

# 10-КРАТНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ DWDM-ЛИНИЙ СВЯЗИ

**НОВИКОВ А.Г.**  
к.т.н., ведущий инженер, ООО «Т8»

**ЧИРКОВ В.С.,**  
старший инженер-программист, ООО «Т8»

**ЛЕОНОВ А.В.**  
к.ф.-м.н., научный консультант, ООО «Т8»



**ТРЕЩИКОВ В.Н.**  
к.ф.-м.н., генеральный директор, ООО «Т8»



**ГУРКИН Н.В.**  
руководитель группы, ООО «Т8»



Разработанное компанией Т8 оборудование DWDM «Волга» с канальной скоростью 100 Гбит/с позволяет по мере необходимости наращивать пропускную способность линий связи путем замены каналов 10 Гбит/с

## 10-FOLD INCREASE OF THE THROUGHPUT OF DWDM LINES

Abstract. DWDM system «Volga» with a channel speed of 100 Gbit/s which is developed by the Russian company T 8 allows increasing the throughput of DWDM lines by means of replacing 10 Gbit/s channels with coherent 100 Gbit/s channels as necessary.

Keywords: implementation of the coherent DWDM systems, operation of 100G DWDM channel surrounded with 10G channels, transponder parameters optimization.

## ВВЕДЕНИЕ

**В** настоящее время большинство оптических линий связи магистральных операторов заполнено трафиком с канальной скоростью 10 Гбит/с. Типичная пропускная способность DWDM системы при использовании частотной сетки с шагом 100 ГГц составляет 0,4 Тбит/с (40 каналов), а при использовании частотной сетки с шагом 50 ГГц — 0,8 Тбит/с (80 каналов).

Для дальнейшего развития существующих магистральных сетей и увеличения их пропускной способности необходимо добавлять 100-гигабитные каналы в существующую DWDM-систему без остановки каналов 10G. Однако при этом происходит значительное искажение сигнала 100G вследствие межканального взаимодействия с соседними каналами 10G. В реальных линиях значение OSNR (оптическое отношение сигнал-шум), требуемое для условно безошибочного приёма сигнала, оказывается на 5–7 дБ выше, чем при прямом соединении передатчика с приёмником (back-to-back, BTB). Например, для существующей промышленной версии 100G транспондера «Т 8» требуемый OSNR на реальных линиях может достигать 17–20 дБ, в то время как требуемый OSNR<sub>BTB</sub> = 12,5 дБ. Это затрудняет внедрение 100G каналов в существующие DWDM системы, требует использования защитных полос между каналами 100G и 10G и ограничивает возможность совместной работы 100G и 10G каналов в одной сети.

Компании «Т 8» удалось значительно улучшить качество 100 Гбит/с сигнала, передаваемого в одном волокне с 10-гигабитными каналами, за счёт изменения времени настройки параметров на оптическом приёмнике. Эксперимент показал, что при использовании новой технологии обработки 100G сигнала запас

**Ключевые слова:** внедрение когерентных DWDM систем, работа DWDM канала 100G в окружении каналов 10G, оптимизация параметров транспондера

по OSNR увеличивается более чем в два раза. Это существенно упрощает внедрение 100G каналов на существующих сетях и позволяет повысить пропускную способность стандартной 80-канальной DWDM-системы до 8 Тбит/с.

## ПЕРЕДАЧА КОГЕРЕНТНОГО СИГНАЛА 100G В ОКРУЖЕНИИ 10G

Доминирующее положение в оптических системах связи высокой ёмкости сегодня занимают когерентные системы связи с цифровой обработкой сигналов (digital signal processing, DSP), которые пришли на смену традиционным системам связи с прямым детектированием [1–6]. При когерентном детектировании сохраняется вся информация, содержащаяся в оптическом сигнале. Благодаря этому в когерентных системах связи могут быть реализованы любые форматы модуляции, в т.ч. с одновременной

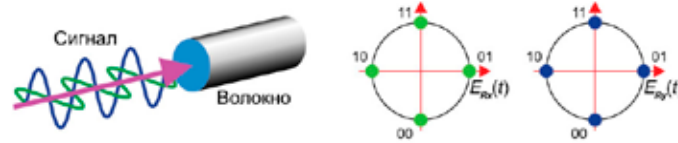


Рис. 1. Сигнал формата DP QPSK (DP 4QAM)

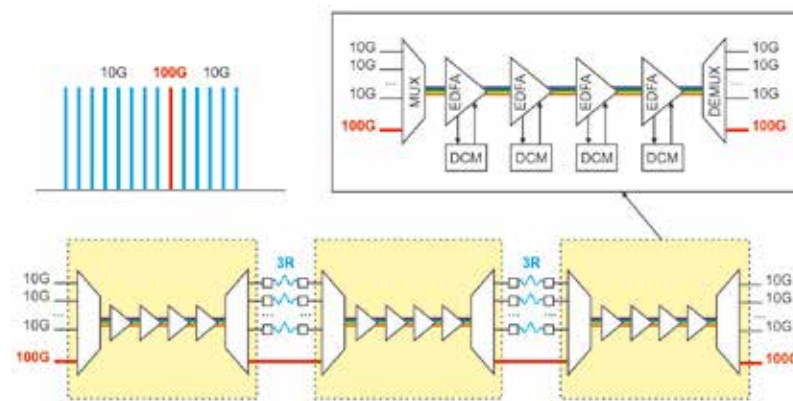


Рис. 2. Передача канала 100G в окружении 10G

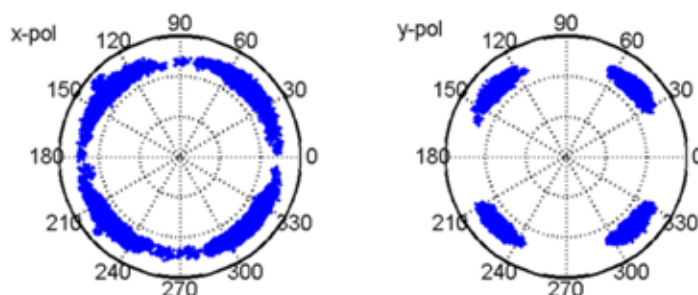
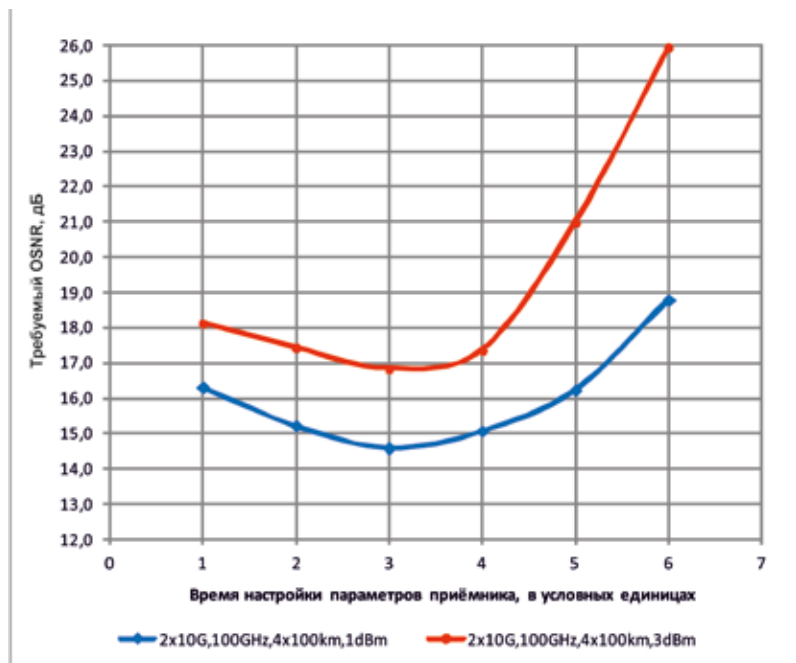
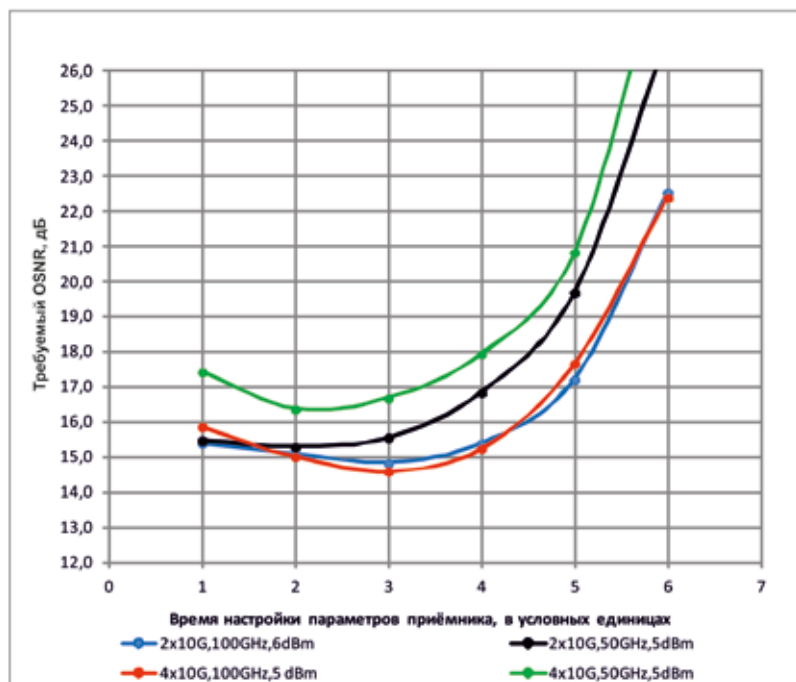


Рис. 3. Искажения X- и Y- поляризации сигнала DP QPSK при распространении в линии совместно с сигналом OOK 10 Гбит/с с X-поляризацией (10x100 км, SSMF) [8]



**Рис. 4.** Зависимость требуемого OSNR от времени настройки параметров приёмника, канал 100G в окружении двух каналов 10G с интервалом 100 ГГц, линия 4x100 км с компенсацией дисперсии



**Рис. 5.** Зависимость требуемого OSNR от времени настройки параметров приёмника, канал 100G в окружении двух или четырёх каналов 10G с интервалом 50 или 100 ГГц, линия 1x150 км без компенсации дисперсии

модуляцией поляризации, фазы и амплитуды сигнала. В практической реализации наиболее удобными оказались форматы, где используется две поляризации сигнала (DP, dual polarization, или PDM, polarization-division-multiplexed), а в каждой из них — квадратурная амплитудная модуляция (QAM, quadrature amplitude modulation) разных уровней. Среди всех форматов семейства DP nQAM наибольшей энергетической эффективностью обладает формат DP QPSK (он же PDM QPSK, он же DP 4QAM), рис.1. [1–3].

При проектировании и строительстве новых ВОЛС целесообразно сразу рассчитывать их параметры для работы с когерентными системами. Однако на практике когерентные системы связи часто устанавливаются в уже работающих ВОЛС, в части DWDM-каналов которых продолжают работать традиционные системы связи с прямым детектированием и оптической компен-

сацией дисперсии. При этом на распространение сигнала 100G оказывают существенное влияние нелинейные эффекты, связанные с межканальным взаимодействием с соседними каналами 10G, которые приводят к штрафу по OSNR. Требуемое значение OSNR в реальной линии увеличивается по сравнению с требуемым отношением сигнал-шум при прямом соединении передатчика и приёмника (OSNRBTB).

Нелинейные эффекты в DWDM-системах обусловлены различными проявлениями эффекта Керра (изменение показателя преломления волокна в зависимости от напряжённости приложенного электрического поля): фазовая само-модуляция (ФСМ), фазовая кросс-модуляция (ФКМ), четырёхволновое смешение (ЧВС), внутрисканальная ФКМ, внутрисканальное ЧВС, поляризационная кросс-модуляция. Относительный вклад различных видов нелинейного взаимодействия зависит как от символической скорости системы связи (формата модуляции), так и от физических параметров линии связи.

Воздействие нелинейных эффектов на линию связи, как показывают исследования, может проявляться по-разному для различных конфигураций ВОЛС. Для когерентной линии связи 100G в окружении каналов 10G в протяжённых линиях с компенсацией дисперсии воздействие нелинейных эффектов проявляется, главным образом, в искажении формы передаваемых оптических сигналов. Схема DWDM-линии с разнородными каналами приведена на рис.2.

Типичная протяжённая линия 10G состоит из нескольких многопролётных участков, между которыми происходит полная регенерация сигнала (3R, Reamplifying, Reshaping, Retiming — усиление, восстановление формы и восстановление синхронизации). На каждом участке стоят несколько оптических усилителей (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier), компенсирующих затухание сигнала при распространении в волокне, и несколько компенсаторов дисперсии (DCM, Dispersion Compensation Module), компенсирующих накопленную дисперсию. При добавлении в такую линию связи канала 100G его регенерацию между участками не производят, что приводит к накоплению в нём больших нелинейных искажений при прохождении линии.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ 100G ОТ СОСЕДНИХ КАНАЛОВ 10G

Если в линии с компенсацией дисперсии распространяются только каналы 100G с поляризационным разделением каналов (DP QPSK), то главным источником деградации сигнала является поляризационная кросс-модуляция [4–8]. При этом в ряде работ было показано, что поляризационная модовая дисперсия ослабляет нелинейное воздействие поляризационной кросс-модуляции, поскольку вызывает деполаризацию каждой поляризации и декорреляцию поляризационных компонент DP QPSK сигнала в процессе распространения по волокну [9–11].

Если в линии с компенсацией дисперсии распространяются сигналы 100G в формате DP QPSK совместно с сигналами 10G в формате OOK, то фазовая кросс-модуляция от каналов 10 Гбит/с вызывает гораздо больший штраф для 100G каналов, чем поляризационная кросс-модуляция [12]. Например, в [8] было выполнено численное моделирование распространения сигнала DP QPSK совместно с сигналом 10 Гбит/с формата NRZ OOK в линии длиной 10x100 км на волокне SSMF при использовании компенсации дисперсии. Фазовая диаграмма двух поляризационных компонент сигнала DP QPSK после прохождения линии показана на рис.3. Видно, что у той компоненты канала 100G, поляризация которой совпадает с поляризацией канала OOK, искажения после прохождения линии оказываются в два раза больше.

В ряде исследований (например, [9]) было показано, что амплитудные форматы (OOK) в соседних каналах гораздо сильнее ухудшают качество 100G, чем фазовые форматы (такие как 40G



DPSK). При этом в волокнах со смещённой дисперсией NZDSF G.655 штраф существенно больше, чем в стандартном волокне SSMF G.652. В волокне G.655 линия оказывается неработоспособной без «защитной полосы» шириной около 150 ГГц между каналами двух типов [10].

Таким образом, нелинейные искажения, создаваемые для канала 100 Гбит/с с модуляцией DP QPSK соседними каналами 10 Гбит/с, существенно ухудшают его характеристики. Исследования показывают, что штраф для канала 100G заметно зависит от числа каналов в DWDM-системе. Влияние оказывают не только соседние, но и удалённые по частоте каналы: например, в линиях на основе волокна NZDSF необходимо учитывать воздействие до 40 соседних каналов.

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА 100G В ОКРУЖЕНИИ 10G

Качество передачи 100G сигнала в окружении каналов 10G может быть улучшено в несколько раз за счёт использования специальных алгоритмов обработки, основанных на изменении времени настройки параметров оптического приёмника. Так, компанией «Т 8» была реализована новая технология обработки 100G сигнала, которая позволила увеличить запас по оптическому отношению сигнал-шум (OSNR) более чем в два раза. Выигрыш по качеству сигнала при применении новых алгоритмов обработки составил 3–5 дБ, рис. 4–5.

Такой выигрыш в OSNR относительно стандартного оборудования существенно облегчает использование когерентных DWDM-каналов 100G на оборудовании «Волга» в сетях операторов связи, где осуществляется одновременная работа каналов 100G и 10G. Максимальная скорость DWDM-системы может быть увеличена таким образом до 8 Тбит/с в стандартной 80-канальной системе с шагом 50 ГГц, или до 9,6 Тбит/с при расширении используемого спектрального диапазона и использовании 96 каналов 100G.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение времени настройки параметров приёмника и применение специальных алгоритмов обработки сигнала позволяет существенно повысить качество работы линий 100G при работе в DWDM-системах в окружении каналов 10G. Достигнутый выигрыш по OSNR составляет до 3–5 дБ. Полученный результат позволяет добиться значительного эксплуатационного запаса по OSNR даже в тех случаях, где ранее требовалась регенерация сигнала. Новая разработка «Т 8» позволяет широко использовать DWDM-систему «Волга» для массового и дешёвого апгрейда существующих DWDM-линий со скоростями 10G путем добавления 100G каналов.

Исключительные технические характеристики оборудования «Волга» позволяют увеличить скорость передачи в канале с 10 до 100 Гбит/с без замены существующего волокна и пунктов обслуживания. Транспондерам «Волга» для работы на скорости 100 Гбит/с требуется такой же OSNR, как некогерентным системам предыдущего поколения для работы на скорости 2,5G без FEC и 10 Гбит/с со стандартным FEC. Таким образом, канал 100 Гбит/с будет работать на той же кабельной инфраструктуре, на которой сейчас работают каналы 2,5/10/40 Гбит/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуркин Н. В., Наний О. Е., Трещиков В. Н. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с // Вестник связи. 2013. № 1, с. 39–40; № 2, с. 40–42.
2. Наний О. Е., Трещиков В. Н. Российское оборудование DWDM с канальной скоростью 40 G и 100 G. // Вестник связи. 2011. № 4, с. 52–53.
3. Наний О. Е., Трещиков В. Н. Анализ форматов модуляции для DWDM систем связи со скоростью 40 Гбит/с // Вестник связи. 2012. № 1, с. 35–38.
4. V V Gainov, N V Gurkin, S N Lukin, S G Akopov, S Makovejs, S Y Ten, O E Nanii, and V N Treshchikov «Record 500 km unrepeated 100 Gb s–1 transmission» Laser Physics Letters 7 2013.
5. Гуркин Н. В., Трещиков В. Н., Новиков А. Г., Наний О. Е. Российское DWDM-оборудование с канальной скоростью 100 Гбит/с // TComm N4 2012.
6. Гуркин Н. В., Наний О. Е., Новиков А. Г., Плаксин С. О., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK // Квантовая электроника, 2013, 43 (6), с. 550–553.
7. Наний О. Е., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. № 9, с. 17–19.
8. Chongjin Xie. Impact of Nonlinear and Polarization Effects on Coherent Systems // Optics Express, Vol. 19, Issue 26, pp. B915–B930 (2011).
9. J. Renaudier, O. Bertran-Pardo, H. Mardoyan, P. Tran, G. Charlet, S. Bigo, M. Lefrançois, B. Lavigne, J.—L. Augé, L. Pirou, and O. Courtois. Performance comparison of 40 G and 100 G coherent PDM-QPSK for upgrading dispersion managed legacy systems // OFC/NFOEC «09, San Diego, CA, 2009, Paper NWD5.
10. J. Renaudier, O. Bertran-Pardo, G. Charlet, M. Salsi, M. Bertolini, P. Tran, H. Mardoyan, and S. Bigo. Investigation on WDM Nonlinear Impairments Arising From the Insertion of 100-Gb/s Coherent PDM-QPSK Over Legacy Optical Networks // IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No. 24, pp. 1816–1818, 2009.
11. Poggiolini P. The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems // Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 24, pp. 3857–3879, 2012.
12. A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, F. Forghieri. Modeling of the Impact of Non-Linear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links // Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 10, pp. 1524–1539, 2012.





Вместе  
построим  
связь будущего!

- Отгрузка базового ассортимента в срок не более двух дней с момента размещения заказа, со складов во всех регионах России.
- 100%-й контроль качества на всех этапах производства кабеля и при выходном контроле.
- 15%-й запас прочности для всех конструкций кабеля, что снижает риски при их прокладке и эксплуатации.
- Гарантия финансовой и юридической чистоты сделок на пути от производителя до потребителя.
- Гибкая система накопительных скидок, специальные сезонные предложения.

www.intg.ru, 8 800 500 57 56    ПРОИЗВОДСТВО И ПРОДАЖА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

на правах рекламы