

# КОМПЕНСАЦИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ СПЕКТРА DWDM-сигнала в многопролетных линиях связи

**М.Горбашова**, аспирант НИУ МФТИ, инженер T8 Company / gorbashova@t8.ru,

**Д.Старых**, инженер T8 Company,

**И.Шихалиев**, к.т.н., инженер T8 Company,

**О.Наний**, д.ф.-м.н., профессор МГУ им. М.В.Ломоносова,  
профессор НИУ МФТИ, начальник научного отдела T8 Company,

**В.Трещиков**, к.ф.-м.н., генеральный директор T8 Company,

**И.Чебыкин**, аспирант НИУ МФТИ, инженер T8 Company

УДК 681.7.068:621.375, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.102.2.58.62

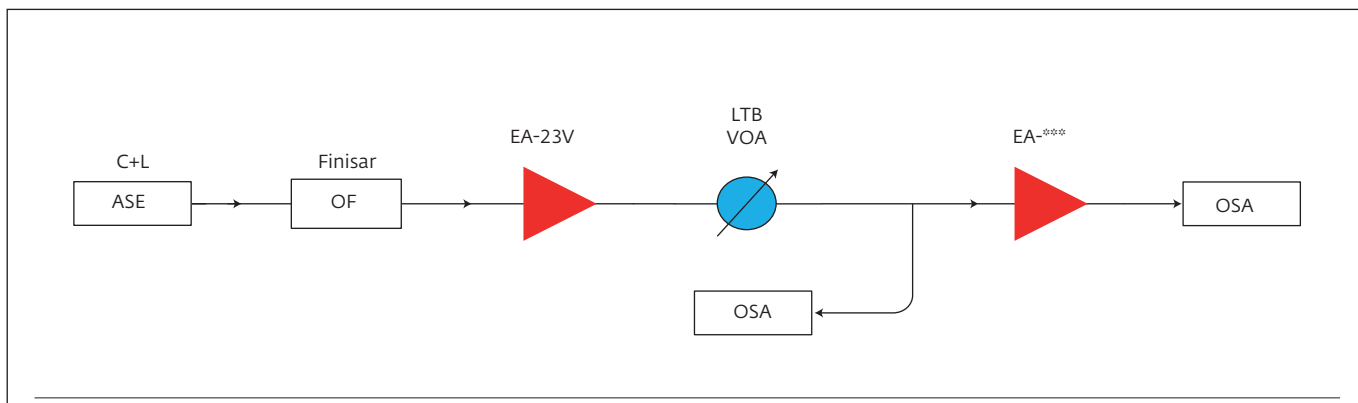
Исследованы статистические характеристики неравномерности спектра сигнала DWDM в зависимости от числа пролетов и статистических характеристик неравномерности усиления используемых усилителей. Установлено, что для линейки усилителей EDFA компании "Т8" с коэффициентом усиления до 24 дБ с вероятностью 95% один усилитель незначительно (не более чем на 0,72 дБ) увеличивает неравномерность спектра. Усилители с большим коэффициентом усиления (до 35 дБ) увеличивают неравномерность спектра примерно на 0,95 дБ. Еще одна причина неравномерности спектра DWDM-сигнала в многопролетных линиях связи – возникновение перекоса спектра из-за неравномерности спектра затухания оптического волокна и из-за нелинейного комбинационного (рамановского) взаимодействия спектральных каналов. Установлено, что нелинейный перекося спектра может быть скомпенсирован за счет согласованного наклона спектра усиления усилителей EDFA.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается беспрецедентный рост объемов информации, передаваемой по магистральным волоконно-оптическим сетям связи. Эта тенденция ставит задачу постоянного увеличения пропускной способности 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 многопролетных линиях связи [1–3].

В системах DWDM неравномерность спектра усиления EDFA является одной из причин, которые приводят к сильному искажению формы спектра сигнала после нескольких пролетов. В каналах



**Рис.1.** Схема экспериментальной установки для измерения спектра усиления  $G(\lambda)$ : ASE – широкополосный (диапазон C+L) источник усиленного спонтанного излучения (Opto-Link Corporation Ltd. OLS15CLGB-15-FA); OF – программируемый оптический фильтр (Finisar 1000S/X), работающий в режиме формирования многоканального спектра пропускания, соответствующего DWDM-сигналу с сеткой частот  $Ch = (191.6:0.1:196.0)$  ТГц; EA-23V – эрбиевый оптический усилитель модели EA-23V(14–24); LTB VOA – аттенюатор; EA-\*\*\* – исследуемые усилители; OSA – оптический анализатор спектра (Anritsu MS9740A)

с наименьшей мощностью сигнала величина OSNR оказывается меньше среднего значения, что может привести к недопустимому ухудшению качества передаваемого сигнала и даже к нарушению работы некоторых спектральных каналов.

Для максимального использования рабочей полосы ВОЛС необходимо обеспечить компенсацию неравномерностей спектра усиления используемых усилителей и перекоса спектра широкополосного DWDM-сигнала, вызванного нелинейным взаимодействием его спектральных компонентов и неравномерностью спектра затухания волокна [4].

Для выравнивания спектра сигнала на промежуточных участках в ВОЛС устанавливают специальные дорогостоящие устройства – эквалайзеры. Оптимизация периода расстановки эквалайзеров позволяет снизить стоимость комплекта оборудования, необходимого для передачи сигнала вдоль линии связи.

Также важной задачей является оптимизация профиля мощности сигнала на выходе эквалайзера, необходимая для достижения максимального запаса по OSNR [5–7]. Точность оптимизации может быть повышена за счет учета накопления неравномерности усиления EDFA.

В данной работе проведен статистический анализ экспериментальных спектров усиления большого числа усилителей (более 500). На его основе получены приближенные аналитические выражения, позволяющие оценивать неравномерность сигнала в многопролетных ВОЛС и делать консервативную оценку неравномерности спектра DWDM-сигнала (95% последовательностей EDFA

будут иметь неравномерность лучше оценочной). Кроме того, показано, что усилители можно использовать в режиме, обеспечивающем создание наклона спектра усиления, который позволяет частично компенсировать перекося сигнала и, как следствие, уменьшить число используемых эквалайзеров и усилителей.

### НАКОПЛЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНОГО DWDM-СИГНАЛА В МНОГОПРОЛЕТНЫХ ВОЛС ИЗ-ЗА НЕРАВНОМЕРНОСТИ СПЕКТРА EDFA

Для проведения статистического анализа накопления неравномерности спектра широкополосного DWDM-сигнала в многопролетных ВОЛС требуется обработать большое число экспериментальных спектров усиления эрбиевых усилителей. Более 500 спектров усиления (зависимостей  $G(\lambda)$ ) 48 различных усилителей были экспериментально измерены на установке, схема которой показана на рис.1. Еще порядка 2000 спектров были получены по данным выходного контроля. Всего было обработано примерно 2500 экспериментальных спектров усиления.

В эксперименте, показанном на рис.1, излучение, эквивалентное DWDM-сигналу, создавалось специальным программируемым широкополосным источником излучения, состоящим из источника усиленного спонтанного излучения (ASE), управляемого оптического фильтра (OF), усилителя мощности (EA-23V) и аттенюатора (LTB VOA). Аттенюатор LTB VOA применялся для регулировки суммарной входной мощности сигнала на исследуемый усилитель (EA-\*\*\*).

Контроль параметров спектра широкополосного сигнала осуществлялся спектроанализатором (OSA), к входу которого подключался выходной порт аттенюатора (VOA). Перед проведением измерений спектр сигнала  $P_{in}(\lambda)$ , подаваемого на исследуемый усилитель EA-\*\*\* (т.е. сигнал на выходе из VOA), был выровнен при помощи OF так, чтобы канальные мощности сигнала отличались не более, чем на 0,2 дБ. Измерение выходного спектра  $P_{out}(\lambda)$  производилось при подключении OSA к выходу исследуемого усилителя EA-\*\*\*.

По измеренным спектрам входного и выходного сигналов были вычислены спектры коэффициента усиления  $G(\lambda)$ :

$$G(\lambda) = P(\lambda) - P_{in}(\lambda). \quad (1)$$

Неравномерность коэффициента усиления Flatness определяется как разность между максимальным и минимальным коэффициентами усиления в заданном спектральном диапазоне:

$$Flatness = \max(G(\lambda)) - \min(G(\lambda)), \quad (2)$$

где  $\max(G(\lambda))$  и  $\min(G(\lambda))$  – максимальное и минимальное значение коэффициента усиления соответственно.

Значения неравномерности спектра как отдельных усилителей, так и последовательности из  $M$  усилителей – случайные величины.

С использованием экспериментально полученных спектров усиления были произведены расчеты неравномерности сигнала на выходе из возможных комбинаций исследуемых усилителей. Оказалось, что при фиксированном числе усилителей в линии связи значение неравномерности имеет некоторый статистический разброс. При этом форма распределения плотности вероятности по величине неравномерности сохраняется при изменении числа усилителей (распределение Максвелла или Гаусса в зависимости от типа усилителей, используемых в линии). Полученные распределения позволяют оценивать величину неравномерности после фиксированного числа усилителей с заданной вероятностью.

Так как однотипные усилители имеют схожие спектры, в случае установки таких усилителей в одной линии вероятность того, что длины волн максимумов и минимумов усиления совпадут – максимальна. Поэтому расчет неравномерности усиления линии, содержащей только однотипные усилители, дает консервативную оценку.

Для линейки усилителей EDFA производства компании "Т8" были получены следующие количественные

оценки величины неравномерности. При использовании в линии связи  $\leq 40\%$  усилителей с коэффициентом усиления  $\sim 35$  дБ в среднем один усилитель увеличивает значение 95-го перцентиля по неравномерности на  $\Delta = 0,72$  дБ:

$$Flatness = 0,72 \times M + 0,44; 2 \leq M \leq 9. \quad (3)$$

При использовании в линии только усилителей с коэффициентом усиления  $\sim 35$  дБ один усилитель увеличивает значение 95-го перцентиля на  $\Delta = 0,95$  дБ:

$$Flatness = 0,95 \times M + 0,51; 2 \leq M \leq 9. \quad (4)$$

Выражение (4) может быть использовано в качестве оценки сверху при доле усилителей с коэффициентом усиления  $\sim 35$  дБ более 40%.

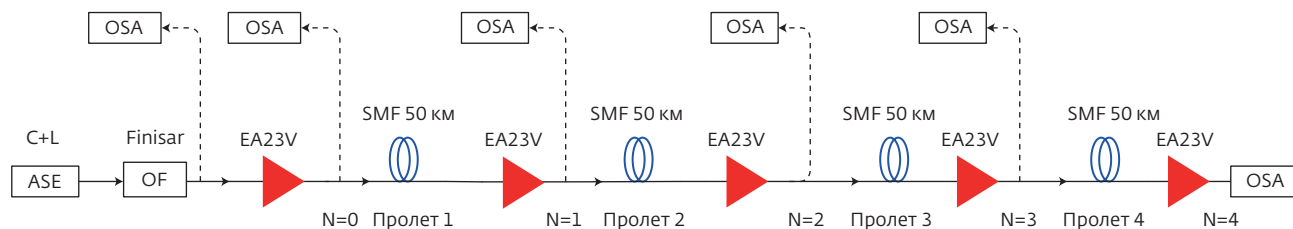
## КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПЕРЕКОСА СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНОГО DWDM-СИГНАЛА

При распространении многоканального сигнала по волоконно-оптической линии связи возникает перекося, вызванный ВКР-взаимодействием каналов, присутствующих в спектре сигнала, и неравномерностью спектра затухания волокна. Перекося спектра ведет к усилению нелинейных искажений и соответствующего штрафа для канала, обладающего наибольшей мощностью, и к уменьшению OSNR для канала с наименьшей мощностью. Таким образом, перекося спектра приводит к деградации качества передаваемых сигналов, которое можно описать как уменьшение эффективного отношения "сигнал – шум" ( $OSNR_{BER}$ ), то есть появление дополнительного штрафа по OSNR в линии с перекосям относительно линии без перекося.

В данной работе проводилось исследование возможности компенсации ВКР-перекося за счет согласованного наклона спектра усиления усилителей EDFA. Для проведения экспериментов была использована четырехпролетная ВОЛС (рис.2).

Излучение, эквивалентное широкополосному DWDM-сигналу, создавалось специальным программируемым широкополосным источником излучения, описанным выше (см. пояснение к рис.1).

Сформированный 45-канальный сигнал подавался на каскад эрбиевых усилителей, между которыми были установлены катушки волокна типа SMF-28, каждая длиной по 50 км. Для измерения эволюции спектра сигнала выходные порты исследуемых усилителей подключались к оптическому анализатору спектра OSA.



**Рис.2.** Схема четырехпролетной линии связи: ASE – широкополосный (диапазон C+L) источник усиленного спонтанного излучения (Opto-Link Corporation Ltd. OLS15CLGB-15-FA); OF – программируемый оптический фильтр (Finisar 1000S/X), работающий в режиме формирования многоканального спектра пропускания, соответствующего DWDM-сигналу с сеткой частот  $Ch = (191.6:0.1:196.0)$  ТГц; EA-23V – эрбиевые оптические усилители модели EA-23V(14–24); OSA – оптический анализатор спектра (Anritsu MS9740A); SMF 50 км – катушки волокон SMF-28, моделирующих пролеты ВОЛС (пролеты 1–4)

В процессе исследования было показано, что установка наклона спектра усиления, соответствующего перекосу между крайними каналами C-диапазона 1 дБ, позволяет добиться существенной компенсации ВКР-перекоса, что также приводит к уменьшению неравномерности спектра сигнала (рис.3).

Согласованный перекося на усилителях дает возможность уменьшить количество эквалайзеров в линии.

Эквалайзер вносит дополнительные потери, для компенсации которых используется дополнительный усилитель. Если усилители EDFA используются в режиме без перекося, то период установки

# Автоматизация. Безопасность. Связь.

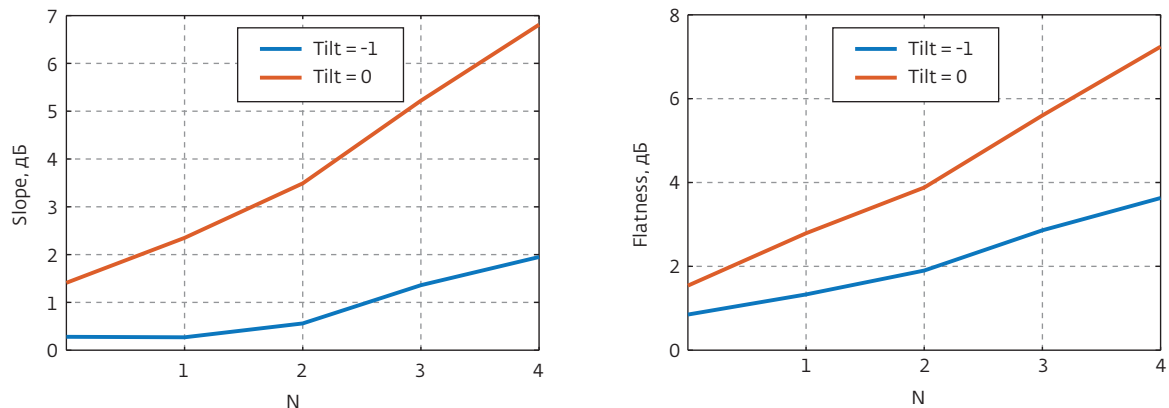
Арена «Ерофей»

## 19-21 МАЯ

- Системы автоматизации, связи и безопасности
- IT технологии

### ХАБАРОВСК 2022

comp@khabexpo.ru • khabexpo.ru



**Рис.3.** Зависимость перегиба и неравномерности от числа пролетов с/без компенсации согласованным наклоном спектра EDFA

эквалайзеров составляет 2–3 пролета. Использование усилителей EDFA в режиме с перегибом позволяет увеличить период установки эквалайзеров вдвое – до 4–6 пролетов. Уменьшение числа эквалайзеров дает существенный выигрыш в стоимости проекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы статистические характеристики неравномерности спектра сигнала DWDM в зависимости от числа пролетов и характеристик неравномерности усиления используемых усилителей (EDFA). Для линейки усилителей EDFA компании "Т8" были получены выражения, позволяющие выполнить количественную оценку величины неравномерности спектра сигнала после последовательности усилителей с достоверностью 95%.

Также экспериментально продемонстрирована возможность компенсации перегиба спектра сигнала, возникающего в волокне, за счет согласованного перегиба спектра усиления EDFA. Использование согласованного перегиба позволяет использовать большую часть динамического диапазона эквалайзера на компенсацию именно неравномерности спектра усиления EDFA. Это приводит к существенному увеличению периода расстановки эквалайзеров и, как следствие, к сокращению числа усилителей в линии связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Коньшев В.А.,** **Леонов А.В.,** **Наний О.Е.,** **Слепцов М.А.,** **Трещиков В.Н.,** **Убайдуллаев Р.Р.** Оптическая революция в системах связи и ее

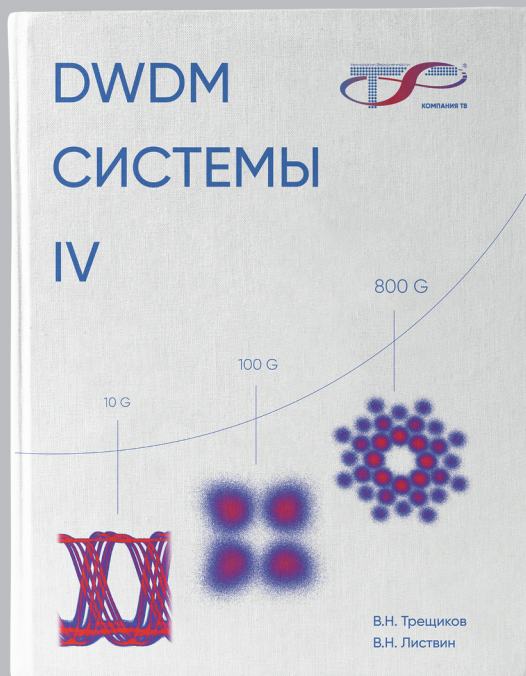
социально-экономические последствия // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 15–27.

2. **Шихалиев И.,** **Лукиных С.,** **Наний О.,** **Трещиков В.,** **Старых Д.,** **Коньшев В.,** **Убайдуллаев Р.** Широкополосный гибридный оптический усилитель: как улучшить существующие ВОЛС // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2018. № 2. С. 68–72.
3. **Леонов А.В.,** **Наний О.Е.,** **Слепцов М.А.,** **Трещиков В.Н.** Тенденции развития оптических систем дальней связи // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 2. С. 123–145.
4. **Капин Ю.А.,** **Наний О.Е.,** **Новиков А.Г.,** **Павлов В.Н.,** **Плоцкий А.Ю.,** **Трещиков В.Н.** Прямое экспериментальное измерение ВКР-перегиба спектра в многоканальных многопролетных системах связи // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 9. С. 818–821.
5. **Virgillito E.,** **London E.,** **D'Amico A.,** **Correia B.,** **Napoli A.,** **Curri V.** Single- vs. Multi-Band Optimized Power Control in C+L WDM 400G Line Systems // Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021. Th4C.3.
6. **Lasagni C.,** **Serena P.,** **Bononi A.,** **Antona J-C.** Power Allocation Optimization in the Presence of Stimulated Raman Scattering // European Conference on Optical Communication (ECOC) 2021. Tu1D.3.
7. **Huaijian L.,** **Jianing L.,** **Zhuili H.,** **Changyuan Y.,** **Chao L.** Optimization strategy of power control for C+L+S band transmission using a simulated annealing algorithm // Optics Express. 2022. V. 30. Issue 1. PP. 664–675.





# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



*В.Н. Трещиков, В.Н. Листвин*

## **DWDM-системы**

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 420с.  
ISBN 978-5-94836-634-0

**Цена 1960 руб.**

В книге собран курс лекций по DWDM-системам, предназначенный для специалистов, занимающихся разработкой, внедрением и эксплуатацией DWDM-оборудования. Это четвертое издание, расширенное и дополненное, состоящее из четырех разделов. В первой части рассмотрены основы DWDM-систем, история их возникновения и эволюция, во второй части — компоненты волоконно-оптического тракта, в третьей — приемник и передатчик каналообразующего оборудования, в четвертой части — механизмы формирования шумов и способы их расчета применительно к волоконно-оптическим линиям связи.

### **Как заказать наши книги?**

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: (495) 956-33-46  
E-mail: [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru)  
[sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphaera.ru](http://www.technosphaera.ru)