

## Сверхдлинные однопролетные линии связи с удаленной накачкой оптических усилителей

© В.В. Гайнов,<sup>1</sup> Н.В. Гуркин,<sup>1</sup> С.Н. Лукиных,<sup>1,2</sup> О.Е. Наний,<sup>1,2</sup> В.Н. Трещиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО „Научно-технический центр Т8“,  
107076 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: lukinyh@t8.ru

(Поступило в Редакцию 24 февраля 2014 г. В окончательной редакции 8 июля 2014 г.)

Описаны методы оценки максимальной достижимой дальности передачи DWDM-сигналов в однопролетных линиях связи различных конфигураций. На примере транспондера со скоростью передачи данных 100 Gb/s с четырехуровневой фазовой модуляцией и поляризационным мультиплексированием (DP-QPSK) приведены значения максимальной длины однопролетной линии в зависимости от варианта исполнения. На основе приведенных оценок экспериментально показано, что при использовании приемопередающей системы с указанным форматом модуляции, а также когерентным детектированием и коррекцией ошибок с мягким принятием решений (SoftFEC) в сочетании с волокном, обладающим ультрамалым затуханием, дальность передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Gb/s в однопролетных линиях связи может превышать 500 km.

### Введение

Сверхдлинные однопролетные линии связи, работающие без использования активных элементов вне конечных узлов, находят широкое применение для соединения островов и создания отводов от подводных магистральных линий связи, а также для соединения нефтегазодобывающих скважин с материком. Поэтому проводится регулярная работа по увеличению пропускной способности и дальности передачи информации в таких линиях [1,2]. Для многих российских регионов очень актуальна разработка однопролетных линий связи со сверхдлинными пролетами (от 300 до 500 km) для прокладки по малонаселенной и труднодоступной территории, когда построение промежуточных усилительных или регенерационных пунктов невозможно или экономически нецелесообразно.

Создание DWDM-систем связи с канальной скоростью передачи информации 100 Gb/s [3,4] ставит задачу определения максимальной длины однопролетных линий связи при таких скоростях и зависимости этой длины от числа каналов.

Возможно множество вариантов однопролетных линий, различающихся типом волокна, наличием, типом и расположением распределенных рамановских усилителей или усилителей с удаленной накачкой (ROPA). Для достижения максимальной дальности передачи необходимо использовать волокно с минимальным затуханием и оптимальное сочетание распределенных усилителей с удаленно накачиваемыми усилителями, причем рекордная дальность достигается при использовании дополнительных волокон для накачки ROPA.

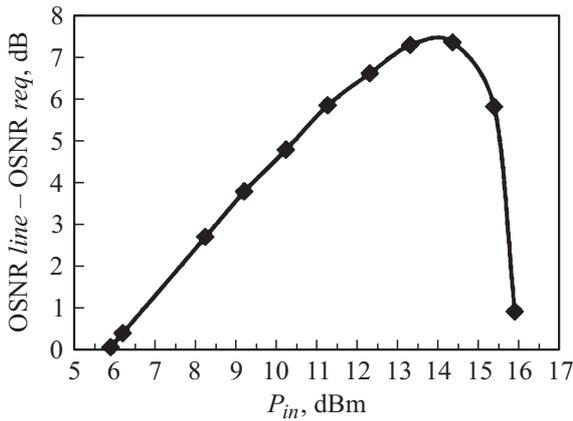
При проектировании конкретной линии меньшей длины необходимо выбрать наиболее технологичный и

экономически эффективный вариант. В работе приводится анализ различных конфигураций однопролетных линий, указаны их основные преимущества и физические ограничения для дальнейшего увеличения длины линии. Приведенные результаты позволяют проектировщику обосновать экономически эффективный выбор той или иной конфигурации для заданного полного затухания в однопролетном участке и требуемой пропускной способности линии.

### Основные характеристики приемопередающих систем и обзор типовых конфигураций

Основным параметром, по значению которого можно судить о работоспособности линии, является оптическое отношение сигнал-шум (OSNR) — отношение мощности сигнала к мощности шума в референсной полосе 0.1 nm. При анализе различных конфигураций ставится задача оптимизации линии по данному параметру. Для достижения оптимальных условий передачи необходимо обеспечить превышение (запас) результирующего OSNR в конце линии над так называемым критическим OSNR<sub>R</sub> — универсальным параметром приемопередающей системы. OSNR<sub>R</sub> — предельное значение оптического отношения сигнал-шум, при котором доля битовых ошибок (BER) на приемном конце не превышает определенного порогового уровня BER<sub>thr</sub> (как правило, не более 10<sup>-12</sup>).

Простейшей конфигурацией однопролетной линии является передача сигнала по участку линии с усилителем мощности (бустером) на передающем конце и предусилителем на приемном конце. Предусилитель обеспечивает постоянный уровень мощности на фотоприемнике транспондера. На рис. 1 изображена типичная зависи-



**Рис. 1.** Типичная зависимость запаса по OSNR в однопролетной линии для транспондеров с каналной скоростью 100 Gbit/s. Величина максимума зависит от длины линии и уровня шума ASE.

мость запаса по OSNR от входной мощности линии (без конкретизации типа приемопередатчика). Значение входной мощности, при котором запас по OSNR максимален, обозначим  $P_{in}^{opt}$  — это является еще одной

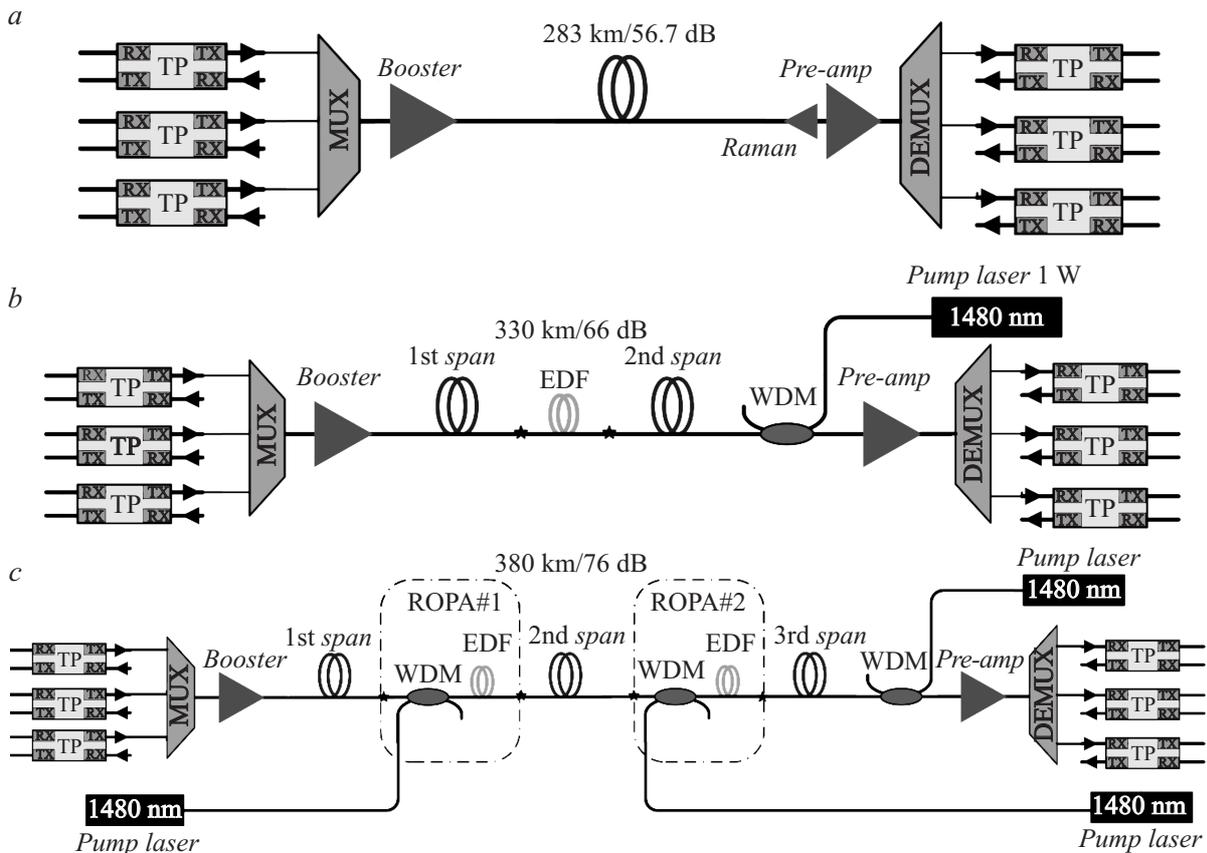
характеристикой приемопередающей системы. При данной мощности достигается оптимум между достижением высокого значения OSNR при фиксированном уровне шумов ASE в линии и допустимым уровнем искажений, вызванных нелинейными эффектами.

В этом случае максимальная дальность  $L$  [km] и перекрываемое затухание определяются простым выражением [5]:

$$\alpha_s L = 58 + P_{in}^{opt} - NF - OSNR_R, \quad (1)$$

где  $\alpha_s$  [dB/km] — затухание волокна на длине волны сигнала,  $NF$  [dB] — шум-фактор предусилителя,  $OSNR_R$  — величина требуемого OSNR в линии, соответствующая мощности  $P_{in}^{opt}$ .

Помимо тривиальной (усилитель мощности + предусилитель), возможны следующие типовые конфигурации однопролетных линий: 1) встречная рамановская накачка на длине волны 1450 nm (рис. 2, a), 2) ROPA с приемной стороны с накачкой по сигнальному волокну 1480 nm (см. рис. 2, b), 3) два усилителя (с приемной и передающей сторон) с накачкой по дополнительным волокнам (см. рис. 2, c).



**Рис. 2.** Типовые конфигурации однопролетных линий: TP — транспондер, MUX — DWDM-мультиплексор, Booster — EDFA усилитель мощности, 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> span — первый, второй, третий пролеты (участки волокна между ROPA) в линии, EDF — волокно, легированное эрбием, WDM — мультиплексор накачки, Raman — распределенный рамановский усилитель со встречной накачкой, Pre-Amp — EDFA предусилитель, DEMUX — DWDM-демультиплексор, Pump Laser — лазер накачки. Приведенная дальность рассчитана для 100 G транспондера „Волга“ (параметры см. табл. I) с учетом запаса 3 dB для волокна с погонным затуханием 0.2 dB/km при передаче одного спектрального канала.

При расчете линии с удаленными усилителями оптимизация сводится к поиску оптимального положения ROPA, которым обеспечивается максимальный запас по OSNR. При этом основным параметром, определяющим режим работы удаленных усилителей, является мощность насыщения активного световода. Для большинства волокон она колеблется в интервале от  $-12$  до  $-7$  dBm, и для рассматриваемого в настоящей работе волокна OFS R37003 составляет  $-9$  dBm [6].

### Конфигурация с удаленным усилителем, накачиваемым с приемной стороны

В линиях с одним удаленным усилителем, накачиваемым с приемной стороны (см. рис. 2, *b*), усилитель работает в режиме слабого сигнала, поскольку в большинстве случаев его выходная оптическая мощность оказывается меньше мощности насыщения. В этом режиме коэффициент усиления и шум-фактор усилителя слабо зависят от мощности сигнала и определяются подводимой мощностью накачки. Измеренная зависимость данных параметров от мощности накачки для усилителя, состоящего из 9.5 активного волокна OFS R37003, приведена на рис. 3.

Распределенное по длине второго участка излучение накачки на длине волны 1480 nm приводит к возникновению рамановского усиления. Входная мощность сигнала в предусилитель оказывается пренебрежимо мала по сравнению с мощностью лазера накачки ROPA, таким образом, распределенный рамановский усилитель работает в режиме неистощающейся накачки. В этом режиме эквивалентные коэффициент усиления  $G_{\text{on/off}}$  и шум-фактор  $NF_{\text{on/off}}$  рамановского усилителя также не зависят от мощности сигнала, причем  $G_{\text{on/off}}$  в логарифмическом масштабе пропорционален мощности накачки [7].

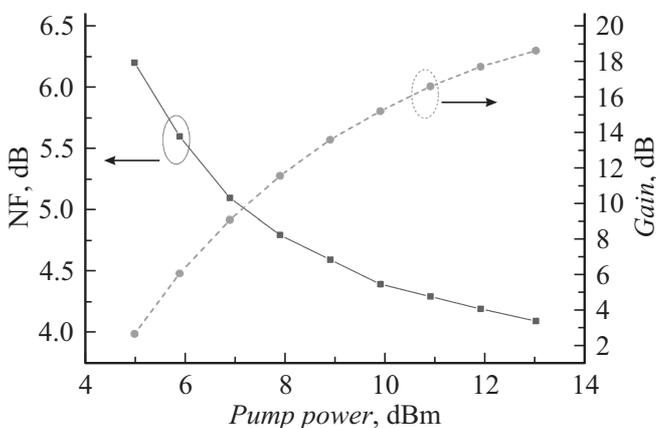


Рис. 3. Зависимость шум-фактора и коэффициента усиления ROPA от мощности накачки в режиме слабого сигнала.

В дальнейших оценках нами были использованы полученные экспериментально значения коэффициента рамановского усиления  $30$  dB/W и  $NF_{\text{on/off}} = -1.8$  dB. Следует отметить, что вариация величины  $G_{\text{on/off}}$  для различных типов стандартного волокна G.652D, а также при изменении длины волны накачки до  $1455$  nm незначительна и составляет не более  $1.5$  dB/W [8] и в конечном итоге слабо влияет на изменения результирующего OSNR в линии.

Таким образом, рассматриваемую линию можно приближенно смоделировать набором дискретных элементов:

1. Участок световода с потерями  $\alpha_s L_1$ .
2. Удаленный усилитель с шум-фактором и коэффициентом усиления, зависящими от мощности накачки и длины второго пролета  $NF_{\text{ROPA}}(P_P - \alpha_P L_2)$ ,  $G_{\text{ROPA}}(P_P - \alpha_P L_2)$ .
3. Участок световода с потерями  $\alpha_s L_2$ .
4. Рамановский усилитель с эффективными коэффициентами усиления  $G_{\text{on/off}}$ ,  $NF_{\text{on/off}}$ , зависящими в общем случае от мощности накачки и типа волокна.
5. Предусилителем с шум-фактором  $NF_{\text{EDFA}} = 6$  dB.

Максимальную дальность передачи  $L$  можно определить из условия достижения результирующим OSNR критического значения  $OSNR_R$  [5]:

$$OSNR_R = 58 + P_{\text{in}}^{\text{opt}} - NF_{\text{total}},$$

где  $NF_{\text{total}}$  — шум-фактор линии [dB],  $P_{\text{in}}^{\text{opt}}$  — оптимальная входная в линию мощность сигнала [dBm].

Расчет суммарного шум-фактора линии производится по формуле Фрииса [5] при известных измеренных зависимостях коэффициента усиления и шум-фактора от мощности накачки. При этом, исходя из структуры линии, выражение для  $NF_{\text{total}}$  можно представить в виде

$$NF_{\text{total}} = \alpha_s L_1 + f(L_2),$$

где  $f(L_2)$  — функция только от длины второго участка. Таким образом, задача максимизации  $L = L_1 + L_2$  сводится к однопараметрической оптимизации по длине второго участка.

Для оценки дальности передачи в современных высокоскоростных линиях связи с каналной скоростью  $100$  GBit/s рассмотрим транспондеры „Волга“ производства компании T8, параметры которого приведены в табл. 1. Транспондер использует четырехуровневый фазовый формат модуляции с поляризационным мультиплексированием (DP-QPSK) и когерентный (гетеродинный прием) и осуществляет передачу сигнала по протоколу OTU4. Для предварительной коррекции ошибок используется алгоритм Soft-FEC с избыточностью кодирования 15%.

В линии связи при условиях, соответствующих оптимуму на рис. 1,  $OSNR_R$  оказывается на  $1.76$  dB больше, чем та же величина, измеренная при малых входных мощностях в линии (указана в табл. 1). Увеличение

Таблица 1. Основные характеристики 100G транспондера

Транспондер	Модуляция	FEC	OSNR <sub>R</sub>	$P_{in}^{opt}$	Pre-FEC BER, критическое значение
TP-100 „Волга“	DP-QPSK	Soft-FEC G.9751.7 15%	12.5 dB	14 dBm	$1.91 \cdot 10^{-2}$

критического OSNR вызвано нелинейными искажениями, влияние которых на когерентные 100G системы приближенно описывается как нелинейный шум, мощность которого пропорциональна мощности сигнала в третьей степени ( $P^3$ ) [4].

Ниже на рис. 4 представлена соответствующая данным параметрам транспонера зависимость суммарной длины линии от  $L_2$ , рассчитанная по указанной выше методике. По максимуму в данной зависимости можно определить максимальное расстояние передачи, допускаемое данной конфигурацией однопролетной линии, и соответствующее ему положение удаленного усилителя.

При заданной фиксированной длине линии оптимизация также производится по положению ROPA, при этом максимизируется величина результирующего OSNR линии.

Следует отметить, что в системах с когерентным (гетеродинным) приемом компенсация дисперсии осуществляется математически по форме оптического сигнала на приемнике при помощи специального DSP-процессора [9]. Поэтому для таких систем дисперсионные эффекты не влияют на дальность передачи в однопролетных линиях. Для некогерентных систем влияние дисперсии учитывается при помощи величины шум-фактора предусилителя, который изменяется в соответствии с величиной компенсируемой дисперсии.

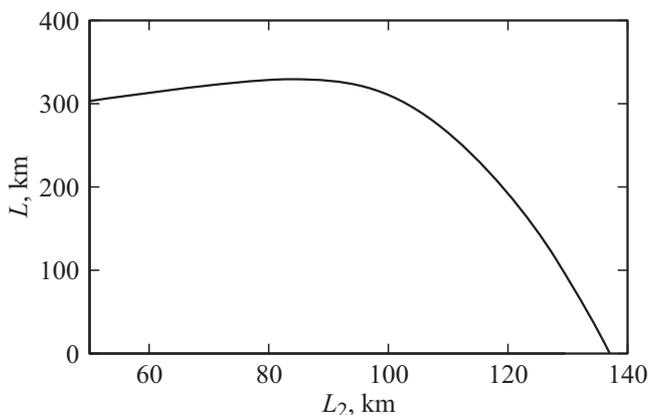


Рис. 4. Зависимость суммарного перекрываемого расстояния для транспондеров „Волга“ от расстояния до ROPA с передающей стороны. Погонное затухание волокна принимается равным 0.2 dB/km, мощность лазера накачки — 1 W.

## Конфигурация с удаленным усилителем, накачиваемым с передающей стороны

При добавлении усилителя, накачиваемого с передающей стороны по дополнительному волокну (см. рис. 2, с), необходимо оптимизировать положение этого усилителя. В большинстве случаев, удаленный усилитель будет работать в режиме сильного насыщения. В этом режиме выходная мощность слабо зависит от входной и определяется подводимой мощностью накачки. Из соображения увеличения OSNR на выходе линии понятно, что необходимо уменьшать расстояние между ROPA и передатчиком, поскольку потери на длине волны накачки (1480 nm) больше, чем на длине волны излучения (на 0.04 dB/km). Таким образом, оптимальное положение ROPA определяется путем нахождения баланса между величиной нелинейных искажений во втором пролете (растущих при увеличении мощности) и оптическим отношением сигнал-шум на выходе линии.

В линиях с использованием удаленного усилителя, накачиваемого с передающей стороны, возникает существенное ограничение на количество каналов  $N_{CH}$  за счет эффекта насыщения усилителя. В DWDM-линии с числом каналов  $N_{CH}$  суммарная мощность излучения на выходе с первой ROPA изменяется незначительно, а мощность в канале уменьшается примерно в  $N_{CH}$  раз по сравнению с мощностью сигнала в одноканальной линии. Для сохранения оптимальной канальной мощности в DWDM-линии необходимо увеличить мощность накачки, что можно сделать, только уменьшив расстояние от передатчика до ROPA. Таким образом, максимальная длина DWDM-линии с числом каналов  $N_{CH}$  уменьшается относительно максимальной длины одноканальной линии на величину  $\Delta L$ , определяемую следующей формулой:

$$\Delta L = \frac{10 \log(N_{CH})}{\alpha_p},$$

где  $\alpha_p$  — погонное затухание в волокне доставки на длине волны накачки. В большинстве случаев при количестве каналов  $N_{CH} > 10$  выигрыш от использования forward ROPA отсутствует. При этом в данных оценках не учитывается влияние межканальных нелинейных эффектов.

Использование дополнительных волокон для доставки накачки позволяет повысить доставляемую на удаленный усилитель мощность. Максимальная, вводимая в линию доставки, мощность излучения ограничена величи-

**Таблица 2.** Рассчитанные значения предельной дальности передачи одного и восьми 100G DWDM-каналов для различных типов волокон и конфигураций однопролетных линий. Мощность накачки каждого из лазеров принимается равной 1 W

Усилитель мощности + встречный распределенный усилитель	Усилитель мощности + удаленный усилитель с приемной стороны	ROPA с передающей стороны с дополнительными волокнами (указано число)	Дополнительные волокна для доставки накачки на ROPA с приемной стороны	Тип волокна и погонные потери на длине волны 1550 nm				
				ULL 0.17 dB/km	ULL 0.18 dB/km	SMF-28 0.19 dB/km	SMF-28 0.20 dB/km	SMF-28 0.23 dB/km
+				352	331	315	299	260
+	+			404	382	363	345	301
+	+	1		442/400	422/381	404/364	386/349	344/311
+	+		+	414	392	372	353	309
+	+	1	+	453/410	431/390	412/373	395/357	352/319
+	+	2	+	466/423	444/403	425/386	408/370	365/331

нами примерно +31 dBm для волокон Corning-SMF-28, ULL (модовая площадь до  $85 \mu\text{m}^2$ ) и +32.5 dBm для волокон EX2000 (модовая площадь  $112 \mu\text{m}^2$ ) при накачке на одной длине волны. Ограничение максимальной мощности вызвано достижением порога паразитной лазерной генерации, обусловленной наличием комбинационного (рамановского) усиления и нерезонансной распределенной обратной связи за счет рэлеевского рассеяния [10].

В качестве примера максимальные дальности передачи, достижимые в различных конфигурациях однопролетных линий при использовании транспондеров „Волга“, приведены в табл. 2.

Описанные выше правила позволяют выбрать наиболее оптимальную конфигурацию однопролетной линии с учетом необходимого перекрываемого затухания, требуемой пропускной способности и стоимости оборудования в узлах связи.

## Экспериментальная демонстрация

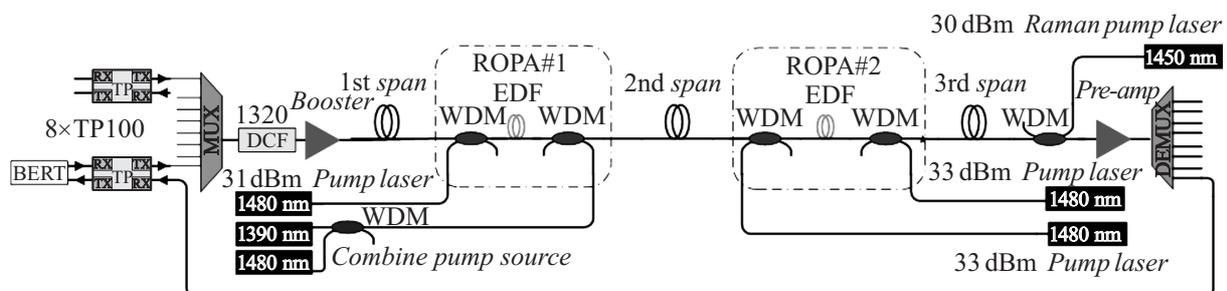
Для достижения предельно возможной дальности передачи необходимо выбирать максимальную конфигурацию из представленных в табл. 2. С целью экспериментальной проверки предельных возможностей передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Gb/s

в лабораторных условиях собран макет линии связи, схема которой приведена на рис. 3. Максимальное число DWDM-каналов в ней равно 8, канальная скорость передачи информации 100 Gb/s, битовая скорость с учетом FEC 120 Gb/s, длина линии 502 km [11].

Сигналы от 1 до 8 передатчиков, входящих в состав промышленно выпускаемых транспондеров „Волга“ (TP), объединяются мультиплексором (MUX), проходят через компенсатор дисперсии на основе компенсирующего дисперсию волокна (DCF), создающий оптимальную предкомпенсацию дисперсии, усиливаются усилителем мощности до суммарной мощности 20.3 dBm (для восьми каналов), что соответствует канальной мощности 11.3 dBm, и поступают в исследуемую однопролетную линию связи.

Линия связи состоит из трех участков волокна PSCF с пониженным затуханием длиной 76, 279 и 147 km общей длиной 502 km. Потери в каждом из трех участков с учетом потерь на сварку равны 12.5, 43.6, 23.2 dB, соответственно, полные потери в линии, таким образом, составили 79.3 dB. Среднее затухание в трех участках линии оказалось несколько разным: 0.164 dB/km в первом, 0.156 dB/km во втором и 0.158 dB/km в третьем участке.

Между участками телекоммуникационного волокна установлены EDFA усилители с удаленной оптической

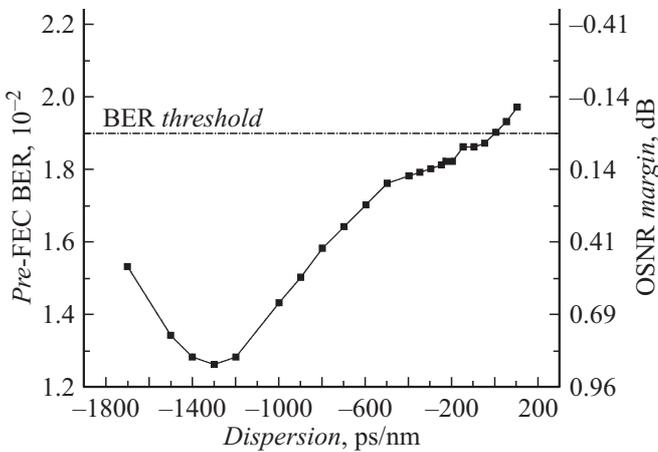


**Рис. 5.** Схема экспериментальной линии: BERT — BER-анализатор, DCF — модуль компенсации дисперсии, 1390/1480 nm Combined Pump Source — двухволновой источник накачки 1390 + 1480 nm суммарной мощностью +33.5 dBm, 1450 nm 30 dBm Raman Pump Laser — лазер с длиной волны 1450 nm мощностью 1 W, используемый для встречной рамановской накачки. Остальные обозначения — см. рис. 1.

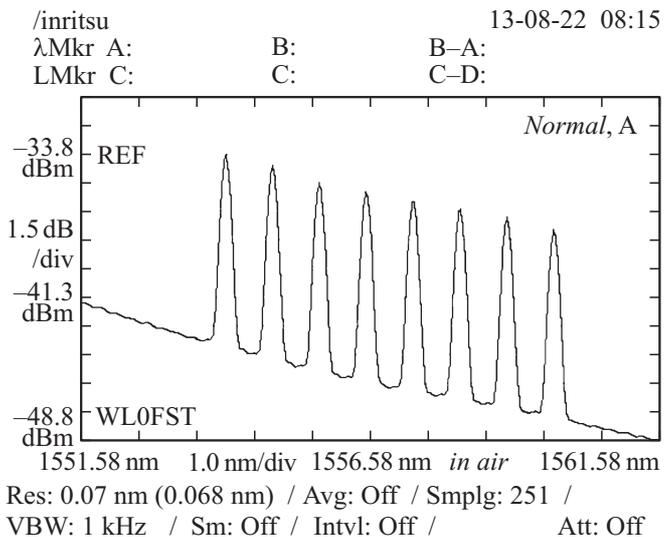
накачкой. Накачка каждого усилителя ROPA осуществлялась с двух сторон с использованием двух оптических линий доставки волокон. Три из четырех линий доставки изготавливались гибридными и содержали участки PSCF волокна с увеличенной площадью моды ( $112 \mu\text{m}^2$ ) длиной не менее 20 km (волокно EX2000 компании Corning). Использование волокон EX2000 позволяет вводить в волокно оптическую мощность до 32.5–33 dBm.

Наряду с удаленным усилением в ROPA применялось распределенное рамановское усиление в последней секции линии связи путем введения встречной накачки на длине волны 1450 nm со стороны приемника (см. рис. 5). При мощности рамановской накачки 29.4 dBm полное распределенное on/off усиление составляет 30 dB.

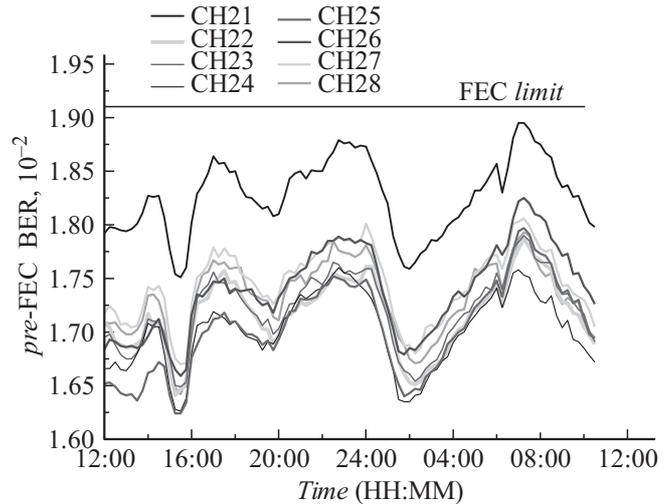
Одним из основных информационных параметров приемопередающей системы является величина



**Рис. 6.** Зависимость pre-FEC BER и запаса по OSNR от величины предкомпенсации дисперсии. Величина pre-FEC BER измеряется экспериментально и по его значению определяется запас по OSNR.



**Рис. 7.** Спектр сигнала на выходе из линии (после предусилителя). Предустановка спектра по равенству BER в каналах.



**Рис. 8.** График зависимости BER от времени.

Pre-FEC BER, т.е. количество ошибок BER на линии, исправляемых алгоритмом FEC. Высокая избыточность кодирования FEC приводит к полному исправлению всех ошибок при величине BER на линии меньше порогового значения Pre-FEC BER, равного  $1.91 \cdot 10^{-2}$  (см. табл. 1).

При использовании предкомпенсации дисперсии возможны уменьшение нелинейных искажений сигнала и снижение уровня Pre-FEC BER. Оптимальная величина предкомпенсации дисперсии зависит от числа пролетов в линии, дисперсии и затухания волокна, а также наличия попутной рамановской накачки. Экспериментально измеренные зависимости Pre-FEC BER от величины предкомпенсации для одного канала в исследуемой линии приведены на рис. 6.

Тестирование работоспособности сверхдлинной линии проводилось при одновременной передаче 100 Gb трафика на 8 DWDM-каналах с 22 по 28 (несущие частоты от 192.2 до 192.8 THz с шагом 100 GHz). Оптический спектр сигнала представлен на рис. 7.

Долговременные измерения вариации величины Pre-FEC BER от времени в течение 12 h показали стабильность работы сверхдлинной линии связи с обработкой в реальном времени. График зависимости BER до FEC от времени показан на рис. 8. Данный результат, насколько известно авторам, является текущим рекордом дальности для канальной скорости 100 Gb/s и суммарной скорости передачи данных в однопролетной линии.

## Выводы

В работе описаны принципы оптимизации однопролетных линий на основе эрбиевых усилителей с удаленной накачкой. Оптимизация сводится к подбору оптимального положения удаленных усилителей для любой приемопередающей системы, при этом анализ упрощается в связи с тем, что усилители работают в своих предельных режимах: ближайший к передатчику

работает в режиме насыщения, а ближайший к приемнику — в режиме слабого сигнала. Свойства приемопередающих систем описываются набором универсальных параметров (величина требуемого OSNR и оптимальной входной мощности в линию), которые могут быть измерены отдельно. В совокупности с приведенными в работе оптимизированными параметрами удаленного усилителя (тип и длина активного волокна, зависимости шум-фактора и коэффициента усиления от мощности накачки) это позволяет спроектировать однопролетную линию с известными характеристиками и подобрать экономически оптимальный вариант, удовлетворяющий требованиям полного затухания в линии и максимальной пропускной способности.

Приведенный в работе экспериментальный результат имеет своей целью зафиксировать рекордные на сегодняшний день характеристики когерентных 100 G систем по пропускной способности на сверхдальних расстояниях передачи в однопролетной линии (0.8 Tb/s более чем на 500 km). Ключевыми технологиями, обеспечивающими такие возможности, являются 1) приемопередающая система на основе спектрально-эффективного формата модуляции DP-QPSK со скоростью передачи данных 100 Gb/s и технологии когерентного приема, с использованием алгоритма электронной компенсации остаточной дисперсии, эффективным алгоритмом FEC и низким значением OSNR<sub>R</sub>; 2) использование эрбиевых усилителей с удаленной накачкой при необходимой оптимизации параметров активного волокна и расположения усилителей на линии; 3) волокно с сердцевиной из чистого кварца (PSCF) со сверхнизкими потерями 0.16 dB/km, а также волокна с увеличенным модовым диаметром; 4) оптимальная величина предкомпенсации дисперсии.

## Список литературы

- [1] Bissessur H., Bousselet P., Mongardien D., Boissy G., Lestrade J. // Proc of the 37<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication (ECOC 2011). Geneva. 2011. Tu. 3. B. 3.
- [2] Chang D., Patki P., Burtsev S., Pelouch W. // OFC/NFOEC Technical Digest. 2013. JTh2A.42.
- [3] Гуркин Н.В., Трещиков В.Н., Новиков А.Г., Наний О.Е. // TComm. 2012. № 4 С. 65–67.
- [4] Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы. М.: Наука, 2013. С. 210.
- [5] Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. // Квант. электрон. 2013. Т. 43. № 6. С. 550–553.
- [6] Specification Sheet „Erbium-doped fibers for C-band“, <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/gl/Datasheets-IS13/OSA00256066.pdf>.
- [7] Chinn S.R. // Electron. Lett. 1997. Vol. 33. N 7. P. 607–608.
- [8] Jiang S., Bristiel B., Jaouën Y., Gallion P., Pincemin E., Capouilliet S. // Opt. Express. 2007. Vol. 15. N 8. P. 4883–4892.
- [9] Waegemans R. Digital electronic predistortion for optical communications // PhD Thesis. University Colledge London, 2009.
- [10] Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Churkin D.V., Kablukov S.I., Ania-Castanon J.D., Karalekas V., Podivilov E.V. // Nature Photon. 2010. Vol. 4. P. 231–235.
- [11] Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Naniy O.E., Treshchikov V.N. // Laser Phys. Lett. 2013. Vol. 10. N 7. P. 075 107.