

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Бутова Олега Владиславовича
на диссертационную работу Кравцова Константина Сергеевича «Управление
оптическими полями для задач связи и защиты информации» на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

01.04.21 - Лазерная физика

Диссертационная работа Кравцова К.С. посвящена использованию оптических сигналов и устройств для решения сложных задач, связанных с передачей и обработкой информации. Данное направление активно исследуется на протяжении трех последних десятилетий и актуальность таких исследований постоянно возрастает. Первоначально, оптические технологии позволяли лишь передавать информацию на ограниченное расстояние, затем появились новые методы мультиплексирования сигналов, позволяющие проводить мультиплексирование сигналов, их полностью оптическое усиление что позволило существенно повысить информационную емкость линий связи. В последнее время все больше внимания уделяется обработке информации непосредственно в оптическом виде, которое может производиться на порядки быстрее, чем позволяют электронные устройства. В диссертации был решен ряд таких задач, имеющих важное значение для развития современных информационных технологий.

Диссертация вносит значительный теоретический и практический вклад в развитие квантовой криптографии, оптических информационных технологий в целом. В частности, был предложен эффективный квантовый генератор случайных чисел – одно из ключевых устройств квантовой криптографии, который уже нашел практическое применение в коммерческих устройствах квантовой коммуникации. Кроме того, впервые предложена оптическая модель действующего нейроморфного устройства. Впервые продемонстрирована

реализация прямого и обратного преобразования Фурье в планарных волноводных решетках. Впервые изучено влияние атмосферной турбулентности на пространственно-модовый состав оптического излучения. Впервые реализован экспериментально релятивистский протокол квантового распределения ключей. Новизна предложенных решений не вызывает сомнений. Результаты работ опубликованы в ведущих тематических журналах мирового уровня преимущественно первого и второго квартилей.

Обоснованность и достоверность полученных результатов в большинстве случаев подтверждена полученными экспериментальными результатами. В вопросах, разобранных теоретически, достоверность подтверждается выбранными математическими моделями и представленными выкладками. подача материала позволяет в дальнейшем воспроизвести заявленные результаты, что также свидетельствует об их обоснованности и научной достоверности.

Полученные результаты обладают большой научной значимостью, ряд предложенных идей закладывает основу новым направлениям развития методов передачи и оптической обработки информации, а также методов защиты информации. К неоспоримо сильным сторонам диссертации следует отнести удачное сочетание теоретических изысканий автора с практической реализацией полученных результатов.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных сокращений, списка опубликованных статей, списка зарегистрированных патентов и списка литературы. Объем диссертации составляет 199 страниц, включая 94 рисунка.

Во введении показана актуальность выбранной тематики исследований, основные цели и задачи, рассмотрена научная новизна и степень разработанности темы исследования. Апробация полученных результатов проводилась на

семинарах множества научных учреждений, включая зарубежные; результаты докладывались на ведущих международных конференциях.

Первая глава посвящена планарным оптическим технологиям для модуляции и мультиплексирования в классических линиях связи. Разобран подход к реализации преобразования Фурье с помощью планарных волноводных решеток. На этом принципе представлена экспериментальная реализация технологии ортогонального частотного мультиплексирования для оптических сигналов. Также в первой главе разобрана так называемая цифровая планарная голография, позволяющая реализовывать сложные оптические устройства с широким функционалом на базе относительно простой интегрально-оптической технологии изготовления.

Во второй главе разработан подход к реализации оптического устройства с функционалом элемента нейронной сети. Несмотря на достаточно сложную экспериментальную реализацию, в основе метода лежит идентичность уравнений для определенной модели биологического нейрона и скоростных уравнений для лазерной среды. Это внушает некоторый оптимизм, так как потенциально может позволить реализовывать подобные устройства в интегрально-оптическом исполнении и создавать сложные нейронные сети, непосредственно для оптической обработки информации.

Третья глава посвящена рассмотрению методов распределения ключей шифрования с помощью оптических сигналов в рамках классической физики. Метод основан на взаимности фазово-чувствительного канала связи, амплитудные флуктуации сигнала в котором одинаково проявляются для обоих направлений распространения. Предложен новый метод распределения ключей на основе анализа наблюдаемых амплитудных флуктуаций, результаты которого переводятся в биты секретного ключа, который уникален для пары пользователей. При этом, процедура «подслушивания» таких ключей третьими

лицами требует наличия несоизмеримо более сложной аппаратуры с применением сложных оптических измерений.

Четвертая глава рассматривает влияние турбулентности на атмосферные каналы связи, на пространственный модовый состав излучения. Такая задача рассмотрена впервые и мотивирована развитием квантовой связи, в которой пространственные моды являются удобной и масштабируемой степенью свободы. Проведено сравнение разработанной теоретической модели с результатами экспериментальных измерений в турбулентной камере. Получено достаточно точное соответствие между ними, что свидетельствует о корректности выбранного теоретического подхода.

В пятой главе демонстрируется использование деформируемого зеркала с ограниченным пространственным разрешением для проведения томографии пространственных квантовых состояний. Данный подход позволяет существенно повысить скорость работы и обеспечить проведение поляризационно-нечувствительных измерений по сравнению с традиционным использованием пространственных фазовых модуляторов (SLM).

Шестая глава посвящена квантовой криптографии и сопутствующим технологиям, таким как генерация случайных чисел и реализация активной системы трекинга для каналов связи по открытому пространству. В работе предложена простая модель квантового генератора случайных чисел, основанная на измерении временных интервалов между срабатываниями однофотонного детектора. В дальнейшем, экстрактор случайных чисел преобразует величины измеренных интервалов в случайные биты. Отдельно следует отметить, что разработанный генератор случайных чисел нашел свою практическую реализацию в коммерческих приборах квантового распределения ключей.

Экспериментально продемонстрирована система релятивистской квантовой криптографии по атмосферному каналу связи с активным трекингом.

Показана состоятельность релятивистского подхода и его реализуемость на текущем уровне технологического развития. Также, теоретически рассмотрен протокол квантового распределения ключей на геометрически-однородных квантовых состояниях. Показано, что комбинация использования состояний-ловушек и большего числа возможных квантовых состояний в целом повышает практическую устойчивость квантово-криптографических систем к взлому.

Диссертация не лишена недостатков, а именно:

1. В тексте диссертации в явном виде не отмечен вклад автора в полученные результаты. Так, например, в разделе 1.2, присутствует ссылка только на одну опубликованную работу с 9-ю соавторами. Какова роль и значимость вклада автора в полученные результаты не уточняется.
2. В первой главе следовало бы больше внимания уделить существующим классическим методам мультиплексирования каналов, типа DWDM, а также отметить возможную роль представленных результатов в улучшении существующих систем мультиплексирования. Кроме того, автору следовало бы более четко отметить новизну представленных в первой главе, результатов.
3. Третья глава представляет собой неплохой обзор систем классического распределения ключей. Но из текста главы неочевидно, что принципиально нового было предложено автором.
4. В тексте диссертации встречаются утверждения, такие как «Совсем недавно была продемонстрирована оптическая система OFDM...» или «В настоящее время уже сообщается о волноводных решетках с количеством каналов 128...». При этом приводятся ссылки на работы не моложе 2010 г., а во втором случае – на статью 2001 г. Этот факт не умаляет заслуг автора в получении результатов, которые были новы и

актуальны на то время, но приведенные выше формулировки в диссертационной работе 2022 г. вводят читателя в заблуждение. Вместо фраз: «Совсем недавно» или «в настоящее время» следовало употребить «на момент проведения исследований».

Указанные недостатки не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку диссертации, на значимость и ценность всей работы в целом. Диссертация Кравцова К.С. выполнена на высоком уровне, ее содержание и форма представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к докторским диссертациям. Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации. Автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент,
Заместитель директора по научной работе,
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
доктор физ.-мат. наук



Бутов Олег Владиславович
«22» августа 2022 г.

Адрес: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7.,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук,
тел.: +7 (495) 629 34 47,
e-mail: obutov@cplire.ru