

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

д.т.н., доцента Григорова Игоря Вячеславовича на диссертацию Гизатулина Азата Ринатовича на тему «Генерация несущих колебаний с орбитальным угловым моментом в гибридных радио-оптических системах связи» по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций на соискание ученой степени кандидата технических наук

#### **Актуальность темы исследования.**

Диссертация Гизатулина А.Р. «Генерация несущих колебаний с орбитальным угловым моментом в гибридных радио-оптических системах связи» посвящена разработке способов формирования вихревых несущих колебаний как в оптическом, так и в радиодиапазонах (порядка ТГц). Целью работы является повышение пропускной способности радио-оптических систем связи.

В настоящее время растет спрос на широкополосные мультимедийные услуги, что связано с возрастающим объемом передаваемых данных в рамках развития цифровой экономики и расширения спектра услуг (видео-конференцсвязь, телемедицина, онлайн-трансляции и т.д.). Широкое распространение получили системы связи с одновременным мультиплексированием по времени (TDM) и по длине волны (WDM). Как показывают последние исследования и прогнозы, текущий технологический уровень волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) уже практически полностью исчерпал ресурсы временной и частотной областей и дальнейшее повышение скорости передачи в волокне ограничено нелинейностью керровского типа (так называемый нелинейный предел Шеннона). Данное обстоятельство заставляет исследователей искать альтернативные физические параметры электромагнитных (ЭМ) волн, которые могут быть использованы для передачи информации.

В последние годы в технологически развитых странах наблюдается чрезвычайный рост количества научно-исследовательских тематик и объемов проводимых НИР в области оптических систем связи на основе мультиплексирования с пространственным разделением каналов (Spatial Division Multiplexing, SDM) или модовым мультиплексированием (MDM). Применение мультиплексирования с пространственным разделением в волоконно-оптических телекоммуникационных системах потенциально способно обеспечить многократное по-



вышение скорости передачи по одному ОВ. В частности, высокий интерес исследователей вызывает орбитальный угловой момент (ОУМ) электромагнитных колебаний, проявляющийся в вихревой дислокации волнового фронта. Одной из актуальных задач в этой области является генерация ОУМ-колебаний. Существует ряд предложенных концепций, которые, однако, до сих пор не нашли коммерческого воплощения в силу дороговизны и/или сложности практической реализации, а проблема преобразования ОУМ излучения из оптического в радиодиапазон является малоизученной. Кроме того, большинство методов формирования оптического ОУМ-излучения основано на использовании компонентов «free-space» оптики (оптики в свободном пространстве), которые не могут быть интегрированы в существующие системы связи. В связи с этим в рамках данной работы предлагаются способы формирования электромагнитных колебаний, переносящих ОУМ как в радио-, так и в оптическом диапазонах, отличающиеся потенциальной возможностью интеграции в уже развернутые системы связи. Кроме того, рассмотрено также влияние эксплуатационных факторов на структуру ОУМ-сигналов, передаваемых по оптическому волокну, например, микроизгибов оптоволокна. В связи с этим, работа Гизатулина А.Р. посвящена решению актуальных научно-технических задач в области развития радиооптических систем 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 анализу существующих методов решения поставленных задач (т.е. методов формирования электромагнитного излучения, переносящего орбитальный угловой момент как в оптическом, так и радиодиапазоне, а также текущее состояние исследований изгибов оптического волокна), рассматриваются их достоинства и недостатки, а также формулируются основы математического аппарата, которые были использованы в рамках исследования.

Вторая глава посвящена волоконно-оптической генерации ОУМ-сигнала с помощью предлагаемой конфигурации ВВБР, приводится математическая модель ВВБР, а также результаты имитационного моделирования.

В третьей главе производится исследование влияния изгибов оптического волокна на модовый состав и модозависимые потери, производится расчет интегралов наложения между модами различных порядков в изогнутом волокне.

В четвертой главе рассмотрено конвертирование оптических вихрей в радиодиапазон с помощью нелинейного кристалла, а также предложена структура передающего сегмента радиооптической системы связи на основе предложенных решений.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

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

Обоснованность основных выводов и результатов, полученных в рамках диссертации Гизатулина А.Р., основана на использовании общепринятых методов математического анализа, линейной алгебры и дифференциальных уравнений. Свойства электромагнитных полей были проанализированы и исследованы с помощью хорошо известного аппарата теории смешанных мод («coupling mode theory»), а также приближения слабонаправляющего волокна. Анализ трехволнового смещения в нелинейной среде основан на параксиальном приближении. Имитационное моделирование проводилось с использованием пакета моделирования «Matlab».

**Достоверность и новизна полученных результатов.**

Научная новизна диссертации Гизатулина А.Р. заключается в следующем:

– Разработан метод конвертирования оптоволоконной моды нулевого порядка в моду первого порядка, основанный на использовании вихревой брэгговской решетки (ВВБР), отличающийся формированием специального профиля показателя преломления ВВБР и применением матричного подхода к описанию ВВБР с учетом аподизации и чирпирования, позволяющий формировать вихревые моды оптического волокна и рассчитывать параметры ВВБР как пассивного волоконно-оптического элемента.

– Разработан метод генерации и метод подавления волоконных мод высших порядков, основанный на управляемой деформации оптического волокна, отличающийся учетом осциллирующего характера смещения мод в зависимости от радиуса изгиба волокна и позволяющий обеспечить перераспределение энергии между модами разных порядков.

– Разработан метод конвертирования оптического вихревого излучения в радиодиапазон, основанный на трехволновом смещении в нелинейной диэлектрической среде, учитывающий сохранение орбитального углового момента и позволяющий формировать вихревое радиоизлучение.

– Предложена структура передающего сегмента гибридной радио-оптической системы связи, основанная на применении электромагнитных колебаний с орбитальным угловым моментом, отличающаяся применением ВВБР, периодической деформации оптического волокна, радио-оптического конвертера и позволяющая повысить канальную пропускную способность телекоммуникационных систем связи за счет увеличения числа пространственных каналов.

Достоверность полученных результатов обусловлена тем, что теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры Телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО УГАТУ, а также на 6 международных и всероссийских научно-технических конференциях.

**Автореферат** диссертации соответствует ее содержанию.

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

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных Гизатулиным А.Р. в рамках диссертационной работы, заключается в том, что разработан метод конвертирования оптоволоконной моды нулевого порядка в моду первого порядка, основанный на ВВБР со специальным профилем показателя преломления. В описании ВВБР используется матричный подход, включающий в себя функции аподизации и чирпирования и позволяющий рассчитать параметры волоконного формирователя вихревых мод; разработан метод генерации и метод подавления волоконных мод высших порядков, основанный на использовании управляемой деформации волокна и позволяющий добиться контроли-

руемого перераспределения энергии между модами разных порядков в процессе распространения сигнала по оптическому волокну за счет использования изгибов волокна определенного радиуса, обеспечивающих требуемое перетекание энергии между модами; разработан метод конвертирования оптического вихревого излучения в радиодиапазон, позволяющий сохранить орбитальный угловой момент и основанный на использовании нелинейного кристалла, что позволяет разработать радио-оптический ОУМ-интерфейс без использования фотодетектирования и промежуточной обработки сигнала, а также предложена структура передающего сегмента радио-оптической системы связи, использующей ОУМ-сигналы, отличающаяся применением ВВБР, периодической деформации оптического волокна, нелинейной диэлектрической среды для конвертирования оптического вихревого сигнала в радиодиапазон, что позволяет повысить канальную пропускную способность за счет увеличения числа пространственных каналов.

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

К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. Имеются некоторые орфографические ошибки и опечатки в тексте диссертации.
2. Во второй главе нет описания способа, как изготовить подобную вихревую брэгговскую решетку; результаты моделирования ВВБР как датчика не достаточно полны.
3. Исследование влияния изгибов можно было бы дополнить не только для когерентных систем, но и для модулированных сигналов с широкой полосой частот.
4. В четвертой главе процесс конвертирования рассматривается только в параксиальном приближении; открытым остается вопрос о возможности конвертирования широкополосных сигналов.
5. В работе не указаны способы повышения эффективности конвертирования, полученные значения эффективности слишком низкие для практической реализации; не рассмотрен вопрос ввода излучения в нелинейную среду.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования А.Р. Гизатулина.

### **Общее заключение.**

Диссертация Гизатулина А.Р. на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи формирования вихревых несущих колебаний в радио-оптических системах связи с помощью пассивных элементов, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно: предложенные способы решения данной задачи могут быть использованы в уже инсталлированных и/или будущих волоконно-оптических линиях связи и гибридных радио-оптических системах связи (RoF), что позволит многократно повысить пропускную способность рассматриваемых систем связи. Таким образом, предложенные в работе Гизатулина А.Р. решения и разработки имеют существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:

д.т.н., доцент

Григоров Игорь Вячеславович,  
проректор по воспитательной работе и  
международному сотрудничеству  
профессор кафедры ТОРС  
ФГБОУ ВО «ПГУТИ»

Докторская диссертация защищена  
по специальности 05.12.13 –

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Адрес места основной работы: 443010,

г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 23.

Рабочий телефон: (846) 228 00 14

Адрес эл. почты: igor\_grigorov@mail.ru

