

# Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи

**О.Е. НАНИЙ**, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук, **В.Н. ТРЕЩИКОВ**, генеральный директор ООО “Т8”, кандидат физико-математических наук, **Р.Р. УБАЙДУЛЛАЕВ**, инженер, кандидат физико-математических наук

Увеличение потребностей в объеме передаваемой информации стимулирует исследователей к разработке более эффективных способов передачи массивов данных на большие расстояния [1 — 5].

На сегодняшний день волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) — самое эффективное средство передачи огромного объема информации как на магистральные (~1000 км), так и трансокеанские (~10000 км) расстояния. Суммарная пропускная способность современных высокоскоростных линий связи со спектральным уплотнением каналов (DWDM-линий) может составлять порядка 10 Тбит/с при скорости передачи в одном частотном канале до 100 Гбит/с и дальности передачи в несколько тысяч километров.

По оценкам ведущих исследовательских компаний, в 2015 г. потребуется уже порядка 15 Тбит/с, а в 2020 г. — примерно 100 Тбит/с [2].

Для обеспечения такой пропускной способности необходимо постоянно модернизировать опорные сети дальней связи с помощью технологий, гарантирующих высокую спектральную эффективность и максимально возможную дальность передачи информации.

В данной статье проведен анализ дальности передачи и пропускной способности когерентных систем связи, использующих различные форматы модуляции. Показано, что при дальности передачи, характерной для магистральных линий связи (~1000 — 2000 км), наиболее перспективным форматом модуляции является DP-QPSK. Использование многоуровневых QAM-форматов модуляции нецелесообразно из-за быстрого увеличения OSNR, необходимого для безошибочной работы.

## Методы увеличения пропускной способности DWDM-линий

Увеличить пропускную способность DWDM-линий можно тремя путями [6, 7]:

расширением используемого спектрального диапазона;

уменьшением расстояния между соседними спектральными каналами;

увеличением канальной скорости.

Наиболее оптимально — сочетать все три. Однако с уменьшением расстояния между каналами уменьшается максимально возможная канальная скорость. Каждый формат модуляции характеризуется некоторым спектром сигнала (см. рис. 1), который занимает полосу модуляции с шириной  $\Delta\nu_{Mod}$ , прямо пропорциональной скорости передачи информации  $V_{Ch}$ :

$$\Delta\nu_{Mod} = \xi_F V_{Ch}, \quad (1)$$

где  $\xi_F$  — зависящий от формата модуляции коэффициент пропорциональности.

Ширина полосы модуляции  $\Delta\nu_{Mod}$  ограничивает максимальную плотность расположения спектральных каналов (частотную сетку  $\Delta\nu_{Ch}$  DWDM):

$$\Delta\nu_{Ch} \geq \Delta\nu_{Mod}. \quad (2)$$

Ограничение плотности расположения каналов накладывают ограничение на максимальную достижимую величину спектральной эффективности SE передачи данных при помощи используемого формата модуляции:

$$\max SE = SE_F = 1/\xi_F. \quad (3)$$

Напомним, что спектральная эффективность SE по определению равна отношению скорости передачи информации в одном частотном канале к расстоянию между соседними частотными каналами:

$$SE = V_{Ch}/\Delta\nu_{Ch}. \quad (4)$$

Максимальное количество DWDM-каналов,  $\max N_{Ch}$ , определяется отношением используемого спектрального диапазона  $\Delta\nu_{Sp}$  (рабочей полосы) к минимальному расстоянию между соседними частотными каналами

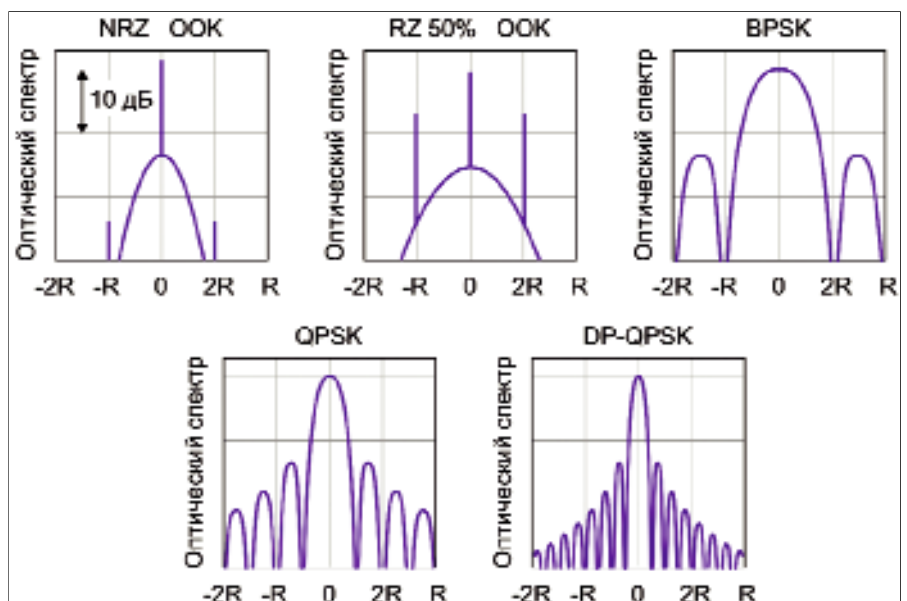
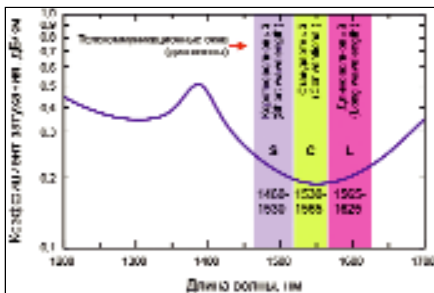


Рис. 1. Оптические спектры сигналов в различных форматах модуляции ( $R=1/T$ , где  $T$  — период следования импульсов)



**Рис. 2. Спектральные диапазоны DWDM-систем связи. Область спектра вблизи третьего окна прозрачности кварцевого волокна (1550 нм) охватывает в соответствии с рекомендациями МСЭ-T три спектральных диапазона: S, C и L [8]**

( $\max N_{Ch} = \Delta\nu_{Sp} / \min \Delta\nu_{Ch}$ ). Поскольку пропускная способность DWDM-системы есть произведение канальной скорости на число каналов, то легко показать, что ее максимальное значение равно отношению рабочей спектральной полосы  $\Delta\nu_{Sp}$  к максимальной спектральной эффективности формата SE<sub>F</sub>:

$$\max B_{DWDM} = \Delta\nu_{Sp} / SE_F \quad (5)$$

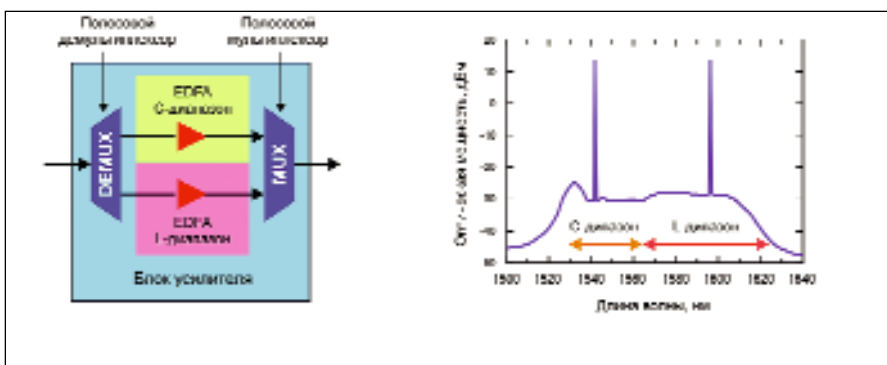
Таким образом, предельная пропускная способность волоконно-оптической линии связи не зависит от канальной скорости, а определяется спектральной эффективностью формата и шириной рабочей спектральной полосы. Следовательно, для увеличения пропускной способности нужно либо увеличивать рабочую полосу, либо использовать спектрально эффективные форматы модуляции.

Возможности расширения рабочей полосы оптических систем связи в настоящее время ограничены возможностями расширения рабочей полосы оптических усилителей. Наиболее перспективный путь — использование в полной мере полосы усиления эрбиевых усилителей (EDFA). В системах связи в настоящее время широко используются EDFA-усилители стандартного C-диапа-

зона с полосой 35 нм (1530 — 1565 нм, см. рис. 2). Все DWDM-системы, введенные в эксплуатацию до 2000 г., и большинство современных работают в C-диапазоне. Он уникален тем, что, во-первых, совпадает с полосой усиления наиболее эффективных усилителей EDFA, а, во-вторых, затухание кварцевого волокна здесь минимально.

Со стороны длинных волн к C-диапазону примыкает L-диапазон — это длинноволновая (от английского слова long) область DWDM-передачи от 1565 до 1625 нм. Существуют специальные модификации усилителей EDFA, работающие в этом диапазоне. Затухание волокна в L-диапазоне незначительно превышает затухание в C-диапазоне, и в целом этот диапазон очень перспективен для увеличения суммарной пропускной способности волокна. Усилители EDFA, работающие в L-диапазоне, уже выпускаются промышленно, но не применяются в системах связи, поскольку сейчас отсутствуют промышленно активные компоненты транспондеров — передатчики и приемники, предназначенные для L-диапазона. Тем не менее, расширение рабочего диапазона систем связи до 70 — 90 нм — реальная задача, над решением которой работают как российские, так и зарубежные компании.

Следует отметить, что оптимальная длина активного волокна в усилителях L-диапазона в несколько раз больше оптимальной длины усилителей C-диапазона, при этом оптимальная мощность накачки значительно меньше. По этой причине двухдиапазонный усилитель делают составным, как показано на рис. 3 (слева). Перед усилением оптические сигналы разделяются по диапазонам полосовым демультиплексором, и для каждого диапазона используется свой усилитель.



**Рис. 3. Структурная схема и спектр усиления двухдиапазонного усилителя EDFA**

Со стороны коротких волн к C-диапазону примыкает S-диапазон — это коротковолновая (от английского слова short) область DWDM-передачи, занимающая интервал от 1460 до 1530 нм. Исследования возможностей создания усилителей в этой области спектра ведутся в течение нескольких десятилетий, однако появление усилителя S-диапазона, пригодного для применения в действующих сетях связи, по-прежнему далеко от решения.

### Форматы модуляции, используемые в когерентных DWDM-линиях связи

Благодаря использованию формата DP-QPSK и коррекции ошибок на основе алгоритмов мягкого принятия решений SoftFEC с избыточностью 20 % достигнуто рекордно низкое значение требуемого OSNR в транспондерах 100 Гбит/с, равное 12,5 дБ. Максимальное значение накопленной дисперсии составляет 70000 пс/нм. Максимальная емкость 96-канальной DWDM-системы на основе транспондера TS-100E составляет 9,6 Тбит/с (C-диапазон с полосой 4,4 ТГц), спектральная эффективность — 2 бит/с/Гц [2, 3].

Увеличить спектральную эффективность можно путем использования многоуровневых форматов модуляции сигнала. Однако, как следует из таблицы, использование многоуровневых mQAM-форматов модуляции с числом уровней больше 4 приводит к увеличению чувствительности к шумам. Более высокая чувствительность к шумам может быть численно оценена величиной так называемых штрафов относительно бинарного амплитудного формата.

Причину возникновения штрафов в mQAM-форматах при m больше 4 можно понять из анализа сигнальных созвездий, приведенных в таблице: по мере увеличения числа m расстояния между значениями символов, уменьшаются, а разброс значений, характеризуемый уровнем шумов и условно показанный на рисунке размером пятен, сохраняется.

На передачу данных в DWDM-системах значительное влияние оказывают нелинейные эффекты, причем, искажения сигнала определяются сложным взаимодействием шумов, линейных

эффектов и нелинейности. При прочих одинаковых условиях нелинейные эффекты проявляются сильнее в системах, использующих многоуровневые mQAM-форматы с  $m$  больше 4.

В результате уменьшения энергетической эффективности и усиления влияния нелинейных искажений дальность передачи при использовании многоуровневых форматов модуляции mQAM с  $m$  больше 4 существенно уменьшается и в линиях связи на основе стандартного волокна становится меньше 500 км. Таким образом, при дальности передачи, характерной для магистральных линий связи (~1000 — 2000 км), наиболее перспективным форматом модуляции является DP-QPSK-формат.

### Достижение пропускной способности 12 и 25 Тбит/с

Современный уровень развития DWDM-транспондеров технически позволяет создавать системы связи со скоростью 9,6 Тбит/с: уже разработанные в России компанией “Т8” активные компоненты когерентных систем связи обеспечивают суммарную скорость передачи информации 9,6 Тбит/с (96 x 100 Гбит/с) и дальность более 4000 км при использовании C-диапазона [2, 3].

Следующий шаг — создание систем связи с суммарной скоростью 12 — 15 Тбит/с. С экономической точки зрения целесообразно в максимальной степени использовать существующую кабельную инфраструктуру и действующее активное оборудование. Обеспечить суммарную скорость 12 Тбит/с позволяет более плотное расположение DWDM-каналов 100 Гбит/с. Для этого необходимо перейти от стандартизованной MCЭ-Т сетки 50 ГГц к нестандартной сетке 33 ГГц или использовать сетку 31,25 ГГц, сформированную на основе стандарта MCЭ-Т G.694.1 [9] (раздел 7, Flexible DWDM grid).

С точки зрения технической реализуемости и экономичности наиболее

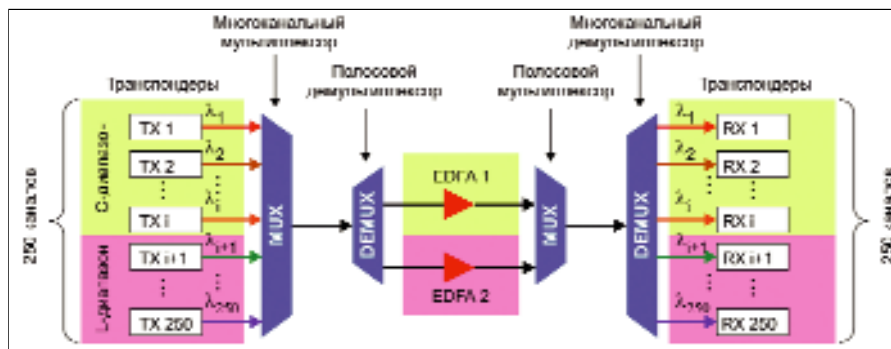


Рис. 4. Структура DWDM-системы связи с емкостью 25 Тбит/с

перспективным вариантом создания систем связи со скоростью 25 Тбит/с является система DWDM, использующая 250 каналов в C- и L-диапазонах, формат модуляции DP-QPSK с канальной скоростью 100 Гбит/с и плотностью расположения каналов 33 ГГц [2]. Структурная схема системы DWDM с пропускной способностью 25 Тбит/с показана на рис. 4.

### Заключение

Для магистральных линий связи (~1000 — 2000 км) наиболее перспективным форматом модуляции является DP-QPSK с когерентным детектированием и цифровой обработкой сигнала, включающей кодирование с исправлением ошибок на основе алгоритма мягкого принятия решений (SoftFEC). Созданное на его основе в России в 2012 — 2013 гг. оборудование на базе транспондеров “Волга” обеспечивает работу систем на существующей кабельной инфраструктуре с использованием действующих усилительных узлов, поддерживая максимальную суммарную скорость 9,6 Тбит/с.

Модернизация системы связи, заключающаяся в переходе к более плотному расположению DWDM-каналов (сетка 33 ГГц), позволит увеличить суммарную пропускную способность системы до 12 — 14 Тбит/с.

С использованием платформы “Волга” в течение года-двух может быть

создана система связи с суммарной скоростью 25 Тбит/с.

Для ее реализации необходимо разработать и создать:

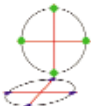
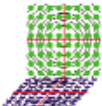

транспондеры (мультиплексоры) для передачи 100 Гбит/с в DWDM-канале на базе формата DP-QPSK с возможностью перестройки лазера с шагом 33 ГГц и возможностью работы в C- и L-диапазонах;

оптические усилители с поддержкой C+L диапазона с шириной спектра более 100 нм;

оптические мультиплексоры с шагом 33 ГГц (0,26 нм) в C+L диапазоне.

### 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. Трещиков В.Н. Разработка DWDM-системы емкостью 25 Тбит/с //Фотон-экспресс. 2013. № 2. С. 24.
3. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Российское оборудование DWDM с канальной скоростью 40G и 100G// Вестник связи. 2011. № 4. С. 52 – 53.
4. 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.
5. Наний О.Е. Когерентные системы связи// Lightwave Russian Edition. 2008. № 4. С. 23.
6. Schubert C. et al. New Trends and Challenges in Optical Digital Transmission Systems// ECOC 2012, We.1. С.1.
7. Величко М.О., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи// Lightwave Russian Edition. 2005. № 4. С. 21.
8. ITU-T Supplement 39, Optical system design and engineering considerations.
9. ITU-T G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.

Формат модуляции	DP-QPSK (DP-4QAM)	DP-16QAM	DP-32QAM
DP-64QAM			
бит/символ	2x2	2x4	2x5
Сигнальное созвездие			
Штраф по OSNR, дБ	0	4	8,5