НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНЫЙ ШУМ в когерентных системах связи

А.Леонов, научный консультант компании "Т8", к.ф.-м.н.,
О.Наний, профессор МГУ им. М.В.Ломоносова, д.ф.-м.н,
В.Трещиков, генеральный директор компании "Т8", к.ф.-м.н.

В статье рассмотрено влияние нелинейных оптических эффектов на работу когерентных DWDM-систем связи с канальной скоростью 100 Гбит/с. Проанализировано воздействие нелинейных эффектов на когерентную линию связи для двух основных вариантов применения: канал 100 Гбит/с в окружении каналов 10 Гбит/с в линиях с компенсацией дисперсии и канал 100 Гбит/с в линиях без компенсации дисперсии. Показано, что в первом случае нелинейные эффекты порождают амплитудные и фазовые искажения, которые проявляются в основном в виде изменения формы передаваемых оптических сигналов; в длинных линиях без компенсации дисперсии характер воздействия нелинейных эффектов оказывается существенно иным и может быть описан как формирование нелинейного шума.

На смену традиционным системам связи с прямым детектированием пришли когерентные системы связи с цифровой обработкой сигналов (DSP, Digital Signal Processing), занявшие доминирующее положение среди оптических систем связи высокой емкости. При когерентном детектировании сохраняется вся информация, содержащаяся в оптическом сигнале. В результате в когерентных системах связи могут быть реализованы любые форматы модуляции с одновременной модуляцией поляризации, фазы и амплитуды сигнала. Наиболее удобными в практической реализации оказались форматы модуляции семейства DP nQAM (Dual Polarization, Quadrature Amplitude Modulation), где в каждой из двух ортогональных поляризаций используется квадратурная амплитудная модуляция с n возможными состояниями сигнала. Наибольшей энергетической эффективностью среди них обладает формат DP QPSK (DP 4QAM) (рис.1) [1–3].

Цифровая обработка детектированного электрического сигнала когерентного фотодетектора позволяет устранить или существенно ослабить линейные искажения оптического сигнала, вызванные хроматической дисперсией и поляризационной модовой дисперсией. Это дает возможность строить протяженные ВОЛС без периодической компенсации хроматической дисперсии. Максимальная длина ВОЛС на основе стандартного одномодового волокна (SSMF, Standard Single Mode Fiber) без

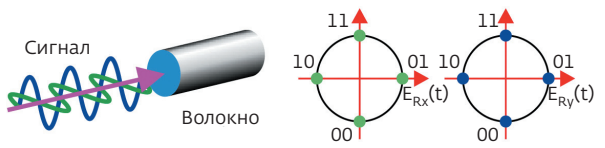

Рис.1. Сигнал формата DP-QPSK

оптических компенсаторов дисперсии превышает 4000 км [4].

Вновь строящиеся протяженные ВОЛС для когерентных систем связи целесообразно проектировать без компенсаторов дисперсии. Однако часто когерентные системы связи устанавливаются в уже работающих ВОЛС, в части DWDM-каналов которых продолжают работать традиционные системы связи с прямым детектированием и оптической компенсацией дисперсии. В обоих случаях на распространение сигнала могут оказывать существенное влияние нелинейные эффекты, которые приводят к снижению (штрафу по) OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio). Значение OSNR, требуемое для условно безошибочного приема сигнала, в реальной линии оказывается заметно выше, чем при прямом соединении передатчика с приемником. Например, для транспондера 100G фирмы "T8" требуемый OSNR на реальных линиях может достигать 17–20 дБ, в то время как требуемый OSNR BTB = 12,5 дБ.

Понимание механизма возникновения штрафов по OSNR, их корректный расчет необходимы для успешного проектирования ВОЛС. В связи с этим особую актуальность приобретает исследование характера деградации когерентных оптических сигналов под действием нелинейных эффектов в разных конфигурациях ВОЛС.

Классификация нелинейных эффектов

В линиях связи с компенсацией дисперсии принято выделять два типа нелинейных эффектов в DWDM-системах: внутриканальные и межканальные нелинейные эффекты. Внутриканальные эффекты вызваны нелинейным самовоздействием отдельных импульсов информационного потока и взаимодействием различных импульсов одного спектрального канала между собой. Межканальные эффекты вызваны нелинейным взаимодействием между двумя или более DWDM-каналами (Dense Wavelength-division multiplexing). Кроме того, нелинейные эффекты (как внутриканальные, так и межканальные) могут быть вызваны взаимодействием информационных сигналов с усиленным спонтанным излучением (ASE, Amplified Spontaneous Emission).

Нелинейные эффекты в DWDM-системах обусловлены различными проявлениями эффекта Керра (изменение показателя преломления волокна в зависимости от напряженности приложенного электрического поля):

- фазовая самомодуляция (ФСМ, Self-Phase Modulation, SPM);
- межканальная фазовая кросс-модуляция (ФКМ, Cross-Phase Modulation, XPM);
- внутриканальная фазовая кросс-модуляция (Intra-Channel XPM, IXPM);
- межканальное четырехволновое смешение (ЧВС, Four-Wave Mixing, FWM);
- внутриканальное четырехволновое смешение (Intra-Channel FWM, IFWM);
- поляризационная кросс-модуляция (Cross-Polarization Modulation, XPolM).

Относительный вклад различных видов нелинейного взаимодействия зависит как от символьной скорости системы связи (формата модуляции), так и от физических параметров линии связи. Воздействие межканальных нелинейных эффектов в DWDM-системах связи, как правило, наиболее существенно при канальных скоростях 10 Гбит/с и меньше. Внутриканальные нелинейные эффекты наиболее сильно проявляются при скоростях 40 Гбит/с и выше. Степень воздействия нелинейных эффектов определяется также величиной локальной дисперсии: как правило, в волокнах с меньшей величиной локальной дисперсии (D < 10 пс/(нм•км)) сильнее проявляются межканальные эффекты, а в волокнах с большей величиной локальной дисперсии (D > 10 пс (нм•км)) – внутриканальные эффекты.

Проявление нелинейных эффектов в системах связи

Проявление нелинейных эффектов в системах связи может выражаться в изменении формы сигнала, вызванном фазовыми и амплитудными нелинейными искажениями,

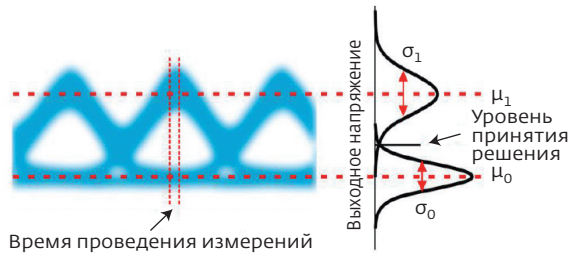

Рис.2. Проявление нелинейных искажений и нелинейного шума на глаз-диаграмме

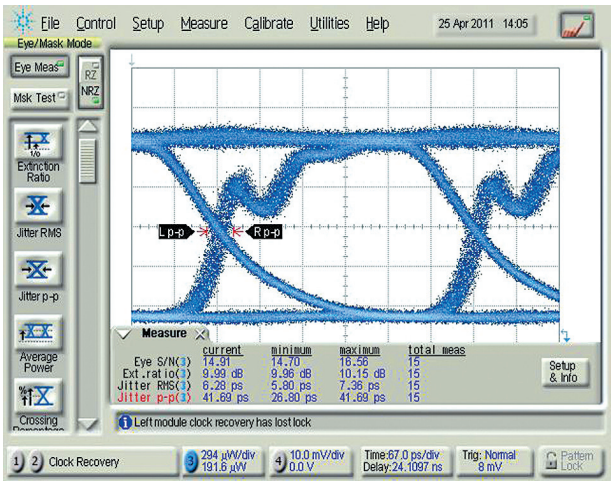

Рис.3. Глаз-диаграмма NRZ-сигнала с искажением формы импульса

и в нелинейном шуме – случайных отклонениях значений символа от его среднего значения. Проявление нелинейных искажений и нелинейного шума видно на глаз-диаграмме (рис.2).

Исследования показывают, что воздействие нелинейных эффектов на линию связи для различных конфигураций проявляется по-разному. В коротких ВОЛС или в длинных ВОЛС с компенсацией дисперсии нелинейные эффекты порождают амплитудные и фазовые искажения, которые проявляются в основном в виде искажений формы передаваемых оптических сигналов (рис.3). В длинных линиях без компенсации дисперсии характер воздействия нелинейных эффектов оказывается существенно иным и может быть описан как формирование и накопление нелинейного шума.

С практической точки зрения наиболее важен анализ воздействия нелинейных эффектов на когерентную линию связи для двух основных конфигураций ВОЛС: канала 100G в окружении каналов 10G в линиях с компенсацией дисперсии и канала 100G в линиях без компенсации дисперсии.

Первая конфигурация возникает при развитии существующих магистральных линий связи и постепенном увеличении их пропускной способности за счет замены некоторых каналов 10G на когерентные каналы 100G. Вторая конфигурация возникает при построении новых линий, сразу рассчитанных на когерентные системы со скоростями 100 Гбит/с и больше. Такие линии создаются без компенсаторов дисперсии, т.к. нелинейные искажения в них меньше.

Канал 100G в окружении каналов 10G с компенсацией дисперсии

В когерентных системах с поляризационным разделением каналов важную роль начинает играть поляризационная кросс-модуляция между каналами 100G. В ряде работ было показано, что XPolM – главный источник деградации сигнала в линиях с компенсацией дисперсии для формата DP QPSK [4–6], если в системе распространяются только каналы 100G. При этом поляризационная модовая дисперсия приводит к деполяризации каждой поляризации

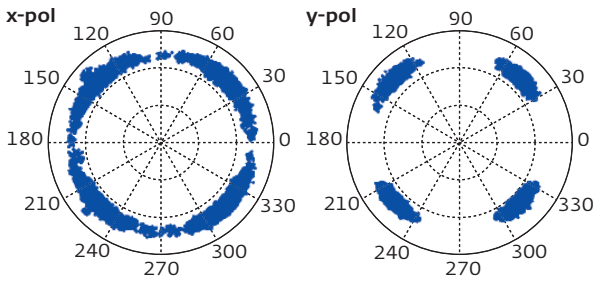

Рис.4. Искажения X- и Y-поляризации сигнала DP QPSK при распространении в линии совместно с сигналом OOK 10 Гбит/с с X-поляризацией

и к декорреляции поляризационных компонент DP QPSK-сигнала в процессе распространения по волокну, что ослабляет нелинейное воздействие XPolM [5–7].

В линиях, где сигналы в формате DP QPSK распространяются совместно с сигналами 10 Гбит/с в формате OOK, фазовая кросс-модуляция от каналов 10 Гбит/с вызывает гораздо больший штраф, чем XPolM [8]. На рис.4 показана фазовая диаграмма двух поляризационных компонентов сигнала DP QPSK, который распространяется совместно с сигналом 10 Гбит/с формата NRZ OOK, после прохождения линии длиной 10×100 км на волокне SSMF при использовании компенсации дисперсии. Представленная фазовая диаграмма – результат численного эксперимента [6]. Искажения для X-поляризации канала DP QPSK в два раза больше, чем для ортогональной Y-поляризации из-за ее совпадения с поляризацией излучения канала OOK.

Исследования показывают, что амплитудные форматы (OOK) в соседних каналах гораздо сильнее ухудшают качество 100G, чем фазовые форматы (например, 40G DPSK) [7]. При этом в волокнах со смещенной дисперсией NZDSF G.655 штраф существенно больше, чем в стандартном волокне SSMF G.652. Линия на волокне G.655 оказывается неработоспособной без защитной полосы шириной около 150 ГГц между каналами двух типов [9].

Таким образом, нелинейные искажения, создаваемые соседними каналами 10 Гбит/с, существенно ухудшают характеристики DP QPSK-канала 100 Гбит/с. Штраф для канала 100 Гбит/с, создаваемый соседними каналами 10 Гбит/с, заметно зависит от числа каналов в DWDM-системе. Важно отметить, что влияние на качество канала 100G оказывают не только соседние, но и удаленные по частоте каналы. Например, в линиях на основе волокна NZDSF необходимо учитывать воздействие до 40 соседних каналов.

Качество передачи сигнала 100G в окружении каналов 10G может быть улучшено в несколько раз за счет использования специальных алгоритмов обработки. Так, компанией "Т8" была реализована в DWDM-системе "Волга" новая технология обработки сигнала 100G, которая позволила увеличить запас по OSNR более чем в два раза. Параметры приемника могут автоматически изменяться (подстраиваться) в зависимости от характеристик приходящего сигнала; изменяя шаг времени, через который происходит подстройка, можно существенно снизить требуемый OSNR. Выигрыш по качеству сигнала при

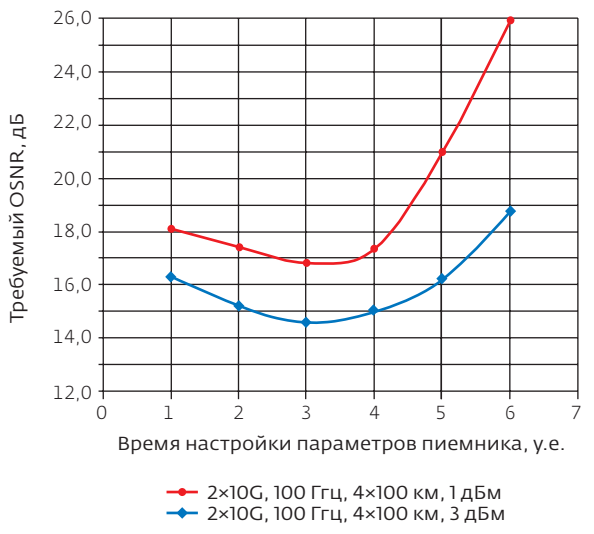

Рис.5. Зависимость требуемого OSNR от времени настройки параметров приемника

применении новых алгоритмов обработки составил 3–5 дБ (рис.5). Для типовой конфигурации (канал 100G в окружении двух каналов 10G мощностью 1 дБм) изменение времени настройки с шести до трех условных единиц позволяет снизить требуемый OSNR на 4,5 дБ (нижняя линия). Эффект проявляется еще сильнее при увеличении мощности каналов 10G до 3 дБм (верхняя линия).

Полученный результат позволяет добиться значительного эксплуатационного запаса по OSNR даже в тех случаях, где ранее требовалась регенерация сигнала. Применение нового алгоритма обработки сигналов позволяет широко использовать упомянутую DWDM-систему для апгрейда существующих DWDM-линий со скоростями 10 Гбит/с путем добавления каналов 100G.

Нелинейные искажения в линиях без компенсации дисперсии

В ВОЛС без компенсации дисперсии оптическое поле приобретает случайный характер из-за дисперсионных эффектов, приводящих к пространственному перекрытию сотен или тысяч передаваемых символов. Вследствие большой накопленной дисперсии воздействие нелинейных эффектов ослабляется, становится случайным по своей природе и проявляется в оптическом приемнике как шум (рис.6). На этом рисунке

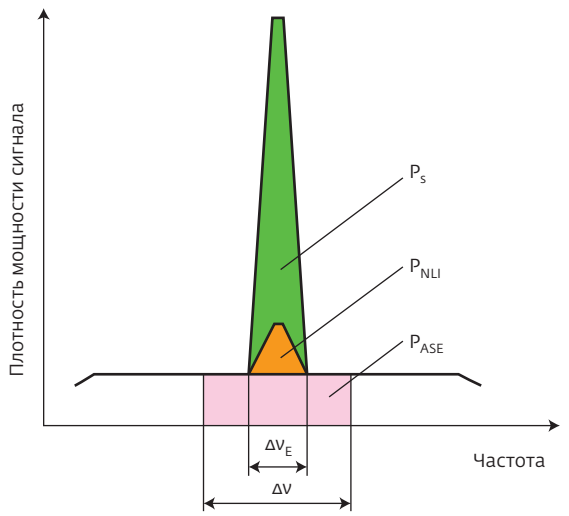

Рис.6. Спектр нелинейного шума совпадает со спектром сигнала, поэтому его прямое измерение обычным оптическим анализатором спектра невозможно

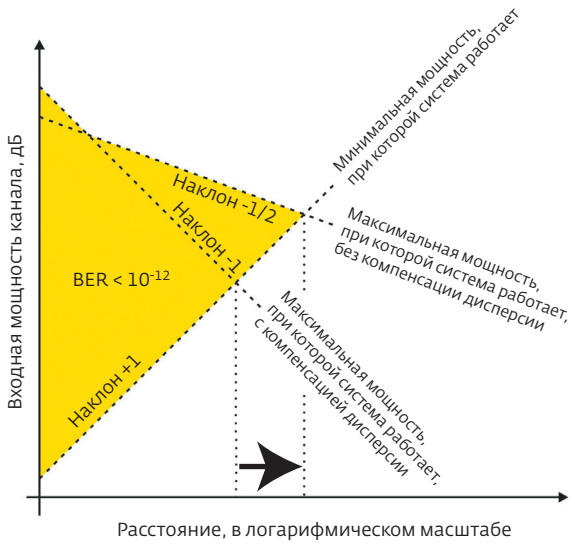

Рис.7. Допустимая входная мощность канала для многопролетных линий с компенсацией и без компенсации дисперсии, в зависимости от протяженности линии

P_S – мощность сигнала, P_{NLI} – мощность нелинейного шума, P_{ASE} – мощность усиленного спонтанного излучения.

Нелинейный шум не регистрируется при измерениях OSNR с помощью оптического анализатора спектра, поскольку его спектр совпадает со спектром сигнала или незначительно превосходит его. Именно поэтому требуемый OSNR, измеренный с помощью оптического анализатора спектра на реальной линии, оказывается выше, чем требуемый OSNR BTB. Если предположить, что нелинейный шум гауссов и линейно суммируется с усиленным спонтанным излучением, то:

$$OSNR_{BER} = \frac{P_s}{P_{ASE} + P_{NLI}},$$

что эквивалентно:

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_{ASE}} + \frac{1}{OSNR_{NLI}},$$

откуда:

$$P_{NLI} = P_s\left(\frac{1}{OSNR_{BER}} - \frac{1}{OSNR_{ASE}}\right).$$

Эта формула может быть использована для косвенного измерения мощности нелинейного шума. Измеримыми параметрами реальной линии можно считать BER (Bit Error Ratio) до процедуры FEC (Forward Error Correction) и $OSNR_{ASE}$, который измеряется оптическим анализатором спектра. $OSNR_{BER}$ вычисляется на основе измеренного BER с помощью калибровочной кривой транспондера, устанавливающей взаимосвязь OSNR и BER до FEC при прямом подключении передатчика к приемнику.

Исследования показывают, что в линиях без компенсации дисперсии нелинейный штраф накапливается медленнее по длине линии, что позволяет достичь существенно большей дальности ВОЛС (рис.7). На этом рисунке стрелка показывает выигрыш в дальности передачи для систем без компенсации дисперсии. Запас по OSNR позволяет оценить максимальную дальность передачи, ограниченную уровнем шумов, величинами порядка 6–8 тыс. км.

Итоги

Исследование нелинейных эффектов в скоростных когерентных каналах связи имеет важное практическое значение для внедрения линий 100G на магистральных сетях. Знание природы и характера проявления нелинейных искажений позволяет разработать оптимальные алгоритмы обработки, ослабляющие деградацию информационных сигналов в реальных линиях связи. Различные алгоритмы обработки сигнала, реализованные

в транспондерах и мукспондерах "Волга", позволяют существенно улучшить качество сигнала 100G при работе как в существующих DWDM-линиях в окружении каналов 10G, так и во вновь создаваемых линиях без компенсации дисперсии, предназначенных для эксплуатации когерентных систем связи с канальной скоростью 100 Гбит/с и выше.

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. **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.
5. **Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р.** Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. № 9. С. 17–19.
6. **Chongjin Xie.** Impact of nonlinear and polarization effects on coherent systems // Optics Express. 2011. Vol. 19. Issue 26. P. B915–B930.
7. **Renaudier J., Bertran-Pard O., Mardoyan H., Tran P., Charle G., Big S., Lefrançois M., Lavigne B., Augé J.-L., Pirou L.,** and **Courtois O.** 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.
8. **Carena A., Curri V., Bosco G., Poggiolini P., Forghieri F.** Modeling of the impact of non-linear propagation effects in uncompensated optical coherent transmission links // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30. No. 10. P. 1524–1539.
9. **Renaudier J., Bertran-Pardo O., Charlet G., Salsi M., Bertolini M., Tran P., Mardoyan H., Bigo S.** Investigation on WDM nonlinear impairments arising from the insertion of 100-Gb/s coherent PDM-QPSK over legacy optical networks // IEEE Photonics Technology Letters. 2009. Vol. 21. No. 24. P. 1816–1818.