

---

УДК 621.396.2

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОПРОЛЕТНОЙ СИСТЕМЫ DWDM С КАНАЛАМИ 40 Гбит/с DPSK В СЕТКЕ 50 ГГц

**Н.В. Гуркин**, инженер ООО «Т8», к.т.н.

**Ю.А. Капин**, главный инженер ООО «Т8»

**В.Н. Павлов**, начальник отдела проектирования ООО «Т8», к.т.н.

**С.О. Плаксин**, инженер ООО «Т8»; plaksin@t8.ru

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

---

**Ключевые слова:** оптическая связь, спектральное мультиплексирование (WDM), дифференциальная фазовая модуляция, оптическое отношение сигнал/шум (OSNR), нелинейные искажения, перекрестные помехи.

**Введение.** Переход от систем связи с канальными скоростями 10 Гбит/с (10G) к системам с 40 Гбит/с (40G) требует решения ряда технических задач. Поскольку при распространении в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) сигналов со скоростью 40 Гбит/с после прохождения участков оптического волокна (ОВ) даже относительно небольшой длины соседние импульсы сигнала полностью перекрываются (наблюдается сильная межсимвольная интерференция), то характер нелинейных искажений в линиях связи 40G и 10G существенно различается [1–3]. Оптимальное распределение дисперсии в системах 40G и 10G также заметно различается. Межсимвольная интерференция в условиях нелинейного распространения приводит к таким нелинейным эффектам, как внутриканальная перекрестная фазовая модуляция (iXPM) и внутриканальное четырехволновое смещение (iFWM).

В оптических системах связи с канальной скоростью до 10 Гбит/с преимущественно используются бинарные амплитудные форматы модуляции. При скорости 40 Гбит/с экономически наиболее эффективным форматом модуляции для реализации DWDM-систем связи, работающих на кабельной инфраструктуре действующих сетей связи, является адаптивный дифференциальный фазовый формат модуляции (ADPSK) [2–5].

В ходе проведенного эксперимента была продемонстрирована возможность совместной работы разнородных спектральных каналов (10 Гбит/с NRZ и 40 Гбит/с NRZ ADPSK) в сети DWDM с межканальным интервалом 50 ГГц [6–7]. Это позволит модернизировать действующие 80-канальные DWDM-системы связи с канальной скоростью 10 Гбит/с путем постепенного поканального перехода к более скоростному оборудованию 40G.

Ранее исследовали в основном дифференциальный фазовый формат с возвращением к нулю (формат RZ DPSK) [2, 3]. Применение этого формата (по сравнению с NRZ DPSK) обеспечивает некоторый выигрыш в величине требуемого OSNR. Кроме того, формат RZ DPSK менее чувствителен к нелинейным искажениям, однако неприменим в 80-канальных DWDM-сетях с межканальным интервалом 50 ГГц. Недавно было продемонстрировано, что в таких сетях может использоваться адаптивный бинарный фазовый формат без возвращения к нулю (NRZ ADPSK) [4–7].

Возможность работы системы связи 40G DPSK в сети, содержащей перестраиваемые оптические мультиплексоры ввода-вывода, продемонстрирована в [6]. Там же приведены результаты полевых испытаний совместной работы каналов 40G и 10G в сети связи компании Google. Однако характер воздействия линейных и нелинейных искажений на характеристики систем связи 40G NRZ ADPSK до настоящего времени в полной мере не исследован.

В статье экспериментально исследована зависимость требуемого OSNR от хроматической дисперсии и мощности сигнала в однопролетной системе DWDM с межканальным

интервалом 50 ГГц и скоростью передачи в оптических каналах 40 Гбит/с.

**Измерение характеристик транспондера.** Важнейшей характеристикой транспондеров, используемых в оптических системах дальней связи, является требуемое отношение сигнал/шум  $osnr_R^{min}$ . По определению  $osnr_R^{min}$  – это минимальное значение OSNR на входе оптического приемника в отсутствие линейных и нелинейных искажений в оптическом тракте ВОЛС, при котором система связи работает в условно безошибочном режиме. Условно безошибочным называется такой режим работы системы связи, когда коэффициент ошибок BER не превышает заданного уровня. В современных системах связи он соответствует  $BER < 10^{-12}$ . Величина  $osnr_R^{min}$  измеряется при оптимальном значении мощности сигнала на входе приемника.

Схема экспериментальной установки, используемой для измерения  $osnr_R^{min}$  и штрафов из-за искажения сигнала под действием хроматической дисперсии, представлена на рис. 1. С помощью источника шума (источник усиленного спонтанного излучения ASE) и переменного аттенюатора варьировалось значение OSNR, измеряемое оптическим анализатором спектра (OSA). Переменный компенсатор дисперсии (TDC) применялся для изменения накапливаемой в линии хроматической дисперсии в экспериментах по измерению зависимости штрафа от накопленной дисперсии. В данной схеме TDC – единственный источник хроматической дисперсии, поэтому накопленная в линии дисперсия равнялась дисперсии TDC. Усилитель, установленный на выходе DMUX, использовался для обеспечения требуемого уровня сигнала на входе приемника оптического транспондера.

При экспериментальном определении  $osnr_R^{min}$  переменный компенсатор хроматической дисперсии не использовался. Сначала по измеренной зависимости коэффициента ошибок BER от мощности сигнала на входе приемника определялась оптимальная мощность входного сигнала, при которой BER минимален. Этот уровень мощности поддерживался постоянным при дальнейших исследованиях. Изменение OSNR достигалось подстройкой коэффициента ослабления шумового сигнала от ASE с помощью переменного аттенюатора (VOA). Значение OSNR контролировалось OSA. Следует отметить, что вклад установленного на выходе DMUX дополнительного усилителя приема пренебрежимо мал, поэтому измеряемая величина OSNR соответствует значению OSNR на входе приемника транспондера.

Проведены исследования двух вариантов транспондеров, различающихся модулями коррекции ошибок (FEC): в первом применялся модуль с избыточностью 7% (скорость передачи сигналов 43,02 Гбит/с), во втором – модуль с избыточностью 10% (скорость передачи сигналов 44 Гбит/с). Результаты измерения коэффициента ошибок BER от OSNR приведены на рис. 2. Как видно из графиков,  $osnr_R^{min} = 11,3$  дБ при использовании нового мощного алгоритма исправления ошибок с избыточностью 10%.

Для измерения зависимости требуемого отношения  $osnr_R$  от накопленной дисперсии в экспериментальной установке был подключен TDC. Результаты измерений с помощью двух моделей переменного компенсатора дисперсии представлены на рис. 3. Как видно из полученных графиков, оптимальная остаточная дисперсия примерно равна 0 пс/нм. Диапазон допустимых значений дисперсии, определяемый по уровню штрафа 1 дБ, составляет  $\pm 90$  пс/нм.

**Измерение нелинейных искажений.** Нелинейные искажения в ВОЛС приводят к возрастанию требуемого OSNR при увеличении мощности  $P_{is}$  сигнала, вводимого в ОВ. Коли-

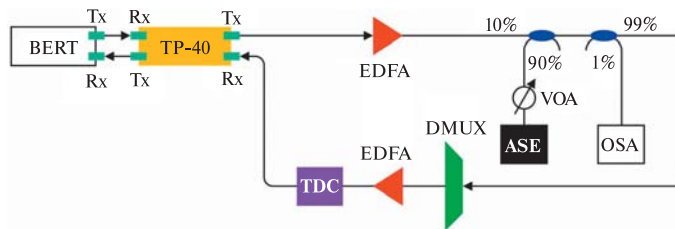


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения  $osnr_R$ :

BERT – измеритель коэффициента ошибок; TP-40 – оптический транспондер; EDFA – эрбиевые усилители; ASE – источник усиленного спонтанного излучения; OSA – оптический анализатор спектра; VOA – переменный оптический аттенюатор; DMUX – демультиплексор; TDC – переменный компенсатор хроматической дисперсии

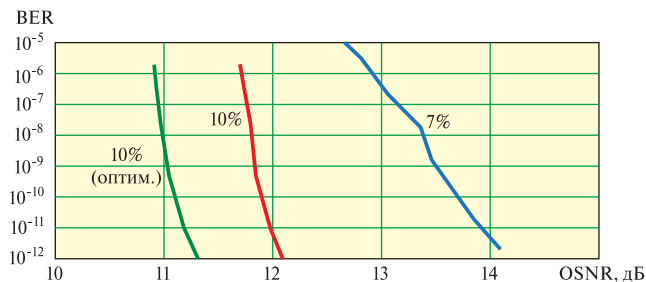


Рис. 2. Зависимость BER от OSNR

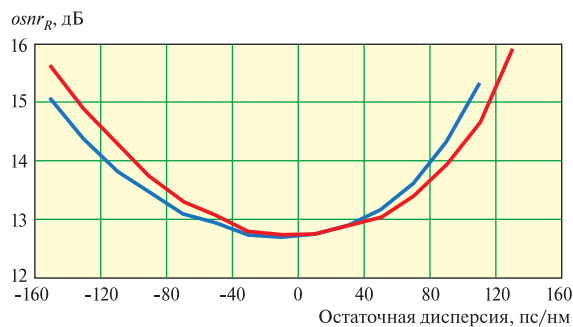


Рис. 3. Зависимость  $osnr_R$  от остаточной дисперсии, измеренная для двух вариантов переменного компенсатора дисперсии

чественно нелинейные искажения определяются размером штрафа  $\Delta osnr = osnr_R - osnr_R^{min}$ , а чувствительность к нелинейным искажениям – мощностью сигнала  $P_{max}$  на входе в ОВ, при которой штраф  $\Delta osnr = 1$  дБ, где  $osnr_R$  и  $osnr_R^{min}$  – значения требуемого OSNR при наличии и отсутствии нелинейных искажений соответственно.

В общем случае нелинейные искажения зависят от дисперсионного плана ВОЛС. Зависимость чувствительности к нелинейным искажениям от дисперсионного плана начали изучать с простейшей однопролетной системы связи, которая характеризуется тремя параметрами: суммарной накопленной дисперсией  $D_s$ , дисперсией ОВ  $D_F$  и величиной предкомпенсации дисперсии  $D_{in}$ .

Схема экспериментальной установки для исследования влияния дисперсионного плана на чувствительность к нелинейным искажениям приведена на рис. 4. В эксперименте использовалось стандартное одномодовое волокно компании OFS длиной  $L=100$  км с дисперсией  $D_F = DL \approx 1630$  пс/нм, соответствующее Рек. МСЭ-Т G.652. Для компенсации дисперсии ОВ применяли модуль компенсации дисперсии DCM с дисперсией  $D_{DCM} \approx -1650$  пс/нм. Суммарная дисперсия, создаваемая ОВ и DCM:  $D_F + D_{DCM} = -20$  пс/нм.

Проведенные исследования показали, что при любом фиксированном значении предкомпенсации  $D_{in} = D_{TDC1}$  минимальное значение  $osnr_R$  достигается при суммарной накопленной дисперсии, равной нулю:

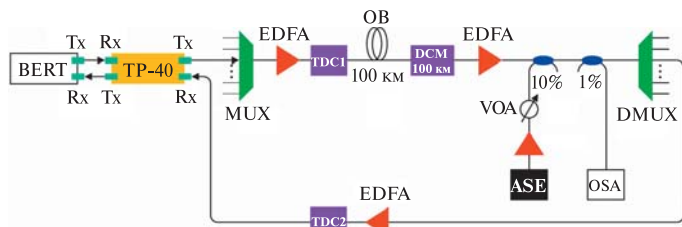


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения критического OSNR:

MUX – мультиплексор; TDC1, TDC2 – перенастраиваемые компенсаторы дисперсии; 100 км – волокно SMF длиной 100 км; DCM 100 км – постоянный компенсатор дисперсии, компенсирующий 100 км волокна SMF

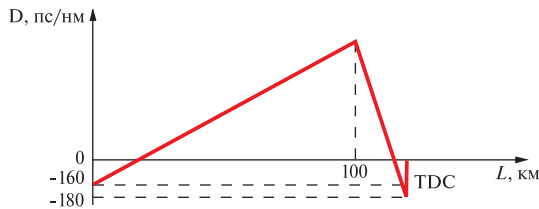


Рис. 5. Оптимальный дисперсионный план однопролетной ВОЛС

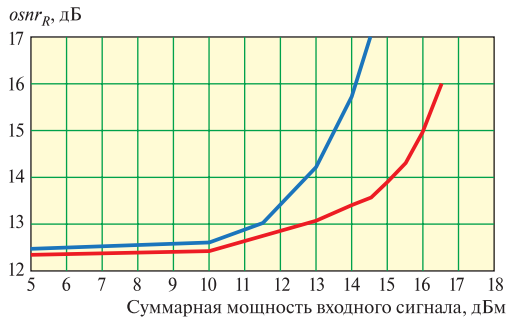


Рис. 6. Зависимость  $osnr_R$  от мощности сигнала, вводимого в односекционную линию при оптимальной предкомпенсации (красная) и при отсутствии предкомпенсации (синяя)

$$D_{\Sigma} = D_{TDC1} + D_{TDC2} + D_F + D_{DCU} = D_{TDC1} + D_{TDC2} - 20 = 0;$$

$$D_{TDC1} + D_{TDC2} = 20 \text{ пс/нс.}$$

Для нахождения оптимальной предкомпенсации дисперсии  $D_{in} = D_{TDC1}$  определяли максимально допустимую вводимую в ОВ мощность как значение мощности, при которой штраф  $\Delta osnr = osnr_R - osnr_R^{min} = 1 \text{ дБ}$ .

Определенная экспериментально оптимальная величина предкомпенсации составила  $D_{in} = D_{TDC1} = -160 \text{ пс/нм}$ . Дисперсионный план однопролетной ВОЛС с оптимальной предкомпенсацией дисперсии приведен на рис. 5.

Зависимости  $osnr_R$  от мощности сигнала, вводимого в ВОЛС, приведены на рис.6 для двух линий: с оптимальным дисперсионным планом и линии без предкомпенсации дисперсии. Как следует из приведенных графиков, максимально допустимая мощность сигнала, вводимого в ОВ, может быть увеличена примерно на 2 дБ путем оптимизации величины предкомпенсации дисперсии.

**Заключение.** Экспериментальные результаты доказали применимость систем связи на основе формата NRZ ADPSK с канальной скоростью 40 Гбит/с в DWDM-сетях с межканальным интервалом 50 ГГц. Измеренное значение  $osnr_R^{min}$  оказалось равным 11,3 дБ, а оптимальная мощность сигнала на входе ОВ составила 15 дБм с использованием предкомпенсации дисперсии в 160 пс/нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи//Lightwave Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21–30.
2. Charlet G. Progress in Optical Modulation Formats for High-Bit Rate WDM Transmissions//IEEE J. of Selected Topics in QE. – 2006. – Vol. 12, №4. – P. 469–483.
3. Winzer P.J., Essiambre R.-J. Advanced Optical Modulation Formats// Proceedings of the IEEE. – 2006. – Vol. 94, № 5. – P. 952–985.
4. Редюк А.А. и др. Математическое моделирование экспериментального прототипа высокоскоростной линии связи на основе дифференциального фазового формата модуляции без возвращения к нулю// Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №10. – С. 929–933.
5. Kamalov V. et al. Field verification of 40G DPSK upgrade in a legacy 10G network// Optical Fiber Communication, Los Angeles. – 2010. – Paper NTuC2.
6. Наний О.Е., Трешиков В.Н. Российское оборудование 40 Гбит/с – реальность// Фотон-экспресс. – 2010. – № 5 (85). – С. 28–30.
7. Наний О.Е., Трешиков В.Н. Российское оборудование DWDM с канальной скоростью 40G и 100G// Вестник связи. – 2011. – № 4. – С. 52–58.
8. Charlet G. et al. WDM transmission at 6-Tbit/s capacity over transatlantic distance, using 42.7-Gb/s differential phase-shift keying without pulse carver// J. Lightw. Technol. – 2005. – Vol. 23, № 1. – P. 104–107.

Получено 13.11.11

ИНФОРМАЦИЯ

НАЦИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА: ПЕРВЫЙ ЭТАП

27 декабря 2011 г. заместитель министра связи и массовых коммуникаций И. Массух подписал документы о приемке результатов НИОКР, выполненных компанией «ПингВин Софтвер» в рамках контракта на создание прототипов базовых компонентов Национальной программной платформы (НПП) в рамках Государственной программы «Информационное общество» на 2011–2020 гг.».

Согласно техническому заданию конкурса, объявленного Минкомсвязи России, требовалось подготовить аналитические исследования, финансово-экономическое

обоснование и проектную документацию, а также разработать прототипы ключевых программных компонентов будущей платформы. Претендентами на госзаказ были озвучены два подхода: разработка эталонной системы НПП и реализация принципа конкурентного наполнения НПП системами от разных производителей, объединенными общими требованиями. Второй путь, предложенный Российской ассоциацией содействия развитию свободного программного обеспечения (РАСПО), позволял избежать монополизма одного поставщика ПО. Одержав победу в конкурсе членам РАСПО помогло объединение усилий бо-

лее чем 200 специалистов, работу которых координировала компания «ПингВин Софтвер». 2 ноября 2011 г. Министерству были переданы пять аналитических отчетов, эскизный проект НПП, техническое задание на дальнейшую разработку НПП, отчет о патентных исследованиях, 14 прототипов ПО с сопутствующей технической документацией объемом более 5000 страниц. Их оценка и испытания заняли у заказчика – Минкомсвязи России – почти два месяца. Членам конкурсной комиссии в этом процессе помогли отраслевые эксперты, чьи мнения были учтены при вынесении положительного вердикта.