

УДК 681.7.068:612.375

**В.В. Гайнов¹, В.А. Конышев¹, А.В. Леонов¹, С.Н. Лукиных^{1, 2},
О.Е. Наний^{1, 2}, П.И. Скворцов^{1, 3}, В.Н. Трещиков¹,
И.И. Шихалиев^{1, 3}, Р.Р. Убайдуллаев¹**

¹ ООО «Т8», Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, Москва, Россия

ОДНОПРОЛЕТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

Теоретически исследованы механизмы деградации сигнала в однопролетных линиях связи с канальной скоростью 100 Гбит/с и когерентным детектированием, ограничивающие предельную длину однопролетных линий. Описаны варианты построения однопролетных линий связи большой протяженности, приведены результаты их экспериментального исследования и показано хорошее совпадение с результатами расчетов. Даны оценки максимальной достижимой длины и пропускной способности рассмотренных вариантов построения однопролетных линий связи. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что при использовании поляризационного мультиплексирования (DP), четырехуровневой фазовой модуляции (QPSK), когерентного детектирования и коррекции ошибок с мягким принятием решений (SoftFEC) в сочетании с волокном стандарта G.652, обладающим ультранизким затуханием, дальность передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Гбит/с в однопролетных линиях связи может превышать 500 км.

Ключевые слова: DWDM, 100 Гбит/с, однопролётная линия, типовая схема, рекордный эксперимент, рамановское усиление.

**V.V. Gainov¹, V.A. Konyshov¹, A.V. Leonov¹, S.N. Lukinykh^{1, 2},
O.E. Nani^{1, 2}, P.I. Skvortsov^{1, 3}, V.N. Treshchikov¹,
I.I. Shikhaliev^{1, 3}, R.R. Ubaidullaev¹**

¹ Company «T8», Moscow, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

VERY LONG SINGLE-SPAN FIBER OPTIC LINES

We investigated theoretically the mechanisms of degradation of signal in single-span lines with 100G channels and coherent detection, which limit a critical length of single-span lines. Variants of construction of very long single-span lines are described, the results of their experimental research are reported, and a good agreement of experimental results with theoretical calculations is shown. Critical

lengths and maximal bandwidths of described variants of single-span lines are estimated. It is shown theoretically and experimentally that using DP-QPSK signal with coherent detection and SoftFEC in combination with G.652 fiber with ultra-low attenuation it is possible to transmit 100G DWDM signal over more than 500 km in a single-span line.

Keywords: DWDM, 100 Gbit/s, single-span line, typical scheme, record experiment, Raman amplification.

Введение

Отличительная черта однопролетных оптических линий связи – отсутствие необходимости в подводе электропитания к промежуточным точкам линии. Такая конструкция позволяет существенно снизить стоимость строительства и эксплуатации линии в сложных внешних условиях. В частности, однопролетные линии связи широко используются для организации связи между островами, удаленными прибрежными городами, побережьем и нефтяными платформами на шельфе, а также для создания отводов от подводных магистральных линий связи (рис. 1).

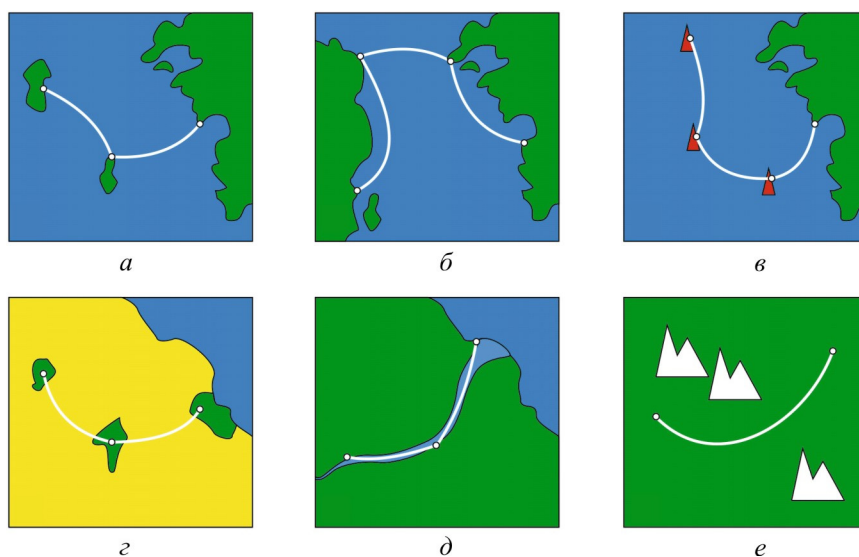


Рис. 1. Однопролетные линии связи: а – между островами; б – для соединения прибрежных городов; в – для соединения с буровыми платформами; г – для соединения городов, разделенных пустыней; д – для прокладки по дну рек; е – для прокладки в малонаселенных районах

Рекордная дальность однопролетной линии на сегодняшний день составляет более 500 км и достигается при использовании оптических усилителей с удаленной накачкой (*remote optically pumped amplifier*, ROPA) и специального оптического волокна с низкими потерями. Специальная конструкция таких линий должна быть предусмотрена еще на

этапе прокладки кабеля, что значительно ограничивает сферу их практического применения. В основном рекордные дальности для линий со специальным волокном достигаются в лабораторных экспериментах (в зарубежной литературе их называют *heroexperiments*) [1–9]. Максимальная скорость передачи информации на расстояние больше 500 км составляет 1 Тбит/с (10 каналов по 100 Гбит/с) [4].

На практике более распространена задача строительства однопролетных линий связи максимальной дальности с использованием существующего (стандартного) волокна и без модернизации кабельной инфраструктуры (т.е. без установки ROPA). Для повышения дальности передачи в этом случае применяются распределенное рамановское усиление сигнала в волокне, предварительная настройка суммарной входной мощности и перекоса мощности каналов, предварительная компенсация дисперсии и другие приемы. Максимальная дальность многоканальных однопролетных линий такого типа на сегодняшний день составляет около 250 км. При их проектировании используются технические наработки и алгоритмы расчета, апробированные в ходе создания рекордных линий.

В статье представлен теоретический анализ вариантов построения однопролетных линий связи большой протяженности. Проанализирована зависимость максимальной дальности от структуры линии, характеристик транспондеров, затухания и диаметра сердцевины волокна.

1. Модель однопролетной линии

Условие физической работоспособности линии можно записать следующим образом:

$$OSNR_{BER} > OSNR_T, \quad (1)$$

где $OSNR_{BER}$ – оптическое отношение сигнал/шум на выходе линии, определяющее уровень битовых ошибок (BER) транспондера (связь между $OSNR_{BER}$ и BER до коррекции ошибок описывается калибровочной кривой транспондера); $OSNR_T$ («критический $OSNR$ ») – пороговая чувствительность приемника, т.е. минимальная величина оптического отношения сигнал/шум, требуемая приемнику для приема сигнала с коэффициентом ошибок, не превышающим некоторый заданный уровень (обычно $BER = 10^{-12}$ после коррекции ошибок). Величина $OSNR_T$

является константой¹, индивидуальной характеристикой приемника. Например, для 100G-транспондера «Волга» эта величина (в логарифмических единицах) равна 12,5 дБ.

$OSNR_{BER}$ в однопролетной линии без учета нелинейных эффектов равно отношению мощности сигнала к мощности шума усиленного спонтанного излучения. Это отношение обозначается как $OSNR_L$ и определяется следующим выражением:

$$OSNR_L = \frac{P_{IN}}{AFhv\Delta\nu}, \quad (2)$$

где P_{IN} – мощность сигнала на входе в линию; A – полное затухание сигнала в пролете; F – шум-фактор усилителя (или каскада усилителей), установленного в конце пролета; h – постоянная Планка; ν – частота сигнала; $\Delta\nu$ – референсная полоса (12,5 ГГц). Для каскада усилителей F рассчитывается по формуле Фрииса [10]. В логарифмических единицах формула (2) записывается следующим образом:

$$OSNR_L = 58 + P_{IN} - \alpha \cdot L - NF, \quad (2a)$$

где P_{IN} – мощность сигнала на входе в линию, дБм; α – коэффициент затухания сигнала в волокне, дБ/км; L – длина пролета, км; NF – шум-фактор усилителя (или каскада усилителей), установленного в конце пролета, дБ.

В реальной линии $OSNR_{BER}$ при повышении P_{IN} увеличивается лишь до определенного значения, после чего начинает уменьшаться из-за влияния нелинейных эффектов. Для расчета $OSNR_{BER}$ с учетом нелинейных эффектов применяется следующая формула [11]:

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_L} + \frac{1}{OSNR_{NL}}. \quad (3)$$

Формула (3) выражает предположение о том, что нелинейные эффекты в линии могут трактоваться как нелинейный шум и что линейный и нелинейный шумы в линии линейно складываются. Это предположение хорошо подтверждается экспериментально.

¹ Если не учитывать возможную деградацию оборудования со временем (выгорание лазера и т.п.).

Мощность нелинейного шума P_{NL} , мВт, вычисляется по формуле

$$P_{NL} = \eta P_{IN}^3, \quad (4)$$

где η – константа нелинейного шума, вычисляемая экспериментально, мВт⁻².

В правой части формулы (3) первое слагаемое обратно пропорционально P_{IN} , а второе слагаемое пропорционально P_{IN}^2 . Это означает, что при заданных значениях потерь в волокне, шум-фактора усилителя и пороговой чувствительности приемника существует предельная протяженность линии связи L и соответствующее ей значение P_{IN} . При протяженности линии меньшей, чем предельная, существует диапазон входных мощностей P_{IN} , при котором линия работоспособна.

Зависимость диапазона допустимых мощностей от длины линии приведена на рис. 2 [11]. Допустимые значения мощности сигнала, вводимого в волокно, лежат в области между верхней и нижней кривыми. Кривые показывают результат теоретического расчета, точки – результаты численного моделирования.

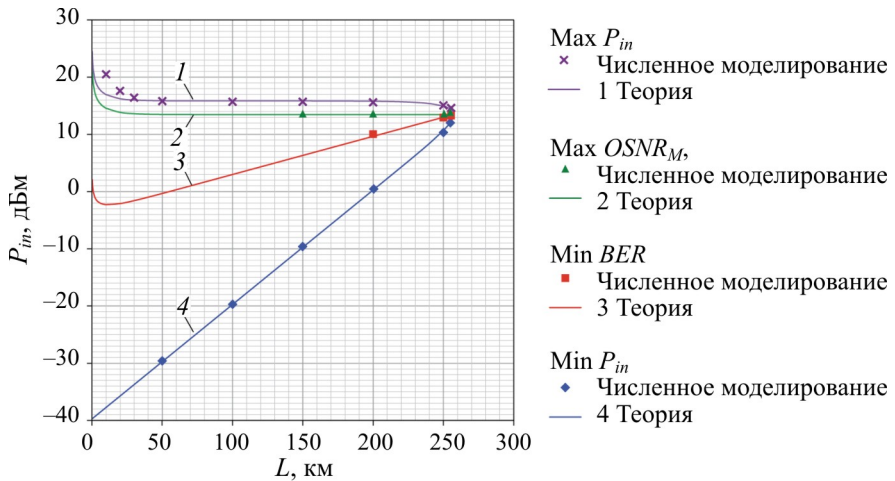


Рис. 2. Зависимость диапазона допустимых мощностей от длины линии (один канал, коэффициент затухания сигнала в волокне – 0,2 дБ/км)

Нижняя граница диапазона допустимых мощностей определяется уровнем шума усиленного спонтанного излучения, растущего с увеличением длины пролета. Поскольку уровень нелинейных шумов во всей области длин пролета, кроме максимальных, т.е. пример-

но до 250 км, пренебрежимо мал, то минимально допустимая мощность сигнала в логарифмических единицах линейно повышается при увеличении длины полета.

Верхняя граница допустимых значений определяется уровнем нелинейных искажений сигнала. В этой области система связи работает в сильно нелинейном режиме. Поскольку величина мощности нелинейного шума при длинах волокна больше примерно 30 км не зависит от длины волокна, то максимально допустимая мощность примерно постоянна до длины линии приблизительно 200 км (пока влиянием шумов усиленного спонтанного излучения можно пренебречь).

Условие работоспособности линии (1) можно переписать с учетом (3) следующим образом:

$$\frac{1}{OSNR_L} < \frac{1}{OSNR_T} - \frac{1}{OSNR_{NL}}. \quad (5)$$

Для обозначения величины в правой части неравенства (5) вводят понятие $OSNR_R$ («требуемый $OSNR$ »):

$$\frac{1}{OSNR_R} \equiv \frac{1}{OSNR_T} - \frac{1}{OSNR_{NL}}. \quad (6)$$

$OSNR_R$ – это величина оптического отношения сигнал/шум, требуемая приемнику для приема сигнала с коэффициентом ошибок, не превышающим некоторый заданный уровень (обычно $BER = 10^{-12}$), с учетом нелинейных эффектов. Величина $OSNR_R$ возрастает при увеличении P_{IN} .

С учетом (6) условие работоспособности линии (5) записывается следующим образом:

$$\frac{OSNR_L}{OSNR_R} > 1. \quad (7)$$

Величина в левой части неравенства (7) называется «запас по $OSNR$ » (в англоязычной литературе – $OSNR$ margin) и обозначается как $OSNR_M$:

$$OSNR_M \equiv \frac{OSNR_L}{OSNR_R}. \quad (8)$$

Таким образом, условие работоспособности линии с учетом нелинейных эффектов приобретает простой вид:

$$OSNR_M > 1. \quad (9)$$

При сдаче линии в эксплуатацию обычно требуется обеспечить ее работоспособность с некоторым запасом, который определяется нормативными документами. Например, согласно требованиям ОАО «Ростелеком» требуется двукратное превышение $OSNR_L$ над $OSNR_R$. Соответственно, условие приема линии в эксплуатацию записывается следующим образом:

$$OSNR_M \geq 2. \quad (10)$$

Для расстояний меньших чем предельное, можно поставить задачу вычисления оптимальной входной мощности P_{IN} . Определить ее можно двумя способами: как мощность, при которой достигается максимум $OSNR_M$ (кривая 2 на рис. 2), или как мощность, при которой достигается максимум $OSNR_{BER}$ с учетом нелинейных эффектов и, соответственно, минимальный уровень битовых ошибок BER (кривая 3 на рис. 2). Эти две мощности не совпадают: мощность, при которой достигается максимальный запас по $OSNR$, всегда больше мощности, при которой достигается минимум BER [11]. Мощность сигнала, при которой достигается максимум $OSNR_M$, практически не меняется при изменении длины однопролетной линии. Мощность сигнала, при которой достигается минимальное значение BER , возрастает при увеличении длины однопролетной линии (при длине больше 30 км).

2. Типовые схемы однопролетных линий

Для организации однопролетных линий связи большой протяженности могут применяться различные схемы. Кроме эрбиевых усилителей на входе в линию (бустер) и перед приемником (предусилитель) в однопролетных линиях большой протяженности также могут использоваться различные дополнительные способы усиления сигнала:

- ♦ эрбиевые усилители с удаленной накачкой;
- ♦ распределенное рамановское усиление в телекоммуникационном волокне.

Накачка усилителей может осуществляться как в попутном (со стороны передатчика), так и во встречном (со стороны приемника) направ-

лении. Для доставки излучения накачки может использоваться как телекоммуникационное волокно, в котором распространяется сигнал, так и дополнительное волокно или волокна.

Таким образом, могут быть реализованы десятки различных схем с разными комбинациями усилителей, каждая из которых имеет свои особенности.

Наибольший интерес для операторов связи представляют схемы, которые позволяют организовать однопролетную линию максимальной дальности с использованием двух волокон (по одному волокну в каждом направлении). Типовые схемы для организации таких линий представлены на рис. 3–5 в порядке возрастания сложности.

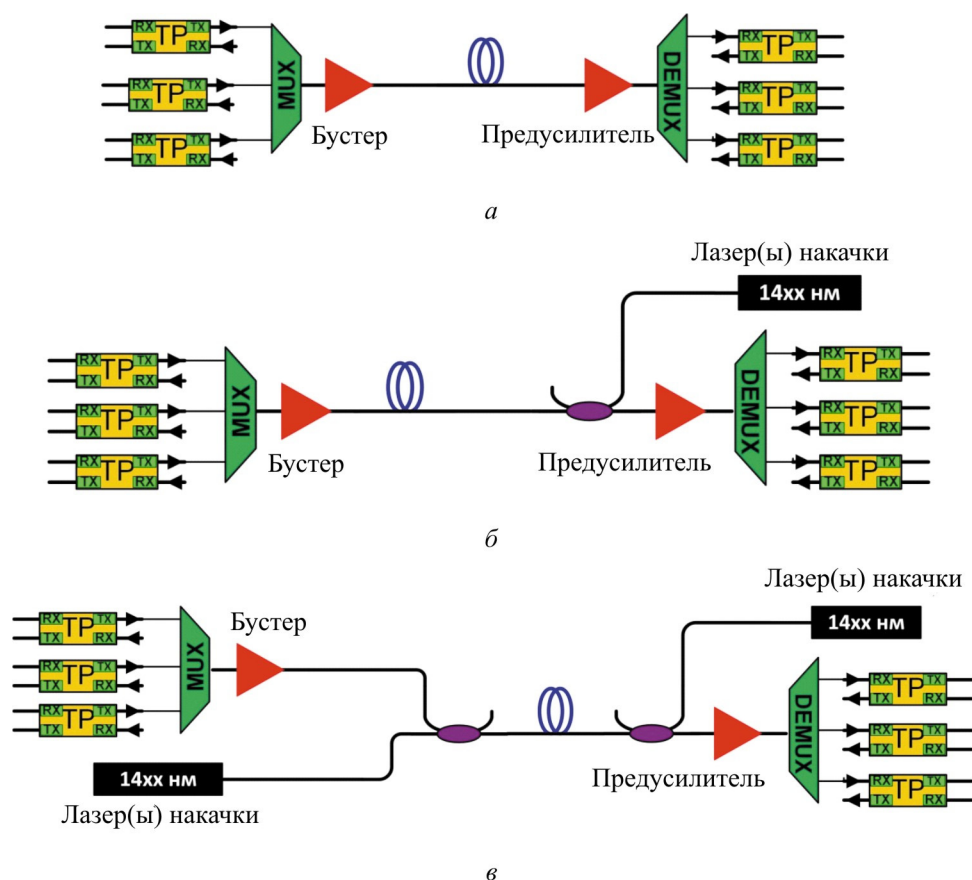


Рис. 3. Типовые схемы однопролетных линий без ROPA

Более дорогие и сложные решения, как правило, обеспечивают большую дальность передачи сигнала. В то же время в сложных решениях может быть ограничено число DWDM-каналов. Подбор и расчет оптимальной схемы должны выполняться специалистами с учетом специфики каждой конкретной задачи.

Простейший вариант организации однопролетной линии требует использования двух эрбиевых усилителей: на входе в линию (бустер) и перед приемником (предусилитель) (рис. 3, *а*). Дополнительное усиление сигнала можно обеспечить за счет рамановского усиления в телекоммуникационном волокне. Для этого во встречном направлении в линию вводится излучение накачки (например, на длине волны 1450 нм) (рис. 3, *б*). Еще большего усиления можно добиться за счет введения излучения накачки и в попутном направлении (рис. 3, *в*).

При использовании волокна Corning® SMF-28® ULL со сверхнизкими потерями (0,166 дБ/км) и рамановской накачки с обеих сторон продемонстрирована возможность передачи 150 каналов 100 Гбит/с на расстояние 333,6 км (бюджет 55,4 дБ) [8].

Для дальнейшего увеличения длины пролета необходимо использовать эрбиевые усилители с удаленной накачкой (ROPA) (рис. 4).

В простейшем случае линия делится на два участка, между которыми устанавливается отрезок волокна, легированного эрбием (рис. 4, *а*). Этот отрезок волокна используется как эрбиевый усилитель с удаленной накачкой. Накачка для этого эрбиевого усилителя вводится в волокно на длине волны 1480 нм во встречном направлении. Кроме того, благодаря накачке на длине волны 1480 нм, в этой схеме возникает также дополнительное усиление сигнала за счет рамановского усиления в телекоммуникационном волокне (см. на рис. 3, *б*).

Линия может быть разделена не на два, а на три участка, между которыми устанавливаются два эрбиевых усилителя с удаленной накачкой. Накачка для усилителя, расположенного ближе к приемнику (B-ROPA), вводится в волокно на длине волны 1480 нм во встречном направлении, а для усилителя, расположенного ближе к передатчику (F-ROPA), – в попутном направлении. Для большей эффективности накачки ее можно доставлять к ROPA с использованием дополнительных волокон, которые соединяются с телекоммуникационным волокном сплиттерами (рис. 4, *б*). При ограниченной возможности использования дополнительных волокон для накачки может также приме-

няться схема однопролетной линии с двумя эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой, с ответвлением накачки для F-ROPA из встречного волокна (рис. 4, в).

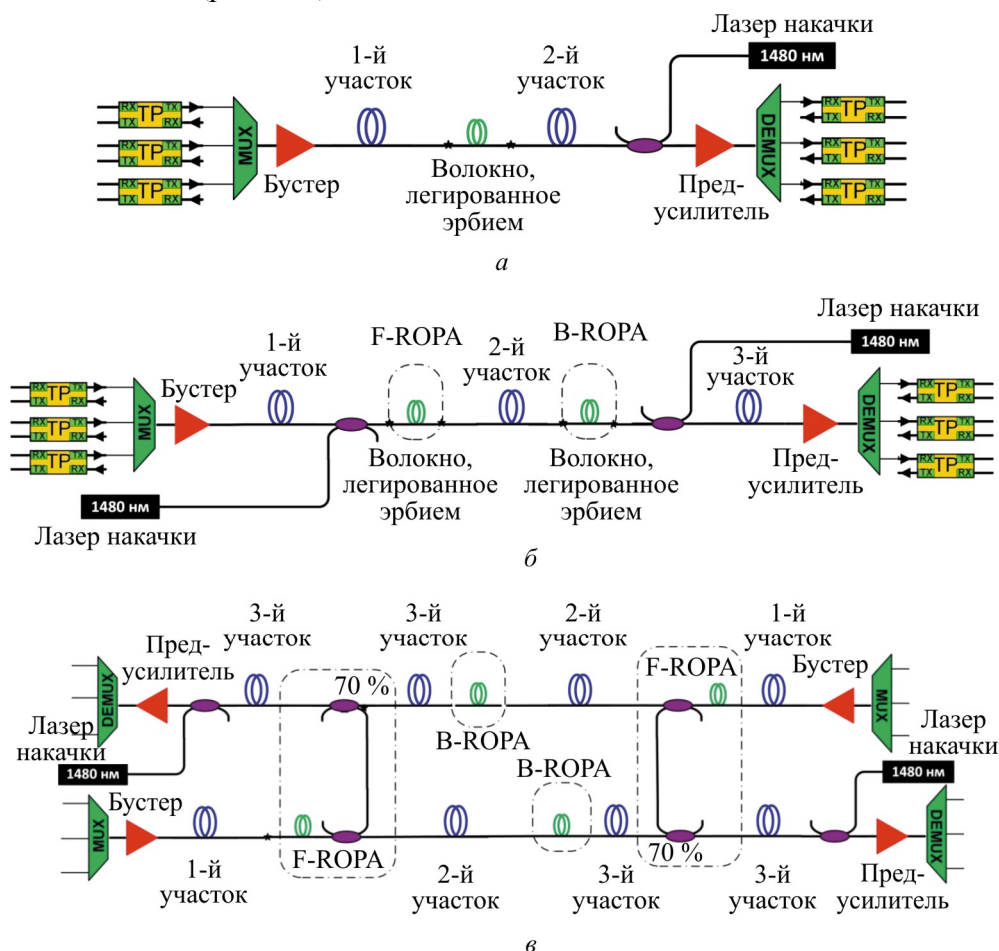


Рис. 4. Типовые схемы однопролетных линий с ROPA

Использование дополнительного ROPA с накачкой в попутном направлении (F-ROPA) может дать значимый выигрыш в расстоянии, но только для небольшого числа каналов (1–3) и для высоких скоростей передачи в канале (т.е. для 2,5 Гбит/с выигрыш небольшой).

Наконец, еще большее увеличение дальности пролета может быть достигнуто за счет использования в схеме с ROPA дополнительной рамановской накачки. Например, на рис. 4, а может быть модифицирована таким образом, как представлено на рис. 5.

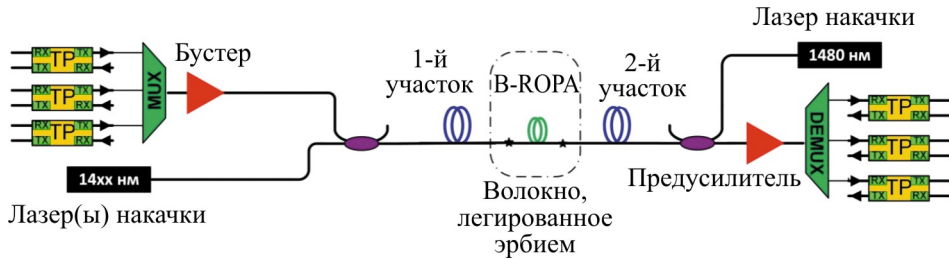


Рис. 5. Схема однопролетной линии с ROPA и рамановской накачкой

Кроме накачки на длине волны 1480 нм во встречном направлении в волокно также вводится накачка в попутном направлении на нескольких длинах волн (например, 1450, 1473, 1480 нм), которая обеспечивает дополнительное усиление сигнала за счет рамановского усиления в телекоммуникационном волокне.

Для еще большего увеличения протяженности линии требуется дальнейшее усложнение схемы: например, использование не одного, а двух эрбиевых усилителей с удаленной накачкой (B-ROPA и F-ROPA), дополнительная рамановская накачка на длине волны 1450 нм во встречном направлении и др. Один из вариантов схемы линии, который применялся специалистами компании «Т8» для достижения рекордной дальности передачи сигнала, будет рассмотрен ниже.

3. Однопролетная линия на основе стандартного волокна

На практике наибольший интерес представляет задача создания протяженной однопролетной линии связи на основе существующего волокна и без модернизации существующей кабельной инфраструктуры. В этом случае добиться максимальной дальности позволяет схема с попутной и встречной рамановской накачкой, представленная на рис. 3, в.

Основную сложность при расчете такой линии представляет расчет влияния попутного рамановского усиления. Сложность связана с тем, что мощность сигнала – а значит, и влияние нелинейных эффектов – растет на начальном участке линии (за счет попутной накачки) и достигает максимального значения на расстоянии примерно 20 км от начала линии. Для корректного учета влияния нелинейных эффектов в DWDM-системе с M каналами и K источниками накачки требуется численное решение системы из $M + K$ дифференциальных уравнений.

Расчет влияния встречного рамановского усиления намного проще, так как на конечном участке линии сигнал находится в линейном режиме. Встречное рамановское усиление обычно учитывается в формуле (2) как дополнительный усилитель с шум-фактором $-1,5$.

Для упрощенного расчета влияния попутного рамановского усиления специалистами компании «Т8» разработаны приближенные формулы, которые заменяют его эквивалентным простым усилителем. Если на вход волокна подается многоканальный DWDM-сигнал с суммарной мощностью p , дБм, и предперекосом¹ s , дБ, то влияние попутной рамановской накачки может быть описано как дополнительное усиление суммарной мощности $gain = f_1(s, p)$ и дополнительный перекос мощности каналов $slope = f_2(s, p)$. Конкретный вид функций f_1 и f_2 (включающих линейные и квадратичные компоненты зависимости от p и s) был подобран экспериментально таким образом, что приближение выполняется с точностью 0,1 дБ в диапазоне входных параметров $p \in (20...26)$, $s \in (-12...0)$. Соответственно, $OSNR_L$ для каждого канала многоканальной DWDM-системы с попутной рамановской накачкой может быть примерно рассчитано с помощью простой модификации формулы (2).

Формула (4) также модифицируется для учета влияния попутной рамановской накачки: вместо P_{IN} в нее подставляется значение

$$P_{IN}^* = \left(\frac{P_1^\beta + P_2^\beta}{2} \right)^{1/\beta}, \text{ где } P_1 \text{ и } P_2 - \text{мощность канала до и после учета}$$

влияния рамановского усиления, β – показатель степени, зависящий от P_1 и p .

При расчете выполняется максимизация значения $OSNR_M$ по трем параметрам: входная мощность, предперекос и предкомпенсация дисперсии. Выполненный расчет однопролетной линии с рамановским усилением показывает возможность передачи 40 каналов на расстояние 250 км (при значении затухания в волокне 0,22 дБ/км и запасе 3 дБ) (рис. 6).

¹ Предперекос – разница мощностей самого длинноволнового и самого коротковолнового каналов в многоканальной DWDM-системе при линейной зависимости мощности канала от номера канала в логарифмическом масштабе.

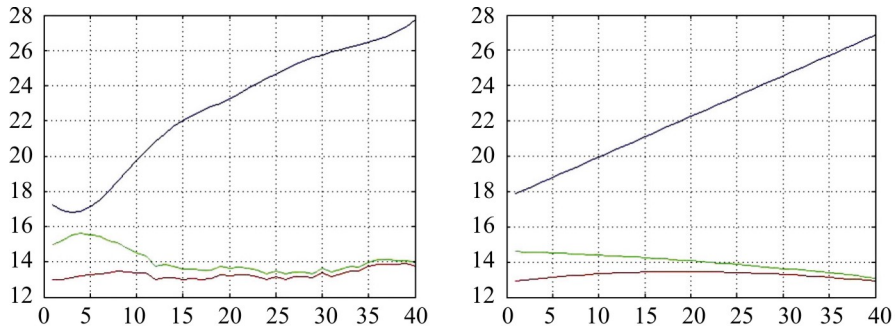


Рис. 6. Точный (слева) и приближенный (справа) расчет $OSNR$ [дБ] в конце линии: $OSNR_{NL}$ (верхняя кривая), $OSNR_L$ (средняя кривая), $OSNR_{BER}$ (нижняя кривая). По горизонтальной оси отложен условный номер канала (от 1 до 40 по мере возрастания длины волны)

В работе [9] экспериментально показана передача 40 каналов 100 Гбит/с на 302 км. При этом использовалось волокно стандарта G.652 с затуханием 0,196 дБ/км и не учитывался запас 3 дБ.

4. Рекордные однопролетные линии

В декабре 2012 г. специалистами компании «Т8» была осуществлена рекордная передача канала 100 Гбит/с на расстояние более 500 км [1]. Бюджет 1-канальной линии составил 84 дБ, использовалось наиболее современное на тот момент волокно Corning® SMF-28® ULL с затуханием 0,167 дБ/км. В настоящее время уже доступно волокно с затуханием 0,157 дБ/км; при использовании такого волокна бюджет 84 дБ соответствует расстоянию 535 км.

В ноябре 2013 г. специалистами компании «Т8» была продемонстрирована передача десяти каналов 100 Гбит/с на 502,8 км в однопролетной линии [4], что является действующим мировым рекордом.

В экспериментах по достижению рекордной дальности передачи в однопролетной линии использовалась схема с двумя эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой (B-ROPA и F-ROPA) и встречной рамановской накачкой на длине волны 1450 нм (рис. 7).

В эксперименте использовались 100G транспондеры TS-100E «Волга» производства компании «Т8» (модуляция DP-QPSK, когерентный прием) и волокно Corning® SMF-28® ULL со сверхнизким затуханием и низкой поляризационной модовой дисперсией.

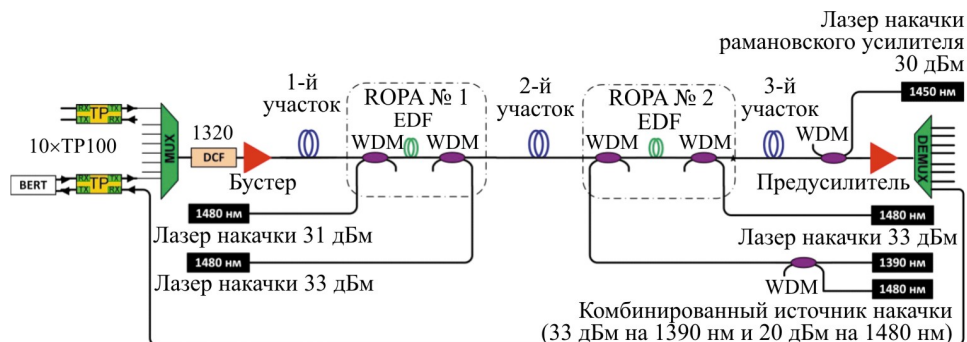


Рис. 7. Схема эксперимента 10×100G на 500 км: DCF – модуль компенсации дисперсии; WDM – оптический разветвитель; EDF – волокно, легированное эрбием; Booster, Pre-Amp – усилитель мощности и предусилитель, установленные в терминалах линии

Бюджет 10-канальной линии – 79 дБ. Затухание на участках представлено в таблице.

Затухание на участках

Линия	Длина, км	Измеренное затухание, дБ	Затухание, дБ/км
Первый участок	52,8	8,53 (1550 нм)	0,162 (1550 нм)
Второй участок	303,3	47,3 (1550 нм)	0,156 (1550 нм)
Третий участок	146,7	23,2 (1550 нм)	0,158 (1550 нм)
ROPA1 – доставка 1	50,5	8,03 (1550 нм)	0,159 (1550 нм)
ROPA1 – доставка 2	50,4	8,01 (1550 нм)	0,159 (1550 нм)
ROPA2 – доставка 1	147,6	28 (1480 нм)	0,190 (1480 нм)
ROPA2 – доставка 2	147,2	29 (1480 нм)	0,197 (1480 нм)

На рис. 8 представлены результаты эксперимента. Частота битовых ошибок (BER) во всех десяти каналах 100 Гбит/с не превышала предельный уровень (BER threshold) в течение всего времени проведения эксперимента.

В рекордном эксперименте, описанном выше, для доставки накачки использовались дополнительные волокна (по два дополнительных волокна для каждого ROPA). Для сравнения приведем описание двух экспериментов без использования дополнительных волокон.

В 2014 г. специалистами компании «Г8» осуществлена передача двух каналов 100 Гбит/с на 502,1 км в однопролетной линии на основе волокна Corning® SMF-28®ULL со сверхнизкими потерями (0,16 дБ/км), соответствующего стандарту G.652B. Для накачки усилителей использовалось то же самое волокно, по которому осуществлялась передача

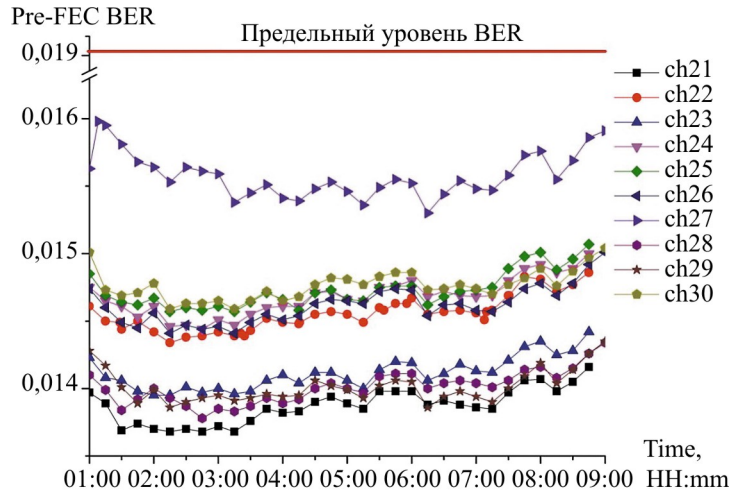


Рис. 8. Результаты эксперимента (10 каналов):
8-часовое тестирование 13.11.2013 (01:00–09:00)

сигнала. В схеме применялись два ROPA, рамановское усиление сигнала, предкомпенсация дисперсии. Бюджет линии составил 80,1 дБ. При передаче одного канала 100 Гбит/с данная схема обеспечивает запас 3 дБ, что позволяет использовать ее операторам связи для передачи коммерческого трафика.

В работе [7] показана возможность передачи одного канала 100 Гбит/с на 557 км и четырех каналов 100 Гбит/с на 523 км в линии без дополнительных волокон. Однако линия при этом целиком выполнена на подводном волокне EX2000 с увеличенным модовым диаметром ($A_{eff} = 112 \text{ мкм}^2$, среднее затухание 0,16 дБ/км).

Заключение

Максимальная длина однопролетных линий связи со скоростью 100 Гбит/с составляет на сегодняшний день около 560 км [7] и уменьшается при увеличении пропускной способности. Максимальная протяженность линии с пропускной способностью 1 Тбит/с (10 каналов по 100 Гбит/с) составляет более 500 км [4]. Однако для достижения рекордной дальности передачи в одном пролете требуется использовать специальное волокно со сверхнизким затуханием и эрбиевые усилители с удаленной накачкой по дополнительным волокнам, что сужает возможности практической реализации таких линий.

Большой практический интерес представляют линии связи, построенные на основе волокна со стандартизованным диаметром (стандарт G.652), без использования усилителей с удаленной накачкой (ROPA). В таких линиях дальность очень сильно зависит от коэффициента затухания волокна и колеблется в диапазоне от 250 до 350 км при изменении коэффициента затухания от 0,22 до 0,16 дБ/км. Показано, что при использовании стандартного волокна с затуханием 0,22 дБ/км и рамановской накачки возможно передать в одном пролете 40 DWDM-каналов на расстояние 250 км с запасом 3 дБ.

Список литературы

1. Record 500 km unrepeated 100 Gbs⁻¹ transmission / V.V. Gainov, N.V. Gurkin, S.N. Lukinih, S.G. Akopov, S. Makovejs, S.Y. Ten, O.E. Nanii, V.N. Treshchikov // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10, no. 7. – P. 075107–075111.
2. Nonlinear interference noise in 100-Gbit s⁻¹ communication lines with the DP-QPSK modulation format / N. Gurkin, O. Nanii, A. Novikov, S. Plaksin, V. Treshchikov, R. Ubaydullaev // *Quantum Electronics*. – 2013. – No. 43 (6). – P. 550–553.
3. Experimental investigation of nonlinear noise in long-haul 100-Gb/s DP-QPSK communication systems using real-time DSP / N. Gurkin, V. Mikhailov, O. Nanii, A. Novikov, V. Treshchikov, R. Ubaydullaev // *Laser Physics Letters*. – 2014. – No. 11 (9). – P. 095103.
4. Record 500 km unrepeated 1 Tbit/s (10×100G) transmission over an ultra-low loss fiber / V.V. Gainov, N.V. Gurkin, S.N. Lukinih, S. Makovejs, S.G. Akopov, S.Y. Ten, O.E. Nanii, V.N. Treshchikov, M.A. Sleptsov // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, no. 19. – P. 22308–22313.
5. Сверхдлинные однопролетные линии связи с удаленной накачкой оптических усилителей / В.В. Гайнов, Н.В. Гуркин, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, В.Н. Трешиков // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85, вып. 4. – С. 83–89.
6. 100 Gb/s coherent DWDM system reach extension beyond the limit of electronic dispersion compensation using optical dispersion management / A.A. Redyuk, O.E. Nanii, V.N. Treshchikov, V. Mikhailov, M.P. Fedoruk // *Laser Physics Letters*. – 2015. – No. 12 (1). – P. 025101.
7. 557-km unrepeated 100 G transmission with commercial Raman DWDM system, enhanced ROPA, and cabled large Aeff ultra-low loss fiber

in OSP environment / T.J. Xia, D.L. Peterson, G.A. Wellbrock, P. Doil Chang, P. Perrier, H. Fevrier, S. Ten, C. Towery, G. Mills // Proc. OFC/NFOEC. – 2014. – Paper Th5A.7.

8. 150×120 Gb/s Unrepeated Transmission over 333.6 km and 389.6 km (with ROPA) G.652 Fiber / D. Chang, H. Pedro, P. Perrier, H.Fevrier, S. Ten, C.Towery, I. Davis, S. Makovejs // Proc. ECOC. – 2014. – Paper Tu.1.5.4.

9. Hybrid EDFA/Raman Amplification Topology for Repeaterless 4.48 Tb/s (40 112 Gb/s DP-DQPSK) Transmission Over 302 Km of G.652 Standard Single Mode Fiber / J.R.F. Oliveira, U.C. Moura, G.E.R. Paiva, A.P. Freitas, L.H.H. Carvalho, V.E. Parahyba, J.C.R.F. Oliveira, M.A. Romero // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31, no. 16.

10. Desurvire E. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications. – New York: Wiley, 1994. – 750 p.

11. Dependence of the bit error rate on the signal power and length of a single-channel coherent single-span communication line (100 Gbit s^{-1}) with polarisation division multiplexing / N.V. Gurkin, V.A. Konyshev, O.E. Nanii, A.G. Novikov, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaydullaev // Quantum Electronics. – 2015. – No. 45 (1). – P. 69–74.

References

1. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinih S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Record 500 km unrepeated 100 Gbs⁻¹ transmission. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 7, pp. 075107-075111.

2. Gurkin N., Nanii O., Novikov A., Plaksin S., Treshchikov V., Ubaydullaev R. Nonlinear interference noise in 100-Gbit s⁻¹ communication lines with the DP-QPSK modulation format. *Quantum Electronics*, 2013, no. 43 (6), pp. 550-553.

3. Gurkin N., Mikhailov V., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubaydullaev R. Experimental investigation of nonlinear noise in long-haul 100-Gb/s DP-QPSK communication systems using real-time DSP. *Laser Physics Letters*, 2014, no. 11 (9), p. 095103.

4. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinih S.N., Makovejs S., Akopov S.G., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Sleptsov M.A. Record 500 km unrepeated 1 Tbit/s (10×100G) transmission over an ultra-low loss fiber. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 19, pp. 22308-22313.

5. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinykh S.N., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Sverkhdlinnye odnoproletnye linii sviazi s udalennoi nakachkoi opticheskikh usilitelei [Extra-long single-span link with remotely pumped optical amplifiers]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, vol. 85, iss. 4, pp. 83-89.

6. Redyuk A.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Mikhailov V., Fedoruk M.P. 100 Gb/s coherent DWDM system reach extension beyond the limit of electronic dispersion compensation using optical dispersion management. *Laser Physics Letters*, 2015, no. 12 (1), p. 025101.

7. Xia T.J., Peterson D.L., Wellbrock G.A., Chang Doil P., Perrier P., Fevrier H., Ten S., Towery C., Mills G. 557-km unrepeated 100 G transmission with commercial Raman DWDM system, enhanced ROPA, and cabled large Aeff ultra-low loss fiber in OSP environment. *Proc. OFC/NFOEC*, 2014, paper Th5A.7.

8. Chang D., Pedro H., Perrier P., Fevrier H., Ten S., Towery C., Davis I., Makovejs S. 150×120 Gb/s Unrepeated Transmission over 333.6 km and 389.6 km (with ROPA) G.652 Fiber. *Proc. ECOC*, 2014, paper Tu.1.5.4.

9. Oliveira J.R.F., Moura U.C., Paiva G.E.R., Freitas A.P., Carvalho L.H.H., Parahyba V.E., Oliveira J.C.R.F., Romero M.A.. Hybrid EDFA/Raman Amplification Topology for Repeaterless 4.48 Tb/s (40 112 Gb/s DP-DQPSK) Transmission Over 302 km of G.652 Standard Single Mode Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 16.

10. Desurvire E. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications. New York: Wiley, 1994. 750 p.

11. Gurkin N.V., Konyshov V.A., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. Dependence of the bit error rate on the signal power and length of a single-channel coherent single-span communication line (100 Gbit s⁻¹) with polarisation division multiplexing. *Quantum Electronics*, 2015, no. 45 (1), pp. 69-74.

Получено 4.03.2015