ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Оптимизация периода расстановки эквалайзеров в многопролётных ВОЛС

М.А.Горбашова, Д.Д.Старых, О.Е.Наний, В.Н.Трещиков, И.П.Чебыкин

Изучена статистика неравномерности спектра мощности сигнала в цепочке эрбиевых усилителей EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Установлено, что учёт статистических свойств неравномерности усиления EDFA позволяет существенно увеличить точность оценки величины неравномерности спектра многоканального сигнала (на 4 дБ в цепочке из пяти EDFA). На основе анализа результатов численного моделирования различных конфигураций волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) получена оценка оптимального периода расстановки эквалайзеров. Показано, что ухудшение качества сигнала в ВОЛС, вызванное неравномерностью усиления EDFA, зависит от числа пролётов между устройствами, выравнивающими спектр сигнала, и статистических характеристик неравномерности спектра усиления используемых EDFA, но практически не зависит от числа секций выравнивания спектра, параметров сигнала и длины пролёта. На основе результатов моделирования построена модель для расчёта штрафа из-за накопленной неравномерности EDFA. Предложен алгоритм для оценки штрафа, применимый для произвольной конфигурации ВОЛС при известной статистике накопления неравномерности в EDFA.

Ключевые слова: *волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), эрбиевый волоконный усилитель (EDFA), неравномерность усиления, штраф по неравномерности, эквалайзер, оптимизация ВОЛС.*

1. Введение

В последние годы наблюдается беспрецедентный рост объёмов информации, передаваемой по волоконно-оптическим сетям связи. Эта тенденция ставит задачу постоянного увеличения производительности волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) путем максимального использования рабочей полосы многоканальных систем связи со спектральным мультиплексированием (DWDM-систем) и снижения шум-фактора усилителей, используемых в многопролётных линиях связи [1 – 3].

В DWDM-системах эффекты, приводящие к искажению формы спектра сигнала, условно могут быть разделены на две группы – случайные и детерминированные. Из случайных эффектов в линиях связи без рамановских усилителей наибольшее воздействие на спектр оказывает неравномерность усиления EDFA. Помимо случайного эффекта искажения формы спектра в EDFA, в ВОЛС присутствуют детерминированные источники перекоса спектра, такие как ВКР-перекос и неравномерность спектра затухания в телекоммуникационном волокне [4]. Искажение формы спектра приводит к ухудшению качества передаваемого сигнала. На каналы с наименьшей мощностью сигнала увеличивается влияние усиленных спонтанных шумов (Amplified Spontaneous Emission, ASE) усилителей, что может привести к недопустимому ухудшению качества передаваемого сигнала. В каналах с наибольшей мощностью сигнала возрастает влияние нелинейных эффектов, что также может привести к нарушению работы некоторых спектральных каналов [5].

Для выравнивания спектра сигнала на промежуточных участках в линиях связи устанавливают эквалайзеры. Число пролётов между эквалайзерами называют периодом расстановки эквалайзеров. Чаще всего в качестве эквалайзеров применяются реконфигурируемые мультиплексоры ввода-вывода (ROADM). Как показано в разд.3.3, в отсутствие эквалайзеров в линии связи существенно снижается предельная дальность передачи без необходимости полной регенерации сигнала.

На данный момент в мировой практике не существует оптимального способа расстановки эквалайзеров и их настройки [5 – 9]. В отдельных работах для ограниченного диапазона параметров линии и без теоретического обоснования приводились рекомендации для длинных и сверхдлинных линий связи. В работах [5 – 8] рекомендован период расстановки эквалайзеров 5 – 6 пролётов. В работе [7] для коротких линий связи период расстановки эквалайзеров предлагается снизить до трёх пролётов. В работе [9] был экспериментально подобран оптимальный период расстановки эквалайзеров в четыре пролёта. Однако оптимизация была проведена только для строго определённой конфигурации линии: 6 пролётов по 100 км для 40 каналов 100G, что делает полученные результаты не применимыми для ВОЛС произвольного состава и длины. В работе [5] проведено численное исследование оптимального периода расстановки эквалайзеров для

М.А.Горбашова, И.П.Чебыкин. ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, Краснобогатырская ул., 44, стр. 1, офис 826; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; email: gorbashova@t8.ru
Д.Д.Старых. ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, Краснобогатырская ул., 44, стр. 1, офис 826
О.Е.Наний. ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, Краснобогатырская ул., 44, стр. 1, офис 826; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2
В.Н.Трещиков. ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, Краснобогатырская ул., 44, стр. 1, офис 826; ООО «Т8», Россия, 107076 Москва, Краснобогатырская ул., 44, стр. 1, офис 826

Поступила в редакцию 5 декабря 2022 г., после доработки – 1 марта 2023 г.

другой конфигурации линии – с пролётами длинной 80 км и с модельным EDFA. Однако не было учтено влияние фильтрации на эквалайзерах, а оптимальный профиль входного сигнала в линию специально подбирался под используемый модельный спектр усиления EDFA, который сильно отличается от реального. Такой подход не позволил сформулировать общие рекомендации для проектирования линий связей.

Кроме того, при проектировании ВОЛС чаще всего оптимизируется не качество передачи, а стоимость проекта в целом. Таким образом, нужно подобрать минимальное число эквалайзеров, при котором линия ещё останется работоспособной. Поэтому желательно иметь инструмент, позволяющий оценивать ухудшение качества сигнала, обусловленное неоптимальной расстановкой эквалайзеров. Для описания ухудшения качества сигнала, обусловленного воздействием отдельного эффекта, принято использовать термин «штраф». Штрафом называют величину, на которую изменяется количественная оценка качества сигнала при добавлении рассматриваемого эффекта. Для оценки влияния неравномерности на качество передаваемого сигнала требуется проведение экспериментальных и численных исследований. Используемые величины могут быть записаны в линейных и логарифмических единицах. Во всех приведённых ниже выражениях прописными буквами обозначены величины, измеряемые в линейных единицах. Для обозначения величин, измеряемых в логарифмических единицах, используются строчные буквы. В работе [10] был проведён анализ влияния неравномерности спектра усиления на качество передаваемого сигнала. Авторами была выполнена оценка величины штрафа по отношению сигнал/шум с учётом влияния только линейных эффектов искажения сигнала ($OSNR_{\rm lin}$) в зависимости от числа EDFA в цепочке, но не было учтено влияние неравномерности на нелинейную составляющую ($OSNR_{\rm nl}$). В работе [7] показано, что при периоде расстановки эквалайзеров ~5 пролётов штраф, вызванный только неравномерностью спектра усиления EDFA, составляет ~1 дБ. Отметим, что данный вывод сделан на основании численного эксперимента с выборкой всего из четырёх EDFA. Такая же величина штрафа (~1 дБ) была получена при использовании методов машинного обучения для сети Deutsche Telekom [7]. Согласно оценке, приведённой в работе [5], после 5 пролётов штраф составляет 0.4 дБ. Однако при оценке не были использованы реальные спектры усиления EDFA (форма спектра усиления EDFA принималась за синусоидальную). Приведённые выше методы не позволяют выполнить оценку оптимального периода расстановки эквалайзеров и рассчитать штраф от неравномерности для произвольной ВОЛС.

Штраф, вызванный неравномерностью, дополнительно может быть уменьшен за счёт применения нелинейного профиля сигнала на выходе из эквалайзеров в соответствии со спектральными характеристиками используемых EDFA [5, 11, 12]. Однако для этого необходима возможность мониторинга спектра сигнала (мониторинг канальных мощностей и $OSNR_{\rm lin}$) в точках установки эквалайзеров. Алгоритмы уменьшения штрафа от неравномерности в рамках данной работы не обсуждаются.

В настоящей работе проведён анализ накопления неравномерности EDFA в ВОЛС и выполнена оценка влияния неравномерности на качество сигнала. В разд.2 описано исследование накопления неравномерности в цепочке EDFA. На основании экспериментальной базы спектров усиления EDFA получены выражения для оценки неравномерности спектра сигнала после каскада EDFA. В разд.3 приведена оценка влияния неравномерности EDFA на качество сигнала при различных потерях в пролётах. Расчёты проводились для следующих конфигураций сигнала: 40 каналов со скоростью 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK (40×100G DP-QPSK), 80 каналов со скоростью 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK (80×100G DP-QPSK), 40 каналов со скоростью 400 Гбит/с с форматом модуляции DP-16QAM (40×400G DP-16QAM) в линиях с равными пролётами. В качестве параметра оценки качества сигнала был выбран запас по *OSNR*, рассчитываемый по формуле

$$osnr_{\rm m} = osnr_{\rm lin} - osnr_{\rm r}, \qquad (1)$$

где $osnr_{\rm r}$ – требуемое значение *OSNR* на приёме с учётом влияния нелинейных эффектов и штрафов по хроматической дисперсии, фильтрации [13], а также штрафа из-за неоптимальности значения мощности сигнала на приёмнике транспондера.

В результате получена оценка оптимального расстояния между эквалайзерами и построена модель для расчёта штрафа из-за накопленной неравномерности EDFA. Также предложен алгоритм для оценки штрафа, применимый для произвольной конфигурации ВОЛС, при заданной статистике неравномерности EDFA.

2. Влияние неравномерности EDFA на форму спектра сигнала

2.1. Описание спектра группового DWDM-сигнала

Мощности каналов широкополосного DWDM-сигнала в общем случае не одинаковы, а огибающая его спектра описывается некоторой функцией. Для описания интегральных характеристик спектра DWDM-сигнала наряду с его полной (или средней канальной) мощностью используются перекос и неравномерность спектра (рис.1).

Перекосом спектра (*Tilt*) называют линейный тренд канальной мощности (рис.1,*а*), а неравномерностью (*Ripple*) – отклонение спектра сигнала от линейной аппроксимации (рис.1,*б*). Для характеристики неровности спектра сигнала также может применяться значение $Ripple_{\rm peak\text{-}to\text{-}peak}$, равное разности максимальной и минимальной канальных мощностей; именно $Ripple_{\rm peak\text{-}to\text{-}peak}$ (сокращённо $Ripple_{\rm ptp}$) мы будем использовать для характеристики неравномерности спектра EDFA, т.к. данная величина позволяет учесть влияние не только неравномерности, но и перекоса, вносимых EDFA.

$Ripple_{\rm ptp}$ спектра усиления эрбиевого волокна при определённых значениях мощности входного сигнала может достигать 10 дБ. Поэтому производители широкополосных EDFA обычно устанавливают выравнивающие фильтры (GFF, Gain Flattering Filter) внутри усилительных модулей. Форма спектра идеального GFF должна быть обратной спектру усиления эрбиевого волокна. Технологии изготовления фильтров не позволяют изготавливать GFF под каждый отдельный EDFA, поэтому итоговое значение $Ripple_{\rm ptp}$ EDFA с GFF является случайной величиной [10, 14].

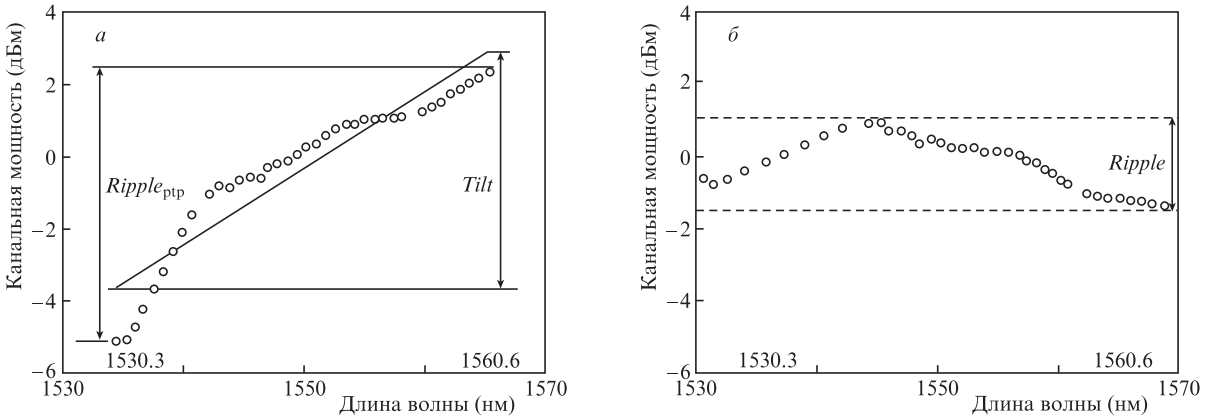

Рис.1. Спектр DWDM-сигнала в произвольной точке линии связи до вычета (*а*) и после вычета (*б*) линейного перекоса.

2.2. Статистический анализ накопления неравномерности

При статистических исследованиях $Ripple_{\text{ptp}}$ DWDM-сигнала в многопролётных ВОЛС требуется анализ большого числа спектров усиления (зависимостей $G(\lambda)$) EDFA. Экспериментально нами было получено более 2500 спектров, соответствующих ~500 различных EDFA. В табл.1 приведено соответствие числа исследуемых EDFA их техническим характеристикам, которые определяют тип усилителя. Для каждого EDFA спектры усиления были измерены в нескольких режимах – при разных значениях входной мощности оптического сигнала и коэффициента усиления. Из экспериментально полученных спектров усиления для каждого EDFA был отобран спектр с максимальным значением $Ripple_{\text{ptp}}$.

Табл.1. Характеристики исследуемых EDFA.

Диапазон коэффициента усиления (дБ)	Максимальная выходная мощность (дБм)	Число исследуемых усилителей
11–18	16	71
14–24	16	65
11–18	20	113
18	23	108
14–24	23	110
20–35	23	51

При фиксированном числе EDFA в цепочке, равном k, объём выборки $Ripple_{\text{ptp}}$ равен числу сочетаний C_n^k, где n – число усилителей в выборке. Оказалось, что при фиксированном числе EDFA в линии $Ripple_{\text{ptp}}$ является случайной величиной, распределение которой можно описать одной из двух стандартных функций – распределением Гаусса или распределением Максвелла. Такой подход позволяет оценивать величину $Ripple_{\text{ptp}}$ после фиксированного числа EDFA с заданной вероятностью. Поскольку однотипные EDFA имеют схожие спектры, в случае установки таких EDFA в одной линии вероятность того, что длины волн максимумов и минимумов усиления совпадут, максимальна. Поэтому расчёт $Ripple_{\text{ptp}}$ линии, содержащей только однотипные EDFA, даёт консервативную оценку. Стоит отметить, что в реальных линиях связи пролёты чаще всего различаются по длине, что требует применения разнотипных EDFA.

Для линейки EDFA из анализа экспериментально измеренных спектров (~500) были получены эмпирические функции плотности вероятности в зависимости от $Ripple_{\text{ptp}}$ при различном числе EDFA в каскаде. Оказалось, что статистику накопления неравномерности для EDFA из группы А (EDFA с коэффициентом усиления G = 11–24 дБ) можно описать распределением Максвелла с коэффициентами, зависящими от числа EDFA N в цепочке, следующим образом:

$$PDF(Ripple_{\text{ptp}}) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times (Ripple_{\text{ptp}} - b)^2 \exp\left(-\frac{(Ripple_{\text{ptp}} - b)^2}{2a^2}\right)\frac{1}{a^3}, \qquad (2)$$

$$a = 0.13 \cdot N + 0.21,$$

$$b = 0.35 \cdot N - 0.15.$$

При использовании в линиях связи EDFA из группы Б (EDFA с коэффициентом усиления G = 20–35 дБ) статистика накопления $Ripple_{\text{ptp}}$ аппроксимируется распределением Гаусса:

$$PDF(Ripple_{\text{ptp}}) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Ripple_{\text{ptp}} - b}{a}\right)^2\right], \qquad (3)$$

$$a = -3.62 \times 10^{-3} \cdot N^2 + 0.095 \cdot N + 0.14,$$

$$b = 0.87 \cdot N + 0.12.$$

В случае, когда в линии используется не более 40% EDFA из группы Б, для оценки всё ещё применимо распределение (2), если доля EDFA из группы Б превышает 40%, то следует использовать распределение (3).

Распределения (2) и (3) для фиксированного числа EDFA позволяют определить граничную величину неравномерности, определённую так, что с заданной вероятностью неравномерность спектра случайной выборки EDFA не превышает граничную величину неравномерности. Для определённости в качестве статистической характеристики неравномерности в дальнейшем будем использовать граничное значение $Ripple_{\text{ptp}}$, меньше которого окажется 95% результатов расчёта. Такое значение неравномерности назовём 95-м процентилем и обозначим как $Ripple_{\text{ptp}}^{95}$. Проведённые исследования показали, что в цепочке из EDFA группы А в среднем один эрбиевый усилитель увеличивает значение 95-го процентиля $Ripple_{\text{ptp}}$ на 0.7 дБ. Тогда

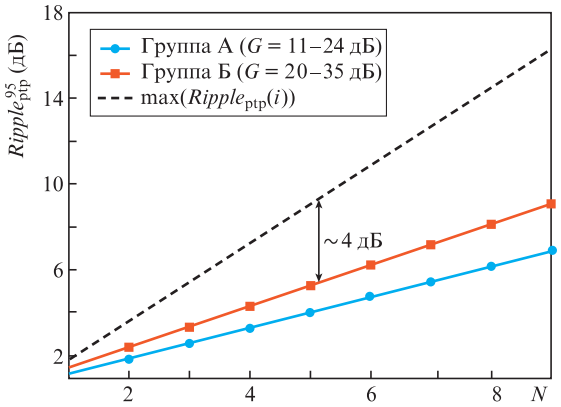

Рис.2. Зависимость 95-го процентиля неравномерности от числа EDFA в цепочке.

$$Ripple^{95}_{ptp} = 0.7 \cdot N + 0.4. \quad (4)$$

При использовании в линии только EDFA из группы Б один EDFA увеличивает значение 95-го процентиля на 1.0 дБ, т. е.

$$Ripple^{95}_{ptp} = 1.0 \cdot N + 0.5. \quad (5)$$

Зависимости $Ripple^{95}_{ptp}$ от числа EDFA в цепочке приведены на рис.2. Штриховой линией показана консервативная оценка неравномерности $N \cdot \max(Ripple_{ptp}(i))$, при которой предполагается, что все используемые EDFA имеют худшее возможное значение неравномерности, при этом максимумы и минимумы спектров усиления у EDFA в цепочке совпадают. Из рис.2 видно, что приведённая выше методика позволяет существенно увеличить точность оценки неравномерности. При расстановке эквалайзеров с периодом 5 пролётов оценочное значение неравномерности оказалось в два раза меньше, чем при консервативной оценке.

3. Влияние накопленной неравномерности на качество сигнала в ВОЛС

Ниже предлагается методика для оценки оптимального периода расстановки эквалайзеров и влияния неравномерности группового спектра на качество передаваемого оптического сигнала.

3.1. Референсные типы линий (канальные конфигурации)

Для оценки влияния неравномерности была проведена серия численных экспериментов по оптимизации многопролётных линий связи с разными типами и числом каналов, а также с разными длинами пролётов. В качестве клиентской нагрузки были выбраны наиболее популярные на данный момент форматы передачи. В расчётах использовались каналы С-диапазона с 21 по 60. Полный перечень смоделированных конфигураций приведён в табл.2. Отметим также, что пролёты характеризуются не только длиной волокна, но и суммарным затуханием между усилительными узлами, которое принято называть бюджетом пролёта. Далее будут приведены основные выражения, используемые для оценки качества сигнала в ВОЛС.

3.2. Описание расчёта

Схема линии связи, используемая в расчёте, приведена на рис.3.

При распространении сигнала вдоль ВОЛС его качество ухудшается из-за воздействия линейных (шумы усилителей, хроматическая и поляризационно-модовая дисперсии, фильтрация) и нелинейных (например, фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция) эффектов. Для учёта влияния собственных шумов EDFA на величину $osnr_{lin}$ было использовано выражение

$$osnr_{lin} = p_{in} - NF - h\nu\Delta\nu, \quad (6)$$

где p_{in} – канальная мощность сигнала; NF – шум-фактор ВОЛС; $h\nu\Delta\nu$ – мощность квантового шума, выраженная в дБм. Значение NF рассчитывалось из шум-факторов отдельных элементов по формуле Фрииса. Для учёта деградации $OSNR_{nl}$ была применена модель GNCFF (Gaussian Noise Closed Form Formula) [15]. Для количественной характеристики качества DWDM-сигнала мы использовали запас по $OSNR$, оцениваемый по формуле (1).

При расчёте заданной ВОЛС (см. табл.2) дополнительно осуществлялась оптимизация суммарной входной мощности и предперекоса сигнала на выходе из мультиплексора/эквалайзера при плоском спектре усиления EDFA, т. к. при проектировании заранее неизвестна форма спектров усилителей, которые будут использоваться в

Табл.2. Модельные конфигурации ВОЛС.

ВОЛС	Клиентская нагрузка* и формат модуляции	Бодовая скорость (Гбод)	Число каналов	Межканальный интервал (ГГц)	Тип волокна	Бюджет пролётов (дБ)	Число пролётов
1. Короткая линия без фильтрации	400G DP-16QAM	65	40	100	SMF-28	19 23 27	18 10 4
2. Длинная линия без фильтрации	100G DP-QPSK	69	40	100	SMF-28	19 23 27	160 86 40
3. Длинная линия с фильтрацией	100G DP-QPSK	32	80	50	SMF-28	19 23 27	74 40 17

* Клиентская нагрузка – скорость передачи клиентского трафика при использовании одного канала по оптической линии связи в Гбит/с.

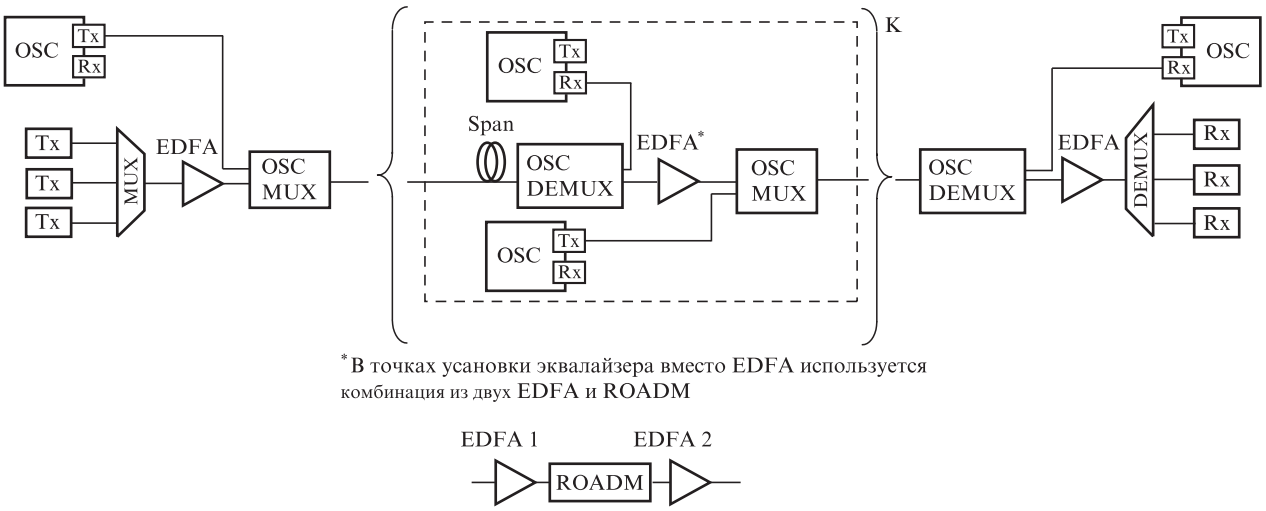

Рис.3. Схема ВОЛС, используемая в в расчёте: Tx/Rx – передатчик/приёмник сигнала; OSC – SFP-модуль для передачи служебного канала; MUX/DEMUX – DWDW-мультиплексор/демультиплексор; EDFA – эрбиевый усилитель; OSC MUX/DEMUX – мультиплексор/демультиплексор служебного канала; Span – катушка волокна SMF-28; ROADM – реконфигурируемый мультиплексор ввода-вывода с встроенными переменными аттенюаторами; K – число пролётов.

реальной ВОЛС. Также на каждом узле была выполнена оптимизация выбора EDFA. Критерием являлась минимизация значения шум-фактора усилительного узла. При расчёте дополнительно варьировалась частота установки эквалайзеров.

3.3. Влияние искажения формы спектра группового сигнала на дальность передачи

Для исследования влияния эффектов, приводящих к искажению формы группового сигнала на дальность передачи, была проведена серия расчётов для канальной конфигурации 100G 40 каналов (табл.2, ВОЛС 2) с бюджетом пролёта 23 дБ (~80 км SMF-волокна). В результате расчётов были найдены значения предельной дальности передачи сигнала при учёте различных комбинаций искажающих спектр эффектов. Для рассматриваемой конфигурации сигнала в отсутствие эквалайзеров искажение формы спектра группового сигнала, вызванное только перекосом сигнала в волокне, привело к снижению дальности передачи на 85% (с 8240 до 1200 км) по сравнению с расчётом, выполненным без учёта искажений формы спектра. При отдельном учёте влияния неравномерности EDFA дальность передачи снизилась на 70% (с 8240 до 2480 км). Учёт обоих эффектов искажения формы группового сигнала привел к снижению дальности передачи на 88% (с 8240 до 960 км). Однако установка эквалайзеров (каждые 4 пролёта) позволила существенно увеличить дальность безрегенерационной передачи (с 960 до 6800 км) и приблизиться к идеальному модельному случаю (дальность передачи на 17.5% меньше, чем в отсутствие искажений).

3.4. Оптимальная расстановка эквалайзеров и оценка штрафа по неравномерности

Для оценки оптимального периода расстановки оборудования для эквалайзинга и штрафа, вызванного накоплением неравномерности сигнала в ВОЛС, была выполнена серия численных экспериментов.

1. Для каждой конфигурации из табл.2 проведено две серии расчётов при периодах расстановки эквалайзеров от 1 до 10 пролётов:

– с ровным спектром EDFA;

– со случайно выбранным (из базы экспериментальных спектров) спектром EDFA на каждом пролёте; таких расчётов сделано 1000 для каждой конфигурации ВОЛС.

2. Для оценки запаса в конце линии использовалось худшее по спектру значение $osnr_{\mathrm{m\,worst}} = \min(osnr_{\mathrm{m}}(\lambda))$.

3. Для каждого расчёта вычислялась разница между $osnr_{\mathrm{m}}(\lambda)$ в конце линии при расчёте с экспериментальными и плоскими спектрами EDFA. Таким образом, для каждого расчёта с экспериментальным спектром EDFA были получены зависимости штрафа по $osnr$, обусловленного неравномерностью спектра усиления EDFA, от длины волны, $pen(\lambda)$.

4. Для консервативной оценки штрафа каждому расчёту с экспериментальными спектрами EDFA в соответствие было поставлено одно значение штрафа – максимальное по спектру, $pen_{\max} = \max(pen(\lambda))$.

5. Также для каждого расчёта посчитан штраф по наихудшему каналу $pen_{\mathrm{worst\,ch}}$, равный разнице между $osnr_{\mathrm{m\,worst}}$ при расчёте с плоскими и экспериментальными спектрами EDFA.

6. На базе выборки из 1000 значений $osnr_{\mathrm{m\,worst}}$, $pen_{\max}$ и $pen_{\mathrm{worst\,ch}}$ получены статистические распределения для каждой величины, по которым посчитаны значения 95-го процентиля ($osnr^{95}_{\mathrm{m\,worst}}$, $pen^{95}_{\max}$ и $pen^{95}_{\mathrm{worst\,ch}}$) для каждой конфигурации ВОЛС.

7. Получены зависимости $osnr^{95}_{\mathrm{m\,worst}}$, $pen^{95}_{\max}$ и $pen^{95}_{\mathrm{worst\,ch}}$ от периода расстановки эквалайзеров T_{eq} (рис.4, 5).

На рис.4 видно, что с увеличением бюджета пролёта значение оптимального периода расстановки эквалайзеров уменьшается. Для всех рассчитанных конфигураций при малом бюджете пролётов (19 дБ) оптимальным с точки зрения максимизации запаса $osnr^{95}_{\mathrm{m\,worst}}$ является период расстановки эквалайзеров 3–7 пролётов. При бюджете пролётов в 23 дБ оптимальный период расстановки эквалайзеров составляет 2–6 пролётов. В линиях с пролётами с большим бюджетом (27 дБ) запас $osnr^{95}_{\mathrm{m\,worst}}$ резко умень-

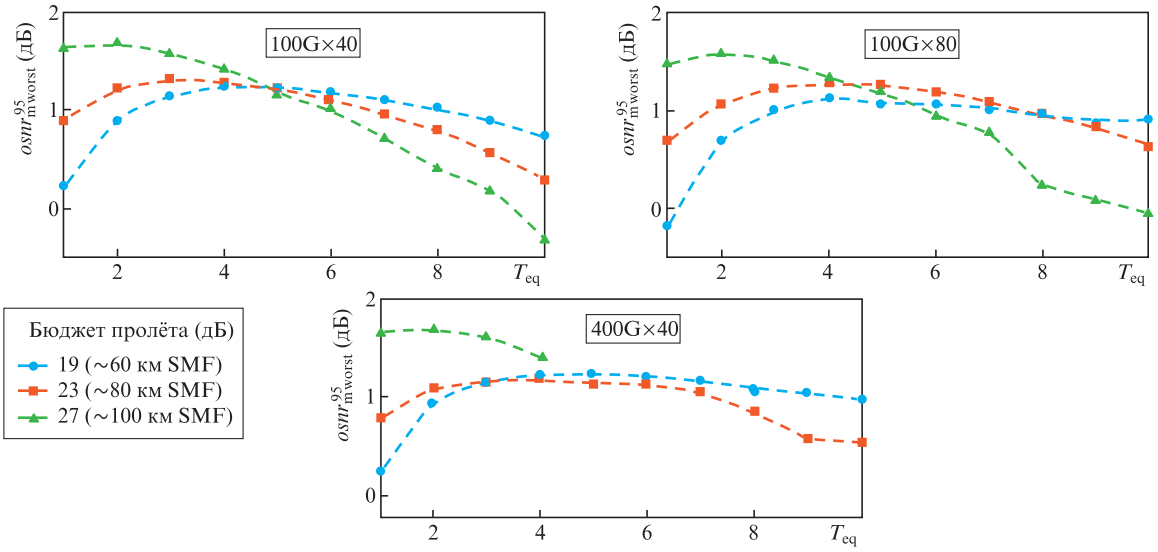

Рис.4. Зависимость 95-го процентиля $osnr_{\mathrm{mworst}}$ от периода расстановки эквалайзеров.

шается с увеличением T_{eq}, поэтому для максимизации $osnr^{95}_{\mathrm{mworst}}$ необходимо увеличивать частоту расстановки эквалайзеров до 1–3 пролётов. Различие в тенденциях связано с воздействием нескольких эффектов. Во-первых, в линиях с пролётами с большим бюджетом оптимальная мощность сигнала на входе в пролёт выше, чем в линиях с малым бюджетом, что приводит к большему ВКР-перекосу. Во-вторых, влияние оказывает неравномерность спектра затухания волокна. Кроме того, в ВОЛС с бюджетом пролёта 19 и 23 дБ для восстановления уровня мощности оптического сигнала использовались EDFA из группы А, а в ВОЛС с бюджетом пролёта 27 дБ требуется использовать EDFA из группы Б, что приводит к более быстрому накоплению неравномерности группового сигнала (см. разд.2.2).

На рис.5,*а* приведены зависимости $pen^{95}_{\max}$ от периода расстановки эквалайзеров для разных канальных конфигураций. Интересным результатом оказалось то, что величина штрафа $pen^{95}_{\max}$ зависит от статистики накопления неравномерности используемых EDFA и от числа пролётов между выравнивающими элементами, но слабо зависит от числа секций выравнивания при фиксированном периоде расстановки эквалайзеров, типа трафика и длины пролёта. При детальном рассмотрении видно, что штраф по запасу связан в первую очередь с линейными эффектами, т.е. с уменьшением отдельных канальных мощностей. Данная величина может быть использована для оценки величины штрафа при произвольной конфигурации линии связи:

– для ВОЛС с бюджетом пролёта 19 и 23 дБ

$$pen^{95}_{\max}(T_{\mathrm{eq}}) = 9.33\times10^{-3}(T_{\mathrm{eq}}-1)^2 + 7.2\times10^{-3}(T_{\mathrm{eq}}-1) + 1.02\times10^{-1}; \quad (7)$$

– для ВОЛС с бюджетом пролёта 27 дБ

$$pen^{95}_{\max}(T_{\mathrm{eq}}) = 9.33\times10^{-3}(T_{\mathrm{eq}}-1)^2 + 1.35\times10^{-1}(T_{\mathrm{eq}}-1) + 2.17\times10^{-2}. \quad (8)$$

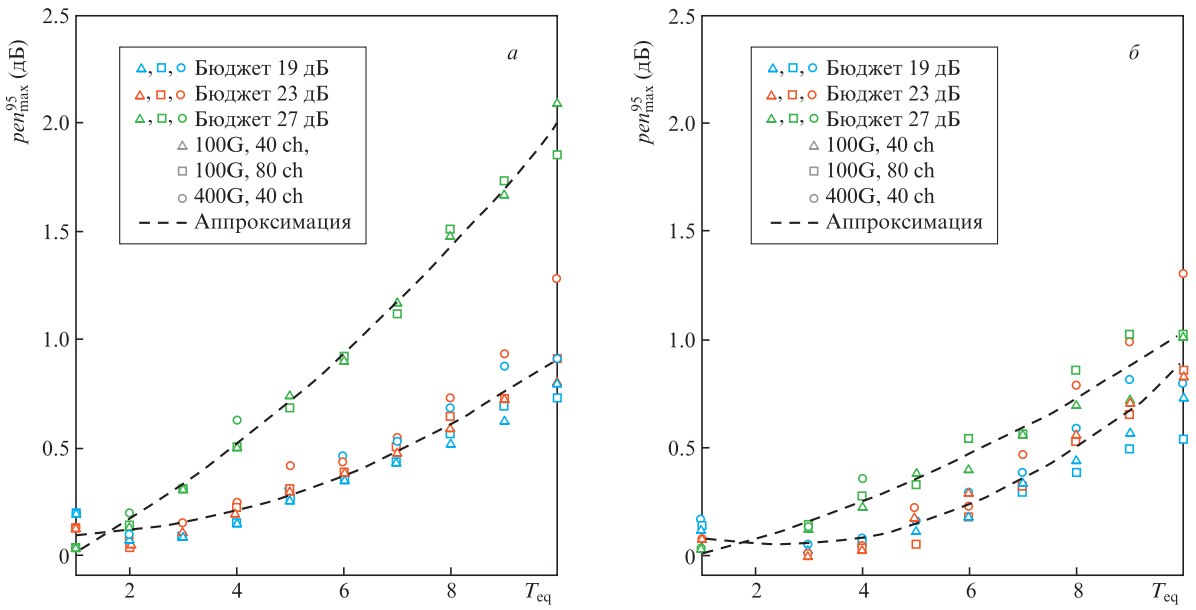

Рис.5. Зависимость штрафа от периода расстановки эквалайзеров.

Величина штрафа по наихудшему каналу $pen^{95}_{\text{worst ch}}$ так же, как и $pen^{95}_{\max}$, зависит от статистики накопления неравномерности используемых EDFA и числа пролётов между эквалайзерами. При этом значение штрафа по наихудшему каналу всегда меньше или равно максимальному по спектру штрафу (исключения на рис.5 объясняются погрешностью в аппроксимации распределений). При периоде T_{eq}, равном 5 пролётам, максимальный по спектру штраф $pen^{95}_{\max}$ составляет менее 0.8 дБ (рис.5,*а*). Как видно из рис.5,*б*, при том же периоде расстановки эквалайзеров штраф по наихудшему каналу $pen^{95}_{\text{worst ch}}$ составляет менее 0.5 дБ. Таким образом, оценка штрафа, выполненная при помощи выражений (7) и (8), является консервативной. Кроме того, зависимость $pen^{95}_{\max}$ от T_{eq} лучше поддаётся аппроксимации, поэтому для оценки штрафа предпочтительнее использовать именно её.

Для обоснования слабой зависимости штрафа от числа секций выравнивания для заданного канала рассмотрим произвольную линию связи, содержащую N таких секций. В случае, когда все EDFA имеют ровный спектр, в линейных единицах формула обратных $OSNR$ для ВОЛС может быть записана следующим образом:

$$\frac{1}{OSNR_{\text{sum_no_ripple}}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \cdots + \frac{1}{OSNR_N}, \quad (9)$$

где $OSNR_i$ – $OSNR$ i-й секции выравнивания спектра.

Предположим, что при учёте неравномерности спектра EDFA $OSNR$ сигнала на каждой секции выравнивания уменьшается в PEN раз, тогда

$$\begin{aligned}\frac{1}{OSNR_{\text{sum}}} &= \frac{PEN}{OSNR_1} + \frac{PEN}{OSNR_2} + \cdots + \frac{PEN}{OSNR_N} \\ &= PEN\left(\frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \cdots + \frac{1}{OSNR_N}\right) \\ &= PEN\frac{1}{OSNR_{\text{sum_no_ripple}}}. \quad (10)\end{aligned}$$

После перевода (10) из линейных единиц в логарифмические получаем

$$osnr_{\text{sum}} = osnr_{\text{sum_no_ripple}} - pen. \quad (11)$$

Из (11) следует, что штраф, вызванный неравномерностью EDFA, для заданного канала не зависит от числа секций выравнивания спектра при условии, что каждая секция вносит одинаковый штраф для данного канала. В реальных ВОЛС в каждой секции выравнивания штраф является статистической величиной. Для того чтобы суммарный штраф по неравномерности в ВОЛС оказался равным максимальному значению штрафа для отдельно взятой секции, необходимо, чтобы значение штрафа в каждой секции выравнивания было максимальным. С увеличением числа секций выравнивания вероятность данного события уменьшается. Таким образом, в линиях, содержащих только одну секцию выравнивания, штраф будет иметь наибольшее значение.

4. Заключение

Исследовано влияние неравномерности усиления EDFA на качество сигнала в многопролётной ВОЛС.

На основе базы экспериментальных спектров усиления EDFA (~2500) разработана модель накопления неравномерности сигнала для цепочки EDFA. Выявлены статистические законы накопления неравномерности. Установлено, что учёт статистических свойств EDFA позволяет увеличить точность оценки значения неравномерности каскада EDFA (на 4 дБ для цепочки из пяти EDFA).

Проведена серия расчётов различных конфигураций ВОЛС для оценки влияния неравномерности усиления на качество сигнала. Показано, что при увеличении бюджета пролёта уменьшается оптимальный период расстановки эквалайзеров. При малом бюджете пролётов (19 дБ) оптимальным является период расстановки эквалайзеров в 3–7 пролётов. При бюджете пролётов в 23 дБ оптимальный период расстановки эквалайзеров составляет 2–6 пролётов. При увеличении бюджета пролётов до 27 дБ для сохранения качества сигнала необходимо уменьшить период расстановки эквалайзеров до 1–3 пролётов (рис.4). Также установлено, что штраф, обусловленный неравномерностью EDFA, зависит от статистики накопления неравномерности используемых EDFA и числа пролётов между выравнивающими элементами и слабо зависит от числа секций выравнивания при фиксированном периоде расстановки эквалайзеров, параметров сигнала и длины пролёта (рис.5). Получены выражения для оценки штрафа, вызванного неравномерностью усиления EDFA, в зависимости от периода расстановки эквалайзеров. Используемый подход к оценке величины штрафа от неравномерности может быть применен для произвольной конфигурации ВОЛС и заданной базы спектров усиления EDFA.

1. Конышев В.А. и др. *Прикладная фотоника*, **3** (1), 15 (2016).
2. Шихалиев И.И. и др. *Первая миля*, № 2, 68 (2018).
3. Леонов А.В. и др. *Прикладная фотоника*, **3** (2), 123 (2016).
4. Капин Ю.А. и др. *Квантовая электроника*, **42** (9), 818 (2012) [*Quantum Electron*., **42** (9), 818 (2012)].
5. Savory S.J. et al. *J. Opt. Commun. Networking*, **11** (10), 76 (2019).
6. Jones G.L. Doct. diss. (London, University College, 2013).
7. Mahajan A. et al. *J. Lightwave Technol*., **38** (9), 2616 (2020).
8. Pastorelli R. et al. *Proc. ECOC 2012* (Amsterdam, 2012, paper We.2.C.2).
9. Chen Y. et al. *2002 IEEE/LEOS Summer Topi All-Optical Networking* (Mont Tremblant, Canada, 2002, paper MD3-8). DOI: 10.1109/LEOSST.2002.1027551.
10. Sun Y. et al. *Bell Labs Tech. J*., **4** (1), 187 (1999).
11. Ives D.J. et al. J. Lightwave Technol., **32** (21), 3485 (2014).
12. Magalhães E. et al. *Proc. OFC 2014* (Cannes, France, 2014, paper W2A).
13. Bazarov T.O. et al. *Laser Phys. Lett*., **19** (7), 075101 (2022).
14. Srivastava A.K. et al., in *Optical Fiber Telecommunications IV-A* (Academic Press, 2002, pp 174–212).
15. Poggiolini P. et al. *Proc. OFC 2019* (San Diego, CA, USA, 2019, paper M1I).