

Вестник СПбГУТ

Том 2. № 4. 2024

**Конференция
ПКМ
5 лет**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

Вестник СПбГУТ

Том 2. № 4

Herald of SPbSUT

Vol. 2. Iss. 4

Санкт-Петербург

2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Editorial Board

Главный редактор *Editor-in-Chief*

Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)
Vladyko A.G. (St. Petersburg)

Макаренко С.И. (Санкт-Петербург)
Makarenko S.I. (St. Petersburg)

Гехт А.Б. (Санкт-Петербург)
Gekht A.B. (St. Petersburg)

Дунайцев Р.А. (Санкт-Петербург)
Dunaytsev R.A. (St. Petersburg)

Зикратов И.А. (Санкт-Петербург)
Zikratov I.A. (St. Petersburg)

Калимуллина О.В. (Санкт-Петербург)
Kalimullina O.V. (St. Petersburg)

Литвинов В.Л. (Санкт-Петербург)
Litvinov V.L. (St. Petersburg)

Окунева Д.В. (Санкт-Петербург)
Okuneva D.V. (St. Petersburg)

Симонина О.А. (Санкт-Петербург)
Simonina O.A. (St. Petersburg)

Сотников А.Д. (Санкт-Петербург)
Sotnikov A.D. (St. Petersburg)

Шутман Д.В. (Санкт-Петербург)
Shutman D.V. (St. Petersburg)

Юрова В.А. (Санкт-Петербург)
Yurova V.A. (St. Petersburg)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- От подготовки кадров в магистратуре к прорывным телекоммуникационным технологиям и развитию цифровых кластеров в России и мире*
Бучатский Н. А.
- Оптические усилители на иттербиевом волокне для систем космической связи*
Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М.
- Моделирование информационных процессов в инфокоммуникационных системах*
Иванов Н. А., Киселёв Д. И., Сотников А. Д.
- Использование фильтра Калмана с ограничениями в целях уменьшения чувствительности приемной адаптивной фазированной антенной решетки к углу прихода*
Щедрин А. А., Бойко И. А.
- Сравнение эффективности компенсации хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон и волоконных брегговских решеток*
Кубинская М. М.
- Научно-исследовательская деятельность студентов как фактор профессиональной подготовки специалистов для сферы рекламы и связей с общественностью*
Герашенко Л. И., Кульназарова А. В.
- Учет наложения секторов базовых станций сотовой связи при экологическом мониторинге электромагнитных полей*
Пищугина А. Д.
- Моделирование аналитических функций интерферограмм по дискретным значениям*
Сединкин И. Б., Скалецкая И. Е.
- Задачи защиты систем виртуализации*
Дюсметова А. А.
- 1** *From the Training of Personnel in the Master's Degree to Breakthrough Telecommunications Technologies and to the Development of Digital Clusters in Russia and the World*
Buchatsky N.
- 2** *Optical Amplifiers on Ytterbium Fiber for Space Communication Systems*
Glagolev S., Gordiychuk I.
- 3** *Modeling of Information Processes in Infocommunication Systems*
Ivanov N., Kiselyov D., Sotnikov A.
- 4** *Using a Kalman Filter with Constraints to Reduce the Sensitivity of the Receiving Active Phased Array Antenna to the Angle*
Schedrin A., Boyko I.
- 5** *Comparison of the Efficiency of Chromatic Dispersion Compensation in Single-Mode Optical Fibers Using Dispersion Compensating Fibers and Fiber Bragg Gratings*
Kubinskaya M.
- 6** *Research Activity of Students as a Factor of Professional Training of Specialists for the Field of Advertising and Public Relations*
Gerashchenko L., Kulnazarova A.
- 7** *Considering Overlapping Sectors of Cellular Base Stations in the Environmental Monitoring of Electromagnetic Fields*
Pishugina A.
- 8** *Modeling of Interferogram Analytical Functions from Discrete Values*
Sedinkin I., Skaletskaya I.
- 9** *Virtualization System Protection Task*
Dyusmetova A.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Эл № ФС77-85553 от 28 июня 2023 г.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Адрес учредителя: 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61, литера А

Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2
Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022, +79643759970

E-mail: vestnik@sut.ru
Web: <http://vestnik-sut.ru>

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

От подготовки кадров в магистратуре к прорывным телекоммуникационным технологиям и развитию цифровых кластеров в России и мире



Институт магистратуры
на сайте СПбГУТ

Описываются особенности и перспективы развития специализированной конференции магистрантов и их руководителей, проходящей ежегодно в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Основное внимание сосредоточено на анонсированном переходе российских вузов с сентября 2026 г. на новую систему образования, в частности, применительно к УГСН 25.00.00 «Электроника, фотоника, приборостроение и связь». Рассмотрено взаимное влияние созданной в институте магистратуры системы мотивации профессорско-преподавательского состава университета, задействованного в подготовке магистров, и специализированной конференции. Представлены основные итоги работы конференции магистрантов и их руководителей за 2020 – 2024 гг. и анонсированы работы участников конференции в текущем выпуске научного журнала.

рениции магистрантов и их руководителей за 2020 – 2024 гг. и анонсированы работы участников конференции в текущем выпуске научного журнала.

С 3 по 5 декабря 2024 г. в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) состоялась V Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024). Конференция объединила более 650 авторов из СПбГУТ и других ведущих университетов и организаций, что показывает, насколько важен сегодня этот уровень образования. Сейчас эта ступень образования еще открыта для всех желающих, независимо от направления подготовки, полученной ранее в бакалавриате или специалитете. Но уже с 1 сентября 2026 г., скорее всего, продолжать свое развитие студентам можно будет лишь в близкой к первично выбранной научной области. Например, текущая редакция проекта ФГОС ВО по УГСН 25.00.00 «Электроника, фотоника, приборостроение и связь» (далее – Проект) предусматривает, что к освоению программ специализированного высшего образования за счет средств федерального бюджета, бюджетов субъектов Российской Федерации и местных бюджетов допускаются лица, имеющие диплом по следующим специальностям базового высшего образования:

- 25-01 Электроника,
- 25-02 Микро- и наносистемы,
- 25-03 Радиотехника,
- 25-04 Фотоника,
- 25-05 Оптические и лазерные системы и технологии,
- 25-06 Приборостроение,
- 25-07 Биотехнические системы и технологии,
- 25-08 Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
- 25-09 Радиоэлектронные системы и комплексы,
- 25-10 Специальные радиотехнические системы,
- 25-11 Оптические и оптико-электронные приборы и системы,
- 25-12 Применение и эксплуатация средств и систем специального мониторинга,
- 25-13 Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи.

Проектом вводятся ограничения на максимальное число обучающихся, для которых один и тот же педагогический работник организации является руководителем выпускной квалификационной работы – для программ специализированного высшего образования это не более двух обучающихся. Вполне возможно, что это нововведение приведет к более качественной подготовке магистров. Например, в СПбГУТ количество магистрантов каждого курса у одного руководителя варьируется от 1 до 9, что далеко не всегда положительно отражается на качестве подготовки магистров. При этом устанавливаемый Проектом срок получения образования по программе специализированного высшего образования для очной формы обучения в 1 год приводит к невозможности продолжения развития в данной области как непрофильных специалистов, так и профильных бакалавров.

Эти обстоятельства значительно ограничивают возможные изменения образовательной траектории обучающегося и увеличивают значимость первоначального выбора направления подготовки и важность профориентационных мероприятий, в которых участвует поступающий на программы высшего образования. В СПбГУТ при поступлении на программы магистратуры дополнительные преимущества получают участники Школы будущего магистранта и Всероссийской студенческой олимпиады «Инфотелеком». Кроме конкурсного отбора, выявляющего наиболее подготовленных и мотивированных поступающих, важным фактором является дополнительное информирование участников мероприятий об особенностях той или иной магистерской программы, что позволяет им более осознанно осуществить выбор направления подготовки. Интересно отметить, что подавляющее большинство победителей и призеров Всероссийской студенческой олимпиады «Инфотелеком», а также обладателей Золотых и Серебряных сертификатов Школы будущего магистранта являются впоследствии активными участниками конференции магистрантов и их руководителей.

Одной из базовых компетенций выпускников как на современных программах магистратуры, так и на планируемых программах специализированного высшего образования является способность применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы.

В СПбГУТ в 2019 г. был введен институт руководителей магистрантов, которые курируют весь процесс обучения и, самое главное, научно-исследовательскую работу студента вплоть до защиты выпускной квалификационной работы. Это укрепляет связь между преподавателем и студентом уже с 1-го семестра обучения, ведь ранее у студента появлялся руководитель только в последнем семестре для руководства ВКР.

Достаточно серьезные успехи университета в части, касающейся магистратуры, – увеличение контрольных цифр приема (КЦП) в 1,5 раза (с 210 в 2021 г. до 323 в 2025 г.) – связаны с созданием по инициативе института магистратуры эффективной системы мотивации профессорско-преподавательского состава (ППС), задействованного в подготовке магистров. Разработка системы потребовала использования в качестве критериев эффективности работы ППС индикаторов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, применяемых при установлении КЦП в магистратуру для каждого вуза.

Оцениваемая деятельность руководителя магистранта – с одной стороны, это научные труды, участие в конференциях самого руководителя. С другой стороны – это оценка работы его студента: участвовал ли он в конференциях, написал ли статьи, какие у него результаты интеллектуальной деятельности, участвует ли он в НИР. При этом значимость высокой публикационной активности, апробации научных результатов, участия в финансируемых НИР и ОКР, наличия РИД у магистрантов и их руководителей достигает 48 % в общей оценке качества работы последних при условии реализации программы на русском языке. Предполагаемые Проектом новые требования к общему руководству научным содержанием программы специализированного высшего образования также предусматривают ежегодную апробацию результатов научно-исследовательской деятельности по направлению подготовки на национальных и международных конференциях научно-педагогическим работником организации, имеющим ученую степень. Очевидно, что наличие собственной ежегодной национальной конференции магистрантов и их руководителей в университете оправданно в соответствии с указанными причинами. Институт ма-



Конференция ПКМ-2024
на сайте СПбГУТ

Конференция
ПКМ за 5 лет:

2500 работ
2000 публикаций

гистратуры СПбГУТ в 2020 г. организовал первую такую специализированную конференцию, а за пять лет в рамках этой конференции прошли апробацию более 2 500 работ магистрантов, было подготовлено свыше 2 000 публикаций. Большой вклад в становление конференции внес доктор технических наук Николай Николаевич Иванов (фото 1 – первый слева), являвшийся составителем всех печатных изданий – Сборника лучших докладов и Материалов конференции (фото 2). В первые четыре года весь объем работ по организации, подготовке программы конференции и последующей допечатной подготовке рукописей статей приходился на работников института магистратуры.

Работа V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024)» – а это 5 научных направлений, 21 секция – принципиально изменила ситуацию с публикационной активностью магистрантов, которая возросла в два раза по сравнению с прошлым периодом; тем самым, сформировались условия для неоднократных выступлений и публикаций магистрантов с результатами их научной работы на разных стадиях. Именно участие в конференции ПКМ, важнейшем учебно-научном мероприятии, обеспечило обучение студентов процессу подготовки докладов, научных статей, получение компетенций научной работы совместно с коллегами.

Конференция
ПКМ-2024:

5 научных направлений
21 секция



Фото 1. Коллектив организаторов конференции ПКМ-2023



Фото 2. Сборники материалов конференции ПКМ

В процессе обучения студентов доклады и публикации неизбежно трансформируются в победы на конкурсах научных работ и проектов, а после обучения – в успешное трудоустройство и высокую заработную плату. Так, ежегодно участники конференции ПКМ подают заявки на Стипендиальный конкурс Фонда Потанина, с 2019 г. в институте магистратуры появилось уже 18 победителей конкурса. Магистранты активно принимают участие в конференциях следующего уровня – например, в Международной научной конференции «Ломоносов», их проекты занимают призовые места на выставках научно-технических разработок и проектов. В 2024 г. участники ПКМ вошли в число победителей конкурсного отбора на получение стипендий имени К. А. Валиева в области электронной промышленности. Анализируя успехи молодых ученых университета, нельзя не увидеть знакомые фамилии, мелькавшие на страницах Сборника лучших докладов конференции ПКМ. Впрочем, далеко не все выпускники магистратуры стремятся к академической карьере, многим ближе условно «профессиональная» магистратура, ориентированная на будущую работу в IT-индустрии. Такие выпускники после двух лет обучения на втором уровне высшего образования заслуженно рассчитывают на больший уровень оплаты труда по сравнению с бакалавриатом.

**Рейтинг лучших
вузов РФ***
СПбГУТ:
12 место
Зарплата*
170000 руб
*по данным SuperJob

По данным сервиса SuperJob в рейтинге лучших вузов России по уровню зарплат IT-специалистов, выпускников 2018–2023 гг. СПбГУТ сохранил свою позицию – 12-е место: зарплата, на которую мог претендовать выпускник IT-направлений СПбГУТ в Москве в 2023–2024 гг., выросла на 10 000 и составила 170 000 рублей.

Научно-технический характер конференции, очевидно, не нуждается в подтверждении после знакомства с программой и большей частью (свыше 90 %) опубликованных докладов. Научно-методический характер конференции отражает тематика докладов, посвященных созданию новых дисциплин и образовательных программ магистратуры, редизайну учебных курсов.

Необходимо отметить достаточно быстрый эффект от внедрения учебных курсов в программы очной магистратуры – например, при запуске обновленного учебного курса в 2025 г. первый выпуск магистров, обладающих необходимыми навыками и компетенциями, произойдет в июле 2027 г. Следует отметить и возможный опережающий эффект внедрения или обновления учебных курсов в связи с тем, что большинство бакалавров трудоустроивается одновременно с поступлением в магистратуру. Таким образом, полученные знания обновленного учебного курса первые магистранты в рассматриваемом случае смогут применить еще в процессе обучения (лето 2026 г.).

Процесс популяризации обновления учебных курсов через конференцию ПКМ привел к постоянному росту не только числа участников различных конкурсов, но и числа победителей – в частности, в ежегодном Грантовом конкурсе для преподавателей магистратуры Фонда Потанина количество победителей с нулевого уровня в 2019 г. возросло до 6 человек в 2024 г. (за 5 лет в число победителей вошли 17 преподавателей института магистратуры). Каждый грант на реализацию проектов по совершенствованию (трансформации и редизайну) образовательных продуктов победителей конкурса предусматривает финансирование до 500 тысяч рублей, все проекты внедряются в учебный процесс университета.

Данные для анализа состава участников конференции, применительно к секции 1.4 «Медиатехнологии и телерадиовещание», приведены в таблице 1.

**6 преподавателей и
6 магистрантов
СПбГУТ в 2024 г –
победители
конкурсов
Фонда Потанина**

Таблица 1. Секция 1.4 «Медиатехнологии и телерадиовещание»

№ п/п	Категория участников конференции	Количество личных докладов	Количество докладов в соавторстве
1	Руководитель магистерских программ	1	2
2	Руководитель магистрантов	1	13
3	Магистрант 1 курса	8	8
4	Магистрант 2 курса	3	3
5	Аспирант	1	1
6	Студент бакалавриата	3	2

С учетом численности студентов 1-го и 2-го курсов обучения рассматриваемой образовательной программы наблюдаются достаточно высокие показатели участия магистрантов в конференции – 94 и 55 %, соответственно. Положительно характеризует уровень подготовки студентов института магистратуры то обстоятельство, что половина всех докладов готовится ими без соавторов. Руководители магистрантов чаще всего участвуют в подготовке совместных докладов со своими студентами, значительно реже выступая самостоятельно. Частично этот негативный момент может быть связан с условно «кадровым» названием существующей конференции – возможно, пока недостаточно привлекательным для указания в списке научных трудов преподавателя. Привлечение на заседание секций студентов бакалавриата старших курсов и аспирантов кафедры является в последние два года заметной тенденцией на всех научных направлениях конференции. Наблюдаемые тенденции в целом по конференции приведены на рисунке 1.

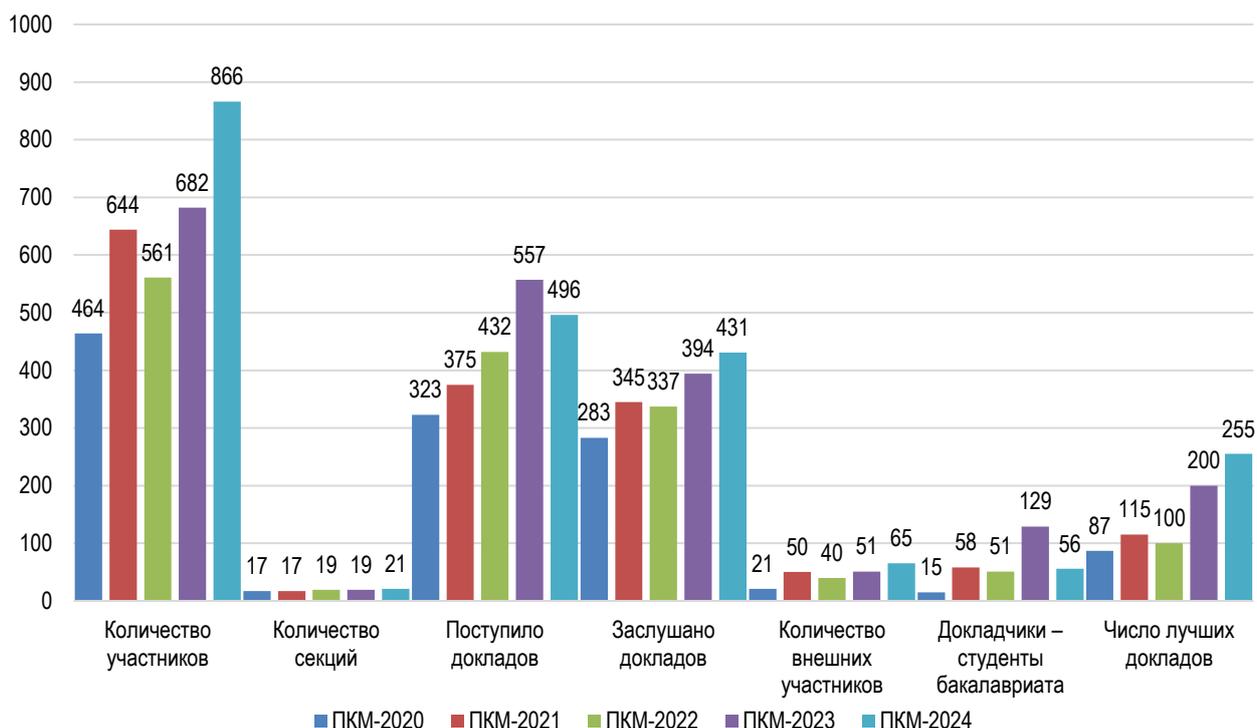


Рис. 1. Работа конференции: данные за 5 лет

Как известно, динамика развития экономики данных во многом определяется скоростью развертывания телекоммуникационных сетей и темпами внедрения информационных технологий, которые, в свою очередь, зависят от качественной подготовки кадров в отрасли телекоммуникаций, в том числе – подготовки кадров в магистратуре. По данным расчетов¹ на основе системы интеллектуального анализа больших данных iFORA Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ, проведенными Анной Пиекалнитс, Софьей Приворотской и Татьяной Серовой, основными тенденциями развития информационно-коммуникационных технологий сегодня можно считать:

- интеллектуализацию сетей,
- конвергенцию мобильной и фиксированной связи,
- D2D/M2M-соединения,
- интеграцию вычислений и хранения данных,
- высокоскоростной доступ в Интернет,
- узкополосный Интернет вещей,
- повышение доступности услуг спутниковой связи.

Проведенные расчеты показывают, что если топовые решения сопоставить в привязке к магистральным технологическим направлениям (кластерам), то становится заметно, что приоритеты их развития и практического применения в России и мире выстроены по-разному: в глобальной повестке доминирует кластер цифровых решений на основе ИИ, а в российской – все больший вес приобретают прорывные разработки на стыке физического и виртуального миров, а также решения в сегменте цифровой инфраструктуры. Кроме названных, к таким кластерам коллеги из НИУ ВШЭ относят цифровые финансы и индустрию 4.0, отмечая при этом роль новых вызовов, прежде всего санкционных ограничений, в выявлении критической зависимости современной экономики от технических возможностей телекоммуникационной инфраструктуры.

Стратегической целью СПбГУТ на перспективу 2033 г. является достижение лидерства и технологического превосходства по вкладам в образование, науку и общество в области информационных технологий и связи, что обеспечит существенный вклад в развитие национальной системы образования, науки и общества как в Северо-Западном федеральном округе, так и в Российской Федерации. В числе

¹ Топ-10 цифровых технологий в России и мире // НИУ ВШЭ. 26.12.2024. URL: <https://issek.hse.ru/news/1000447295.html>

ожидаемых эффектов от реализации образовательной политики в рамках действующей Программы развития СПбГУТ предусмотрено обеспечение 100 % обучающихся возможностью вариативности обучения, кастомизации и индивидуализации образовательных траекторий, высокой скоростью адаптации образовательных программ под новые задачи.

Таким образом, все эти факторы приводят нас к необходимости предоставить магистрантам и их руководителям как сегодняшнего, так и завтрашнего дня, подходящую площадку для апробации результатов своих научных исследований. Настоящий выпуск журнала «Вестник СПбГУТ» сформирован из статей участников Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024)» – руководителей магистерских программ, руководителей магистрантов, преподавателей магистратуры и самих магистрантов.

В номер вошли работы, посвященные:

- анализу угроз, связанных с виртуальными инфраструктурами, с целью выявления и классификации основных задач защиты систем виртуализации;
- моделированию информационных процессов в инфокоммуникационных системах и аналитических функций интерферограмм по дискретным значениям;
- методике локализации областей воздействия дестабилизирующих факторов в сети связи и анализу поведения фильтра Калмана;
- оптическим усилителям для систем космической связи и эффективности компенсации хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон и волоконных брегговских решеток;
- исследованию влияния наложения секторов базовых станций сотовой связи на пространственное распределение электромагнитных полей;
- выявлению роли научно-исследовательской деятельности студентов в формировании профессионально-востребованных качеств.

Представленные материалы отражают как научный, так и методический характер прошедшей конференции и позволяют надеяться на ее дальнейшее развитие в рамках важнейших мероприятий вуза-участника программы «Приоритет-2030» – а именно в качестве конференции магистрантов, аспирантов и их руководителей «Прорывные телекоммуникационные технологии и развитие цифровых кластеров в России и мире (ПКМ-2025)».

*Директор института магистратуры СПбГУТ,
кандидат технических наук, доцент
Александр Николаевич Бучатский*

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 621.391

Оптические усилители на иттербиевом волокне для систем космической связи

Глаголев С. Ф.✉, Гордийчук И. М.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Внедрение оптической связи между искусственными спутниками Земли как части глобальной сети связи – важная и актуальная проблема. Одна из задач, которую при этом необходимо решить, – это переход с длины волны излучения 1,55 мкм, которая успешно используется в волоконно-оптических системах связи на Земле и под водой, на более короткие волны. В статье рассмотрена частная задача практической реализации оптического усилителя для системы космической связи. Была выбрана схема усилителя, использующего иттербиевое оптическое волокно в качестве активной усилительной среды. **Целью** работы является исследование оптических усилителей на основе иттербия, их схем и конструктивных особенностей для применения в качестве усилителя мощности и предварительного усилителя в системах космической связи. **Новизна** работы заключается в предлагаемой методике исследований и результатах анализа схем двухкаскадного оптического усилителя мощности и однокаскадного предварительного оптического усилителя. **Результат исследования:** практические рекомендации по методикам исследования оптических усилителей на основе иттербиевых волокон. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы разработчиками оптических усилителей, а также в учебном процессе на кафедре оптических и квантовых систем связи СПбГУТ.

Ключевые слова: космическая связь, волоконно-оптический усилитель на основе иттербия

О современном состоянии космической связи

Космическая связь начала свое развитие в середине 1960-х гг. с появлением первого советского спутника связи «Молния» и американского «Telstar» и продолжает быстро развиваться в интересах всего человечества.

В настоящее время в околоземном пространстве находятся тысячи спутников связи, которые классифицируются по типу своей орбиты [1, 2] относительно Земли (таблица 1). Существуют группировки низкоорбитальных (LEO), среднеорбитальных (MEO) и геостационарных (GEO) спутников связи.

Библиографическая ссылка на статью:

Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М. Оптические усилители на иттербиевом волокне для систем космической связи // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 2. EDN: MSPXWZ

Reference for citation:

Glagolev S., Gordiyuchuk I. Optical Amplifiers on Ytterbium Fiber for Space Communication Systems // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 2. EDN: MSPXWZ

Таблица 1. Классификация спутников связи по параметрам их орбит

Параметры орбит спутников связи	Типы орбит спутников связи		
	GEO	MEO	LEO
Высота орбиты, км	36 000	5000–15 000	500–2000
Минимальное количество спутников связи в одной орбитальной группировке	3	8–12	48–66
Максимальная зона покрытия поверхности Земли одним спутником связи, %	34	25–28	3–7
Время пребывания одного спутника связи в зоне радиовидимости	24 часа	1,5–2 часа	10–15 мин

На рисунке 1 представлено схематическое представление орбит спутников связи. Согласно международной конвенции ООН о мирном использовании космического пространства и рекомендациям Международного радиочастотного комитета, чтобы избежать радиопомех для соседних геостационарных спутников связи, их угловое расстояние друг от друга должно составлять не менее $0,5^\circ$. Таким образом, на геостационарной орбите можно разместить не более 720 спутников. Однако в последние десятилетия это требование уже не соблюдается. На 2011 год в каталоге числилось свыше 1500 геостационарных спутников. К ним можно добавить более 600 высокоэллиптических объектов, которые периодически пересекают геостационарную орбиту, и более 200 военных спутников, запущенных на орбиту в интересах обороны и разведки различных государств, не включенных в публично доступный каталог NORAD (<https://www.sat.belastro.net/index.php>).

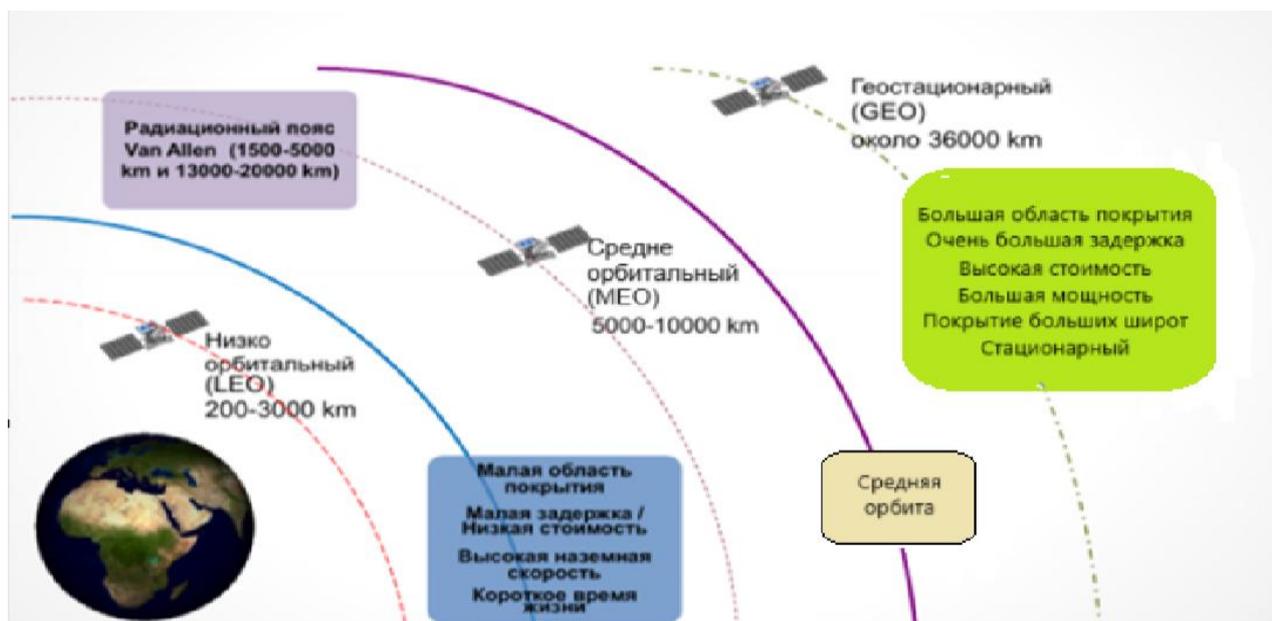


Рис. 1. Схема расположения орбит спутников связи относительно Земли

В настоящее время связь между спутниками связи и наземными станциями в основном осуществляется сверхвысокочастотными радиоволнами в диапазонах X (7,0–10,7 ГГц), Ku (10,7–18,0 ГГц) и Ka (26,5–40 ГГц) [3].

Однако интерес к использованию и попытки создания систем лазерной оптической связи в космосе возникли практически сразу после появления первых спутников связи и лазерных источников излучения: во второй половине прошлого века [1–3]. Отметим, что оптическая связь в космическом пространстве относится к более широкой области связи, которая получила название FSO (*аббр. от англ. Free Space Optics* – оптика свободного пространства). В большинстве FSO используется ближний инфракрасный диапазон длин волн от 750 до 1600 нм. Наиболее распространенные длины волн включают диапазоны около: 800 нм (819/830/880 нм), 1000 нм (1058/1064 нм) и 1550 нм [4].

Структурные схемы передатчиков и приемников FSO

Рассмотрим упрощенные структурные схемы передатчика и приемника для M -канальных FSO. В схему передатчика (рисунок 2) входят M отдельных маломощных канальных передатчиков (Tx1–TxM) с длинами волн λ_1 – λ_M , модулированное излучение которых объединяется в мультиплексоре (MUX) и поступает на оптический усилитель мощности (ОУМ), также называемый бустером. Выходное излучение ОУМ поступает в оптическую схему передающей антенны (ПРД), где формируется выходное излучение в виде параллельного пучка с радиусом W_0 .

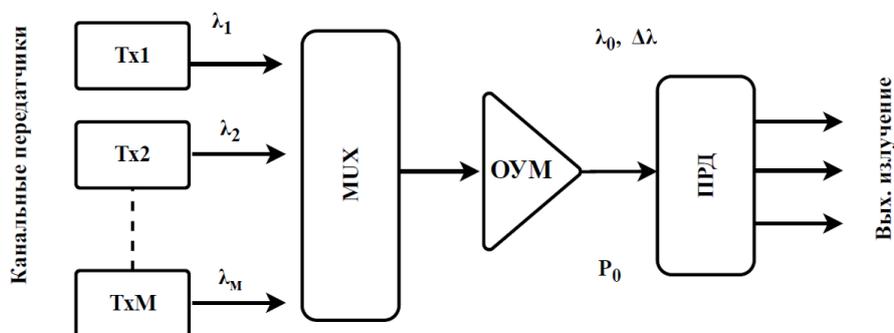


Рис. 2. Упрощенная структурная схема многоканального передатчика FSO

В схему приемника (рисунок 3) входит приемная антенна (ПМР), которая собирает ослабленное рассеянное излучение от передатчика с мощностью P_R в пределах своей апертуры с радиусом W_R и направляет его в предварительный оптический усилитель (ПОУ) с коэффициентом усиления G и коэффициентом шума F_n . Выходной сигнал ПОУ поступает на демультиплексор (DMUX), который направляет оптические каналные сигналы с мощностью P_r на свои фотоприемные устройства (ФПУ).

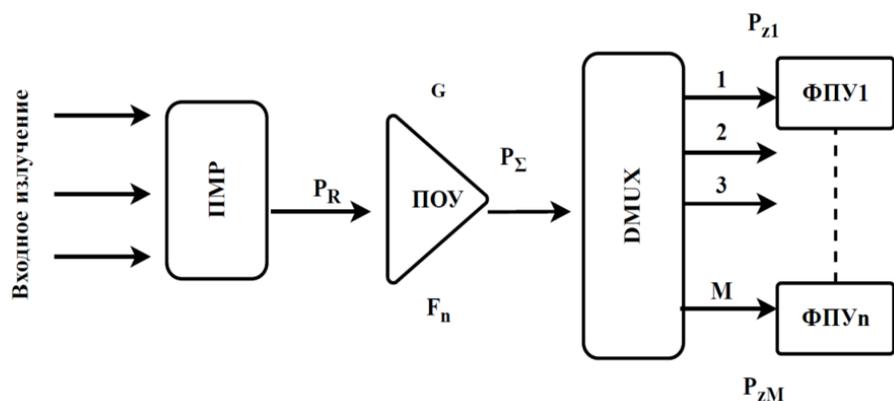


Рис. 3. Упрощенная структурная схема M -канального приемника FSO

Выбор длины волны излучения для FSO в космосе

При выборе наиболее эффективной длины волны лазерного излучения для FSO необходимо учитывать ряд факторов: уровень потерь в канале связи, наличие доступных и эффективных источников, приемников, усилителей и модуляторов оптического излучения, а также других оптических компонентов для выбранной длины волны. Потери в канале связи FSO между спутниками определяются в основном дифракционной расходимостью лазерного пучка, а для атмосферных FSO, включая линии связи с наземными станциями, необходимо учитывать также потери и искажения оптических пучков в атмосфере Земли. Рассмотрим упрощенную оптическую схему канала FSO в безвоздушном пространстве длиной L (рисунок 4) между двумя линзовыми антеннами Л1 (ПРД) и Л2 (ПМР). Полагаем, что выходящий из линзы Л1 пучок мощностью P_0 является гауссовским с радиусом W_0 равным радиусу линзы Л1 (апертуре передатчика).

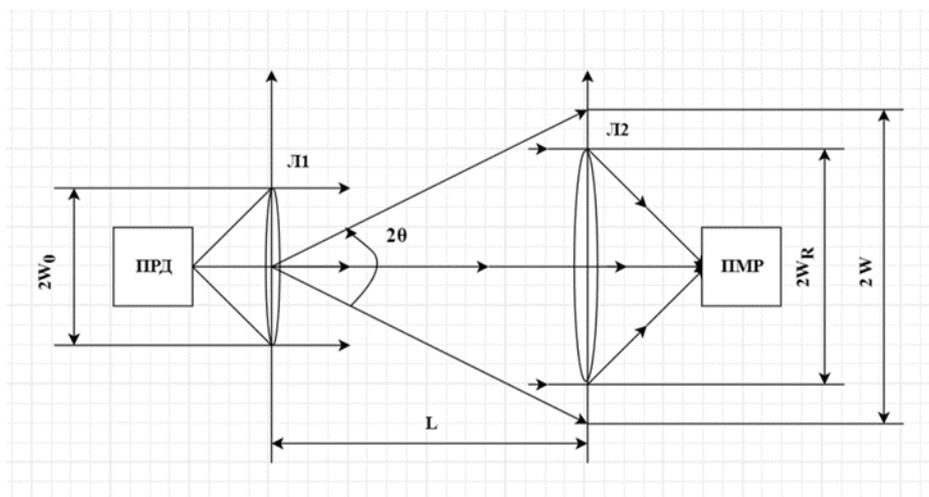


Рис. 4. Упрощенная оптическая схема канала FSO в безвоздушном пространстве

Радиус этого пучка на расстоянии L значительно возрастает до величины W . Часть энергии пучка с радиусом апертуры приемной антенны W_R воспринимается ФПУ. Запишем выражение для угла расходимости θ_0 пучка, который зависит от длины волны излучения λ_0 и апертуры передатчика W_0 :

$$\theta^0 = \frac{\lambda^0}{\pi \cdot W_0}, \text{ рад.} \quad (1)$$

Для оценки величины потерь в оптическом канале за счет дифракции можно использовать упрощенное выражение [2]:

$$A = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_0}{P_R}\right) \approx 20 \cdot \lg\left(\frac{L \cdot \lambda_0}{\pi \cdot W_0 \cdot W_R}\right), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где P_R – мощность на входе ФПУ.

Из выражения (2) видно, что для уменьшения потерь в линейном тракте FSO необходимо увеличивать апертуры передающей W_0 и приемной W_R антенн, а также уменьшать длину волны излучения λ_0 . Это означает следующее: несмотря на то, что С-диапазон со средней длиной волны 1550 нм широко используется для FSO, работающих в атмосфере, переход на более коротковолновый диапазон со средней длиной волны 1000 нм позволяет, в соответствии с (2), на 3,8 дБ уменьшить потери A и в 2,4 раза увеличить максимальное расстояние L между спутниками.

Особенности FSO по сравнению с волоконно-оптическими системами связи

В настоящее время многоканальные волоконно-оптические системы связи (ВОСС) с технологией плотного мультиплексирования в волновой области DWDM (*аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing* – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны), использующие одномодовые оптические волокна (ОВ) и среднюю длину волны 1550 нм, стали во всем мире основой не только транспортных, магистральных и региональных сетей связи, но также и сетей доступа. Для них разработана широкая номенклатура комплектующих изделий, включая источники, приемники, кодеры, модуляторы излучения, а также мультиплексоры и цифровые сигнальные процессоры (DSP, *аббр. от англ. Digital Signal Processor*) для обработки сигналов и т. д. Для усиления сигналов в ВОСС используют оптические усилители EDFA (*аббр. от англ. Erbium-Doped Fibre Amplifier* – усилитель на волокне, легированном эрбием). В качестве активной усиливающей среды в них используются ОВ, сердцевина которых легирована ионами эрбия.

Особенностями современных ВОСС являются линейные и нелинейные искажения в волокнах, которые ограничивают максимальные уровни оптических сигналов на входе в ОВ. Кроме того, для устранения этих искажений ужесточаются требования к структурам DSP, а также к алгоритмам и программам цифровой обработки сигналов (ЦОС).

В FSO в канале связи между спутниками атмосферные искажения, обусловленные потерями на поглощение и турбулентностью, отсутствуют. Нелинейные искажения и нелинейные шумы также не возникают. Это позволяет не только упростить структуру DSP и алгоритмы ЦОС, но и снять ограничения на канальную и общую мощности на выходе передающей антенны, которую можно повысить до нескольких ватт за счет применения ОУМ. Для повышения чувствительности ФПУ можно использовать лавинные фотодиоды (ФД) или ПОУ в сочетании с р-и-п ФД.

В данной статье рассматривается один из аспектов возможного перехода FSO на среднюю длину волны 1000 нм, а именно возможность практической реализации ключевых элементов системы связи — ОУМ и ПОУ.

Особенности оптических усилителей на ОВ, легированном иттербием

Для создания оптического усилителя (ОУ) в разных диапазонах длин волн используют ОВ, сердцевина которых легируется редкоземельными элементами: эрбием, иттербием, празеодимом, тулием и гольмием [5]. Для диапазона со средней длиной волны в районе 1000 нм может использоваться волоконный ОУ YDFA (аббр. от англ. Ytterbium-Doped Fibre Amplifier — усилитель на волокне, легированном иттербием), в качестве активной среды которого используется кварцевое ОВ (YDF), сердцевина которого легирована иттербием. YDFA позволяют усиливать оптические сигналы в очень широком диапазоне длин волн от 975 до 1150 нм (обычно от 1030 до 1080 нм), обеспечивать высокую выходную мощность до десятков ватт и эффективное преобразование мощности накачки в выходную мощность сигнала (PCE, аббр. от англ. Power Conversion Efficiency — эффективность преобразования мощности), а YDF обладает высокой теплостойкостью, сохраняя свою геометрию при высоких температурах [6, 7].

На рисунке 5 показана структура энергетических уровней ионов иттербия Yb^{3+} в YDF. Для использования в ОУ подходят два множества уровней: основное множество ${}^2F_{7/2}$, состоящее из четырех уровней, и возбужденное множество ${}^2F_{5/2}$, состоящее из трех уровней [8].

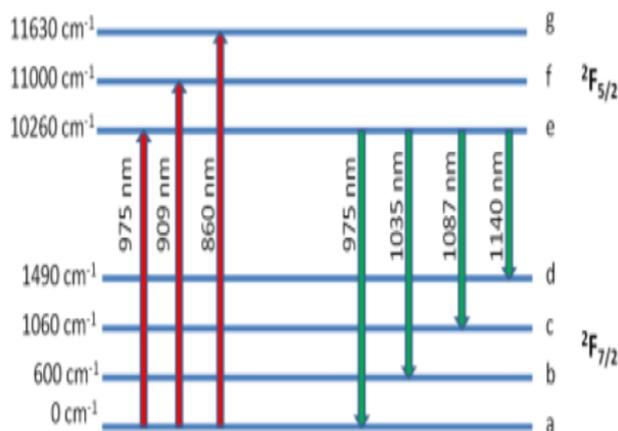


Рис. 5. Структура энергетических уровней Yb^{3+} [9]

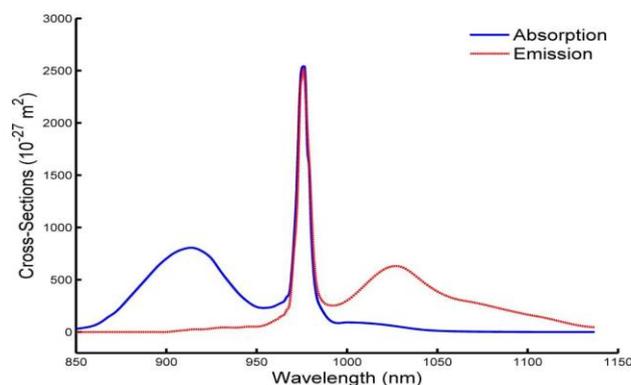


Рис. 6. Сечения поглощения (синий) и излучения (красный) Yb в германосиликатном стекле [8]

На рисунке 6 показаны сечения поглощения и излучения иттербия в германосиликатном стекле. Первый пик поглощения находится на длине волны 910 нм, что обусловлено переходом с нижнего уровня основного состояния, уровня a , на второй уровень возбужденного состояния, уровень f . Поскольку возбужденные ионы на уровне f нестабильны и легко распадаются до уровня e в возбужденном состоянии, сечение излучения на длине волны 910 нм очень мало. Это позволяет значительной части иттербия перейти в верхнее множество состояний, и мощная накачка на длине волны 910 нм приводит к тому, что 97 % ионов находятся в верхнем состоянии, что обеспечивает практически максимальное возможное

усиление на единицу длины [8]. Первый пик сечения излучения находится на длине волны 975 нм, что связано с переходами с нижнего уровня возбужденного состояния, уровня *e*, на нижний уровень основного состояния, уровня *a*. Таким образом, можно достичь максимально возможного усиления на длине волны 975 нм при накачке около 910 нм, но это будет слишком узкополосный ОУ, не пригодный для передачи больших объемов информации.

Для эффективного усиления в диапазоне от 1030 до 1080 нм, что соответствует переходам с уровня *e* в возбужденном состоянии на уровни *b* и *c* в основном состоянии, необходимо обеспечить инверсную населенность на уровне *e*. Для этого можно использовать накачку с длинами волн 860–970 нм (рисунок 5), которая переводит ионы иттербия на возбужденные уровни *f*, *g*. Далее ионы переходят без излучения на уровень *e* и там накапливаются, создавая инверсную населенность. Использовать для накачки излучение с длинами волны вблизи пика поглощения 975 нм (рисунок 6), нецелесообразно, так как этой волне соответствует и пик излучения. Это приводит к резкому росту усиленного спонтанного излучения (ASE, аббр. от англ. Amplified Spontaneous Emission) и ограничивает инверсию населенности на уровне *e* величиной 50 %. Этого недостаточно для эффективного усиления. Далее это будет проиллюстрировано (см. рисунок 13).

Однако по данным компании-изготовителя PG Photonics даже небольшой уход от резонансной длины волны позволяет создавать эффективные иттербиевые ОУ с мощностью от 1 до 100 Вт.

Отметим, что для ПОУ с небольшой выходной мощностью могут использоваться одномодовые ОБ с одной оболочкой и смесители (мультиплексоры) с технологией WDM (аббр. от англ. Wavelength Division Multiplexing – мультиплексирование в волновой области) для объединения излучений сигнала и накачки ограниченной мощности (не более 1 Вт). Для ОУМ с большой выходной мощностью требуется накачка мощностью в единицы-десятки Вт. При использовании обычного смесителя WDM для ОУМ требуемая интенсивность излучения на входе в ОБ может приводить к разрушению, как торца YDF, так и самого смесителя.

Изобретение YDF с двойной оболочкой решает эту проблему. На рисунках 7 и 8 показана упрощенная конструкция YDF с двойной оболочкой: внешней (Outer Cladding) и внутренней (Inner Cladding).

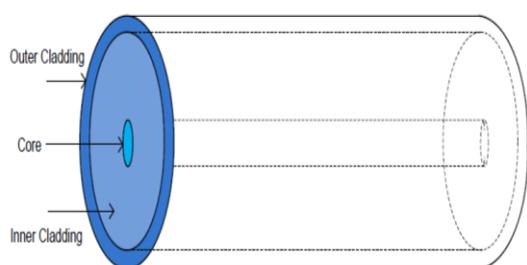


Рис. 7. Конструкция YDF с двойной оболочкой

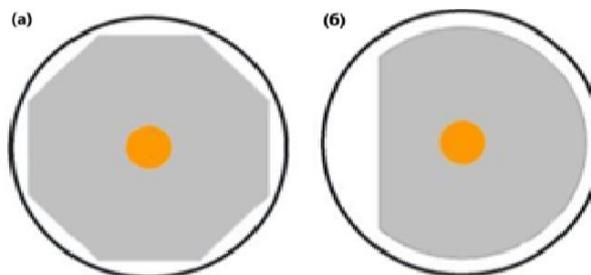


Рис. 8. Поперечное сечение: а) восьмиугольного; б) D-образного YDF с двойной оболочкой

Оптический сигнал вводится в сердцевину ОБ с двойной оболочкой и затем усиливается в ней, тогда как излучение накачки вводится во внутреннюю оболочку. В любой плоскости сечения ОБ, перпендикулярной направлению распространения света, только небольшая часть излучения накачки взаимодействует с ионами легирующего элемента в сердцевине волокна. Однако излучение накачки входит в сердцевину YDF не только в его начале, но и на всем протяжении. Введем коэффициент *D*, который определяет процент энергии накачки, введенной во внутреннюю оболочку, и фактически определяет усилительную способность на определенном участке волокна:

$$D = \frac{A_{core}}{A_{inner_cladding}}, \quad (3)$$

где A_{core} , $A_{inner_cladding}$ – площади сердцевины и внутренней оболочки YDF, соответственно.

Диаметр внутренней оболочки имеет размер около 100 мкм, в то время как диаметр сердцевины обычно не превышает 10 мкм. Таким образом, коэффициент D будет меньше 0,01. Чтобы добиться более высокой эффективности накачки, нужно значительно увеличить ее мощность, вводимую во внутреннюю оболочку, и увеличить длину YDF. Коэффициент D можно также увеличить, применив различные формы внутренней оболочки, чтобы повысить вероятность того, что отраженный свет накачки попадет в сердцевину. На рисунке 8 показаны поперечные сечения двух ОБ с двойной оболочкой с восьмиугольной и D -образной формами внутренней оболочки, которые иногда называют «хаотическими волокнами». Неправильные формы внутренней оболочки позволяют свету накачки отражаться в случайных направлениях, благодаря чему он имеет большую вероятность пройти через сердцевину YDF и возбудить ионы легирующего элемента.

В сердцевине YDF из-за большой интенсивности излучений возникают нелинейные искажения сигналов. Один из методов уменьшения нелинейных эффектов – это снижение интенсивности излучения за счет увеличения площади сердцевины ОБ. Такие ОБ называются волокнами с большим диаметром поля моды (Large Mode Area Fibers, LMA), типичный диаметр которых составляет 20 мкм или более.

Двухкаскадный ОУ на ОБ, легированном иттербием

Использование двух каскадов усиления в YDFA, использующего YDF с двойной оболочкой, позволяет создать ОУ с большим коэффициентом усиления, низким уровнем шума и большой выходной мощностью. На рисунке 9 представлена схема моделирования такого двухкаскадного ОУ [10].

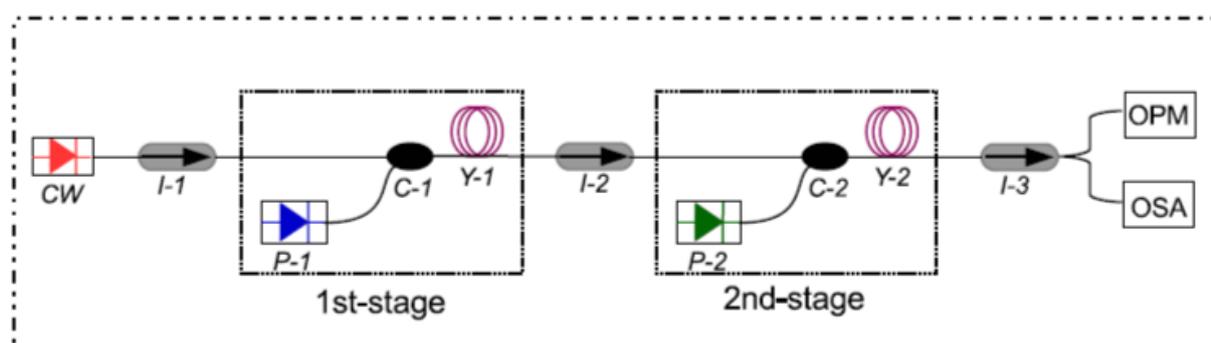


Рис. 9. Схема YDFA: CW – лазер непрерывного излучения; I-1, I-2, I-3 – изоляторы; P1, P2 – источники излучения накачки; Y-1, Y-2 – YDF; C1, C2 – смесители WDM; OSA – оптический анализатор спектра; OPM – оптический измеритель мощности

Первый каскад усиления использует накачку с длиной волны 920 нм, на которой коэффициент поглощения ОБ мал. Второй каскад использует более мощную по сравнению с первым накачку с длиной волны 980 нм, для которой поглощение в ОБ практически максимально. Схема исследования включает в себя источник входного сигнала (непрерывный лазер), три изолятора (I-1, I-2 и I-3), которые обеспечивают однонаправленное прохождение оптического сигнала, а также два смесителя излучения сигнала и накачки (C1 и C2). В схему также входят два источника накачки (P1 и P2), два коротких отрезка иттербиевого ОБ YDF (Y-1 и Y-2), выполняющие функции усиления. Параметры YDF Y-1 и Y-2 приведены в таблице 2 [10]. Эти параметры схожи с характеристиками серийных ОБ YDF (#YB1200-4/125) производства Thorlab (https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=336&pn=YB1200-4/125). Изоляторы I-1 и I-2 расположены перед первым и вторым каскадами ОУ, соответственно, а изолятор I-3 установлен на выходе всего усилителя для предотвращения возможных обратных отражений, которые могут нарушить стабильность работы ОУ [11, 12]. Для исследований в установке используются: оптический измеритель мощности (OPM) и оптический анализатор спектра (OSA).

На рисунке 10 показаны зависимости общего коэффициента усиления двухкаскадного ОУ от длины волны в диапазоне 1020–1080 нм. Из рисунка 10а видно, что максимальное усиление (62, 62,5 и 60,8 дБ) наблюдается на длине волны сигнала 1032,9 нм при длинах легированного волокна Y-2 второго каскада усиления 3, 6 и 9 м, соответственно. Коэффициент усиления в коротковолновой части спектра существенно снижается с увеличением длины ОБ, что связано с уменьшением инверсии населенности усиливающей

среды [11]. Из рисунка 10б видно, что максимальное усиление (62, 62,5 и 60,5 дБ) достигается на той же длине волны при концентрациях ионов иттербия Yb^{3+} , равных 25×10^{24} , 50×10^{24} и $75 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$, соответственно. При этом длина ОВ Y-2 была равна 6 м, а мощность сигнала на входе второго каскада была постоянной и составляла -35 дБм.

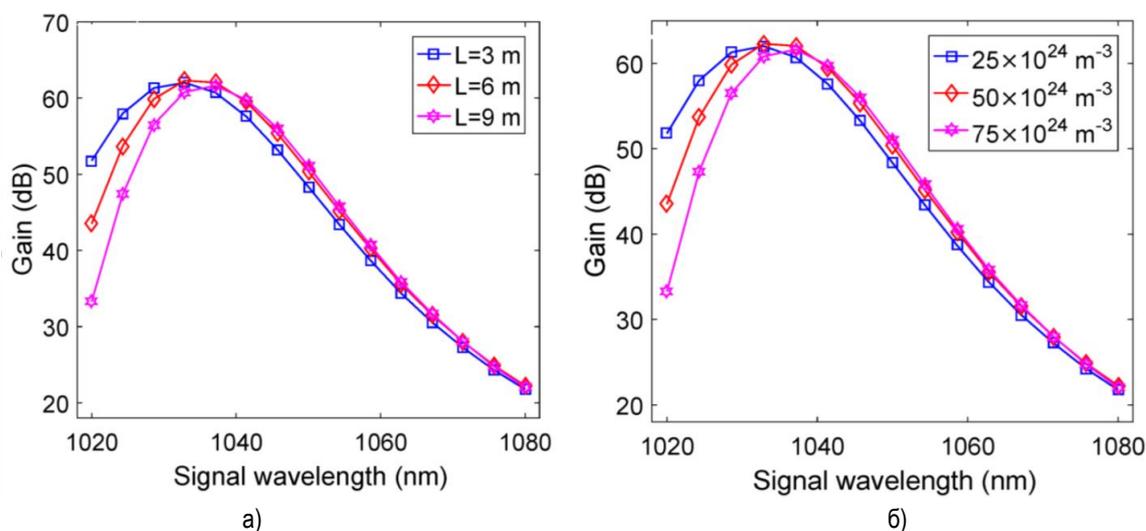


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента усиления от длины волны входящего сигнала для различных длин ОВ Y-2 (а) и концентраций легирующей примеси Yb^{3+} (б) [10]

Параметры, использованные при моделировании двухкаскадного ОУ, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры двухкаскадного ОУ YDFA

Параметр ОУ	Значение
Длина волны накачки 1-го каскада P-1	920 нм
Длина волны накачки 2-го каскада P-2	980 нм
Мощность накачки 1-го каскада P-1	1 Вт
Мощность накачки 2-го каскада P-2	4 Вт
Длина первого ОВ Y-1	1 м
Концентрация Yb^{3+} в ОВ Y-1	$50 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$
Радиусы сердцевин ОВ Y-1 и Y-2	3,4 мкм
Радиусы областей легирования ОВ Y-1 и Y-2	2,4 мкм
Радиусы оболочек ОВ Y-1 и Y-2	62,5 мкм
Числовые апертуры сердцевин ОВ Y-1 и Y-2	0,2
Числовые апертуры оболочек ОВ Y-1 и Y-2	0,5
Затухание сигнала	0,1 дБ
Затухание сигнала накачки	0,15 дБ

Таким образом, длина ОВ Y-2 6 м и концентрация легирующего вещества Yb^{3+} , равная $50 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$, обеспечивают максимальное усиление $-62,5$ дБ.

На рисунке 11 показаны графики зависимости коэффициента усиления от длины волны сигнала при различных значениях мощности накачки и сигнала. Из рисунка 11а видно, что максимальные значения усиления (около 58,6, 60,6 и 62,5 дБ) были получены при мощности накачки 2, 3 и 4 Вт, соответственно, для длины волны сигнала 1032,9 нм. Из рисунка 11б видно, что максимальные значения усиления (62,5, 54,5 и 40,4 дБ) наблюдались на длине волны сигнала 1032,9 м при уровнях мощности сигнала на входе второго каскада -35 , -20 , и -5 дБм, соответственно.

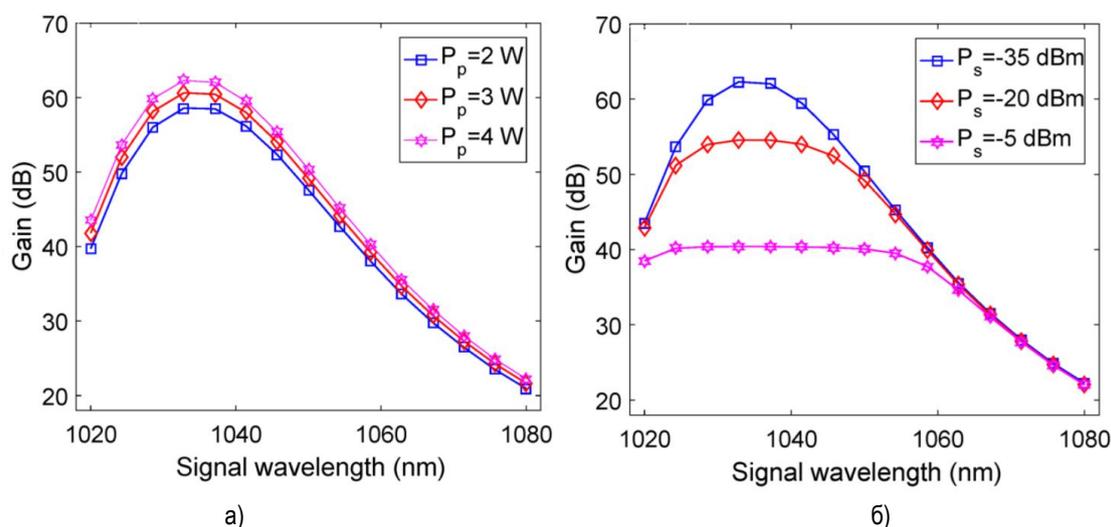


Рис. 11. Графики зависимости коэффициента усиления от длины волны сигнала при различных мощностях накачки (а) и сигнала на входе второго каскада (б) [10]

На рисунке 12 показаны графики зависимостей уровней мощности сигнала на выходе ОУ и коэффициента усиления от мощности накачки при различных значениях мощности сигнала. Из рисунка 12а видно, что эффективность преобразования мощности накачки в мощность сигнала (PCE) на длине волны сигнала 1032,9 нм равна 58,8, 60 и 60,5 % при уровнях мощности сигнала –35, –20 и –5 дБм, соответственно. Из рисунка 12б видно, что коэффициент усиления быстро увеличивается при возрастании мощности накачки для каждого значения мощности сигнала; однако наибольший коэффициент усиления достигается при самой малой мощности входного сигнала –35 дБм.

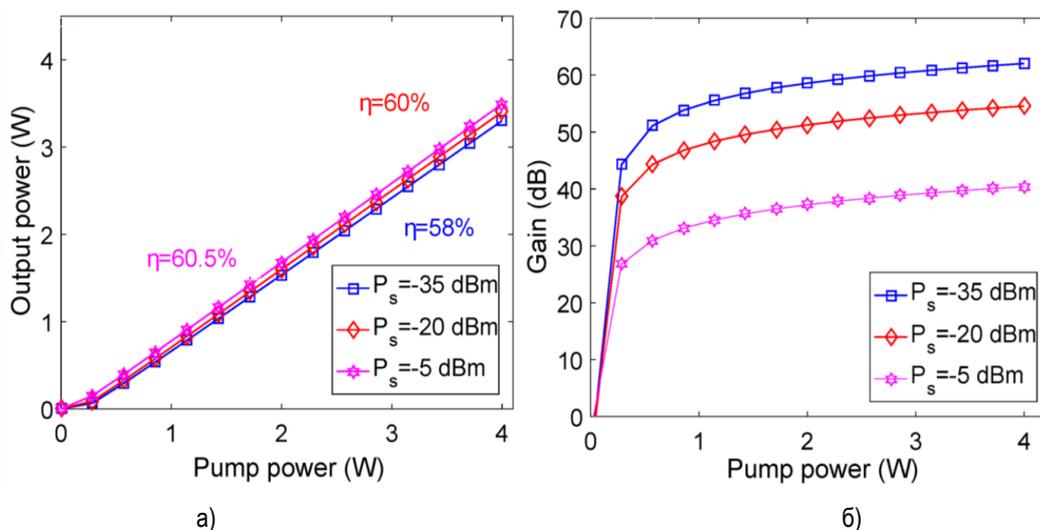


Рис. 12. Зависимость от мощности накачки выходной мощности сигнала (а) и коэффициента усиления (б) [10]

На рисунке 13 показаны зависимости выходной мощности и коэффициента усиления ОУ от длины волны накачки для трех различных значений мощности накачки на длине волны сигнала 1032,9 нм. Из рисунка 13а видно, что при изменениях длины волны накачки от 940 до 960 нм выходная мощность сигнала остается стабильной на уровнях 1,75; 3,5 и 4,5 Вт при мощностях накачки 2, 4 и 6 Вт, соответственно. Из рисунка 13б видно, что в этом диапазоне длин волн накачки коэффициент усиления составляет 59; 62,5 и 63,5 дБ при мощностях накачки 2, 4 и 6 Вт, соответственно. Однако на длине волны накачки примерно 965 нм наблюдается резкое снижение выходной мощности сигнала и коэффициента усиления ОУ.

Подобное поведение графиков зависимости на рисунке 13 можно объяснить, обратившись к рисунку 6, где видно, что коэффициенты поглощения фотонов накачки мало изменяются в диапазоне длин

волн 920–960 нм. Следовательно, выходная мощность и коэффициент усиления остаются практически постоянными в этом диапазоне длин волн накачки при всех трех значениях ее мощности.

На рисунке 6 в области 960–970 нм виден резкий пик поглотительной и излучательной способности ионов иттербия, которая приводит к снижению инверсии населенности до 50 %. При этом резко возрастает ASE, которое перегружает ОУ, и он теряет свои полезные усилительные функции. В результате выходная мощность и коэффициент усиления ОУ резко снижаются. При дальнейшем увеличении длины волны накачки более 975 нм значения выходной мощности и коэффициента усиления ОУ возвращаются к своим прежним значениям.

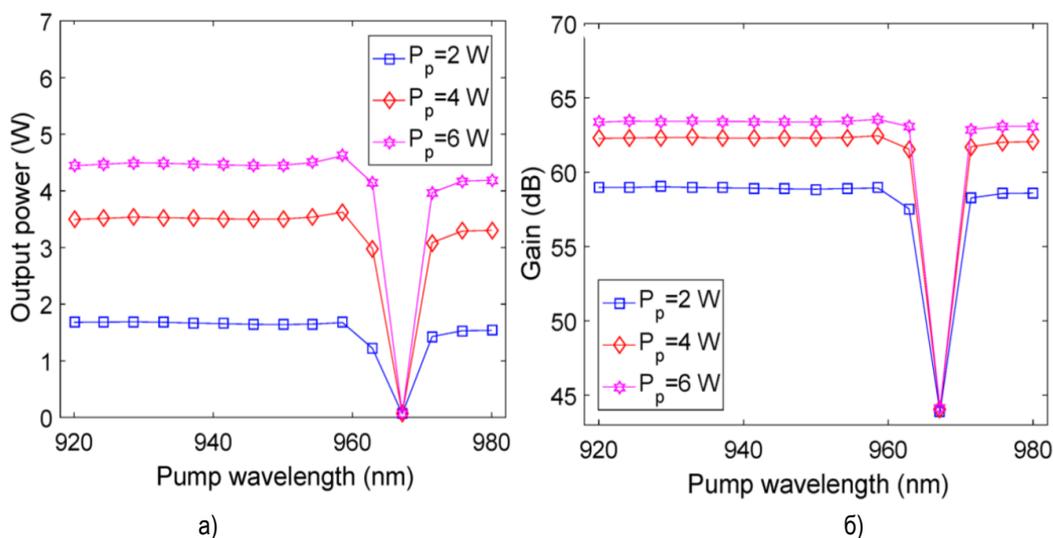


Рис. 13. Зависимость от длины волны накачки выходной мощности сигнала (а) и коэффициента усиления (б) [10]

На рисунке 14а показаны зависимости коэффициента усиления ОУ от его выходной мощности при трех уровнях мощности накачки: 3; 3,5 и 4 Вт. При этом мощность сигнала на входе второго каскада поддерживалась на уровне -35 дБм. Максимальные уровни выходных сигналов ОУ, при которых коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ, изменяются в пределах от 33,8 до 35,3 дБм. При этом мощность накачки изменялась от 3 до 4 Вт.

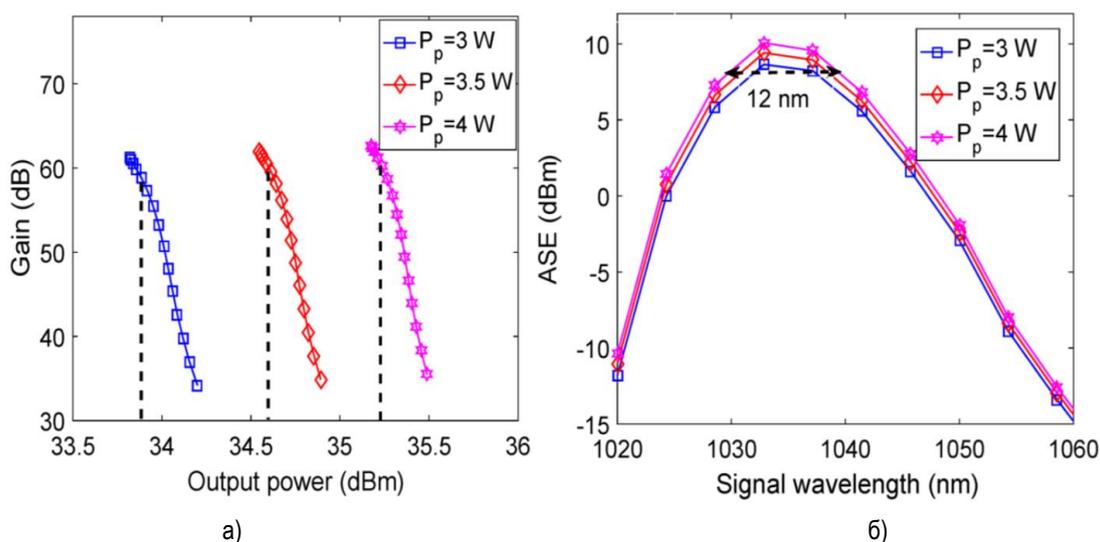


Рис. 14. Зависимости коэффициента усиления от выходной мощности ОУ (а) и уровня мощности ASE от длины волны сигнала (б) для различных значений мощности накачки [10]

На рисунке 14б показаны зависимости уровней мощности ASE от длины волны сигнала. Максимальные мощности ASE наблюдались на длине волны 1030 нм. Они составили 8,7; 9,4 и 10,1 дБм при мощностях накачки 3; 3,5 и 4 Вт, соответственно. Видно, что мощность ASE возрастает с увеличением

мощности накачки, так как последнее повышает не только вынужденное, но и спонтанное излучение. При мощности накачки 4 Вт ширина полосы ASE достигла 12 нм.

На рисунке 15 показана зависимость коэффициента усиления ОУ от мощности входного сигнала для различных значений мощности накачки на длине волны сигнала 1032,9 нм. Можно заметить, что коэффициент усиления постепенно увеличивается при уменьшении мощности сигнала с 10 до -30 дБм. При дальнейшем снижении мощности сигнала с -30 до -40 дБм коэффициент усиления стабилизируется и перестает увеличиваться. Отметим также, что значение коэффициента усиления ОУ растет с увеличением мощности накачки.

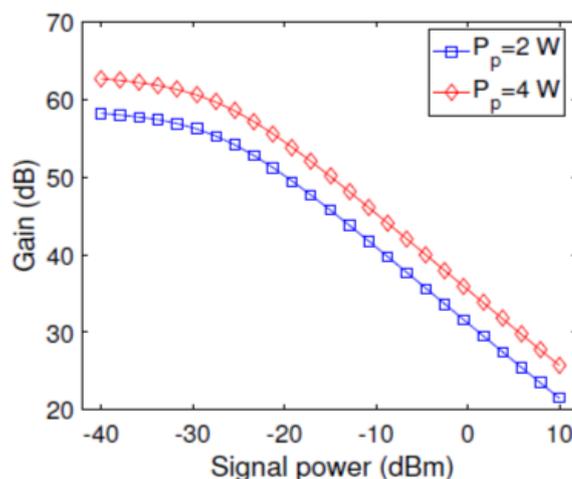


Рис. 15. Графики зависимости коэффициента усиления от мощности входного сигнала для двух значений мощности накачки

Основные характеристики рассмотренного двухкаскадного волоконно-оптического усилителя на основе иттербия в режиме стабилизации выходной мощности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные характеристики двухкаскадного ОУ на основе иттербиевого ОВ с двойной оболочкой

Параметр	Значение параметра
Коэффициент усиления G , дБ	до 62,5
Длины волн сигнала λ , нм	1030–1080
Уровень мощности входного сигнала, $P_{\text{вх}}$, дБм	-35 / -20 / -5
Мощность выходного сигнала $P_{\text{вых}}$, Вт	до 3,5
Шум-фактор NF , дБ	меньше 5
Эффективность преобразования мощности накачки, PCE , %	до 60,5

ПОУ на ОВ, легированном иттербием

В [13] предложена схема и конструкция ОУ на основе иттербия для использования в качестве ПОУ. В ОУ использовано специально разработанное YDF, имеющее конструкцию с кольцевым легированием (оболочка была частично легирована ионами Yb) и малым диаметром сердцевины и оболочки 10 и 80 мкм, соответственно, для получения низкой выходной мощности при использовании в качестве ПОУ (таблица 4). На рисунке 16 показана эффективность преобразования сигнала накачки в выходной сигнал ПОУ.

Таблица 4. Параметры ПОУ YDFA

Параметр	Значение параметра
Мощность накачки, Вт	менее 10
Мощность входного сигнала, мВт	менее 1
Мощность выходного сигнала, Вт	0,1–1
Энергетическая эффективность накачки, PCE , %	11,5

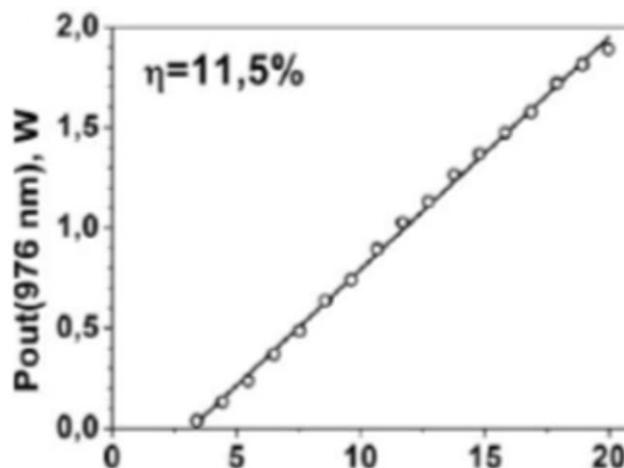


Рис. 16. Эффективность преобразования сигнала накачки в выходной сигнал, измеренная в режиме насыщения

Заключение

Основываясь на изложенном, сформулируем преимущества перехода на более короткие длины волн и использование YDFA по сравнению с EDFA для космической связи.

Во-первых, использование для межспутниковой оптической связи диапазона длин волн 1030–1080 нм вместо 1520–1560 нм позволяет увеличить дальность связи при тех же габаритах передающих и приемных антенн за счет меньшей расходимости лучей или уменьшить габариты антенн при той же дальности.

Во-вторых, использование YDFA по сравнению с EDFA позволяет обеспечить более широкую полосу усиления оптических сигналов, за счет чего можно уменьшить взаимные помехи при одном и том же количестве каналов или увеличить количество сигналов.

В-третьих, использование YDF с увеличенным диаметром сердцевины и двойной оболочкой по сравнению со стандартным EDF позволяет значительно увеличить не только выходную мощность YDFA, но и дальность связи между космическими аппаратами.

Литература

1. Дмитриев В. И. Системы спутниковой подвижной связи // Космическая связь: прошлое, настоящее, будущее: Материалы Четвертых научных чтений памяти А. С. Попова, посвященных Дню радио – празднику работников всех отраслей связи (Санкт-Петербург, 6 мая 2011 г.). СПб.: Центральный музей связи им. А. С. Попова, 2011. 128 с.
2. Hemmati H. Near-Earth Laser Communications // Near-Earth Laser Communications. CRC press, 2020. 453 p.
3. Романов А. А., Романов А. А. Основы космических информационных систем: учебное пособие. М.: ИКИ РАН; МФТИ, 2019. 292 с.
4. Kaushal H., Kaddoum G. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 19. Iss. 1. P. 57–96. DOI: 10.1109/COMST.2016.2603518. EDN: USFFPW
5. Alharbi A. G., Kanwal F., Ghafoor S., Habib N.; Kanwal B. et al. Performance Optimization of Holmium Doped Fiber Amplifiers for Optical Communication Applications in 2–2.15 μm Wavelength Range // Photonics. 2022. Vol. 9. Iss. 4 (245). DOI: 10.3390/photonics9040245. EDN: TORLVN
6. Albalawi A., Zhu H., Taccheo S., Chiasera A., Ferrari M. et al. Numerical Modeling of the Impact of Pump Wavelength on Yb-Doped Fiber Amplifier Performance // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. Iss. 11. PP. 1–7. DOI: 10.1007/s11082-016-0771-z. EDN: DAPYDN
7. Zervas N. M. High Power Ytterbium-Doped Fiber Lasers-Fundamentals and Applications // International Journal of Modern Physics B. 2014. Vol. 28. Iss. 12. PP. 1442009–1442044. DOI: 10.1142/S0217979214420090. EDN: SOQEMP
8. Paschotta R., Nilsson J., Tropper A. C., Hanna D. C. Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1997. Vol. 33. Iss. 7. PP. 1049–1056. DOI: 10.1109/3.594865

9. Pask H. M., Carman R. J., Hanna D. C., Tropper A. C., Mackechnie C. J. et al. Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1–1.2 μm Region // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1995. Vol. 1. Iss. 1. PP. 2–13. DOI: 10.1109/2944.468377

10. Mirza J., Ghafoor S., Armghan A., Elhamrawy O. I., Jamal L. et al. Performance Enhancement of Ytterbium-Doped Fiber Amplifier Employing a Dual-Stage In-Band Asymmetrical Pumping // Micromachines 2022. Vol. 13. Iss. 9. P. 1488. DOI: 10.3390/mi13091488. EDN: IUPIIU

11. Mukhtar S., Aliyu K. N., Qureshi K. K. Performance Evaluation of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Codoped Fiber Amplifier // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. Vol. 62. Iss. 6. PP. 2243–2247. DOI: 10.1002/mop.32320. EDN: ANLZZD

12. Tench R. E., Romano C., Delavaux J.-M. Shared Pump Two-Stage Polarization-Maintaining Holmium-Doped Fiber Amplifier // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. Vol. 31. Iss. 5. PP. 357–360. DOI: 10.1109/LPT.2019.2895786. EDN: CEDQKE

13. Aleshkina S. S., Lipatov D. S., Kotov L. V., Temyanko V. L., Likhachev M. E. All-fiber Single-mode PM Yb-Doped Pre-Amplifier at 0.976 μm // Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC, Munich, Germany, 23–27 June 2019). P. 8872593. DOI: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872593. EDN: ILPCFA

**Статья поступила 5 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 20 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.**

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторах

Глаголев Сергей Федорович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: glagolev.sergey@sut.ru

Гордийчук Ирина Михайловна — студент 2-го курса магистратуры (группа ИКТФ-36м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: gordiichuk.im@sut.ru

Optical Amplifiers on Ytterbium Fiber for Space Communication Systems

S. Glagolev✉, I. Gordiychuk

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Statement of the problem. *The implementation of optical communication between Earth-orbiting satellites, as part of a global communication network, presents an important and relevant challenge. One of the tasks that must be addressed in this context is the transition from the 1.55 μm wavelength, which is successfully used in terrestrial and underwater fiber-optic communication systems, to shorter wavelengths. This paper, following the justification of this primary task, explores a specific challenge related to the practical realization of an optical amplifier for space communication systems. The amplifier design selected utilizes ytterbium-doped optical fiber as the active amplifying medium. **The objective of this study** is to investigate the ytterbium-based optical amplifier, its design, and construction features for its application as a power amplifier and a pre-amplifier in space communication systems. **The novelty** of this work lies in the proposed research methodology and the analytical results regarding the configurations of both two-stage power optical amplifiers and single-stage pre-optical amplifiers. **Results:** The outcome of the research includes practical recommendations for research methodologies pertaining to ytterbium fiber-based optical amplifiers. **Practical significance:** The findings can be utilized by developers of optical amplifiers, as well as in the educational process within the Department of Optical and Quantum Communication Systems at the SPbSUT.*

Key words: *space communication, ytterbium-based fiber optic amplifier*

Information about Authors

Glagolev Sergey — Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: glagolev.sergey@sut.ru

Gordiychuk Irina — 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: gordiichuk.im@sut.ru

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 004.021

Моделирование информационных процессов в инфокоммуникационных системах

Иванов Н. А., Киселёв Д. И., Сотников А. Д. ✉

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Разработка сложных прикладных инфокоммуникационных систем требует эффективного использования таких ресурсов, как вычислительная мощность, пропускная способность, функциональность. **Постановка задачи:** адаптировать доменную модель инфокоммуникаций для адекватного представления информационных процессов в инфокоммуникационных системах. Конкретная **цель работы:** предложить формализованный способ количественного описания информационных процессов. **Метод** решения основан на использовании графовой модели информационных потоков в системе. **Элементы новизны** заключаются в использовании доменной модели, позволяющей формулировать количественные оценки процессов для постановки и последующего решения задач оптимизации инфокоммуникационных систем. В **результате** разработан и апробирован алгоритм и программная реализация, а также использована нейронная сеть для формирования в составе инфокоммуникационной системы информационных потоков с заданными свойствами.*

Ключевые слова: инфокоммуникации, информационные системы, информационные потоки, доменная модель инфокоммуникаций, граф, матрица смежности, нейросеть

Введение

Проектирование современных инфокоммуникационных систем (ИКС) связано с распределением ресурсов между компонентами системы. Такими ресурсами могут быть логические элементы микросхемы или функциональные узлы специализированного устройства, вычислительные ресурсы или пропускная способность узла ИКС. Подобные задачи встречаются как на аппаратном, так и на программно-алгоритмическом уровне ИКС. Еще более комплексной подобная задача становится при разработке сложных систем, включающих в себя относительно автономные подсистемы. Примером подобной задачи является поиск предпочтительной локализации узлов при организации «облачных» или «туманных» сервисов. В каждом из упомянутых случаев предлагаются конкретные решения в большей или меньшей степени удовлетворяющие разработчика.

При всем разнообразии формулировок и итоговых решений задачи проектирования ИКС обладают принципиальным общим свойством. Они связаны с информационными процессами, а точнее, с множественной реализацией совокупности элементарных актов информационного взаимодействия [1, 2], включающего как минимум двух участников, осуществляющих функции генерации и утилизации данных конкретного информационного потока. В реальных системах между источником и приемником

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов Н. А., Киселёв Д. И., Сотников А. Д. Моделирование информационных процессов в инфокоммуникационных системах // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 3. EDN: ZZAEYN

Reference for citation:

Ivanov N., Kiselyov D., Sotnikov A. Modeling of Information Processes in Infocommunication Systems // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 3. EDN: ZZAEYN

располагается собственно ИКС (в узком понимании термина), реализующая традиционные функции – обработку, хранение, транспортировку, представление данных. Теоретическое описание информационного процесса дает доменная модель инфокоммуникаций (ДМИ) [3] – дескриптивная модель, описывающая три домена – физический, информационный и когнитивный, в которых реализуется информационное взаимодействие участников. Формально ДМИ может быть представлена выражением, описывающим элементарный акт информационного взаимодействия:

$$\langle\langle A_n \rangle^{\xi A_n} \rangle^{\xi C_m} \xrightarrow{Q_{22}^{C_m C_k}} \langle\langle A_n \rangle^{\xi A_n} \rangle^{\xi C_k}, \quad (1)$$

где: A_n – объект когнитивного или физического домена; C_m – объект информационного домена; ξA_n – тезаурус (множество возможных состояний объекта); Q – операции преобразования тезаурусов при перемещении элементов информационного потока между доменами или подсистемами.

Графическая иллюстрация информационного взаимодействия в ДМИ представлена на рисунке 1. Расширение выражения (1) для большего количества элементарных взаимодействий и формирование их последовательностей представляет высокоуровневое описание информационных процессов в произвольной информационной системе (ИС) независимо от ее области применения и целевого назначения, функционального состава и архитектуры.

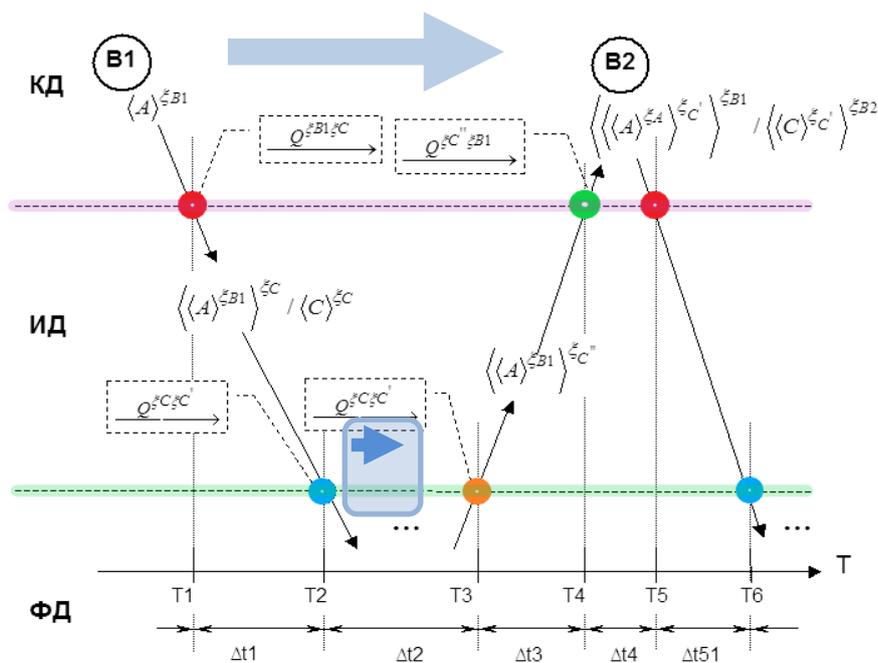


Рис. 1. Элементарный акт информационного взаимодействия

Постановка задачи

ИКС произвольного назначения, структуры и функционального состава может быть адекватно представлена совокупностью своих информационных потоков (ИП), генерируемых на ее входах и утилизируемых на ее выходах. В этом случае ее формальным представлением выступает неориентированный граф $G(V, E)$, $V \neq 0$, вершины которого соответствуют точкам генерации, преобразования и утилизации ИП. В случае важности направлений ИП может использоваться ориентированный граф. Двоичный граф $v_i = \{0, 1\}$ будет представлять ИС, если значимым для анализа является только наличие ИП между ее входами и выходами. Если представляют интерес различные характеристики системы, соответствующие элементам графа, то вершинам или дугам могут быть поставлены в соответствие веса, например, нормированные для удобства обработки значения производительности (пропускной способности и т. п.) модуля, соответствующего вершине графа. Таким образом, для ИС граф выступает ее математической

моделью, а матрица смежности – вычислительной моделью для анализа характеристик с целью оптимального размещения ресурсов ИС и повышения эффективности обработки ИП.

Метод решения

Эквивалентные преобразования матрицы смежности графа заключаются в перестановке строк и столбцов, позволяющей сгруппировать ненулевые элементы и генерирующей новые варианты «структур» ИС, в которых реализуются иные варианты размещения ресурсов, обладающие иными характеристиками (рисунок 2). Сформированная в результате перестановок компактная группа единичных элементов соответствует группе функций ИС, которые могут быть реализованы в рамках одного модуля.

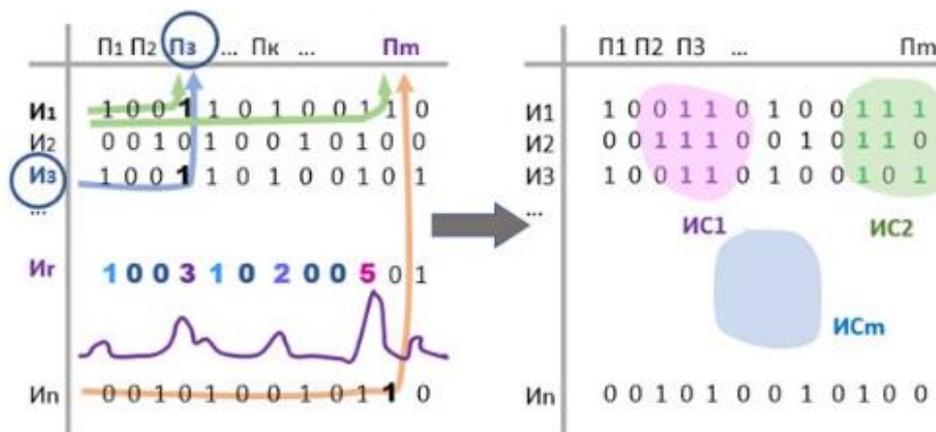


Рис. 2. Принцип генерации новых «структур» ИС

Компоновка потоков путем перестановки строк/столбцов матрицы с целью более «плотной» группировки единичных значений, отображающих потоки, и «концентрация» их в определенных областях матрицы, сопоставленных с компонентами ИС, обрабатывающими эти потоки, позволяет выделить связанные элементы (или целые подсистемы) и улучшить «архитектурные» характеристики системы [1]. При такой формализации возможна корректная формулировка задач оптимизации, при которой выполняется максимизация плотности единичных элементов, что соответствует концентрации информационных потоков в отдельных подсистемах и оценке, например, суммарного объема данных, передаваемого в подсистеме в единицу времени (строка с выделенными цветом элементами на рисунке 2) [3], что в свою очередь позволяет оценивать распределение потребности в ресурсах для различных информационных потоков в рамках ИС. Кроме того, становится возможным определение «узких мест» в структуре ИС.

Выбор критериев оптимальности получаемых результатов существенным образом зависит от «природы» моделируемой ИС и целевых характеристик рассматриваемой системы. На данном этапе рассматривается упрощенный критерий, учитывающий относительную плотность единичных элементов матрицы смежности графа ИС в локальной области заданного размера:

$$(N_1/N) > M, \quad N_1 = \sum_{v=1} (v),$$

где N_1 – количество единичных элементов матрицы смежности; N – общее количество элементов; M – заданная величина «плотности единичных элементов» в заданной области.

В качестве метода нахождения лучшей конфигурации компонентов ИС предлагается следующая процедура, состоящая из четырех этапов.

Этап 1. Построение графа эквивалентного ИС, включающее определение входов и выходов информационных потоков. Выполняется на основе структурно функциональных схем, диаграмм потоков

данных, бизнес-процессов, UML-диаграмм (аббр. от англ. Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования) или иных доступных описаний ИС.

Этап 2. Нумерация входов и выходов ИП, построение матрицы смежности модельного графа. Проверка ацикличности графа.

Этап 3. Последовательные преобразования матрицы смежности путем перестановки строк и столбцов с проверкой выполнения требований критерия «плотности единичных элементов». На данном этапе могут быть использованы различные программные инструменты, включая нейронные сети (инструменты искусственного интеллекта). Учитывая ограниченность задачи, целочисленный тип данных и доступные вычислительные ресурсы, эффективным может оказаться решение на основе полного перебора вариантов.

Этап 4. Формирование выходных отчетов, включающее улучшенные варианты конфигураций.

Эксперимент

Проверка предложенного подхода выполнена проведением ряда экспериментов для упрощенной графовой модели произвольной ИС, состоящей из 100 элементов. Для упрощения расчетов и сопоставимости результатов выбрана квадратная матрица (10×10), что соответствует 10 входам и 10 выходам с максимальным возможным числом нециклических информационных процессов $R = C n m$, которое является очевидно завышенным. Рассматривались варианты со случайным распределением единичных элементов и тестовые с типовыми заполнениями.

Разработаны алгоритмы и программы на языке Python и в среде Wolfram Mathematica (WM), а также с использованием нейронной сети DeepSeek. Ниже приведен фрагмент программы WM, позволяющий находить группы единиц вокруг каждого единичного узла в блоках размером 3×3 элемента:

```

=====
maxgr{A_?MatrixQ} := Block{{f, spisok, pos, group, max, number},
max = Length[A];
group{{i_Integer, j_Integer}} := Count{Flatten{
  A{{Max{i - 1, 1} ;; Min{i + 1, max},
    Max{j - 1, 1} ;; Min{j + 1, max}}}}, 1};
f = If{#1 == 1, #2, Nothing} &;
spisok = Flatten{MapIndexed{f, A, {2}}, 1};
number = group /@ spisok;
pos = PositionLargest{number};
{Max{number}, spisok{{pos}}} }
=====

```

Примеры результатов преобразований матрицы смежности (10×10) для тестового графа приведены на рисунке 3.

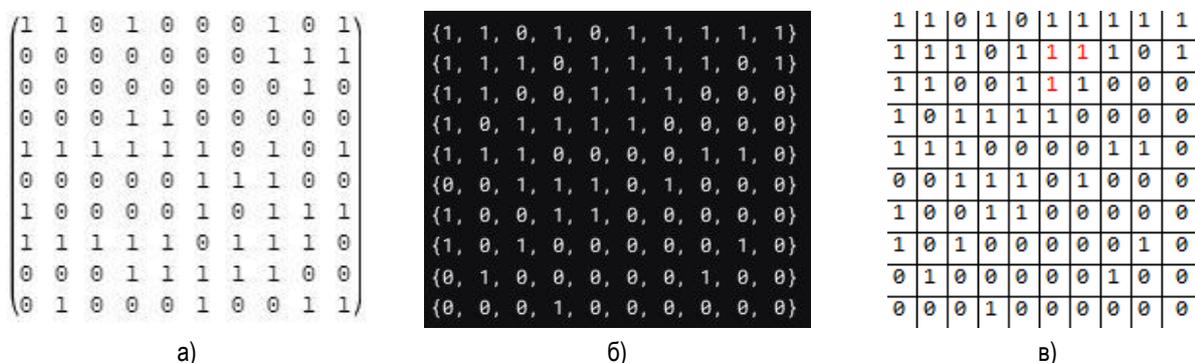


Рис. 3 Примеры результатов преобразований матрицы смежности: а) исходная; б) итоговая (DeepSeek); в) итоговая (WM)

В экспериментах с нейросетью DeepSeek был выбран метод решения «жадный алгоритм» (Greedy Algorithm), который на каждом шаге делает локально наилучший выбор в надежде, что итоговое решение

будет оптимальным. В таблице 1 представлены плотности исходной и итоговой преобразованной матриц. В новой матрице, в каждой из ее четвертей, появились две группы с плотностью более 0,5 по сравнению с исходной, в которой была только одна.

Таблица 1. Сравнение «плотности» матриц

Исходная матрица	Итоговая матрица
$10/25 = 0,4$	$17/25 = 0,68$
$9/25 = 0,36$	$14/25 = 0,56$
$9/25 = 0,36$	$10/25 = 0,4$
$16/25 = 0,64$	$3/25 = 0,12$

Эксперимент продемонстрировал положительный результат, состоящий в формировании групп единичных элементов с большей плотностью по сравнению с исходной матрицей, что соответствует формированию новых вариантов ИС с лучшими реализационными параметрами – в данном случае с группировкой информационных потоков, их «уплотнением» и, в итоге, большей производительностью. Эксперимент не выявил преимуществ разработанных алгоритмов преобразования или использования нейронной сети ввиду сравнительно малого размера матриц (10×10). При анализе реальных прикладных ИС, возможно, будут выявлены преимущества одного или другого варианта преобразования. Есть вероятность, что приемлемым с точки зрения использования вычислительных ресурсов окажется и алгоритм полного перебора, который обеспечит гарантировано оптимальный вариант.

Выводы

Доменная модель инфокоммуникаций позволяет описывать информационные процессы и строить количественные модели, обеспечивающие улучшение характеристик прикладных информационных систем. Рассмотренный метод представления и преобразования информационных потоков на основе графовых и матричных моделей является независимым от специфических свойств и характеристик прикладных ИС, что делает его универсальным и эффективным инструментом анализа и проектирования. Предложенные программные решения и использование нейронных сетей делают метод пригодным для разнообразных ИС различного назначения и масштаба.

Литература

1. Сотников А. Д. Инфокоммуникации. Информационное взаимодействие и модели телемедицинских систем. М.: Судостроение, 2008. 172 с. EDN: SDXAFP
2. Sotnikov A. D. Applied Infocommunication Systems and their Models for Healthcare // Proceedings of IEEE EUROCON 2009 (St. Petersburg, Russia, 18–23 May 2009). St. Petersburg, 2009. PP. 1668–1675. DOI: 10.1109/EURCON.2009.5167867. EDN: RHNCJV
3. Соломко Ю. С., Сотников А. Д. Использование методологии описания информационных процессов в магистерской подготовке // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 1. EDN: XZCVJM

Статья поступила 7 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 6 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторах

Иванов Никита Андреевич – студент 2-го курса магистратуры (группа БИ-31м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Киселёв Данил Ильич – студент 2-го курса магистратуры (группа БИ-31м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Сотников Александр Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, доцент кафедры экономики данных факультета социальных технологий и экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: adsotnikov@sut.ru

Modeling of Information Processes in Infocommunication Systems

N. Ivanov, D. Kiselyov, A. Sotnikov✉

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*The development of complex applied infocommunication systems requires the efficient use of such resources as computing power, bandwidth, and functionality. **Statement of the problem:** to adapt the domain model of infocommunications for adequate representation of information processes in infocommunication systems. **Specific objective of the work:** to propose a formalized method for quantitative description of information processes. Used **method** is based on a graph model of information flows in the system. **Elements of novelty** consist in the use of a domain model that allows formulating quantitative assessments of processes for setting and subsequent solving problems of optimization of infocommunication systems. **Result:** an algorithm and software implementation were developed and tested, and a neural network was used to form information flows with specified properties as part of the infocommunication system.*

Key words: infocommunications, information systems, information flows, domain model of infocommunications, graph, adjacency matrix, neuronet

Information about Authors

Ivanov Nikita – 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Kiselev Danil – 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Sotnikov Alexander – Advanced Doctor in Technical Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of Data Economics of the Faculty of Social Technologies and Data Economics (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: adsotnikov@sut.ru

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 621.396.99

Использование фильтра Калмана с ограничениями в целях уменьшения чувствительности приемной адаптивной фазированной антенной решетки к углу прихода

Щедрин А. А.✉, Бойко И. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка проблемы. При разработке приемных адаптивных фазированных антенных решеток использование пространственной избирательности, т. е. априорных данных о пространственных координатах источника сигнала в алгоритме адаптации является более выигрышным по сравнению с использованием информации о форме сигнала в условиях нестатичного канала связи. Одной из главных проблем, влияющих на надежный прием сигнала, является несоответствие предполагаемого угла прихода сигнала реальному. Данная проблема становится еще более острой в условиях, когда направление прихода полезного сигнала меняется во времени. В данной статье рассмотрен метод уменьшения чувствительности приемной адаптивной фазированной антенной решетки к рассогласованию предполагаемого и реального направления источника сигнала. **Результаты:** рассмотрена модификация пространственно-избирательного алгоритма MVDR (аббр. от англ. Minimum Variance Distortionless Response – минимальная дисперсия без искажений), обеспечивающего адаптацию диаграммы направленности приемной адаптивной фазированной антенной решетки с целью повышения отношения сигнал / шум. Использование расширенного фильтра Калмана для поиска оптимальной оценки вектора весовых коэффициентов, являющейся компромиссным вариантом между векторами весовых коэффициентов, образующими главный лепесток диаграммы направленности в предполагаемом и реальном направлениях источника сигнала, позволило повысить отношение сигнал / шум на выходе малоэлементной антенной решетки не менее чем на 20 дБ по сравнению с входным сигналом в условиях отклонения предполагаемого угла прихода от реального в диапазоне $\pm 10^\circ$ в азимутальной плоскости и при уровне шума 10 дБ по сравнению с сигналом. **Практическая значимость:** использование данной модификации алгоритма MVDR целесообразно при разработке пространственно-избирательных малоэлементных приемных антенных решеток при условии высокой погрешности определения угла прихода полезного сигнала и наличия большой вычислительной мощности адаптивного устройства.

Ключевые слова: фильтр Калмана с ограничениями, адаптивная антенная решетка, уменьшение чувствительности к углу прихода, диаграммообразование с целью уменьшения помех, адаптивная фазированная антенная решетка с пространственной избирательностью

Библиографическая ссылка на статью:

Щедрин А. А., Бойко И. А. Использование фильтра Калмана с ограничениями в целях уменьшения чувствительности приемной адаптивной фазированной антенной решетки к углу прихода // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 4. EDN: ENPYXH

Reference for citation:

Schedrin A., Boyko I. Using a Kalman Filter with Constraints to Reduce the Sensitivity of the Receiving Active Phased Array Antenna to the Angle // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 4. EDN: ENPYXH

Введение

Одной из главных проблем приемных адаптивных фазированных антенных решеток (АФАР) с пространственной избирательностью, влияющих на надежный прием сигнала при условии подавления помех, является несоответствие предполагаемого угла прихода сигнала реальному [1, 2]. Данное отклонение может быть вызвано различными причинами, такими как погрешность локационного оборудования, высокая скорость изменения направления прихода сигнала и т. п. Даже небольшое несоответствие реального направления прихода сигнала предполагаемому приводит к расположению главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в нежелательном направлении, что, в свою очередь, приводит либо к полному подавлению сигнала, либо к серьезному уменьшению отношения сигнал / шум (ОСШ) [3].

В данной статье рассмотрен метод понижения чувствительности АФАР к углу прихода сигнала на основе расширенного фильтра Калмана с ограничениями, включенными в уравнение измерения.

Описание метода

Рассмотрим линейную M -элементную антенную решетку, выходной сигнал которой на итерации k можно представить как:

$$y_k = \mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_k,$$

где \mathbf{x}_k – вектор $M \times 1$ наблюдений АФАР, представляющий собой полное возбуждение, пришедшее на элементы $1 \dots M$ решетки; \mathbf{w}_k – вектор $M \times 1$ весовых коэффициентов АФАР.

Вектор наблюдения \mathbf{x}_k можно записать в виде:

$$\mathbf{x}_k = s_k \cdot \mathbf{l} + \mathbf{u}_k + \mathbf{n}_k,$$

где s_k – полезный сигнал; \mathbf{l} – вектор $M \times 1$ направления прихода полезного сигнала; \mathbf{u}_k и \mathbf{n}_k – векторы $M \times 1$ помех и шума, соответственно.

Предполагается, что полезный сигнал и помехи не коррелированы и стационарны. Минимизация мощности помех и шума при сохранении приема полезного сигнала без искажений реализована в алгоритме MVDR [3]. Задача диаграммообразования в MVDR задается формулой:

$$\min_W \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \text{ при условии, если } \mathbf{w}^H \mathbf{d} = 1, \quad (1)$$

где \mathbf{R}_{xx} – корреляционная матрица принимаемого сигнала \mathbf{x}_k $M \times M$; \mathbf{d} – предполагаемый вектор прихода полезного сигнала.

Решение задачи диаграммообразования MVDR (1) приводится в [4]:

$$\mathbf{w}_{\text{опт}} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{d}}{\mathbf{d}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{d}}. \quad (2)$$

Отклонение предполагаемого вектора направления прихода полезного сигнала \mathbf{d} от реального \mathbf{l} может привести к подавлению полезного сигнала вместо помех. В ряде случаев данное отклонение можно ограничить какой-либо известной константой $\varepsilon > 1$.

Следовательно, для уменьшения чувствительности АФАР к углу прихода при использовании алгоритма MVDR необходимо реализовать минимизацию выходной мощности при сохранении приема сигнала со всех направлений диапазона $[\mathbf{d} - \varepsilon : \mathbf{d} + \varepsilon]$. Таким образом, ограничение (2) приобретает вид:

$$\min_W \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \text{ при условии, если } |\mathbf{w}^H \mathbf{c}| \geq 1 \quad (3)$$

для всех $\mathbf{c} \in [\mathbf{d} - \varepsilon : \mathbf{d} + \varepsilon]$.

Рассмотрим среднеквадратическое отклонение (СКО) между нулевым и выходным сигналом:

$$\text{СКО} = E[0 - (\mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_k)^2] = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w}.$$

В то же время ограничение $|\mathbf{w}^H \mathbf{c}| \geq 1$ может быть выражено как:

$$J_2(\mathbf{w}_k) = 1,$$

где $J_2(\mathbf{w}_k) = \varepsilon^2 \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k - \mathbf{w}_k^H \mathbf{d} \mathbf{d}^H \mathbf{w}_k + \mathbf{w}_k^H \mathbf{d} + \mathbf{d}^H \mathbf{w}_k$.

Следовательно, формула (3) примет вид:

$$\min_{\mathbf{w}} \text{СКО при условии, если } J_2(\mathbf{w}_k) = 1.$$

Для решения данной задачи воспользуемся алгоритмом фильтрации Калмана. Неизвестная динамическая система может быть смоделирована как фильтр, вектор состояния которого подвергается марковскому процессу первого порядка, т. е.:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \psi \mathbf{w}_k + \mathbf{n}_{pk},$$

где ψ – фиксированный параметр модели; \mathbf{n}_{pk} – шум процесса, который предполагается белым гауссовым с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей:

$$\mathbf{Q} = \delta_n^2 \mathbf{I},$$

где \mathbf{I} – единичная матрица $M \times M$; δ_n^2 – дисперсия шума процесса.

Тогда уравнение измерения можно представить как:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_k \\ J_2(\mathbf{w}_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{1k} \\ \mathbf{N}_{2k} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где \mathbf{N}_{1k} и \mathbf{N}_{2k} – остаточные и ограничительные ошибки, соответственно; они также предполагаются белыми гауссовыми с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \delta_1^2 & 0 \\ 0 & \delta_2^2 \end{bmatrix}.$$

Для получения рекуррентной формулы нахождения вектора \mathbf{w}_k используется расширенный фильтр Калмана второго порядка [5]. Вычислим Якобиан $\mathbf{J}_{\mathbf{w}}(k, \mathbf{w}_k)$ Гесса первой \mathbf{H}_1 и второй \mathbf{H}_2 размерностью $M \times M$ строк уравнения (4):

$$\mathbf{J}_{\mathbf{w}}(k, \mathbf{w}_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^H \\ \varepsilon^2 \mathbf{w}_k^H - (\mathbf{d} \mathbf{d}^H \mathbf{w}_k)^H + \mathbf{d}^H \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_1 = 0, \mathbf{H}_2 = \varepsilon^2 \mathbf{I} - \mathbf{d} \mathbf{d}^H.$$

Обновление оценки вектора весовых коэффициентов происходит следующим образом:

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k-1} + \mathbf{G}_k[\mathbf{z} - \mathbf{z}_0(k|k-1)],$$

где оценочное измерение $\mathbf{z}_0(k|k-1)$ и коэффициент Калмана \mathbf{G}_k $M \times 1$ задаются как:

$$\mathbf{z}_0(k|k-1) = \begin{bmatrix} \Psi \mathbf{x}_k^H \mathbf{w}_{k-1} \\ J_2(\Psi \mathbf{w}_{k-1}) + \frac{1}{2} \text{tr}\{\mathbf{H}_2 \mathbf{P}(k|k-1)\} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{J}_W(k, \Psi \mathbf{w}_{k-1}) \mathbf{S}_k^{-1},$$

где ковариационная матрица \mathbf{S}_k 2×2 и оценочная ковариационная матрица вектора весовых коэффициентов $\mathbf{P}(k|k-1)$ $M \times M$ представляются как:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k &= \mathbf{J}_W(k, \Psi \mathbf{w}_{k-1}) \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{J}_W^H(k, \Psi \mathbf{w}_{k-1}) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \times \text{tr}\{\mathbf{H}_2 \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{H}_2\} + \mathbf{R}, \\ \mathbf{P}(k|k-1) &= \Psi^2 \mathbf{P}(k-1|k-1) + \mathbf{Q}. \end{aligned}$$

Ковариационная матрица вектора весовых коэффициентов обновляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k|k) &= \{\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \mathbf{J}_W(k, \Psi \mathbf{w}_{k-1})\} \mathbf{P}(k|k-1) \times \\ &\quad \times \{\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \mathbf{J}_W(k, \Psi \mathbf{w}_{k-1})\}^H + \mathbf{G}_k \mathbf{R} \mathbf{G}_k^H. \end{aligned}$$

Результаты моделирования АФАР

В ходе исследований была смоделирована восьмиэлементная линейная АФАР, а также три варианта алгоритма работы: без алгоритма адаптации, на основе алгоритма MVDR с ограничением равенства и на основе алгоритма MVDR с использованием фильтра Калмана. Значение ψ было выбрано равным 1, что обеспечивает стабильность работы фильтра при условии, что помеховая обстановка стационарна.

Значения $\delta_{\text{п}}$, δ_1 и δ_2 были выбраны равными 10^{-2} , 1 и 10^{-6} , соответственно. При всех измерениях реальный угол прихода сигнала был выбран равным 10° в азимутальной плоскости, уровень приходящего шума был выбран равным 10 дБ относительно полезного сигнала. На основании модели был проведен анализ уменьшения чувствительности алгоритма MVDR к отклонению угла прихода при использовании фильтра Калмана.

Как видно из рисунка 1, при появлении отклонения реального угла прихода сигнала от предполагаемого главный лепесток ДН АФАР, использующей Калмановский алгоритм, устремляется в промежуточное значение, не полагаясь полностью на предполагаемый угол. Это, в свою очередь, позволяет сохранить форму сигнала в отличие от алгоритма MVDR, основанного на ограничении равенства (рисунки 2), при относительном выигрыше ОСШ в сравнении с АФАР без пространственной фильтрации в 20 дБ (рисунки 3).

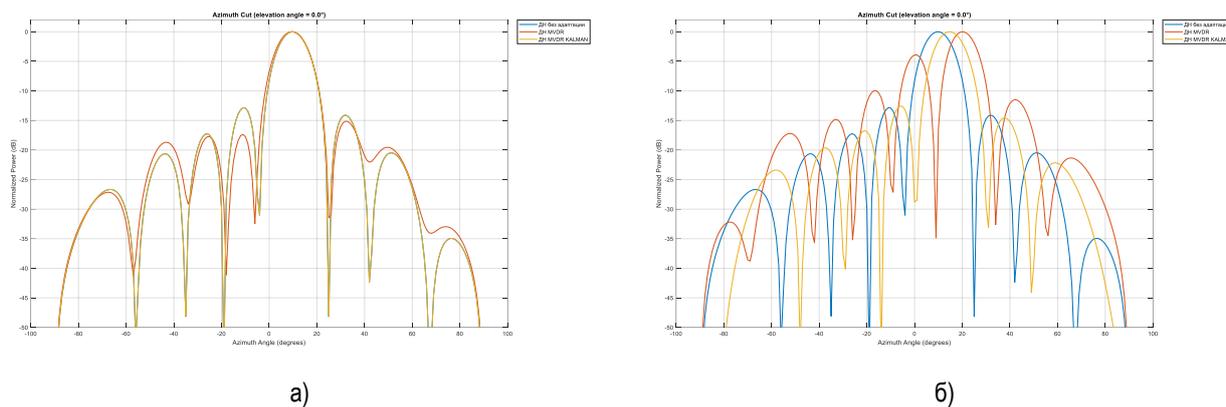


Рис. 1. ДН: а) при отсутствии отклонения; б) при наличии отклонения 10°

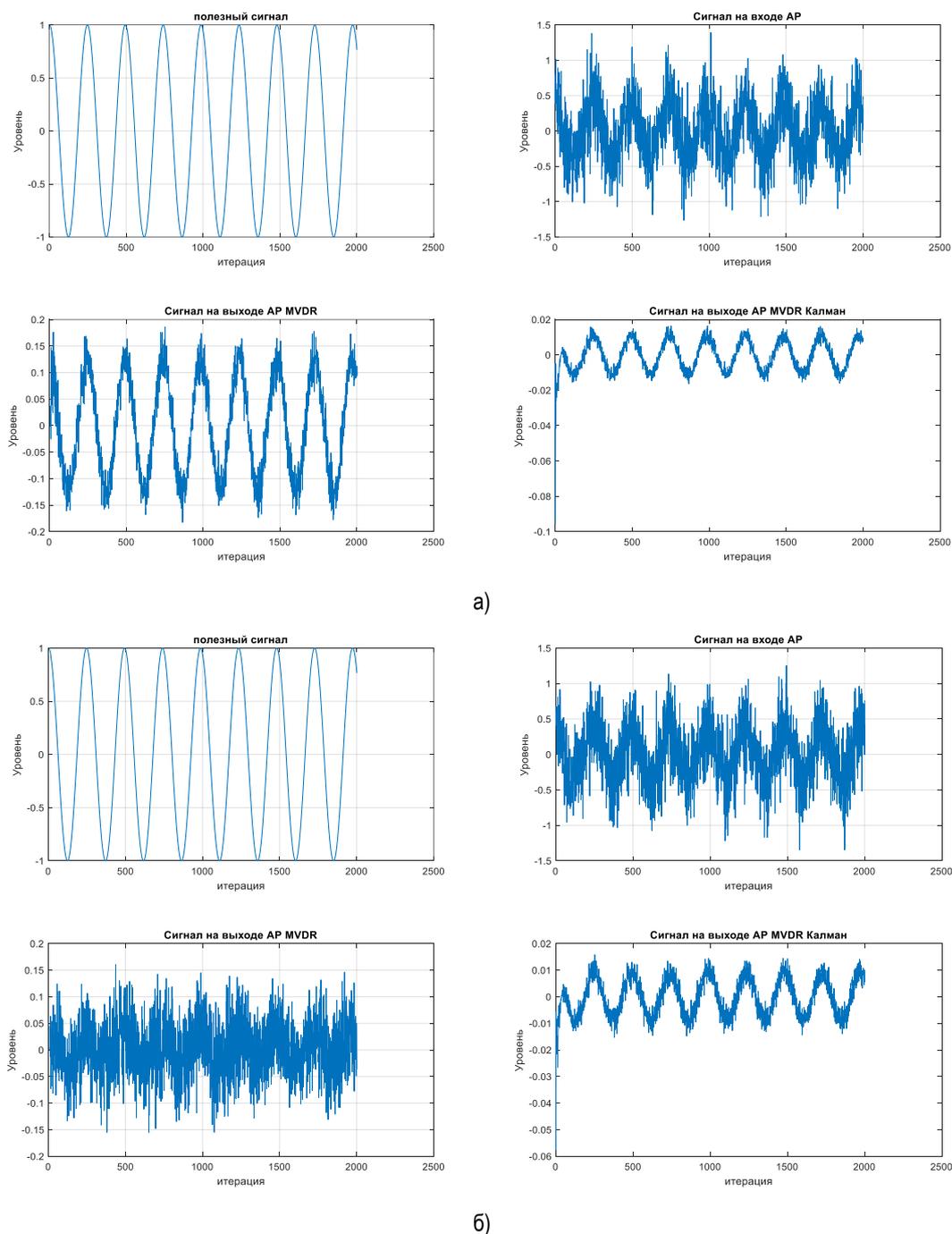


Рис. 2. Формы сигналов: а) при отсутствии отклонения; б) при наличии отклонения 10°

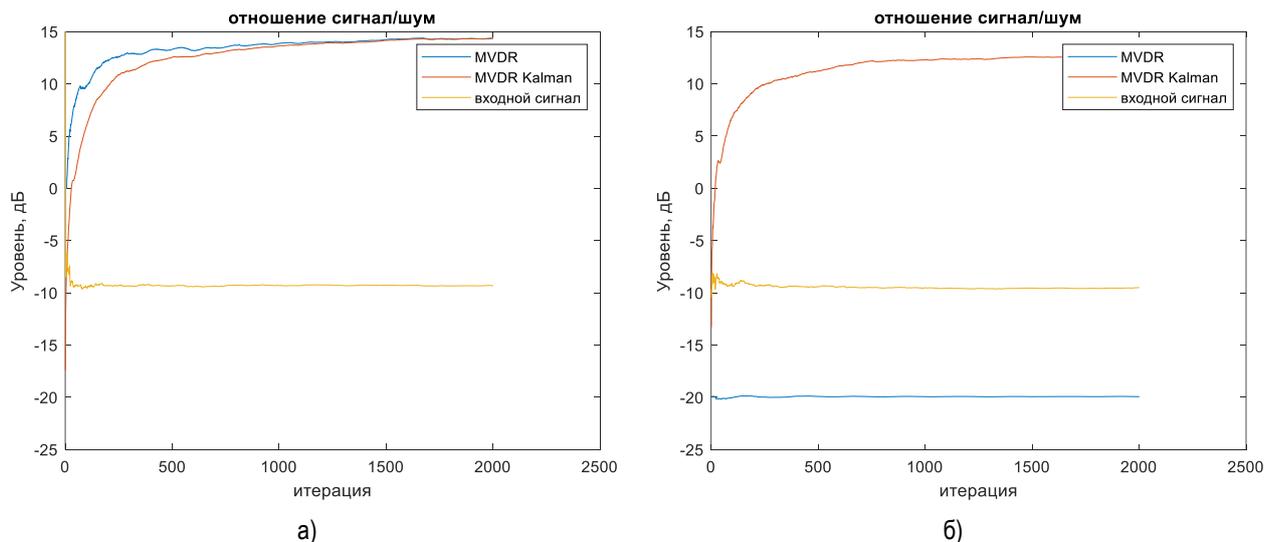


Рис. 3. ОСШ: а) при отсутствии отклонения; б) при наличии отклонения 10°

Как показано на рисунке 4, для восьмиэлементной решетки допустимым можно считать угол отклонения вплоть до 10° . Далее значения ОСШ начинают стремительно снижаться.

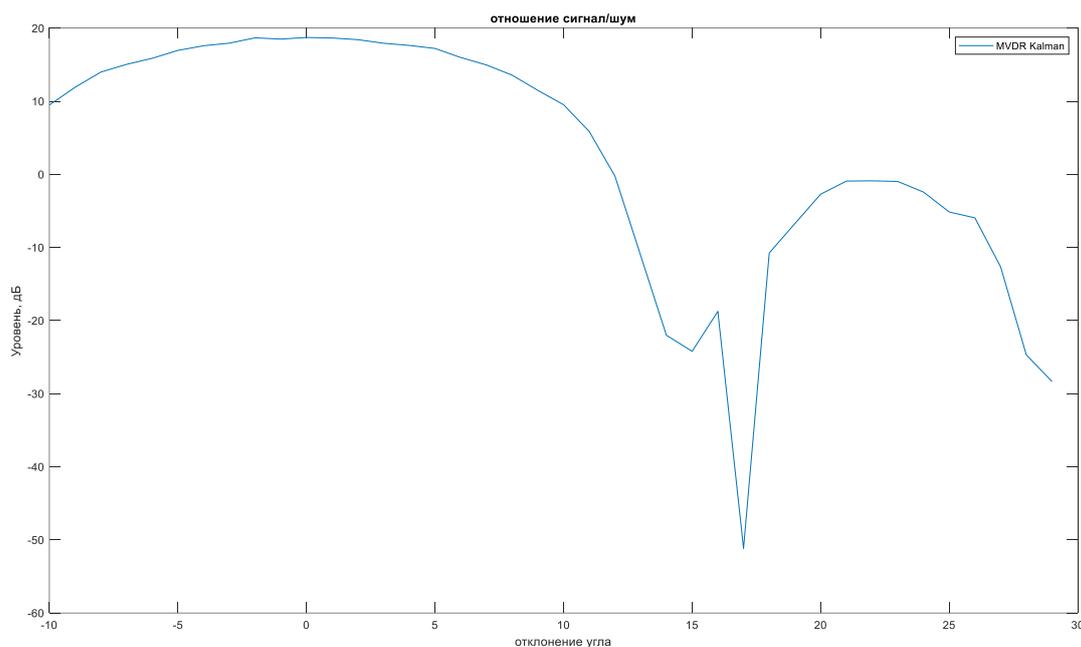


Рис. 4. ОСШ при различном значении отклонения

Заключение

В данной работе рассмотрен метод уменьшения чувствительности АФАР к отклонению угла прихода с помощью расширенного фильтра Калмана. Выявлено, что алгоритм MVDR при введении ограничения неравенства на уровень выходного шума и решения задачи MVDR фильтром Калмана способен функционировать при существенном отклонении угла прихода сигнала, в то время как отклонения уже в $1-2^\circ$ при введении ограничения равенства приводят к подавлению полезного сигнала. Было показано, что данный метод при условии понижения чувствительности к углу прихода способен давать выигрыш в ОСШ относительно АФАР без пространственной фильтрации в 20 дБ в диапазоне рассогласования углов вплоть до $\pm 10^\circ$.

Результаты исследований показывают эффективность использования принципов Калмановской фильтрации для уменьшения чувствительности приемной АФАР к отклонению предполагаемого угла прихода от реального, в связи с чем перспективным является модификация алгоритма MVDR с использованием менее требовательного к вычислительным мощностям и более устойчивого к нестационарным средам сигма-точечного фильтра Калмана.

Литература

1. Kim J. W., Un C. K. An Adaptive Array Robust to Beam Pointing Error // IEEE Transactions on Signal Processing. 1992. Vol. 40. Iss. 6. PP. 1582–1584. DOI: 10.1109/78.139266
2. Vorobyov S. A., Gershman A. B., Luo Z. Q. Robust Adaptive Beamforming Using Worst-Case Performance Optimization: A Solution to the Signal Mismatch Problem // IEEE Transactions on Signal Processing. 2003. Vol. 51. Iss. 2. PP. 313–324. DOI: 10.1109/TSP.2002.806865
3. Hua Y., Gershman A. B., Cheng Q. Robustness Issues in Adaptive Beamforming and High-Resolution Direction Finding // High-Resolution and Robust Signal Processing / Ed. by Yingbo Hua, Alex Gershman, Qi Cheng. New York: Marcel Dekker, 2003. PP. 63–110. DOI: 10.1201/9781315214689
4. Monzingo R. A., Miller T. W. Introduction to Adaptive Arrays. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980. 543 p.
5. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 545 p.

Статья поступила 11 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 21 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторах

Щедрин Александр Алексеевич – студент 2-го курса магистратуры (группа РТ-31м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: shedrin.aa@sut.ru

Бойко Игорь Андреевич – ассистент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: boiko.ia@sut.ru

Using a Kalman Filter with Constraints to Reduce the Sensitivity of the Receiving Active Phased Array Antenna to the Angle

A. Schedrin✉, I. Boyko

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem Statement: In the development of adaptive phased array antennas, the use of spatial selectivity, i. e., a priori data on the spatial coordinates of the signal source in the adaptation algorithm, proves to be more advantageous compared to utilizing information about the shape of the signal in non-static communication channels. One of the main problems affecting reliable signal reception is the mismatch between the expected angle of arrival of the signal and the actual angle. This issue becomes even more critical in conditions where the direction of the incoming useful signal changes over time. This article discusses a method to reduce the sensitivity of the adaptive phased array antenna to the mismatch between the expected and actual direction of the signal source. **Results:** A modification of the spatially selective MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) algorithm is considered, which ensures the adaptation of the antenna pattern of the adaptive phased array to enhance the signal-to-noise ratio. The use of an extended Kalman filter for finding the optimal estimate of the weight vector, serving as a compromise between weight vectors forming the main lobe of the antenna pattern in both the expected and actual directions of the signal source, allowed for an improvement in the signal-to-noise ratio at the output of the small-element antenna array by at least 20 dB compared to the input signal, despite having an expected angle of arrival deviating from the real one within a range of $\pm 10^\circ$ in the azimuth plane, and at a noise level of 10 dB compared to the signal. **Practical significance:** The use of this modification of the MVDR algorithm is justified in the development of spatially selective small-element receiving antenna arrays in cases of high inaccuracies in estimating the angle of arrival of the useful signal and the availability of substantial computational power in the adaptive device.

Key words: Kalman filter with constraints, adaptive antenna array, reduction of sensitivity to the angle of arrival, diagram formation to reduce interference, phased array with spatial selectivity

Information about Authors

Schedrin Alexander — 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: shedrin.aa@sut.ru

Boyko Igor — Assistant of the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: boiko.ia@sut.ru

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 621.391.63

**Сравнение эффективности компенсации хроматической дисперсии
в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон
и волоконных брегговских решеток**

Кубинская М. М.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка проблемы. Нескомпенсированная хроматическая дисперсия приводит к искажению передаваемых сигналов и ограничивает дальность и пропускную способность волоконно-оптических систем связи. **Цель работы:** определить критерии для выбора оптимального метода компенсации хроматической дисперсии при практическом проектировании волоконно-оптических систем связи с энергетическим приемом. **Используемые методы:** исследования проводились методом имитационного моделирования в программе OptiSystem; рассмотрено использование специальных волокон и применение чирпированных волоконных брегговских решеток для компенсации хроматической дисперсии. **Результаты:** на базе предложенного метода проведен анализ преимуществ и недостатков использования специальных волокон и применения чирпированных волоконных брегговских решеток. Рассмотрены такие параметры, как эффективность компенсации, вносимые оптические потери, стоимость и технологические особенности реализации.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы связи, хроматическая дисперсия, компенсация хроматической дисперсии, чирпинг, одномодовые оптические волокна, специальные волокна для компенсации хроматической дисперсии, волоконные брегговские решетки

Введение

Одной из ключевых проблем при проектировании высокоскоростных волоконно-оптических систем связи (ВОСС) является хроматическая дисперсия (ХД) в одномодовых оптических волокнах (ОВ). Данная работа посвящена сравнительному анализу эффективности двух методов компенсации ХД: 1) использование специальных волокон DCF (аббр. от англ. Double-Clad Fiber – оптическое волокно с двойным покрытием) с отрицательной дисперсией и 2) применение чирпированных волоконных брегговских решеток (FBG, аббр. от англ. Fiber Bragg Gratings.).

Первая часть данной статьи посвящена углубленному теоретическому рассмотрению и имитационному моделированию в программе OptiSystem (OptiSystem User Guide and Reference Manual. Optical Communication System Design Software. Version 19. Optiwave Systems Inc. 2022) процессов компенсации ХД в одномодовых ОВ с помощью специальных волокон DCF. Во второй части теоретически и с помощью моделирования рассматриваются физические процессы компенсации ХД в одномодовых

Библиографическая ссылка на статью:

Кубинская М. М. Сравнение эффективности компенсации хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон и волоконных брегговских решеток // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 5. EDN: WCLKDC

Reference for citation:

Kubinskaya M. Comparison of the Efficiency of Chromatic Dispersion Compensation in Single-Mode Optical Fibers Using Dispersion Compensating Fibers and Fiber Bragg Gratings // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 5. EDN: WCLKDC

ОВ с использованием FBG, а также проводится всестороннее сравнение методов компенсации ХД с помощью DCF и FBG. В качестве основных критериев сравнения будут использованы Q-фактор и потери в компенсирующем устройстве.

Распространение сигналов в одномодовых ОВ. Параметры волокон. Межсимвольная интерференция

Одномодовое ОВ является одним из основных элементов современных цифровых ВОСС большой протяженности. Его основными параметрами, влияющими на качество связи, являются зависимости коэффициентов затухания $\alpha(\lambda)$ и ХД $D_x(\lambda)$, которые зависят от длины волны λ [1].

Рассмотрим влияние $\alpha(\lambda)$ и $D_x(\lambda)$ на прохождение спектрально ограниченного гауссовского импульса с пиковой мощностью P_{0m} и канонической полушириной T_0 . Зависимость мощности импульса на входе в одномодовое ОВ от времени t можно описать следующим образом [1]:

$$P_0(t) = P_{0m} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2}\right).$$

Полагая, что форма импульса на выходе одномодового ОВ остается гауссовской [2], запишем выражение для зависимости мощности импульса от расстояния z вдоль одномодового ОВ и внутриимпульсного времени T [1]:

$$(z, T) = P_{0m} \cdot \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2 \cdot [1 + (z/L_D)^2]}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (z/L_D)^2}} \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (1)$$

где $T = t - z \cdot n_g/c$ – внутриимпульсное время, отсчитываемое от вершины оптического гауссовского импульса на расстоянии z ; c – скорость света в вакууме; n_g – групповой показатель преломления сердцевины одномодового ОВ; $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ – дисперсионная длина одномодового ОВ; $\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2 \cdot D_x}{2\pi \cdot c}$ – дисперсия групповых скоростей; λ_0 – длина волны излучения источника в вакууме.

Из выражения (1) следует, что полуширина выходного гауссовского импульса определяется дисперсионной длиной одномодового ОВ:

$$T_{0L} = T_0 \cdot \sqrt{1 + (z/L_D)^2}.$$

Из того же выражения следует, что ХД вносит дополнительное затухание сигнала в $1/\sqrt{1 + (z/L_D)^2}$ раз. Во столько же раз возрастает и длительность выходного импульса.

Для величины дисперсионного расширения спектрально ограниченного гауссовского импульса можно также использовать следующее выражение [1]:

$$\Delta\tau(z) = |D_x| \cdot \Delta\lambda \cdot z.$$

Отметим, что в одномодовых ОВ в одноканальной ВОСС даже при отсутствии нелинейных искажений сигналов в волокне возникает межсимвольная интерференция, т. е. суммирование напряженностей электрического поля E в световых волнах соседних импульсов. Зависимость E от z и t становится очень сложной и практически непредсказуемой. Отметим, что зависимость интенсивности излучения I , которая пропорциональна E^2 , от z и t проявляется еще сильнее. В многоканальных ВОСС интерференция оптических импульсов разных каналов с разными несущими частотами становится очень сложной.

Однако компенсация ХД в одномодовых ОВ позволяет разделить в одноканальной ВОСС отдельные импульсы, а в многоканальной – импульсы разных каналов после их демультимплексирования.

Компенсация ХД с помощью DCF

Компенсация ХД на усилительном участке (УУ) ВОСС основана на последовательном включении телекоммуникационного ОБ длиной L и DCF длиной L_c [1]. Задачами проектировщика ВОСС являются: выбор типа и определение длины L_c DCF для полной или частичной (оптимальной) компенсации ХД в одномодовых ОБ в диапазоне рабочих длин волн ВОСС. При оптимальной частичной компенсации удается повысить качество связи (увеличить Q-фактор), но при этом происходит некоторое расширение импульса ΔT на выходе УУ [1–3].

В работах [1–3] показано, что для полной компенсации ХД выбранное DCF должно удовлетворять условию:

$$RDS = S_x/D_x = S_{xc}/D_{xc}, \quad (2)$$

где D_x и D_{xc} – коэффициенты ХД, а S_x и S_{xc} – наклоны дисперсионных характеристик для телекоммуникационного ОБ и DCF.

Кроме того, знаки коэффициентов ХД и наклонов дисперсионных характеристик для телекоммуникационного ОБ и DCF должны быть противоположными. Для большинства одномодовых ОБ, включая телекоммуникационные ОБ и DCF, зависимость $D_x(\lambda)$, для любой длины волны λ можно аппроксимировать следующим выражением [1–3]:

$$D_x(\lambda) = D_x(\lambda_0) + S_x(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0), \quad (3)$$

где λ_0 – референсная длина волны, для которой известны значения $D_x(\lambda_0)$ и $S_x(\lambda_0)$. Обычно $\lambda_0 = 1550$ нм.

Учитывая (2) и (3), запишем выражение для остаточного (допустимого) расширения импульса на выходе УУ:

$$\Delta T = |[D_x(\lambda_0) + S_x(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)] \cdot L + [D_{xc}(\lambda_0) + S_{xc}(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)] \cdot L_c| \cdot \Delta\lambda, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda = \Delta\nu \cdot \lambda^2/c$ – максимальная ширина спектра канального оптического сигнала с несущей длиной волны λ , которая в системах с DWDM (*аббр. от англ. Dense Wavelength-Division Multiplexing* – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны) определяется частотным интервалом между каналами $\Delta\nu$.

Полагая $\Delta T = 0$, исходя из (4) и с учетом (2) определим длину компенсирующего одномодового ОБ, необходимую для полной компенсации ХД на средней длине волны λ используемого в ВОСС диапазона длин волн [1–3]:

$$L_c = -\frac{[D_x(\lambda_0) + S_x(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)] \cdot L}{[D_{xc}(\lambda_0) + S_{xc}(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)]}. \quad (5)$$

Моделирование процессов компенсации ХД с применением DCF

На рисунке 1 показана схема моделирования в программе OptiSystem процессов посткомпенсации ХД в одномодовом ВОСС с помощью DCF. Передатчик ВОСС содержит генератор информационной битовой последовательности (Bit Sequence Generator) со скоростью $B = 10$ Гбит/с, оптический генератор гауссовских импульсов (Gaussian Pulse Generator) с длиной волны $\lambda_0 = 1550$ нм и оптический фильтр Баттерворта с полосой $\Delta\nu_f = 40$ ГГц. Волоконно-оптический линейный тракт содержит стандартное одномодовое ОБ (SF, *аббр. от англ. Standart Fiber*) длиной L и DCF длиной L_c для полной или частичной компенсации ХД. В приемнике Rx используется p-i-n фотодиод.

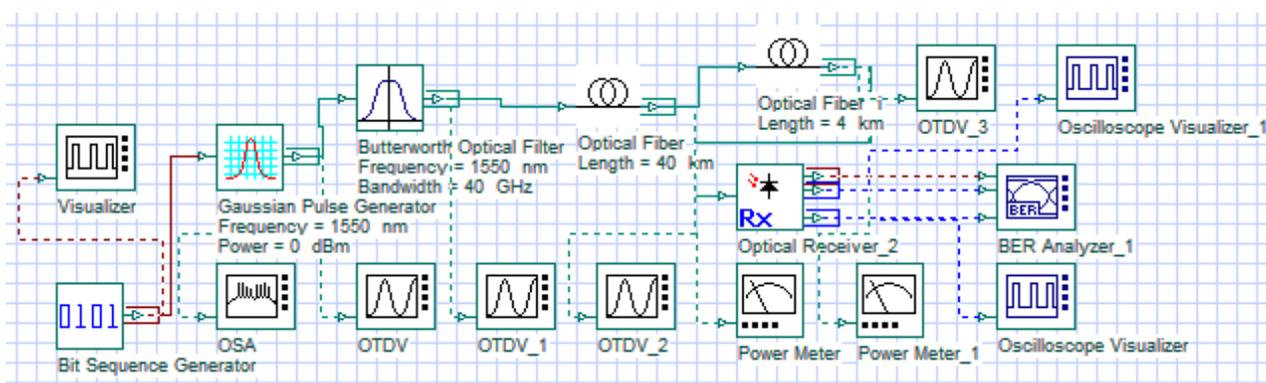


Рис. 1. Схема ВОСС для исследования посткомпенсации ХД

Для контроля и измерения используются следующие приборы: оптические анализаторы спектра (OSA), оптические осциллографы (OTDV) и измерители мощности (Power Meter), а также электрические осциллографы (Oscilloscope Visualizer) и анализатор битовых ошибок (BER Analyzer).

В процессе исследований изменялись длины телекоммуникационного ОВ L и DCF L_c . Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования процессов компенсации ХД с применением DCF

Установленные величины		Измеренные величины			
L , км	L_c , км	P_m , мкВт	t_u , бит	α_c , дБ	Q-фактор
40	4	90	0,26	1,6	18,0
60	6	30	0,26	2,4	6,0
80	8	39	0,26	3,2	8,1
80	7	34	0,36	2,8	8,2
80	6	25	0,50	2,4	8,8
80	5	20	0,68	2,0	8,4

В первых строках таблицы приведены результаты для полной компенсации ХД при длинах SF 40, 60 и 80 км. Видно, что расширения выходного гауссовского импульса при этом не наблюдалось. Для SF длиной 80 км уменьшение длины DCF может несколько повысить Q-фактор, но выходной импульс при этом расширяется.

Использование FBG для компенсации ХД в одномодовых ОВ является альтернативой применению DCF.

Остаточная ХД в телекоммуникационном ОВ

Прежде чем рассматривать принцип компенсации ХД в одномодовых ОВ с помощью FBG, вернемся к известному выражению для расширения оптических импульсов $\Delta\tau$ за счет ХД [2, 3]:

$$\Delta\tau = |D_x| \cdot L \cdot \Delta\lambda, \quad (6)$$

где D_x – коэффициент ХД; L – длина телекоммуникационного ОВ; $\Delta\lambda$ – ширина спектра сигнала.

Величину $\Delta\tau$ можно трактовать как изменение задержки оптических сигналов, отличающихся по длине волны от среднего значения λ_0 на $\pm \frac{\Delta\lambda}{2}$. Изменение задержки обусловлено различием в групповых скоростях для излучений с различными длинами волн и возрастает с увеличением длины L одномодового ОВ.

Используя выражение (6), определим понятие остаточной ХД, которое характеризует дисперсионные свойства конкретного одномодового ОВ длиной L :

$$DL = D_x \cdot L. \quad (7)$$

Остаточная ХД имеет размерность пс/нм. Определим максимальную ширину спектра $\Delta\lambda$ одноканального сигнала DWDM со средней частотой λ_0 , ограниченную межканальным интервалом по частоте $\Delta\nu$ для используемой ВОСС:

$$\Delta\lambda = \Delta\nu \cdot \lambda_0^2 / c.$$

Далее будем использовать понятие остаточной дисперсии для FBG.

Моделирование процессов компенсации ХД с помощью модуля FBG-DCM

Простейшая FBG представляет собой одномодовое ОВ длиной λ_{FBG} , у которого зависимость группового показателя преломления (ГПП) сердцевинки $n_g(z)$ от расстояния является периодической функцией [3]:

$$n_g(z) = n_{g0} \cdot \left(1 + \Delta n \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\Lambda_0} z\right) \right),$$

где n_{g0} – средний ГПП сердцевинки ОВ; Δn – глубина модуляции ГПП; Λ_0 – шаг (период) FBG.

Рассмотренная FBG имеет резонансную брегговскую длину волны излучения λ_{FBG} , которое при достаточной длине λ_{FBG} практически полностью отражается от решетки [3]:

$$\lambda_{FBG} = 2 \cdot n_{g0} \cdot \Lambda_0.$$

Для компенсации ХД используется модуль FBG-DCM, схема включения которого приведена на рисунке 2 [3]. Модуль состоит из chirпированной FBG, т. е. решетки с переменным шагом, и оптического трехпортового циркулятора. На порт 1 поступает излучение сигнала, искаженного действием ХД (расширенный импульс), которое циркулятор направляет по часовой стрелке через порт 2 в FBG. Отраженный от FBG сигнал, свободный от искажений за счет ХД, выходит через порт 3.



Рис. 2. Схема включения FBG-DCM

Для компенсации ХД используют линейно chirпированные FBG, у которых период Λ линейно меняется с изменением расстояния z от $-\frac{L_{FBG}}{2}$ до $+\frac{L_{FBG}}{2}$ вдоль ОВ [3]:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \Delta \cdot (z - L_{FBG}/2) / L_{FBG},$$

где $\Delta = \Delta\lambda / (2 \cdot n_g)$ – chirп FBG.

Дисперсионные свойства модуля FBG-DCM обусловлены тем, что свет с разными длинами волн отражается от разных участков chirпированной решетки. Знак дисперсии FBG-DCM зависит от того, каким концом решетки подключена к циркулятору. При компенсации положительной ХД длинноволновая часть решетки располагается ближе к циркулятору. Таким образом, FBG-DCM может компенсировать ХД с любым знаком коэффициента ХД D_x .

Для выполнения функции компенсации ХД в одномодовых ОВ FBG должна обладать такой же остаточной ХД, но с противоположным знаком. Запишем выражение для разности групповых запаздываний $\Delta\tau$ излучения, отраженного от начала и конца FBG длиной λ_{FBG} :

$$\Delta\tau = 2 \cdot n_g \cdot L_{FBG} / c = (\Delta\tau / L_{FBG}) \cdot L_{FBG} = (2 \cdot n_g / c) \cdot L_{FBG}. \quad (8)$$

Используя (6) и (8), определим остаточную дисперсию для FBG с линейным чирпингом:

$$DL_{FBG} = (\Delta\tau / \Delta\lambda) = (\Delta\tau / L_{FBG}) \cdot L_{FBG} / \Delta\lambda = (2 \cdot n_g / c) \cdot L_{FBG} / \Delta\lambda. \quad (9)$$

Приравнявая выражения (7) и (9), определим необходимую длину FBG для компенсации ХД в одномодовом ОВ длиной L :

$$L_{FBG} = (2 \cdot n_g / c) / \Delta\lambda = D_x \cdot L \cdot \Delta\lambda \cdot c / (2 \cdot n_g).$$

На рисунке 3 показана схема моделирования в программе OptiSystem процессов посткомпенсации ХД в ВОСС с помощью модуля FBG-DCF. За исключением типа компенсатора ХД она аналогична представленной на рисунке 1.

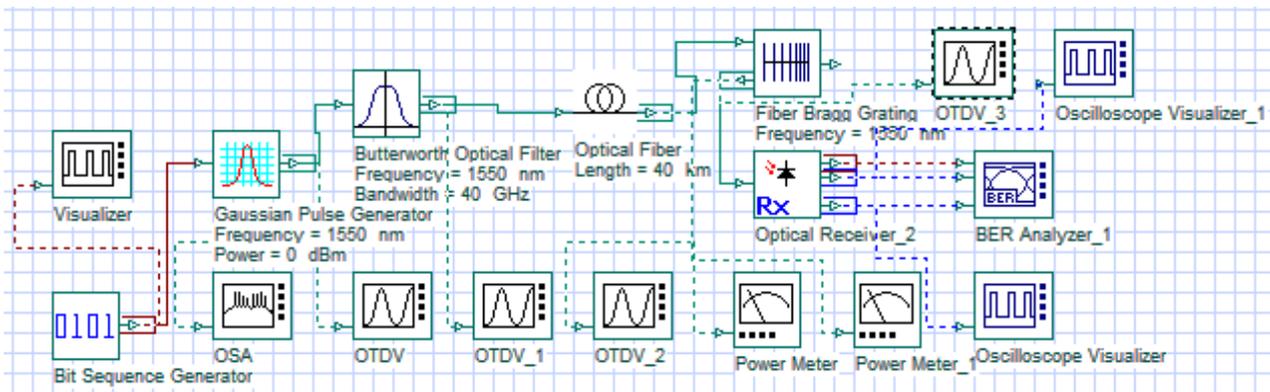
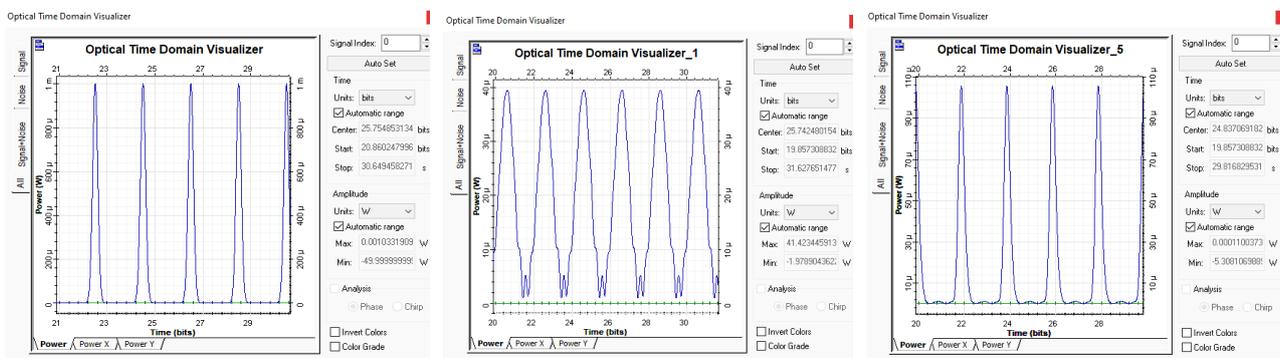


Рис. 3. Схема ВОСС для исследования компенсации ХД в ОВ с помощью FBG-DCF

Исходные данные ВОСС для моделирования: $\lambda_0 = 1550$ нм; $\Delta\nu = 50$ ГГц; $\Delta\lambda = 0,4$ нм; $L = 40$ км; $D_x = 16,75$ пс/(нм·км); $DL = 670$ пс/нм. Результаты расчетов параметров FBG по формулам (2–6): $\Lambda_0 = 0,534$ мкм; $\Delta = 0,138$ нм и $\lambda_{FBG} = 28$ мм.

На рисунке 4 показаны сигналы на входе и выходе одномодового ОВ, а также на выходе FBG-DCF. Другие результаты исследований приведены в таблице 2.



а) б) в)
Рис. 4. Сигналы на входе (а) и выходе одномодового ОВ (б); на выходе FBG-DCF (в)

Таблица 2. Результаты моделирования процессов компенсации ХД с помощью FBG-DCF

Установленные величины				Измеренные величины			
L , км	L_{FBG} , мм	Δ , нм	DL , пс/нм	P_m , мкВт	t_u , бит	a_{FBG} , дБ	Q-фактор
40	28	0,138	670	106	0,30	0,40	23
40	28	0,150	670	110	0,29	0,36	22
40	28	0,165	670	102	0,28	0,67	23

Из таблицы 2 видно, что рассчитанное значение чирпинга $\Delta = 0,138$ нм не обеспечивает оптимальную компенсацию ХД. Увеличение чирпинга FBG до $\Delta = 0,15$ нм позволяет уменьшить потери в решетке до минимума $a_{FBG} = 0,36$ дБ, а увеличение чирпинга до $\Delta = 0,165$ нм позволяет уменьшить длительность импульса до $t_u = 0,28$ бит.

Выводы

Проведенное в работе исследование двух методов компенсации ХД в одномодовых ОВ – с использованием 1) специальных волокон с отрицательной дисперсией (DCF) и 2) чирпированных волоконных брегговских решеток (FBG) – позволило сделать ряд важных выводов:

Во-первых, компенсация с применением FBG-DCM обеспечивает меньшие дополнительные потери.

Во-вторых, компенсация с DCF значительно эффективнее и пригодна для использования в более широком диапазоне длин волн.

В-третьих, целесообразным представляется продолжение исследований для многоканальных ВОСС с DWDM.

Литература

1. Былина М. С., Глаголев С. Ф. Оптические волокна в телекоммуникациях: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2019. 108 с. EDN: PURHYU
2. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Дюбов А. С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приема цифровых информационных оптических сигналов. Часть 1. Энергетический прием // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 12–20. EDN: ZIWOIH
3. Трещикова В. Н., Листвин В. Н. DWDM системы. 4-е изд. М.: Техносфера, 2021. 420 с.

Статья поступила 14 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 18 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторе

Кубинская Мария Михайловна – студент 2-го курса магистратуры (группа ИКТФ-36м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Comparison of the Efficiency of Chromatic Dispersion Compensation in Single-Mode Optical Fibers Using Dispersion Compensating Fibers and Fiber Bragg Gratings

M. Kubinskaya

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. *Uncompensated chromatic dispersion leads to distortion of the transmitted signals and limits the range and bandwidth of fiber-optic communication systems. **Objective:** to determine the criteria for selecting the optimal method of chromatic dispersion compensation in the practical design of fiber-optic communication systems with power-based reception. **Methods Used.** The research was conducted using simulation modeling in the OptiSystem software. The use of specialty fibers and the application of chirped fiber Bragg gratings for chromatic dispersion compensation were investigated. **Results.** Based on the proposed method, an analysis of the advantages and disadvantages of using specialty fibers and applying chirped fiber Bragg gratings was conducted. Parameters such as compensation efficiency, insertion optical losses, cost, and technological implementation aspects were considered.*

Key words: *fiber-optic communication systems, chromatic dispersion and its compensation, chirping, single-mode optical fibers, special fibers for chromatic dispersion compensation, fiber Bragg gratings*

Information about Author

Kubinskaya Maria — 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 378.4

Научно-исследовательская деятельность студентов
как фактор профессиональной подготовки специалистов
для сферы рекламы и связей с общественностью

Герашенко Л. И., Кульназарова А. В. ✉

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Учет требований рынка к качеству подготовки специалиста становится сегодня важным фактором успешного функционирования образовательного учреждения. Развитие научно-исследовательской деятельности студентов решает несколько задач: способствует личностному развитию, формирует востребованные практикой профессиональные качества выпускника вуза, повышает рейтинг учебного заведения среди работодателей. **Целью работы** является выявление роли научно-исследовательской деятельности студентов, обучающихся по направлению 42.03.01 «Реклама и связи с общественностью», в формировании профессионально востребованных качеств. **Используемые методы:** для получения первичной социологической информации был применен метод структурированного наблюдения за участниками студенческой научно-практической конференции в рамках XXV Международного Балтийского коммуникационного форума «Глобальные и региональные коммуникации: настоящее и будущее». Методы анализа и синтеза использовались, соответственно, при эмпирической интерпретации основных понятий темы для обоснования элементов наблюдения и при обобщении полученных результатов и формулировке выводов. **Элементы новизны:** в качестве инструмента исследования был применен метод структурированного наблюдения. **Результат:** выявлен уровень сформированности базовых навыков в подготовке докладов и выступлениях студентов. Установлена зависимость уровня владения навыками аналитической работы от курса обучения студентов. **Теоретическая / Практическая значимость работы:** в научном плане проведенное исследование показывает возможности использования метода наблюдения для выявления исследовательских навыков студентов. Полученные результаты могут служить основой для совершенствования работы по формированию профессионально востребованных навыков у выпускников вуза.

Ключевые слова: научно-исследовательская работа, профессиональные компетенции, исследовательские навыки, структурированное наблюдение

Актуальность исследования

В современной системе высшей школы научно-исследовательская деятельность студентов становится неотъемлемой функционально значимой частью образовательного процесса. Вовлечение сту-

Библиографическая ссылка на статью:

Герашенко Л. И., Кульназарова А. В. Научно-исследовательская деятельность студентов как фактор профессиональной подготовки специалистов для сферы рекламы и связей с общественностью // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 6. EDN: SKIHNN

Reference for citation:

Gerashchenko L., Kulnazarova A. Research Activity of Students as a Factor of Professional Training of Specialists for the Field of Advertising and Public Relations // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 6. EDN: SKIHNN

дентов в исследовательскую деятельность отвечает потребностям рынка в специалистах, готовых работать в быстро меняющихся условиях, способствует профессиональному самоопределению студентов, развитию их личностных качеств, повышению самооценки, поднимает рейтинг учебного заведения.

Запрос со стороны практики на активных творческих специалистов, способных нестандартно мыслить, быстро и качественно выявлять возникающие в процессе профессиональной деятельности проблемы и находить оптимальные пути их решения, ставит перед вузами задачу научить студентов «видеть свою область знаний и профессиональную деятельность глазами исследователя» [1].

В этой связи в научно-образовательной среде сегодня активно ведется разработка эффективных способов организации научно-исследовательской работы студентов, выявляются и анализируются факторы, обсуждаются критерии оценки ее результативности, рассматриваются преимущества конкретных форм ее организации. Этому поиску способствует проведение эмпирических исследований. Анализ научных публикаций показывает, что данные исследования нацелены преимущественно на изучение мотивов участия (или неучастия) студентов в научной деятельности и выявление факторов, на это влияющих [2], а также на определение степени удовлетворенности студентов исследовательской работой [3]. Выявление характера сформированности исследовательских компетенций у студентов пока еще не является предметом пристального внимания ученых.

Анализ уровня сформированности профессиональных компетенций у студентов — достаточно сложная проблема для эмпирического изучения. Понимание ее требует комплексного подхода к организации научно-исследовательской деятельности и учета мнения всех заинтересованных в ее результатах сторон, на что указывают исследователи Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова [4]. Результаты проведенного ими анкетного опроса среди студентов, преподавателей и работодателей показывают эффективность такого подхода. Применение иных методов получения первичной информации с учетом конкретных форм ведения исследовательской деятельности позволит конкретизировать подобные изыскания.

Постановка задачи

В современном обществе работодатели предъявляют к специалистам в сфере рекламы и связей с общественностью (РСО) достаточно широкий круг требований как в профессиональном, так и в личностном плане. Сегодня на рынке востребован не столько экономист-менеджер, «с хорошими коммуникационными навыками», сколько организатор коммуникаций «с навыками творческой и исследовательской работы» [5].

Анализируя различные аспекты образования в сфере РСО, исследователи отмечают значимость методологической и методической подготовки студентов. Речь идет о культуре мышления, умении строить устную и письменную речь, способности находить, обобщать и анализировать информацию, ставить цели и выбирать оптимальные пути их достижения [6].

Формы реализации научно-исследовательской деятельности студентов в вузе достаточно многообразны. Это и грантовая, и проектная деятельность, и участие в различных конкурсах, и написание научных текстов и многое другое. По мнению некоторых ученых, наилучшей формой развития профессионально-исследовательских компетенций студента является научная конференция [7]. Участие в ее работе способствует повышению репутации обучающегося в студенческой и преподавательской среде, развивает навыки общения.

Студенческую конференцию, на наш взгляд, можно рассматривать как место трансляции имеющихся у студентов навыков, востребованных в будущей профессиональной деятельности. Для докладчиков это навыки выступления перед широкой аудиторией. Успешное выступление предполагает не только умение студента доступно в свободной форме излагать материал доклада, но и навыки написания текста — поиска, отбора и анализа необходимой информации, логики выстраивания текста, разработки визуального сопровождения (презентации) выступления. К значимым навыкам аудитории студенческой конференции можно отнести способность слушать и участвовать в обсуждении докладов. Изучение поведения участников конференции позволит получить представление о характере сформированности некоторых базовых исследовательских навыков студентов.

Методика исследования

С целью определения характера сформированности исследовательских навыков студентов по направлению подготовки 42.03.01 «Реклама и связи с общественностью» было проведено социологическое исследование методом структурированного наблюдения. Как метод сбора первичных эмпирических данных наблюдение предполагает непосредственное визуальное и/или слуховое восприятие событий, подвергающихся контролю и проверке.

Объектом наблюдения стали студенты – участники восьми секций студенческой научно-практической конференции, проводившейся в СПбГУТ в рамках работы XXV Международного Балтийского коммуникационного форума «Глобальные и региональные коммуникации: настоящее и будущее» (BAFO-2023) 1–2 декабря 2023 г. Программа Форума включала в себя научно-практическую конференцию преподавателей, аспирантов и магистрантов; студенческую научно-практическую конференцию; мастер-классы и тренинги по развитию профессиональных и гибких навыков; круглые столы на актуальные темы.

Предметом исследования стали базовые исследовательские навыки студентов, востребованные в рамках работы научно-практической конференции.

Инструментарий исследования состоял из четырех отдельных карточек фиксации результатов наблюдения:

- 1) общая характеристика работы секции;
- 2) характеристики докладчика;
- 3) содержательные характеристики доклада;
- 4) активность аудитории.

В качестве основных элементов в описании общей характеристики работы секции были определены: название; продолжительность работы; установленное время на выступление с докладом; количество докладчиков согласно программе конференции; количество студентов, выступивших с докладами; максимальное и минимальное количество студентов, присутствующих на секции.

В характеристике докладчика наиболее значимыми для задач нашего исследования были обозначены две позиции: курс обучения и способ трансляции доклада. Акцент в оценке последнего был сделан на необходимых для будущих специалистов в сфере РСО навыках подачи информации – наличии презентации и свободном владении материалом.

Основные позиции в оценке содержательных характеристик доклада определялись через наличие в нем самостоятельной аналитической работы – теоретических обобщений, анализа статистики, результатов эмпирических исследований.

Активность аудитории определялась через такие показатели, как общее количество студентов, участвовавших в обсуждении докладов, и количество студентов, участвовавших в обсуждении более чем трех докладов.

Общая характеристика работы секции. Работа студенческой конференции велась по 11 научным направлениям. На шести из них обсуждались проблемы, возникающие в сфере РСО (таблица 1). По этим направлениям было подано 166 заявок на участие. Наибольшее количество заявок было подано по направлениям «Интернет-продвижение: технологии, кейсы» и «PR-коммуникации в бизнесе» – 27,8 % и 20,4 %, соответственно. В силу большого количества участников работа каждого из указанных исследовательских направлений была разделена на две секции.

С докладами на конференции выступили 100 человек, что составило 60,2 % от общего числа заявок на участие. Более высокий уровень присутствия докладчиков наблюдался в секциях «Тенденции развития медиасферы и журналистики» (73,7 %) и «Реклама и маркетинговые коммуникации в условиях кризиса» (73,3 %).

Продолжительность работы секций, в зависимости от количества участников и характера обсуждения докладов, составляла от двух до четырех часов. Установленное время для выступления с докладом – 7–10 минут. Численный состав аудитории секций постоянно менялся. Наибольшее число участников практически по всем направлениям было зафиксировано в начале работы секций. Совокупно максимальная численность аудитории составила 101 человек, а к концу работы секции она уменьшилась до 60.

Таблица 1. Численность участников по направлениям работы секций

№ секции	Направление	Количество участников по секциям согласно программе конференции		Количество студентов, выступивших с докладами на секции	
		Всего, чел.	Доля от общего количества заявок, %	Всего, чел.	Доля от числа подавших заявки на секцию, %
1.1, 1.2	PR-коммуникации в бизнесе	34	20,5	21	61,8
2	Реклама и маркетинговые коммуникации в условиях кризиса	15	9,0	11	73,3
3.1, 3.2	Интернет-продвижение: технологии, кейсы	46	27,7	27	58,7
4	Перспективы социального PR в современном мире	26	15,7	14	53,8
5	Тенденции развития медиасферы и журналистики	19	11,4	14	73,7
6	Социально-психологические аспекты PR и рекламы	26	15,7	13	50,0
Итого:		166	100	100	60,2

Основные характеристики докладчиков. Среди выступавших преобладали студенты выпускного курса (39 %), второкурсники и третьекурсники составили, соответственно, 21 и 22 %, а студенты 1-го курса – 18 %. Практически все из них владели навыками предоставления информации – презентациями сопровождалась 98 % докладов. Однако, как показали результаты наблюдения, полное владение материалом, погружение в проблему и свободное ее изложение были характерны лишь для 71 % студентов. При этом наблюдалась вполне объяснимая зависимость увеличения численности таких студентов от курса обучения (таблица 2).

Таблица 2. Основные характеристики докладчиков

Курс обучения	Общее количество докладов	Наличие презентации в выступлениях		Свободное изложение материала	
		Количество докладов	Доля от общего количества докладов, %	Количество докладов	Доля от общего количества докладов, %
1-й	18	18	100	9	50,0
2-й	21	19	90,5	14	66,7
3-й	22	22	100	16	72,2
4-й	39	39	100	32	82,1
Итого:	100	98	98	71	71

Содержательные характеристики доклада. Наблюдателями было отмечено, что в 31 % случаев содержание выступлений носило чисто описательный характер, в них отсутствовали какие-либо результаты проделанной автором аналитической работы (таблица 3). Такие сообщения в большей степени были характерны для первокурсников (61,1 %) и менее всего – для студентов второго курса (19 %). Описательный характер содержания докладов был отмечен в четверти выступлений студентов выпускного курса (25,6 %) и немногим более этого (27,3 %) – у третьекурсников. Наличие совокупной и теоретической, и статистической аналитической работы наблюдалось в 49 % докладов. В 15 % выступлений присутствовали только теоретические обобщения, а в 5 % случаев был приведен статистический анализ без какого-либо теоретического осмысления.

Таблица 3. Характеристика содержания доклада по курсу обучения докладчиков

Курс обучения	Единицы измерения	Всего докладов	Доклады, содержащие:			Доклады без элементов исследовательского характера
			все виды обобщений (теоретические, статистические, эмпирические)	только теоретические обобщения	только эмпирические обобщения	
1-й	количество	18	3	4	0	11
	доля, %	100	16,7	22,2	0,0	61,1
2-й	количество	21	12	4	1	4
	доля, %	100	57,1	19,0	4,8	19,0
3-й	количество	22	10	4	2	6
	доля, %	100	45,5	18,2	9,1	27,3
4-й	количество	39	24	3	2	10
	доля, %	100	61,5	7,7	5,1	25,6
Итого	количество	100	49	15	5	31
	доля, %	100	49	15	5	31

Активность аудитории. Степень активности аудитории в обсуждении докладов рассчитывалась в отношении максимального числа присутствующих. Результаты наблюдения показали, что лишь 38,6 % студентов в той или иной степени участвовали в обсуждении докладов. Более высокий уровень активности отмечался только у 16,8 % от присутствующих. При этом доля активных участников была выше в секциях «Социально-психологические аспекты PR и рекламы» и «Реклама и маркетинговые коммуникации в условиях кризиса» (таблица 4).

Таблица 4. Активность аудитории

№ п/п	Показатели активности студентов	Максимальное количество, чел.	Доля активных участников от максимального количества присутствующих, %
1	Участвовало в работе секции	101	100
2	Участвовало в обсуждении докладов	39	38,6
3	Участвовало в обсуждении более чем трех докладов	17	16,8

Выводы

Научно-исследовательская деятельность студентов рассматривается сегодня как самостоятельный творческий процесс по поиску новых знаний и выработке важных для будущего специалиста в конкретной сфере профессиональной деятельности личностных качеств и навыков. Эффективность организации этого вида деятельности в вузе определяется многими факторами. Вовлечение студентов уже с первых курсов обучения в исследования диктует потребность в развитии различных форм такой деятельности с учетом их возможностей и интересов. А потребность в совершенствовании приобретаемых знаний и навыков ставит вопрос о необходимости выявления уровня их сформированности. Эмпирическим инструментом такого анализа вполне может стать метод научного социологического наблюдения. Полученные в результате проведенного исследования данные показывают степень владения студентами разных курсов обучения навыками ведения аналитической работы, публичного выступления, умения слушать и вести научный диалог.

Литература

1. Барина Н. Г., Тимофеева Е. В., Клейменова М. Н. Роль исследовательского подхода в подготовке бакалавров к научно-исследовательской деятельности // Проблемы современного педагогического образования. 2020. № 66-2. С. 35–38. EDN: GJJJTC
2. Тараненко А. В., Кушваха Х. Н. Вовлечение студентов, обучающихся по направлению «Реклама и связи с общественностью», в научно-исследовательскую деятельность // Педагогика. Вопросы теории и практики. 2023. Т. 8. № 2. С. 224–228. DOI: 10.30853/ped20230037. EDN: MADNLB
3. Харина Г. В., Мирошникова Е. Г., Алешина Л. В., Раскатова Е. А. Научно-исследовательская деятельность студентов как фактор профессионального становления будущих специалистов // Научное мнение. 2023. № 11. С. 112–120. DOI: 10.25807/22224378_2023_11_112. EDN: KDJEZH
4. Малардырова В. В., Карнаухова А. А. Методологические подходы к профессиональной подготовке будущих бакалавров рекламы и связей с общественностью: опыт СВФУ // Российская школа связей с общественностью. 2022. № 27. С. 101–126. EDN: PXMZTD
5. Глуценко О. А., Гришанин Н. В. Эволюция специальности «Реклама и связи с общественностью»: история формирования, современное состояние и тенденции развития // Коммуникология. 2020. Т. 8. № 1. С. 34–52. DOI: 10.21453/2311-3065-2020-8-1-34-52. EDN: NMXYBH
6. Емельянов С. М. Методологические, организационные и методические аспекты образования в сфере рекламы и связей с общественностью // Российская школа связей с общественностью. 2015. № 6. С. 184–193. EDN: TXOJMH
7. Прищенко С. В., Цыганова И. В. Научная конференция как способ формирования у студентов педагогического вуза опыта научно-исследовательской деятельности // Общество: социология, психология, педагогика. 2023. № 12(116). С. 139–144. DOI: 10.24158/spp.2023.12.19. EDN: SPQEYW

**Статья поступила 15 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 25 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.**

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторах

Герашенко Людмила Ивановна — доктор социологических наук, профессор кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: gerashenko.li@sut.ru

Кульназарова Анастасия Витальевна — кандидат политических наук, доцент кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: kulnazarova.av@sut.ru

Research Activity of Students as a Factor of Professional Training of Specialists for the Field of Advertising and Public Relations

Gerashchenko L., Kulnazarova A.✉

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. Taking into account the requirements of the market for the quality of specialist training is becoming an important factor in the successful functioning of an educational institution today. The development of students' research activities solves several problems: it contributes to their personal development, forms the professional qualities demanded by practice in university graduates, and increases the university's rating among employers. **The purpose** of the work is to identify the role of research activities of students studying in the direction 42.03.01 "Advertising and Public Relations" in the formation of professionally demanded qualities. **Methods used:** to obtain primary sociological information, the method of structured observation of the participants of the student scientific and practical conference of the XXV International Baltic Communication Forum "Global and Regional Communications: Present and Future" was used. The methods of analysis and synthesis were used, respectively, in empirical and interpretation of the basic concepts of the topic to substantiate the elements of observation, and when summarizing the results obtained and formulating conclusions. **Elements of novelty:** the method of structured observation was used as a research tool. **Result:** the level of formation of basic skills in the preparation of the report and the presentation of students was revealed. The dependence in the level of mastery of analytical work skills on the course of training of students is established. **Scientific and practical significance of the work:** in scientific terms, the study shows the possibilities of using the observation method to identify the research skills of students. The results obtained can serve as a basis for improving the work on the formation of professionally demanded skills among university graduates.

Key words: research work, professional competencies, research skills, structured observation

Information about Authors

Gerashchenko Lyudmila – Advanced Doctor in Sociological Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of Socio-Political Sciences (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: gerashchenko.li@sut.ru

Kulnazarova Anastasia – Ph.D. of Political Sciences, Associate Professor of the Department of Socio-Political Sciences (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: kulnazarova.av@sut.ru

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 504.055

Учет наложения секторов базовых станций сотовой связи
при экологическом мониторинге электромагнитных полей

Пищугина А. Д.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Актуальность исследования связана с недостаточной изученностью пространственной динамики и временной изменчивости электромагнитного фона радиочастотного диапазона в условиях городской среды. Действующие методики экологической оценки параметров электромагнитных полей, разработанные несколько десятилетий назад, не соответствуют современным реалиям, характеризующимся быстрым развитием технологий и увеличением числа источников излучения. Существующая методика измерений предполагает проведение мониторинга отдельно для каждого источника излучения. Однако в современных городах с высокой плотностью излучающих устройств, которые постоянно взаимодействуют друг с другом, невозможно выделить параметры электромагнитных полей для одного конкретного устройства. Это создает трудности в определении источника излучения максимальных значений, что, в свою очередь, осложняет разработку активных мер защиты. В текущих условиях необходим поиск новых методик прогнозирования электромагнитной обстановки с учетом большого количества радиотехнических устройств, используемых технологий излучения и сложной архитектуры высокоурбанизированных территорий. **Целью работы** является исследование влияния наложения секторов базовых станций на формирование областей повышенных значений плотности потока энергии. **Используемые методы:** проведение инструментального мониторинга плотности потока энергии, сравнение эмпирических данных с предельно допустимыми уровнями электромагнитных полей, интерполяция полученных значений, их геометрическая и картографическая обработка с помощью ГИС-технологий. **Новизна:** моделирование наложения секторов связи различных стандартов от базовых станций для прогноза зон повышенных значений плотности потока энергии и определения источников максимальных значений в урбанизированной среде. **Результат:** на исследуемой территории электромагнитный фон повышен, превышения предельно допустимого уровня электромагнитных полей радиочастотного диапазона обнаружены в 31,6 % точек, в том числе превышения предельно допустимого уровня в 3–5 раз отмечены в 4,4 % случаев. Максимальное зафиксированное значение составило 52,29 мкВт/см². В зонах наложения пяти и более секторов базовых станций сотовой связи, использующих центральную частоту 900 МГц, формируются области максимальных значений плотности потока энергии электромагнитных полей радиочастотного диапазона. Кроме этого, данные области формируются при наложении трех и более секторов, если хотя бы один использует стандарт LTE. **Практическая значимость:** применение полученных результатов для актуализации существующих методов экологического мониторинга плотности потока энергии и мероприятий по защите от электромагнитных полей радиочастотного диапазона, а также создание картографических материалов электромагнитного фона в процессе исследования.

Библиографическая ссылка на статью:

Пищугина А. Д. Учет наложения секторов базовых станций сотовой связи при экологическом мониторинге электромагнитных полей // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 7. EDN: QEXGOE

Reference for citation:

Pishugina A. Considering Overlapping Sectors of Cellular Base Stations in the Environmental Monitoring of Electromagnetic Fields // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 7. EDN: QEXGOE

Ключевые слова: электромагнитные поля, плотность потока энергии, базовые станции сотовой связи, экологический мониторинг, ГИС-технологии

Введение

Современное общество невозможно представить без использования технологий, базирующихся на передаче и обработке информации посредством электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ). Мобильная связь, беспроводной интернет, радиовещание и телевидение стали неотъемлемой частью городской инфраструктуры, обеспечивающей высокий уровень комфорта телекоммуникационной связи. Однако интенсивное развитие этих технологий сопровождается увеличением общего уровня электромагнитного излучения, что вызывает необходимость проведения экологической оценки, прогнозирования и разработки соответствующих защитных мероприятий в целях обеспечения экологической безопасности населения и окружающей среды от негативного воздействия электромагнитных полей [1–5].

В условиях высокоурбанизированной среды проблема электромагнитного загрязнения приобретает особую актуальность. Плотная застройка, высокая концентрация технических средств и значительное количество источников излучения способствуют формированию сложной электромагнитной обстановки. Существующая методика измерений¹ предполагает получение значений отдельно для каждого источника излучения. Однако, как показывают проведенные ранее исследования электромагнитного фона [6–9], распределение (ЭМП РЧ) в пространстве обычно неоднородное. В современных городах с высокой плотностью излучающих устройств, которые постоянно взаимодействуют друг с другом, невозможно выделить параметры ЭМП для одного конкретного устройства. Это создает трудности в определении источника максимальных значений плотности потока энергии (ППЭ), что, в свою очередь, осложняет разработку активных мер защиты, таких как изменение характеристик и режимов работы излучателя.

Для контроля электромагнитной обстановки перед размещением или реконструкцией радиоэлектронных средств производится расчет значений ППЭ с помощью лицензированных программных комплексов. Тем не менее, они практически не учитывают окружающие объекты и физические характеристики городской среды, из-за чего реальная электромагнитная обстановка на селитебной урбанизированной территории отличается от расчетной. Следовательно, необходим поиск новых подходов и инструментов для прогнозирования и контроля уровней электромагнитных полей. В данной работе предлагается поиск решения проблемы через совместное исследование ППЭ и покрытия сети сотовой связи. Выполнено моделирование наложения секторов базовых станций сотовой связи (БССС) на полученные результаты мониторинга электромагнитных полей для прогноза зон повышенных значений ППЭ и определения источников максимальных значений в урбанизированной среде от различных стандартов связи.

В Российской Федерации, в целях обеспечения экологической безопасности населения от вредного влияния передающих радиотехнических объектов, установлены предельно допустимые уровни (ПДУ) электромагнитного излучения в соответствии с нормативными документами². Для частотного диапазона 0,3–330 ГГц нормирование осуществляется на основе показателя ППЭ, при этом ПДУ составляет 10 мкВт/см² для жилых и общественных помещений, а также для селитебных территорий.

Используемые методики

В рамках данного исследования оценка электромагнитного фона проводилась в микрорайоне Западный г. Мурино, расположенного на северо-западе Всеволожского района Ленинградской области. Для исследования ЭМП РЧ была выбрана селитебная территория с плотной высокотэтажной жилой застройкой. Для определения параметров секторов БССС использовался открытый сервис картирования вышек сотовой связи и покрытия CellMapper, который показывает детальную информацию о сетях EDGE,

¹ МУК 4.3.3921-23. 4.3. Методы контроля. Физические факторы. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиоэлектронных средств, работающих в диапазоне частот 300 МГц–300 ГГц. Методические указания. Утверждены Роспотребнадзором 30.06.2023 г.

² СанПиН 2.1.8/2.2.4.2302-07. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 19 декабря 2007 г. № 91;

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2.

GSM, CDMA, UMTS, LTE¹. Для исследования была выбрана центральная частота 900 МГц со стандартами EDGE, GSM и LTE. На данной частоте было обнаружено 109 секторов от 60 БССС, из них 59 зон провайдера ПАО «Мегафон» и 50 секторов ПАО «МТС».

Для измерения ЭМП РЧ использовался измеритель уровня электромагнитного излучения МEGEОН 07300 (ООО «МЕГЕОН», Россия), предназначенный для измерений в диапазоне от 50 МГц до 3,5 ГГц. Замеры проводились согласно методике² в период с 16 сентября по 28 октября 2024 г. на частоте 900 МГц в 636 точках с интервалом 30–50 м.

Статистическая и картографическая обработка данных проводилась в программе QGIS 3.16.11. Была выбрана географическая система координат WGS 84, в качестве базовой карты использовалась OpenStreetMap (OSM), к которой в дальнейшем привязывался фрагмент карты из портала Яндекс.Карты. С помощью внутренних инструментов программы осуществлялся перенос геометрии и параметров секторов БССС из сервиса CellMapper в QGIS для визуализации данных с учетом параметров стандартов связи и провайдеров и последующей совместной обработки с эмпирическими значениями ППЭ (рисунок 1).

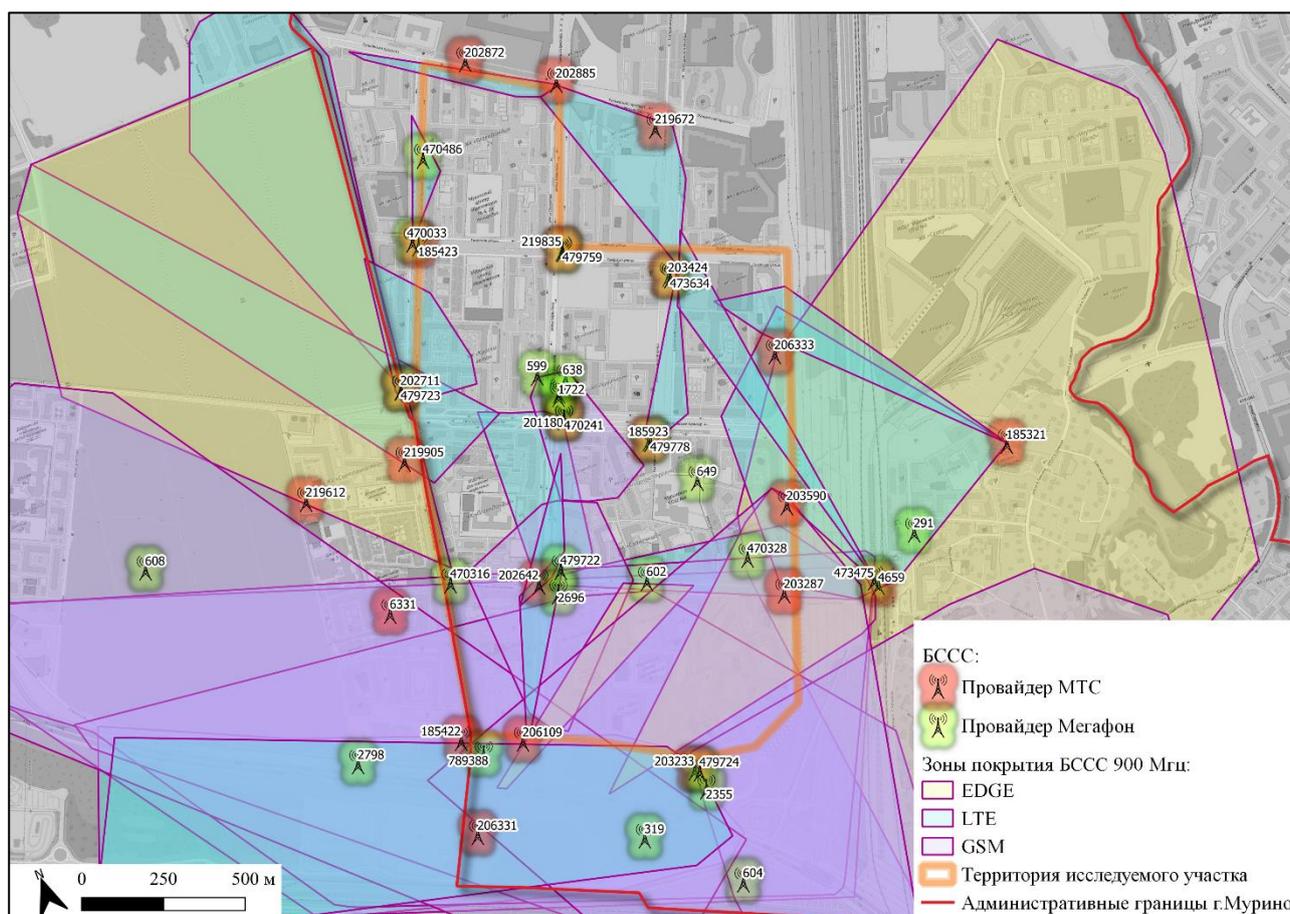


Рис. 1. Зоны секторов БССС на частоте 900 МГц

Затем была произведена обработка полученной геометрии секторов БССС для выявления зон их наложения (рисунок 2). Также в программе производилась статистическая обработка, интерполяция и визуализация полученных значений ППЭ. Интерполяция значений была выполнена методом нерегулярной триангуляционной сети (TIN), что позволило рассчитать и визуализировать поверхность из значений ППЭ по всей исследуемой территории. В результате была построена карта наложений секторов БССС на интерполированные значения ППЭ (рисунок 3).

¹ Сервис картирования вышек сотовой связи и покрытия CellMapper. URL: <https://www.cellmapper.net> (дата обращения 29.10.2024).

² МУК 4.3.3921-23. 4.3. Методы контроля. Физические факторы. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиоэлектронных средств, работающих в диапазоне частот 300 МГц–300 ГГц. Методические указания. Утверждены Роспотребнадзором 30.06.2023 г.

Результаты обработки данных

На исследуемой территории электромагнитный фон повышен, превышения ПДУ ЭМП РЧ обнаружены в 31,6 % точек, в том числе превышения в 3–5 раз отмечены в 4,4 % случаев. Максимальное зафиксированное значение составило 52,29 мкВт/см². Области максимальных значений в большинстве случаев формируются на юге территории и относятся к бульвару Менделеева с пересекающими его улицей Шувалова и Воронцовским бульваром. Среднее значение ППЭ в данной области составляет 17,20 мкВт/см². Кроме того, участки повышенных значений формируются на смежной территории во дворах на юго-западе и юго-востоке исследуемого участка. Отдельные районы максимальных значений отмечены на Петровском бульваре и Екатерининской улице, со средним значением 9,86 мкВт/см².

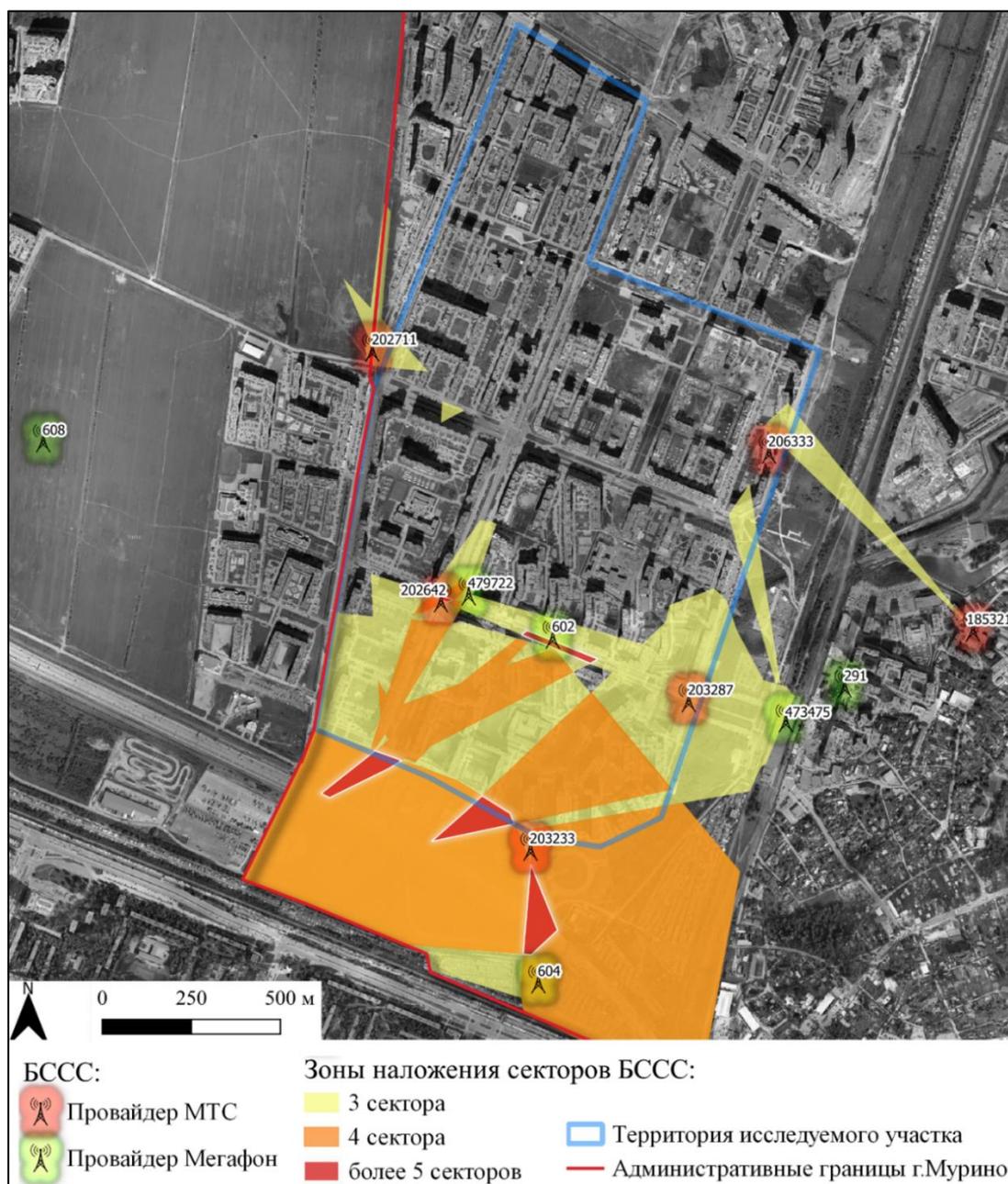


Рис. 2. Зоны наложения секторов БССС на частоте 900 МГц

От 12 БЗСС наложение в трех и более слоях происходит у 17 секторов, из которых восемь относятся к компании МТС, остальные – к «Мегафону». Наложение трех зон секторов БССС, использующих стандарт GSM, отмечено в южной части исследуемой территории, стандарты EDGE и LTE – в западной, центральной и восточной. Наложение четырех зон секторов формирует на юге три области, две из которых образуются стандартами EDGE и GSM, и одна – LTE и GSM. Наложение пяти и более секторов

происходит стандартами EDGE, GSM и LTE на центральном участке бульвара Менделеева, и стандартами GSM и LTE на перекрестке бульвара Менделеева и улицы Шувалова. В итоге наибольшая площадь наложения секторов формируется в южной части исследуемого участка, а наибольшее количество пересечений относится к центральной части бульвара Менделеева и его перекрестку с улицей Шувалова.

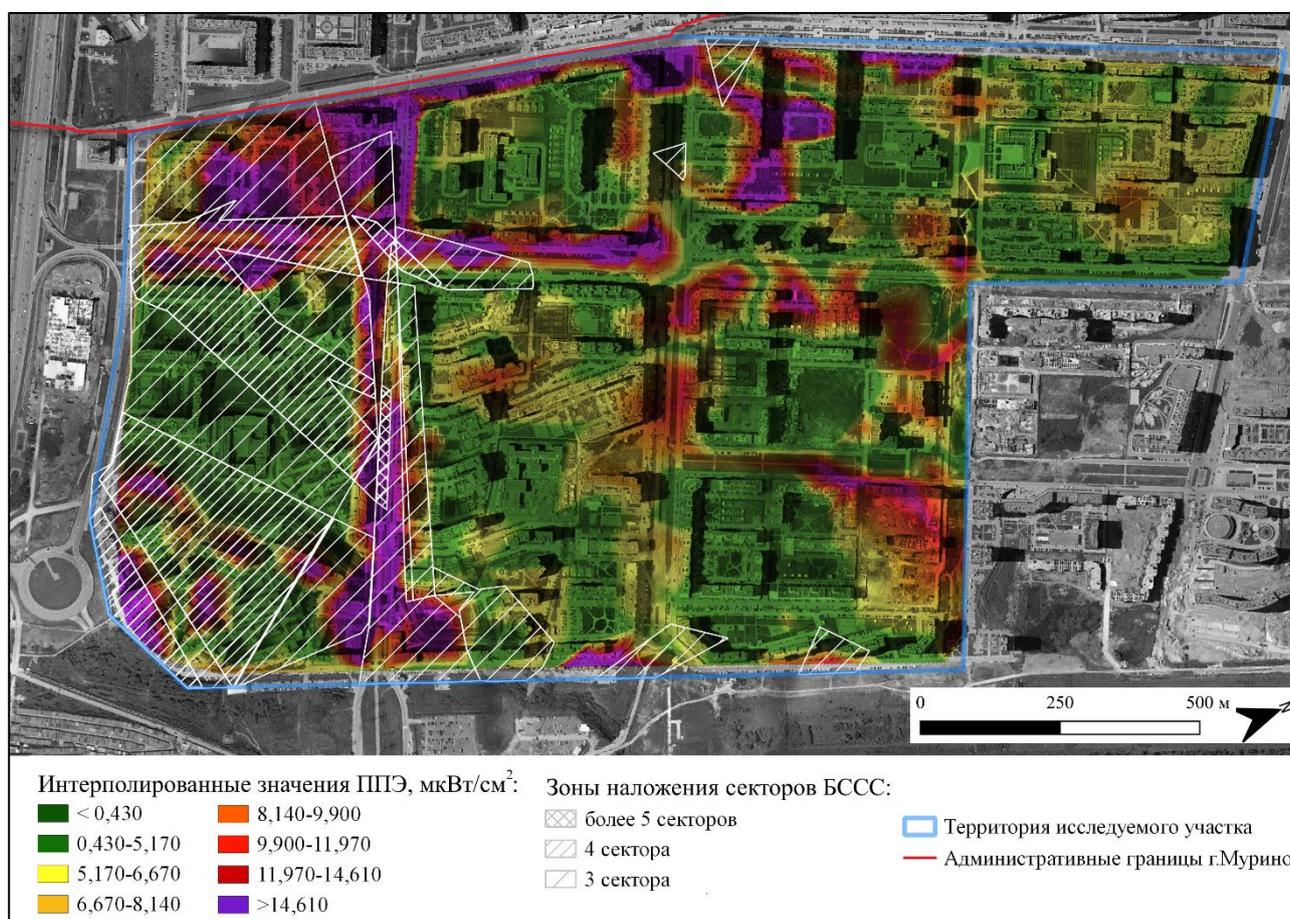


Рис. 3. Карта наложений секторов БССС на интерполированные значения ППЭ

В результате сравнения данных интерполированных значений ППЭ и участков наложения секторов БССС приблизительно 63 % площади участков наибольших значений ППЭ входят в зоны наложения секторов. Практически 40 % территории в зоне наложения секторов не относится к областям повышенных значений ППЭ. В зоне наложения трех секторов БССС к областям повышенных значений ППЭ не относится 62 % площади, в зоне наложения четырех секторов – 42 %, а в зоне наложения пяти и более секторов – менее 1 %. При этом в зонах наложения секторов со стандартом LTE области повышенных значений ЭМП занимают 96 % площади. Источниками являются БССС 185321, 202711, 202642 провайдера МТС и БССС 473475, 479722 провайдера «Мегафон».

Выводы

Таким образом, на исследуемой территории в зонах наложения пяти и более секторов БССС, использующих центральную частоту 900 МГц, формируются области максимальных значений ППЭ ЭМП РЧ. Кроме этого, данные области формируются при наложении трех и более секторов, если хотя бы один использует стандарт LTE. Источниками максимальных значений ППЭ с учетом наложения секторов являются БССС 185321, 202711, 202642 (МТС) и 473475, 479722 («Мегафон»). Стоит отметить, что для данной работы использовался открытый сервис картирования вышек сотовой связи и покрытия, для более корректной оценки необходимо проведение исследования покрытия сети сотовой связи в г. Мурино.

Литература

1. Panagopoulos D. J., Chavdoula E. D., Margaritis L. H. Bioeffects of Mobile Telephony Radiation in Relation to its Intensity or Distance from the Antenna // International Journal of Radiation Biology. 2010. Vol. 86. Iss. 5. PP. 345–357. DOI: 10.3109/09553000903567961
2. Toxicology and Carcinogenesis Studies in Sprague Dawley (Hsd: Sprague Dawley SD) Rats Exposed to Whole-Body Radio Frequency Radiation at a Frequency (900 MHz) and Modulations (GSM and CDMA) Used by Cell Phones. National Toxicology program Technical Report: NTP-TR-595. 2018. DOI: 10.22427/NTP-TR-595. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK561730>
3. Колганова О. И., Панфилова В. В., Измestьева О. С., Жураковская Г. П., Чибисова О. Ф. и др. Влияние многократного воздействия сложноорганизованного электромагнитного излучения на поведение крыс в тесте «открытое поле» // Радиационная биология. Радиоэкология. 2024. Т. 64. № 3. С. 286–294. DOI: 10.31857/S0869803124030057. EDN: MBNNYD
4. Ушаков И. Б., Федоров В. П., Давыдов Б. И. Нейроморфологические эффекты острого и хронического электромагнитного облучения // Радиационная биология. Радиоэкология. 2024. Т. 64. № 3. С. 257–273. DOI: 10.31857/S0869803124030034. EDN: MBPWSP
5. Falcioni L., Bua L., Tibaldi E., Lauriola M., De Angelis L. et al. Report of Final Results Regarding Brain and Heart Tumors in Sprague-Dawley Rats Exposed from Prenatal Life until Natural Death to Mobile Phone Radiofrequency Field Representative of a 1.8 GHz GSM Base Station Environmental Emission // Environmental Research. 2018. Vol. 165. PP. 496–503. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.037
6. Pichugina A., Sturman V., Yatsenko M. Application of GIS Technology for Electromagnetic Field Assessment // Вестник факультета социальных цифровых технологий: сборник научно-теоретических статей. 2023. С. 438–442. EDN: CXHTOX
7. Пищугина А. Д. Картографирование электромагнитных полей радиочастотного диапазона в урбанизированной среде (на примере г. Мурино) // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023). Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов: в 2 т. / сост. Н. Н. Иванов. Т. 1. СПб.: СПбГУТ, 2023. С. 133–137. EDN: VCAONB
8. Потапов А. А. Экологический мониторинг электромагнитных полей радиочастотного диапазона в условиях города с применением ГИС-технологий // Экология урбанизированных территорий. 2010. № 3. С. 20–29. EDN: MXGQCP
9. Васильев А. В. Методы и результаты экологического мониторинга некоторых физических загрязнений окружающей среды на примере территорий городских округов Самарской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. Т. 23. № 5 (103). С. 25–38. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-5-25-38. EDN: QUKKQM

**Статья поступила 15 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 17 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.**

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторе

Пищугина Александра Дмитриевна – студент 2-го курса магистратуры (группа ЭП-31м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: pishugina.ad@sut.ru

Considering Overlapping Sectors of Cellular Base Stations in the Environmental Monitoring of Electromagnetic Fields

Pishugina A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

The relevance of the study is related to the lack of knowledge of the spatial dynamics and temporal variability of the electromagnetic background of the radio frequency range in an urban environment. The current methods of environmental assessment of electromagnetic field parameters, developed several decades ago, do not correspond to modern realities characterized by rapid technological development and an increase in the number of radiation sources. The existing measurement methodology assumes monitoring separately for each radiation source. However, in modern cities with a high density of emitting devices that constantly interact with each other, it is impossible to isolate the parameters of electromagnetic fields for one specific device. This creates difficulties in determining the source of maximum radiation values, which, in turn, complicates the development of active protection measures. In the current conditions, it is necessary to search for new methods for predicting the electromagnetic situation, taking into account the large number of radio engineering devices, radiation technologies used and the complex architecture of highly urbanized territories. **The aim of the work** is to study the effect of overlapping sectors of base stations on the formation of areas of increased energy flux density. **Methods used:** instrumental monitoring of energy flux density, comparison of empirical data with maximum permissible levels of electromagnetic fields, interpolation of the obtained values, their geometric and cartographic processing using GIS technologies. **Novelty:** modeling the overlap of communication sectors of various standards from base stations to predict areas of increased energy flow density and identify sources of maximum values in an urbanized environment. **The result:** the electromagnetic background is elevated in the studied area, exceeding the maximum permissible level of electromagnetic fields of the radio frequency range was detected in 31.6 % of points, including exceeding the maximum permissible level by 3–5 times in 4.4 % of cases. The maximum recorded value was $52.29 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. In the overlapping zones of five or more sectors of cellular base stations using a central frequency of 900 MHz, areas of maximum energy flux density of electromagnetic fields of the radio frequency range are formed. In addition, these areas are formed when three or more sectors overlap, if at least one uses the LTE standard. **Practical significance:** the application of the results obtained to update existing methods of environmental monitoring of energy flux density and measures to protect against electromagnetic fields in the radio frequency range, as well as the creation of cartographic materials of the electromagnetic background during the study.

Key words: electromagnetic fields, energy flux density, cellular base stations, environmental monitoring, GIS technologies

Information about Author

Pishugina Alexandra – 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: pishugina.ad@sut.ru

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 519.6; 543.421/.424

Моделирование аналитических функций интерферограмм по дискретным значениям

Сединкин И. Б., Скалецкая И. Е. ✉

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Актуальной задачей в области инфракрасной спектроскопии является оценка эффективности использования фоточувствительных пластин с напыленным слоем селенида свинца в фотоприемных устройствах для прогнозирования качества изделия на раннем технологическом этапе его создания. Анализ качества характеристик пластин с применением графических данных, которые предоставляют современные приборы инфракрасной спектроскопии, затруднителен ввиду визуальной схожести графиков интерферограмм для разных пластин, вследствие чего возникает необходимость применения аналитических функций. **Цель работы:** получение аналитического выражения функций интерферограмм, представленного в виде суммы тригонометрических функций с переменными коэффициентами при них. По данным коэффициентам можно судить о различиях между интерферограммами для дальнейшей оценки качества фоточувствительных пластин, имея на входе дискретные точки данных спектра пропускания. **Используемые методы:** применение косинус-преобразования Фурье, позволяющего восстановить интерферограмму, полученную на Фурье-спектрометре, по ее спектру пропускания, а также программного обеспечения для автоматизации расчетов коэффициентов для множества исходных спектров пропускания. **Результат:** по итогам работы получено аналитическое выражение восстановленной интерферограммы в общем виде с переменными коэффициентами, уникальными для каждой пластины. Аналитическое выражение представляет собой сумму тригонометрических функций с аргументами, равными пределам интегрирования полиномов сплайн-функции. Однако на практике каждая тригонометрическая функция делится на независимую переменную, возведенную в целую степень от 1 до 4. Это позволяет сделать вывод, что любая интерферограмма, полученная в соответствии с данной моделью, имеет локальные максимумы, чьи значения постепенно уменьшаются по мере увеличения независимой переменной. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить вычисления коэффициентов, благодаря чему возможно получение как аналитического, так и дискретного представления интерферограммы для множества исходных спектров пропускания. Приведены примеры результатов работы программного обеспечения, которые представлены в виде графика интерферограммы, аналитического выражения в текстовом файле, а также в виде таблицы с рассчитанными коэффициентами. **Теоретическая / Практическая значимость:** применение аналитического представления вместо графического позволит на количественном уровне представить различия между разными интерферограммами, на первый взгляд схожими визуально. В перспективе это поможет сопоставлять пластины нужного качества с определенными физическими показателями.

Библиографическая ссылка на статью:

Сединкин И. Б., Скалецкая И. Е. Моделирование аналитических функций интерферограмм по дискретным значениям // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 8. EDN: XXZQGJ

Reference for citation:

Sedinkin I., Skaletskaya I. Modeling of Interferogram Analytical Functions from Discrete Values // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 8. EDN: XXZQGJ

Ключевые слова: преобразование Фурье, интеграл Фурье, сплайн, интерферограмма, спектры пропускания

Актуальность работы

Математическое моделирование является неотъемлемой частью современных исследований в области естественных и технических наук, развивающихся поэтапно — от постановки научно-технических задач к построению аналитических моделей. Последнее связано с применением математических методов исследований и вычислительных алгоритмов их решения, пакетов прикладных программ, иллюстраций расчетов, апробацией моделей путем сравнения с экспериментальными или теоретическими данными.

Данная статья посвящена математическому моделированию с применением вычислительной техники для решения актуальных проблем современной технологии в области инфракрасной (ИК) спектроскопии. Задача определения эффективности использования фоточувствительных пластин с напыленным слоем селенида свинца в фотоприемных устройствах ИК диапазона актуальна в связи с очевидным преимуществом прогнозирования на раннем технологическом этапе создания изделия. Предлагается методом математического моделирования с использованием Фурье-анализа приблизиться к ее решению и автоматизировать посредством программного обеспечения (ПО) процесс анализа экспериментальных данных — спектральных характеристик пластин, полученных на Фурье-спектрометре. Анализ качества характеристик пластин при использовании графического представления интерферограмм, являющихся результатом обработки экспериментальных значений, затруднителен ввиду их визуальной схожести друг с другом: пластины разного качества могут иметь очень схожие графики, и даже при хорошем приближении не удастся найти отличия одного от другого. Аналитическое представление позволяет представить их различия на количественном уровне, поскольку разные коэффициенты гарантируют непохожесть одной интерферограммы на другую.

Постановка задачи

Целью исследования являлось получение аналитической функции, представляющей восстановленную методом Фурье-анализа интерферограмму, описывающую спектры фоточувствительных пластин, полученные в дискретном виде на Фурье-спектрометре. Данная цель достигается путем решения следующих задач:

- получение коэффициентов полиномов сплайн-функции для аппроксимации спектра пропускания исследуемых пластин [1];
- получение аналитического выражения интерферограмм с определением составляющих его коэффициентов.

Стоит напомнить, что кубическая сплайн-функция включает в себя множество полиномов с ограниченной областью определения:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x), & x_0 \leq x \leq x_1, \\ S_i(x), & x_i \leq x \leq x_{i+1}, \\ \dots & \dots \\ S_{n-1}(x), & x_{n-1} \leq x \leq x_n, \end{cases}$$

где $S_i(x) = a_{i3}x^3 + a_{i2}x^2 + a_{i1}x + a_{i0}$; $i = 0; \dots; (n - 1)$. Коэффициенты $a_{i3}, a_{i2}, a_{i1}, a_{i0}$ представляют собой искомые коэффициенты полиномов сплайн-функции. По сути имеется аналитическое представление спектра пропускания для одной пластины [1].

Для идеального интерферометра получение интерферограммы возможно путем применения следующей формулы [2]:

$$I'(k) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} S(x) dx + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} S(x) \cos(kx) dx,$$

где первый интеграл представляет собой постоянное число, которое можно не учитывать при нахождении функции $I'(k)$ и сконцентрироваться только на переменной составляющей $I(k)$. Постоянный коэффициент $\frac{1}{2}$ также может быть опущен:

$$I(k) = \int_0^{\infty} S(x) \cos(kx) dx. \quad (1)$$

Второй интеграл представляет собой косинус-преобразование Фурье [3] исходного спектра пропускания. Так как функция $S(x)$ является кусочно-непрерывной, в которой каждые два соседние полинома $S_i(x)$ и $S_{i+1}(x)$ имеют общий предел интегрирования, то, воспользовавшись свойством аддитивности интеграла, можно провести преобразование формулы (1):

$$I(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} S_i(x) \cos(kx) dx, \quad (2)$$

где x_{i1} и x_{i2} — пределы интегрирования, ограничивающие участок спектра, в рамках которого определен i -й полином кубической сплайн-функции. Таким образом, аналитическая модель интерферограммы (2) представляет собой сумму из n интегралов для каждого полинома кубической сплайн-функции по его области определения.

Поэтапное получение аналитической модели путем математических преобразований

Процесс получения модели, которая описывается формулой (2), является довольно сложным и требует поэтапного выполнения. Ниже приведено описание трех этапов для получения общего результата.

Этап 1. Нахождение неопределенного интеграла i -го полинома сплайн-функции с использованием интегрирования по частям.

Этап 2. Получение определенного интеграла i -го полинома сплайн-функции на основе результатов этапа 1.

Этап 3. Получение общего результата для всех полиномов кубической сплайн-функции, представленного в таком виде, в котором будет удобно производить необходимые вычисления на компьютере.

Ниже приведена формула для интегрирования одного полинома кубической сплайн-функции $S(x)$:

$$\int S_i(x) \cos(kx) dx = \int (a_{i3}x^3 + a_{i2}x^2 + a_{i1}x + a_{i0}) \cos(kx) dx.$$

Следующий результат получается путем интегрирования по частям:

$$\begin{aligned} & \int S_i(x) \cos(kx) dx = \\ & = a_{i3} \left(\frac{x^3}{k} \sin(kx) + \frac{3x^2}{k^2} \cos(kx) - \frac{6x}{k^3} \sin(kx) - \frac{6}{k^4} \cos(kx) \right) + \\ & \quad + a_{i2} \left(\frac{x^2}{k} \sin(kx) + \frac{2x}{k^2} \cos(kx) - \frac{2}{k^3} \sin(kx) \right) + \\ & \quad + a_{i1} \left(\frac{x}{k} \sin(kx) + \frac{1}{k^2} \cos(kx) \right) + \frac{a_{i0}}{k} \sin(kx) + C. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, найден ответ, чему равен неопределенный интеграл для i -го полинома сплайн-функции (3). Главный вывод, который можно сделать, заключается в том, что вне зависимости от порядкового номера полинома i неопределенный интеграл имеет фиксированное количество тригонометрических функций, равное 10, фиксированные коэффициенты при них (1, 2, 3, 6), а также фиксированные степени при x и k . Отличие заключается лишь в коэффициентах $a_{i3}, a_{i2}, a_{i1}, a_{i0}$, которые изначально различны для каждого полинома.

В случае определенного интеграла получается зависимость от k :

$$I_i(k) = \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} S_i(x) \cos(kx) dx.$$

Ниже приведено получение определенного интеграла для i -го полинома сплайн-функции $S(x)$. Каждому слагаемому из формулы (3) ставится в соответствие разность двух таких же слагаемых, полученных при подстановке пределов интегрирования.

$$\begin{aligned} I_i(k) = & a_{i3} \left(\frac{x_{i2}^3 \sin(kx_{i2})}{k} - \frac{x_{i1}^3 \sin(kx_{i1})}{k} \right) + 3a_{i3} \left(\frac{x_{i2}^2 \cos(kx_{i2})}{k^2} - \frac{x_{i1}^2 \cos(kx_{i1})}{k^2} \right) + \\ & + 6a_{i3} \left(\frac{x_{i1} \sin(kx_{i1})}{k^3} - \frac{x_{i2} \sin(kx_{i2})}{k^3} \right) + 6a_{i3} \left(\frac{\cos(kx_{i1})}{k^4} - \frac{\cos(kx_{i2})}{k^4} \right) + \\ & + a_{i2} \left(\frac{x_{i2}^2 \sin(kx_{i2})}{k} - \frac{x_{i1}^2 \sin(kx_{i1})}{k} \right) + 2a_{i2} \left(\frac{x_{i2} \cos(kx_{i2})}{k^2} - \frac{x_{i1} \cos(kx_{i1})}{k^2} \right) + \\ & + 2a_{i2} \left(\frac{\sin(kx_{i1})}{k^3} - \frac{\sin(kx_{i2})}{k^3} \right) + a_{i1} \left(\frac{x_{i2} \sin(kx_{i2})}{k} - \frac{x_{i1} \sin(kx_{i1})}{k} \right) + \\ & + a_{i1} \left(\frac{\cos(kx_{i2})}{k^2} - \frac{\cos(kx_{i1})}{k^2} \right) + a_{i0} \left(\frac{\sin(kx_{i2})}{k} - \frac{\sin(kx_{i1})}{k} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь, когда найдено выражение, описывающее часть интерферограммы (4), полученной путем интегрирования одного полинома сплайн-функции, можно приступить к выводу общей аналитической модели.

Как следует из формулы (2), общая аналитическая модель представляет собой сумму интегралов от полиномов кубической сплайн-функции. Поскольку на каждый из n интегралов приходится 10 слагаемых, полная аналитическая модель включает в себя $10n$ таких слагаемых с разными коэффициентами при них и разными аргументами внутри тригонометрических функций. Ниже приведена сокращенная запись полной аналитической модели функции интерферограммы, построенной на базе сплайн-функции, состоящей из n кубических полиномов:

$$\begin{aligned} I(k) &= \sum_{i=0}^{n-1} I_i(k). \\ I(k) &= \sum_{i=0}^{n-1} a_{i3} \left(\frac{x_{i2}^3 \sin(x_{i2}k)}{k} - \frac{x_{i1}^3 \sin(x_{i1}k)}{k} \right) + \\ &+ \sum_{i=0}^{n-1} 3a_{i3} \left(\frac{x_{i2}^2 \cos(x_{i2}k)}{k^2} - \frac{x_{i1}^2 \cos(x_{i1}k)}{k^2} \right) + \dots \\ &\dots + \sum_{i=0}^{n-1} a_{i1} \left(\frac{\cos(x_{i2}k)}{k^2} - \frac{\cos(x_{i1}k)}{k^2} \right) + \sum_{i=0}^{n-1} a_{i0} \left(\frac{\sin(x_{i2}k)}{k} - \frac{\sin(x_{i1}k)}{k} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Упрощение аналитической модели для дальнейших расчетов на компьютере

Пусть каждая из десяти сумм в функции $I(k)$ называется *частичной суммой*. Тогда формула (5) имеет следующий вид:

$$I(k) = \sum_{i=0}^{n-1} I_i(k) = A_4(k) + A_3(k) + A_2(k) + A_1(k),$$

где $A_t(k)$ включает в себя те знаменатели частичных сумм, в которых переменная k имеет степень t ; $t = 1, \dots, 4$.

$$\begin{aligned} A_4(k) &= \sum_{i=0}^{n-1} 6a_{i3} \left(\frac{\cos(kx_{i1})}{k^4} - \frac{\cos(kx_{i2})}{k^4} \right). \\ A_3(k) &= \sum_{i=0}^{n-1} 6a_{i3} \left(\frac{x_{i1} \sin(kx_{i1})}{k^3} - \frac{x_{i2} \sin(kx_{i2})}{k^3} \right) + \dots \\ A_2(k) &= \sum_{i=0}^{n-1} 3a_{i3} \left(\frac{x_{i2}^2 \cos(kx_{i2})}{k^2} - \frac{x_{i1}^2 \cos(kx_{i1})}{k^2} \right) + \dots \\ A_1(k) &= \sum_{i=0}^{n-1} a_{i3} \left(\frac{x_{i2}^3 \sin(kx_{i2})}{k} - \frac{x_{i1}^3 \sin(kx_{i1})}{k} \right) + \dots \end{aligned}$$

Функция $A_4(k)$ включает в себя одну частичную сумму и раскладывается в конечный ряд из n слагаемых:

$$A_4(k) = 6a_{03} \left(\frac{\cos(kx_{01})}{k^4} - \frac{\cos(kx_{02})}{k^4} \right) + 6a_{13} \left(\frac{\cos(kx_{11})}{k^4} - \frac{\cos(kx_{12})}{k^4} \right) + \dots$$

Поскольку два соседних полинома имеют один общий предел интегрирования, имеет смысл сделать замену:

$$\begin{aligned} x_{01} &= \beta_0; \quad x_{02} = \beta_1; \\ x_{11} &= \beta_1; \quad x_{12} = \beta_2; \\ &\dots \\ x_{(n-1)1} &= \beta_{n-1}; \quad x_{(n-1)2} = \beta_n. \end{aligned}$$

В результате получается следующее преобразование:

$$\begin{aligned} A_4(k) &= \left(\frac{6}{k^4} a_{03} \cos(\beta_0 k) \right) + \left(\frac{6}{k^4} (a_{13} - a_{03}) \cos(\beta_1 k) \right) + \left(\frac{6}{k^4} (a_{23} - a_{13}) \cos(\beta_2 k) \right) + \dots \\ &\dots + \left(\frac{6}{k^4} (a_{(n-1)3} - a_{(n-2)3}) \cos(\beta_{n-1} k) \right) - \left(\frac{6}{k^4} a_{(n-1)3} \cos(\beta_n k) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Преобразования, показанные в формуле (6), проводятся для остальных частичных сумм из $A_3(k)$, $A_2(k)$, $A_1(k)$. В силу большого объема в статье не будут приведены преобразования для всех частичных сумм. Однако стоит отметить, что в пределах каждой частичной суммы образуется ряд из $n + 1$ синусов (косинусов), при каждом из которых присутствует постоянный коэффициент, вычисляемый по уже известным на данный момент коэффициентам.

Упрощение заключается в том, что при любых исходных данных полиномов сплайн-функции соответствующая интерферограмма будет иметь одно и то же аналитическое выражение, отличающееся лишь количеством синусов (косинусов) в частичных суммах, коэффициентами при них, а также количеством пределов интегрирования ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$). Таким образом, для однозначного определения интерферограммы необходимо и достаточно рассчитать коэффициенты при синусах (косинусах) для соответствующих частичных сумм.

В таблице 1 приведена матрица, каждый элемент которой представляет собой коэффициент при j -м синусе (косинусе) в i -й частичной сумме.

Таблица 1. Матрица $10 \times (n+1)$ коэффициентов интерферограммы

	1	2	...	$n+1$
1	$6a_{03}$	$6(a_{13} - a_{03})$	...	$-6a_{(n-1)3}$
2	$6\beta_0 a_{03}$	$6\beta_1(a_{13} - a_{03})$	...	$-6\beta_n a_{(n-1)3}$
3	$2a_{02}$	$2(a_{12} - a_{03})$	...	$-2a_{(n-1)2}$
4	$-3\beta_0^2 a_{03}$	$-3\beta_1^2(a_{13} - a_{03})$	...	$3\beta_n^2 a_{(n-1)3}$
5	$-2\beta_0 a_{02}$	$-2\beta_1(a_{12} - a_{02})$	...	$2\beta_n a_{(n-1)2}$
6	$-a_{01}$	$-(a_{11} - a_{01})$	...	$a_{(n-1)1}$
7	$-\beta_0^3 a_{03}$	$-\beta_1^3(a_{13} - a_{03})$	...	$\beta_n^3 a_{(n-1)3}$
8	$-\beta_0^2 a_{02}$	$-\beta_1^2(a_{12} - a_{02})$	...	$\beta_n^2 a_{(n-1)2}$
9	$-\beta_0 a_{01}$	$-\beta_1(a_{11} - a_{01})$	...	$\beta_n a_{(n-1)1}$
10	$-a_{00}$	$-(a_{10} - a_{00})$	...	$a_{(n-1)0}$

Данная матрица может быть использована в программных расчетах для получения интерферограммы как в аналитическом, так и в дискретном виде.

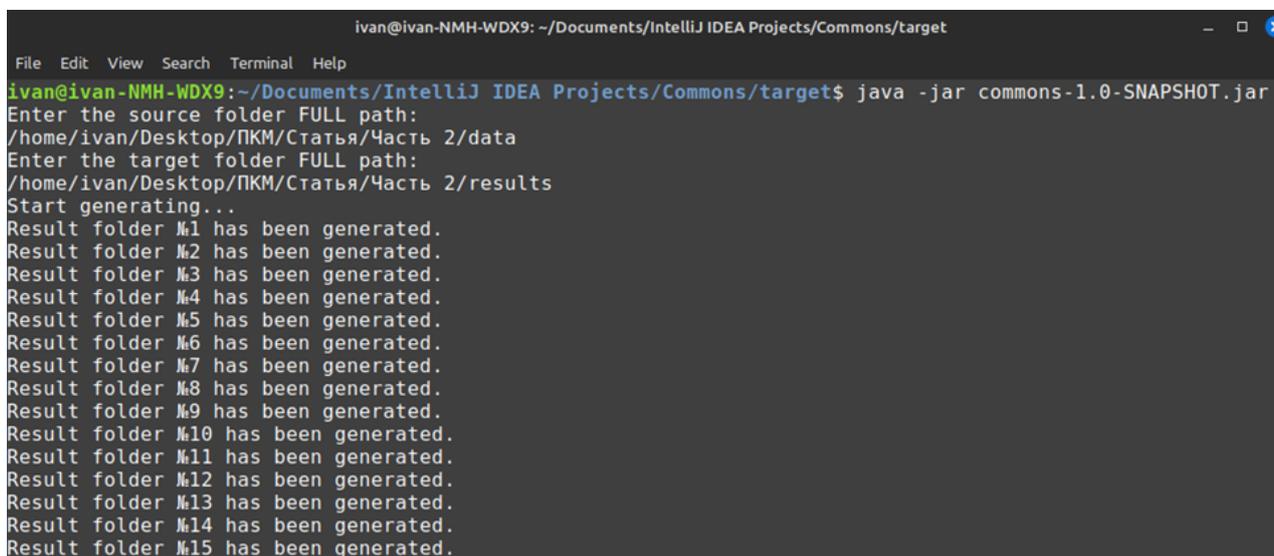
Расчет коэффициентов и получение интерферограмм в двух представлениях для множества исходных спектров пропускания на компьютере

По итогам разработки аналитической формулы была написана программа, позволяющая по дискретным отсчетам спектра пропускания получать на выходе функцию интерферограммы в аналитическом и дискретном видах. Очевидно, что перед этим требуется получить коэффициенты полиномов кубической сплайн-функции, которые используются для расчетов коэффициентов в вышеупомянутой матрице. По этой причине программа включает в себя два основных этапа: *расчет коэффициентов полиномов кубической сплайн-функции* и *расчет коэффициентов интерферограммы*. Результаты первого этапа приведены в [1]. В таблице 2 даны коэффициенты интерферограммы с использованием коэффициентов полиномов кубической сплайн-функции.

Таблица 2. Матрица из 680 коэффициентов, рассчитанных на основе коэффициентов полиномов сплайн-функции [1]

	1	2	...	68
1	$-4,263 \times 10^{-7}$	$1,828 \times 10^{-6}$	...	$-2,063 \times 10^{-7}$
2	$-6,092 \times 10^{-4}$	$2,684 \times 10^{-3}$	...	$-8,254 \times 10^{-4}$
3	$6,092 \times 10^{-4}$	$-2,684 \times 10^{-3}$	...	$8,254 \times 10^{-4}$
4	0,435	-1,97	...	1,651
5	-0,871	3,94	...	-3,302
6	0,435	-1,97	...	1,651
7	207,393	-963,727	...	2201,153
8	-622,178	2891,18	...	-6603,46
9	622,110	-2891,18	...	6602,96
10	-207,97	963,73	...	-2200,572

Исходный код ПО написан на языке Java 11 с применением библиотеки Apache Commons Math. Для запуска ПО необходим jar-файл, запускаемый через терминал (командную строку) с помощью команды «java-jar». Для работы ПО необходима папка (в которой располагаются файлы с табличными данными, хранящие дискретное представление спектра пропускания), называемая *source folder*, а также целевая папка (в которую ПО сохраняет результаты работы), называемая *target folder*. На рисунке 1 в качестве *source folder* и *target folder* выступают папки «data» и «results», соответственно. После указания полного пути до обеих папок начинается генерация результатов.



```
ivan@ivan-NMH-WDX9: ~/Documents/IntelliJ IDEA Projects/Commons/target
File Edit View Search Terminal Help
ivan@ivan-NMH-WDX9:~/Documents/IntelliJ IDEA Projects/Commons/target$ java -jar commons-1.0-SNAPSHOT.jar
Enter the source folder FULL path:
/home/ivan/Desktop/ПКМ/Статья/Часть 2/data
Enter the target folder FULL path:
/home/ivan/Desktop/ПКМ/Статья/Часть 2/results
Start generating...
Result folder №1 has been generated.
Result folder №2 has been generated.
Result folder №3 has been generated.
Result folder №4 has been generated.
Result folder №5 has been generated.
Result folder №6 has been generated.
Result folder №7 has been generated.
Result folder №8 has been generated.
Result folder №9 has been generated.
Result folder №10 has been generated.
Result folder №11 has been generated.
Result folder №12 has been generated.
Result folder №13 has been generated.
Result folder №14 has been generated.
Result folder №15 has been generated.
```

Рис. 1. Терминал, в котором происходил запуск программы

Для каждого файла из папки «data» ПО генерирует соответствующую папку в целевой папке с двумя файлами (с двумя представлениями интерферограммы), как показано на рисунке 2. Номер сгенерированной папки совпадает с номером файла исходного спектра пропускания.

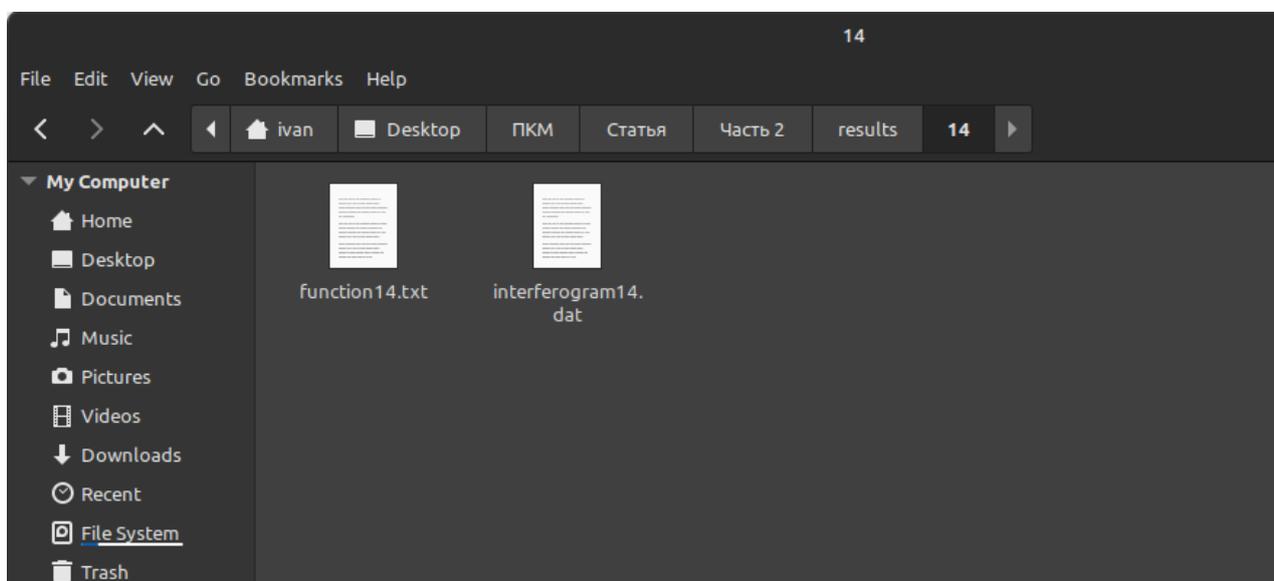


Рис. 2. Скриншот сгенерированной папки с двумя файлами (двумя представлениями интерферограммы)

На рисунке 3 приведен график интерферограммы, построенный по дискретным точкам, взятым из файла «interferogram14.dat»; построение проводилось в среде GNU Octave.

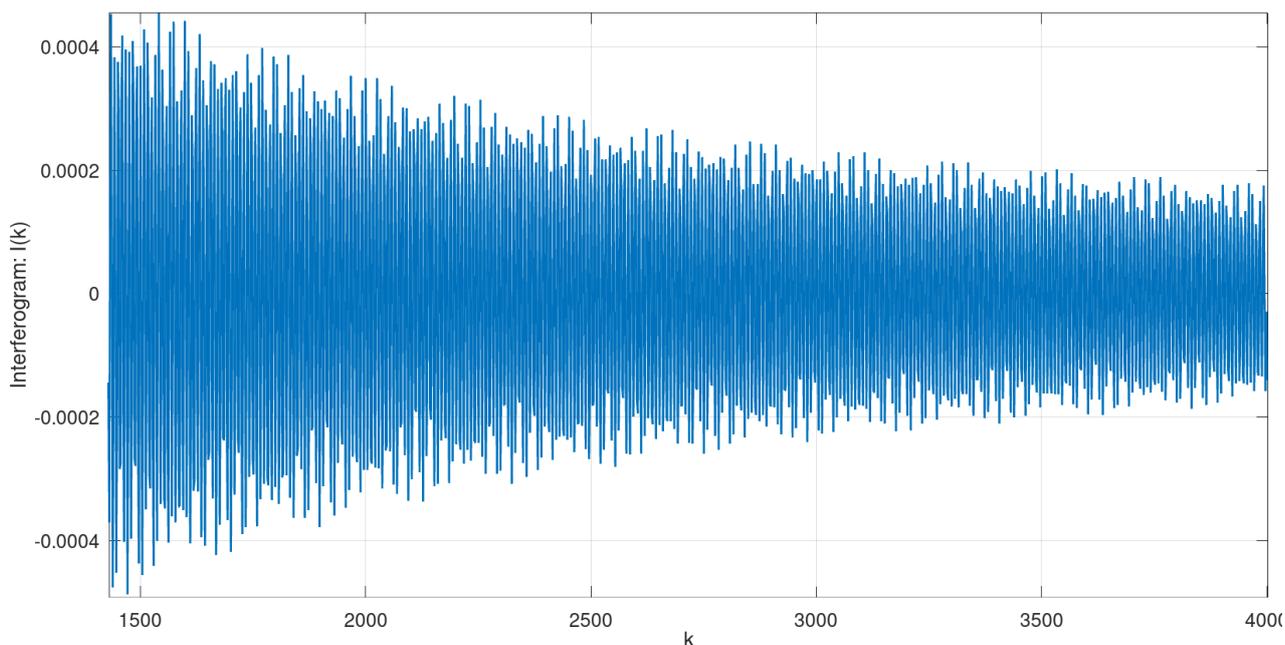


Рис. 3. График зависимости функции интерферограммы $I(k)$ от параметра k

Аналитическое представление интерферограммы по заданным исходным данным приведено ниже на рисунке 4. Коэффициенты порядка ниже 10^{-3} заменены на 0 и потому отсутствуют в результирующем файле.

```
function14.txt
() / x^4 +
( + 0.003sin(1467.729x) + 0.003sin(1583.450x) + 0.001sin(1814.892x) + 0.001sin(3627.856x) + 0.002sin(3705.003x) + 0.001sin(3782.151x) +
0.002sin(3975.019x)) / x^3 +
( + 0.003sin(1506.303x) + 0.001sin(1544.876x) + 0.002sin(1699.171x) + 0.002sin(1853.466x) + 0.001sin(2470.645x) + 0.001sin(2894.956x) +
0.002sin(3666.430x) + 0.002sin(3743.577x) + 0.002sin(3936.446x)) / x^3 +
(0.435cos(1429.155x) + 2.135cos(1506.303x) + 1.142cos(1544.876x) + 0.701cos(1660.598x) + 1.662cos(1699.171x) + 1.702cos(1853.466x) +
0.258cos(1969.187x) + 0.362cos(2007.761x) + 0.286cos(2046.335x) + 0.231cos(2200.629x) + 0.257cos(2277.777x) + 0.697cos(2393.498x) +
1.265cos(2470.645x) + 0.223cos(2547.793x) + 0.354cos(2586.366x) + 0.804cos(2702.087x) + 0.102cos(2779.235x) + 0.665cos(2817.808x) +
1.537cos(2894.956x) + 0.705cos(2972.103x) + 0.226cos(3087.824x) + 0.007cos(3164.972x) + 0.195cos(3203.545x) + 1.509cos(3280.693x) +
0.891cos(3357.840x) + 0.449cos(3396.414x) + 0.917cos(3473.561x) + 1.105cos(3589.282x) + 3.368cos(3666.430x) + 3.087cos(3743.577x) +
0.874cos(3820.724x) + 0.326cos(3859.298x) + 3.254cos(3936.446x) + 1.651cos(4000.092x)) / x^2 +
( + 3.940cos(1467.729x) + 4.771cos(1583.450x) + 0.882cos(1622.024x) + 1.402cos(1737.745x) + 1.548cos(1776.319x) + 2.219cos(1814.892x) +
0.262cos(1892.040x) + 1.441cos(1930.613x) + 0.824cos(2084.908x) + 0.250cos(2123.482x) + 0.182cos(2162.056x) + 0.236cos(2239.203x) +
0.014cos(2316.350x) + 1.071cos(2354.924x) + 2.053cos(2432.071x) + 1.856cos(2509.219x) + 0.237cos(2624.940x) + 0.945cos(2663.514x) +
1.305cos(2740.661x) + 2.713cos(2856.382x) + 2.434cos(2933.529x) + 0.533cos(3010.677x) + 0.127cos(3049.251x) + 0.286cos(3126.398x) +
1.598cos(3242.119x) + 3.259cos(3319.266x) + 2.632cos(3434.987x) + 0.185cos(3512.135x) + 0.733cos(3550.709x) + 4.891cos(3627.856x) +
6.925cos(3705.003x) + 4.272cos(3782.151x) + 3.512cos(3897.872x) + 7.222cos(3975.019x)) / x^2 +
(0.435cos(1429.155x) + 2.135cos(1506.303x) + 1.142cos(1544.876x) + 0.701cos(1660.598x) + 1.662cos(1699.171x) + 1.702cos(1853.466x) +
0.258cos(1969.187x) + 0.362cos(2007.761x) + 0.286cos(2046.335x) + 0.231cos(2200.629x) + 0.257cos(2277.777x) + 0.697cos(2393.498x) +
1.265cos(2470.645x) + 0.223cos(2547.793x) + 0.354cos(2586.366x) + 0.804cos(2702.087x) + 0.102cos(2779.235x) + 0.665cos(2817.808x) +
1.537cos(2894.956x) + 0.705cos(2972.103x) + 0.226cos(3087.824x) + 0.007cos(3164.972x) + 0.195cos(3203.545x) + 1.509cos(3280.693x) +
0.891cos(3357.840x) + 0.449cos(3396.414x) + 0.917cos(3473.561x) + 1.105cos(3589.282x) + 3.368cos(3666.430x) + 3.087cos(3743.577x) +
0.874cos(3820.724x) + 0.326cos(3859.298x) + 3.254cos(3936.446x) + 1.651cos(4000.092x)) / x^2 +
```

Рис. 4. Искомое аналитическое представление интерферограммы

Выводы

Аналитическое представление интерферограммы представляет собой сумму тригонометрических функций, деленных на независимую переменную, возведенную в степень от 1 до 4, с аргументами, равными пределам интегрирования полиномов кубической сплайн-функции и с переменными коэффициентами при этих функциях. Значения локальных максимумов функции интерферограммы постепенно уменьшается по мере увеличения независимой переменной, благодаря чему функция приобретает в целом убывающий (не монотонно) характер.

Разработанное ПО позволяет решать задачи анализа исходных спектров фоточувствительных пластин в части получения функций интерферограмм в аналитическом и дискретном видах, что в перспективе должно помочь в определении качества фоточувствительных пластин, т. е. на раннем этапе

прогнозирования эффективности их использования в фотоприемных устройствах ИК диапазона. Полученное аналитическое выражение достаточно громоздкое и требует дальнейшего упрощения путем аппроксимации гиперболическими функциями.

Литература

1. Безверхний В. П., Сединкин И. Б. Математический анализ спектра пропускания вещества в ИК-диапазоне // 78-я региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна-2024»: сборник научных статей / под ред. Р. В. Киричка; сост. Е. А. Аникевич, И. М. Татарникова. Т. 2. СПб. : СПбГУТ, 2024. С. 54–59.
2. Позднякова С. А., Денисюк И. Ю. Теория и техника современного физического эксперимента: учебно-методическое пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 76 с. EDN: ZUZSEN
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., испр. М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1986. 544 с.

Статья поступила 9 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 20 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторах

Сединкин Иван Борисович – студент 3-го курса факультета инфокоммуникационных сетей и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Скалецкая Ирина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики факультета радиоэлектронных систем и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: skaleckaya.ie@sut.ru

Modeling of Interferogram Analytical Functions from Discrete Values

I. Sedinkin, I. Skaletskaya ✉

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. A relevant task in the infrared spectroscopy is the assessment of the effectiveness of applying of photoconductive plates with sputtered layers of lead selenide in photodetection devices, aimed at predicting a quality at the early technological stages of product development. The analysis of plates quality using graphical data provided by current infrared spectroscopy instruments is complicated due to the visual similarity of interferogram graphs for plates of varying quality, which requires the application of analytical functions. The present paper aims to derive an analytical expression of the interferogram functions, represented as a sum of trigonometric functions with variable coefficients. The coefficients can be used to evaluate differences between interferograms for further quality assessment of the photoconductive plates mentioned. **Methods.** There has been proposed to use the cosine Fourier transform for reconstruction of an interferogram obtained from a Fourier-transform spectrometer based on its transmission spectrum, and a software for automating the calculation of coefficients mentioned for multiple input transmission spectrum. **Results.** The study resulted in an analytical expression for the reconstructed interferogram in a general form with variable coefficients unique to each plate. The analytical expression represents as a sum of trigonometric functions, divided by an independent variable raised to an integer power ranging from 1 to 4, with arguments equal to the limits of integration of spline polynomial functions and with variable coefficients. Thus, any interferogram generated according to this model exhibits local maxima, which values gradually decrease as the independent variable increases. The software has been developed to facilitate the calculation of coefficients, enabling both analytical and discrete representations of the interferogram for multiple input transmission spectrum. Examples of the software's output are presented in the form of an interferogram graph, an analytical expression in a text file, and a table with calculated coefficients. **Practical relevance.** The use of an analytical representation instead of a graphical one will quantitatively illustrate the difference between various interferograms that may appear visually similar at first glance. In the future, this will assist to correlate plates of the desired quality with specific physical parameters.

Key words: Fourier transform, Fourier integral, spline, interferogram, transmission spectrum

Information about Authors

Sedinkin Ivan – 3rd Year Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Skaletskaya Irina – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: skaleckaya.ie@sut.ru

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 004.056.53

Задачи защиты систем виртуализации

Дюсметова А. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Виртуализация, будучи ключевым компонентом современных IT-решений, представляет собой сложную систему, в которой различные элементы взаимосвязаны и взаимодействуют друг с другом. Это делает виртуальные инфраструктуры особенно уязвимыми к разнообразным атакам и угрозам, комплексный анализ которых позволит выявить и классифицировать основные задачи защиты систем виртуализации. **Целью работы** является идентификация уязвимых мест во всей виртуальной инфраструктуре для оценки текущего уровня безопасности и разработки рекомендаций для улучшения защиты виртуальных систем. **Используемые методы:** решение поставленной задачи основано на анализе виртуальной инфраструктуры, разделенной на сегменты, каждый из которых требует индивидуального подхода к обеспечению безопасности. Подход с разделением инфраструктуры на зоны способствует направленной защите и оптимизации ресурсов безопасности, позволяя эффективно распределять их в зависимости от важности и рисков каждой зоны. **Результат:** проведенный анализ угроз демонстрирует, что каждая составляющая виртуальной системы подвержена рискам атак или несанкционированного доступа к хранимой и передаваемой информации. Угрозы могут быть направлены как на аппаратную, так и на программную часть инфраструктуры и имеют разнообразный характер.

Ключевые слова: виртуализация, гипервизор, аутентификация, виртуальная машина, защита данных, конфиденциальность, целостность

Актуальность темы

Актуальность данной темы обусловлена тем, что виртуализация позволяет объединить различные вычислительные ресурсы в централизованную инфраструктуру, что значительно упрощает администрирование и масштабирование [1]. Этот подход повышает эффективность использования оборудования, снижает эксплуатационные расходы, упрощает резервное копирование и восстановление информации. В дополнение к этому изоляция виртуальных машин (VM) и приложений создает барьер для распространения атак: в случае взлома воздействие ограничивается только одним приложением на одной операционной системе. При разграничении виртуальной инфраструктуры обеспечивается доступ к системе для пользователей без раскрытия им критической информации. В случае заражения VM ее можно оперативно вернуть к состоянию до компрометации, что ускоряет восстановление работоспособности [2]. Более того, виртуализация позволяет сократить количество физического оборудования, что упрощает инфраструктуру, снижая затраты на эксплуатацию и улучшая физическую безопасность – меньше устройств означает меньше потенциальных точек доступа, а также меньшую потребность в центрах обработки данных. В совокупности эти аспекты делают виртуализацию привлекательной для компаний, стремящихся к обеспечению повышенной безопасности обрабатываемой информации и оптимизации

Библиографическая ссылка на статью:

Дюсметова А. А. Задачи защиты систем виртуализации // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 9. EDN: NJYZEU

Reference for citation:

Dyusmetova A. Virtualization System Protection Task // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 9. EDN: NJYZEU

управления ресурсами. Однако с широким распространением виртуальных сред появляется и новый уровень угроз, что делает вопрос безопасности виртуализации критически важным.

К мерам защиты виртуальных инфраструктур (как отдельных VM, так и гипервизоров) относится предохранение от несанкционированного доступа к информации, утечки данных, различных атак, использующих уязвимости или вредоносный код. Эти меры помогают поддерживать безопасность данных и ресурсов, что особенно важно в виртуализированных средах, где любое нарушение может затронуть множество систем и сервисов одновременно [3]. На рисунке 1 представлен пример схемы виртуальной инфраструктуры, где за внешним периметром сети администрирования находится рабочее место администратора виртуальной инфраструктуры (АВИ), внутри периметра средство защиты информации (СЗИ), за средством защиты и соответственно во внутреннем периметре находятся гипервизоры (ESXi серверы) и VM.

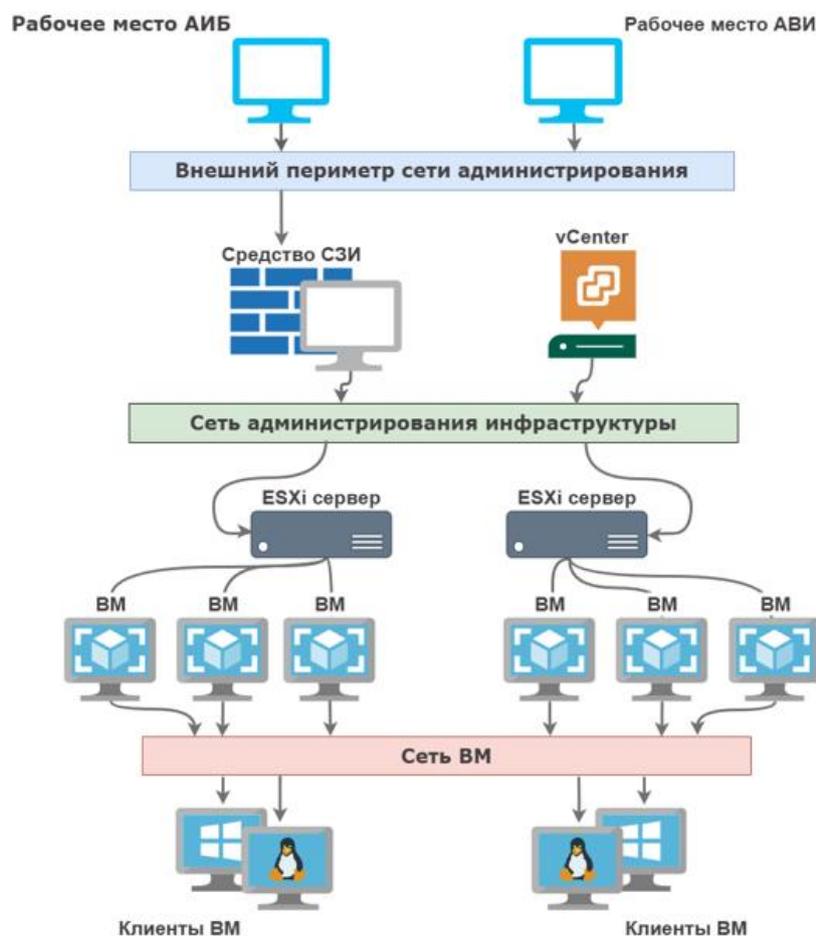


Рис. 1. Схема виртуальной инфраструктуры

Задачи защиты систем виртуализации

Задачи защиты систем виртуализации подразделяются на:

- противодействие нарушению работы аппаратных компонентов;
- обеспечение управления доступом и разграничения доступа;
- обеспечение целостности и конфиденциальности данных;
- обеспечение отказоустойчивости и резервирования;
- обеспечение защиты сетевой инфраструктуры;
- контроль виртуальной инфраструктуры.

В данной работе исследуются способы защиты, не требующие дополнительного функционала от платформ виртуализации: рассматривается подход, основанный на применении принципов безопасности.

Нарушения работы аппаратных компонентов

Сбой в работе сервера или компьютера, связанный с его аппаратными частями, может привести к нарушению функционирования всех запущенных на нем ВМ. Аппаратные сбои, такие как отказы процессоров, памяти или дисков, могут иметь разрушительные последствия для виртуализированных систем. Поскольку данные системы тесно связаны между собой (рисунок 2), нарушение работы основы повлечет за собой сбой всей системы.

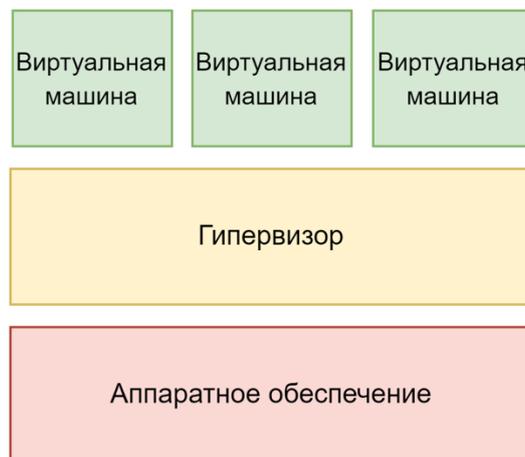


Рис. 2. Схема виртуализации для гипервизора, исполняемого на аппаратном уровне

Также ВМ, работающие на сервере виртуализации, могут быть связаны виртуальными каналами передачи данных, которые эмулируют реальные телекоммуникационные сети. При переносе вычислительных ресурсов в виртуальное пространство важно сохранить все коммуникации на прежнем уровне, обеспечивая соответствие существующим условиям коммутации и маршрутизации, а также эффективную фильтрацию трафика [4].

Одним из основных рисков остается использование плохо защищенных ВМ с некорректными настройками безопасности. Уязвимости, такие как слабые пароли или отсутствие актуальных патчей, делают их легкой мишенью для злоумышленников. Также важно учитывать риски сетевых атак между ВМ, так как вирусные заражения или другие формы атак могут быстро распространяться по всей инфраструктуре, нарушая работу системы.

Для предотвращения таких угроз требуется внедрение сетевой изоляции, регулярный мониторинг и контроль за настройками безопасности ВМ.

Управление доступом и контроль

Одной из ключевых задач защиты систем виртуализации является обеспечение строгого управления доступом к виртуальным ресурсам, часто содержащим конфиденциальную информацию. Для предотвращения несанкционированного доступа, способного привести к утечкам данных или нарушению их целостности, используется многоуровневая аутентификация, включающая двухфакторные механизмы, смарт-карты или токены (рисунок 3) [5]. Эти меры позволяют минимизировать вероятность несанкционированного доступа даже при компрометации учетных записей.

Ролевой доступ обеспечивает пользователям доступ только к тем ресурсам, которые необходимы для выполнения их обязанностей. Для повышения контроля над действиями пользователей важно внедрить систему мониторинга и аудита, которая фиксирует все операции и позволяет проводить их анализ в случае инцидентов. Особое внимание уделяется защите консолей управления, поскольку их компрометация может привести к полному контролю злоумышленника над инфраструктурой [6].



Рис. 3. Схема работы с токеном

Обеспечение целостности и конфиденциальности данных

Некачественное разграничение доступа или нарушение правил безопасности может привести к утечке данных и компрометации всей инфраструктуры. Несанкционированный доступ к сети хранения образов VM создает серьезные риски, позволяя злоумышленникам получить доступ к критически важным данным и управлению системой, что может привести к сбоям и утечкам.

Помимо этого, несанкционированный доступ к консоли управления VM или их настройкам создает угрозу перехвата управления. Злоумышленники, получившие доступ к конфигурациям, могут изменить настройки или получить доступ к конфиденциальным данным, что ставит под угрозу безопасность всей виртуальной среды.

Виртуализированные среды часто содержат конфиденциальные данные, включая персональную информацию. Для их защиты необходимо строгое разграничение прав доступа, шифрование информации и соблюдение требований законодательства по защите персональных данных. Нарушение конфиденциальности данных может повлечь за собой юридические и репутационные риски, поэтому важно уделять внимание обеспечению безопасности на каждом этапе управления данными.

Образы VM, содержащие конфиденциальные данные, могут быть подвержены несанкционированному копированию или искажению, что создает угрозу безопасности [4].

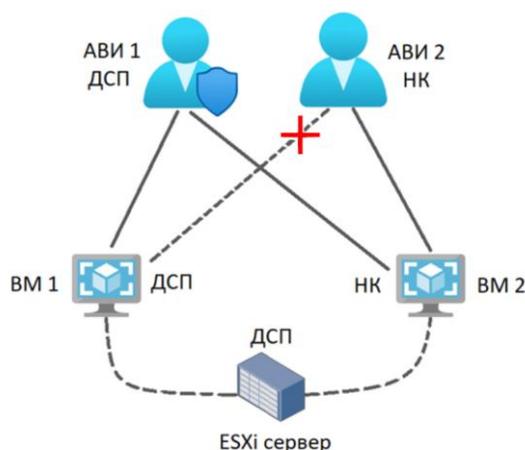


Рис. 4. Пример обеспечения конфиденциальности данных

Пример разграничения конфиденциальной информации представлен на рисунке 4: администратор виртуальной инфраструктуры (АВИ) с уровнем доступа «для служебного пользования» (ДСП) имеет доступ к информации с таким же уровнем и уровнем ниже, но АВИ с уровнем «неконфиденциально» (НК) не имеет доступа к информации уровнем выше. Уничтожение или повреждение носителей данных с образами ВМ может привести к потере информации и отказу в доступе к ВМ. Чтобы минимизировать такие риски, важно использовать надежное резервное копирование и механизмы контроля целостности данных, такие как хэш-суммы и цифровые подписи.

Уровни конфиденциальности, их количество и характеристика определяются лицом, ответственным за безопасность или администрирование виртуальной инфраструктуры. Например, уровни могут разделиться следующим образом: неконфиденциальная информация, конфиденциальная информация, информация для служебного пользования, секретная информация и совершенно секретная информация. ВМ, содержащие данные разных уровней конфиденциальности, должны быть изолированы друг от друга для предотвращения утечек информации в случае компрометации одной из них. При миграции данных между ВМ необходимо применять шифрование, чтобы исключить риск перехвата.

Отказоустойчивость и резервирование

Необходимость в отказоустойчивости становится критически важной в условиях высокой зависимости организаций от виртуальных систем [6]. Сбои в сетевых коммуникациях, оборудовании или программном обеспечении могут вывести из строя всю инфраструктуру [2]. Для обеспечения непрерывности работы применяются механизмы резервирования сетей. Дублирование серверов (рисунок 5), сетевых путей и хранилищ позволяет свести к минимуму влияние аппаратных неисправностей.

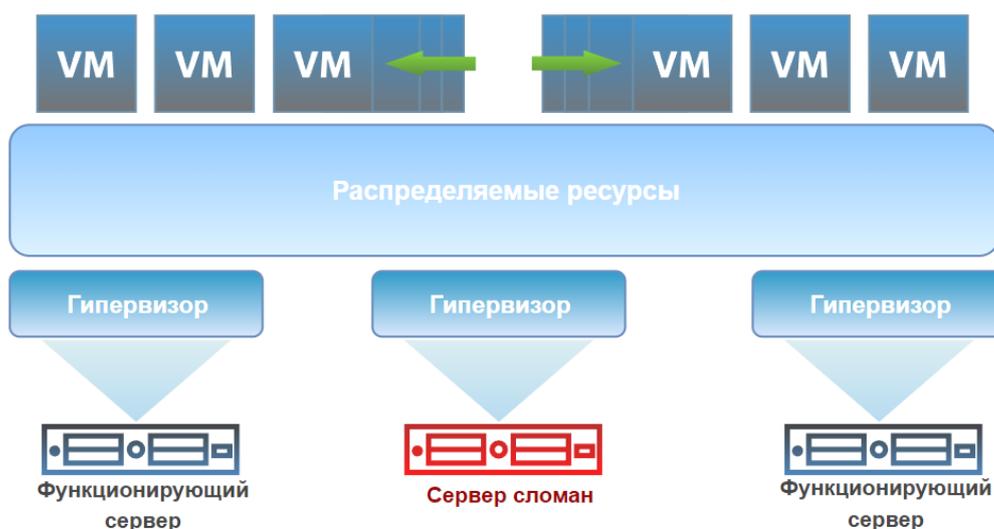


Рис. 5. Пример резервирования серверов

Регулярное резервное копирование данных помогает избежать их утраты и обеспечивает возможность восстановления в случае повреждений. Планирование включает разработку сценариев восстановления инфраструктуры после критических инцидентов, таких как аварии или атаки. Системы мониторинга в реальном времени позволяют оперативно выявлять неисправности и предотвращать их распространение.

Защита сетевой инфраструктуры

Виртуальные сети, обеспечивающие взаимодействие между ВМ, также нуждаются в надежной защите. Одной из основных мер является изоляция сетевых сегментов, которая предотвращает несанкционированный доступ к чувствительным данным. Виртуальные межсетевые экраны играют важную роль в блокировке негативного трафика. Фильтрация трафика позволяет ограничить доступ к критически

важным ресурсам, что дополнительно защищает инфраструктуру от атак. Вредоносное программное обеспечение, распространяющееся через виртуальные сети, представляет значительную угрозу, поэтому важно использовать антивирусные решения и разграничение трафика между ВМ [7].

Контроль виртуальной инфраструктуры

Эффективное управление виртуальной инфраструктурой подразумевает не только контроль ее безопасности, но и предотвращение неконтролируемого роста числа ВМ. Создание избыточного количества ВМ может привести к повышенной нагрузке на оборудование и усложнению управления системой. Важной задачей является управление развертыванием новых ВМ с применением систем автоматизации, которые позволяют отслеживать ресурсы и их использование. Также необходимо планировать нагрузку на оборудование, чтобы избежать избыточного потребления ресурсов и поддерживать стабильную работу всей инфраструктуры. Использование систем управления жизненным циклом ВМ упрощает контроль над всеми этапами их работы, от развертывания до завершения.

Заключение

Виртуальные среды обеспечивают гибкость и масштабируемость, но при этом они уязвимы для различных видов атак и технических сбоев, поскольку множество ВМ работают на общем аппаратном оборудовании под управлением гипервизора. Последний является одной из ключевых точек безопасности, поэтому основное внимание уделяется его защите, а также поддержанию его надежной изоляции от других элементов системы.

Таким образом эффективная защита ВМ предполагает не только обеспечение их изоляции друг от друга и от гипервизора, но и контроль доступа, регулярное обновление программного обеспечения и мониторинг безопасности. Использование многоуровневой аутентификации, разграничения доступа, разделения сети на сегменты позволяет сократить риск несанкционированного доступа. Важнейшим элементом обеспечения безопасности является управление доступом и аудит всех действий в виртуализированной среде. Виртуальные сети, которые связывают ВМ, также подвержены угрозам. Защита сетевой инфраструктуры требует применения механизмов шифрования, изоляции сетевых сегментов и регулярного мониторинга трафика. Важнейшим элементом обеспечения безопасности является управление доступом и аудит всех действий в виртуализированной среде.

Литература

1. Virtualization Security – защита виртуализации // Cloud Networks. 2023. URL: <https://cloudnetworks.ru/inf-bezопасnost/virtualization-security> (дата обращения 02.11.2024)
2. Средство защиты информации vGate R2. Руководство администратора // Код безопасности. 2021. URL: <https://www.securitycode.net/upload/iblock/522/vGate%20R2%20vSphere%20-%20Руководство%20администратора%20-%20Установка,%20настройка%20и%20эксплуатация.pdf> (дата обращения 02.11.2024)
3. Безопасность Виртуализации. Ч. 1 // Habr.com. 2014. URL: <https://habr.com/ru/articles/243845> (дата обращения 02.11.2024)
4. Угрозы ИБ систем виртуализации и современные средства защиты // Information Security. 2014. URL: <https://lib.itsec.ru/articles2/Oborandteh/ugrozy-ib-sistem-virtualizatsii-i-sovremennye-sredstva-zaschity> (дата обращения 02.11.2024)
5. Курносов К. В. Методика оценки безопасности информационных систем, построенных с использованием технологий виртуализации // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019. Т. 22. № 1. С. 37–44. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-37-44. EDN: SXRVUE
6. Печенкина А. В., Селифанов В. В. Системы обеспечения безопасности, применяемые при использовании технологии виртуализации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 150–158. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-6-2-150-158. EDN: OULNUQ
7. Иващенко В. В., Газизов А. Р. Угрозы и методы обеспечения информационной безопасности виртуальных сред // Вестник науки. 2018. Т. 3. № 7. С. 88–91. EDN: YLJDNB

Статья поступила 15 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 24 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторе

Дюсметова Азалия Айдаровна – студент 1-го курса магистратуры (группа ИКТБ-47м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: dusmetova.aa@sut.ru

Virtualization System Protection Task

Dyusmetova A.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem Statement. Virtualization, being a key component of modern IT solutions, is a complex system in which various elements are interconnected and interact with each other. This makes virtual infrastructures particularly vulnerable to a variety of attacks and threats, a comprehensive analysis of which will identify and classify the main tasks of protecting virtualization systems. **Purpose.** The goal is to identify vulnerabilities in the entire virtual infrastructure in order to assess the current level of security and develop recommendations for improving the protection of virtual systems. **Methods used:** solving the problem is based on the analysis of a virtual infrastructure divided into segments, each of which requires an individual approach to security. The approach of dividing infrastructure into zones contributes to the targeted protection and optimization of security resources, allowing them to be effectively distributed depending on the importance and risks of each zone. **Results.** The threat analysis demonstrates that each component of the virtual system is subject to the risks of attacks or unauthorized access to stored and transmitted information. Threats can be directed at both the hardware and software parts of the infrastructure and are of a diverse nature.

Key words: virtualization, hypervisor, authentication, virtual machine, data protection, confidentiality, integrity

Information about Author

Dyusmetova Azaliya – 1st Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: dusmetova.aa@sut.ru

ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 28.12.2024

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Берзина Е.В.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**

Изображение на обложке с сайта <http://www.freepik.com>