

## Методы увеличения дальности передачи многоканального сигнала в многопролетных волоконно-оптических линиях связи

© М.А. Горбашова,<sup>1,2</sup> Д.Д. Старых,<sup>1</sup> О.Е. Наний,<sup>1,3</sup> В.Н. Трещиков<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>ООО „Т8 НТЦ“,  
107076 Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт,  
141707 Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет,  
119234 Москва, Россия

<sup>4</sup>ООО „Т8“,  
107076 Москва, Россия  
e-mail: gorbashovama@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 января 2024 г.

В окончательной редакции 7 марта 2024 г.

Принято к публикации 10 марта 2024 г.

Рассмотрено несколько способов увеличения дальности передачи многоканального сигнала в многопролетных волоконно-оптических линиях связи. На основе численного эксперимента выполнена оценка выигрыша в дальности передачи при замене волокон стандарта G.652-D на волокна G.654-C, отличающиеся физическими характеристиками. Показано, что в волоконно-оптических линиях связи с равными пролетами величина выигрыша в дальности при замене волокна зависит от длины пролета. Предложена методика оптимизации диапазонов усиления эрбиевых усилителей, используемых в реальных линиях связи. Выполнена оценка выигрыша в дальности передачи при использовании встроенных в эрбиевые усилители мультиплексов ввода–вывода служебного канала и при снижении запаса, закладываемого на величину суммарных потерь между усилительными узлами (бюджету пролета).

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), эрбиевый усилитель (EDFA) оптимизация ВОЛС, DWDM, бюджет пролета, запас.

DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57820.2-24

### Введение

В последние годы наблюдается беспрецедентный рост объемов информации, передаваемой по волоконно-оптическим сетям связи. Эта тенденция ставит задачу постоянного увеличения производительности волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [1–3], равной производству пропускной способности на дальность передачи.

В многоканальных системах связи со спектральным мультиплексированием (DWDM — Dense Wavelength Division Multiplexing) для передачи данных традиционно используется диапазон длин волн от 1529 до 1561 nm — так называемый C-диапазон (Conventional band). При формировании информационного сигнала оптическое излучение лазера подается на модулятор, в котором происходит изменение интенсивности и/или фазы лазерного излучения в соответствии с передаваемой битовой последовательностью. В DWDM-системах ключевыми факторами, приводящими к ограничению дальности передачи полезного сигнала, являются затухание оптического сигнала в волокне, шумы усилительного и приемно-передающего оборудования и нелинейные эффекты, вызывающие ухудшение качества сигнала при увеличении мощности сигнала в волокне. Увеличить

дальность можно, уменьшая потери в волокне, оптимизируя характеристики реальных усилителей, доступных для использования в реальных условиях, и снижая нелинейную деградацию сигнала.

Самый прямой метод повышения дальности передачи — использование в проектируемых сетях современных типов волокон с минимальным затуханием. На сегодняшний день большая часть существующих ВОЛС построена на базе волокна стандарта G.652-D SSMF (Standard Single Mode Fiber), погонные потери в котором составляют  $\sim 0.2$  dB/km [4]. В последние годы также активно используется волокно стандарта G.654-C ULL (Ultra-Low Loss) [5], погонные потери в котором снижены до величины  $\sim 0.17$  dB/km. Кроме того, коэффициент нелинейности у волокон ULL имеет меньшее значение, чем у SMF, что также делает их привлекательными для использования.

Также выигрыша в дальности передачи можно добиться за счет оптимального подбора усилительного оборудования. Чаще всего в DWDM-системах связи применяют эрбиевые волоконные усилители (EDFA — Erbium Doped Fiber Amplifier). Теоретически для минимизации влияния шумов на сигнал нужно использовать усилители, оптимизированные под работу с определенным значением коэффициента усиления (FGA — Fixed

Gain Amplifier). При таком подходе, однако, усилитель под каждое значение длины пролета необходимо разрабатывать отдельно, что является крайне дорогостоящим решением, которое не используется в реальных сетях связи. К тому же в таких линиях не предусмотрена возможность компенсации изменений потерь, возникающих в процессе эксплуатации ВОЛС, за счет подстройки коэффициента усиления. Однако этот подход применяется в подводных линиях связи [6]. В современных наземных сетях чаще используются EDFA с возможностью перестройки коэффициента усиления в некотором диапазоне (VGA — Variable Gain Amplifier). Шум-фактор таких усилителей уменьшается с ростом коэффициента усиления, что приводит к увеличению мощности шумов усилителей в линиях с короткими пролетами. Поэтому важной задачей является подбор оптимальных диапазонов изменений коэффициента усиления для линейки используемого усилительного оборудования. При этом необходимо учитывать, что рост числа используемых усилителей в линейке приведет к увеличению затрат на разработку оборудования. Также в DWDM-системах используются распределенные рамановские волоконные усилители (DRA — Distributed Raman Amplifier). По сравнению с EDFA DRA имеют более низкое значение шум-фактора, при этом использование DRA из-за высокой мощности излучения накачки требуется тщательно следить за чистотой разъемных соединений. Наличие пыли/грязи на выходном коннекторе усилителя при использовании DRA гарантированно приведет к тому, что коннектор будет испорчен при прохождении излучения накачки через него. Кроме того, цена DRA существенно выше, чем у EDFA, поэтому DRA обычно применяют в дополнение к EDFA.

В DWDM-системах для осуществления взаимодействия между оборудованием, установленным в промежуточных точках линии связи, дополнительно осуществляется передача данных по служебному каналу. Чаще всего для передачи данных по служебному каналу используются длины волн 1490 или 1510 nm. Для того чтобы осуществить ввод/вывод излучения на данных длинах волн, на входном/выходном порту EDFA устанавливают WDM (Wavelength Division Multiplexer). В случае если WDM является внешним, при проектировании линии связи необходимо учитывать не только внутренние потери на WDM ( $\sim 0.35$  dB), но и потери на дополнительных розетках, необходимых для соединения с усилительным оборудованием ( $\sim 0.5$  dB на входе и выходе усилителя). Таким образом, использование мультиплексоров для ввода/вывода излучения на длине волны, на которой осуществляется передача служебной информации, встроенных в усилители, позволяет улучшать качество передачи.

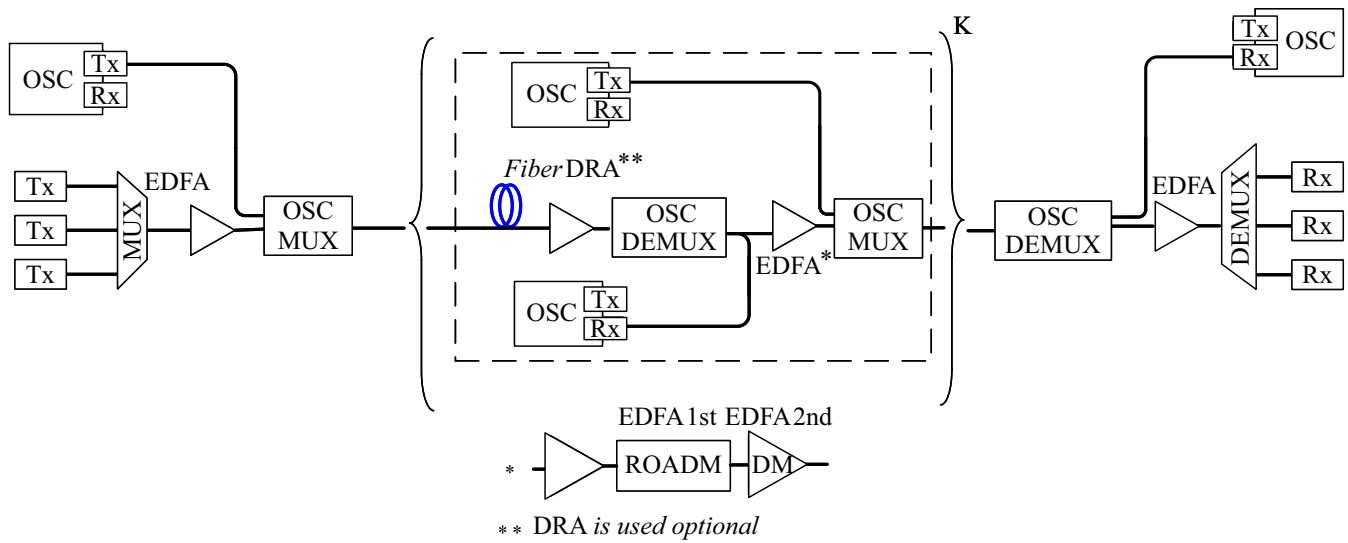
Традиционно при проектировании ВОЛС закладывают различные запасы на эксплуатацию сети. В работе [7] авторы рекомендуют закладывать запас на старение волокон  $1.6 \cdot 10^{-3}$  dB/(km·year) ( $\sim 3.2$  dB при длине пролета 100 km и сроке эксплуатации линии 20 лет). Российские

операторы связи обычно требуют, чтобы оценка качества сигнала на приеме осуществлялась с учетом величины запаса на величину суммарных потерь между усилительными узлами на кабель 3 dB для каждого участка усиления [8]. Для обозначения величины суммарных потерь между усилительными узлами далее по тексту будет использован термин бюджет пролета. Снижение величины запаса по бюджету пролета гарантированно приведет к увеличению допустимой дальности передачи, при этом понизится устойчивость к возникновению точечных потерь. Таким образом, при снижении запаса по бюджету операторы связи должны учитывать, что при этом увеличится риск возникновения аварий на ВОЛС в процессе длительной эксплуатации.

В настоящей работе проведена оценка выигрыша в дальности от использования нового типа волокна, предложена методика подбора оптимальных характеристик линейки эрбиевых усилителей, проведена оценка выигрыша от использования встроенных в усилитель мультиплексоров для ввода/вывода длины волны, на которой осуществляется передача служебной информации, а также приведены результаты оценки выигрыша в дальности безрегенерационной передачи данных от уменьшения запаса по бюджету. В разд. 1 описана модель расчета для оценки качества сигнала в многопролетных ВОЛС, работающих в нелинейных режимах, используемая в последующих разделах. В разд. 2 приведена оценка выигрыша в дальности передачи при использовании волокон G.654-C ULL по сравнению с использованием волокон G.652-D в зависимости от бюджета пролета для следующих конфигураций сигнала: 80 каналов со скоростью 100 Gbit/s с форматом модуляции DP-QPSK (80–100G DP-QPSK) в линии с EDFA, 40 каналов со скоростью 400 Gbit/s с форматом модуляции DP-16QAM (40–400G DP-16QAM) в линии с EDFA и рамановскими усилителями DRA. В разд. 3 предложена методика подбора оптимальных диапазонов усиления для линейки EDFA. В разд. 4 приведен результат оценки выигрыша от использования встроенных в EDFA WDM для ввода/вывода излучения на длине волны, на которой осуществляется передача данных по служебному каналу. В разд. 5 проведена оценка выигрыша в дальности передачи при снижении запаса, закладываемого при проектировании ВОЛС.

## 1. Описание расчета

Схема линии, используемой в расчете, приведена на рис. 1. Сформированный многоканальный сигнал проходит через несколько единообразных пролетов — участков волокна одинакового типа и длины. В промежуточных узлах между пролетами для компенсации потерь в пролетах используются EDFA. Каждый 3–5 пролетов усилительный узел также включает в себя реконфигурируемый мультиплексор ввода–вывода (ROADM Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) со встро-



**Рис. 1.** Схема расчета. Tx/Rx — передатчик/приемник сигнала, OSC—SFP модуль для передачи данных по служебному каналу, MUX/DEMUX—DWDW — мультиплексор/демультиплексор, EDFA — эрбиевый усилитель, DRA — рамановский усилитель, OSC MUX/DEMUX — мультиплексор/демультиплексор для ввода/вывода излучения на длине волны, на которой осуществляется передача служебной информации, Fiber — катушка волокна, ROADM — реконфигурируемый мультиплексор ввода–вывода со встроенными переменными аттенуаторами.

енными переменными аттенуаторами для выравнивания формы спектра сигнала и дополнительный эрбиевый усилитель для компенсации потерь на ROADM. Также дополнительно при расчете в схеме может быть использован распределенный рамановский усилитель (DRA)

При распространении сигнала вдоль ВОЛС его качество ухудшается из-за воздействия линейных (шумы усилителей, хроматическая и поляризационно-модовая дисперсии, фильтрация и т.д.) и нелинейных эффектов — фазовой самомодуляции (ФСМ), фазовой кросс-модуляции (ФКМ) и т.д. Используемые величины могут быть записаны в линейных и логарифмических единицах. Во всех приведенных ниже выражениях заглавными буквами будут обозначены величины, измеряемые в линейных единицах. Для обозначения величин, измеряемых в логарифмических единицах, будут использованы строчные буквы. Шумы спонтанной люминесценции усилителей традиционно учитываются с помощью линейного оптического отношения сигнал/шум  $osnr_L$ . Учет влияния собственных шумов отдельного EDFA и DRA на величину  $osnr_L$  проводится по формуле ниже [9]:

$$osnr_L = p_{in} - NF - hv\Delta\nu, \tag{1}$$

где  $p_{in}$  — канальная мощность сигнала,  $NF$  — шум-фактор ВОЛС,  $hv\Delta\nu$  — мощность квантового шума. Для расчета коэффициента усиления и шум-фактора встречного DRA была использована теоретическая модель встречного рамановского усилителя, основанная на скоростных уравнениях, описывающих распределение интенсивностей или мощностей вдоль оптического волокна [10]. Влияние каскада усилителей может быть

оценено по формуле:

$$\frac{1}{OSNR_L^{sum}} = \sum_i \frac{1}{OSNR_L} \tag{2}$$

Для учета деградации  $OSNR_{NL}$  была применена модель GNCF (Gaussian Noise Closed Form Formula) [11]. В качестве основного параметра для оценки качества DWDM-сигнала использовался запас по  $OSNR$   $osnr_M$  [12], оцениваемый по формуле (2):

$$osnr_M = osnr_L^{sum} - osnr_R, \tag{3}$$

где  $osnr_R$  — требуемое значение  $OSNR$  на приеме с учетом неидеальностей приемной и передающей частей (в их числе электрические шумы и ошибки квантования), влияния нелинейных эффектов, штрафов по хроматической дисперсии, фильтрации [13], а также штрафа из-за неоптимальности значения мощности сигнала на приемнике транспондера.

При расчете заданной конфигурации ВОЛС дополнительно осуществлялась оптимизация суммарной входной мощности и предперекоса сигнала на входе в пролеты. Предперекосом сигнала называется предискажение формы спектра сигнала по линейному закону. На каждом узле устанавливался EDFA с оптимальным усилением и минимальным значением шум-фактора усилительного узла. В зависимости от цели расчета выбор усилителя осуществлялся из базы FGA усилителей (разд. 2) с минимальным теоретически возможным шум-фактором или из базы VGA усилителей с оптимальными диапазонами усиления (разд. 3–5). Накачка DRA в расчете осуществлялась на четырех длинах волн — 1425, 1435, 1455 и

Таблица 1. Модельные конфигурации ВОЛС

Номер ВОЛС	Клиентская нагрузка* + формат модуляции	Бодовая скорость, Gbit/s	Число каналов	Межканальный интервал, GHz	Тип волокна	Погонное затухание, dB/km	Используемые типы усилителей
1	100G DP-QPSK DP-16QAM	33	80	90 SSMF	G.652-D	0.204	EDFA
					G.654-C ULL	0.17	
2	400G DP-16QAM	69	40	100	G.652-D SSMF	0.204	EDFA + DRA
					G.654-C ULL	0.17	

Примечание. \* клиентская нагрузка — скорость передачи клиентского трафика при использовании одного канала по оптической линии связи в Gbit/s.

1465 nm с суммарной мощностью накачки 1 W. Также были учтены потери на кроссах (по 0.5 dB) и на WDM для ввода/вывода канала, по которому осуществляется передача служебной информации (по 1 dB).

В расчетах использовались каналы С-диапазона с 21 по 60. Перечень смоделированных конфигураций приведен в табл. 1.

Результатом расчета является максимальное число пролетов  $N_{\max}$ , при котором запас по OSNR в рабочем спектральном диапазоне  $osnr_M$ , рассчитанный по формуле (4), имеет значение  $\geq 0$  dB. Используя максимальное число пролетов  $N_{\max}$ , можно посчитать регенерационную длину  $L_{\text{reg}}$ , равную произведению максимального числа пролетов на длину одного пролета  $L_{\text{span}}$ :

$$L_{\text{reg}} = L_{\text{span}} \times N_{\max}. \quad (4)$$

## 2. Оценка выигрыша в дальности при использовании волокон G.654-C ULL

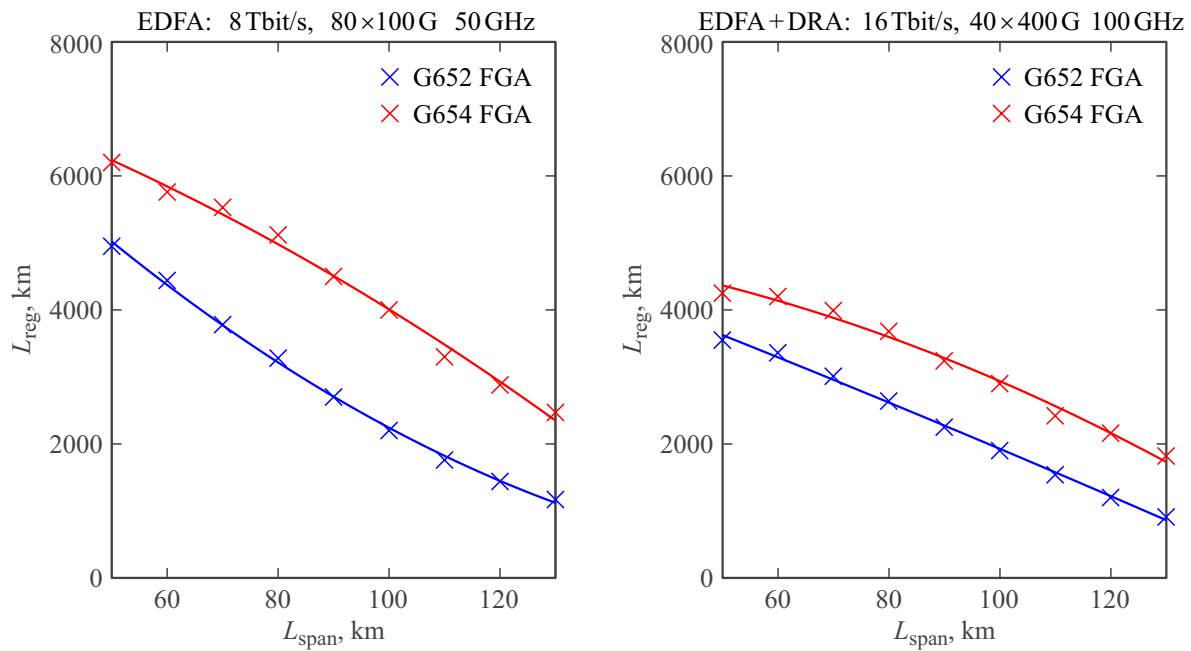
Для того чтобы оценить выигрыш от использования волокон G.654-C ULL, вместо волокон G.652-D SSMF была проведена серия численных экспериментов по оптимизации многопролетных линий связи с разными типами и количеством каналов для двух типов канальных конфигураций, описанных в табл. 1. При проведении расчетов по оценке регенерационной длины были использованы выражения (1)–(4). Во всех расчетах длина одного пролета варьировалась от 50 до 130 km. В каждый пролет дополнительно был заложен запас по затуханию в 3 dB. Расчеты были выполнены в предположении, что под каждое значение длины пролета доступен усилитель EDFA типа FGA с оптимальным коэффициентом усиления и минимальным для заданного коэффициента усиления шум-фактором. Для оценки шум-фактора был проведен сравнительный анализ значений шум-фактора для коммерчески доступных FGA-усилителей нескольких производителей. Часть данных

была взята с сайтов компаний, часть была получена из спецификаций, высланных в ответ на письменный запрос. При коэффициентах усиления более 12 dB минимальное значение шум-фактора принималось равным 5.5 dB, при меньших коэффициентах усиления значение шум-фактора принималось несколько большим. При минимальном используемом при расчете коэффициенте усиления (10 dB) шум-фактор равен 5.8 dB.

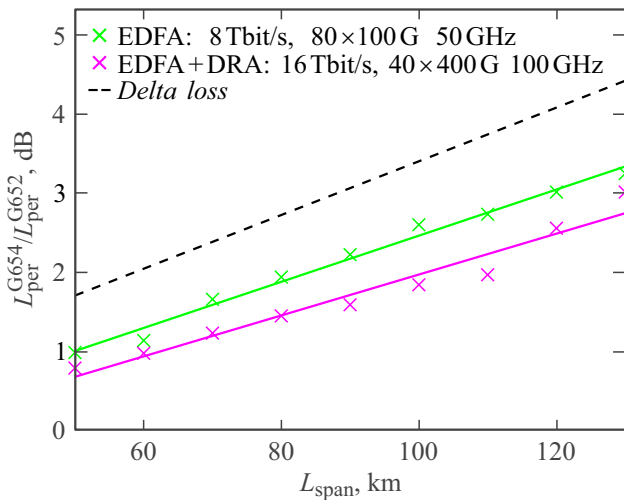
На рис. 2 приведены зависимости регенерационной длины от длины одного пролета для конфигураций, описанных в табл. 1. Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением длины пролета регенерационная длина монотонно убывает.

Для того чтобы была возможность оперативно оценивать увеличение дальности безрегенерационной передачи при замене волокна, для каждой из длин пролетов дополнительно был проведен расчет выигрыша в дальности передачи, равного отношению регенерационных длин при использовании волокон G.654-C и G.652-D в логарифмической шкале. Зависимость выигрыша в дальности безрегенерационной передачи от длины пролета приведена на рис. 3. Штриховой линией показана разница в затухании в одном пролете при использовании волокон разного типа.

Выигрыш равномерно возрастает с увеличением длины пролета. Кроме того, при всех длинах пролетов выигрыш меньше, чем разница в затухании. Это связано с тем, что разница в потерях в пролете при фиксированной длине пролета частично компенсируется за счет оптимизации значения мощности сигнала на входе в пролет. При изменении мощности изменяется воздействие на сигнал как линейных, так и нелинейных эффектов. Разница в выигрыше по регенерационной длине для конфигураций с использованием EDFA и EDFA + DRA обусловлена тем, что рамановский коэффициент усиления в волокнах G.654-C ниже, чем в волокнах G.652-D. Кроме того, в волокнах G.654-C величина погонного затухания рамановской накачки больше, чем в волокнах



**Рис. 2.** Зависимость регенерационной длины от длины пролета для конфигураций расчета, описанных в табл. 1: *a* — ВОЛС 1, *b* — ВОЛС 2.



**Рис. 3.** Зависимость выигрыша в регенерационной длине от длины пролета при использовании волокон G.654-C ULL вместо G.652-D SSMF для конфигураций расчета, описанных в табл. 1.

G.652-D. Следовательно, использование DRA в волокнах G.654-C менее эффективно, чем в волокнах G.652-D.

### 3. Оптимизация диапазонов усиления эрбиевых усилителей

Был проведен статистический анализ затуханий, вносимых в одном пролете ВОЛС. На рис. 4 приведено распределение по величине бюджета и длине пролета

для выборки из > 160 тысяч пролетов. Бюджетом пролета здесь названа величина суммарных потерь между усилительными узлами, которые включают потери в одном пролете волокна, запас на эксплуатацию (традиционно 3 dB), потери на кроссах (по 0.5 dB) и потери на ввод/вывод служебного канала (по 1 dB). На основе полученных результатов был сделан вывод, что наиболее вероятные потери в пролете составляют величину ~ 19–23 dB, а наиболее вероятная длина пролета составляет ~ 60–80 km. При этом длина пролета может принимать любое значение в интервале от 0 до 410 km.

В реальных наземных линиях связи, как отмечалось ранее, разработка оптимального FGA-усилителя, компенсирующего любые значения затухания пролета, крайне неэффективна экономически. Поэтому перед производителями DWDM-оборудования встает задача выбора оптимальных диапазонов усиления VGA-усилителей. При выборе диапазонов усиления необходимо учитывать следующее:

- максимальный коэффициент усиления EDFA, применимых для использования в многоканальных системах, составляет ~ 35 dB [9];
- диапазоны усиления усилителей должны перекрываться таким образом, чтобы обеспечивать сохранение работоспособности при уменьшении требуемого коэффициента усиления на 3 dB (запас на эксплуатацию) для всех значений бюджетов пролетов;
- требуется минимизировать общее число усилителей в линейке оборудования;
- не должно наблюдаться критического снижения дальности передачи по сравнению со случаем использования

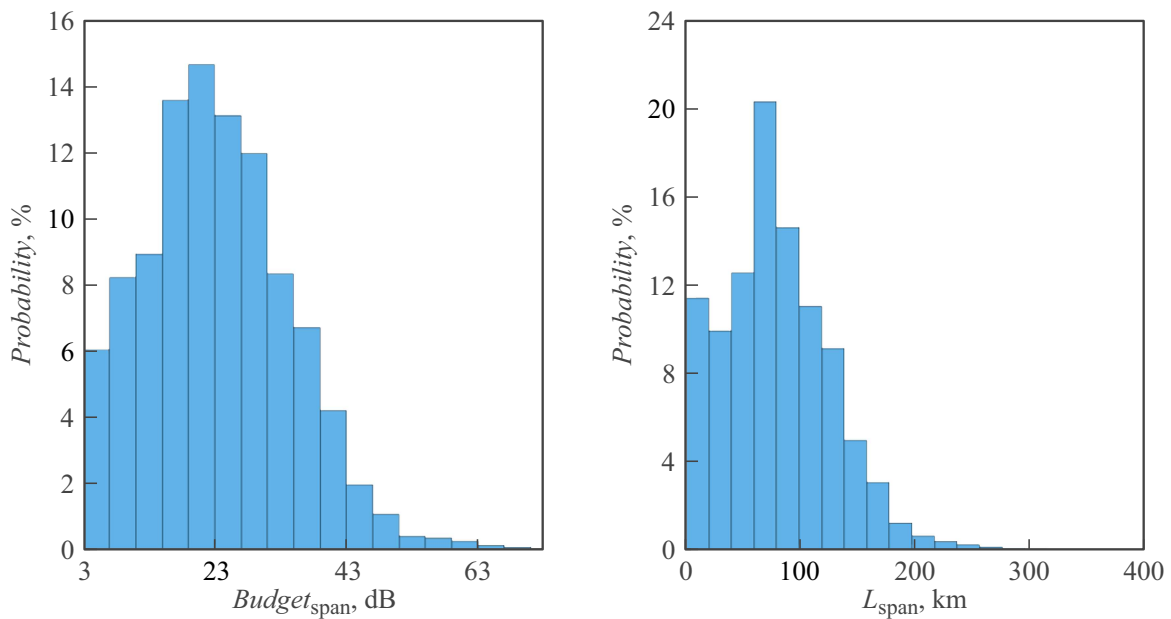


Рис. 4. Распределение по величине потерь в пролете для выборки из > 160 тысяч пролетов с учетом запаса на эксплуатацию, потерь на кроссах и потерь на ввод/вывод служебного канала.

Таблица 2. Рекомендуемые диапазоны усиления EDFA

Номер типа усилителя	Диапазон усиления, dB	Назначение
1	10–20	Максимизация дальности в линиях с большим числом пролетов с низким бюджетом
2	14–24	Минимизация шум-фактора в линиях с большим числом пролетов с длиной ~ 80 km волокна G.652-D
3	18–28	Минимизация шум-фактора в линиях с большим числом пролетов с длиной ~ 100 km G.652-D
4	25–35	Максимизация дальности в линиях, содержащих пролеты с высоким бюджетом

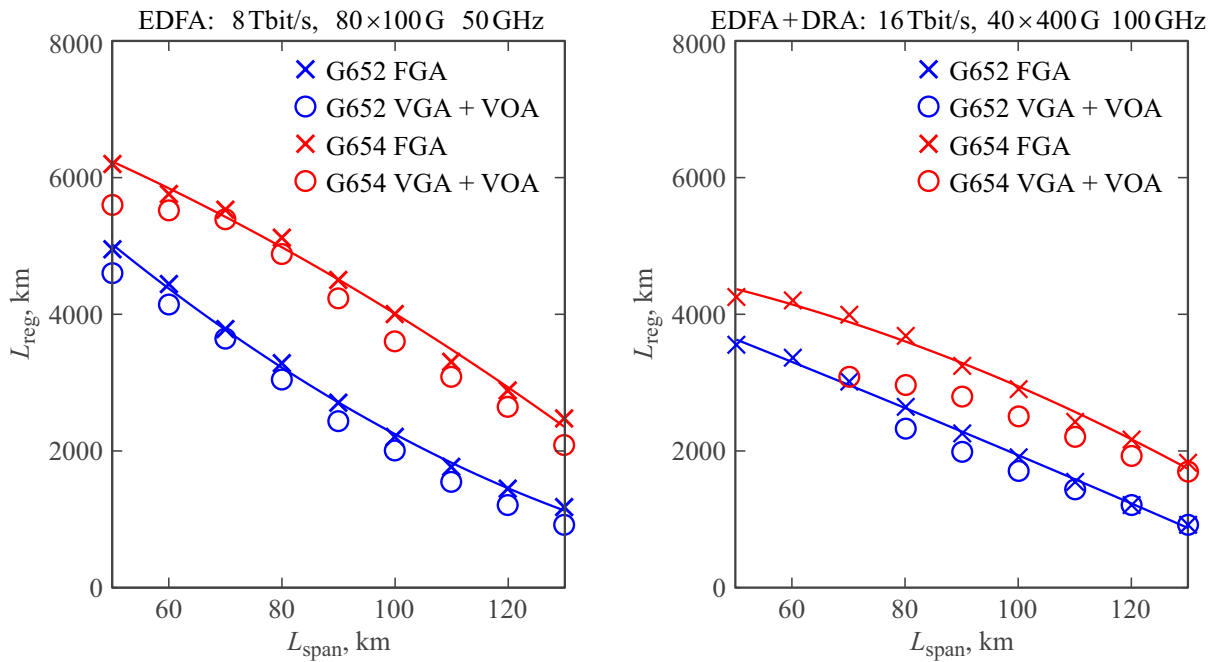
оптимальных FGA в линиях с равными пролетами, в которых для усиления используются только EDFA.

Исходя из описанных принципов, предлагается использовать диапазоны коэффициентов усиления, приведенные в табл. 2. В случае необходимости использования EDFA при бюджете пролета < 10 dB может быть использован аттенуатор на выходе из усилителя.

Для оценки того, насколько изменяется регенерационная длина при замене оптимальных FGA-усилителей на VGA, описание которых приведено в табл. 2, была проведена дополнительная серия численных экспериментов по оптимизации многопролетных линий связи. При проведении расчетов по оценке регенерационной длины были использованы выражения (1)–(4). На рис. 5 приведены зависимости регенерационной длины от длины пролета для конфигураций, описанных в табл. 1 в случае ис-

пользования идеальных FGA и усилителей с рекомендуемыми коэффициентами усиления VGA с возможностью установки переменного аттенуатора (VOA — Variable Optical Attenuator) на выходе из усилителя. Для ВОЛС 1 (табл. 1) регенерационная длина при использовании VGA-усилителей близка к идеальному случаю для обоих типов волокон.

Проигрыш в  $L_{reg}$  (регенерационной длине) не превышает 20% для длин пролетов от 50 до 130 km в линиях с равными пролетами, в которых используются только EDFA и для длин пролетов от 90 до 130 km в линиях с использованием EDFA+DRA. Сокращение числа используемых диапазонов коэффициента усиления приведет к возникновению разрыва в функции зависимости регенерационной длины от длины пролета при смене типа усилителей или к сокращению



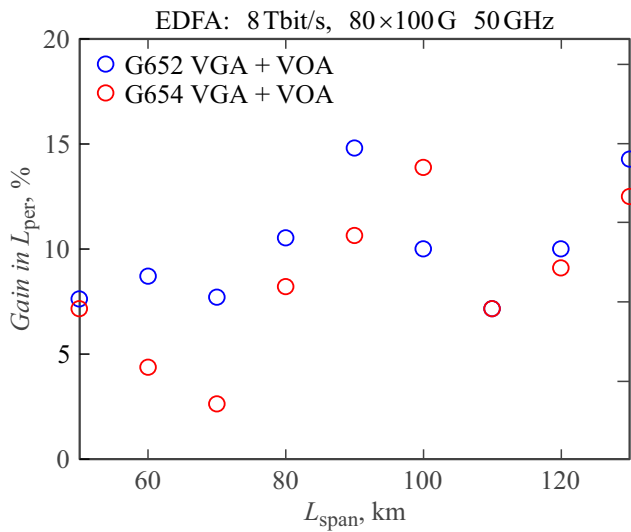
**Рис. 5.** Зависимость регенерационной длины от длины пролета для конфигураций рассчитываемых линий, описанных в табл. 1: *a* — ВОЛС 1, *b* — ВОЛС 2 при использовании различных типов усилителей.

диапазона перекрываемых бюджетов пролетов. Шум-фактор у FGA-усилителей имеет минимальное значение при максимальном коэффициенте усиления и монотонно увеличивается при уменьшении коэффициента усиления. При этом, начиная с определенного значения коэффициента усиления, это изменение крайне мало (при коэффициенте усиления более 10 dB шум-фактор изменяется менее чем на 0.1 dB при изменении коэффициента усиления на 10 dB). У конкретной модели VGA-усилителя шум-фактор также уменьшается с увеличением коэффициента усиления, однако из-за конструкторских особенностей данная зависимость существенно усиливается. Так, например, у VGA-усилителя с диапазоном перестройки коэффициента усиления от 14 до 24 dB при коэффициенте усиления 14 dB шум-фактор составляет  $\sim 10$  dB, а при 24 dB шум-фактор равен 5.5 dB. При увеличении бюджета пролета требуется повышать коэффициент усиления используемых усилителей. При некотором бюджете необходимо будет поменять тип используемых усилителей. При изменении используемого типа усилителей происходит переход от минимального значения шум-фактора  $\sim 5.5$  dB, соответствующего максимальному коэффициенту усиления для данного типа усилителей, к некоторому промежуточному значению шум-фактора. Например, при бюджете пролета 24 dB в линии будет использован усилитель второго типа (табл. 2) с максимальным коэффициентом усиления 24 dB и значением шум-фактора  $\sim 5.5$  dB. Если исключить усилитель третьего типа (табл. 2), то при бюджете пролета 25 dB в линии будет использован усилитель четвертого типа с мини-

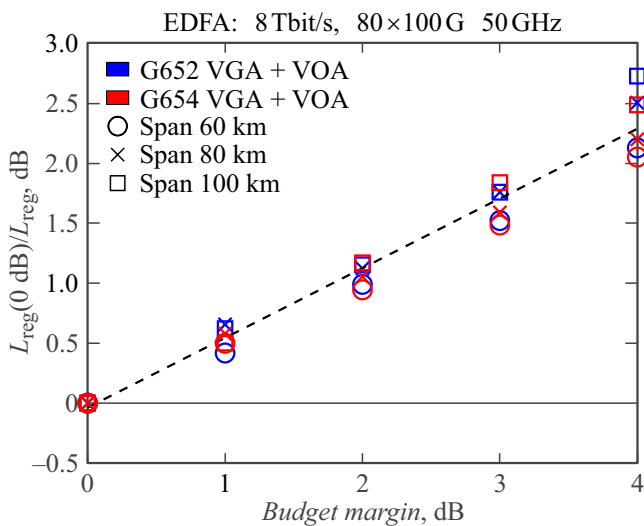
мальным коэффициентом усиления для данного типа усилителей 25 dB и значением шум-фактора  $\sim 10$  dB. Таким образом, увеличение бюджета пролета на 1 dB приведет к резкому увеличению шум-фактора и возникновению разрыва в зависимости регенерационной длины от бюджета пролета. Для ВОЛС 2 (табл. 1) использование комбинации EDFA из табл. 2 и DRA на усилительном узле возможно только с длины пролета  $\sim 80$  km.

#### 4. Использование встроенного мультиплексора служебного канала

Для оценки выигрыша от использования встроенных в EDFA мультиплексоров для ввода/вывода служебного канала была проведена серия расчетов для ВОЛС 1, описанной в табл. 1 при уменьшении потерь, закладываемых на ввод/вывод служебного канала с 1 до 0.35 dB при использовании усилителей, описанных в табл. 2. При проведении расчетов по оценке регенерационной длины были использованы выражения (1)–(4). Снижение потерь происходит за счет отказа от дополнительных оптических коннекторов, необходимых для соединения EDFA с внешними WDM. Расчеты были выполнены при использовании VGA с диапазонами усиления, подобранными в разд. 4 (табл. 2). Зависимость выигрыша от длины пролета (рис. 6) является кусочно-монотонной функцией. Изменение характера монотонности обусловлено сменой типа используемых усилителей.



**Рис. 6.** Зависимость выигрыша в регенерационной длине от длины пролета при использовании встроенных мультиплексоров ввода/вывода служебного канала для ВОЛС 1, описанной в табл. 1.



**Рис. 7.** Зависимость проигрыша в регенерационной длине от запаса, закладываемого в каждый пролет для ВОЛС 1, описанной в табл. 1.

По результатам расчетов выигрыш в регенерационной длине от использования встроенных в EDFA WDM для ввода/вывод служебного канала составляет 2.5–15%.

### 5. Снижение запаса по бюджету

Для того чтобы оценить зависимость дальности передачи от запаса по затуханию, закладываемого в каждый пролет, была проведена дополнительная серия численных экспериментов для конфигурации ВОЛС 1, описанной в табл. 1. При проведении расчетов по оценке регенерационной длины были использованы выражения

(1)–(4). Расчеты были проведены для трех значений длины пролета — 60, 80 и 100 km. При этом запас по затуханию варьировался от 0 до 4 dB. Расчеты были выполнены при использовании VGA с диапазонами усиления, подобранными в разд. 4 (табл. 2).

На рис. 7 приведены зависимости проигрыша в регенерационной длине в dB от запаса, закладываемого в каждый пролет.

С увеличением длины пролета снижение дальности при увеличении запаса по бюджету становится существеннее, при этом величина выигрыша по дальности при снижении бюджета пролета слабо зависит от типа волокна и длины пролета. Полученная зависимость позволяет оценивать выигрыш в регенерационной длине при снижении запаса. Так, при снижении запаса с 3 до 2 dB регенерационная длина увеличивается примерно на 0.6 dB, т. е. на 15%.

### Заключение

В работе исследованы различные способы увеличения дальности передачи многоканального сигнала в многопролетных ВОЛС.

На основании численной модели ВОЛС было показано, что замена волокна стандарта G.652-D SSMF на волокно G.654-C ULL обеспечивает выигрыш в дальности передачи, величина которого в логарифмической шкале линейно зависит от длины пролета. При этом в линиях с распределенными рамановскими усилителями выигрыш от замены волокон меньше из-за меньшего значения коэффициента рамановского рассеяния и большей величины затухания рамановской накачки в волокнах G.654-C. Предложена методика оптимизации диапазонов усиления EDFA, используемых в реальных линиях связи. Показано, что при использовании найденных диапазонов усиления регенерационная длина снижается не более чем на 20% в линиях с EDFA при переходе от идеальных FGA-усилителей к VGA-усилителям, используемым в реальных линиях связи. Также показано, что использование встроенных мультиплексоров ввода/вывода служебного канала позволяет увеличить дальность передачи на 2.5–15%. Проведена оценка выигрыша в регенерационной длине от снижения запаса по бюджету, закладываемому в каждый пролет при проектировании ВОЛС. Показано, что снижение запаса по бюджету с 3 до 2 dB обеспечивает выигрыш в дальности ~ 15%.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.



## Список литературы

- [1] Р.Р. Убайдуллаев, В.А. Конышев, А.В. Леонов, О.Е. Наний, М.А. Слепцов, В.Н. Трещиков. Прикладная фотоника, **3** (1), 15 (2016).
- [2] Р.Р. Убайдуллаев, И.И. Шихалиев, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, Д.Д. Старых, В.А. Конышев. Первая миля, **2**, 68 (2018).  
DOI: 10.22184/2070-8963.2018.71.2.68.72
- [3] V.A. Konyshchev, A.V. Leonov, O.E. Nanii, D.D. Sarykh, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaidullaev. Bull. Lebedev Phys. Inst., **50** (Suppl. 4), S435 (2023).  
DOI: 10.3103/S1068335623160078
- [4] I.-T. Rec.652-D. *Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable* (2017).
- [5] I.-T. Rec.654-C. *Characteristics of a cut-off Shifted Single-Mode Optical Fibre and Cable* (2020).
- [6] J. Chesnoy. *Undersea Fiber Communication Systems* (Academic press, 2015)
- [7] Y. Pointurier. J. Opt. Commun. Netw., **9** (1), A9 (2017).  
DOI: 10.1364/JOCN.9.0000A9
- [8] *Технические требования к Оборудованию DWDM для реализации проекта «Доборудование сети в интересах сторонних операторов». 2 этап*, 1 (2015)  
<https://ctp.setonline.ru/downloadppf?uuid=dbfile184h8080000kq03jvg1cmg1j6s>
- [9] В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. *DWDM-системы* (Техносфера, 2021)
- [10] И.И. Шихалиев. *Увеличение производительности одно-пролетных когерентных линий связи с рамановскими усилителями* (МФТИ, Долгопрудный, 2019)
- [11] P. Poggiolini, M. Ranjbar Zefreh, G. Bosco, F. Forghieri, S. Pisciaccia. *Accurate Non-Linearity Fully-Closed-Form Formula Based on the GN/EGN Model and Large-Data-Set Fitting*. Opt. Fiber Commun. Conf. — Opt. Soc. Am., paper M11. 4 (2019). DOI: 10.1364/OFC.2019.M11.4
- [12] V.A. Konyshchev, A.V. Leonov, O.E. Nanii, A.G. Novikov, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaidullaev. Quant. Electron., **46** (12), 1121 (2016). DOI: 10.1070/QEL16219
- [13] T.O. Bazarov, M.A. Senko, A.N. Dorozhkin, D.D. Sarykh, O.E. Nanii, V.N. Treshchikov. Laser Phys. Lett., **19** (7), 075101 (2022). DOI: 10.1088/1612-202X/ac6b45