот, следовательно, для разности брэгговских частот будет справедливо в первом приближении:

$$\omega_1 - \omega_2 = \Phi(\mathbf{F}_x) = \Phi(F), \quad (22)$$

где $\Phi(\mathbf{F}_x)$ функциональная зависимость разностной частоты $(\omega_1 - \omega_2)$ от проекции действующей силы $\mathbf{F}(t)$ на направление оси акселерометра – $\mathbf{F}_x$. Как и ранее будем рассматривать проекцию F действующей силы $\mathbf{F}$ на ось волокна. Здесь и далее будем использовать неявную запись брэгговских частот в виде ω_1 и ω_2 , как функций, зависящих от F .

Изменяющееся во времени внутреннее давление трубы можно выразить как:

$$P = P_0 + P_1 \sin \omega t, \quad (23)$$

где P_0 представляет собой номинальное давление, в то время как P_1 повторяет амплитуду изменения давления с частотой $f = \omega/2\pi$. Давление в ТП будет создавать силу на стенки трубы, труба будет расширяться, и это вызовет собственную вибрацию.

Трубу можно считать тонкостенной с толщиной h , а длина волны колебаний давления намного больше диаметра d . Поскольку статические напряжения и деформации вводятся номинальным давлением, P_0 не играет определяющего значения для вывода формулы для вибрации, рассматриваются только динамические напряжения и деформации. Молекулы воды в среднем перемещаются в осевом направлении потока жидкости. Однако мно-

гие молекулы сталкиваются со стенкой трубы. В силу первого закона термодинамики определенное количество кинетической энергии, производимой молекулами, будет рассеиваться в тепло в виде турбулентных вихрей, но большая часть кинетической энергии преобразуется в потенциальную энергию в форме давления.

Вибрация в ТП, возникающая в результате цикла преобразования энергии, пропорциональна средней скорости потока в нем. Таким образом, возможно измерение частоты и амплитуды собственных колебаний ТП и определение их как пороговых. При увеличении амплитуды или изменении частоты речь идет о появлении вибраций, вызванных утечками. Анализируя разность первых и вторых можно определить параметры утечек.

Заключение

В данной статье приведена математическая модель аддитивного сигнала, возникающего в результате суммарного отклика двух $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₂, используемых в качестве чувствительных элементов волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом. Определение смещения центральных частот ω_1 и ω_2 указанных АВБС осуществляется по аддитивному сигналу биений всех их адресных частот на фотоприемнике, по параметрам которого судят о приложенных физических полях на каждый датчик в отдельности.

Поставлена задача математической записи аддитивного сигнала на выходе узкополосного фотоприемника для подготовки акселерометра к работе, определения силы преднатяжения волокон, юстировки нулевой рабочей точки и анализа малоинтенсивных вибраций, вызванных «тихими» утечками, в полосе пропускания фотоприемника. Для анализа используется частотный дискриминатор в виде равнобедренной треугольной ВБР.

Поставлена задача математической записи аддитивного сигнала на выходе широкополосного фотоприемника, пригодном для его последующей адресной частотной фильтрации с использованием программных продуктов спектрального анализа. Получена переопределенная система уравнений, описывающая зависимость амплитуд выходного тока фотоприемника при фильтрации его на адресных частотах компонент $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₂ в зависимости от их положения в амплитудно-частотной плоскости оптического фильтра с наклонной линейной характеристикой.

Предложенные математические модели и описание задачи математической физики по определению вибрации как разности ω_1 и ω_2 позволяют осуществить переход к следующей стадии исследования, а именно к натурным экспериментам.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Гольянов А. А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах / А.А. Гольянов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. - 2002. - № 10. - С. 5-14.
2. Кутуков С. Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах / С. Е. Кутуков // Нефтегаз. дело. - 2004. - Т. 2. - С. 29-45.
3. Prisutova, J. Use of fibre-optic sensors for pipe condition and hydraulics measurements: a review / J. Prisutova, A. Krynkina, S. Tait, et al. // Civil Engineering. - 3 (1). - P. 85-113.

4. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.
5. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.
6. Муслимов Э.Р. Спектрографы с высокой дисперсией для радиотонных сенсорных систем / Э.Р. Муслимов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 6 (158). - С. 318-319.
7. Muslimov E. Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach / E. Muslimov, I. Nureev, O. Morozov et al. // Optical Engineering. - 2018. - Vol. 57. - № 12. -Р. 125104.
8. Мисбахов Р. Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р. Ш. Мисбахов, Р. Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. - 2017. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
9. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. - № 4. - С. 535-543.
10. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6. - № 1. - С. 6–13.
11. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov et al. // Sensors. - 2020. - Vol. 20. - P. 2693.
12. Мисбахов Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р.Ш. Мисбахов, В.И. Артемьев, О.Г. Морозов и др.// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2024. № 2 (62). С. 57-73.

FIBER-OPTIC ACCELEROMETER FOR CONTROL OF PIPELINE LEAKAGES BASED ON TWO COMBINED ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURES WITH WAVE AND PHASE-WAVE COMPONENTS. MATHEMATICAL MODELS

¹*Rus.Sh. Misbakhov*, ²*E.V. Kulikov*

¹LLC "TatAISneft"

Russian Federation, 423458, Almet'yevsk, st. Riza Fakhret'dina, 62

²FSBI "3rd Central Research Institute" Ministry of Defense
of the Russian Federation

Russian Federation, 107564, Moscow, Pogonny proezd, 10

Abstract. Pipeline leakage detection remains an important issue, especially for the development of smart energy. Various non-destructive testing methods for pipeline leak detection have been actively developing since the end of the last century. However, research needs and technological problems still remain, especially at the stage of their implementation in practice of thermal and nuclear power plants. Researchers have shown great interest in the vibration method of leak detection. The signal of the natural frequency of pipe vibrations is monitored using an accelerometer, the parameters of which change when leaks appear. Recently, such accelerometers are based on fiber-optic technologies using one or more fiber Bragg gratings (FBG) with well-known advantages and disadvantages. The latter are mainly associated with the need to use an expensive optical spectral device for their interrogation - an interrogator. The emerging way to eliminate this drawback is the transition to budget radio-photonics interrogators operating in the radio frequency range and sensitive elements adapted to them - addressable fiber Bragg structures (AFBS). In the simplest case, AFBS are two FBGs, spectrally separated by a unique frequency that does not change under any conditions, also lying in the radio frequency range. The article consistently considers the issues of synthesis of the functional optoelectronic circuit of the microwave photonic accelerometer, based on two combined AFBS with wave and phase-wave components operating on reflection, a mathematical model of the process of adjusting the accelerometer in the region of its operating point, as well as a mathematical model of the process of measuring vibrations using their frequency localization on a known scale of an optical filter with an inclined linear characteristic through the difference in the components of two AFBS, wherein the relative position of the components inside the AFBS is known in advance.

Keywords: pipeline, leakage, accelerometer, fiber Bragg grating, address fiber Bragg structure, combined address fiber Bragg structure, mathematical model of monitoring the operating point; mathematical model of vibration measurement.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИНАМИКИ РУКОПИСНЫХ ПОДПИСЕЙ

Э.С. Анисимова^{1,2}, И.В. Аникин¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

² Елабужский институт (филиал) федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"
Российская Федерация, 423604, г. Елабуга, ул. Казанская, д. 89

Аннотация. В работе исследуется применение нейронных сетей для распознавания рукописных подписей с учётом динамики их ввода. Рассматриваются три типа архитектур: полносвязные сети (MLP), сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) и свёрточные нейронные сети (CNN). Проведён сравнительный анализ эффективности данных архитектур на наборе данных МСЧТ Signature 100, содержащем подписи 100 авторов и их подделки. В ходе исследования варьировались ключевые гиперпараметры, такие как оптимизатор (RMSProp, Adam, SGD), размер пакета и количество слоёв, для каждой из архитектур. Результаты показывают, что свёрточные нейронные сети (CNN) достигают наилучшей точности, превосходя MLP и LSTM. Предложенный метод имеет практическую ценность для автоматизации верификации подписей и может быть применён в работе систем безопасности и электронного документооборота.

Ключевые слова: распознавание рукописных подписей, нейронные сети, LSTM, CNN, полносвязные сети, динамика подписи, верификация, биометрическая аутентификация, предобработка данных, гиперпараметры.

Введение

В современном цифровом мире аутентификация личности играет ключевую роль в обеспечении безопасности общества. Среди различных биометрических методов верификация по рукописной подписи сохраняет свою актуальность, особенно в юридически значимых документах и финансовых операциях [1]. Однако традиционные методы распознавания подписей [2, 3], основанные на статическом анализе изображения, уязвимы к подделкам высокого качества. Поэтому всё большее внимание сегодня привлекает анализ динамики рукописной подписи, учитывающий такие параметры, как координаты, давление, азимут, наклон пера [4-6]. Этот подход позволяет получить более полную информацию о процессе написания подписи и существенно повысить надёжность систем аутентификации.

Для распознавания рукописных подписей по динамике их ввода традиционно применяются такие методы, как метод опорных векторов [7], скрытые марковские модели [8], вейвлет-преобразования [9], теория нечётких множеств [10-11]. Однако в последние годы нейронные сети продемонстрировали выдающиеся результаты в различных областях, включая компьютерное зрение и анализ временных рядов. Их способность к обучению на больших объёмах данных и извлечению сложных зависимостей делает нейронные сети перспективным инструментом для распознавания динамики рукописных подписей. Несмотря на имеющиеся исследования, потенциал нейросетевого подхода в этой области остаётся не до конца исследованным. В частности, актуальными задачами являются разработка и исследование новых архитектур нейронных сетей, адаптированных к специфике данных о динамике подписи, а также оптимизация параметров обучения для достижения максимальной

точности распознавания и устойчивости к подделкам. В данной статье рассматривается разработка и исследование нейросетевых моделей, включая полносвязную (MLP, Multilayer Perceptron), свёрточную (CNN, Convolutional Neural Network) и LSTM (Long Short-Term Memory) сети, для распознавания рукописных подписей с учётом динамики их ввода. Проводится сравнительный анализ эффективности предложенных моделей и исследуется их чувствительность к различным параметрам.

Материалы и методы

Для решения задачи распознавания рукописных подписей с учётом динамики их ввода был использован набор данных MCYT Signature 100 [12], содержащий рукописные подписи 100 авторов. Разделение набора данных на обучающую и валидационную выборки было проведено в стандартном соотношении 4:1 (4000 и 1000 подписей соответственно), что является общепринятой практикой в задачах машинного обучения и позволяет обеспечить достаточный объём данных для обучения модели и адекватную оценку её качества. Рукописные подписи были введены с использованием графического планшета Wacom INTUOS A6 USB. В процессе ввода рукописных подписей осуществлялось считывание следующих параметров: значений координат (X и Y), давления на перо (Z), азимута (Γ), угла наклона пера (H) в каждой точке подписи. Параметры рабочей области графического планшета 127x97, чувствительность к нажиму – 1024 уровня. Таким образом, диапазоны значений параметров: X : [0; 12700]; Y : [0; 9700]; Z : [0; 1024]; Γ : [0; 3600]; H : [300; 900](Рисунок 1).

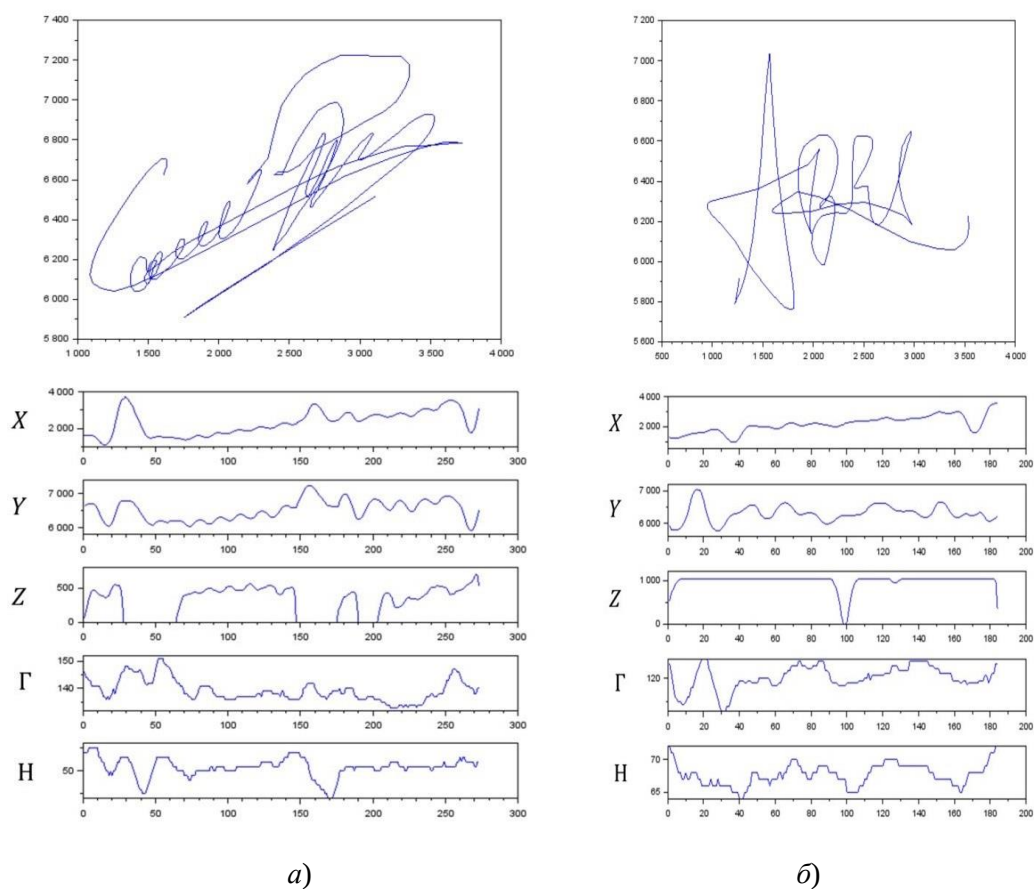


Рис.1. Визуализация рукописных подписей пользователей 0002 (а) и 0036 (б) с параметрами из набора данных MCYT Signature 100

В процессе подготовки данных временные ряды были нормализованы с учётом характеристик графического планшета. Поскольку рукописные подписи содержат разное количество точек, для корректного сравнения признаков и последующей обработки данных была проведена интерполяция, унифицирующая длину последовательностей. Это необходимо, так как алгоритмы машинного обучения, используемые для распознавания, часто требуют входных последовательностей одинаковой длины.

В исследовании рассматривались как подлинные подписи, так и их подделки. Набор поддельных подписей был сформирован путём сбора 25 образцов для каждого из участников. Подлинные подписи каждого автора формировали отдельный класс, а все поддельные подписи были объединены в один класс, что в итоге привело к 101 классу. Обучающая выборка содержала по 20 подлинных подписей каждого автора. Каждая подпись представлена многомерным временным рядом размерности 1000×5 , где 1000 – длина временного ряда (количество отсчётов после проведения интерполяции), а 5 – количество регистрируемых параметров: X, Y, Z, G, H .

Для решения задачи классификации были разработаны и исследованы три типа нейронных сетей: полносвязная, свёрточная и LSTM. Выбор этих архитектур обусловлен их эффективностью в задачах анализа временных рядов. Полносвязные сети хорошо зарекомендовали себя в задачах классификации, LSTM сети способны учитывать долговременные зависимости во временных последовательностях, а свёрточные сети эффективно извлекают локальные признаки.

Экспериментальные исследования

Представим описание структуры и результатов экспериментов с каждой моделью.

1. Полносвязная нейронная сеть (MLP)

Для исследования влияния различных гиперпараметров на точность классификации полносвязной нейронной сети (MLP) была проведена серия экспериментов. В ходе экспериментов варьировались следующие гиперпараметры: оптимизатор (RMSProp, Adam, SGD), размер пакета данных (от 50 до 300) и количество слоёв (2, 3). Результаты экспериментов представлены в таблице 1. В каждом эксперименте фиксировалась архитектура сети, количество нейронов в каждом слое и использовалась функция активации ReLU. Это позволило оценить влияние выбранных гиперпараметров на производительность модели в задаче распознавания динамики рукописных подписей.

Таблица 1. Точность MLP при различных оптимизаторах, размерах пакета и количестве слоёв

Количество слоёв	Количество нейронов	Оптимизатор	Размер пакета	Функция активации	Точность (%)
2	100	RMSProp	50	ReLU	90,6
2	100	RMSProp	100	ReLU	91,8
2	100	RMSProp	150	ReLU	93,3
2	100	RMSProp	200	ReLU	92,8
2	100	RMSProp	250	ReLU	91,9
2	100	RMSProp	300	ReLU	92,1
2	100	Adam	50	ReLU	92,3
2	100	Adam	100	ReLU	84,9

2	100	Adam	150	ReLU	91,7
2	100	Adam	200	ReLU	92,5
2	100	Adam	250	ReLU	92
2	100	Adam	300	ReLU	91,8
2	100	SGD	50	ReLU	88,8
2	100	SGD	100	ReLU	87,3
2	100	SGD	150	ReLU	86
2	100	SGD	200	ReLU	87,1
2	100	SGD	250	ReLU	86,6
2	100	SGD	300	ReLU	85,9
3	100	RMSProp	50	ReLU	89,6
3	100	RMSProp	100	ReLU	91,1
3	100	RMSProp	150	ReLU	87,9
3	100	RMSProp	200	ReLU	93,6
3	100	RMSProp	250	ReLU	92,1
3	100	RMSProp	300	ReLU	92,6
3	100	Adam	50	ReLU	60,7
3	100	Adam	100	ReLU	81,4
3	100	Adam	150	ReLU	93,1
3	100	Adam	200	ReLU	92,7
3	100	Adam	250	ReLU	92,9
3	100	Adam	300	ReLU	92,5
3	100	SGD	50	ReLU	89,7
3	100	SGD	100	ReLU	87,7
3	100	SGD	150	ReLU	86,5
3	100	SGD	200	ReLU	84,7
3	100	SGD	250	ReLU	84,7
3	100	SGD	300	ReLU	85,8

2. LSTM нейронная сеть

Для исследования влияния оптимизатора, размера пакета и количества слоёв на точность классификации LSTM нейронной сети была проведена серия экспериментов. Количество нейронов в каждом слое было зафиксировано на 100, а коэффициент dropout – на 0.2. Варьировались следующие гиперпараметры: оптимизатор (RMSProp, Adam), размер пакета (50, 100, 150, 200, 250, 300) и количество слоёв (2, 3). Результаты экспериментов, демонстрирующие влияние этих параметров на точность, представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Точность LSTM-сети при различных оптимизаторах, размерах пакета и количестве слоёв

Количество слоёв	Количество нейронов	Оптимизатор	Размер пакета	Коэффициент dropout	Точность (%)
2	100	RMSProp	50	0,2	88,7
2	100	RMSProp	100	0,2	88,8
2	100	RMSProp	150	0,2	83,5
2	100	RMSProp	200	0,2	88,1
2	100	RMSProp	250	0,2	87,2
2	100	RMSProp	300	0,2	87,2
2	100	Adam	50	0,2	89,2
2	100	Adam	100	0,2	88,8
2	100	Adam	150	0,2	88,1
2	100	Adam	200	0,2	87,8
2	100	Adam	250	0,2	85,8
2	100	Adam	300	0,2	86,5
3	100	RMSProp	50	0,2	87,8
3	100	RMSProp	100	0,2	86,9
3	100	RMSProp	150	0,2	87,3
3	100	RMSProp	200	0,2	85,8
3	100	RMSProp	250	0,2	85,6
3	100	RMSProp	300	0,2	85,1
3	100	Adam	50	0,2	84,6
3	100	Adam	100	0,2	85,8
3	100	Adam	150	0,2	87,8
3	100	Adam	200	0,2	87,2
3	100	Adam	250	0,2	86,7
3	100	Adam	300	0,2	86,2

3. Свёрточная нейронная сеть (CNN)

Для анализа чувствительности CNN к количеству слоёв, оптимизатору и размеру пакета был проведен ряд экспериментов. В Таблице 3 представлены результаты, демонстрирующие влияние следующих гиперпараметров: количество слоёв (2, 3), оптимизатор (RMSProp, SGD, Adam) и размер пакета (от 50 до 300). Функция активации (ReLU), количество фильтров (20), размер ядра свёртки (4x4), шаг свёртки (4) и размер окна пулинга (2x2) были зафиксированы.

Таблица 3. Точность CNN при различных оптимизаторах, размерах пакета и количестве слоёв

Количество слоёв	Оптимизатор	Размер пакета	Функция активации	Количество фильтров	Размер ядра свёртки	Шаг свёртки	Размер окна пулинга	Точность (%)
2	RMSProp	50	ReLU	20	4x4	4	2x2	93
2	RMSProp	100	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,5
2	RMSProp	150	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,5
2	RMSProp	200	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,2
2	RMSProp	250	ReLU	20	4x4	4	2x2	94
2	RMSProp	300	ReLU	20	4x4	4	2x2	93
2	Adam	50	ReLU	20	4x4	4	2x2	91,9
2	Adam	100	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,1
2	Adam	150	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,2
2	Adam	200	ReLU	20	4x4	4	2x2	91
2	Adam	250	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,5
2	Adam	300	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,7
2	SGD	50	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,7
2	SGD	100	ReLU	20	4x4	4	2x2	92
2	SGD	150	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,8
2	SGD	200	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,7
2	SGD	250	ReLU	20	4x4	4	2x2	91,7
2	SGD	300	ReLU	20	4x4	4	2x2	91,1
3	RMSProp	50	ReLU	20	4x4	4	2x2	94,3
3	RMSProp	100	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,9
3	RMSProp	150	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,5
3	RMSProp	200	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,3
3	RMSProp	250	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,5
3	RMSProp	300	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,8
3	Adam	50	ReLU	20	4x4	4	2x2	91,9
3	Adam	100	ReLU	20	4x4	4	2x2	90,4
3	Adam	150	ReLU	20	4x4	4	2x2	91,9
3	Adam	200	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,5
3	Adam	250	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,5
3	Adam	300	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,2
3	SGD	50	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,5

3	SGD	100	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,4
3	SGD	150	ReLU	20	4x4	4	2x2	93,1
3	SGD	200	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,5
3	SGD	250	ReLU	20	4x4	4	2x2	92,4
3	SGD	300	ReLU	20	4x4	4	2x2	91,5

Обсуждение полученных результатов

В данной работе исследовалась задача распознавания рукописных подписей с использованием набора данных MCYT Signature 100, содержащего подписи 100 авторов, а также их подделки. Для решения задачи распознавания были разработаны и исследованы три типа нейронных сетей: полносвязная (MLP), долгой краткосрочной памяти (LSTM) и свёрточная (CNN). Выбор этих архитектур обусловлен их эффективностью в задачах анализа временных рядов, к которым относится и распознавание динамики рукописных подписей.

1. Полносвязная нейронная сеть (MLP). Анализ экспериментов с полносвязной нейронной сетью (MLP) выявил зависимость точности классификации от выбора оптимизатора и размера пакета данных. RMSProp показал наилучшую производительность, достигнув точности 93,6% с размером пакета 200 и трёхслойной архитектурой. Adam и SGD продемонстрировали менее стабильные результаты, кроме того, Adam оказался чувствителен к изменению архитектуры сети: его эффективность заметно снижалась при переходе от двух- к трёхслойной модели. В целом, результаты подчеркивают важность выбора подходящего оптимизатора и размера пакета для достижения оптимальной производительности MLP в задаче распознавания рукописных подписей.

2. LSTM нейронная сеть. Наилучшая точность (89,2%) была достигнута с использованием двухслойной архитектуры, оптимизатора Adam и размера пакета 50. При использовании RMSProp наибольшая точность составила 88,8% с размером пакета 100 (в двухслойной модели). Увеличение количества слоев до трёх в целом привело к снижению точности. Изменение размера пакета показывает незначительные колебания точности, не выявляя чёткой зависимости.

3. Свёрточная нейронная сеть (CNN). Наилучшая точность (94,3%) была достигнута при использовании трёхслойной CNN, оптимизатора RMSProp и размера пакета 50. Для двухслойной CNN максимальная точность составила 94% с оптимизатором RMSProp и размером пакета 250. Оптимизаторы Adam и SGD продемонстрировали более низкую точность по сравнению с RMSProp. Влияние размера пакета на точность было относительно небольшим, однако наблюдались некоторые колебания в зависимости от используемого оптимизатора.

Практическая ценность: Предложенный метод распознавания рукописных подписей с использованием нейронных сетей имеет высокую практическую ценность, поскольку позволяет автоматизировать процесс верификации подписей, что может быть применено в различных областях, таких как банковское дело, электронный документооборот, системы безопасности и другие. Автоматизация процесса верификации подписей повышает эффективность работы, снижает вероятность ошибок и мошенничества, а также уменьшает затраты на ручной труд.

Условия применимости: Для эффективного применения предложенного метода необходимо соблюдение следующих условий:

- Наличие достаточного объёма данных для обучения.
- Предварительная обработка данных.

- Выбор подходящей архитектуры нейронной сети и настройка гиперпараметров.
- Аппаратные ресурсы: Обучение и применение глубоких нейронных сетей может требовать значительных вычислительных ресурсов.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность нейронных сетей для распознавания динамики рукописных подписей. Свёрточная нейронная сеть (CNN) продемонстрировала наилучший результат (94,3%), превосходя полносвязную (MLP) и LSTM нейронную сеть. Для CNN ключевым фактором достижения высокой точности стал выбор оптимизатора и количества слоёв. Влияние оптимизатора и размера пакета также оказалось важным для MLP и LSTM. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку более сложных архитектур, комбинированных моделей, а также на исследование новых методов предобработки данных и техник расширения набора данных для повышения обобщающей способности моделей и их устойчивости к вариациям в стиле подписи. Это позволит создать более надёжные и точные системы распознавания динамики рукописных подписей.

Список литературы

1. Самотуга А.Е. Распознавание субъектов и их психофизиологических состояний на основе параметров подписи для защиты документооборота / А.Е. Самотуга // Системная инженерия и информационные технологии. – 2023. – Т.2. – С.56-65.
2. Diaz M. Investigating the common authorship of signatures by off-line automatic signature verification without the use of reference signatures / M. Diaz, M.A. Ferrer, S. Ramalingam, R. Guest // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. - 2020. Т. 1. – С. 487-499.
3. Mo L.-F., Zhu Y.-L., Mamat H., Ubul K. Off-line handwritten signature recognition based on discrete curvelet transform / L.-F. Mo, Y.-L. Zhu, H. Mamat, K. Ubul // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – P. 424-434.
4. Riesen K. Online signature verification based on string edit distance / K. Riesen, R. Schmidt // International Journal on Document Analysis and Recognition. - 2019. – V.1. – P. 41-54.
5. Sae-Bae N. A Simple and Effective Method for Online Signature Verification / Sae-Bae N., Memon Sae-Bae N. // BIOSIG 2013 – Proceedings of the 12th International Conference of the Biometrics Special Interest Group. - 2013. – P. 147-158.
6. Tolosana R. ICDAR 2021 competition on on-line signature verification / R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, C. Gonzalez-Garcia, Fierrez J. et al. // Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – P. 723-737.
7. Elzeki O. Signature recognition based on support vector machine and deep convolutional neural networks for multi-region of interest / O. Elzeki, M. Shams, N. Hikal et al. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2020. - V.98. – P. 3887-3897.
8. Maiorana E., Martinez-Diaz M., Campisi P., Ortega-Garcia J., Neri A. Template Protection for HMM-based On-Line Signature Authentication / E. Maiorana, M. Martinez-Diaz, P. Campisi et al. // CVPR Workshop. – 2008. - P.1-6.
9. Kumari M. Signature Recognition using 2D Discrete Wavelet Transforms International / M. Kumari, A. Kumar, M. Saxena // Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2020. – V. 9(7). – P. 528-532.
10. Anisimova E.S. Fuzzy Sets Theory Approach for Recognition Handwritten Signatures / E.S. Anisimova, I.V. Anikin // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2021. –P. 969-982.
11. Anikin I. Framework for Biometric User Authentication Based on a Dynamic Handwritten Signature / I. Anikin, E. Anisimova // Studies in Systems, Decision and Control. – 2022. – 417. – P. 219-231.

12. Ortega-Garcia J. MCYT Baseline Corpus: a Bimodal Biometric Database / Ortega- J. Garcia, J. Fierrez-Aguilar, D. Simon et al. // IEEE Proceedings - Vision Image and Signal Processing. – 2003. – V.150. – P. 395-401.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORK MODELS FOR HANDWRITTEN SIGNATURE DYNAMICS RECOGNITION

E.S. Anisimova^{1,2}, I.V. Anikin¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

² Elabuga Institute of Kazan Federal University
89, st. Kazanskaya, Elabuga, 423604, Russian Federation

Annotation. In this work, we investigated the application of neural networks for handwritten signature recognition, taking into account the dynamics of their input. We considered three types of architectures: Multilayer Perceptrons (MLPs), Long Short-Term Memory networks (LSTMs), and Convolutional Neural Networks (CNNs). We conducted a comparative analysis of the effectiveness of these architectures on the MCYT Signature 100 dataset, which contains signatures from 100 authors and their forgeries. Key hyperparameters, such as the optimizer (RMSProp, Adam, SGD), batch size, and number of layers, were varied for each architecture during the study. The results show that Convolutional Neural Networks (CNNs) achieve the best accuracy, outperforming MLPs and LSTMs. The proposed method has practical value for automating signature verification and can be applied in security systems and electronic document management.

Keywords: handwritten signature recognition, neural networks, LSTM, CNN, fully connected networks, signature dynamics, verification, biometric authentication, data preprocessing, hyperparameters.

Статья представлена в редакцию 9 декабря 2024 г.

УДК 654.1

КАЗАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ И ИСТОРИЯ МИРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Р.В. Даутова

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Российская Федерация, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Аннотация: Телевидение, являясь самым доступным и популярным средством массовой информации во всем мире, играет большую роль в развитии человеческого общества. В условиях глобализации и информационного общества интерес к историческим истокам того или иного явления закономерен. В истории мирового телевидения особое место занимают изобретения первой системы цветного телевидения и звуко-видеомагнитной записи, которые принадлежат русским изобретателям А.А. Полумордвинову и А. М. Понятову, чья судьба была связана с Казанью и Казанским университетом – старейшим университетом России, которому исполнилось в 2024 году 220 лет.

Ключевые слова: история телевидения, цветное телевидение, звуко-видеомагнитная запись, Казанский университет.

1. Введение

Человечество до XX века существовало без таких средств коммуникации, как радио, телевидение, Интернет, компенсируя их отсутствие реальным общением и непосредственным обращением к первоисточникам информации. Однако человек, мечтая о будущем, всегда связывал с ним, прежде всего, качественное улучшение жизни. В понятие «улучшение» вкладывалось многое: и фантастическое разнообразие продуктов питания, и полеты в космос, и победа над самыми страшными недугами, и быстрое выполнение сложнейших задач. Мечтая и одержимо работая над самыми невероятными, как казалось их современникам, проектами, человек приближал это будущее «счастье». Одним из таких проектов было телевидение, над изобретением которого работали многие ученые и изобретатели в разных странах. Вклад русских разработчиков в историю мирового телевидения получил международное признание, однако новые имена пионеров телевидения расширяют границы нашего знания об этой огромной работе.

2. Основная часть

Значительным в исследованиях истории российского телевидения можно считать последнее десятилетие XX века. Появилась возможность дать объективную, без идеологического налета, оценку прошлому, открыть для общества новые исторические страницы и имена людей, которые оставили большой след в развитии средств массовой информации (СМИ).

В этих исследованиях [1-4] выделяется два уровня изучения феномена телевидения (ТВ): технологический и социально-исторический, которые так или иначе отразились в подходах к периодизации истории российского телевидения (ТВ). А.И. Баранцев, В.А. Урвалов, Н.А. Голядкин рассматривают только технологический аспект и выделяют этапы развития телевидения в зависимости от внедрения тех или иных технических нововведений [5-10].

Например, В.А. Урвалов выделяет: зарождение идеи ТВ (до 1920 г.); создание механического ТВ (1920-1935 гг.); создание электронного черно-белого ТВ (1936-1966 гг.); создание электронного цветного ТВ (с 1967 г.). Н.А. Голядкин также рассматривает технологические характеристики, укрупняет этапы по главным тенденциям развития российского телевидения:

- экспериментальный, когда главными фигурами выступают изобретатели и инженеры;

- становление регулярного вещания на стандартах, близких к сегодняшним, поиск оптимальных организационных форм и массовое распространение телеприемников среди населения;

- превращение ТВ в ведущее СМИ и господство в эфире нескольких крупных общенациональных программ;

- внедрение спутникового и кабельного ТВ, деление некогда единой телеаудитории и индивидуализация зрительского выбора.

Такой же подход демонстрирует нам в своих работах 1990-х годов В.В. Егоров, кстати, первым среди российских теоретиков обративший внимание на важность развития республиканского и местного телевидения: 1 этап – от научных опытов, изобретений и открытий русских ученых в области передачи изображения и звука на расстояние до появления регулярного телевизионного вещания, т.е. от начала XX века до 1930-х гг.; 2 этап - от начала регулярного телевидения в 1930-е годы до создания системы центрального, республиканского местного ТВ и возникновения массового вещания в 1960-е годы; 3 этап – с конца 1960-х гг., когда массовое вещание стало общесоюзным и многопрограммным, до настоящего времени [11].

Старейший историк российского телевидения А.Я. Юровский берет за основу наиболее характерные для различных периодов тенденции в развитии ТВ России, в том числе и творческого характера: первый этап (1930 – 1940-е гг.) – подготовка и творческое освоение технической базы ТВ; второй этап (1950 – 1960-е гг.) – становление телепрограмм, поиск форм и определение тематики вещания; третий этап (1970-е гг.) – совершенствование жанрово-тематической структуры программ, существенное расширение аудитории и начавшаяся централизация телевизионного вещания; четвертый этап (1980-е гг.) – окончательное обретение телевидением политической и профессиональной зрелости, «оно превратилось в ударную силу идеологического фронта» [12, с.6]. Этой же периодизации в общих чертах придерживаются Г.В. Кузнецов, Г.Н. Петров [13-15].

Как бы подытоживая предыдущие точки зрения, Р. Борецкий выделяет два неравноценных по общественной значимости периода. Первый период исследователь называет предысторией, научно-техническим экспериментом, когда шел поиск оптимального пути, выразившийся в противостоянии сторонников «механического» и электронного ТВ. Второй период он называет собственно историей ТВ как средства массовой информации и шире – массовой культуры. Во втором периоде ученым особо выделяются конец 1950-конец 1960 гг.: «В истории массового телевидения, т.е. реально претендующего на включение в систему средств массовой информации (СМИ), принципиальную роль сыграло десятилетие конца 50-конца 60-х годов. Примечательно, что период тот, хотя и по-разному, стал революционным в общемировом масштабе» [16, с.24].

Уже в первые десятилетия существования советской системы телевидения проявили интерес к истории телевидения П.К. Горохов, Э.Г. Багиров, Р.А. Борецкий, А.И. Воробьев, Г.А. Казаков, А.И. Мельников и другие [17-20].

Впервые об изобретателе А.А. Полумордвинове сообщил в 1964 году журнал «Техника кино и телевидения». Автор статьи П.К. Горохов коротко описал разработанную Полумордвиновым оптико-механическую телевизионную систему и сделал для того времени смелый вывод: «В нашей литературе разработку первой системы цветного

телевидения с последовательной передачей цветов обычно связывают с именем советского инженера И.А. Адамиана и относят к 1925 году. Но оказывается, еще в конце прошлого века над созданием такой системы работал другой русский инженер, нашедший реальный путь решения сложной задачи. Своим предложением А.А. Полумордвинов положил начало развитию технических идей цветного телевидения» [21, с.58].

Архивными поисками материалов о личности изобретателя занимался в свое время также известный теоретик телевидения, ветеран ТВ В.А. Урвалов [22]. Его поиски продолжила А.Ф. Орлова, роль которой необходимо подчеркнуть особо. В 1984 году редакция журнала «Радио» проводила конкурс «Радио-60». Цель конкурса - сбор материалов по истории создания радиоаппаратов, значительных для развития отечественной радиотехники. Среди работ, присланных в журнал, оказались и такие, которые рассказывали не о радио, а о малоизвестных страницах истории телевизионной техники.

На этот конкурс прислала свою статью Антонина Федоровна Орлова – в те годы преподаватель Казанского электротехникума связи и создатель музея связи ТАССР при техникуме. Статья называлась «Полумордвинов и его «Телефот» [23]. На суд читателей были представлены результаты многолетнего поиска сведений и документов о создателе первого проекта устройства для передачи цветного изображения на расстояние. Уникальность материала не вызывала сомнений – преподавателю электротехникума с учащимися удалось собрать данные не только о казанском периоде жизни А.А. Полумордвинова и его научных изысканиях, но и о том, как сложилась его судьба в последние десятилетия жизни. Подробное описание устройства «Телефот», портрет А.А. Полумордвинова, схемы трех вариантов светораспределителя, которые ученый привел в привилегии № 10738, – делали статью очень ценной, а ее автора А.Ф. Орлову – почти первооткрывателем.

Этот же материал, но в уже развернутом виде вошел впоследствии в книгу А.Ф. Орловой «Время и связь» [24], посвященную истории развития всех видов связи в Татарской республике. В 1998 году выходит в свет первое издание Татарского энциклопедического словаря, в который сотрудники Института Татарской энциклопедии Академии наук Республики Татарстан включили статьи, посвященные изобретателю и его изобретению [25, 26].

Но главное признание заслуг А.А. Полумордвинова перед отечественным телевидением состоялось в 2000 году. 24 февраля 2000 года по инициативе Российского НТОРЭС им. А.С. Попова, Московского НТОРЭС им. А.С. Попова, Министерства обороны РФ, НИ ИР, ГСПИ РТФ, Института прикладных исследований, ГЦРТ, журналов «Радио» и «История телевидения» состоялся торжественный вечер, посвященный 100-летию изобретения первой системы цветного ТВ А.А. Полумордвиновым [27]. Вечер проходил в Королевском зале экскурсионного корпуса ГЦРТ. Первой для выступления дали слово А.Ф. Орловой - тогда уже председателю исторической секции Московского отдела НТОРЭС. Основное внимание в своем докладе она уделила проекту первой системы цветного ТВ, разработанному А.А. Полумордвиновым. Генеральный директор НИИР Ю.Б. Зубарева и другие выступающие отметили историческую роль идей Полумордвинова в развитии цветного ТВ не только в России, но и во всем мире.

Много публикаций о А.А. Полумордвинове и его изобретении в связи с 100-летием «Телефота» появилось и в Татарстане [28, 29]]. О признании роли А.А. Полумордвинова в развитии телевизионной техники говорит и тот важный факт, что в Москве, в экспозиции Политехнического музея, посвященной телевидению, имеется материал и об этом изобретателе. А самое главное – можно увидеть в действии «Телефот», который так и не был реализован при жизни ученого, но в настоящее время его демонстрируют посетителям музея.

Еще одно легендарное имя, имеющее отношение к истории телевидения, - это А.М.Понятов. Долгое время это имя в СССР находилось под строгим запретом, так как Понятов был прежде всего человеком, эмигрировавшим в Америку. Об этом писал автор первой статьи о русском инженере и американском бизнесмене-изобретателе В.Г. Маковеев. Именно он обратил внимание на то, что отец-основатель первых массовых видеомагнитофонов, давший своему детищу собственное кодифицированное имя, основатель знаменитой фирмы «Ампекс», в течение полувека удерживавшей мировое техническое лидерство в области аппаратуры профессиональной магнитной записи звука, изображения и многих специальных сигналов, родился в России, в Казанской губернии.

«Возвращение» А.М.Понятова на Родину было долгим. В Советском Союзе заговорили о нем в конце 1950-х годов. В 1958 году вышло секретное Постановление Совета Министров СССР о начале разработки линейки советских вещательных видеомагнитофонов. Работа в этом направлении активизировалась после визита Н.С. Хрущева в Америку. Когда советский лидер привез домой подаренную ему видеозапись его встречи с Президентом США Д. Эйзенхауэром, оказалось, что воспроизвести ее нет никакой технической возможности. Над этой трудной задачей бились сотрудники кафедры телевидения Московского электротехнического института связи. Вот тогда советские разработчики, обратившись к зарубежной литературе, узнали об американской фирме «Ампекс» и ее основателе А.М. Понятове.

В мае 1974 года Маковееву удалось встретиться с Понятовым, в 1992 году он первым в Стране Советов рассказал в печати о заслугах этого человека, в 1993 году на Центральном телевидении вышла в эфир телепередача о Понятове в цикле «Америка с Михаилом Таратутой». В 2012-2013 годах в Казанском университете и на родине изобретателя прошли торжества по случаю 100-летия А.М. Понятова, а также презентация документального фильма "Русский триумф на чужбине: пионер видеоэры инженер Понятов".

Конец XIX-начало XX веков ознаменовался в России небывалым промышленным подъемом, сопровождавшийся интенсивными научными изысканиями. В огромном комплексе исследовательских работ этих лет одно из ведущих мест занимало изучение проблемы электроэнергии. На железных дорогах предпринимались попытки введения электрической тяги. Электрическое освещение, телефон, радио, электроника – области, развивавшиеся благодаря открытиям ученых, которые были сделаны именно в этот период. Начала организовываться электротехническая промышленность.

Одна из самых крупных технических проблем, решенных в этот период, - это получение и использование электроэнергии, новой энергетической основы промышленности и транспорта. Строительство крупных промышленных предприятий, рост больших городов и успехи в производстве электрической энергии обусловили возникновение и развитие электрического освещения. Широкое развитие получила в это время и такая отрасль электротехники, как техника средств связи. Совершенствуется аппаратура проволочного телеграфа, параллельно с этим ведутся большие работы по конструированию и практическому применению телефонной аппаратуры. Важным событием стало изобретение радио – беспроводной электросвязи, основанной на использовании электромагнитных волн (радиоволн), впервые обнаруженных в 1887-1888 гг. немецким физиком Г. Герцем. Задача практического создания такой связи была успешно решена русским ученым А.С. Поповым, продемонстрировавшим 7 мая 1895 года первый в мире радиоприемник. Не будь радио, разве могли бы люди мечтать о «Радио для глаз», о котором фантазировал знаменитый русский поэт, корни которого, кстати, мы находим также в Казани, Велимир Хлебников.

Надо отметить, что опыты по «дальновидению» и разработки первых проектов имели место уже в 80-е годы XIX века. Португальский физик Адриано де Пайва и французский

изобретатель К.Сенлек технически обосновали в своих работах возможность «электрической телескопии», «телектроскопии», фактически предсказав принципы механического телевидения. Через три года немецкий студент П.Нипков придумал способ последовательного механического разложения передаваемого изображения на отдельные элементы с помощью вращающегося диска с отверстиями. Этот диск впоследствии получил имя изобретателя и использовался в дальнейшем во многих системах механического телевидения.

В 1885 году в журнале «Электричество» был опубликован оригинальный телевизионный проект, названный «Телефотографом», уже российского изобретателя – П.И. Бахметьева. А через 14 лет в этом же журнале выйдет заметка о I Всероссийском электротехническом съезде и выступавших там, в числе которых будет назван А.А. Полумордвинов. 26-летний казанский инженер делал доклад о своем «Телефоте».

Однако, как мы знаем, телевидение окончательно перестало быть заоблачной мечтой только после того, как перешло с механического пути на путь электронный, когда инертные и малоподвижные механические системы коммутации заменил безынерционный электронный луч. Этот путь впервые был предложен русским ученым Б.Л. Розингом в 1907 году [19]. Спустя четыре года профессор Петербургского технологического института получил первое простейшее электронное изображение. Изобретенную им электронно-лучевую трубку считают родоначальницей телевидения.

Все это произойдет в первом десятилетии XX века, а казанский инженер-технолог, педагог Казанского промышленного училища Александр Полумордвинов изобретет свою систему уже в конце XIX столетия.

Александр Аполлонович Полумордвинов родился 30 августа 1874 года в небольшом городке Слободское Вятской губернии (ныне - Кировская область) в обедневшей дворянской семье. Известно, что отец изобретателя – Аполлон Петрович – происходил из разорившихся дворян. Он умер, когда малышу едва исполнился год. Александра Капитоновна (в некоторых документах – Константиновна) осталась вдовой в 24 года с двумя детьми на руках, без средств существования. В 1884 году семья переезжает в Казань. Сашу определяют в первый класс 3-й мужской гимназии.

В Национальном архиве Татарстана в фонде Казанской 3 мужской гимназии сохранилось Личное дело Александра Аполлоновича Полумордвинова, в котором собраны документы периода его учебы в гимназии (1884-1892 гг.): прошение вдовы на имя директора гимназии принять сына в первый класс, выписка из метрической книги Вятской Епархии года Слободское за 1874 год под № 38, а также приказ от 7 августа 1884 года директора гимназии о принятии Александра в 1 класс.

Александр до этого обучался дома, о чем и написала в своем прошении Александра Капитоновна. Учебу в гимназии мальчик закончил в 1892 году. Аттестат зрелости, выданный выпускнику с результатами 8-летней учебы в гимназии, демонстрирует хорошие успехи. В нем написано, что мальчик занимался с одинаковым интересом всеми предметами, хотя, судя по отметкам, Александру лучше давались точные науки, чем гуманитарные.

В 1892 году он поступает на физико-механический факультет Казанского императорского университета, занимавшего значительное место не только в системе российского высшего образования, но и отечественной культуре в целом. Но А.Полумордвинов учится там всего год – его не устраивает, что в университетской программе уделяется так много внимания теории и так мало – инженерной практике. И он решает перевестись в Харьковский университет.

С 1893 года Александр Полумордвинов – студент механического отделения Харьковского технологического института. О том, как он учился, можно составить представление по отличной характеристике, которую прислал чуть позже руководитель его

дипломной работы, профессор М.П.Мухачев. В частности, харьковский профессор отметил увлеченность и творческий настрой студента, которые были его путеводной звездой при исследовании коэффициента полезного действия больших молотов. А. Полумордвинов, будучи студентом, изобрел приспособление для увеличения КПД четырехтактных двигателей.

Получив диплом технолога, Александр Полумордвинов возвращается к родным в Казань с твердым намерением найти здесь работу. 16 августа 1898 года он подает прошение на имя Директора Казанского промышленного училища: «Имею честь покорнейше просить Ваше Высокородие об определении меня преподавателем механических наук и черчения в высших технических училищах Вверенного Вам Промышленного училища...». Его принимают, и он начинает вести занятия по механике, геометрии, черчению, технологии, а также ему поручается ведение практических занятий в механических мастерских, оборудование лабораторий.

Как видим, в Казанском промышленном училище по достоинству оценили одаренного молодого педагога и загрузили его работой. Но даже при такой занятости он находит время, чтобы заниматься научными изысканиями. Не раз обращался к начальству с просьбой отпустить его в командировки в столицу – то на электротехнический съезд, то на техническую выставку.

Сохранилась переписка А.А. Полумордвинова с директором училища, которая, надо отметить, носила разный характер. Директор, мягко говоря, не был в восторге от частых отлучек своего преподавателя. Сохранился любопытный документ, свидетельствующий о том, что Грузов, используя свои связи в столичных научных кругах, обратился с письмом к одному из профессоров, в котором, видимо, спрашивал мнения о смысле научных изысканий А.А. Полумордвинова. И получил ответ, суть которого заключалась в следующем: многие пытались, но ничего не получилось, посоветуйте тому человеку заняться чем-нибудь иным...

К сожалению, неизвестно - узнал ли Александр Апполонович об этом письме. Возможно, Н.Г. Грузов все же показал его изобретателю, и именно это письмо повлияло в последующем на решение изобретателя вновь стать студентом – теперь уже Санкт-Петербургского электротехнического института. Но это будет потом, а пока Полумордвинов продолжает свои работы. Для руководства Казанского промышленного училища очевидно, что наука, а точнее электротехника, которая в тот период набирала обороты в России, для Александра Апполоновича имела большее значение, чем преподавательская деятельность.

А.Ф. Орлова в своей книге достаточно подробно описывает схему аппарата А.А. Полумордвинова. По ее сведениям, он разработал его менее чем за два года [24, с.132-133]. Но впоследствии несколько раз совершенствовал.

Итак, конструкция аппарата, названного изобретателем «Телефот», должна была позволять передавать изображение на расстояние со всеми цветами и их оттенками и всеми тенями. Система базировалась на теории трехкомпонентного цветного зрения с использованием оптико-механической системы. Сердцем аппарата А.А.Полумордвинов сделал светораспределитель, который позволял разложить цветное изображение на три основных цвета, а затем синтезировать в приемном устройстве.

Изобретатель предложил три варианта конструкции светораспределителя. В первом варианте предлагалось использовать два диска с отверстиями, которые располагались на одной оси и вращались с разной угловой скоростью. В первом диске прорезывались щели по радиальным линиям, а во втором – наклонные дугообразные. В процессе вращения щели дисков пересекались и создавали сквозное отверстие ромбической формы. Количество щелей на дисках выбиралось кратно трем. На прорезах одного из дисков попеременно укреплялись красные, зеленые и фиолетовые стекла. Диски предполагалось связать между

собой двойной зубчатой передачей и вращать в одну сторону с разными скоростями. Каждая такая щель станет сканировать одну строку изображения. К тому времени, когда первая щель obeжит первую строку, начнет работать новая щель, которая, в свою очередь, будет считывать вторую строку и т.д. Прошедший через ромбическое отверстие свет преобразовывался в электрический сигнал с помощью фотоэлемента, который предполагалось передавать на приемный пункт и использовать для управления яркостью света на аналогичном развертывающем устройстве.

Второй вариант конструкции светораспределителя отличался тем, что вместо дисков предлагалось использовать два концентрически расположенных цилиндра, которые вращались один внутри другого. В третьем варианте устройства две призмы с одинаковым числом зеркальных граней вращались на взаимно перпендикулярных осях.

Как свидетельствуют документы личного дела преподавателя Казанского промышленного училища А.А.Полумордвинова, чтобы запатентовать свое изобретение, он пишет в конце декабря 1899 года прошение на отпуск и едет в Петербург. Приехав в северную столицу, 23 декабря он идет первым делом в Департамент торговли и мануфактур министерства финансов России и подает заявку на изобретенный им прибор. А 27 декабря делает сообщение о своем изобретении на первом Всероссийском электротехническом съезде в Санкт-Петербурге 29 декабря 1899 г, о чем даже вышла маленькая заметка в газете «Электричество» [30].

Вообще эта поездка сыграла важную роль в жизни изобретателя. Не только потому, что его выступление на первом Всероссийском электротехническом съезде вызвало большой интерес и ему предложили выступить вторично с более подробным сообщением на ближайшем заседании VI (электротехнического) отдела Русского технического общества. И уже 28 апреля 1900 года на заседании отдела Русского технического общества А.А. Полумордвинов представил улучшенную систему своего «Телефота», центральной частью аппарата которого являлся «светораспределитель», дающий возможность получить развертку цветного изображения и передачу изображения на расстояние. Доклад назывался «Современное состояние вопроса об электровидении на расстоянии (телевизирование)».

Все же главный итог этой командировки заключался в том, что Александр Апполонович познакомился с такими учеными и специалистами в области электротехники, переживающей первые этапы развития в России, как А.С. Попов, П.С. Осадчий, Б.Л. Розинг, К.Д. Перский, Е.В. Колбасьев, которые впоследствии оставят значительный след в истории отечественной техники радио и телевидения. Кстати, на I Всероссийском электротехническом съезде выступал выдающийся изобретатель А.С. Попов, А.А. Полумордвинов слушал его доклад «Телеграфирование без проводов». Фактически именно во время этой поездки Полумордвинов был допущен в сообщество отечественных физиков-электротехников, и данное событие не могло не окрылить и не вдохновить его на дальнейшую работу над аппаратом.

Кроме того, как свидетельствует отчет изобретателя об этой командировке, написанный директору Казанского промышленного училища Н.Г. Грузову, Александр Апполонович принял участие в собрании представителей промышленных училищ, состоявшемся в рамках съезда. На собрании активно обсуждался вопрос о введении предмета «электротехника» в учебную программу промышленных училищ. Казанский преподаватель выступал на этом собрании и можно предположить, что его выступление полностью выражало одобрение этому нововведению. Одним словом, Полумордвинов вернулся в Казань, полный надежд.

Но существовали две серьезные проблемы, которые тормозили работу изобретателя над «Телефотом»: первая – отсутствие финансов и вторая – невозможность посвятить все свое время любимому занятию. Необходимо было зарабатывать себе на жизнь. Для решения первой проблемы А.А. Полумордвинов пишет письмо Военному министру

господину А.Н. Куропаткину с просьбой выделить для изготовления опытного устройства субсидию. Генерал Куропаткин решает выдать изобретателю 2000 рублей, о чем свидетельствует письмо, написанное из этого ведомства директору Казанского промышленного училища.

Таким образом, у Полумордвинова появилась возможность реализации своей идеи. Однако оказалось, что необходимых для «Телефота» деталей не было не только в Казани, где к тому времени еще не существовало ни одного электротехнического предприятия, но и в Петербурге, куда он вновь отпрашивается у директора училища. А.Ф. Орлова пишет, что в Петербурге Полумордвинов обращается в несколько электротехнических заводов – Сименса и Гальске, Глебова, Гейснера, но безуспешно. Помочь Александру Апполоновичу вызывается по рекомендации инспектора Электротехнического института М.А. Шателена-заведующий мастерскими при физическом кабинете Технологического института Петерман. В мастерских смогли изготовить детали с вращающимися зеркальными призмами и приспособление для фотографической передачи изображения. Сам светораспределитель с вращающимися дисками с прорезями для передачи изображения, даваемых объективом непосредственно от предметов, был изготовлен в открывшей в Кронштадте мастерской Е.В. Колбасьева по производству телефонов. А вот остальное можно было выписать только из-за границы: селеновые пластинки и оптико-электрический элемент – из Парижа; зеркала, посеребренные снаружи и стекла – из Германии; гальванометр, винтовые передачи для зеркальных призм, оптические конденсаторы – из Англии.

Срок отпуска преподавателя А. Полумордвинова заканчивается, он должен вернуться в Казань. Изобретатель посылает в училище телеграмму с просьбой продлить отпуск и получает отказ начальства. Ему приходится фактически бросить незаконченным изготовление «Телефота», под угрозой срыва оказывается и его выступление на заседании Русского технического общества 28 апреля 1900 года. К счастью, доклад Полумордвинова о «Телефоте» соглашается прочесть Н.М. Сокольский, благодаря чему изобретение казанского преподавателя получает высокую оценку членов Русского технического общества. В частности, участники этого заседания, сравнивая аппарат А.А. Полумордвинова со схемой передачи изображения на расстояние, предложенной поляком Щепаником, признали преимущество первого.

А.А. Полумордвинов, вернувшись в Казань, продолжает работать над «Телефотом». Он разрабатывает новый тип аппарата, в котором вместо вращающихся зеркальных призм предлагает применить колеблющиеся зеркала и увеличить освещенность изображения и облегчить коррекцию синхронизма. Изобретатель приходит к выводу: чтобы аппарат мог передавать сложные изображения, необходимо передавать одновременно не одну точку изображения, а несколько, разделив изображение на соответствующее число частей и применяя для каждой такой части отдельные селеновые пластинки и отдельные приемные электромагнитные приборы.

Летом 1900 года Париж становится местом проведения Всемирной выставки, куда обычно съезжаются многие ученые мира. А.А. Полумордвинов получает счастливую возможность увидеть воочию последние достижения европейской науки и техники, познакомиться с современными успехами электротехники. Ему удастся не только посетить выставку, но и принять участие в работе I Всемирного конгресса электротехников, который проходит в это же время в Париже. Кроме того в Париже А.А. Полумордвинов знакомится с господином Дюкрете и договаривается с ним об изготовлении необходимых деталей для своего аппарата.

Срок командировки заканчивается, и Полумордвинов оказывается перед дилеммой: вновь бросить на полпути начатую работу над аппаратом и вернуться в Казань, или посвятить себя полностью любимому занятию. Он принимает кардинальное решение:

пишет письмо директору Казанского промышленного училища с просьбой освободить его от занимаемой должности. В это же время другое письмо А.А. Полумордвинова идет в Петербург, а именно в Электротехнический институт – изобретатель просит принять его вольнослушателем на 3-й курс.

К сожалению, как только Полумордвинов уехал из Парижа, работа над аппаратом остановилась – необходимо было присутствие автора чертежей. Господин Дюкрете сообщил, что вынужден отказаться от продолжения работы...

В Электротехническом институте А.А. Полумордвинов глубоко изучает телефонию, телеграфию, электротехнику. Занимается научной работой. Как пишет А.Ф. Орлова, за три года учебы им проделана поистине гигантская работа. Кроме нескольких типов аппаратов для передачи изображения на расстояние он предложил: несколько схем для применения динамо-машин постоянного тока и альтеристоров в качестве реле; дуплексное включение дифференциальных электромагнитов при передаче звука и изображения и вообще разветвления цепи для этих случаев; телефонные реле с заменой постоянного магнита электромагнитом, присоединенным через реактивную катушку; применение многократной передачи изображений и звука по проводам и без проводов и т.д.

Создатель “Телефота” первым в мире предложил проект устройства и для демонстрации звукового телевидения (1903 г.), то есть за четверть века до того, как звук впервые начали применять в дальновидении и кинематографе. На этот раз в проекте “светораспределителя” Полумордвинов разрабатывает дополнительно “систему многократной передачи изображения и звука по проводам и без проводов”. Возможность одновременной передачи изображения и звука была теоретически решена изобретателем с помощью найденного им явления многократного резонанса напряжений и токов в замкнутых или нескольких цепях. Для доказательства возможности и слышать, и видеть изображение по одной электрической цепи он разработал несколько вариантов. Подобной схемы до А.А. Полумордвинова никто не предлагал.

К сожалению, чиновники не поняли научной и практической ценности его новой работы и отказали ему в привилегии. Правда, А.А. Полумордвинов все же предпринял попытку изготовить этот аппарат – обратился к фирме Эриксон и К. Но фирма не смогла выполнить этот проект по отсутствию необходимых деталей.

После окончания Петербургского электротехнического института (второго высшего образования, в 1903 г.) он был принят на службу в Главное управление почт и телеграфов на должность помощника столоначальника телефонного отделения. А через год Полумордвинов поступает в аспирантуру Петербургского электрохимического института по теме «Кажущиеся сопротивления в цепях переменного тока с разветвлениями». В 1908 году он прикомандировывается к Электротехническому институту и в течение двух лет работает здесь в лабораториях, делает ряд открытий, важных для развития телефонного дела в России.

Известно, что в 1913 году он снова предлагает теперь уже более совершенный аппарат для передачи цветного изображения на расстояние. Но о признании своих трудов, о том, что ему выдано несколько привилегий – он узнает только в 1915 году, когда во время отпуска едет в Петроград. Получив несколько патентов, он пытается заинтересовать проектом «Телефота» русских промышленников, но они не поддерживают его. Полумордвинову ничего не остается, как продать патент за рубеж. Купивший патент Полумордвинова английский ученый-изобретатель Дж. Бэрд усовершенствовал прибор. В 1928 году состоялась его демонстрация.

Обратим внимание на то, что 20-30-е годы XX века были периодом активных научных изысканий в этом направлении. В 1925 году армянский физик-инженер О.А. Адамян спроектировал оригинальный аппарат, позволяющий видеть через светонепроницаемую преграду, а затем разработал идею передачи цветных

изображений с помощью цилиндров или дисков, которые разлагают рисунок на отдельные составные цвета. «На этом принципе основано современное телевидение», – пишет автор книги об Адамяне А.К.Товмасын [31, с.89].

В 1926 году в Физико-техническом институте (Петроград) проходит защита необычной дипломной работы, тема которой - «Электрическое дальновидение» [32]. На своей защите автор работы Л.С. Термен демонстрирует действующие образцы устройства для «беспроволочной» передачи изображения на расстояние. Впоследствии действие аппарата Термена демонстрировалось и в Наркомате Обороны. Специально созданная комиссия постановила использовать дальновидение на государственной границе. Аппарат засекретили на многие годы. И этим отложили развитие массового телевидения в СССР до конца 30-х годов, когда начался процесс освоения электрического телевидения с разложением изображения на 343 строки (сначала в Ленинграде, в Москве, затем в Киеве) [33].

Интересно, знал ли обо всем этом Александр Полумордвинов? Знал ли он, что в 30-годы - официальная дата первых экспериментов по телевидению в СССР – в стране было создано сразу несколько групп ученых, целенаправленно занимающихся этой тематикой? В 1932 году впервые был предложен новый принцип передающих трубок. Развили их и усовершенствовали П.В. Шмаков и П.В. Тимофеев, что позволило создать телевизионные передатчики значительно более высокой чувствительности. Рождением телевидения мы также обязаны И.В. Кузнецову, Н.М. Гопштейн, П.В. Брауде, Л.А. Кубецкому, С.А. Векшинскому ... [34].

Судьба другого знаменитого русского изобретателя также связана с Казанским университетом. Александр Матвеевич Понятов родился 25 марта 1892 года в селе Русская Айша Чепчуговской волости Казанской губернии. После учебы во 2-м реальном училище Казани он поступил на физико-математический факультет Казанского университета, но в 1910 году решает учиться в МВТУ на механическом факультете. Маковеев вспоминает, что при встрече с ним Понятов сказал, что считает себя учеником профессора Н.Е. Жуковского и под его влиянием «заболел» авиацией. Однако уже в 1911 году Понятов, опасаясь наказания за участие в студенческих волнениях, уехал с рекомендациями Н.Е. Жуковского продолжать образование в Германию в Политехникум города Карлсруэ.

В Первую мировую войну он был призван в армию из Казани, окончил школу летчиков и служил офицером в авиации. В гражданскую войну Понятов сражается на стороне Белой армии. Бежит через Сибирь в Китай и в конце 20-х годов перебирается во Францию, а затем в США.

Здесь в 1944 году создается фирма "Ампекс", название которой расшифровывается так: Александр Матвеевич Понятов - экселенс (в переводе с английского - высшее качество). Компания, выпускавшая узлы для радаров, после войны оказывается на грани закрытия. Понятов берется за труднейшую задачу - поставить на промышленную основу вывезенные из Германии трофейные технологии магнитной записи. Хотя специалисты фирмы RCA во главе с Давидом Сарновым и Владимиром Зверским отказались: "Это невозможно сделать!" Возглавляемая выходцем из России Давидом Сарновым гигантская Американская радиокорпорация (RCA), точнее ее дочерняя фирма грамзаписи «Виктор», занимала тогда главенствующее положение.

Разработкой магнитофонов после войны занималось несколько компаний. В условиях конкуренции "Ампекс" с самого начала заложил высокие стандарты качества в индустрии магнитозаписи. Кроме того, на принципе магнитозаписи была основана память первых компьютеров. Спецоборудование "Ампекса" использовалось в медицине, авиации, космонавтике. Эта знаменитая компания принесла в телевидение цвет [35]. За 10-15 лет империя Понятова прошла путь от никому не известной кучки энтузиастов до мирового лидера, гиганта индустрии. Начав с вещательных магнитофонов, фирма «Ампекс» очень

скоро по велению времени сосредоточилась на более доходной специальной технологии, освоив методы и аппаратуру точной, инструментальной магнитной записи.

Почти полвека (с 1946 по 1995 годы) фирма «Ампекс» держала мировое научно – техническое лидерство в профессиональной аппаратуре магнитной записи вещательных и специальных сигналов. Она также обладала патентами на многие фундаментальные методы и устройства в этой области, что помогало ей десятилетиями сдерживать настойчивые попытки американских, европейских и японских конкурентов разрушить фирму и купить по частям. Однако по – настоящему звездным достижением фирмы и ее основателя стало создание первого в мире профессионального вещательного видеомэгнитофона. В ряде стран в характеристике процесса видеозаписи на магнитную ленту некоторое время использовался термин «ампексование».

3. Заключение

Нельзя утверждать, что вклад русских изобретателей А.А. Полумордвинова и А.М. Понятова в историю мирового телевидения не оценен. А.А. Полумордвинова можно смело назвать прародителем цветного телевизора, а А.М. Понятову современное телевидение обязано разработками звуко-и видеомэгнитного оборудования, без которого трудно представить электронные средства массовой информации. Однако исторические факты, связанные с их личностным становлением и развитием их научных интересов, на которые, безусловно, повлияли Казань и Казанский университет, не столь широко известны мировому научному сообществу [36,37]. Данная статья – одна из попыток восполнить этот пробел, для чего предлагаем использовать:

Личное дело А. А. Полумордвинова в 3 Казанской мужской гимназии/ Национальный архив Республики Татарстан – Ф.88, оп.23, д. 993.

Личное дело А.А. Полумордвинова – преподавателя Казанского промышленного училища / НА РТ – Ф.121, оп.1, д.90.

Личное дело А.А. Полумордвинова – студента Казанского императорского университета / НА РТ – Ф.977, д.32238.

Список литературы

1. Авраамов Д.С. Профессиональная этика журналиста: Парадоксы развития, поиски, перспективы / Д.С. Авраамов. – М. Мысль, 1991, 253 с.
2. Кузнецов И.В. История отечественной журналистики (1917–2000) / Учебный комплект– Учебное пособие. Хрестоматия М.: Флинта: Наука, 2002 г., 639 с.
3. Овсепян Р.П. История новейшей отечественной журналистики. Февраль 1917 – начало ХХІ в: учебное пособие / Овсепян Р.П. — Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Наука, 2005. — 352 с. — ISBN 5-211-06156-X.
4. Голядкин Н.А. История отечественного и зарубежного телевидения: учебное пособие.– М.: Аспект Пресс. – 2004. - 190 с.
5. Баранцев А.И. У истоков телевидения / А.И. Баранцев, В.А. Урвалов. – М.: Знание, 1982, 64с.
6. Быховский М.А. Круги памяти: Очерки истории развития радиосвязи и вещания в ХХ столетии / М.А. Быховский. – М, 2001.
7. Николаев Д.С. Русские основоположники телевидения и радиолокации / Д.С. Николаев. – М., 1951, Очерки по истории Российского телевидения. – М., 1999.
8. Варбанский А.М. Телевидение: от первых шагов до наших дней / А.М. Варбанский. - Вестник связи. – 1995. - N 3.

9. Голядкин Н.А. Краткий обзор становления и развития отечественного и зарубежного телевидения / Н.А. Голядкин. – М., 1996.
10. Урвалов В.А. Очерки истории телевидения / В.А. Урвалов. – М: Наука, 1990.
11. Егоров В.В. Телевидение: теория и практика. – М.: ИПК работников телевидения и радиовещания, 1992 – С.5.
12. Юровский А.Я. Телевидение – поиски и решения / А.Я. Юровский. – М.: Искусство, 1983 - С. 6.
13. Кузнецов Г.В. ТВ-журналистика: критерии профессионализма / Г.В. Кузнецов. – М.: изд-во «Рип-холдинг», 2003.
14. Егоров В.В. Теория и практика советского ТВ / В.В. Егоров. – М., 1980.
15. Петров Г.Н. Телевизионная драматургия: Проблемы журналистского мастерства и особенности творчества / Г.Н. Петров. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун.-та, 1999.
16. Борецкий Р.А. Телевидение как социальная технология и социальный институт// Телерадиоэфир: История и современность – М.: 2005, С. 24.
17. Багиров Э.Г. Очерки теории телевидения . – М., 1978.
18. Борецкий Р.А. Телепрограмма – М, 1967.
19. Горохов П.К. Б.Л. Розинг – основоположник электронного телевидения – М.:Наука. – 1964.
20. Воробьев А.И., Казаков Г.А., Мельников А.И. Очерки истории советского радиовещания и телевидения. Ч.1. 1917-1941. – М., 1972.
21. Горохов П.К. Страницы истории телевидения /Техника кино и телевидения. - 1964, № 6. – с.58.
22. Урвалов В.А. Цветному телевидению исполнилось сто лет / Наука и техника, 1999, № 15 – С.122.
23. Орлова А.Ф. Полумордвинов и его «телефот» / Радио. - 1984, № 12 – С.19-21.
24. Орлова А.Ф. Время и связь: Очерки по истории связи в ТАССР/ А.Ф. Орлова – Казань: Татарское кн. изд-во. - 1988, 144с.
25. Полумордвинов А.А./ Татарский энциклопедический словарь. – Казань: Институт Татарской энциклопедии АН РТ, 1998.
26. Телефот /Татарский энциклопедический словарь. – Казань: Институт Татарской энциклопедии АН РТ, 1998. – с.572.
27. Лейтес Л.С. К 100-летию изобретения А.А. Полумордвиновым первой системы цветного телевидения /Техника кино и телевидения – 2000, № 4.
28. Григорьев Е.И. Казань – Родина цветного телевидения - Республика Татарстан, 1999, № 62.
29. Григорьев Е.И. Преподаватель Казанского соединенного промышленного училища А.А. Полумордвинов (1874-1942 гг.) / “К 100-летию изобретения цветного телевидения”. Материалы н.-практ. Конференции. – Казань: Изд. КГТУ, 1999 и др.
30. Электричество – 1900. – N1.
31. Товмасын А.К. Из истории телевидения и фототелеграфа / А.К. Товмасын. – Ереван: изд-во АН Арм. СССР, 1971 – С.87.
32. Галеев Б. Советский Фауст / Лев Термен – пионер электронного искусства / Б. Галеев. – Казань, 1995 – С. 35–37.
33. Глейзер М. Радио и телевидение в СССР. Даты и факты (1917–1986) / М. Глейзер. – М., 1989 – С.54–55.
34. Баранцев А.И. У истоков телевидения /А.И. Баранцев, В.А. Урвалов. – М.: Знание, 1982 – С.45.
35. Broadcasting. Телевидение и радиовещание: журнал. - №3, 2013.

36. Борисов В. П. Рождение телевидения в стране Советов. К 75-летию отечественного телевидения / Вопросы истории естествознания и техники, 2007, № 1 – <http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/VIET/TV/TV.HTM>
37. Даутова Р.В. Телевидение Татарстана: от телефота до цифровых технологий. Коллективная монография / Р.В. Даутова, М.П. Шлеймович/ Под ред. О.Г. Морозова. – Казань: издательство КНИТУ-КАИ, 2023.

KAZAN UNIVERSITY AND THE HISTORY OF WORLD TELEVISION

R.V. Dautova

Kazan (Volga Region) Federal University
Russian Federation, 420008, Kazan, Kremlevskaya St., 18

Abstract: Television, being the most accessible and popular means of mass media in the world, plays a major role in the development of human society. In the context of globalization and information society, interest in the historical origins of a particular phenomenon is natural. In the history of world television, a special place is occupied by the inventions of the first color television system and audio-video magnetic recording, which belong to Russian inventors A.A. Polumordvinov and A.M. Ponyatov, whose fate was connected with Kazan and Kazan University – the oldest university in Russia, which turned 220 years old in 2024.

Key words: history of television, color television, audio-video recording, Kazan University.

Статья представлена в редакцию 15.11.2024

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ» СООБЩАЕТ...

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ
Российская Федерация, 420110, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Трехтомник «Полигауссовы модели. Теория и практика» предлагает всесторонний обзор как теоретических основ полигауссовых моделей, так и прикладных аспектов их использования. Издание адресовано научным сотрудникам, специалистам в области телекоммуникаций и информационных технологий, а также аспирантам и магистрантам.

Ключевые слова: полигауссовы модели.

Обзор новой монографии «Полигауссовы модели. Теория и практика». Недавно вышедшая в издательстве КНИТУ-КАИ коллективная монография «Полигауссовы модели. Теория и практика» представляет собой значимый вклад в современную теорию и практику статистической радиотехники. Книга состоит из трех томов и предлагает всесторонний обзор как теоретических основ полигауссовых моделей, так и прикладных

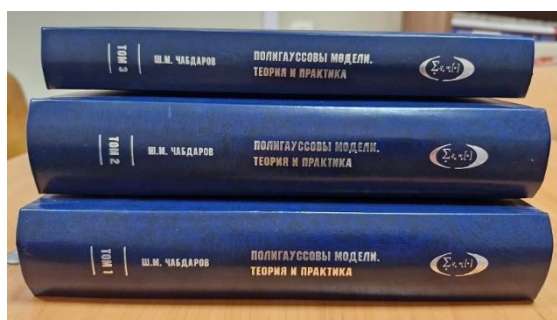
аспектов их использования. Издание адресовано научным сотрудникам, специалистам в области телекоммуникаций и информационных технологий, а также аспирантам и магистрантам, интересующимся современной математической радиотехникой и статистическим анализом.



История и контекст научного направления

Основные идеи и методы, описанные в монографии, развиты Шамилем Мидхатовичем Чабдаровым и его учениками в рамках казанской научной школы, которая с конца 1960-х годов занималась исследованием методов обработки сигналов в сложных условиях помех и нестабильных воздействий.

Возникновение Казанской научной школы и формирование теории полигауссовых моделей неразрывно связаны с многолетней работой Ш.М. Чабдарова и его коллег. Исторически первый шаг к созданию полигауссовых моделей был сделан в конце 60-х годов, когда Ш.М. Чабдаров познакомился с теорией вероятностных смесей и увидел потенциал применения гауссовых смесей для моделирования сигналов и помех. Постепенно вокруг его исследований сформировался коллектив, который в течение следующих десятилетий занимался решением практических задач радиотехники. Первым, кто защитил



диссертацию в этом направлении, был аспирант А.Е. Михайлов, который разработал многопороговый приемник на основе бигауссовой модели. В дальнейшем направление было усилено работами других учеников Чабдарова, и в 1981 году он защитил докторскую диссертацию, где впервые систематически изложил теорию полигауссовых моделей. В рамках казанской научной школы ведутся исследования новых классов смешанных вероятностных моделей, в частности, вероятностных смесей гауссовских распределений с конкретизированным механизмом смешивания основанном на марковском свойстве, так называемые марково-смешанные полигауссовы вероятностные модели, разработанные А.Ф. Надеевым.

Казанская школа внесла значительный вклад в создание алгоритмических методов, ориентированных на работу с негауссовскими процессами, которые включают, среди прочего, методы многопороговой обработки сигналов, алгоритмы обнаружения и различения в условиях помех, которые позволили создать основу для многих прикладных разработок, используемых сегодня в промышленности и телекоммуникациях.

Под руководством Ш.М. Чабдарова казанская школа сумела интегрировать наработки теории вероятностей, статистики и радиотехники, разрабатывая методы, которые привели к созданию полигауссовых моделей. Основная особенность этих моделей заключается в использовании смесей гауссовских распределений, которые позволяют моделировать широкий спектр негауссовских процессов. Предложенные подходы оказались не только теоретически обоснованными, но и практически применимыми, что позволило сформировать уникальный методологический базис для анализа сложных сигналов и помех в радиотехнике.

Теоретические основы и новый подход к статистической обработке

Один из важнейших аспектов, раскрытых в книге, — это метод смесевых представлений, который позволяет более точно описывать сложные радиотехнические системы и процессы. Полигауссовы модели, основанные на смеси гауссовских распределений, используются для аппроксимации вероятностных характеристик сигналов и помех, что позволяет обойти ограничения традиционных корреляционных теорий. Эти модели способны с высокой точностью описывать процессы, подверженные нестабильным условиям, что особенно актуально для современных задач радиотехники и телекоммуникаций. В книге подчеркивается, что полигауссовы модели аналогичны спектральным представлениям детерминированных сигналов, так как они позволяют разложить негауссовские процессы на стандартные компоненты.

В монографии представлены исследования, подтверждающие эффективность полигауссовых моделей для анализа широкого спектра статистических задач, таких как оценка потенциала помехоустойчивости и оптимизация приемных устройств. При этом авторы рассматривают не только теоретические аспекты, но и практическую применимость в условиях реальной эксплуатации систем радиосвязи, что делает монографию ценной не только для теоретиков, но и для инженеров.

Применение полигауссовых моделей не ограничивается только радиотехникой. В монографии подробно рассматриваются их применение для анализа сигналов и данных в таких областях, как телекоммуникационные сети, оптические системы, а также лазерная техника. В частности, полигауссовы модели нашли применение в задачах по оптимизации передачи сигналов в условиях помех в оптическом диапазоне и в задачах комплексного анализа радиотехнических систем. Авторы описывают алгоритмы, позволяющие эффективно решать задачи обнаружения и различения сигналов в условиях интенсивных помех, и показывающие себя весьма успешными в условиях, где традиционные методы корреляционного анализа недостаточны.

Практическое применение и вклад в развитие вычислительных структур

Одним из значительных преимуществ полигауссовых моделей является их способность поддерживать внутренний параллелизм вычислений, что позволяет эффективно реализовывать их в параллельных и мультипроцессорных системах. В монографии описаны приложения полигауссовых методов для оптимизации приема лазерных сигналов и задач в области мобильной связи. Разработанные методы включают алгоритмы обработки сигнала, которые можно адаптировать для параллельной обработки, что особенно важно в условиях больших объемов данных и потребности в высокой скорости вычислений. Данный подход делает полигауссовы модели важным инструментом в области разработки и оптимизации современных радиотехнических и телекоммуникационных систем, особенно в условиях реального времени.

Книга включает анализ марково-смешанных полигауссовых моделей, которые предоставляют эффективный способ обработки сигналов на основе комбинации гауссовских и марковских алгоритмов. Эти модели позволяют достигнуть высокой точности в задачах обнаружения, различения и разрешения сигналов. Благодаря свойствам рекуррентности и параллелизма такие алгоритмы могут быть реализованы на современных вычислительных платформах, обеспечивая высокую производительность и помехоустойчивость.

Монография «Полигауссовы модели. Теория и практика» представляет собой фундаментальный труд, подводящий итог многолетней исследовательской работы казанской научной школы. Трехтомник отличается всесторонним подходом к освещению полигауссовых моделей, подробно раскрывает их теоретические основы и демонстрирует примеры успешного применения на практике. Исследования, представленные в издании, способствуют не только развитию теории статистической радиотехники, но и создают практическую основу для разработки новых методов обработки сигналов.

Книга выделяется глубоким научным подходом и ориентирована на создание систем и алгоритмов, способных эффективно решать задачи в сложных условиях помех. «Полигауссовы модели. Теория и практика» будет полезна всем, кто занимается математическим моделированием и обработкой информации в радиотехнике, оптической технике и смежных областях. Трехтомник представляет собой надежный инструмент для инженеров и исследователей, предлагая концепции и алгоритмы, которые могут быть использованы для создания инновационных систем и устройств.

PUBLISHING HOUSE "RADIOTECHNICAL FACULTY" INFORMS...

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI
Russian Federation, 420110, Kazan, K. Marksa St., 10

Abstract. The three-volume work "Poly-Gaussian Models. Theory and Practice" offers a comprehensive overview of both the theoretical foundations of poly-Gaussian models and the applied aspects of their use. The publication is addressed to researchers, specialists in the field of telecommunications and information technology, as well as postgraduate and master's students.

Keywords: poly-Gaussian models.

Редколлегия

Представлено в редакцию 06.12.2024