



Достижения и перспективы отечественных DWDM-систем связи

В. Н. Трещиков¹, М. А. Горбашова¹, М. О. Жулидова¹,
В. А. Коньшев¹, А. В. Леонов¹, О. Е. Наний^{1,2}, Д. Д. Старых¹,
Р. Р. Убайдуллаев¹, И. И. Шихалиев¹

¹ Компании «Т8», Москва, Россия

² МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассмотрены история развития, достижения и современные тенденции совершенствования технологических решений по увеличению скорости передачи, энергетической и экономической эффективности работы отечественных волоконно-оптических сетей связи.

Ключевые слова: DWDM, волоконно-оптическая сеть связи, когерентный прием, спектральная эффективность, формат модуляции, символьная скорость, формирование спектра, управление спектром, FlexGrid, эффект Фарадея, запас по OSNR, требуемый OSNR, BER, коэффициент ошибок, EDFA, ROPA, неравномерность, сверхдлинные линии, дата-центры

Статья получена: 20.05.2022

Статья принята: 04.06.2022

1. РАЗВИТИЕ DWDM-СИСТЕМ СВЯЗИ

Технология спектрального мультиплексирования (WDM, wavelength division multiplexing) позволяет многократно увеличить суммарный поток передаваемой по одному волокну информации за счет использования нескольких несущих. Суть спектрального уплотнения заключается в одновременной передаче по одному волокну нескольких независимых сигналов на разных оптических длинах волн. На каждой длине волны организуется отдельный оптический канал передачи информации со своим передатчиком и приемником [1]. Количество каналов может составлять от двух (в самых простых системах) до сотни и более (при использовании расширенного спектрального диапазона).

Achievements and Prospects of Domestic DWDM Communication Systems

V. N. Treshchikov¹, M. A. Gorbashova¹, M. O. Zhulidova¹,
V. A. Konyshev¹, A. V. Leonov¹, O. E. Naniy^{1,2},
D. D. Starykh¹, R. R. Ubaidullaev¹, I. I. Shikhaliev¹

¹ T8, Moscow, Russia

² Moscow State University Moscow, Russia

The history of development, achievements and current trends in improving technological solutions to increase the transmission speed, energy and economic efficiency of the domestic fiber-optic communication networks are considered.

Keywords: DWDM, fiber optic communication network, coherent detection, spectral efficiency, modulation format, symbol rate, spectrum shaping, spectrum management, FlexGrid, Faraday effect, OSNR margin, required OSNR, BER, error rate, EDFA, ROPA, flatness, extra-long lines, data centers

Статья получена: 20.05.2022

Статья принята: 04.06.2022

1. DEVELOPMENT OF DWDM COMMUNICATION SYSTEMS.

The spectral multiplexing technology (WDM, wavelength division multiplexing) allows to multiply the total capacity per fiber due to the use of several carriers. The wavelength division multiplexing concept is the simultaneous transmission of several independent signals over one fiber at different optical wavelengths. At each wavelength, a separate optical data transmission channel is arranged with its own transmitter and receiver [1]. The number of channels can range from two (in the simplest systems) to hundreds or more (when using an extended spectral range).

Initially, the fiber-optic communication systems used the amplitude modulation of laser radiation (on-off keying, OOK) was used to encode informa-



Изначально в волоконно-оптических системах связи для кодирования информации использовалась амплитудная модуляция лазерного излучения (on-off keying, ООК), а для приема – прямое детектирование (DD, direct detection). Канальная скорость в коммерческих системах с прямой модуляцией достигла 10 Гбит/с (STM-64) в 1995 году и 40 Гбит/с (STM-256) в 2002 году. Однако на этом развитие систем с прямой модуляцией остановилось, поскольку ширина полосы амплитудно-модулированного сигнала приблизилась к ширине доступной спектральной полосы в частотной сетке ITU-T.

Переломным моментом в развитии систем волоконно-оптической связи стало изобретение в 2000-х годах систем с когерентным приемом и цифровой обработкой принятого сигнала. Суть когерентного приема состоит в том, что принятый из линии сигнал смешивается с излучением опорного лазера на близкой частоте. Разностный сигнал оцифровывается с помощью высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), после чего анализируется и обрабатывается на специализированном когерентном цифровом сигнальном процессоре (Coherent DSP). Это позволяет детектировать одновременно амплитуду и фазу сигнала для каждой из поляризацій.

Переход к когерентному приему открыл возможность применения многоуровневых амплитудно-фазовых форматов модуляции и соответствующего повышения спектральной эффективности.

Спектральная эффективность (SE, spectral efficiency) – число бит, которые могут быть переданы с использованием данного формата модуляции за одну секунду в спектральной полосе один герц, размерность бит/с/Гц. Обычно при сравнении различных систем связи учитывается скорость передачи полезной информации (без FEC). Спектральную эффективность можно рассчитывать как для отдельного канала, так и для системы в целом. В современных системах, где спектральные каналы расположены вплотную друг к другу, спектральная эффективность системы и спектральная эффективность отдельного канала совпадают. Например, если DWDM-система емкостью 8 Тбит/с занимает спектральную полосу 4 ТГц (80 каналов по 50 ГГц), то ее спектральная эффективность вычисляется как $8 \text{ Тбит/с} / 4 \text{ ТГц} = 2 \text{ бит/с/Гц}$. Аналогично можно рассчитать спектральную эффективность для отдельного канала: $SE = 100 \text{ Гбит/с} / 50 \text{ ГГц} = 2 \text{ бит/с/Гц}$.

Для повышения спектральной эффективности необходимо повысить скорость передачи данных

и прямое детектирование (DD) было применено для приема. Канальные скорости в коммерческих системах прямой модуляции достигли 10 Гбит/с (STM-64) в 1995 году и 40 Гбит/с (STM-256) в 2002 году. Однако развитие систем с прямой модуляцией было остановлено в этот момент, поскольку ширина полосы амплитудно-модулированного сигнала приблизилась к ширине доступной спектральной полосы в частотной сетке ITU-T.

Ключевым моментом в развитии систем волоконно-оптической связи стало изобретение систем с когерентным приемом и цифровой обработкой принятого сигнала в 2000-х годах. Суть когерентного приема состоит в том, что принятый из линии сигнал смешивается с излучением опорного лазера на близкой частоте. Разностный сигнал оцифровывается с помощью высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), после чего анализируется и обрабатывается на специализированном когерентном цифровом сигнальном процессоре (Coherent DSP). Это позволяет одновременно детектировать амплитуду и фазу сигнала для каждой поляризации.

Переход к когерентному приему открыл возможность применения многоуровневых амплитудно-фазовых форматов модуляции и соответствующего повышения спектральной эффективности.

Спектральная эффективность (SE) – это количество бит, которые могут быть переданы с использованием данного формата модуляции за одну секунду в спектральной полосе один герц, размерность бит/с/Гц. Обычно при сравнении различных систем связи учитывается скорость передачи полезной информации (без FEC). Спектральную эффективность можно рассчитывать как для отдельного канала, так и для системы в целом. В современных системах, где спектральные каналы расположены вплотную друг к другу, спектральная эффективность системы и спектральная эффективность отдельного канала совпадают. Например, если DWDM-система емкостью 8 Тбит/с занимает спектральную полосу 4 ТГц (80 каналов по 50 ГГц), то ее спектральная эффективность вычисляется как $8 \text{ Тбит/с} / 4 \text{ ТГц} = 2 \text{ бит/с/Гц}$. Аналогично можно рассчитать спектральную эффективность для отдельного канала: $SE = 100 \text{ Гбит/с} / 50 \text{ ГГц} = 2 \text{ бит/с/Гц}$.

Для повышения спектральной эффективности необходимо повысить скорость передачи данных и прямое детектирование (DD) было применено для приема. Канальные скорости в коммерческих системах прямой модуляции достигли 10 Гбит/с (STM-64) в 1995 году и 40 Гбит/с (STM-256) в 2002 году. Однако развитие систем с прямой модуляцией было остановлено в этот момент, поскольку ширина полосы амплитудно-модулированного сигнала приблизилась к ширине доступной спектральной полосы в частотной сетке ITU-T.

Ключевым моментом в развитии систем волоконно-оптической связи стало изобретение систем с когерентным приемом и цифровой обработкой принятого сигнала в 2000-х годах. Суть когерентного приема состоит в том, что принятый из линии сигнал смешивается с излучением опорного лазера на близкой частоте. Разностный сигнал оцифровывается с помощью высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), после чего анализируется и обрабатывается на специализированном когерентном цифровом сигнальном процессоре (Coherent DSP). Это позволяет одновременно детектировать амплитуду и фазу сигнала для каждой поляризации.

при той же занимаемой спектральной полосе. Для этого используются многоуровневые форматы модуляции. Однако, при этом неизбежной платой за повышение скорости является снижение качества передаваемого сигнала и, как следствие, снижение дальности передачи (рис. 1).

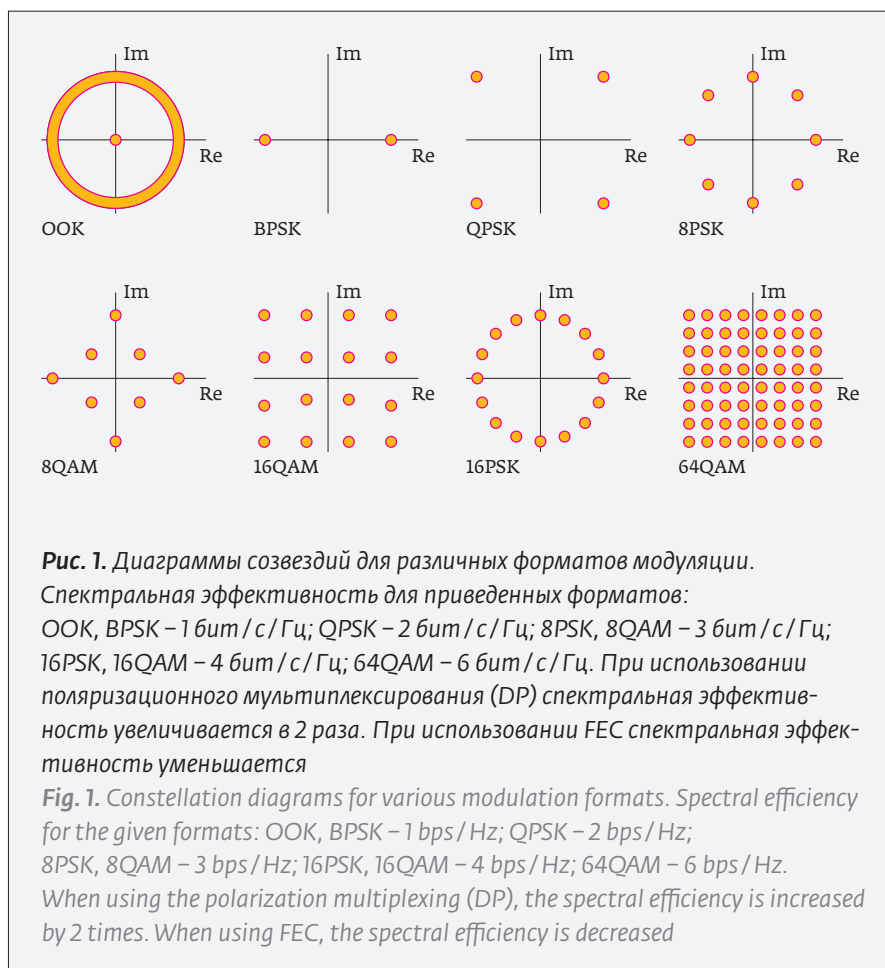
На протяжении второй декады XXI века когерентные системы прошли несколько этапов своего развития, начиная с первых систем со скоростью передачи 40 Гбит/с по одной длине волны (символьная скорость 20 Гбод, формат модуляции DP-BPSK) и до наиболее современных систем со скоростью передачи 600 Гбит/с по одной длине волны (символьная скорость 56 Гбод, формат модуляции DP-64QAM), рис. 2. Таким образом, скорость передачи данных по одной несущей увеличилась в 15 раз [2].

В то же время усложнение формата модуляции неизбежно ведет к падению дальности. Чем больше дискретных состояний оптического сигнала используется, тем выше символьная эффективность кодирования, но при этом ниже качество сигнала и дальность передачи (см. рис. 3).

Дальность передачи L не менее важна для операторов связи, чем скорость передачи по одной длине волны. Под дальностью в магистральных системах подразумевается дальность передачи в многопролетной линии на каскаде усилителей без регенерации сигнала. Чем больше эта дальность, тем реже на магистральной линии нужно ставить приемопередающее оборудование, следовательно, ниже и стоимость решения.

Современные когерентные системы поддерживают возможность выбора формата модуляции, благодаря чему оператор может настроить оптимальный для своих задач баланс между дальностью и скоростью передачи данных.

Далее можно определить основной показатель волоконно-оптической линии связи, задача которой состоит в том, чтобы передать по оптоволокну максимальный поток данных на максимальное расстояние с минимальным использованием спек-

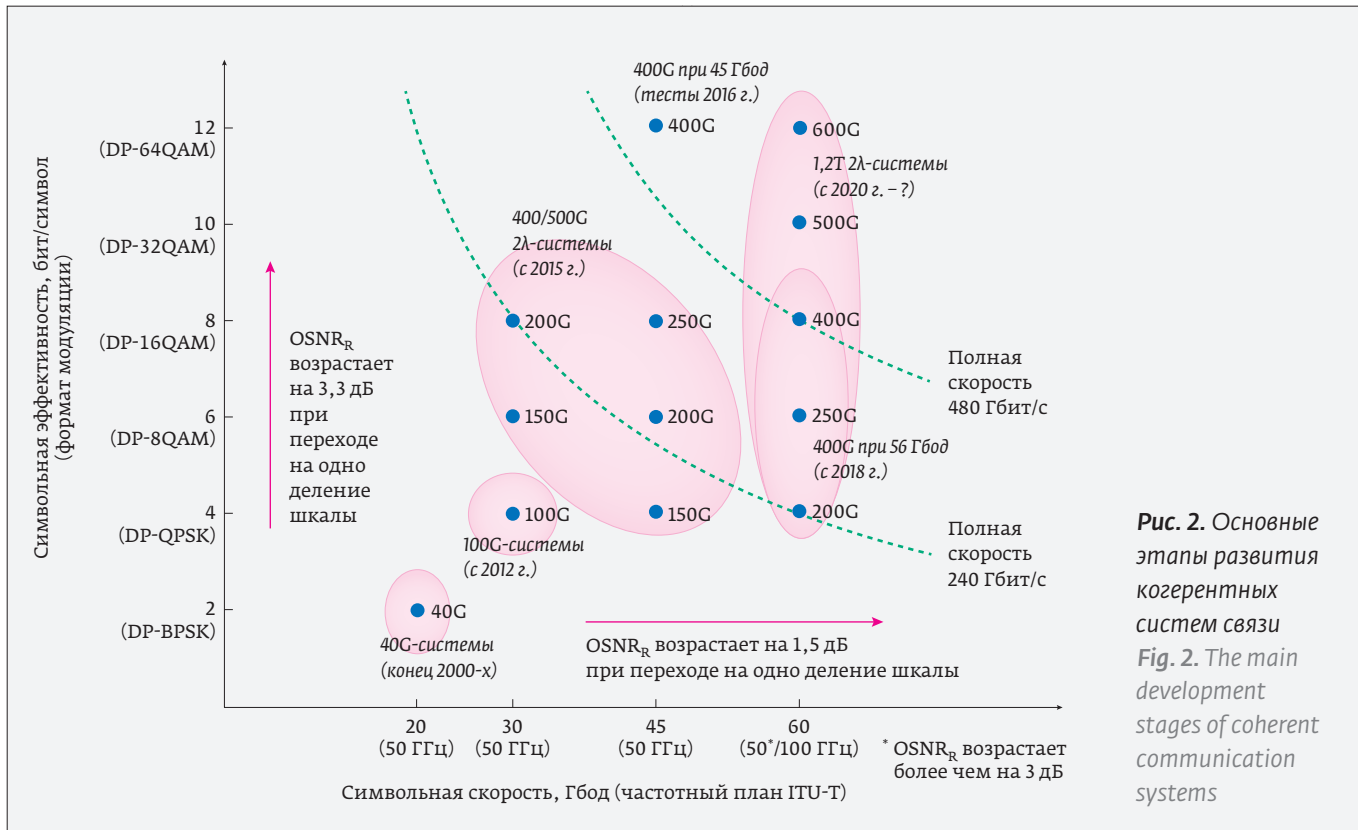


length (symbol rate: 20 Gbaud, modulation format: DP-BPSK) to the most modern systems with a transmission rate of 600 Gbit/s over a single wavelength (symbol rate: 56 Gbaud, modulation format: DP-64QAM), see Fig. 2. Thus, the data transmission rate over one carrier is increased by 15 times [2].

Moreover, the modulation format complication inevitably leads to a drop in reach. The more discrete states of the optical signal are used, the higher the symbolic coding gain, the lower the signal quality and transmission range (see Fig. 3).

The transmission reach L is no less important for the telecoms operators than the transmission rate over a single wavelength. The reach in the long-haul systems means the transmission reach in a multi-span line with a cascade of amplifiers and without signal regeneration. The greater this reach, the less often it is necessary to install the transceivers on the long-haul line; therefore, the solution cost is also lower.

The up-to-date coherent systems support the possible selection of a modulation format, so that the



трального диапазона. Таким образом, для сравнения систем связи удобно использовать параметр удельной производительности – произведение спектральной эффективности на дальность передачи ($SE \cdot L$) [3].

Спектральная эффективность SE оборудования связи обычно известна или легко вычисляется. Основную сложность при сравнении удельной производительности различных используемых и перспективных технологий представляет вычисление дальности передачи L , которую может обеспечить та или иная система связи. Максимальная удельная производительность достигается в системах 100 Гбит/с с модуляцией DP-QPSK [4–6].

Увеличение канальной скорости передачи достигается не только за счет использования многоуровневых форматов. Продолжает расти символическая скорость передачи, поддерживаемая электронной компонентной

operator can set the optimal balance between the range and data rate for his tasks.

Further, it is possible to determine the main indicator of a fiber-optic communication line, the objective of which is to transmit the maximum data rate

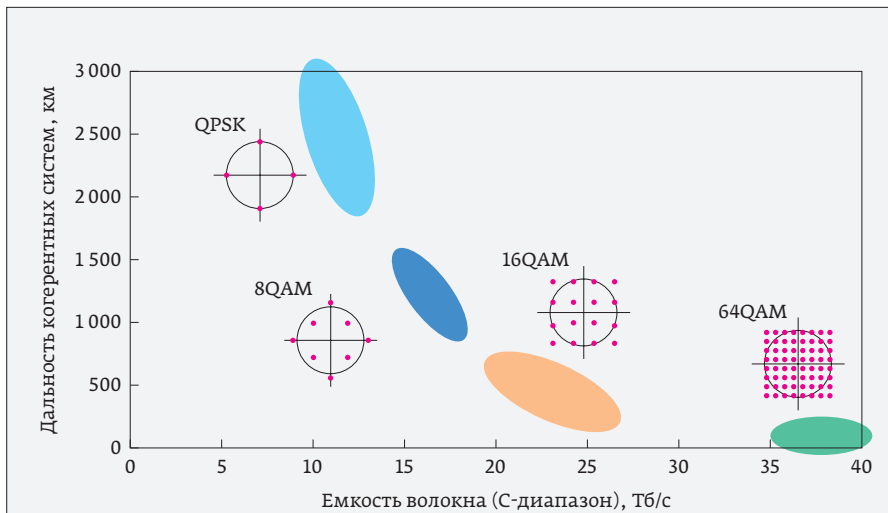


Рис. 3. Взаимосвязь пропускной способности и дальности когерентных систем связи, использующих разные форматы модуляции
Fig. 3. Relations between the transmission capacity and reach of coherent communication systems using various modulation formats



базой. В 2020 году ведущие мировые производители анонсировали активное освоение на уровне компонентной базы символьных скоростей в диапазоне 64–100 Гбод, что позволяет передавать потоки данных до 800 Гбит/с по одной длине волны.

Продолжается миниатюризация оптических компонентов и комплектов, в том числе за счет активного использования интегральной фотоники.

Активно развивается рынок оптоволоконных систем агрегации/доступа для нового поколения беспроводных сетей (5G). Беспроводные сети нового поколения потребуют значительно более плотного расположения базовых станций, чем в сетях 4G (количество базовых станций, по оценкам, должно возрасти в сотни раз), более высокой скорости оптоволоконной линии связи к каждой базовой станции (10 Гбит/с и выше), существенно меньших задержек сигнала (например для задач управления беспилотным транспортом в системах типа «умный город»). Все это формирует специфические требования к оборудованию DWDM/OTN, которое планируется использовать на уровне транспортной сети систем 5G.

DWDM активно проникает на новые рынки, прежде всего на рынок систем связи для центров обработки данных (ЦОД или DCI). В отличие от сферы телекоммуникаций, где DWDM-системы традиционно применяются в основном для магистральной передачи данных на большие расстояния, на рынке ЦОД технология DWDM применяется для высокоскоростной передачи на небольшие расстояния (рис. 4). Это предъявляет к оборудованию новые требования, которых не было в телекоме, и ведет к появлению нового класса решений. Решения для ЦОД отличаются высокой плотностью портов, высокой скоростью передачи данных в расчете на один слот/юнит, высокой компактностью, в том числе наличием широкого спектра компактных гибридных блоков, которые позволяют сэкономить стоечное пространство [7].

В России ведущим производителем волоконно-оптических систем связи на основе технологии спектрального уплотнения (DWDM) в настоящее время является компания «Т8». В компании работает более 350 человек, в том числе четыре доктора наук и более двадцати кандидатов наук. Ядро коллектива компании составляют выпускники ведущих ВУЗов – МФТИ, МГУ, МГТУ им. Баумана, МИФИ, МТУСИ, СПбГУТ и др.

Разработка скоростных DWDM-систем ведется компанией с 2008 года. В 2012 году компания «Т8» продемонстрировала когерентный транспондер

over the optical fiber at the maximum distance with the minimum use of the spectral range. Thus, to compare the communication systems, it is convenient to use the *specific capacity* parameter, namely the product of the spectral efficiency and the transmission reach ($SE \cdot L$) [3].

The spectral efficiency SE of communication equipment is usually known or easily calculated. The main difficulty in comparing the specific capacity of various applied and promising technologies is the transmission reach L calculation that can be provided by a particular communication system. The maximum specific capacity is achieved in the 100 Gbit/s systems with DP-QPSK [4]–[6] modulation.

The increase in the channel transmission rate is achieved not only due to the use of multi-level formats. The symbol transmission rate supported by the electronic component base continues to be grown. In 2020, the world's leading manufacturers announced the active development of symbol rates in the range of 64–100 Gbaud at the component base level that makes it possible to transmit the data flows up to 800 Gbps over a single wavelength.

The miniaturization of optical components and accessories is also continued, including through the active use of integrated photonics.

The fiber optic aggregation/access system market for a new generation of wireless networks (5G) is actively developing. The next-generation wireless networks will require much denser base station location than for 4G networks (the number of base stations is estimated to be increased by hundreds of times), the higher fiber optic line velocity factors to each base station (10 Gbps or more), significantly lower signal delays (for example, for control of the unmanned vehicles in the smart city systems). All these factors develop the specific requirements for DWDM/OTN equipment that is planned to be used at the level of the 5G system transmission network.

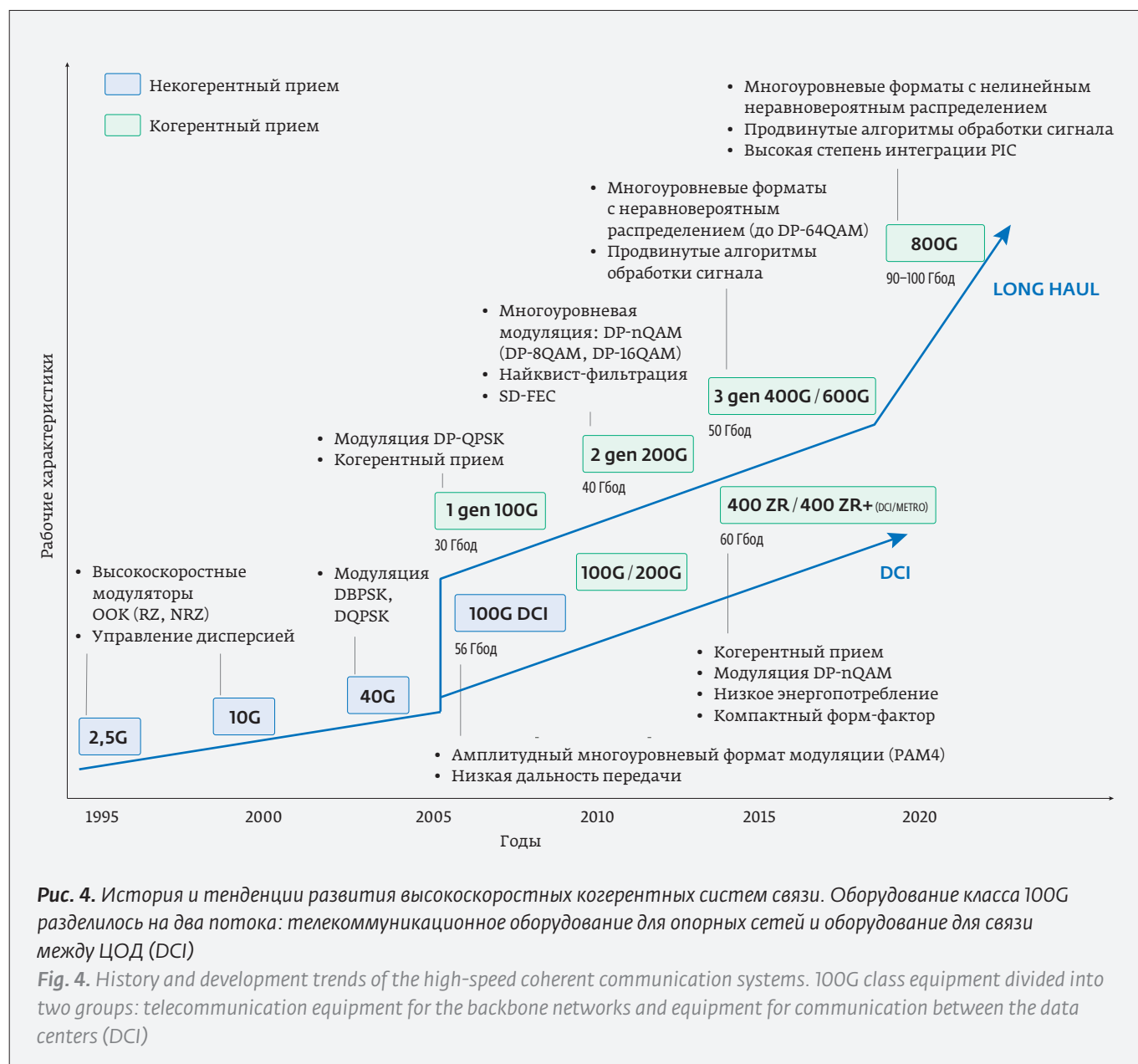
DWDM is actively breaking into the new markets, primarily the market of communication systems for data processing centers (DPC or DCI). In contrast to the telecommunications industry, where the DWDM systems are conventionally used mainly for the long-haul data transmission over long distances, the DWDM technology in the data center market is used for the high-speed transmission over short distances (Fig. 4). This imposes new requirements on the equipment not available in the field of telecommunications, and leads to the emergence of a new class of solutions. The data center solutions are distinguished by the high port density, high data transfer rate per slot/unit, high compactness,



100 Гбит/с собственной разработки, войдя в пятерку компаний в мире, обладающих на тот момент данной технологией. В 2018 году компанией представлено коммерческое оборудование 200 Гбит/с. К 2020 году разработана и запущена в серийное производство линейка DWDM-устройств с поддержкой канальных скоростей 2,5; 10; 40; 100 Гбит/с; 200 Гбит/с (по одной оптической несущей), начата разработка устройств 600 Гбит/с (по двум длинам волн в частотной сетке 100 ГГц) и 800 Гбит/с (по одной длине волны). Характеристики созданных компанией «Т8» DWDM-систем соответствуют мировому уровню коммерческих магистральных DWDM-систем.

including availability of a wide range of compact hybrid units that save the rack space [7].

In Russia, the leading manufacturer of fiber-optic communication systems based on the DWDM technology is T8. The company employs more than 350 people, including four doctors of sciences and more than twenty Ph. Ds. The core of the company's team are graduates from the leading universities, such as the Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow State University, Bauman Moscow State Technical University, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Saint-Petersburg State University of Telecommunications, etc.





2. ПЛАТФОРМА «ВОЛГА»

Компания «Т8» разработала и выпускает полноценную мультисервисную DWDM-платформу «Волга», которой присвоен статус телекоммуникационного оборудования российского происхождения (ТОРП) и которая занесена в Единый реестр российской радиоэлектронной продукции. В рамках этой платформы создана полная линейка оборудования для волоконно-оптических систем связи на базе технологии спектрального уплотнения (DWDM). В состав оборудования входят блоки транспондеров и агрегирующих транспондеров (агрегаторов) с разными скоростями передачи и различными комбинациями клиентских и линейных интерфейсов, блоки оборудования оптического тракта (усилители, мультиплексоры и другие), шасси и блоки управления, вспомогательные блоки, а также системы сетевого управления и мониторинга класса EMS/NMS (рис. 5).

Кроме оборудования для стандартных телекоммуникационных применений выпускаются системы для инфраструктуры связи центров обработки данных – DCI, а также развивается линейка оборудования, адаптированная для применения на сетях 5G.

Семейство мультисервисной платформы «Волга» для построения высокоскоростных DWDM-сетей поддерживает канальную скорость до 800 Гбит/с, до 28 Тбит/с в одной паре волокон. Система обеспечивает пропускную способность до 28 Тбит/с в С-диапазоне по паре волокон. Передача дан-

The company has been developing the high-speed DWDM systems since 2008. In 2012, T8 demonstrated a 100 Gbps coherent transponder developed in house, becoming one of the top five companies in the world who had this technology at that time. In 2018, the company introduced 200 Gb/s commercial equipment. By 2020, a range of DWDM devices with the support of channel rates of 2.5, 10, 40, 100 Gb/s, 200 Gb/s (one optical carrier) has been developed and commercialized; the development of 600 Gb/s devices (over two wavelengths in the 100 GHz frequency grid) and 800 Gbit/s devices (one wavelength) has begun. The performance of T8's DWDM systems is comparable to the world-class commercial long-haul DWDM systems.

2. VOLGA PLATFORM

T8 has developed and is producing a full-fledged multi-service Volga DWDM platform that has received the status of the Russian-made telecommunications equipment and is listed in the Unified Register of Russian Radioelectric Products. This platform is accompanied with the complete range of equipment for the fiber optic communication systems based on the DWDM technology. The equipment includes the units of transponders and aggregating transponders (aggregators) with various transmission rates and various combinations of the customer and line interfaces, units of optical path equipment (amplifiers, multiplexers, etc.), chassis and control units, auxiliary units, as well as

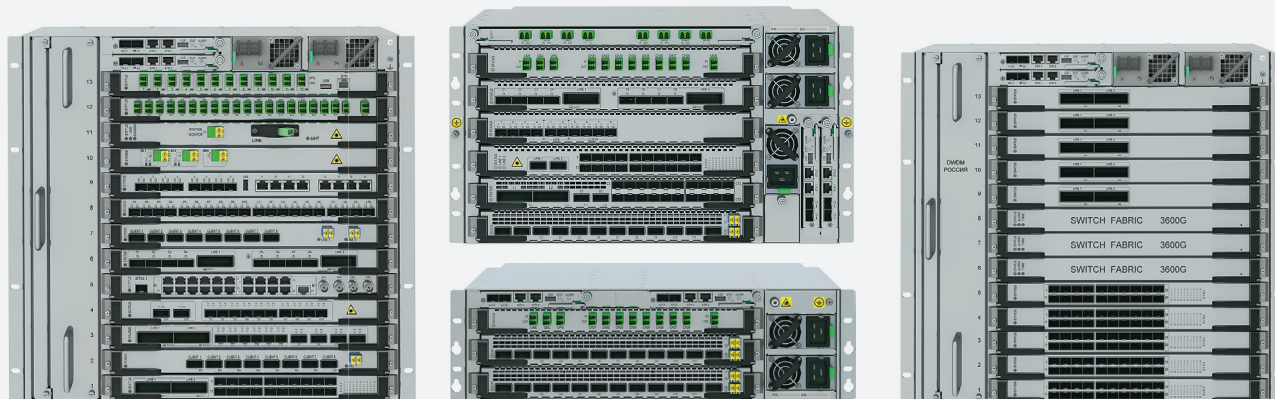


Рис. 5. DWDM T8 – оборудование мирового класса: телекоммуникационное оборудование для магистральных оптических сетей связи; телекоммуникационное оборудование для городских сетей и ЦОД; первый российский OTN кросс-коммутатор

Fig. 5. DWDM T8 – a world class equipment: telecommunication equipment for the backbone optical communication networks; telecommunication equipment for the metro networks and data centers; the first Russian OTN cross-connect



ных в каждом спектральном канале производится на скоростях 800, 600, 400, 200, 100, 40, 10 Гбит/с и менее. Реконфигурация сети и ее расширение могут производиться без перерыва трафика. Высокое качество сигнала на транспондерах позволяет вводить каналы на существующих линиях, построенных ранее для организации низкоскоростных каналов.

Шасси позволяет оперативно увеличивать емкость сети путем добавления в свободные слоты требуемых блоков. Линейка шасси платформы включает размеры от 1U до 10U. Выпускаются шасси с резервированием системы управления и блоков питания (БП) двух типов: DC 36–72 В или AC 220 В. Шасси устанавливается в стандартные стойки «19/21».

3. ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ DWDM-СИСТЕМЫ ДАЛЬНОЙ СВЯЗИ

К основным физическим параметрам DWDM-систем относятся: емкость, спектральная эффективность, производительность и удельная производительность, а также требуемое оптическое отношение сигнал-шум (OSNR) транспондера в конфигурации «back-to-back».

Емкость (C, capacity) – это произведение числа каналов на максимальную поддерживаемую скорость в канале. Например, емкость DWDM-системы, которая способна передать 80 каналов по 100 Гбит/с в каждом, равна 8 Тбит/с.

Повышать емкость DWDM-системы можно как за счет повышения скорости в единичном канале, так и за счет увеличения количества каналов в системе.

Производительность системы связи – это произведение емкости C на максимальную дальность передачи L и измеряется в бит·км/с:

$$P_E = C \cdot L. \quad (1)$$

Используя определение спектральной эффективности как отношение скорости передачи данных к используемому спектральному диапазону $\Delta\nu$, выражение (1) можно записать в виде:

$$P_E = SE \cdot \Delta\nu \cdot L. \quad (2)$$

Предельная дальность многопролетной линии связи зависит от многих характеристик: длин пролетов, затухания в волокне, шум-фактора усилителей, коэффициента нелинейности (выражающего влияние нелинейных эффектов на распространение сигнала), входных мощностей

the network management and monitoring systems of the EMS/NMS class (Fig. 5).

In addition to the equipment for standard telecommunications applications, the systems are being produced for the data center communication infrastructure (DCI). The range of equipment adapted for the use on 5G networks is also being developed.

The family of the Volga multiservice platform for the high-speed DWDM networks supports the channel rate of up to 800 Gbps, and up to 28 Tbps in one pair of fibers. The system provides the bandwidth capacity of up to 28 Tbps in the C-band over a pair of fibers. Data transmission in each spectral channel is performed at the rates of 800, 600, 400, 200, 100, 40, 10 Gbit/s and less. The network reconfiguration and its expansion can be performed without traffic interruption. The high signal quality at the transponders allows to enter the channels on existing lines built earlier for the low-speed channels.

The chassis allows to quickly increase the network capacity by adding the required units to the free slots. The platform chassis range includes the dimensions from 1U to 10U. The chassis is available with the redundant control system and power supply units (PSU) of two types: DC 36–72 V or AC 220 V. The chassis is installed in the standard 19/21» racks.

3. HIGH-SPEED COHERENT LONG-DISTANCE DWDM COMMUNICATION SYSTEMS

The main physical parameters of DWDM systems include the capacity, spectral efficiency, performance and specific capacity, as well as the required optical signal-to-noise ratio (OSNR) of the transponder in the back-to-back configuration.

Capacity (C) is the product of the number of channels and the maximum supported rate in the channel. For example, the capacity of a DWDM system that is capable of transmitting 80 channels of 100 Gbps each is 8 Tbps.

It is possible to increase the DWDM system capacity both by increasing the rate in a single channel and by increasing the number of channels in the entire system.

The communication system performance is the product of the capacity C and the maximum transmission reach L and is measured in bit·km/s:

$$P_E = C \cdot L. \quad (1)$$

в каждый пролет, количества и типа передаваемых каналов, используемого частотного плана и защитных интервалов, требуемого эксплуатационного запаса по OSNR, пороговой чувствительности транспондера OSNR_T. Значения входных мощностей в линии могут выбираться по-разному в зависимости от используемого метода оптимизации линии (минимизация BER, максимизация запаса по OSNR и др.). Методы оптимизации для систем с когерентным приемом сигнала отличаются от методов, принятых в системах с некогерентным приемом. Для сравнения разных технологий необходимо все экспериментальные или расчетные дальности пересчитать к единому набору входных параметров (характеристик линии).

На рис. 6 показаны три способа увеличения регенерационной длины, а на рис. 7 – три способа увеличения полной скорости передачи по паре волокон.

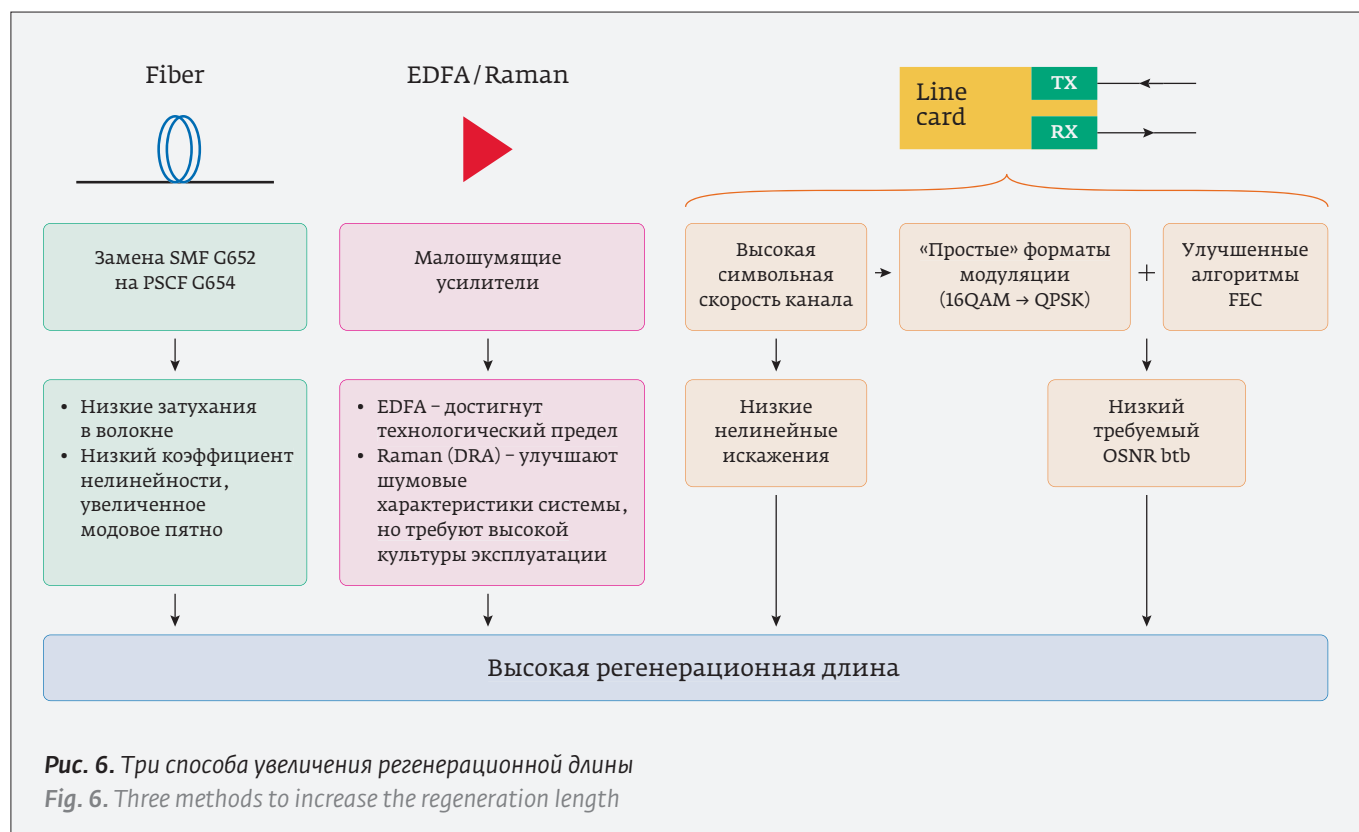
Увеличение скорости передачи информации в оптических сетях связи за счет применения многоуровневых форматов снижает дальность безрегенерационной передачи и производительность систем связи. Возникает вопрос: а как скажется на дальности передачи информации и производительности увеличение канальной скорости

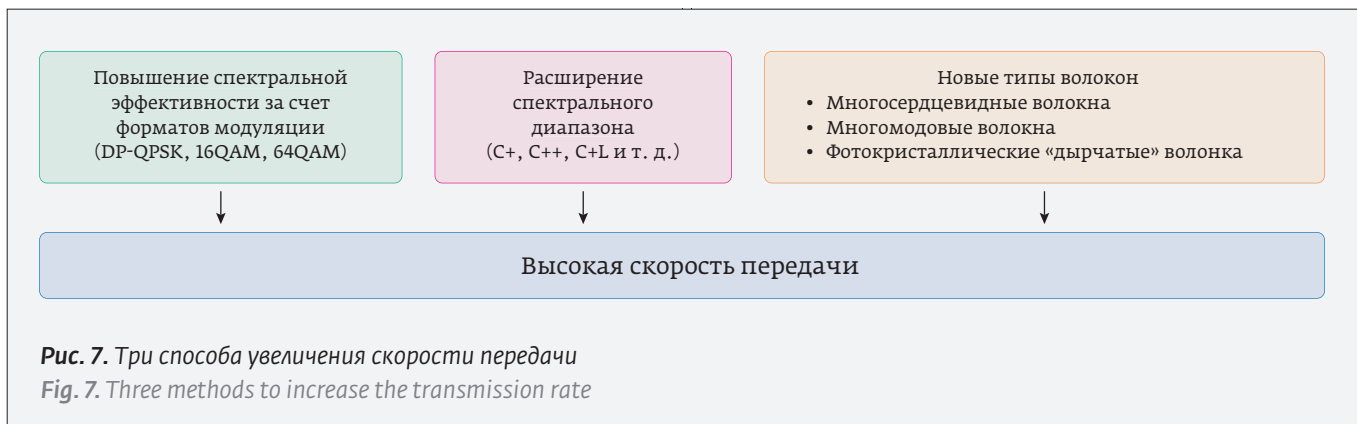
Using the definition of spectral efficiency expressed as the ratio of data rate to the used spectral range $\Delta\nu$, the formula (1) can be shown as follows:

$$P_E = SE \cdot \Delta\nu \cdot L. \quad (2)$$

The maximum reach of a multi-span communication path depends on many specifications, such as the span length, attenuation in the fiber, the noise factor of the amplifiers, non-linearity factor (that expresses the influence of non-linear effects on the signal propagation), the input powers in each span, the number and type of transmitted channels, the frequency plan used, and guard band, the required operating margin for OSNR, the transponder sensitivity threshold OSNR_T. The line input power values can be selected in different ways depending on the line optimization method used (BER minimization, OSNR margin maximization, etc.). The optimization methods for the systems with coherent signal detection differ from those used in the systems with non-coherent detection. To compare various technologies, it is necessary to recalculate all experimental or calculated reaches based on a single set of input parameters (line characteristics).

Figure 6 shows three methods to increase the regenerative length, and Figure 7 shows three meth-



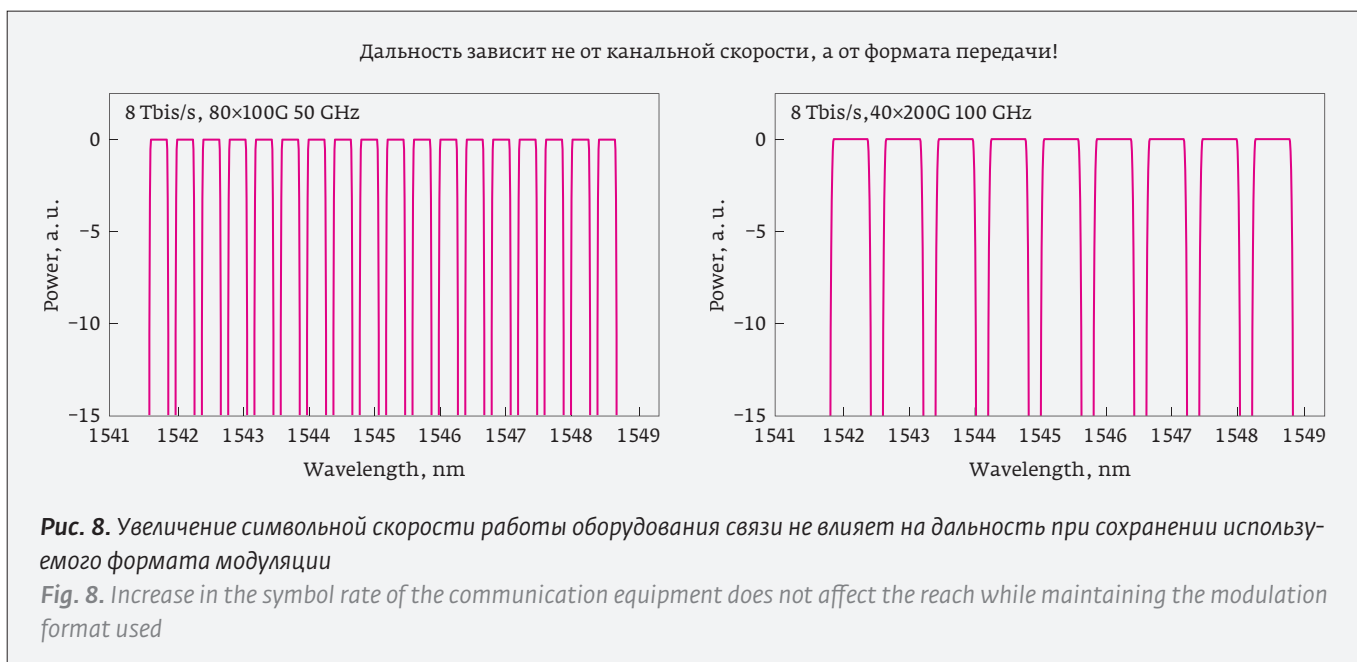


передачи информации за счет увеличения символической скорости? Сравним низкоскоростную (узкополосную с канальной полосой 35 ГГц) и высокоскоростную (широкополосную с канальной полосой 70 ГГц) канальные конфигурации (см. рис. 8). Пусть в обоих случаях полные мощности на входе в пролет будут равны. Поскольку в широкополосной конфигурации в 2 раза меньше каналов, следовательно, канальная мощность широкополосных каналов должна быть в 2 раза выше. Как известно, спектральная плотность мощности шумов ASE в первую очередь определяется полной мощностью, приходящей на EDFA. Следовательно, в первом приближении спектральная плотность мощности шумов ASE останется в обоих случаях одинаковой.

Аналогичное утверждение можно сделать и о спектральной плотности мощности нелиней-

ных эффектов, способствующих увеличению скорости передачи информации за счет увеличения символической скорости.

Increase in the data rate in the optical communication networks due to the use of multi-level formats reduces the non-regeneration transmission reach and the communication system performance. This poses the following question: how will the increase in the channel data transfer rate due to the increased symbol rate affect the data transmission reach and performance? We will compare the low speed (narrowband with 35 GHz channel bandwidth) and high speed (broadband with 70 GHz channel bandwidth) channel configurations (see Figure 8). In both cases the total input power of the span will be equal. Since there are 2 times fewer channels in a broadband configuration, therefore, the channel power of broadband channels should be 2 times higher. As is known,



ных шумов. Данное утверждение следует из референсной формулы модели нелинейного аддитивного гауссова шума. Следовательно, полная спектральная плотность шумов на выходе линии останется постоянной.

Таким образом, спектральные плотности мощности сигнала и шумов останутся одинаковыми в обоих случаях, а значит и спектральное отношение сигнал-шум (SNR) будет одинаковым. При этом, исходя из определения OSNR, следует, что для широкополосных каналов (70 ГГц) полное OSNR на выходе линии будет в 2 раза выше, чем для узкополосных (35 ГГц).

Как известно, BER взаимно однозначно функционально связан именно с величиной SNR. Конкретный вид функциональной зависимости определяется форматом модуляции (см. таблицу 1). Поскольку нелинейные шумы также определяются величиной SNR, а не величиной OSNR, то при оптимальной канальной мощности качество сигнала будет одинаковым при использовании оптимальной канальной мощности (см. рис. 9).

Иными словами, хотя при увеличении символьной скорости в 2 раза возрастают в 2 раза оптимальная канальная мощность (и оптимальная величина OSNR) максимальная дальность передачи не изменяется.

Полученный результат только на первый взгляд кажется парадоксальным, но он легко объясняется, если рассмотреть связь SNR и OSNR, которая с хорошей точностью описывается приближенной формулой, приведенной ниже (для формата QPSK, 1 поляризация):

$$OSNR = \frac{R_s}{2B_{ref}} SNR. \quad (3)$$

Из этой формулы явно следует, что при фиксированном оптимальном значении SNR увеличение символьной скорости R_s , равной удвоенной электрической полосе ($R_s = 2 \cdot BW_e$, $B_{ref} = 12,5$ ГГц), оптимальное значение OSNR пропорционально символьной скорости R_s и также увеличивается, но достижимое качество сигнала и дальность от символьной скорости не зависят (см. рис. 9 и 10).

Таблица. Зависимость BER от SNR для различных форматов модуляции
Table. BER versus SNR for various modulation formats

Формат модуляции Modulation format	Формула Formula	Примечание Notes
PM-BPSK	$BER = 0,5 \cdot \text{erfc}(\sqrt{SNR})$	Точная формула Exact formula
PM-QPSK	$BER = 0,5 \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{2}SNR}\right)$	Точная формула для кода Грэя Exact formula for Gray code
PM-8QAM	$BER = \frac{2}{3} \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{3}{14}SNR}\right)$	Приближенная формула Approximation formula
PM-16QAM	$BER = \frac{3}{8} \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{10}SNR}\right)$	Приближенная формула Approximation formula
ASK и PM ASK	$BER = 0,5 \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{2}SNR}\right)$	Точная формула Exact formula

the ASE noise power spectral density is primarily determined by the total power arriving at the EDFA. Therefore, at a first approximation, the ASE noise power spectral density will remain the same in both cases.

A similar statement can be made in relation to the nonlinear noise power spectral density. This statement follows from the reference formula of the nonlinear additive Gaussian noise model.

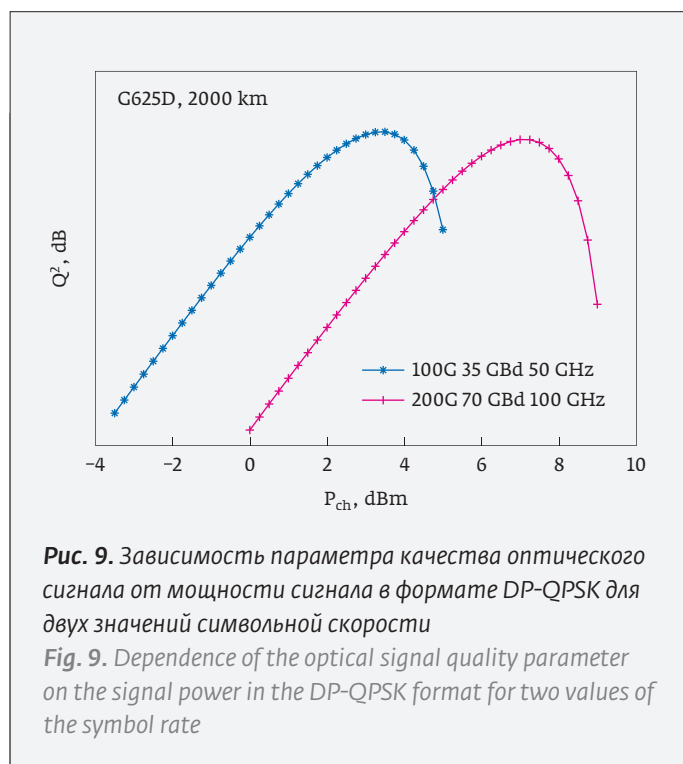


Рис. 9. Зависимость параметра качества оптического сигнала от мощности сигнала в формате DP-QPSK для двух значений символьной скорости

Fig. 9. Dependence of the optical signal quality parameter on the signal power in the DP-QPSK format for two values of the symbol rate

На практике необходимо к теоретическим значениям требуемого SNR добавить штрафы, связанные с техническими ограничениями конкретной реализации аппаратуры.

В компании «Т8» переход от первого поколения оборудования с полной скоростью 1,2 Тбит/с (80×200G) к оборудованию (40×400G) не только не привел к снижению максимальной дальности передачи, но и увеличил дальность на 15–65%. При этом главное преимущество нового поколения систем связи с увеличенной канальной скоростью заключается в снижении стоимости передаваемой информации.

4. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ, ПРОЕКТИРОВАНИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ СВЯЗИ

4.1. Нелинейный режим работы когерентных систем связи

Использование новых для индустрии форматов модуляции привело к необходимости разработки новых методов оптимизации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) на их основе. Эта задача была успешно выполнена компанией «Т8»: создана новая методика настройки параметров каналаобразующего оборудования (линейных карт) и математический аппарат, использующий эти параметры для проектирования ВОЛС; разработана методика расчета характеристик когерентных волоконно-оптических сетей связи с учетом множества физических эффектов, одновременно воздействующих на распространение сигнала. Предложенные алгоритмы и простые в использовании «инженерные» методики, позволяющие прогнозировать производительность сетей, существенно упрощают проектирование. Результаты исследований опубликованы в статьях [8–13].

Therefore, the total noise spectral density at the line output will remain constant.

Thus, the spectral power densities of the signal and noise will remain the same in both cases, and hence the spectral signal-to-noise ratio (SNR) will be the same. Moreover, based on the OSNR definition, it follows that for the broadband channels (70 GHz) the total OSNR at the line output will be 2 times higher than for the narrowband ones (35 GHz).

As far as is known, BER is one-to-one functionally related to the SNR value. The specific type of functional dependence is determined by the modulation format (see Table 1). Since the non-linear noise is also determined by the SNR value and not by the OSNR value, the signal quality will be the same when using the optimal channel power (see Fig. 9).

In other words, although doubling the symbol rate increases the optimal channel power (and the optimal OSNR) by 2 times, the maximum transmission reach is not changed.

The result obtained seems paradoxical at first sight only. However, it is easily explained if we consider the relations between SNR and OSNR

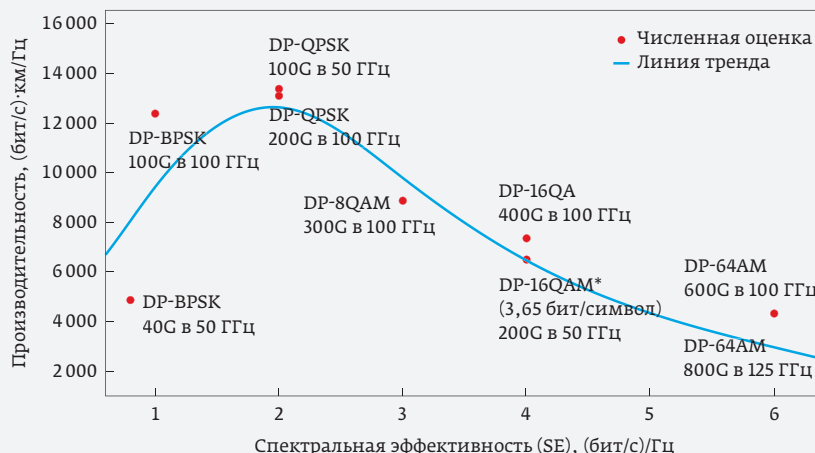


Рис. 10. Производительность оптических систем связи зависит от формата модуляции и связанной с ним спектральной эффективности, но слабо зависит от символической скорости. Зависимость от символической скорости связана с техническими возможностями и особенностями реализации
Fig. 10. The performance of optical communication systems depends on the modulation format and the related spectral efficiency, but weakly depends on the symbol rate. Dependence on the symbol rate is related to the technical capabilities and implementation features



4.2. Преодоление прерывания связи при ударах молний в ОКГТ

Использование оптических кабелей в грозотросе (ОКГТ) является экономически эффективным техническим решением, поскольку позволяет реализовать одновременно и функции грозотроса, защищающего линии электропередач от ударов молний, и функции телекоммуникационного оптического кабеля, применяющегося для передачи данных по оптическим волокнам.

Однако прямой удар молнии в ОКГТ, как оказалось, может вызывать кратковременные прерывания связи при использовании современных когерентных высокоскоростных систем передачи информации. Проведенные исследования и численное моделирование позволили установить физический механизм этого явления: удар молнии формирует в волокне сильное продольное магнитное поле, изменение которого, в свою очередь, приводит к вращению состояния поляризации оптического сигнала из-за эффекта Фарадея и к появлению ошибок на приемной стороне [14–17]. Наиболее чувствительными к ударам молнии оказались современные высокоскоростные когерентные системы передачи с многоуровневыми форматами модуляции и поляризационным мультиплексированием.

При ударе молнии скорость вращения состояния поляризации сигнала в волокне может достигнуть величины 10 Мрад/с (обычно 1–5 Мрад/с).

В обычных когерентных транспондерах это приводит к прерыванию связи. Установление причины прерывания связи позволило компании «Т8» создать когерентные транспондеры 100/200/400G, оснащенные функцией SOP-suppression, способные противостоять таким сильным возмущениям сигнала, вызываемым ударами молний (см. рис. 11).

Как видно из рисунка, использование алгоритма отслеживания состояния поляризации позволяет существенно улучшить устойчивость работы транспондера в условиях ударов молний.

Кроме того, по результатам исследований влияния ударов молнии на поляризацию света разработан и запущен в производство прибор для определения местоположения и мощности молнии.

4.3. Использование статистических закономерностей в спектрах усилителей для оптимизации линий связи

При распространении многоканального сигнала по оптической линии связи форма его спектра искажается. Неровности в спектре приводят к возникно-

that described with good accuracy by the approximate formula given below (for the QPSK format, 1 polarization):

$$\text{OSNR} = \frac{R_s}{2B_{\text{ref}}} \text{SNR}. \quad (3)$$

It clearly follows from this formula that with a recorded optimal SNR value, an increase in the symbol rate R_s equal to the double electrical bandwidth ($R_s = 2 \cdot BW_e$, $B_{\text{ref}} = 12,5$ GHz), the optimal OSNR value is proportional to the symbol rate R_s and is also increased. However, the achievable signal quality and reach do not depend on the symbol rate (see Fig. 9, 10).

On a practical level, it is necessary to add the adjustments related to the technical limitations of a particular hardware to the required theoretical SNR values.

In T8, the transition from the first generation of equipment with a full rate of 1.2 Tbps (80x200G) to the equipment (40x400G) not only did not reduce the maximum transmission reach, but also increased the reach by 15–65%. Moreover, the main advantage of the new generation of communication systems with an increased channel rate is reduction in the transmitted data cost.

4. SOME EXAMPLES OF USING THE RESEARCH RESULTS IN THE DEVELOPMENT, DESIGN AND IMPROVEMENT OF COMMUNICATION EQUIPMENT

4.1. Nonlinear operating mode of coherent communication systems

The use of modulation formats that are advanced for the industry has led to the need to develop new optimization methods for the fiber-optic communication lines (FOCL). This task has been successfully completed by T8, with the development of a new method for parameter setting of the channeling equipment (line cards) and a mathematical tool that uses these parameters for the FOCL design. The calculation method has been developed for the specifications of coherent fiber-optic communication networks, with due regard to many physical effects that have simultaneous impact on the signal propagation. The proposed algorithms and easy-to-use engineering methods that allow predicting the network performance significantly simplify the design. The research results are published in the articles [8]–[13].

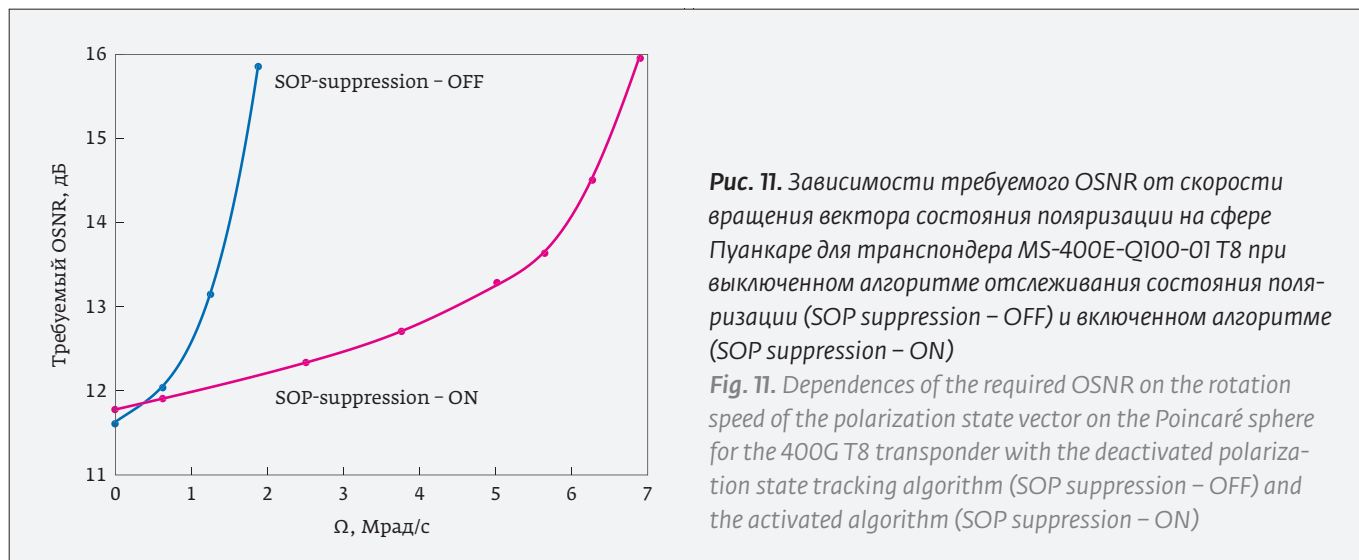


Рис. 11. Зависимости требуемого OSNR от скорости вращения вектора состояния поляризации на сфере Пуанкаре для транспондера MS-400E-Q100-01 T8 при выключенном алгоритме отслеживания состояния поляризации (SOP suppression – OFF) и включенном алгоритме (SOP suppression – ON)

Fig. 11. Dependences of the required OSNR on the rotation speed of the polarization state vector on the Poincaré sphere for the 400G T8 transponder with the deactivated polarization state tracking algorithm (SOP suppression – OFF) and the activated algorithm (SOP suppression – ON)

вению дополнительного штрафа по OSNR. Неравномерность спектра усиления EDFA является одним из эффектов, оказывающих существенное влияние на форму спектра сигнала. В научном отделе компании «Т8» изучены статистические свойства распределения значений накопленной неравномерности спектра (Flatness) в многопролетной линии связи с EDFA в зависимости от числа пролетов. На основе полученных распределений получены приближенные аналитические выражения, позволяющие оценивать неравномерность сигнала в многопролетных ВОЛС и делать консервативную оценку неравномерности спектра DWDM сигнала (95% последовательностей EDFA будут иметь неравномерность лучше оценочной) (рис. 12). Согласно полученным результатам с вероятностью 95% один усилитель производства компании «Т8» увеличивает неравномерность спектра на величину не более 0,72 дБ. Исключение составляет случай, когда в линии требуется использование значительного числа (>40%) усилителей с большим значением коэффициента усиления (~35 дБ). При такой конфигурации линии связи с вероятностью 95% один усилитель увеличит неравномерность спектра на величину не более 0,95 дБ.

4.2. Overcoming communication interruption in the case of lightning strikes in the OPGW

The use of optical cables in a ground wire (OPGW) is a cost-efficient technical solution, since it allows to simultaneously implement the functions

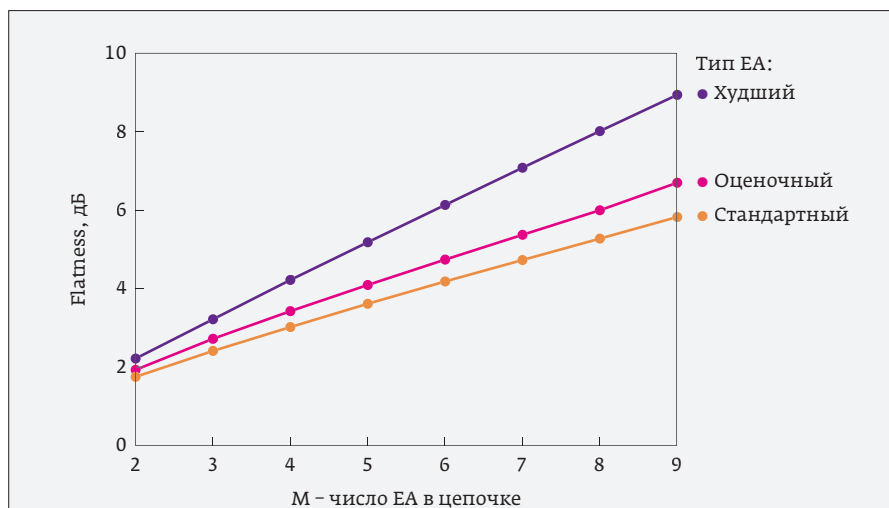


Рис. 12. Неравномерности спектра усиления последовательности из M-эрбиевых усилителей; худший – последовательность только из усилителей с большим коэффициентом усиления (20–35 дБ); стандартный – последовательность из усилителей со стандартным коэффициентом усиления (14–24 дБ); оценочный – зависимость, применяемая при проектировании линии без усилителей с большим коэффициентом усиления

Fig. 12. The gain spectrum flatness of a sequence from the M-erbium amplifiers; the worst one – a sequence from the amplifiers only with a high gain (20–35 dB); the standard one – a sequence from the amplifiers with a standard gain (14–24 dB); the estimated one – dependence used when designing a line without the amplifiers with a high gain

Найденные закономерности позволяют за счет уменьшения количества пунктов выравнивания спектра сигнала уменьшить стоимость линии.

4.4. Сверхдлинные линии

Построение сетей связи с длинными пролетами требует дополнительных исследований.

В частности, в компании «Т8» теоретически и экспериментально исследованы механизмы деградации сигнала в сверхдлинных однопролетных линиях связи с распределенными рамановскими усилителями с канальной скоростью 100 Гбит/с и когерентным детектированием, ограничивающие предельную длину однопролетных линий [18].

Описаны варианты построения и реализованы модели расчета однопролетных линий связи большой протяженности (рис. 13) [19]. Предложены методы оптимизации при проектировании сверхдлинных линий связи. Показано хорошее совпадение результатов проектирования линии с результатами экспериментальных исследований.

Важными элементами сверхдлинных однопролетных линий связи являются распределенные рамановские и удаленные эрбиевые усилители. В компании «Т8» проведена разработка моделей таких усилителей на основе скоростных уравнений. Для хорошей точности данных моделей по известным методикам проведены измерения параметров телекоммуникационных и активных эрбиевых волокон, таких как: коэффициенты вынужденного комбинационного рассеяния, коэффициенты затухания, сечения поглощения и люминесценции, коэффициент кооперативной ап-конверсии и др. [20]. Создана база данных параметров различных типов телекоммуникационных и активных волокон, позволяющая проектировать сверхдлинные линии на основе любых компонентов.

of a ground wire that protects the power lines from lightning strikes, and the functions of a telecommunications optical cable used to transmit data over the optical fibers.

However, a direct lightning strike in the OPGW can cause the short-term communication interruptions when using the modern coherent high-speed data transmission systems. The studies and computational simulations made it possible to determine the physical mechanism of this phenomenon: a lightning strike generates a strong longitudinal magnetic field in the fiber, the change of which, in turn, leads to the polarization state rotation of the optical signal due to the Faraday effect and to the occurrence of errors on the receiving side [14]-[17]. The up-to-date high-speed coherent transmission systems with the multilevel modulation formats and polarization multiplexing turned out to be the most sensitive to the lightning strikes.

In the case of a lightning strike, the rotation rate of the signal polarization state in the fiber can reach 10 Mrad/s (typically 1-5 Mrad/s).

In the conventional coherent transponders, this leads to the communication interruption. Determination of the interruption reason allowed T8 to develop the 100/200/400G coherent transponders equipped with the SOP-suppression function that are able to withstand such strong signal disturbances caused by the lightning strikes (see Fig. 11).

As can be seen from the figure, the use of the polarization state tracking algorithm can significantly improve the transponder stability under the conditions of lightning strikes.

In addition, the results of study of the lightning strike effect on the light polarization led to the development and production of a device for determining the lightning location and power.

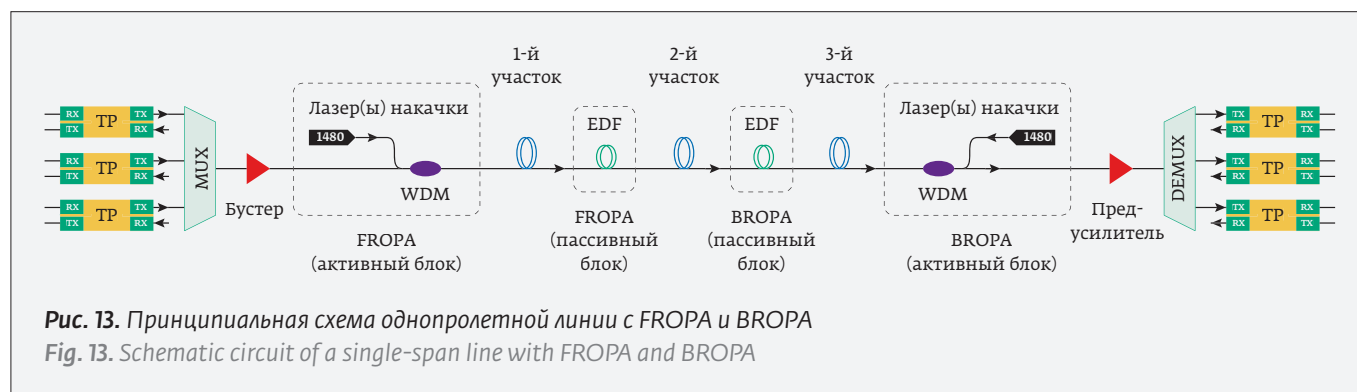


Рис. 13. Принципиальная схема однопролетной линии с FROPA и BROPA

Fig. 13. Schematic circuit of a single-span line with FROPA and BROPA



Для оценки точности разработанных моделей проведены экспериментальные исследования интегральных характеристик усилителей, влияния попутной и встречной рамановских накачек, а также удаленных эрбиевых усилителей на параметры одноканальных и многоканальных однопролетных линий связи. Результаты экспериментальных и расчетных исследований совпадают с хорошей точностью.

По результатам экспериментальных исследований рамановских и удаленных эрбиевых усилителей установлено, что:

- Увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению эффективности использования удаленных эрбиевых усилителей: коэффициент усиления уменьшается, а шум-фактор увеличивается;
- Активные волокна для EDFA и ROPA имеют различные характеристики, специализированные для работы каждого усилителя;
- Волокно для ROPA должно иметь большое значение эффективности накачки для работы с малой мощностью накачки (рис. 14);
- Эффективность накачки эрбиевого усилителя можно увеличить, уменьшив диаметр модового поля.

Реализованные численные модели рамановских и удаленных эрбиевых усилителей применяются при разработке усилителей, в частности широкополосных рамановских усилителей для C-band, гибридных усилителей [21], активных и пассивных блоков ROPA.

Проведенные в научном отделе компании «Т8» исследования позволили создать линейку оборудования для однопролетных систем связи и методику оптимизации таких линий, с использованием которых было установлено несколько мировых рекордов дальности и производительности:

- 10×100 Гбит/с (DP-QPSK, SoftFEC) на расстояние 500 км с применением двух дополнительных волокон доставки накачки, с использованием волокна G.652B (Corning ULL) и G.654B (Corning Vascade EX2000) с полным затуханием 79 дБ [22].
- 1×200 Гбит/с (5 bit per symbol modulation format, 56.8 GBaud) на расстояние 520 км с применением дополнительных волокон с использованием волокна G.652B и G.654.E с полным затуханием 84,5 дБ [23].
- 2×100 Гбит/с (DP-QPSK, SoftFEC) на расстояние 501 км без применения дополнительных волокон с использованием волокна G.652B (Corning ULL) с полным затуханием 80,1 дБ [24].

4.3. Use of the statistical regularities in the spectra of amplifiers for the communication line optimization

When a multichannel signal propagates along an optical communication line, its spectrum profile is distorted. The spectrum irregularities result in an additional OSNR penalty. The non-uniformity of the EDFA gain spectrum is one of the effects that has a significant impact on the signal spectrum profile. The T8 research department studied the statistical properties of the distribution of values of the accumulated spectrum non-uniformity (Flatness) in a multi-span communication line with EDFA depending on the number of spans. Based on the obtained distributions, the approximate analytical expressions were obtained that allow estimating the signal non-uniformity in the multi-span FOCL and obtaining a conservative estimate of the DWDM signal spectrum non-uniformity (95% of the EDFA sequences will have a non-uniformity better than the estimated one) (Fig. 12). According to the results obtained with a probability of 95%, one T8 amplifier increases the spectrum non-uniformity by no more than 0.72 dB. The exception is the case when a significant number (>40%) of amplifiers with a high gain ratio (~35 dB) is required in the line. In the case of such communication line configuration, with a probability of 95%, one amplifier will increase the spectrum non-uniformity by no more than 0.95 dB.

The empirical rules found make it possible to reduce the cost of line by reducing the number of power spectrum equalization points.

4.4. Extra-long lines

The construction of communication networks with the long spans requires additional research.

In particular, T8 theoretically and experimentally studied the signal degradation mechanisms in the extra-long single-span communication lines with the distributed Raman amplifiers with a channel rate of 100 Gbit/s and coherent detection that limit the maximum length of single-span lines [18].

The construction options are described and the numerical models for the single-span long-distance communication lines are implemented (Fig. 13) [19]. The optimization methods are proposed for designing the extra-long communication lines. A good coincidence between the network design results and the results of experimental studies is shown.

The distributed Raman and remote erbium amplifiers are the important elements of extra-long single-span communication lines. T8 developed the models of

На выставке «Связь-2017» (25–28 апреля 2017 года) продемонстрирована передача 1×100 Гбит/с (DP-QPSK, SoftFEC) на расстояние 410 км на основе стандартного волокна G652.D (Corning SMF-28) с полным затуханием 77 дБ.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ DWDM-СИСТЕМ СВЯЗИ В РОССИИ

В ближайшем будущем развитие магистральных ВОЛС будет происходить в направлении увеличения пропускной способности сетей. Там, где на федеральных магистралях уже всеми главными потребителями DWDM-оборудования («Ростелеком», «Большая тройка» и ТТК) установлено когерентное оборудование, будет постепенно увеличиваться число 100G- и 200G- каналов, на региональных магистралях будет происходить переход с 10G-каналов на 100G-каналы, а в региональных сетях агрегации трафика будет расти число 10G-каналов, а число 1G- и 2,5G-каналов будет стремительно уменьшаться. Можно ожидать нового всплеска массивной модернизации DWDM-сетей, который будет связан с подготовкой к введению в эксплуатацию сетей 5G. В этих условиях оборудование терабитного класса (с поддержкой скоростей передачи до 600/800 Гбит/с на одну длину волны, до 1,2 Тбит/с на один блок) окажется очень востребованным для телекоммуникационных систем связи и для сетей связи между дата-центрами и внутри них, поскольку такое оборудование обеспечивает самую низкую стоимость трафика в расчете на гигабит в секунду.

Чтобы увеличить суммарную скорость системы вдвое, нужно будет создать скоростные транспондеры и мукспондеры до 800G (1,2T), оптические усилители и мультиплексоры для работы в C++ диапазоне и линейку дополнительных блоков.

Основные задачи, которые будут решать российские производители:

- Расширение номенклатуры и функциональности пас-

such amplifiers based on the rate equations. For good accuracy of these models, the well-known methods were used to measure the parameters of telecommunication and active erbium fibers, such as the stimulated Raman scattering factors, attenuation factors, absorption and luminescence cross sections, up-conversion coefficient, etc. [20]. The parameter database for various types of telecommunication and active fibers has been developed that makes it possible to design the extra-long lines based on any components.

To assess the accuracy of the developed models, we performed the experimental studies of the integrated amplifier specifications, impact of co-propagating and counter-propagating Raman pumps, as well as the remote erbium amplifiers on the parameters of single-channel and multi-channel single-span communication lines. The results of experimental and computational studies coincide with good accuracy.

According to the results of experimental studies of the Raman and remote erbium amplifiers, it was found that:

- An increase in the ambient temperature leads to a decreased efficiency of the remote erbium amplifiers: the gain is decreased, and the noise factor is increase;

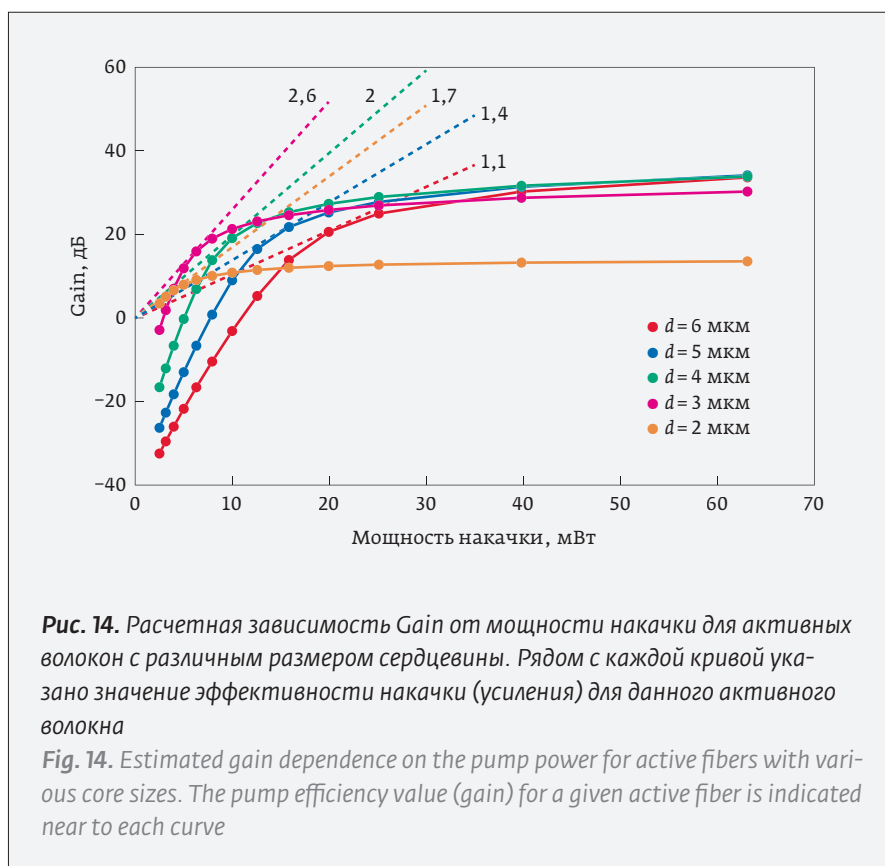


Рис. 14. Расчетная зависимость Gain от мощности накачки для активных волокон с различным размером сердцевины. Рядом с каждой кривой указано значение эффективности накачки (усиления) для данного активного волокна

Fig. 14. Estimated gain dependence on the pump power for active fibers with various core sizes. The pump efficiency value (gain) for a given active fiber is indicated near to each curve



- сивных DWDM-устройств, прежде всего мультиплексоров/демультиплексоров и OADM;
- Сокращение энергоемкости оборудования;
 - Внедрение технологии Flex Grid (гибкий частотный план), которая уже сейчас является важным конкурентным преимуществом ряда зарубежных производителей;
 - Разработка и внедрение средств защиты DWDM-каналов, обеспечивающих бесперебойную работу протокола FC;
 - Совершенствование системы сетевого управления (NMS) с целью облегчения ее стыковки с NMS других основных поставщиков DWDM-оборудования [13].

Переход к следующему поколению когерентных систем связи предъявляет новые требования к оптическим компонентам для обеспечения высокой производительности и уменьшения занимаемой площади.

В ближайшее время ключевой тенденцией в разработке когерентных оптических систем связи станет все более плотная компоновка электрических и оптических компонентов и необходимость в более высоких уровнях интеграции в электрических и фотонных схемах.

Для соответствия новым требованиям фотонные компоненты должны обеспечивать высокую символьную скорость (> 400 G), линейность для поддержки форматов модуляции высокого порядка, низкое энергопотребление и высокую плотность интеграции.

Сегодня практически вся компонентная база высокоскоростных когерентных систем связи российского производства изготавливается за границей. Создание российской компонентной базы интегральной фотоники является критически важной задачей.

К числу ключевых оптических блоков, создание отечественного производства которых является первоочередной задачей, относятся следующие:

1. Когерентные оптические модули и компоненты;
2. Оптические трансиверы;
3. EDFA/RAMAN и другие оптические компоненты;
4. Пассивные оптические компоненты.

REFERENCES

1. Listvin V. N., Treshchikov V. N. *DWDM systems* / 3-th publ. – M.: Technosphaera. 2017. 300 p. ISBN 978-5-94836-488-9. Листвин В. Н., Трещиков В. Н. *DWDM системы*. – М.: Техносфера. 2017. 300 с. издание. ISBN 978-5-94836-488-9.
2. Leonov A. V., Treshchikov V. N., Ubajdullaev R. R. Tendencii razvitiya kogerentnyh sistem svyazi v 2010–2025 gg. *Foton-ekspress*. 2019; 8(160):4–7.

- The active fibers for EDFA and ROPA have various specifications tailored to the performance of each amplifier;
- A fiber for ROPA should have a high pump efficiency to operate at low pump power (Fig. 14.);
- The pump efficiency of an erbium amplifier can be increased by decreasing the mode field diameter.

The implemented numerical models of the Raman and remote erbium amplifiers are used in the development of amplifiers, in particular the broadband Raman amplifiers for C-band, hybrid amplifiers [21], active and passive ROPA units.

The studies performed by the T8 research department made it possible to develop a range of equipment for the single-span communication systems and the optimization method for such lines, used to break several world records in relation to the reach and performance:

- 10x100 Gbit/s (DP-QPSK, SoftFEC) over a distance of 500 km using two additional pump delivery fibers, using G.652B (Corning ULL) and G.654B (Corning Vascade EX2000) fibers with a total attenuation of 79 dB [22].
- 1x200 Gbit/s (5 bit per symbol modulation format, 56.8 GBaud) over a distance of 520 km using the additional fibers with G.652B and G.654.E fiber with a total attenuation of 84.5 dB [23].
- 2x100 Gbit/s (DP-QPSK, SoftFEC) over a distance of 501 km without any additional fibers using G.652B fiber (Corning ULL) with a total attenuation of 80.1 dB [24].

At the SVIAZ-2017 trade show (April 25–28, 2017) we demonstrated 1x100 Gbit/s (DP-QPSK, SoftFEC) transmission over a distance of 410 km based on the standard G652.D fiber (Corning SMF-28) with full attenuation of 77 dB.

5. PROSPECTS AND AREAS FOR DEVELOPMENT OF THE DWDM COMMUNICATION SYSTEMS IN RUSSIA

In the foreseeable future, the development of long-haul FOCL will be performed in the area of increasing the network transmission capacity. In the points where all the main consumers of DWDM equipment (Rostelecom, «Bolshaya Troyka» (Beeline, Megafon, MTS) and TTK) installed coherent equipment along the federal long-haul lines, the number of 100G- and 200G-channels will be gradually increased, the transition from 10G-channels to 100G-channels will take place on the regional networks. Moreover, in the regional traffic aggregation networks the number of



- Леонов А. В., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Тенденции развития когерентных систем связи в 2010–2025 гг. *Фотон-экспресс*. 2019; 8(160):4–7.
3. **Konyshev V., Leonov A., Nanii O., Treshchikov V., Ubaydullaev R.** System's 100G Record Through-Put as a Mark of proceeding to fiber optical transmission systems evoluti. *Last Mile*. 2015; 6: 40–43.
 4. **Konyshev V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Slepcev M.A., Treshchikov V.N., Ubajdullaev R.R.** Opticheskaya revolyuciya v sistemah svyazi i ee social'no-ekonomicheskie posledstviya. *Prikladnaya fotonika*. (In Russ.). 2016; 3(1): 15–27. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Слепцов М.А., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия. *Прикладная фотоника*. 2016; 3(1): 15–27.
 5. **Leonov A.V., Konyshev V.A.** From the revolution to the evolution: the change in the character of development of fiber optic communications technology. *International Workshop Engineering Technologies and Computer Science*. 2017;34–36.
 6. **Leonov A., Nanii O., Slepcev M., Treshchikov V.** Tendencii razvitiya opticheskikh sistem dal'nej svyazi. *Prikladnaya fotonika*. (In Russ.). 2016;3(2):123–145. Леонов А., Наний О., Слепцов М., Трещиков В. Тенденции развития оптических систем дальней связи. *Прикладная фотоника*. 2016;3(2):123–145.
 7. **Maniloff E., Gareau S., Moyer M.** 400G and Beyond: Coherent Evolution to High-Capacity Inter Data Center Links. *OFC*. 2019, М3Н.4.
 8. **Konyshev V., Leonov A., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Design principles for modern fiber-optic communication lines. *Quantum Electronics*. 2019;49(12):1149–1153.
 9. **Zhitelev A., Konyshev V., Lukinykh S., Nanii O., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Nonlinear distortions as nonlinear noise in coherent fibre-optic communication lines. *Quantum Electronics*. 2017;47(12):1135–1139.
 10. **Konyshev V., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Correlation of nonlinear noises from different spans in 100 Gb/s multi-span fiber optic lines. *Optics Communications*. 2016;381:352–359.
 11. **Konyshev V., Nanii O., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** New method to obtain optimum performance for 100 Gb/s multi-span fiber optic lines. *Optics Communications*. 2015;355:279–284.
 12. **Konyshev V., Leonov A., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Accumulation of nonlinear noise in coherent communication lines without dispersion compensation. *Optics Communications*. 2015;349:19–23.
 13. **Konyshev V., Leonov A., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Design of high-bit-rate coherent communication links. *Quantum Electronics*. 2016;46(12):1121–1128.
 14. **Akopov S., Konyshev V., Nanii O., Treshchikov V., Ubaydullaev R., Frolov I.** Influence of Lightings on Operation of Coherent FOCL. *Last Mile* (In Russ.). 2021; 4: 24–30.
 15. **Konyshev V., Lukashova T., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Retarded field model for fast polarization rotations caused by lightning events. *Laser Physics Letters*. 2021;18(11):115101.
 16. **Konyshev V., Lukinykh T., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Effect of a magnetic field on polarization of light in an optical fibre with a random distribution of linear birefringence. *Quantum Electronics*. 2019; 49(8):773–776.
 17. **Gorbatov D., Konyshev V., Lukinykh T., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubajdullaev R.** Effect of anisotropy of a single-mode fibre on lightning-induced rotation of polarisation of a light signal in an optical ground wire. *Quantum Electronics*. 2022; 52(1):87–93.
 18. **Starykh D., Shikhaliev I., Konyshev V., Nanii O., Treshchikov V., Ubaydullaev R., Kharasov D.** Experimental investigation of nonlinear operation mode of a DP-QPSK 100G link with co-propagating-pump Raman amplification. *Quantum Electronics*. 2018;48(8):767–772. Старых Д., Шихалиев И., Конышев В., Наний О., Трещиков В., Убайдуллаев Р., Харасов Д. Экспериментальное исследование нелинейного режима работы DP-QPSK 100G линии связи, содержащей распределенный рамановский усилитель с полупутной накачкой. *Quantum Electronics* (In Russ.). 2018;48(8):767–772.
 19. **Gainov V., Konyshev V., Leonov A., Lukinykh S., Nanii O., Novikov A., Shikhaliev I., Treshchikov V., Ubaydullaev R.** Odnoproletnye opticheskie linii svyazi bol'shoj protyazhennosti. *Prikladnaya fotonika*. (In Russ.). 2015; 2(1): 5–22. Гайнов В., Конышев В., Леонов А., Лукиных С., Наний О., Новиков А., Шихалиев И., Трещиков В., Убайдуллаев Р. Однопролетные оптические линии связи большой протяженности. *Прикладная фотоника*. 2015; 2(1): 5–22.
 20. **Zhulidova M., Nanii O., Treshchikov V., Tsibinogina M., Shevtsov D., Shikhaliev I.** Erbium Amplifiers With Remote Pumping On Domestic Active Fiber. *Last Mile*. (In Russ.). 2020; 88(3):54–59.
 21. **Shikhaliev I., Lukinykh S., Nanii O., Treshchikov V., Starykh D., Konyshev V., Ubaydulayev R.** Broadband hybrid optical amplifier: how to improve existing FOCLs. *Last Mile* (In Russ.). 2018;2: 68–72.
 22. **Gainov V., Gurkin N., Lukinih S., Makovejs S., Akopov S., Ten S., Nanii O.,**

10G-channels will grow, while the number of 1G and 2.5G channels will be rapidly decreased. We can expect a new surge of large-scale DWDM network modernization that will be related to the commissioning of 5G networks. Under these conditions, the terabit-class equipment (supporting the transmission rates of up to 600/800 Gb/s per wavelength, up to 1.2 Tb/s per unit) will be in great demand for the telecommunications systems and for communication networks between the data centers and inside them, since such equipment provides the lowest cost per gigabit per second.

To double the total system rate, it will be necessary to develop the high-speed transponders and multiplexers up to 800G (1.2T), optical amplifiers and multiplexers for operation in the C ++ range, and expand the product line with additional units.

The main tasks to be solved by the Russian manufacturers are as follows:

- Expansion of the range and functionality of passive DWDM devices, primarily the multiplexers/demultiplexers and OADM;
- Reduction in the energy intensity of equipment;
- Implementation of Flex Grid technology (flexible frequency plan) that is already an important competitive advantage of a number of foreign manufacturers.
- Development and implementation of the protection features for DWDM channels, ensuring the uninterrupted FC protocol operation;
- Improvement of the network management system (NMS) in order to facilitate its docking with the NMS of other major DWDM equipment suppliers [13].

The transition to the next generation of coherent communication systems places new demands on the optical components in relation to high performance and reduced footprint.

In the near future, the key trend in the development of coherent optical communication systems will be the increasingly dense packaging of electrical and optical components and the need for higher integration levels in the electrical and photonic circuits.

To meet the new requirements, the photonic components must provide the high symbol rates (> 400 G), linearity to support the high-order modulation formats, low power consumption, and high integration density.

At present, almost the entire component base of the Russian-made high-speed coherent communication systems is produced abroad. Development of the Russian component base of integrated photonics is a critically important task.



- Treshchikov V., Sleptsov M.** Record 500 km unrepeated 1 Tbit/s (10×100G) transmission over an ultra-low loss fiber. *Optics Express*. 2014; 22(19):22308.
23. **Sarykh D., Akopov S., Kharasov D., Konyshov V., Makovejs S., Nanii O., Shikhaliev I., Treshchikov V.** 200 Gb/s per Channel Unrepeated Transmission Over 520 km Terrestrial Fibers. *Photonics Technology Letters*. 2019;31(22):1799–1802.
24. **Gainov V., Gurkin N., Lukin S., Shikhaliev I., Skvortsov P., Makovejs S., Akopov S., Ten S., Nanii O., Treshchikov V.** 500 km unrepeated 200 Gbit/s transmission over a C.652-compliant ultra-low loss fiber only. *Laser Physics Letters*. 2015;12(6):066201(1)-066201(6).

АВТОРЫ

- В. Н. Трещиков, к. ф. - м. н., генеральный директор компании «Т8».
ORCID: 0000-0002-6665-8564
- М. А. Горбашова, инженер компании «Т8».
ORCID: 0000-0002-5084-3845
- М. О. Жулидова, инженер компании «Т8».
ORCID: 0000-0002-7013-1538
- В. А. Конышев, к. ф. - м. н., руководитель научной группы компании «Т8».
ORCID: 0000-0001-8482-2922
- А. В. Леонов, д. т. н., заместитель генерального директора по техническому развитию компании «Т8».
ORCID: 0000-0003-1938-9864
- О. Е. Наний, д. ф. - м. н., профессор МГУ, начальник научно-исследовательского отдела компании «Т8».
ORCID: 0000-0003-4269-1332
- Д. Д. Старых, заместитель начальника научно-исследовательского отдела компании «Т8».
ORCID: 0000-0002-6533-8462
- Р. Р. Убайдуллаев, инженер компании «Т8».
ORCID: 0000-0003-3210-2290
- И. И. Шихалиев, к. т. н., руководитель группы компании «Т8», shikhaliev@t8.ru.
ORCID: 0000-0003-0351-5408

The key optical units the domestic production of which is a priority, include the following:

1. Coherent optical modules and components;
2. Optical transceivers;
3. EDFA/RAMAN and other optical components;
4. Passive optical components.

AUTHORS

- V. N. Treshchikov, Cand. of Scien.(Phys.&Math.), General Director of T8 company.
ORCID: 0000-0002-6665-8564
- M. A. Gorbashova, engineer of T8 company.
ORCID: 0000-0002-5084-3845
- M. O. Zhulidova, engineer of T8 company.
ORCID: 0000-0002-7013-1538
- V. A. Konyshov, Cand. of Scien.(Phys.&Math.), head of the scientific group of the T8 company.
ORCID: 0000-0001-8482-2922
- A. V. Leonov, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director for Technical Development of the T8 company.
ORCID: 0000-0003-1938-9864
- O. E. Nanii, Doctor of Scien.(Phys.&Math.), Professor of MSU, Head of the Research Department of the T8 company.
ORCID: 0000-0003-4269-1332
- D. D. Sarykh, Deputy Head of the Research Department of T8 Company.
ORCID: 0000-0002-6533-8462
- R. R. Ubaydullaev, engineer of T8 company.
ORCID: 0000-0003-3210-2290
- I. I. Shikhaliev, Cand. of Scien.(Tech.), shikhaliev@t8.ru, head of the group of T8 company.
ORCID: 0000-0003-0351-5408



Металлообработка. Сварка – Урал

международная выставка технологий,
оборудования, материалов для машиностроения,
металлообработывающей промышленности
и сварочного производства



14–17 марта 2023
Екатеринбург

крупнейший
специализированный
региональный проект в России

(342) 264-64-27
egorova@expoperm.ru
www.metal-ekb.expoperm.ru



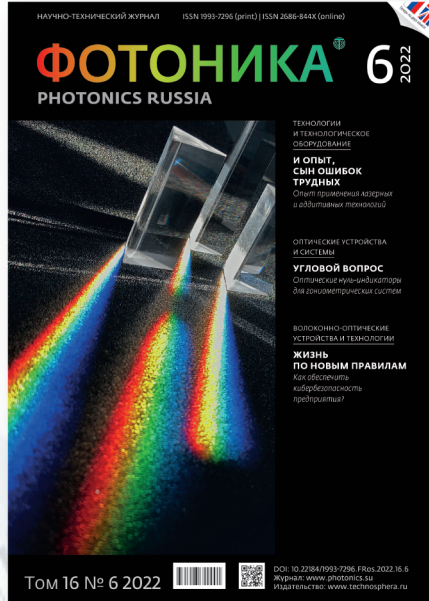


ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru