

УДК 621.372.8.082.5

А.В. Леонов, О.Е. Наний, М.А. Слепцов, В.Н. Трещиков

ООО «Т8», Москва, Россия

**ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ДАЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Рассмотрены основные тенденции развития современных магистральных оптических систем дальней связи. Это прежде всего усложнение форматов модуляции сигнала, увеличение символической скорости в оптическом тракте, применение суперканалов и формирование спектра сигнала, управление спектром (FlexGrid), развитие усилителей в новых спектральных диапазонах, исследование маломодовых и многосердцевидных оптических волокон. Показано, что существующие технологии теоретически позволяют достичь пропускной способности порядка 100 Тбит/с по одному волокну. Для дальнейшего увеличения пропускной способности требуются использование новых спектральных диапазонов или пространственное мультиплексирование с применением новых типов оптических волокон.

Ключевые слова: DWDM, волоконно-оптическая сеть связи, когерентный прием, спектральная эффективность, формат модуляции, символическая скорость, формирование спектра, управление спектром, FlexGrid, NyquistWDM, суперканал, маломодовые волокна, многосердцевидные волокна.

A.V. Leonov, O.E. Nanii, M.A. Sleptsov, V.N. Treshchikov

Company «T8», Moscow, Russian Federation

**TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF BACKBONE
OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS**

The article overviews main trends of development of modern backbone optical communication systems. First of all, it is the increase of complexity of modulation formats, increase of the symbol rate in optical line, usage of super-channels and spectral shaping, spectrum management, the development of amplifiers in new spectral bands, investigation of few-mode and multicore fibers. It is shown that the existing technologies in theory enable achievement of 100 Tbit/s bandwidth over a single fiber; a further bandwidth increase requires usage of new spectral ranges or spatial multiplexing using new types of optical fibers.

Keywords: DWDM, fiber optic communication network, coherent receive, spectral efficiency, modulation format, symbol rate, spectral shaping, spectrum management, FlexGrid, NyquistWDM, superchannel, few-mode fiber, multicore fiber.

Введение

Потребности в передаче трафика постоянно растут, что формирует спрос на увеличение производительности оптических систем дальней связи [1]. В конце 2000-х годов были созданы первые коммерче-

ские когерентные системы 40G и 100G, в 2013–2014 годах произошел масштабный переход крупнейших мировых операторов связи на когерентные каналы 100G как основной тип магистральных каналов (в терминологии Infinera – optical reboot – оптическая перезагрузка). Канал 100 Гбит/с в наземных DWDM-системах передается обычно в полосе 50 ГГц (спектральная эффективность $SE = 100/50 = 2$ бит/с/Гц).

В 2015 году были созданы первые коммерческие оптические блоки, обеспечивающие передачу 200 Гбит/с по одной несущей в полосе 50 ГГц. К началу 2016 года такие блоки представили уже все ведущие производители, в том числе Acacia, ClariPhy, NEL. Спектральная эффективность этих типов оптических блоков – 4 бит/с/Гц, что вдове выше, чем у систем 100G. В начале 2017 года ожидается появление оптических блоков со скоростью 400 Гбит/с по одной несущей.

Таким образом, емкость существующих DWDM-систем связи по одному волокну составляет в *C*-диапазоне 9,6 Тбит/с (96 каналов 100G), в расширенном *C+L*-диапазоне – 27 Тбит/с (270 каналов 100G). При переходе к системам с $SE = 4$ бит/с/Гц максимальная емкость увеличивается соответственно до 19,2 или 54 Тбит/с. По существующим теоретическим оценкам, канал 400G может быть передан и в полосе 50 ГГц ($SE = 8$), что теоретически позволит достичь емкости 100 Тбит/с в одном волокне в *C+L*-диапазоне (270 каналов 400G).

На практике использование расширенного спектрального диапазона (*C+L*), как и увеличение спектральной эффективности, требует решения целого ряда технологических задач. В связи с этим сегодня активно ведется исследование технологий, которые позволят увеличить скорость оптических систем дальней связи. Для продолжения устойчивого развития оптических систем дальней связи жизненно необходимы не только развитие существующих технологий и подходов, но и поиск новых физических идей и принципов, с использованием которых будут созданы прорывные технологии следующего поколения.

Основные научные и технологические задачи, над которыми в данный момент активно работают ученые и инженеры в мире, можно разделить на четыре группы:

1. Совершенствование когерентных систем связи:
 - многоуровневые форматы модуляции;
 - увеличение символьной скорости передатчиков и приемников;
 - суперканалы и спектральная инженерия;

- использование фотонных интегральных схем в транспондерах;
 - программно-перестраиваемые сети.
2. Совершенствование методов обработки сигналов в когерентных системах связи:
- компенсация искажений при цифровой обработке сигналов;
 - развитие алгоритмов коррекции ошибок.
3. Совершенствование методов усиления и регенерации оптических сигналов:
- применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой;
 - использование не задействованных в настоящее время спектральных диапазонов;
 - оптическая регенерация.
4. Новая инфраструктура волоконно-оптических сетей связи:
- специальные волокна с уменьшенной нелинейностью;
 - волокна с малой физической задержкой;
 - методы пространственного мультиплексирования: многосердцевинные и маломодовые волокна.

Рассмотрим каждую из этих групп и входящие в нее задачи более подробно.

1. Совершенствование когерентных систем связи

Когерентные системы связи позволяют использовать все четыре степени свободы электромагнитного поля: амплитуду и фазу (или две квадратуры) в каждой из двух поляризаций. Это позволяет, например, в формате DP-QPSK (dual polarization – quater phase shift keying) передавать 4 бита на каждый символ, используя всего один уровень мощности. Соответственно, переход к когерентному детектированию позволяет увеличить скорость передачи информации без увеличения символьной скорости, т.е. без изменения принятой в настоящее время сетки частот (50 ГГц) в мультиплексировании по длинам волн.

Таким образом, переход от прямого детектирования к когерентному в новом поколении систем связи является закономерным. Он позволяет увеличить объем передаваемой информации, используя спектральное и поляризационное уплотнение каналов, а также спектрально-эффективные форматы модуляции, в частности формат DP-QPSK. Не случайно, что буквально за последние несколько лет на смену сис-

темам с модуляцией мощности (ООК), работающим на частоте повторения 10 Гбит/с, пришли когерентные форматы модуляции на частотах повторения 40 и 100 Гбит/с [2–4].

Структура оптического сигнала в формате DP-QPSK показана на рис. 1. Сигнал содержит два информационных компонента в формате QPSK на ортогональных поляризациях. Это означает, что осуществляется поляризационное мультиплексирование (см. рис. 1, а), поэтому для обозначения данного формата наряду с аббревиатурой DP-QPSK используется аббревиатура PM-QPSK, т.е. поляризационно-мультиплексированный QPSK. В свою очередь, каждый из двух ортогонально поляризованных сигналов в формате QPSK можно представить как объединение двух бинарных фазовых сигналов BPSK, сдвинутых по фазе на $\pi/2$ (см. рис. 1, б).

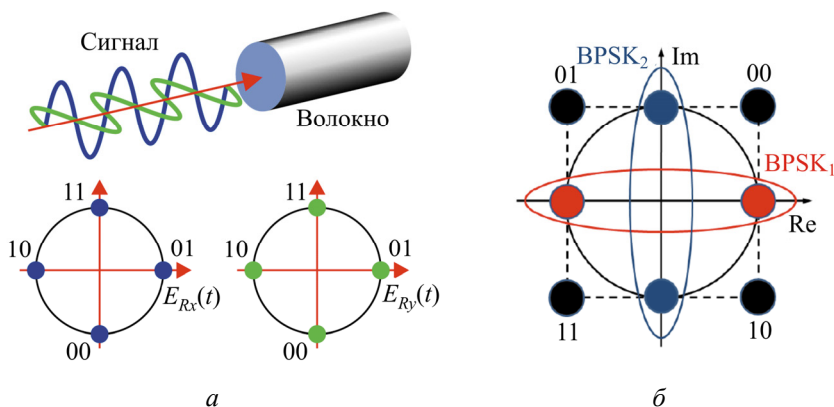


Рис. 1. Структура оптического сигнала в формате DP-QPSK:
 а – поляризационное мультиплексирование двух сигналов в формате QPSK;
 б – структура сигнала QPSK

Многоуровневые форматы модуляции. Дальнейшее развитие волоконно-оптических систем связи, как это видно по тенденциям 2014–2015 годов, вероятнее всего, будет основано на использовании более сложных форматов модуляции (DP-16QAM, DP-64QAM и др.) [5, 6], которые позволяют существенно повысить спектральную эффективность и, соответственно, скорость в привычной для оператора ширине полосы. Однако усложнение структуры формата модуляции неизбежно ведет к существенному падению дальности передачи. Тем не менее исследования все более сложных форматов интенсивно

проводятся многими компаниями. Сообщается о ведущихся экспериментах с форматами 128QAM и даже 256QAM. Такие форматы дают заметный выигрыш в скорости передачи информации для коротких линий при фиксированной полосе. Выигрыш в скорости достигается за счет большей информационной емкости таких форматов: один символ в формате DP-QPSK переносит 4 бита, а один символ в формате DP-256QAM – 16 бит. Можно прогнозировать внедрение систем 200G и 400G в городских сетях с использованием форматов DP-16QAM уже в ближайшее время. Ведутся интенсивные исследования по увеличению качества сигналов и совершенствованию алгоритмов работы высокоуровневых форматов с целью использования их в сетях связи.

Увеличение символьной скорости. В транспондерах современных систем связи используются символьные скорости 30 и 40 Гбод, причем наиболее широкое распространение получили системы связи с символьными скоростями около 30 Гбод. Именно такие символьные скорости реализуются в наиболее распространенных когерентных транспондерах со скоростью передачи информации 100 Гбит/с, использующих формат DP-QPSK. Увеличение символьной скорости обеспечивает улучшение управляемости сетью и потенциально может привести к сокращению расхода энергии и занимаемых оборудованной площадей (объемов) в регенерационных пунктах и узлах сети связи. Кроме того, задачу перехода на новые каналные скорости – 400 Гбит/с и 1 Тбит/с на канал – ставят потребители услуг связи. Ожидается, что символьная скорость 60 Гбод может стать следующим шагом в развитии технологии транспондеров [7]. Этот шаг позволит достигнуть скорости передачи информации 400 Гбит/с с использованием одной несущей в полосе 100 ГГц (например, при использовании формата DP-16QAM и символьной скорости 60 Гбод), поэтому интенсивные исследования в области разработки транспондеров с символьной скоростью 60 Гбод и больше (до 120 Гбод) проводят как производители компонентов (транспондеров), так и производители систем связи (Alcatel, Huawei, ZTE).

Основное препятствие на пути повышения символьной скорости – ограниченное быстродействие электроники. Его можно преодолеть, используя оптические технологии, в частности технологии «спектрального склеивания» [8] или оптического временного мультиплексирования (технология OTDM) [9, 10]. С использованием технологии

OTDM достигнуты символьные скорости, значительно превышающие 100 Гбод, которые пока не доступны при использовании электронных методов. Первый эксперимент по передаче информации со скоростью 100 Гбит/с на расстояние 36 км с использованием технологии OTDM был проведен еще в 1993 году [10]. С того времени исследователи технологии OTDM существенно увеличили скорость и дальность передачи. Однако, несмотря на демонстрацию потенциальных возможностей технологии OTDM, перспективы ее практического применения столь же неопределенны, как и в 1993 году. Главный недостаток технологий OTDM и «спектрального склеивания» – высокая стоимость оборудования и сложности фотонно-электронной интеграции.

Суперканалы и спектральная инженерия. Использование нескольких несущих (поднесущих) для увеличения канальной скорости передачи информации позволяет получить канальную скорость 400 Гбит/с и 1 Тбит/с при меньших требованиях к быстродействию электроники, чем при использовании одной несущей (если используются форматы модуляции одного уровня сложности). Недостаток данной технологии – увеличение сложности цифровой обработки сигналов, необходимость синхронизации потоков данных, передаваемых с использованием разных поднесущих частот. Однако именно эта технология позволяет получать канальные скорости передачи информации 300, 400 Гбит/с и даже 1 Тбит/с [11–13] с использованием существующего сегодня оборудования.

Идея распараллеливания высокоскоростных потоков для облегчения их передачи по линиям связи не нова. Она используется в системах связи разных уровней и в разных диапазонах длин волн. В частности, можно использовать для распараллеливания сигнала любой набор из нескольких обычных каналов. В опорных сетях связи целесообразно иметь возможность на оптическом уровне управлять группой из компонентов интегрированного высокоскоростного канала как единым целым. Такую возможность предоставляет технология оптических суперканалов.

Суть технологии оптических суперканалов заключается в том, что некоторое количество (обычно от двух до десяти) частотных каналов объединяется в агрегированный суперканал, который при прохождении по оптической сети маршрутизируется оптическими устройствами как единый канал.

Для увеличения спектральной эффективности (а значит, и пропускной способности системы связи при фиксированной полосе передачи) необходимо располагать каналы с максимальной плотностью. Максимально плотно можно располагать каналы, спектр модуляции сигналов которых прямоугольный. Методы формирования сигналов с заданными спектральными характеристиками называют «спектральной инженерией». Технология плотного расположения таких каналов называется Найквист-WDM и широко исследуется как теоретически, так и экспериментально с целью создания экономичных коммерческих систем связи.

Использование фотонных интегральных схем. Увеличение степени фотонной интеграции направлено на создание более компактных фотонных устройств, что позволяет снизить себестоимость производимой продукции и энергетические затраты [14–16]. Ожидаемый экономический эффект от внедрения фотонных интегральных схем определяет растущий интерес к этому направлению исследований со стороны производителей компонентов волоконно-оптических систем связи.

Среди множества компонентов, которые могут быть объединены на одном фотонном интегральном устройстве (PLC), можно назвать делители пучков (beam splitters), решетки (gratings), соединители (couplers), поляризаторы (polarizers), интерферометры (interferometers), источники излучения, усилители и детекторы.

Интеграция может осуществляться последовательно и параллельно. При последовательной интеграции (например, для телекоммуникационных устройств) различные элементы чипа создаются и соединяются последовательно: лазер и питание лазера, модулятор и управляющая электроника, фотоприемник и приемная электроника. При параллельной интеграции чип состоит из набора усилителей, набора фотоприемников, мультиплексоров и демультимплексоров. Возможна комбинация двух архитектур с использованием модулей ввода-вывода, переключателей и межсоединений.

Наивысший уровень интеграции достигается при монолитной интеграции, когда все оптические элементы, включая источники света, устройства управления светом, детекторы и электронные компоненты расположены на одной подложке. Наиболее перспективными материалами для монолитной интеграции являются полупроводниковые материалы, в частности для диапазона 1550 нм – кремний (Si) и фосфат индия (InP).

В случае гибридной интеграции на одной подложке изготавливаются устройства управления светом, а на другой – дополнительные элементы, такие как лазеры и детекторы. Они подсоединяются друг к другу непосредственно или при помощи оптических волноводов. В качестве подложки для гибридных технологий используются диэлектрические материалы, такие как стекла, кварц или ферроэлектрические кристаллы. Технология, использующая сочетание кварца и кремния, может рассматриваться как квазигибридная интеграция, при которой все компоненты, кроме источников света, могут быть изготовлены на одной подложке.

Программно-перестраиваемые сети. Эффективность работы волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) в реальных условиях можно существенно увеличить путем гибкого управления шириной спектральной полосы, занимаемой каналом, в зависимости от скорости передачи и используемого формата. Существующие системы DWDM используют стандартную сетку 50 ГГц. В технологии Flexgrid рабочий спектр делится на узкие спектральные полосы – слоты (обычно 12,5 ГГц), расположенные вплотную друг к другу. Эти слоты могут объединяться для формирования спектральных блоков нужного размера [17, 18] (рис. 2).

Возможность применения технологии Flexgrid в коммерческих системах появилась только после создания и начала массового производства перестраиваемых спектрально селективных переключателей WSS (wavelength selective switch), использующих технологию LCoS (liquid crystal on silicon) [19]. С использованием WSS на основе технологии LCoS можно изменять размеры спектральных полос для разных каналов в реальном времени. Выделенный канал может занимать любое количество слотов, таким образом, ширина выделенной для этого канала полосы может изменяться в диапазоне от 12,5 ГГц (иногда 6,25 ГГц) до полной ширины C-диапазона (примерно 4,5 ТГц).

В реальных сетях связи трафик существенно изменяется в течение часов, дней, недель, месяцев. Например, бизнес-трафик максимален в течении рабочего дня; вечером и ночью возрастает трафик частных потребителей. Для повышения эффективности сетей связи можно использовать совместно с технологией Flexgrid также технологию перестраиваемых транспондеров. Разрабатываются два типа таких транспондеров.

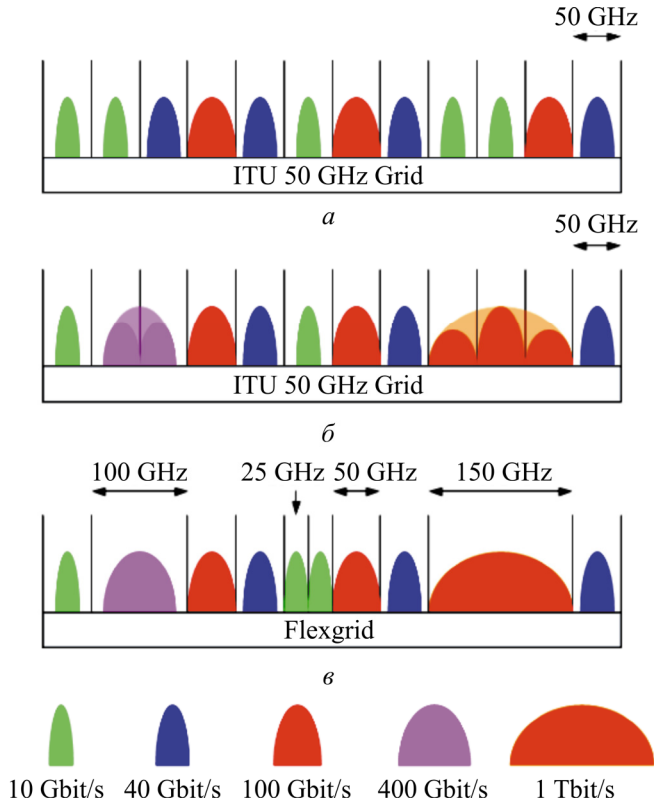


Рис. 2. Сравнение DWDM-систем с фиксированными полосами (Fixed grids) и гибкими полосами (Flexgrid): *а* – работа гетерогенной сети с канальными скоростями до 100 Гбит/с в фиксированной сетке 50 ГГц; *б* – передача канальных сигналов с увеличенной скоростью до 400 Гбит/с и 1 Тбит/с становится невозможной; *в* – технология Flexgrid позволяет использовать спектральные полосы необходимой ширины [17]

В транспондерах BVT (bitrate variable transponder) возможна перестройка только скорости передачи информации транспондером. В транспондерах SDT (software defined transponder) через систему управления можно изменять формат модуляции, символьную скорость и занимаемую полосу. При использовании SDT в сетях Flexgrid появляется возможность дополнительной оптимизации сети в условиях динамически изменяющегося трафика (рис. 3). Каналы могут динамически подстраивать ширину полосы в зависимости от трафика, при этом освободившаяся полоса может быть использована соседними каналами [17].

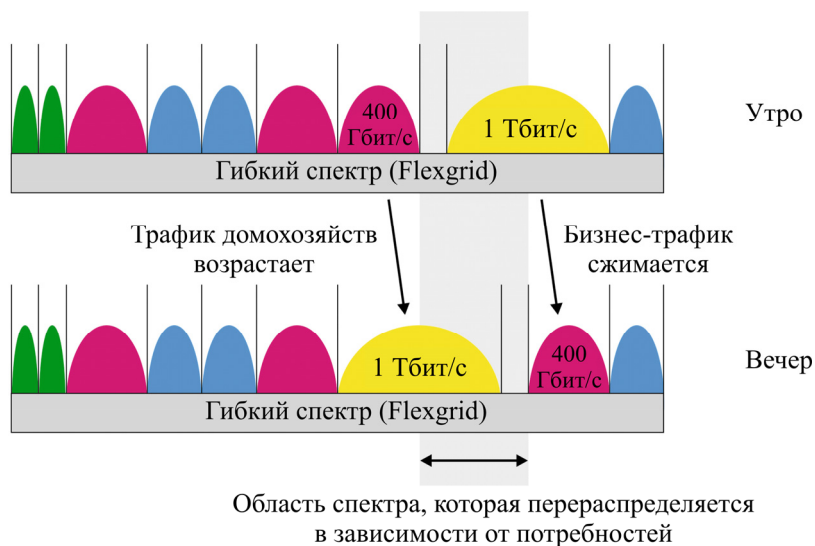


Рис. 3. В зависимости от времени суток два канала могут попеременно использовать некоторый участок спектра [17]

Интенсивные исследования в области создания новых динамически перестраиваемых сетевых технологий проводятся в следующих направлениях:

- интеллектуальная маршрутизация;
- динамический выбор скорости передачи и размещения канала в спектре WDM;
- быстро перестраиваемые, эффективные по энергопотреблению, адаптивные по скорости оптические транспондеры.

2. Совершенствование методов обработки сигналов в когерентных системах связи

Цифровая обработка сигналов (DSP) – неотъемлемый компонент современных приемников когерентных систем связи. При помощи DSP удалось обеспечить работоспособность когерентных систем связи при сравнительно умеренных требованиях к физическим характеристикам передающего лазера и опорного лазера когерентного приемника.

Компенсация искажений при цифровой обработке сигналов позволяет существенно улучшить характеристики системы связи. В настоящее время в коммерческих приемниках когерентных систем связи формата DP-QPSK реализованы электронные методы компенсации хрома-

тической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии. Алгоритмы работы цифровых приемников продолжают совершенствоваться, идет поиск более эффективных и быстродействующих алгоритмов, способных работать в реальном времени с высокими символьными скоростями (до 60 Гбод) и многоуровневыми форматами модуляции.

Продолжаются интенсивные исследования методов цифровой обработки сигналов, позволяющих компенсировать нелинейные искажения и тем самым увеличить дальность передачи информации [20]. В основном исследования проводятся в офлайн-режиме (т.е. запись сигналов в память с использованием высокоскоростного АЦП и дальнейший анализ этих сигналов не в реальном времени) для определения потенциальных возможностей исследуемых методов. Среди различных методов следует отметить метод back-propagation, когда решается обратная задача по распространению сигнала в нелинейной среде [20, 21].

Главный недостаток методов электронной компенсации нелинейных искажений – сложность используемых алгоритмов, особенно в режимах плотного расположения спектральных каналов. Это затрудняет их использование в режиме реального времени, однако работы по совершенствованию этих алгоритмов интенсивно проводятся в ряде научных центров.

Применение алгоритмов коррекции ошибок (forward error correction, FEC) – еще один мощный инструмент увеличения дальности работы волоконно-оптических систем связи. Принцип коррекции ошибок заключается в том, что, наряду с полезной информацией, в оптическом сигнале передается дополнительная информация, используемая для обнаружения и исправления ошибок в принятом сигнале.

В системах связи, использующих прямое детектирование, применяется так называемая технология «жесткого» принятия решений (hard decision FEC, HD-FEC). В когерентных системах связи с цифровой обработкой сигналов используются значительно более эффективные алгоритмы коррекции ошибок – так называемая технология «мягкого» принятия решений (soft decision FEC, SD-FEC).

Совершенствование алгоритмов FEC продолжается, идет поиск наиболее оптимальных алгоритмов, способных работать при все более высокой скорости передачи информации [22, 23].

3. Совершенствование методов усиления и регенерации оптических сигналов

Применение распределенных усилителей и усилителей с удаленной накачкой позволяет существенно увеличить дальность работы однопролетных и многопролетных ВОЛС [24–27]. Для снижения уровня шума и, соответственно, повышения качества передаваемого сигнала (качество – параметр оптического сигнала, пропорциональный отношению сигнал – шум), желательно обеспечить такой режим распространения сигнала по линии связи, когда мощность сигнала вдоль линии изменяется минимально.

Простой путь решения этой задачи – расположение усилителей на все меньшем расстоянии друг от друга – неприемлем по экономическим соображениям, поэтому широким фронтом ведутся исследования эффективности использования распределенных рамановских усилителей [28]. Эти исследования становятся особенно актуальными в настоящее время, поскольку для внедрения многоуровневых форматов с большой символьной эффективностью (например, формата DP-16QAM) требуется существенно увеличить отношение сигнал – шум принимаемого сигнала. В настоящее время в густонаселенной части Европы среднее расстояние между усилителями составляет 80 км, в России – примерно 100 км.

Иногда возникают задачи передать информацию на расстояние 300–400 км без использования промежуточных усилителей, т.е. по однопролетной линии. Однопролетные линии связи широко востребованы для организации связи между островами, удаленными прибрежными городами, побережьем и нефтяными платформами на шельфе, создания отводов от подводных магистральных линий связи, а также для прокладки ВОЛС в малонаселенных областях, что особенно актуально для России (рис. 4).

Следует отметить, что в России компанией «Т8» создан комплект оборудования, обеспечивающий дальность передачи по однопролетной линии 500 км с суммарной скоростью 1 Тбит/с [25].

Современные DWDM-сети дальней связи используют почти исключительно *C*-диапазон (*C*-band) оптического волокна в окрестности длины волны 1,55 микрометра. Тому есть две причины: именно в этом спектральном диапазоне работают оптические усилители EDFA, а также по-

тери света при распространении света этого диапазона в оптическом волокне минимальны. Ширина C -диапазона – примерно 35 нм, или 4,4 ТГц.

Использование незадействованных в настоящее время спектральных диапазонов может увеличить пропускную способность ВОЛС. Практически готова к использованию в коммерческих системах связи еще одна спектральная полоса – L -диапазон (1565–1625 нм). Для этой области также могут быть использованы эрбиевые усилители EDFA, однако их конструкция существенно отличается от конструкции усилителей C -диапазона.

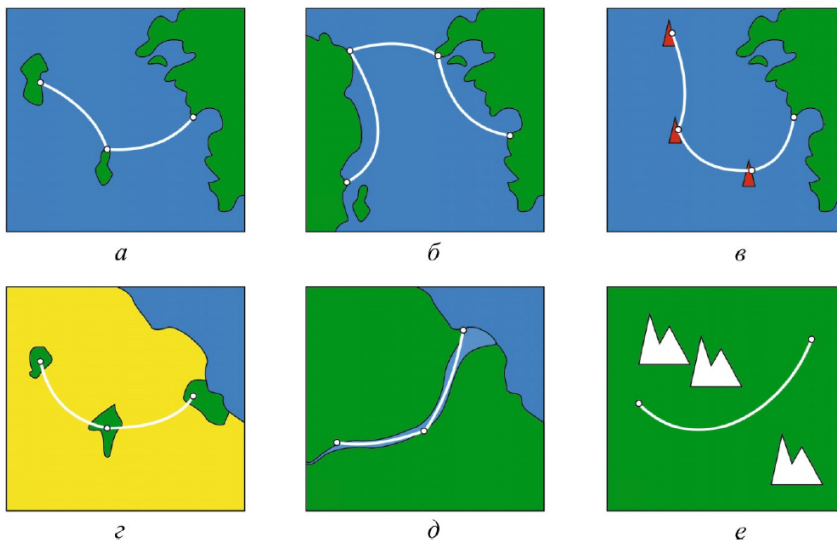


Рис. 4. Однопролетные линии связи: a – между островами; b – для соединения прибрежных городов; b – для соединения с буровыми платформами; z – для соединения городов, разделенных пустыней; d – для прокладки по дну рек; e – для прокладки в малонаселенных районах [25]

В L -диапазоне ширина спектра 60 нм, что в единицах частоты составляет примерно 7 ТГц. Даже с учетом того, что эффективная полоса усиления эрбиевых усилителей для L -полосы несколько меньше (около 5,6 ТГц), потенциальная информационная емкость L -полосы больше емкости C -полосы. Недавно российской компанией «Т8» была продемонстрирована работа системы связи со скоростью 27 Тбит/с, использующей 270 каналов по 100 Гбит/с в C - и L -диапазонах, формат модуляции – DP-QPSK и плотность расположения каналов – 33 ТГц [2] (рис. 5).

Спектральная область с оптическими потерями в волокне, не превышающими 0,4 дБ/км, которая могла бы быть использована для передачи информации, простирается от 1300 до 1700 нм (ширина полосы – 400 нм). Однако в настоящее время для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм отсутствуют эффективные волоконные оптические усилители – обязательные элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации.

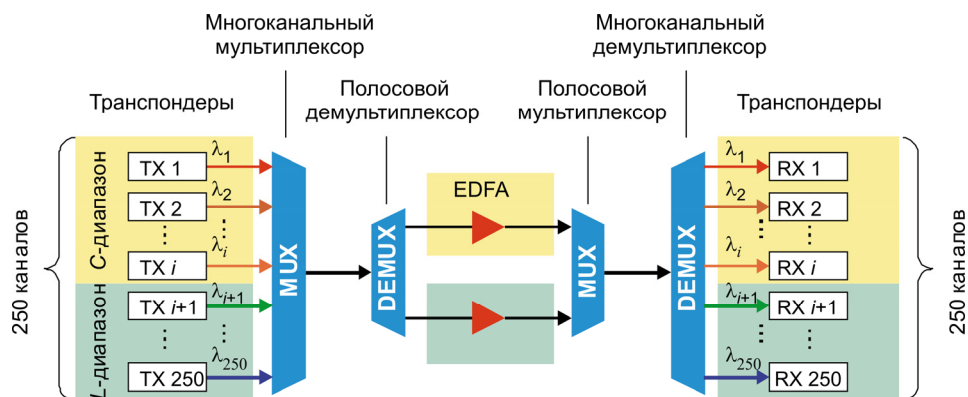


Рис. 5. Структура DWDM-системы связи со скоростью 27 Тбит/с

Конечно, в этом диапазоне могут использоваться распределенные рамановские усилители (ВКР-усилители) [28]. Однако для оптимальной работы сетей дальней связи необходимо, наряду с распределенными усилителями, использовать дискретные усилители, аналогичные усилителям EDFA для C- и L-диапазонов. В связи с этим работы по созданию эффективных усилителей для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм являются исключительно актуальными.

Оптимистичными выглядят результаты исследований волоконно-оптических усилителей на основе волокон, легированных висмутом, появившиеся в последние годы [29, 30]. Потенциально их использование позволяет существенно расширить рабочий диапазон спектра волоконно-оптических линий связи.

Оптическая регенерация также позволяет увеличить дальность передачи с использованием спектрально эффективных многоуровневых форматов. Как показано в ряде работ, регенерация оптических сигналов полностью оптическими методами (без преобразования в электрический сигнал, как в современных ВОЛС) обладает большим

потенциалом и позволяет значительно увеличить качество передаваемого сигнала [31].

В целом тенденция в сторону увеличения доли оптических устройств в управлении и коммутации сигналов является закономерной. Прогресс в этой области будет в существенной степени зависеть от прогресса в области развития компонентной базы нелинейно-оптических устройств.

4. Новая инфраструктура волоконно-оптических сетей связи

Рассмотренные выше исследования направлены на увеличение пропускной способности и снижение эксплуатационных затрат при увеличении качества сигнала в сетях связи, использующих существующую кабельную инфраструктуру. Это связано с тем, что эксплуатационный период активного оборудования оптических сетей связи составляет примерно 5 лет, в то время как эксплуатационный период кабельной инфраструктуры – примерно 25 лет. Однако возможный уже в недалеком будущем дефицит пропускной способности повышает актуальность исследований в области создания новой инфраструктуры волоконно-оптических сетей связи.

Специальные волокна с уменьшенной нелинейностью позволяют увеличить дальность передачи без регенерации за счет увеличения мощности сигнала, вводимого в ВОЛС. Такие волокна особенно востребованы при прокладке трансокеанских линий связи. Для таких линий созданы специальные волокна с увеличенной площадью моды, в которых нелинейные искажения удалось снизить примерно в 1,5 раза.

Волокна с полой сердцевиной позволяют радикально уменьшить нелинейные искажения. В таких волокнах сердцевина полая и заполнена воздухом, нелинейность которого пренебрежимо мала по сравнению с нелинейностью кварцевого стекла – материала сердцевины современных телекоммуникационных волокон. Не менее важно, что в волокнах с полой сердцевиной потенциально можно уменьшить затухание до уровня меньше 0,14 дБ/км (минимально возможного для кварцевых волокон), причем в существенно более широкой полосе длин волн.

Однако пока уровень затухания в волокнах с полой сердцевиной значительно превышает 0,2 дБ/км, что не позволяет использовать их в сетях дальней связи. В настоящее время они востребованы для спе-

цифических применений в таких линиях связи, где требуется малая физическая задержка (low latency).

Кардинально увеличить пропускную способность волокна позволяют методы пространственного мультиплексирования, которые реализуются с использованием многосердцевинных и маломодовых волокон [34–36]. Поскольку у одномодовых волокон диаметр сердцевины менее 10 мкм, то даже в оболочке стандартного размера с диаметром 125 мкм можно расположить несколько сердцевин (рис. 6). При этом по каждой сердцевине можно передавать независимые потоки информации, как по отдельным одномодовым волокнам.

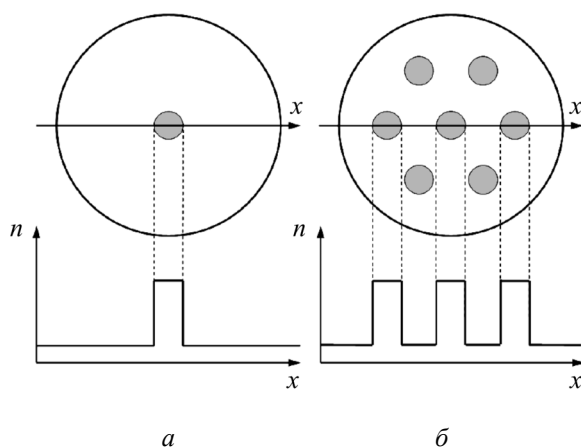


Рис. 6. Поперечные сечения (вверху) и профили показателя преломления вдоль оси x (внизу) одномодового волокна (а) и многосердцевинного волокна (б)

Большую активность в области разработки и исследований многосердцевинных волокон проявляют мировые лидеры по производству телекоммуникационного волокна и оборудования для оптических систем связи (OFS, Corning, Alcatel-Lucent, NTT, NEC, Fujikura, Sumitomo и др.), а также связанные с ними исследовательские лаборатории и центры. Продемонстрирована передача информации в таких волокнах со скоростями 1–2 Пбит/с на расстояние в несколько десятков километров. Однако для увеличения дальности передачи необходимо решить ряд технологических проблем, в первую очередь создать усилители для многосердцевинных волокон.

Второй технологией, реализующей идею пространственного мультиплексирования, является технология маломодовых волокон.

Сердцевина маломодового волокна поддерживает распространение нескольких пространственных мод (обычно 3–7), по каждой из которых может быть передан независимый поток информации.

Объединение двух методов позволило создать многосердцевинное многомодовое волокно. Продемонстрированное недавно волокно [35] содержит 36 сердцевин, каждая из которых поддерживает распространение 3 пространственных мод. В таком волокне можно одновременно передавать 108 пространственно мультиплексированных информационных каналов.

Заключение

Вот уже более 15 лет в магистральных сетях связи сохраняется экспоненциальный рост трафика, который увеличивается приблизительно в 10 раз каждые 7 лет. При сохранении этих темпов роста примерно к 2020 году будут исчерпаны все возможности увеличения пропускной способности за счет существующего технологического задела (который позволяет теоретически достичь скорости порядка 100 Тбит/с по одному волокну). Очевидна необходимость разработки новых технологий и подходов, которые позволят и далее поддерживать текущие темпы роста трафика.

В ближайшие годы прогресс в увеличении производительности систем связи будет основан на внедрении и совершенствовании спектрально эффективных форматов модуляции в сочетании с когерентным детектированием и цифровой обработкой сигналов. В перспективе, по-видимому, приоритетными направлениями развития магистральных систем связи станут расширение используемого спектрального диапазона, интеграция фотоники и электроники, развитие многомодовых и многосердцевинных волокон и соответствующих оптических усилителей.

Список литературы

1. O'Mahony M. Future optical networks // *Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks*. – 2008. – P. 611–640.
2. Трешиков В.Н. Разработка DWDM-системы емкостью 25 Тбит/с // *Фотон-экспресс*. – 2013. – № 2 (106). – С. 24–28.
3. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с / Н.В. Гуркин, О.Е. Наний, В.Н. Трешиков, Р.Р. Убайдуллаев // *Вестник связи*. – 2013. – № 2. – С. 39–40.

4. Трещиков В.Н., Наний О.Е. Новое поколение систем связи // Фотон-экспресс. – 2014. – № 4 (116). – С. 18–20.

5. Extremely higher-order modulation formats / M. Nakazawa, T. Hirooka, M. Yoshida, K. Kasai // Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. – 2013. – P. 297–336.

6. Маковой С., Коротков Н. Тенденции развития оптических систем связи, работающих со скоростью более 100 Гбит/с // Фотон-экспресс. – 2014. – № 1 (113).

7. High symbol rate coherent optical transmission systems: 80 and 107 Gbaud / G. Raibon [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32, № 4. – P. 824–826.

8. Bandwidth scalable and high fidelity spectrally-sliced transmitter / B. Guan [et al.] // OFC. – 2015. – Paper M2G.2.

9. Weber H.-G., Ludwig R. Ultra-high-speed OTDM transmission technology // Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks. – 2008. – P. 201–232.

10. Single polarization completely time-division-multiplexed 100 Gbit/s optical transmission experiment / S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama [et al.] // Proc. ECOC'93. – 1993. – P. 53–56.

11. Chandrasekhar S., Liu X. Advances in Tb/s superchannel // Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. – 2013. – P. 83–120.

12. Перспективные DWDM-системы связи со скоростью 20 Тбит/с на соединении / А.Г. Новиков, В.Н. Трещиков, С.О. Плаксин, А.Ю. Плочкин, О.Е. Наний // Фотон-экспресс. – 2012. – № 3 (99). – С. 34–38.

13. Leuthold J., Freude W. Optical OFDM and Nyquist multiplexing // Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. – 2013. – P. 381–431.

14. Doerr C.R., Okamoto K. Planar lightwave circuits in fiber-optic communications // Optical Fiber Telecommunications V A: Systems and Networks. – 2008. – P. 269–342.

15. Semiconductor photonic integrated circuit transmitters and receivers / R. Nagarajan [et al.] // Optical Fiber Telecommunications VI A: Systems and Networks. – 2013. – P. 62–147.

16. Integrated and hybrid photonics for high-performance interconnects / N. Bamiedakis [et al.] // Optical Fiber Telecommunications VI A: Systems and Networks. – 2013. – P. 458–504.

17. Wright P., Lord A., Velasco L. The network capacity benefits of flexgrid // ONDM. – URL:<http://personals.ac.upc.edu/lvelasco/docs/research/2013-ONDM-2.pdf> (дата обращения: 1.03.2016).

18. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? / O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S. Ben Yoo // *IEEE Communication Magazine*. – 2012. – Vol. 50. – P. s12–s20.

19. Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS technology / S. Frisken, G. Baxter, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke, S. Poole // *Proceedings of OFC/NFOEC*. – 2011. – OTuM3.

20. Bayvel P., Behrens C., Millar D.S. Digital signal processing (DSP) and its application in optical communication systems // *Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks*. – 2013. – P. 221–288.

21. Ip E. Nonlinear compensation using backpropagation for polarization-multiplexed transmission // *Journal of Lightwave Technology*. – 2010. – № 28. – P. 939–951.

22. Smith B.P., Kschischang F.R. Future prospects for FEC in fiber-optic communications // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2010. – Vol. 16, № 5. – P. 1245–1257.

23. Schmalen L., Lind van Wijngaarden A.J. de, Brink S. ten. Forward error correction in optical core and optical access networks // *Bell Labs Technical Journal*. – 2013. – Vol. 18, № 3. – P. 39–66.

24. Record 500 km unrepeated 100 Gb s⁻¹ transmission / V. Gainov, N. Gurkin, S. Lukinih, S. Akopov, S. Makovejs, S. Ten, O. Nanii, V. Treshchikov // *Laser Physics Letters*. – 2013. – № 10. – P. 075107.

25. Record 500 km unrepeated 1 Tbit/s (10×100G) transmission over an ultra-low loss fiber / V. Gainov, N.V. Gurkin, S.N. Lukinih, S. Makovejs, S.G. Akopov, S.Y. Ten, O.E. Nanii, V. Treshchikov, M. Sleptsov // *Optics Express*. – 2014. – № 22. – P. 22308–22313.

26. 500 km unrepeated 200 Gbit·s⁻¹ transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only / V. Gainov, N. Gurkin, S. Lukinih, I.I. Shikhaliev, P.I. Skvortsov, S. Makovejs, S. Akopov, S. Ten, O. Nanii, V. Treshchikov // *Laser Physics Letters*. – 2015. – № 12. – P. 066201 (1)–(6).

27. Однопролетные оптические линии связи большой протяженности / В.В. Гайнов, В.А. Коньшев, А.В. Леонов, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, П.И. Скворцов, В.Н. Трещиков, И.И. Шихалиев, Р.Р. Убайдуллаев // *Прикладная фотоника*. – 2015. – № 1. – С. 5–22.

28. Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи // Прикладная фотоника. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 26–49.

29. Висмутовые волоконные лазеры и усилители, работающие в области 1,3 мкм / Е.М. Дианов, С.В. Фирстов, В.Ф. Хопин, А.Н. Гурьянов, И.А. Буфетов // Квантовая электроника. – 2008. – Vol. 38, iss. 7. – P. 615–617.

30. Optical amplification in 1430–1495 nm range and laser action in Bi-doped fibers / V.V. Dvoyrin, O.I. Medvedkov, V.M. Mashinsky, A.A. Umnikov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Optical Express. – 2008. – Vol. 16, № 21. – P. 16971.

31. Sorokina M.A., Turitsyn S.K. Regeneration limit of classical Shannon capacity // Nature communications. – 2014. – Vol. 5, № 3861.

32. Towards high-capacity fibreoptic communications at the speed of light in vacuum / F. Poletti, N.V. Wheeler, M.N. Petrovich, N. Baddela, E.N. Fokoua, J.R. Hayes, D.R. Gray, Z. Li, R. Slavik, D.J. Richardson // Nature Photonics. – 2013. – № 7. – P. 279–284.

33. Transmission systems using multicore fibers / Y. Awaji [et al.] // Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. – 2013. – P. 617–651.

34. Дианов Е.М., Семенов С.Л., Буфетов И.А. Новое поколение волоконных световодов // Квантовая электроника. – 2016. – Vol. 46, № 1. – P. 1–10.

35. Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels / J. Sakaguchi [et al.] // Proceedings OFC, Th5C2. – Los Angeles, 2015.

36. 114 space-division-multiplexed transmission over 9,8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers / K. Igarashi [et al.] // Proceedings OFC, Th5C2. – Los Angeles, 2015.

References

1. O'Mahony M. Future optical networks. *Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks*, 2008, pp. 611-640.

2. Treshchikov V.N. Razrabotka DWDM-sistemy emkost'iu 25 Tbit/s [DWDM-system development with capacity of 25 Mbit/s]. *Foton-ekspress*, 2013, no. 2 (106), pp. 24-28.

3. Gurkin N.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Proizvoditel'nost' kogerentnykh DWDM-sistem s kanal'noi skorost'iu 100 Gbit/s

[Performance coherent DWDM-systems with a channel speed of 100 Gbit/s]. *Vestnik sviazi*, 2013, no. 2, pp. 39-40.

4. Treshchikov V.N., Nanii O.E. Novoe pokolenie sistem sviazi [The new generation of communication systems]. *Foton-ekspress*, 2014, no. 4 (116), pp. 18-20.

5. Nakazawa M., Hirooka T., Yoshida M., Kasai K. Extremely higher-order modulation formats. *Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks*, 2013, pp. 297-336.

6. Makovei S., Korotkov N. Tendentsii razvitiia opticheskikh sistem sviazi, rabotaiushchikh so skorost'iu bolee 100 Gbit/s [Trends in the development of optical communication systems operating at speeds of over 100 Gb/s]. *Foton-ekspress*, 2014, no. 1 (113).

7. Raibon G. [et al.] High symbol rate coherent optical transmission systems: 80 and 107 Gbaud. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, no. 4, pp. 824-826.

8. Guan B. [et al.] Bandwidth scalable and high fidelity spectrally-sliced transmitter. *OFC*, 2015, paper M2G.2.

9. Weber H.-G., Ludwig R. Ultra-high-speed OTDM transmission technology. *Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks*, 2008, pp. 201-232.

10. Kawanishi S., Takara H., Uchiyama K. [et al.] Single polarization completely time-division-multiplexed 100 Gbit/s optical transmission experiment. *Proceedings ECOC'93*, 1993, no. 3, pp. 53-56.

11. Chandrasekhar S., Liu X. Advances in Tb/s superchannel. *Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks*, 2013, pp. 83-120.

12. Novikov A.G., Treshchikov V.N., Plaksin S.O., Plotskii A.Iu., Nanii O.E. Perspektivnye DWDM-sistemy sviazi so skorost'iu 20 Tbit/s na soedinenie [Future DWDM communication system at a rate of 20 Tbit/s per connection]. *Foton-ekspress*, 2012, no. 3 (99), pp. 34-38.

13. Leuthold J., Freude W. Optical OFDM and nyquist multiplexing. *Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks*, 2013, pp. 381-431.

14. Doerr C.R., Okamoto K. Planar lightwave circuits in fiber-optic communications. *Optical Fiber Telecommunications V A: Systems and Networks*, 2008, pp. 269-342.

15. Nagarajan R. [et al.] Semiconductor photonic integrated circuit transmitters and receivers. *Optical Fiber Telecommunications VI A: Systems and Networks*, 2013, pp. 62-147.

16. Bamiedakis N. [et al.] Integrated and hybrid photonics for high-performance interconnects. *Optical Fiber Telecommunications VI A: Systems and Networks*, 2013, pp. 458-504.

17. Wright P., Lord A., Velasco L. The network capacity benefits of flexgrid. *ONDM*, available at: <http://personals.ac.upc.edu/lvelasco/docs/research/2013-ONDM-2.pdf> (accessed 1 March 2016).

18. Gerstel O., Jinno M., Lord A., Ben Yoo S. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, 2012, vol. 50, pp. s12-s20.

19. Frisken S., Baxter G., Abakoumov D., Zhou H., Clarke I., Poole S. Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS Technology. *Proceedings of OFC/NFOEC*, 2011, paper OTuM3.

20. Bayvel P., Behrens C., Millar D.S. Digital signal processing (DSP) and its application in optical communication systems. *Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks*, 2013, pp. 221-288.

21. Ip E. Nonlinear compensation using backpropagation for polarization-multiplexed transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, no. 28, pp. 939–951.

22. Smith B.P., Kschischang F.R. Future prospects for FEC in fiber optic communications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 1245-1257.

23. Schmalen L., Lind van Wijngaarden A.J. de, Brink S. ten Forward error correction in optical core and optical access networks. *Bell Labs Technical Journal*, 2013, vol. 18, no. 3, pp. 39-66.

24. Gainov V., Gurkin N., Lukinih S., Akopov S., Makovejs S., Ten S., Nanii O., Treshchikov V. Record 500 km unrepeated 100 Gb s⁻¹ transmission. *Laser Physics Letters*, 2013, no. 10, pp. 075107.

25. Gainov V., Gurkin N.V., Lukinih S.N., Makovejs S., Akopov S.G., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V., Sleptsov M. Record 500 km unrepeated 1 Tbit/s (10×100G) transmission over an ultra-low loss fiber. *Optics Express*, 2014, no. 22, pp. 22308-22313.

26. Gainov V., Gurkin N., Lukinih S., Shikhaliev I.I., Skvortsov P.I., Makovejs S., Akopov S., Ten S., Nanii O., Treshchikov V. 500 km unrepeated 200 Gbit·s⁻¹ transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only. *Laser Physics Letters*, 2015, no. 12, pp. 066201(1)-(6).

27. Gainov V.V., Konyshev V.A., Leonov A.V., Lukinykh S.N., Nanii O.E., Skvortsov P.I., Treshchikov V.N., Shikhaliev I.I., Ubaidullaev R.R.

Odnoproletnye opticheskie linii sviazi bol'shoi protiazhennosti [Very long single-span fiber optic lines]. *Prikladnaia fotonika*, 2015, no. 1, pp. 5-22.

28. Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Usiliteli na osnove vynuzhdenного kombinatsionного rasseianiia v opticheskikh sistemakh sviazi [Raman amplifiers in optical communication systems]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 26-49.

29. Dianov E.M., Firstov S.V., Khopin V.F., Gur'ianov A.N., Bufetov I.A. Vismutovye volokonnye lazery i usiliteli, rabotaiushchie v oblasti 1,3 mkm [Bi-doped fiber lasers and amplifiers operating in the 1,3 micron range]. *Kvantovaia elektronika*, 2008, vol. 38, no. 7, pp. 615-617.

30. Dvoyrin V.V., Medvedkov O.I., Mashinsky V.M., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M. Optical amplification in 1430-1495 nm range and laser action in Bi-doped fibers. *Optical Express*, 2008, vol. 16, no. 21, pp. 16971.

31. Sorokina M.A., Turitsyn S.K. Regeneration limit of classical Shannon capacity. *Nature communications*, 2014, vol. 5, no. 3861.

32. Poletti F., Wheeler N.V., Petrovich M.N., Baddela N., Fokoua E.N., Hayes J.R., Gray D.R., Li Z., Slavik R., Richardson D.J. Towards high-capacity fibreoptic communications at the speed of light in vacuum. *Nature Photonics*, 2013, no. 7, pp. 279-284.

33. Awaji Y. [et al.] Transmission systems using multicore fibers. *Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks*, 2013, pp. 617-651.

34. Dianov E.M., Semenov S.L., Bufetov I.A. Novoe pokolenie volokonnykh svetovodov [The new generation of optical fibers]. *Kvantovaia elektronika*, 2016, vol. 46, no. 1, pp. 1-10.

35. Sakaguchi J. [et al.] Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels. *Proceedings OFC*. Los Angeles, 2015.

36. Igarashi K. [et al.] 114 space-division-multiplexed transmission over 9,8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers. *Proceedings OFC*. Los Angeles, 2015.

Получено 04.04.2016