

**Акционерное общество  
«Научно-производственное  
объединение  
Государственный оптический  
институт им. С.И. Вавилова»**  
(АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»)  
ИНН/КПП 7811483834/781101001,  
ОКПО 07505944,  
ОГРН 1117847038121  
ул. Бабушкина, д.36, корпус 1,  
Санкт-Петербург, 192171  
тел.: (812) 386-73-16,  
факс: (812) 560-10-22;  
e-mail: [info@goi.ru](mailto:info@goi.ru)

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»



/ К.В. Дукельский /

Исх. № 2864 от 08.12.2020  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» на диссертацию Гизатулина Азата Ринатовича на тему «Генерация несущих колебаний с орбитальным угловым моментом в гибридных радио-оптических системах связи», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

#### Актуальность темы исследования

На сегодняшний день можно уверенно выделить отдельное научное направление, посвященное вопросам моделирования и разработки устройств формирования мод с заданной конфигурацией поля в заданной среде распространения для различных частных приложений волоконной оптики и фотоники. При этом сама технология модового мультиплексирования рассматривается как одно из перспективных решений увеличения пропускной способности каналов связи инфо- и телекоммуникационных сетей нового поколения, ориентированных на экстремально высокую пропускную способность. С этой точки зрения отдельный интерес в рамках данного

УГАТУ  
Вх. № 154-13  
от 09.12.2020

направления представляет технология модового мультиплексирования по орбитальному угловому моменту (ОАМ – Optical Angular Momentum), привлекательность которой заключается в полностью оптическом способе уплотнения канала передачи данных и, как результат, в отличие от ММО, не требующей применения каких-либо вычислительных ресурсов. В свою очередь, применение мультиплексирования по модам ОАМ в сочетании с волоконно-эфирными системами передачи рассматривается как перспективная инфраструктура сетей 5G. Все это требует разработки новых способов и реализующих их устройств формирования сигналов, переносящих ОАМ как в оптическом, так и в радиочастотном диапазонах, что не представляется возможным без создания соответствующего математического описания их функционирования и проведения комплекса теоретических исследований физических процессов распространения электромагнитных волн в этих устройствах и их отдельных компонентах. Вышесказанное определяет актуальность диссертационной работы Гизатулина Азата Ринатовича, непосредственно посвященной решению задачи моделирования процессов формирования электромагнитных волн с ОАМ в приложении к волоконно-эфирным системам связи.

### **Оценка структуры и содержания работы.**

Диссертационная работа Гизатулина А.Р. состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Текст исследования представлен на 146 страницах, содержит 73 рисунка и 8 таблиц. Список использованной литературы включает 124 источника.

Первая глава посвящена обзору и сравнительному анализу существующих методов формирования электромагнитного излучения с ОАМ как в оптическом, так и радиочастотном диапазонах. Отдельно рассмотрены подходы моделирования и анализа влияния изгибов волоконного световода на параметры оптического излучения. Приведено математическое описание полей мод ОАМ в слабонаправляющих оптических волокнах (ОВ) со ступенчатым профилем показателя преломления.

Вторая глава посвящена разработке оригинального подхода формирования мод ОАМ с помощью спиральной волоконной решетки Брэгга (СВРБ). Представле-

но математическое описание процессов сложения поперечных мод ОВ в моду ОАМ, разработана модель описанной волоконно-оптической структуры на основе СВРБ на основе матричного подхода теории связи мод. Приведены результаты проведенных теоретического исследования влияния параметров СВРБ на коэффициент отражения и эффективность конвертации поперечных мод ОВ в моду ОАМ.

В третьей главе проводится теоретическое исследование влияния микроизгибов ОВ на процессы взаимодействия и смещения модовых составляющих оптического сигнала и дифференциальные модовые потери, в том числе, и с точки зрения показателей качества волоконно-оптических систем передачи с модовым мультиплексированием каналов связи.

Четвертой главе рассмотрено конвертирование оптических вихрей в радиочастотный диапазон с помощью нелинейного кристалла, а также предложена структура передающего сегмента радио-оптической системы связи на основе предложенных решений.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждена применением известных теоретических положений. Автор корректно использует научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. В диссертации изучены и критически проанализировано достаточно большое количество научных работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных вопросам моделирования процессов взаимодействия и смещения модовых составляющих оптического излучения при распространении в ОВ, а также формирования и мод ОАМ в оптических системах и средах.

### **Научная новизна полученных результатов**

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан метод формирования моды ОАМ путем конвертирования поперечной направляемой моды ОВ нулевого азимутального порядка в моду ОАМ первого азимутального порядка, который, в отличие от известных решений, базируется на применении оригинальной, предложенной автором, СВРБ;
2. Разработана математическая модель СВРБ, базирующаяся на матричном подходе теории связи мод, и на ее основе – методика расчета параметров и характеристик СВРБ как пассивного волоконно-оптического элемента;
3. Разработан метод управления (в частности, возбуждения и подавления) модами высших порядков волоконного световода с помощью наведения периодической деформации на ОВ с заданными параметрами, в том числе, характером, степенью, периодом;
4. Предложена структура передающего сегмента гибридной волоконно-эфирной системы связи на базе мод ОАМ оптического излучения, отличающаяся от известных решений включением СВРБ, периодической деформации ОВ, а также конвертера на базе периодически поляризованного нелинейного кристалла, обеспечивающего перенос спектра излучения моды ОАМ из оптического в радиочастотный диапазон, которая, благодаря предложенному решению, позволяет увеличить число пространственных каналов и, как результат, повысить общую пропускную способность волоконно-эфирных систем связи.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке методов и подходов формирования мод ОАМ и конвертации спектра оптического излучения этих мод из оптического в радиочастотный диапазон, а также математического аппарата описания реализующих их волоконно-оптических структур и моде-

лирования процессов взаимодействия и смешения модовых составляющих оптического сигнала в этих структурах.

Практическая значимость диссертационной работы также не вызывает сомнений и заключается в разработке практических рекомендаций по проектированию СВРБ и передающего сегмента волоконно-эфирной системы связи на его основе, использующей технологию пространственного мультиплексирования на модах ОАМ.

### **Апробация полученных результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и всероссийских конференциях: XIV международной научной конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2016», Самара 2016; X всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа 2016; Международной научно-технической конференции «Прикладная электро-динамика, фотоника и живые системы (ПРЭФЖС-2017)», Казань 2017; XX международной конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2018», Уфа 2018; XXI международной конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2019», Казань 2019; XXVII международной конференции «Telecommunications Forum (TEL-FOR)», Serbia, Belgrade 2019.

По теме диссертации опубликовано 22 печатных работ, из них 4 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 – в журналах, индексируемых в БД Web of Science и Scopus. Разработанное программное обеспечение, используемое в рамках имитационного моделирования защищено Свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201666318.

Несомненно следует отметить, что отдельные результаты исследований данной диссертационной работы были получены в рамках исследований, поддержанных грантом РНФ № 18-19-00123 «Разработка принципов построения и моделирование многоканальной телекоммуникационной системы, работающей по технологии «Радио-по-волокну» в диапазоне частот 75-110 ГГц, на основе управления спин-

орбитальным состоянием электромагнитного поля»; грантом Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ #FEUE-1010-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах»; госзадания «Развитие теории и разработка технических принципов формирования, передачи и преобразования спиральных пучков в волоконно-оптических телекоммуникационных системах» 2014/240 2014-2016 г.; госзадания «Разработка принципов синтеза радио-оптических информационно-телекоммуникационных систем с управлением по угловому моменту электромагнитного поля на основе спинорного представления уравнений Максвелла» 8.5701.2017/БЧ 2017-2019 г.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. Не представлены данные, какой конкретно периодически-поляризационный кристалл ниобата лития предполагается использовать в предложенной в главе 4 схеме передающего сегмента волоконно-эфирной системы связи для декларируемой конвертации спектра формируемой моды ОАМ из оптического в радиочастотный диапазон;

2. В рамках работы подразумевается, что диэлектрическая проницаемость ОВ непосредственно зависит от всех трех координат, однако в уравнениях при разработке математического аппарата в главе 2, среда рассматривается как изотропная;

3. Представленные в главе 3 результаты расчетов графиков зависимостей параметров связи мод от радиуса изгиба ОВ построены в диапазоне 0...100 мм, в первой половине которого, исходя из практики, с учетом внешнего диаметра по оболочке типового телекоммуникационного ОВ 125 мкм, структура кварцевого волоконного световода будет разрушаться;

4. Несомненный интерес, в рамках данной работы, представляет экспериментальная верификация и практическая реализация разработанного метода формирования мод ОАМ на базе предложенной СВРБ, однако автор ограничился теоретическими исследованиями;

5. В продолжение предыдущего замечания, следовало бы привести в работе практические рекомендации по реализации записи СВРБ;

6. Следовало бы дополнительно провести исследование потенциальных возможностей сохранения структуры мод ОАМ при передаче по линиям с кварцевыми ОВ соответствующей конструкции, для которых неизбежно наличие как собственной нерегулярности, микро- и макро-изгибов, так и различных стыковых неоднородностей;

7. Из текста диссертации непонятно, каким образом было получено численное приращение значения группового показателя преломления ОВ после процедуры записи СВРБ, приведенное на рис. 2.5, относительно опорного.

Отмеченные недостатки носят частный характер, не снижают научную значимость диссертационной работы Гизатулина А.Р. и не влияют на общую положительную оценку проведенного исследования.

### **Заключение**

Диссертация Гизатулина А.Р., представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи формирования мод ОАМ в радио-эфирных системах связи с помощью пассивных волоконно-оптических структур, обеспечивающих повышение пропускной способности каналов этих систем, что непосредственно относится к приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации. Разработанные в диссертации оригинальные подходы моделирования устройств формирования и конвертации мод ОАМ могут быть использованы для проектирования новых модулей передачи волоконно-эфирных систем связи, использующих технологию пространственного мультиплексирования, в том числе и в виде практических рекомендаций по реализации отдельных технических решений.

Отраженные в диссертационной работе положения соответствуют пунктам 1 и 11 области исследования специальности 05.12.13:

1. Исследование новых физических процессов и явлений, позволяющих повысить эффективность работы сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

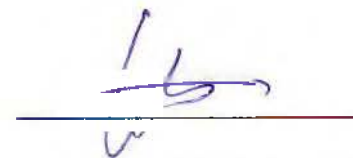
11. Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования.

Диссертация Гизатулина А.Р. является законченным научным исследованием, обладающим научной новизной и практической значимостью, что соответствует требованиям п. 9, 10, 11 «Положения о присуждении ученых степеней» (ред. 21.04.2016), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Отзыв обсужден на заседании НТС АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова» 02.12.2020, протокол № 3.

Отзыв составлен:

Кандидат технических наук,  
Тер-Нерсисянц Егише Вавикович,  
Ведущий научный сотрудник  
научного отделения №6 «ВОЛОКНО»  
АО «Научно-производственное объединение  
Государственный оптический институт  
им. С.И. Вавилова»



Кандидатская диссертация защищена по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.  
Телефон рабочий: (812)676-54-61, адрес эл. почты: ter@goi.ru

Кандидат физико-математических наук,  
Сандуленко Александр Витальевич,  
Ведущий научный сотрудник  
научного отделения №5 «КРИСТАЛЛ»  
АО «Научно-производственное объединение  
Государственный оптический институт  
им. С.И. Вавилова»



Кандидатская диссертация защищена по специальности 01.04.05 – Оптика.  
Телефон рабочий: (812)449-46-99, адрес эл. почты: sandulenko@goi.ru

Подпись руки Тер-Нерсисянца А.В. заверено  
Директор производственного отдела  
Сандуленко А.В.  
Ромаша А.А.

