

Оптоэлектронные технологии в инфокоммуникациях: современное состояние и перспективы

М.С.Былина, к.т.н., доцент СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича / BylinaMaria@mail.ru,
С.Ф.Глаголев, к.т.н., доцент СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича / GlagolevSF@yandex.ru

УДК 681.7+621.39+530.145, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.123.7.52.59

Рассмотрены современное состояние, пути и перспективы развития оптоэлектронных технологий для транспортных волоконно-оптических систем связи, обработки изображений и сигналов, квантовых коммуникаций и вычислений.

1. О значении оптоэлектронных технологий в инфокоммуникациях

Трудно переоценить значение инфокоммуникационных технологий (ИКТ) для всестороннего развития человеческого общества. В соответствии с [1] информационно-телекоммуникационные системы отнесены к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в нашей стране.

Особое место в ИКТ занимают оптоэлектронные технологии (ОЭТ). Проекты, связанные с разработкой и производством коммуникационного оборудования, в том числе с использованием оптических, оптоэлектронных и квантовых технологий, отнесены к приоритетным направлениям технологического суверенитета РФ [2].

На основе ОЭТ создаются стационарные наземные и подводные волоконно-оптические системы и сети связи (ВОСС), по которым передается большая часть всемирного трафика. Потребности в количестве и качестве услуг связи растут в геометрической прогрессии. Это требует постоянного развития ОЭТ и внедрения их в ВОСС.

2. Оптоэлектронные технологии для транспортных ВОСС

Современные транспортные ВОСС имеют сложную разветвленную топологию. Основными тенденциями их совершенствования являются: повышение скорости и дальности передачи информации; увеличение объемов информации, передаваемой по одному оптическому волокну (ОВ). Основная технология для транспортных ВОСС – плотное мультиплексирование в волновой области (DWDM). DWDM позволяет организовать одновременную передачу многих высокоскоростных цифровых потоков по одному ОВ, разделяя их по длине волны. Фрагмент структурной схемы ВОСС с DWDM представлен на рис.1.

Информационные потоки, поступающие от клиентского оборудования, преобразуются транспондерами в каналные оптические сигналы на длинах волн [3]. Затем с помощью терминального оптического мультиплексора каналные сигналы DWDM объединяются в групповой оптический сигнал, который усиливается усилителем мощности и попадает в линейный тракт на основе одномодового ОВ. На приемной стороне групповой сигнал

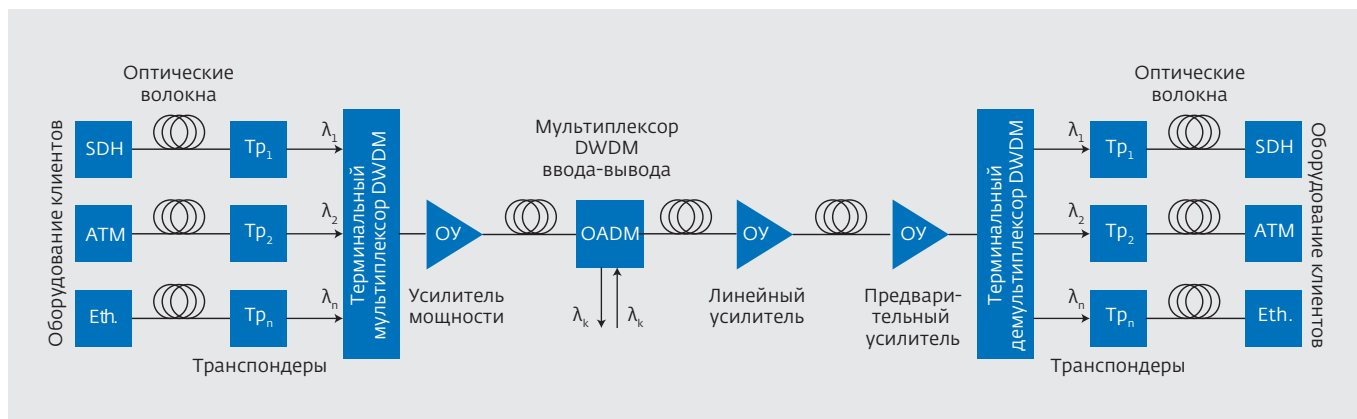


Рис.1. Структурная схема ВОСС с DWDM

разделяется с помощью терминального оптического демultipлексора DWDM на каналные сигналы, которые преобразуются транспондерами в клиентские сигналы и направляются на приемное клиентское оборудование.

Развитие DWDM идет по пути увеличения канальной скорости и количества спектральных каналов, передаваемых по одному ОВ. Отечественная компания "Т8" предлагает серийно выпускаемую систему передачи с канальной скоростью 800 Гбит/с, что соответствует лучшим мировым достижениям [4, 5].

Для увеличения количества спектральных каналов, передаваемых по одному ОВ, расширяется диапазон длин волн, используемых для DWDM. Кроме традиционного C-диапазона (1530–1565 нм) используются диапазоны S (1460–1530 нм), L (1565–1625 нм) и U (1625–1675 нм). На смену частотному плану с фиксированным канальным интервалом (fixed grid) пришел план с переменным

интервалом (flexible grid), позволяющий эффективнее использовать спектральный диапазон [3].

Другой важной тенденцией развития является разработка ВОСС с пространственным мультиплексированием (ПМ) – параллельной передачей нескольких цифровых потоков по разнесенным в пространстве каналам. Простейшей реализацией ПМ является использование нескольких ОВ оптического кабеля. Более сложные реализации ПМ – волокна с несколькими сердцевинами [6, 7, 8] и использование отдельных мод или групп мод в малоимодовых ОВ [9, 10].

При реализации сверхвысокоскоростных систем связи возникает немало проблем, решение которых приводит не только к совершенствованию существующей техники, но и созданию новой. Так, необходимость формирования оптических сигналов со скоростью, превышающей 100 Гбит/с, привела к появлению

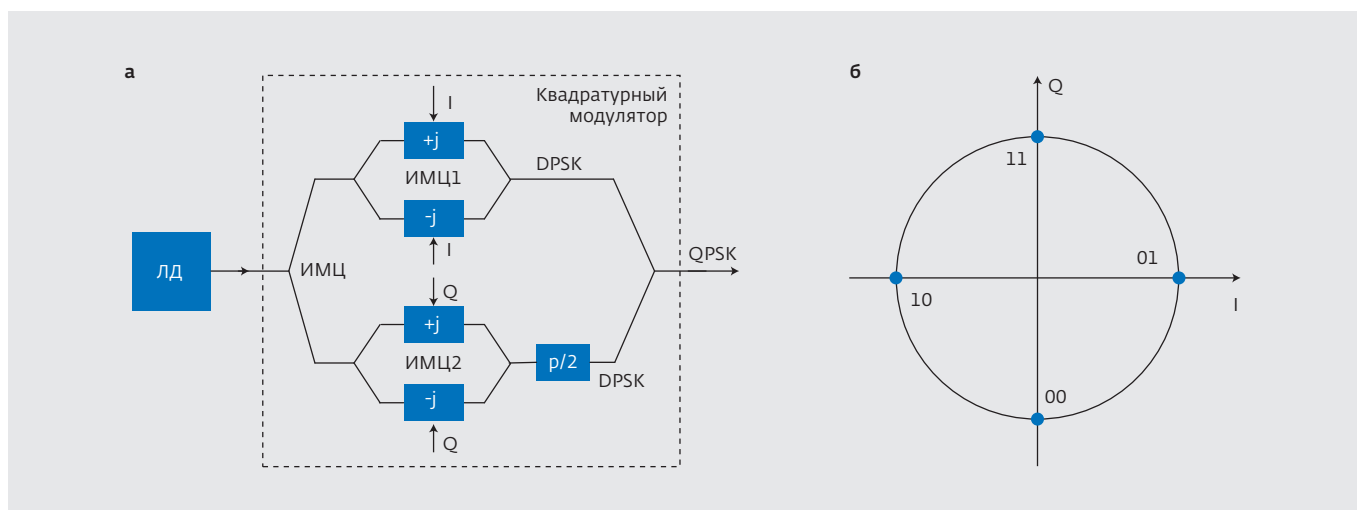


Рис.2. Формирование сигнала QPSK. а – структурная схема передатчика, б – фазовая диаграмма

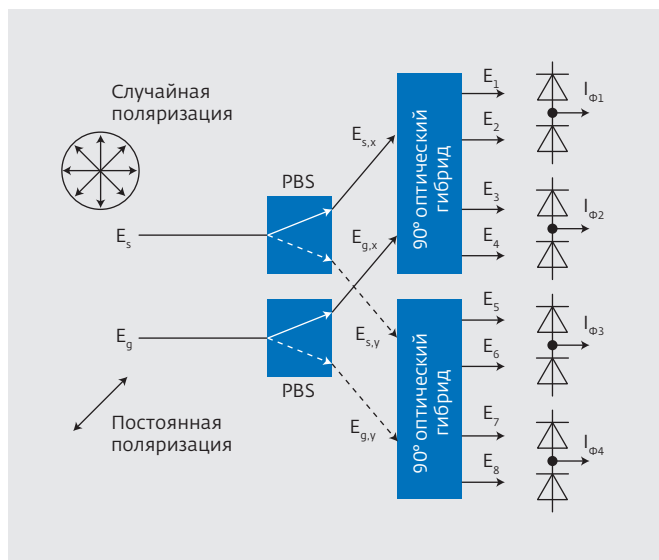


Рис.3. Структурная схема когерентного ФПУ для сигнала с многоуровневой QAM и поляризационным уплотнением. E_s , E_g – напряженности электрического поля в излучении принимаемого сигнала и гетеродина

модуляторов, позволяющих получить многоуровневые квадратурно-амплитудные форматы модуляции (QAM) [11]. Используя n уровней QAM, можно увеличить скорость передачи информации по одному ОВ. Дополнительно можно повысить ее еще в два раза, используя уплотнение по поляризации.

На рис.2 представлена структурная схема передатчика для сигнала с четырехуровневой фазовой модуляцией QPSK (или QAM-4) и фазовая диаграмма (созвездие) этого сигнала.

Передающее устройство содержит лазерный диод ЛД и два модулятора на основе интерферометров Маха-Цендера – ИМЦ1 и ИМЦ2, формирующих сигналы DPSK с двухуровневой фазовой модуляцией, которые затем объединяются в QPSK сигнал с помощью интерферометра ИМЦ и фазовращателя $\pi/2$.

Для приема сигналов с QAM были разработаны когерентные фотоприемные устройства (ФПУ), в котором излучение принимаемого сигнала смешивается с излучением местного лазера (гетеродина) и затем детектируется суперпозиция двух излучений [11] (рис.3). Излучения принимаемого сигнала и гетеродина с помощью поляризационных расщепителей PBS (Polarizing beam splitter) разделяются на две ортогональные поляризации, поступающие на входы 90-градусных гибридов – оптических компонентов, на выходах которых формируются линейные комбинации

входных сигналов. Оптические сигналы с каждой пары выходов гибрида поступают на два балансных фотоприемника, токи которых оказываются пропорциональны синфазной и квадратурной составляющим принимаемого сигнала.

Внедрение когерентного приема открыло новые возможности для цифровой обработки сигналов (ЦОС). Автоматическая регулировка усиления, компенсация хроматической и поляризационно-модовой дисперсии, восстановление тактовой и кадровой синхронизации – все это осуществляется блоком ЦОС в составе когерентного приемника.

Повышение канальной скорости передачи приводит к возрастанию требуемого оптического отношения сигнала к шуму на входе ФПУ. Для решения этой проблемы было создано новое поколение помехоустойчивых кодов (Forward Error Correction, FEC), позволяющее за счет внесения избыточности 7–20% существенно снизить количество битовых ошибок [12]. Современные FEC используют алгоритмы с "жестким" (hard-decision) и "мягким" принятием решения (soft-decision). Hard-decision-декодер использует для принятия решения только результат сравнения сигнала с пороговым значением, а soft-decision-декодер принимает во внимание еще и фактор надежности результата сравнения – информацию о том, насколько сигнал выше или ниже порогового значения.

Необходимость обеспечить большую дальность связи, которая сокращается при увеличении скоростей передачи, привела к развитию оптических усилителей (ОУ), появлению нового поколения "пассивных" ОУ с накачкой от удаленного источника.

Развитие ВОСС с использованием ПМ порождает новые задачи по разработке устройств ввода излучения и разъемов для многосердцевинных и маломодовых ОВ. Для волокон с несколькими сердцевинами, которые предлагается использовать в протяженных ВОСС, необходимы ОУ на основе многосердцевинных эрбиевых ОВ с накачкой в их оболочку [6].

3. Оптоэлектронные технологии для вычислений и обработки изображений и сигналов

Оптические устройства обработки информации отличаются очень высоким быстродействием, позволяя выполнять до 10^{15} операций в секунду эквивалентного цифрового процессора и имея при этом малые габариты и энергопотребление. Это делает перспективным их использование в бортовых вычислительных системах.

К настоящему времени предложено и исследовано большое число схем оптических процессоров (ОП) обработки сигналов и изображений. Наиболее известными

являются оптические фурье-процессоры, используемые для спектрального анализа сигналов, и оптические корреляторы, которые применяются для распознавания образов. Эти устройства хорошо подходят для выполнения многих интегральных преобразований, таких как преобразование Фурье, интегралы свертки и корреляции, вейвлет-преобразование, и др., используемых при решении многих задач. ОП перспективны для создания нейронных сетей, систем искусственного интеллекта, глубокого обучения (Deep Learning) и машинного обучения (Machine Learning).

Наибольшие успехи на пути разработки ОП продемонстрировали компании Lightelligence и Microsoft. Lightelligence в 2021 году представила процессор PACE, значительно превосходящий по мощности графические процессоры [13]. Microsoft в 2023 году предложила вычислительную платформу на основе аналоговых оптических вычислителей [14].

В последние годы возобновился интерес к созданию устройств обработки и хранения информации с использованием аналоговых компьютеров [15–17]. Их широкому применению мешает ограниченный список рабочих сред, пригодных для использования, и требование охлаждения среды до низких температур. Однако уже синтезированы вещества, не требующие криогенной техники. Это литиевый феррит железа, обогащенный изотопом ^{57}Fe , и тонкие пленки изотопа кобальта ^{61}Co . С использованием обученных кварцевых стекол удалось создать электрически-управляемую линию задержки импульсных СВЧ-сигналов [16] и устройство автокорреляционной обработки сигналов [17], принцип работы которых основан на применении явления спинового эха (ядерного, электронного, фотонного).

Еще одно перспективное направление – оптическая голография. В последние годы в России и за рубежом уделяется большое внимание внедрению голографических методов и технологий в различные области научных исследований и практических применений: защитная голография с получением цветных 3D-изображений, применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в системах формирования изображений (3D-дисплеи, очки виртуальной и дополненной реальности), использование компьютерных методов синтеза голограмм.

Голограммы широко применяются в оптико-информационных системах. Голографические фильтры являются одними из основных элементов оптических систем обработки информации, плоские ДОЭ на основе голограмм используются для компенсации аберраций линз и для фокусировки оптических пучков. Известны специальные ДОЭ для анализа и формирования поперечномодового состава излучения [18, 19].

Использование ДОЭ, выполняющих демультимплексирование оптических каналов, в линиях связи позволяет значительно повысить скорость обработки приходящей информации [18, 20]. Большое число работ в последние годы посвящено разработке голографических элементов, формирующих бездифракционные лазерные пучки, которые демонстрируют меньшую чувствительность к атмосферной турбулентности, чем другие типы пучков [21], что важно при разработке атмосферных линий связи.

По мнению ведущих специалистов, сегодня сформировалось два основных актуальных направления научно-технического развития оптической голографии [22]:

- цифровая голография, появление которой обусловлено технологическими успехами в области создания и внедрения в практику новейших крупноформатных фотоматриц (КМОП-структур) с пикселями размером 1–2 мкм в количестве до 10^8 , что дает возможность избавиться от фоточувствительных материалов и использовать методы цифровой голографии для записи амплитудно-фазовой информации об оптических полях в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн;
- Компьютерный синтез голограмм, а также создание и внедрение в практику мегапиксельных пространственных модуляторов света (МПМС), что позволило в реальном времени вводить в оптические каналы приборов и систем компьютерно-синтезированные голограммы, формирующие волновые фронты оптического излучения требуемого качества и практически любой сложности.

Примером успешного применения МПМС для ввода компьютерных голограмм является их использование в схемах оптических пинцетов, позволившее существенно расширить функциональные возможности последних [23].

4. Конвергенция фотоники и электроники для повышения быстродействия микросхем

Реализация сверхвысоких скоростей передачи и обработки информации существенно повышает требования к элементной базе. Известно, что быстродействие микросхем напрямую зависит от разрешения литографического оборудования, используемого для ее производства. Компании IBM и TSMC заявили о достижении разрешения в 2 нм [24], а в 2023 году Intel и TSMC – о разработке оборудования с разрешением в 1 нм [25].

Резервы по дальнейшему увеличению быстродействия ученые видят в конвергенции фотоники и электроники. Доказана эффективность применения оптических волноводов вместо проводников на печатных

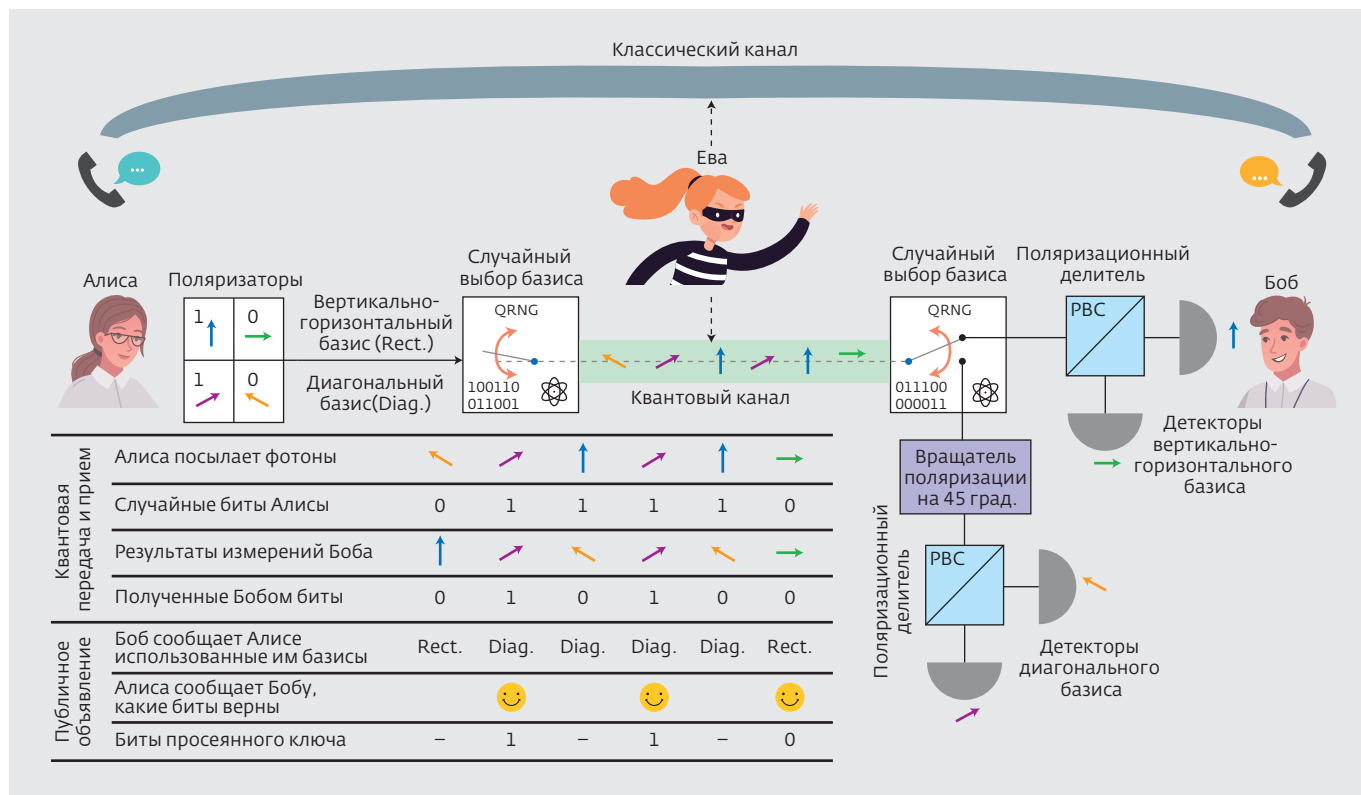


Рис.4. КРК по протоколу BB84

платах. Большой интерес представляют гибридные цифровые оптико-электронные устройства, в которых обработка сигналов частично осуществляется оптическими методами. Фотонные интегральные схемы (Photonic Integrated Circuit, PIC), объединяющие на одном чипе электронные и оптические компоненты, в перспективе должны дать существенный выигрыш не только в быстродействии, но и в энергопотреблении [26].

Одной из проблем на пути развития PIC является необходимость использования разных подложек для электронных и оптических компонентов. Основной платформой для электронных компонентов сегодня служит кремний, а для оптических – фосфид индия. Кроме того, интегральное исполнение разных оптических устройств требует применения разнородных материалов – стекол, полупроводников, оптически нелинейных кристаллов. Поэтому поиск и исследование новых материалов, которые позволят совершить прорыв в данном направлении, является актуальной задачей.

5. ОЭТ для квантовых коммуникаций и квантовых вычислений

Конвергенция фотоники и электроники сделала возможным развитие еще одного перспективного

направления – квантовых технологий. Федеральный проект по развитию квантовых технологий в РФ стартовал в 2019 году.

Наиболее успешно развитие квантовых технологий идет по двум направлениям – квантовые коммуникации и квантовые вычисления, которые поддерживаются корпорациями, соответственно, "РЖД" и "Росатом". Дорожные карты этих направлений были актуализированы в 2022 году [27, 28].

5.1. Квантовые коммуникации

Целью направления "Квантовые коммуникации" является создание каналов связи, защищенных от вторжения злоумышленника на уровне фундаментальных законов квантовой физики. Сегодня такие каналы используются для распределения криптографических ключей (КРК) и работают по ОВ. В качестве переносчика информации в них используются фотоны. Квантовым состоянием фотона можно закодировать элемент ключа – логическую единицу или ноль, а теорема о принципиальной невозможности клонирования квантового состояния не даст злоумышленнику перехватить ключ.

Первый протокол КРК с доказанной секретностью был предложен в 1984 году и получил название

BB84 по именам авторов – Ч.Беннетта и Ж.Брассара [29, 30]. Схема КРК (рис.4) по протоколу BB84 содержит передатчик (Алиса), приемник (Боб) и квантовый канал, по которому передаются фотоны. Биты ключа кодируются состоянием поляризации фотонов. Для передачи нужно иметь четыре попарно ортогональных состояния поляризации, например вертикально-горизонтальный и диагональный ($\pm 45^\circ$) базис. На приемной стороне имеются поляризационные делители, которые могут отличить горизонтальную поляризацию от вертикальной и диагональную $+45^\circ$ от диагональной -45° , но не могут отличить диагональную поляризацию от вертикально-горизонтальной.

Передача ключа осуществляется следующим образом. На первом этапе Алиса отправляет Бобу фотоны, каждый раз выбирая базис случайным образом. Боб случайным образом выбирает базис, в котором измеряет принятые фотоны. Если Боб угадал базис Алисы, принятый им бит совпадает с битом Алисы. Если не угадал, принятый бит будет иметь случайное значение. Биты, передаваемые по квантовому каналу, может попытаться перехватить злоумышленник (Ева). Ева тоже пытается угадывать базис Алисы и, если она ошибается, то искажает передаваемый бит.

На следующем этапе Алиса и Боб сравнивают использованные ими для каждого бита базисы, не объявляя при этом значений переданных и принятых бит. Бит, принятый, когда базис Алисы не совпадал с базисом Боба, вычеркивается из ключа. Оставшиеся биты представляют собой просеянный ключ. В отсутствие Евы биты просеянного ключа у Алисы и Боба будут одинаковыми.

Если имело место подслушивание, то Алиса и Боб могут оценить количество информации, которую могла перехватить Ева. Для этого по открытому каналу они сравнивают часть бит просеянного ключа и определяют уровень ошибок. Доказано, что, если он превышает 11%, то ключ скомпрометирован. Если уровень ошибок меньше, то Ева получила мало информации о ключе. В этом случае можно провести операцию усиления секретности, в результате которой ключ окажется полностью неизвестным Еве.

Существует также более простой в реализации протокол B92 [30, 31], в котором используются только два неортогональных квантовых состояния.

Существующие системы КРК имеют уязвимости, связанные с их практической реализацией. Наиболее серьезное отличие реальной системы КРК от идеальной – применение ослабленных лазерных импульсов вместо однофотонного источника. В сочетании с применением детекторов на основе лавинных фотодиодов, не позволяющих определить количество одновременно

принимаемых фотонов, это дает возможность Еве применить атаку с разделением фотонов (photon-number-splitting, PNS) [32]. В настоящее время разработаны новые протоколы КРК, способные противостоять атаке PNS, например протоколы "4+2" и SARG04 [33].

Проблема создания истинно однофотонного детектора привела к разработкам систем КРК на непрерывных переменных [30]. В них применяется гетеродинный способ детектирования излучения, при котором квантовый сигнал смешивается с высокоинтенсивным лазерным излучением, а затем детектируется на двух фотодиодах. Регистрируемым сигналом является разностный фототок.

Перспективным является также метод квантовой коммуникации на боковых частотах модулированного излучения [30], в которых сигнал выносится на боковые частоты в результате фазовой модуляции, а не генерируется непосредственно источником. Данный метод позволяет использовать практически любой фазовый протокол квантовой связи.

Следует также отметить, что протоколы КРК не решают задачу аутентификации, то есть необходима отдельная процедура для того, чтобы Алиса и Боб могли убедиться, что действительно говорят друг с другом, а не с Евой, которая разорвала оба канала (квантовый и классический) и общается с Алисой, представляясь Бобом, и с Бобом, представляясь Алисой. Эта процедура осуществляется по открытому каналу.

5.2. Квантовые вычисления

Проект "квантовые вычисления" направлен на создание квантовых компьютеров, в которых вместо битов для кодирования информации применяются кубиты – квантовые разряды. Если классический бит может находиться в одном из двух возможных состояний, интерпретируемых как "1" или "0", то кубит способен находиться в суперпозиции состояний "1" и "0". При измерении кубита мы можем получить и "1", и "0" с некоторой долей вероятности. Кроме того, два кубита могут обладать свойством квантовой запутанности – иметь взаимосвязанные квантовые состояния. При измерении состояния одного из таких кубитов состояние второго также становится известным. Эти свойства кубитов используются при создании квантовых алгоритмов.

Успехи квантовых вычислений обещают колоссальное возрастание быстродействия компьютеров и расширение возможностей по решению сложных вычислительных задач. Первые квантовые компьютеры уже созданы и действительно показывают существенный рост производительности.

Одно из последних мировых достижений в этой области продемонстрировали в 2023 году ученые

из Университета науки и технологий Китая. Они представили квантовый 255-кубитный компьютер Jiuzhang на фотонах и показали, что он может ускорить выполнение алгоритмов, применяемых в системах искусственного интеллекта, в 180 млн раз по сравнению с самым мощным в мире суперкомпьютером [34].

Сегодня квантовые компьютеры еще не готовы заменить классические. Прогресс в области квантовых вычислений встречает технологические трудности, связанные с необходимостью не только наращивать число кубитов, но и обеспечивать достоверность результатов квантовых операций, которые, во-первых, носят принципиально вероятностный характер, а во-вторых, могут искажаться, например, в результате воздействия шума. Достоверность повышают с помощью кодов коррекции квантовых ошибок (Quantum Error Correction, QEC) [35]. QEC, как и классические коды коррекции ошибок, основаны на избыточности: для кодирования одного логического кубита используется несколько физических. Современные QEC пока недостаточно совершенны и не справляются с большим уровнем ошибок. Для практического применения и широкого внедрения квантовых компьютеров необходим прорыв в технологиях QEC.

Потенциал квантовых вычислений рассматривается мировым сообществом не только с точки зрения новых возможностей, но и угроз. В частности ожидается, что квантовый компьютер представляет угрозу взлома для самого распространенного криптографического алгоритма RSA. Эта опасность является дополнительным стимулом для развития квантовых коммуникаций.

Заключение

Создание и использование современных оптических, оптоэлектронных и квантовых технологий – залог экономического успеха нашей страны. Поскольку эти технологии основываются на ультрасовременных научно-технических достижениях, обязательным условием их развития является подготовка высококвалифицированных специалистов и ученых в вузах. Для успешного решения этой задачи необходимо учитывать быстрое устаревание знаний, обусловленное стремительным научно-техническим прогрессом, поддерживать актуальность образовательных программ, а также мотивировать студентов на непрерывное саморазвитие и самообразование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ" (в редакции указа от 16.12.2015 № 623).
2. Постановление правительства РФ от 15 апреля 2023 г. № 603 "Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики РФ".
3. G.694.1 Transmission media and optical systems characteristics Characteristics of optical systems. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid: Recommendation. ITU-T. October, 2020. 16 p.
4. DWDM Волга: телекоммуникационное оборудование для оптических сетей связи (каталог). М.: Компания Т8. 2022. 52 с.
5. Windstream: Wholesale и Cisco продемонстрировали передачу 1 Тбит/с на одной длине волны на расстояние 1100 км. [Электронный ресурс]. URL: <https://prointech.ru/news/1-tbit-s-na-odnoj-dline-volny/> (дата обращения 18.02.2024).
6. Papapavlou C., Paximadis K., Tomkos I. Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends // *Telecom*. 2022. Vol. 3. Iss. 2. PP. 234–280.
7. Takeshima K., Tsuritani T., Tsuchida Y., Maeda K., Saito T., Watanabe K., Sasa T., Imamura K., Sugizaki R., Igarashi K., Morita I., Suzuki M. 51.1-Tbit/s MCF Transmission Over 2520 km Using Cladding-Pumped Seven-Core EDFAs // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. Vol. 34. Iss. 2. PP. 761–767.
8. Семенов А.Б. Параллельная волоконно-оптическая передача в ЛВС и СКС. Подходы к реализации физического и канального уровней. М.: Горячая линия Телеком, 2018. 272 с.
9. Бурдин А.В. Маломодовый режим функционирования волоконно-оптических линий связи: приложения на сетях передачи данных разного назначения // *Фотон-Экспресс*. 2021. № 6 (174). С. 196–197.
10. Xia C. et al Supermodes for optical transmission // *Optics Express*. 2011. Vol. 19. Iss. 17. PP. 16653.
11. Трещиков В.Н., Листвин В.Н. DWDM-системы. 4-е изд. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. 420 с.
12. Mukherjee B., Tomkos I., Tornatore M., Winzer P., Zhao Y. Springer Handbook of Optical Networks. Springer, 2020. 1182 p.
13. Оптический процессор: в 100 раз мощнее графических чипов [Электронный ресурс]. URL: <https://naukatehnika.com/opticheskij-processor.html> (дата обращения 10.03.2024).
14. Microsoft представила первый в мире аналоговый оптический компьютер задачами оптимиза-

- ции займутся фотоны [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1089177/microsoft-predstavila-perviy-v-mire-analogoviy-opticheskiy-kompyuter-zadachi-optimizatsii-budut-reshat-fotoni> (дата обращения 10.03.2024).
15. **Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А.** Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. М.: Радиотехника, 2013. 216 с.
 16. **Дудкин В.И., Тарханов В.И.** Сжатие широкополосных сигналов спиновым эхо-процессором. Современные технологии извлечения и обработки информации // Сб. научных трудов ОАО "Радиоавионика". 2001. С. 199–204.
 17. **Дудкин В.И., Рубинов С.И.** Электрически управляемая СВЧ линия задержки. Современные технологии извлечения и обработки информации // Сб. научных трудов ОАО "Радиоавионика". 2001. С. 206–210.
 18. **Хонина С.Н., Казанский Н.Л.** и др. Дифракционные оптические элементы для мультиплексирования структурированных лазерных пучков // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 7. С. 629–635.
 19. **Хонина С.Н., Казанский Н.Л.** и др. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 425–434.
 20. **Lei T., Zhang M., Li Y.** [et all]. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings // Light: Science and Applications. 2015. Iss. 4. PP. e257.
 21. **Хонина С.Н.** Простой способ эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 1. С. 70–78.
 22. **Одинокоев С.Б., Венедиктов В.Ю.** Работы по голографии в России // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 7. С. 613.
 23. **Котова С.П., Майорова А.М., Самагин С.А.** Возможности четырехканального жидкокристаллического модулятора по формированию световых полей со сложным распределением интенсивности // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 5. С. 46–55.
 24. **Cutress I.** IBM Creates First 2nm Chip [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anandtech.com/show/16656/ibm-creates-first-2nm-chip> (дата обращения 18.02.2024).
 25. TSMC заявила, что начнет производство 1-нм чипов к 2030 году [Электронный ресурс]. URL: <https://overclockers.ru/blog/Fantoci/show/128804/TSMC-zayavila-chto-nachnet-proizvodstvo-1-nm-tranzistorov-k-2030-godu> (дата обращения 18.02.2024).
 26. Минобрнауки России: Фотонные микросхемы помогут в создании высокоскоростных устройств для передачи и обработки информации [Электронный ресурс]. URL: <https://vc.ru/future/585178-fotonnye-mikroshemy-pomogut-v-sozdanii-vysokoskorostnyh-ustroystv-dlya-pere-dachi-i-obrabotki-informacii> (дата обращения 18.02.2024).
 27. Распоряжение правительства РФ от 11.07.2023 г. № 1856-р "Об утверждении концепции регулирования отрасли квантовых коммуникаций в РФ до 2030 года".
 28. Росатом представил на ЦИПр-2023 свой подход к ускоренному достижению суверенитета в разработке индустриального ПО [Электронный ресурс]. URL: https://rosatom.ru/journalist/news/rosatom-predstavil-na-tsipre-2023-svoy-podkhod-k-uskorennomu-dostizheniyu-suvereniteta-v-raz-rabotke-/?sphrase_id=4253385 (дата обращения 15.03.2024).
 29. **Bennett C.H., Brassard G.** Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing // Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing. 1984. PP. 175–179.
 30. **Козубов А.В., Гайдаш А.А., Кынев С.М., Егоров В.И., Иванова А.Е., Глейм А.В., Мирошниченко Г.П.** Основы квантовой коммуникации. Часть 1. СПб: Университет ИТМО, 2019. 85 с.
 31. **Bennett C.H.** Quantum Cryptography using any Two Nonorthogonal States // Physical Review Letter. 1992. Vol. 68. Iss. 21. P. 3121.
 32. **Acin A., Gisin N., and Scarani V.** Coherent-pulse implementations of quantum cryptography protocols resistant to photon-number-splitting attacks // Physical Review A. 2004. Vol. 69. Iss. 1. P. 012309.
 33. **Scarani V., Acin A., Ribordy G., Gisin N.** Quantum Cryptography Protocols Robust against Photon Number Splitting Attacks for Weak Laser Pulse Implementations // Physical Review Letter. 2004. Vol. 92. Iss. 5. P. 057901.
 34. Китайский квантовый компьютер на 255 кубит продемонстрировал невероятную мощность [Электронный ресурс]. URL: <https://overclockers.ru/blog/amv212/show/114966/kitajskij-kvantovyj-kompjuter-na-255-kubit-prodemonstroval-nevero-yatnuju-moschnost> (дата обращения 15.03.2024).
 35. **Гушанский С.М., Божич В.И., Потапов В.С.** Исследование и разработка квантового кода для исправления ошибок // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 3 (227). С. 129–139.