

# Улучшение оптического качества сигнала при нелинейном взаимодействии спектральных каналов

В.А.Конышев, А.В.Леонов, О.Е.Наний, А.Г.Новиков, И.И.Шихалиев, В.Н.Трещиков, Р.Р.Убайдуллаев

*Исследуется эффект подавления вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в многоканальных DWDM-системах за счет нелинейного перекрестного взаимодействия каналов и его влияние на оптическое качество сигнала в линии связи ( $1/OSNR_R$ ). Экспериментально исследованы одно-, трех- и пятиканальные системы с каналами 10 Гбит/с NRZ. Показано, что оптическое качество сигнала в трех- и пятиканальных системах превышает оптическое качество сигнала в одноканальной системе. Обнаруженное явление объясняется тем, что фазовая кросс-модуляция вызывает расширение спектра сигнала и увеличение порога ВРМБ. Это, в свою очередь, делает более заметным эффект улучшения оптического качества сигнала за счет фазовой самомодуляции.*

**Ключевые слова:** многоканальные DWDM-системы, нелинейное взаимодействие каналов, оптическое качество сигналов, фазовая кросс-модуляция, фазовая самомодуляция.

## 1. Введение

Пропускная способность волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) ограничена нелинейными искажениями, вызванными эффектом Керра. Нелинейные искажения сигнала в ВОЛС в общем случае ведут к увеличению коэффициента ошибок и ограничивают максимальную дальность передачи и пропускную способность линии [1–13]. В однопролетных линиях связи наиболее низкопороговым нелинейным эффектом, снижающим качество работы систем связи, является ВРМБ [14]. Для ослабления нелинейных эффектов разрабатываются специальные волокна с малой керровской нелинейностью [15] и увеличенным порогом ВРМБ [16].

Важно отметить, что, как показано в работах [17–19], нелинейная фазовая самомодуляция (SPM) в ВОЛС с амплитудной модуляцией может улучшить качество передаваемого сигнала. Природа этого явления заключается в совместном воздействии SPM и хроматической дисперсии. Также ранее было показано, что фазовая кросс-модуляция (XPM) в многоканальных DWDM-системах может расширять спектр сигнала и увеличивать Q-фактор сигнала

за счет подавления ВРМБ [20]. Данный эффект подробно исследован в работе [21] для многоканальной однопролетной DWDM-системы с канальной скоростью 10.7 Гбит/с (сигнал NRZ), определены зависимости коэффициента ошибок BER от числа каналов и межканального расстояния. Исследования проводились преимущественно для волокна Corning Vascade EX1000 стандарта G.654 со смещенной длиной волны отсечки. Таким образом, было установлено, что при совместном действии нескольких нелинейных эффектов влияние одних нелинейных эффектов может устранять негативное влияние других.

В упомянутых выше работах [18–21] мерой качества сигнала являлась величина коэффициента BER или Q-фактора (они однозначно связаны между собой). В то же время для практических задач проектирования сетей связи более важным параметром является требуемая величина OSNR ( $OSNR_R$ )\*. В частности, было показано, что оптимизация сетей связи по принципу максимизации запаса по OSNR ( $OSNR_M \equiv OSNR_L/OSNR_R$ ) позволяет строить более надежные сети связи, чем оптимизация их по принципу минимизации BER [6].

Кроме того, в отличие от Q-фактора, который в линейном режиме передачи прямо пропорционален мощности сигнала, величина  $OSNR_R$  в линейном режиме не зависит от мощности сигнала. Благодаря этому его удобнее использовать для исследования влияния нелинейных эффектов на сигнал, поскольку изменение  $OSNR_R$  в зависимости от мощности сигнала показывает влияние нелинейных эффектов в чистом виде. Иными словами, параметр  $OSNR_R$  более точно, чем BER или Q-фактор, показывает качество самого сигнала, не замаскированное на фоне изменяющегося отношения сигнал/шум. Поэтому в качестве величины, выражающей оптическое качество сигнала, мы будем использовать  $1/OSNR_R$ . Чем меньше  $OSNR_R$ , тем выше оптическое качество сигнала, а когда

**В.А.Конышев.** ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1, оф. 826; Институт истории естествознания и техники им. С.И.Вавилова РАН, Россия, 109012 Москва, Старопанский пер., 1/5

**А.В.Леонов, А.Г.Новиков, И.И.Шихалиев, Р.Р.Убайдуллаев.** ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1, оф. 826; e-mail: leonov.av@t8.ru

**О.Е.Наний.** ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1, оф. 826; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

**В.Н.Трещиков.** ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1, оф. 826; Филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1

Поступила в редакцию 9 февраля 2016 г., после доработки – 25 августа 2016 г.

\* Минимальное оптическое отношение сигнал/шум, которое требуется транспондеру для приема сигнала в ВОЛС с определенным уровнем битовых ошибок (например, BER =  $10^{-12}$ ).

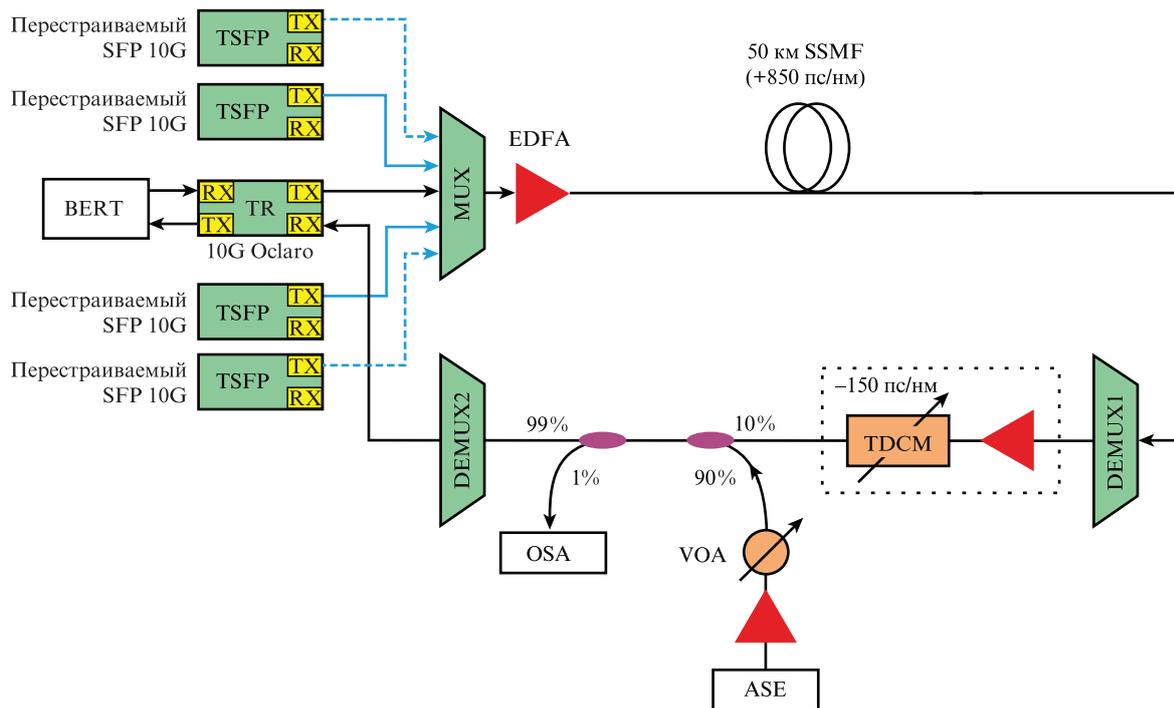


Рис.1. Схема экспериментальной однопролетной ВОЛС на основе SSMF длиной 50 км.

$OSNR_R$  возрастает, можно говорить о снижении оптического качества. При этом мы воспринимаем Q-фактор как параметр, выражающий информационное качество сигнала.

В работах [20, 21] не выполнялись прямые измерения оптического качества сигнала в зависимости от входной мощности сигнала и других параметров в нелинейном режиме. Значения BER нельзя пересчитать в значения  $OSNR_R$  без знания дополнительных параметров эксперимента\*\*, а такой пересчет в работах [20, 21] не был выполнен. Таким образом результаты [20, 21] экспериментально показывают, что кросс-модуляция в многоканальных системах устраняет негативное воздействие ВРМБ, но не дают оснований утверждать, что при этом улучшается оптическое качество сигнала.

Для практического применения обнаруженных ранее эффектов улучшения информационного качества сигнала в многоканальных системах необходимо прямое исследование влияния XPM на оптическое качество сигнала  $1/OSNR_R$ . Такое исследование выполнено в настоящей работе для однопролетных DWDM-систем высокой мощности с канальной скоростью 10 Гбит/с. Экспериментально показано, что в однопролетной ВОЛС с сигналом 10 Гбит/с OOK NRZ оптическое качество передаваемого сигнала в исследуемом DWDM-канале может увеличиваться при добавлении одного или нескольких соседних DWDM-каналов. Обнаруженное явление объясняется тем, что фазовая кросс-модуляция вызывает расширение спектра сигнала и увеличение порога ВРМБ. Это в свою очередь позволяет

в большей степени проявиться эффекту улучшения оптического качества сигнала за счет фазовой самомодуляции.

## 2. Изучение аномального поведения каналов 10 Гбит/с

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Измерялась зависимость требуемого  $OSNR$  от мощности канала в линии из SSMF-волокна длиной 50 км (рис.2). Широкополосный шум усиленного спонтанного излучения (ASE) от источника шума подмешивался в линию через переменный оптический аттенюатор (VOA). Для измерения  $OSNR_R$  при определенном уровне входной мощности мощность ASE-шума постепенно повышалась с помощью VOA до момента отказа линии (потери синхронизации), затем мощность ASE-шума немного понижалась для восстановления работоспособности линии с

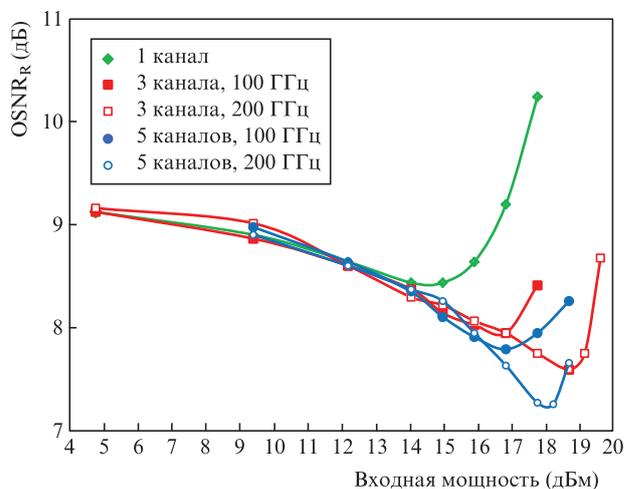


Рис.2. Зависимость  $OSNR_R$  от входной мощности канала  $P_{in}$ .

\*\* Q-фактор связан однозначным соответствием с BER, а калибровочная кривая транспондера однозначно связывает BER с  $OSNR_{BER}$ . В свою очередь,  $1/OSNR_{BER} = 1/OSNR_L + 1/OSNR_{NL}$ , а  $1/OSNR_R = 1/OSNR_{BTB} - 1/OSNR_{NL}$  [6]. Таким образом, экспериментальные значения BER в принципе можно пересчитать в  $OSNR_R$ , но только если в ходе эксперимента выполнялось измерение  $OSNR_L$ , а также если известно  $OSNR_{BTB}$  и калибровочная кривая транспондера.

требуемым уровнем битовых ошибок ( $BER = 10^{-12}$ ); значение OSNR в этот момент регистрировалось как  $OSNR_R$ . Определение OSNR осуществлялось с помощью оптического анализатора спектра (OSA). Отказ линии и восстановление ее работоспособности регистрировались с помощью BER-тестера (BERT).

В конце линии использовался перестраиваемый модуль компенсации дисперсии (TDCM) Teгахion для подстройки дисперсии на входе в транспондер к оптимальному значению ( $\sim 700$  пс/нм), а также оптический усилитель на эрбиевом волокне (EDFA) для подстройки мощности сигнала на входе в транспондер к оптимальному значению, известному из предыдущих экспериментов (от  $-10$  до  $-15$  дБм). Второй демультиплексор (DEMUX2) в конце линии служил для «обрезания» широкополосного ASE-шума и снижения полной мощности на входе в приемник до приемлемого уровня.

Исследуемый канал 10 Гбит/с генерировался модулем 10G производства Oclarо (режим кодирования UFEC) и всегда находился в середине группы передаваемых каналов. Соседние каналы генерировались перестраиваемыми SFP-модулями 10G. Было исследовано несколько конфигураций: один канал, три канала и пять каналов с частотными межканальными интервалами 100 и 200 ГГц (см. рис.2). Входные мощности всех каналов были одинаковыми.

Зависимость  $OSNR_R$  от входной мощности  $P_{in}$  в одноканальном случае соответствовала теоретической модели. Фазовая самомодуляция расширяет спектр сигнала с ростом его мощности, соответственно сокращает импульсы и увеличивает амплитуду при передаче бита 1. Это ведет к некоторому снижению  $OSNR_R$ , прежде чем он начинает расти из-за различных нелинейных эффектов. Такой эффект ранее наблюдался в [17–19].

В то же время увеличение оптического качества сигнала при добавлении соседних каналов является аномальным. Как видно из рис.2, требуемый OSNR для рабочего канала может быть улучшен на величину до 1.2 дБ путем добавления четырех соседних каналов с интервалом 200 ГГц (минимальный  $OSNR_R = 8.4$  дБ для одноканальной конфигурации и 7.2 дБ для пятиканальной); снижение минимального значения  $OSNR_R$  также наблюдалось в других конфигурациях с дополнительными каналами (два соседних канала с интервалом 100 и 200 ГГц, четыре соседних канала с интервалом 100 ГГц).

Для того чтобы продемонстрировать аномальное поведение  $OSNR_R$  в исследуемом канале в явном виде, был проведен еще один эксперимент. Входная мощность в исследуемом канале устанавливалась постоянной на уровне +18 дБм (т.е. в нелинейном режиме), тогда как мощность в соседних каналах варьировалась. Исследовались несколько конфигураций: один соседний канал на расстоянии 100 и 200 ГГц, два соседних канала на расстоянии 200 ГГц (рис.3).

В отсутствие соседних каналов  $OSNR_R$  в исследуемом канале с  $P_{in} = 18$  дБм на 1.3 дБ больше, чем в линейном режиме. (Линейный режим достигается, когда входная мощность канала менее 5 дБм.) Таким образом, одноканальная конфигурация с входной мощностью +18 дБм имеет заметный нелинейный «штраф» (+1.3 дБ). При добавлении соседних каналов и постепенном увеличении их мощности  $OSNR_R$  в исследуемом канале снижается. Это наблюдается как в двухканальной, так и в трехканальной конфигурации для интервалов 100 и 200 ГГц. Макси-

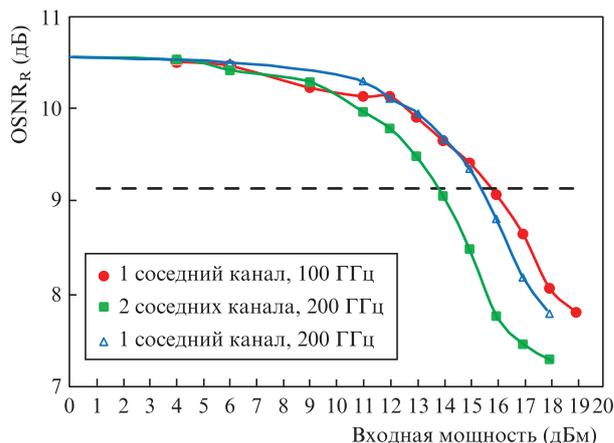


Рис.3. Зависимость  $OSNR_R$  в исследуемом канале от входной мощности в соседних каналах. Входная мощность исследуемого канала 10 Гбит/с постоянна (+18 дБм). Штриховая линия показывает уровень  $OSNR_R$  в линейном режиме.

мальный выигрыш в  $OSNR_R$  в нелинейном режиме составляет 3.5 дБ и достигается за счет перекрестного взаимодействия исследуемого канала с соседними.

### 3. Обсуждение наблюдаемого явления

Мы предположили, что наблюдаемое увеличение  $OSNR_R$  при росте мощности  $P_{in}$  вызвано в основном не SPM-эффектом, а ВРМБ, который начинает влиять на сигнал при более низких мощностях, чем SPM. Однако в многоканальной линии порог ВРМБ сдвигается из-за XPM-эффекта. Принципиальная схема предлагаемого объяснения наблюдаемого явления представлена на рис.4.

В одноканальной линии главным ограничивающим фактором по мощности является ВРМБ. В многоканальной линии эффект ВРМБ подавляется за счет фазовой кросс-модуляции, в результате порог ВРМБ сдвигается в область более высоких значений  $P_{in}$ . Из-за подавления ВРМБ воздействие фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции становится более заметным. При росте мощности сигнала  $P_{in}$  SPM-эффект сначала улучшает оптическое качество сигнала, а затем ухудшает. При наличии ВРМБ этот эффект маскируется; при сдвиге порога ВРМБ, вызванном XPM-эффектом, улучшение качества сигнала за счет SPM становится заметным.

Фазовая кросс-модуляция сама по себе ухудшает качество сигнала, причем чем меньше межканальный интервал, тем сильнее деградация сигнала. Это хорошо видно на рис.2 и 3: в многоканальной линии с межканальным интервалом 200 ГГц достигается более высокое оптиче-

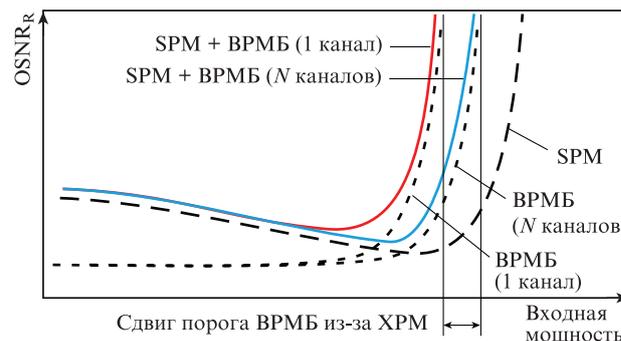


Рис.4. Сдвиг порога ВРМБ из-за XPM-эффекта.

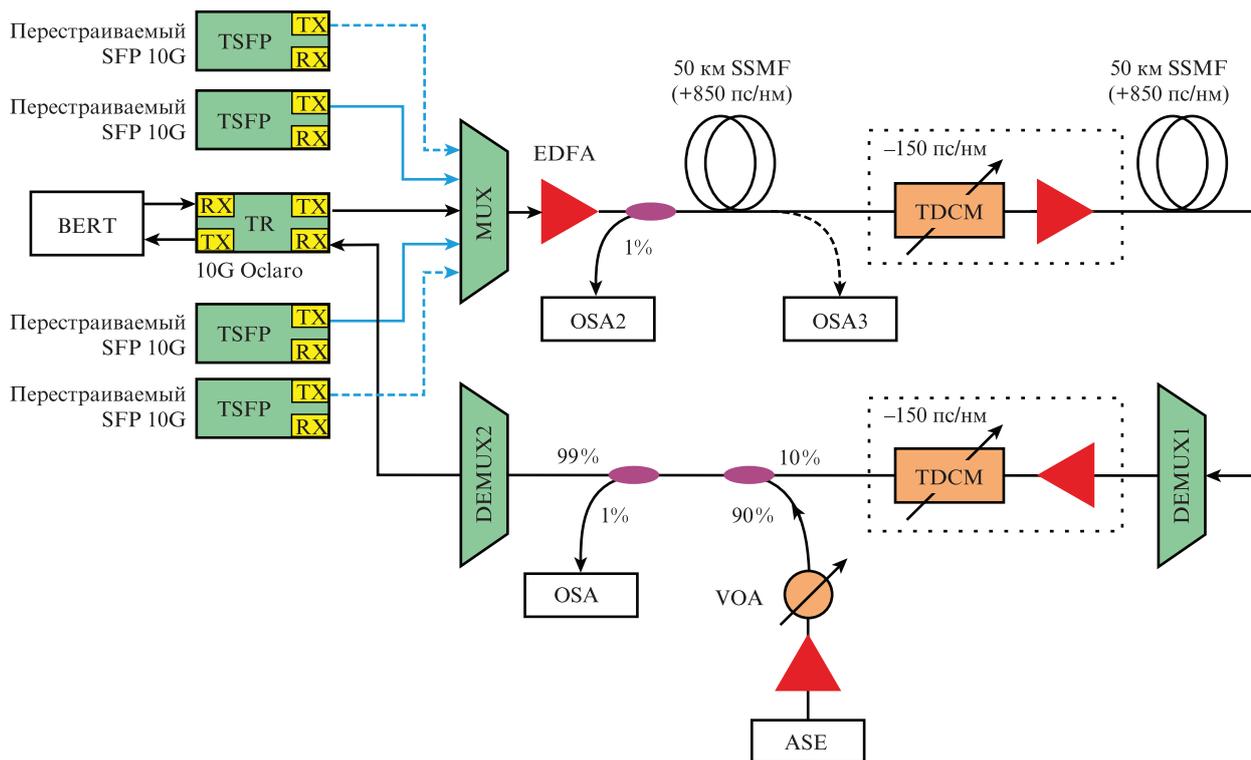


Рис.5. Схема экспериментальной установки на основе двух пролетов из SSMF длиной по 50 км.

ское качество сигнала, чем в линии с интервалом 100 ГГц. В обоих случаях XPM-эффект устраняет негативное воздействие ВРМБ, однако при интервале 100 ГГц «штраф» из-за воздействия XPM больше, чем при интервале 200 ГГц.

Для проверки предложенного объяснения наблюдаемых закономерностей было выполнено два эксперимента. Во-первых, непосредственно измерен порог ВРМБ в однопролетной линии; во-вторых, исследована двухпролетная конфигурация. Нелинейные эффекты, такие как SPM и XPM, в многопролетных конфигурациях накапливаются, тогда как порог ВРМБ остается неизменным. Таким образом, исследование двухканальной конфигурации позволяет проверить наше предположение.

#### 4. Исследование влияния ВРМБ

Для проверки сделанных предположений мы изменили экспериментальную установку, включив второй пролет с SSMF-волоком длиной 50 км (рис.5). Мощность сигнала в обоих пролетах была одинаковой. Для полной компенсации дисперсии после первого пролета был добавлен второй TDCM Teгахion. На входе в первый пролет был также установлен 1%-ный ответвитель, чтобы измерять рассеянную назад мощность с помощью оптического анализатора спектра OSA2. Выходная мощность после первого пролета измерялась напрямую путем переключения сигнала на оптический анализатор спектра OSA3.

Для прямого измерения порога ВРМБ определялись зависимости от входной мощности в первом пролете выходной мощности (OSA3) (рис.6) и рассеянной назад мощности (OSA2) (рис.7). Все эксперименты выполнялись в одноканальной конфигурации.

Зависимость рассеянной назад мощности от входной мощности в милливаттах показана на рис.8.

Как видно из рис.6–8, ВРМБ может значительно влиять на сигнал 10 Гбит/с, если входная мощность превы-

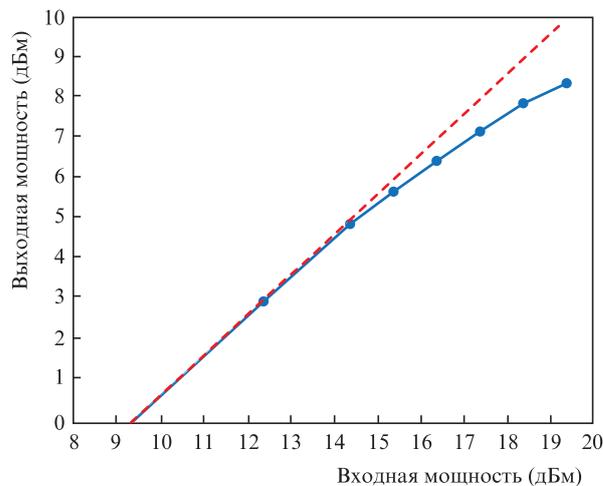


Рис.6. Зависимость выходной мощности в первом пролете (один канал) от входной мощности (штриховая кривая – расчет без учета ВРМБ, сплошная кривая – экспериментальные измерения).

шает 16–17 дБм (40–50 мВт). Ухудшение оптического качества сигнала (увеличение  $OSNR_R$ ) в линии с каналом 10 Гбит/с (см. рис.2) начинается примерно при том же уровне входной мощности. Это подтверждает предположение, что увеличение  $OSNR_R$  в исследуемом канале 10 Гбит/с вызывается в основном ВРМБ.

#### 5. Сравнение однопролетной и двухпролетной линий

Хорошо известно, что в многопролетных линиях с компенсацией дисперсии влияние нелинейных эффектов (SPM и XPM) накапливается. Таким образом, можно ожидать, что влияние этих эффектов на оптическое качество сигнала в двухпролетной линии будет таким же, как

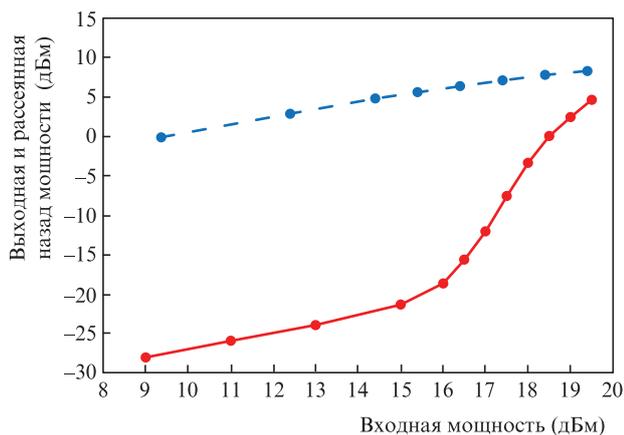


Рис.7. Зависимости выходной мощности (штриховая кривая) и рассеянной назад мощности (сплошная кривая) от входной мощности в первом пролете (один канал).

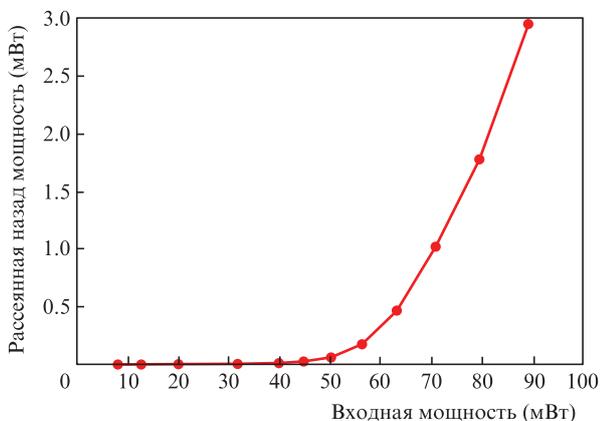


Рис.8. Зависимость рассеянной назад мощности от входной мощности в первом пролете (один канал).

в однопролетной, если полная мощность сигнала в двух пролетах линии примерно равна мощности сигнала в однопролетной линии. Или, другими словами, если мощность сигнала в каждом пролете двухпролетной линии примерно на 3 дБ меньше, чем мощность сигнала в однопролетной линии.

В отличие от нелинейных эффектов, вызванных эффектом Керра (SPM и XPM), порог ВРМБ в однопролетной и двухпролетной линиях практически одинаков. Таким образом, можно ожидать, что снижение оптического качества сигнала в двухпролетной линии из-за влияния ВРМБ должно начаться примерно при таком же уровне мощности сигнала в каждом пролете, как и в однопролетной линии.

Измеренные зависимости требуемого OSNR от входной мощности для однопролетной и двухпролетной линий показаны на рис.9. Как видно из графиков, экспериментальные результаты хорошо согласуются с нашими предположениями: влияние ВРМБ становится заметным для одного канала в однопролетной линии, если входная мощность превышает 15 дБм (30 мВт), а для одного канала в двухпролетной линии, если входная мощность в каждом пролете превышает те же 15 дБм. Это доказывает, что рост требуемого OSNR при росте входной мощности (правая часть графиков на рис.9) вызывается в основном ВРМБ.

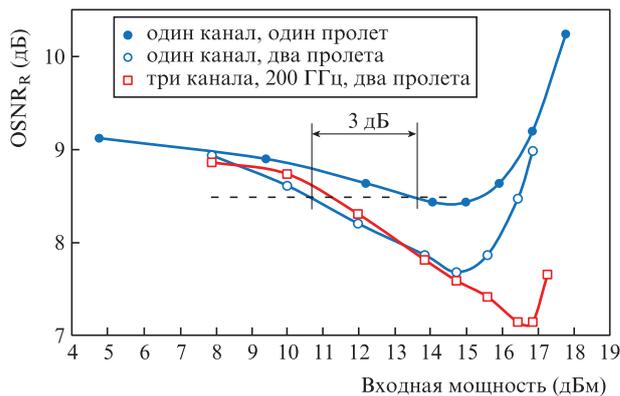


Рис.9. Зависимость требуемого OSNR от входной мощности (для двухпролетных конфигураций указана входная мощность в каждом канале).

В то же время, один и тот же уровень оптического качества сигнала (например,  $OSNR_R = 8.5$  дБ) достигается в двухпролетной линии при уровне входной мощности в каждом канале, примерно на 3 дБ меньше, чем в однопролетной. Таким образом, снижение требуемого OSNR при увеличении входной мощности (левая часть графиков на рис.9) вызывается в основном нелинейным SPM-эффектом, который в многопролетных линиях накапливается.

Добавление соседних каналов ведет к еще большему снижению минимального значения  $OSNR_R$ . Аномальное поведение OSNR при добавлении соседних каналов можно объяснить, предположив, что влияние ВРМБ («загиб» графика вверх) при наличии нескольких каналов становится заметным при более высоких значениях мощности, чем в случае одного канала.

## 6. Заключение

Предложена новая методика исследования влияния нелинейных эффектов на сигнал, основанная на измерении оптического качества сигнала ( $1/OSNR_R$ ). Применение этой методики позволило экспериментально продемонстрировать увеличение оптического качества DWDM-канала 10 Гбит/с при добавлении соседних каналов. Таким образом, показано, что известный ранее эффект подавления ВРМБ за счет нелинейного перекрестного взаимодействия каналов приводит к увеличению оптического качества сигнала и может использоваться на практике при проектировании линий связи.

Физический механизм наблюдаемого эффекта заключается в том, что влияние XPM на исследуемый канал ведет к расширению спектра сигнала в этом канале и, соответственно, к снижению ВРМБ в нем. Сам по себе XPM-эффект ухудшает оптическое качество сигнала, однако сопутствующее ему снижение ВРМБ позволяет заметно улучшить оптическое качество сигнала за счет SPM, причем, по крайней мере для некоторых исследованных конфигураций, это улучшение оказывается преобладающим. Таким образом, наблюдаемое «аномальное» поведение – улучшение качества сигнала при добавлении соседних каналов – является следствием совместного воздействия трех нелинейных эффектов (ВРМБ, SPM и XPM).

Вопрос о возможности увеличения качества оптического сигнала в длинных линиях связи при воздействии

нелинейных эффектов очень актуален. С одной стороны, нелинейные эффекты ограничивают максимальную пропускную способность ВОЛС, но, с другой стороны, именно нелинейные эффекты потенциально позволяют преодолеть границу максимальной скорости передачи информации в линейных системах, определяемую формулой Шеннона [22–24]. Однако вычисление шенноновской емкости различных нелинейных каналов связи до сих пор является открытой проблемой.

1. Essiambre R.J., Kramer G., Winzer P.J., Foschini G.J., Goebel B. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 662 (2010).
2. Maher R. et al. *Sci. Rep.*, **5**, 8214 (2015).
3. Winzer P.J. *IEEE Photon. J.*, **4**, 647 (2012).
4. Gurkin N.V., Mikhailov V., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 095103 (2014).
5. Bosco G., Carena A., Curri V., Poggiolini P., Forghieri F. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22**, 1129 (2010).
6. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R. R. *Opt. Commun.*, **355**, 279 (2015).
7. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. *Opt. Commun.*, **349**, 19 (2015).
8. Redyuk A.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Mikhailov V., Fedoruk M.P. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 025101 (2015).
9. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Makovejs S., Akopov S.G., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Sleptsov M. *Opt. Express*, **22**, 22308 (2014).
10. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 075107 (2013).
11. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдулаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **43**, 550 (2013).
12. Гуркин Н.В., Конышев В.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдулаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **45**, 69 (2015).
13. Юшко О.В., Наний О.Е., Редюк А.А., Трещиков В.Н., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **45**, 75 (2015).
14. Лихачев М.Е. и др. *Квантовая электроника*, **44**, 1043 (2014).
15. Наний О.Е., Павлова Е.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 757 (2009).
16. Дианов Е.М., Карасик А.Я., Лучников А.В., Пилипецкий А.Н. *Квантовая электроника*, **16**, 752 (1989).
17. Listvin V.N., Treshchikov V.N. *DWDM systems*. (Moscow: Tekhnosfera, 2015).
18. Elbers J.P. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 276 (2000).
19. Bellotti G., Bertaina A., Bigo S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 824 (1999).
20. Horiuchi Y., Yamamoto S., Akiba S. *IEEE Electron. Lett.*, **34**, 390 (1998).
21. Downie J.D., Hurley J. *Opt. Express*, **15**, 9527 (2007).
22. Turitsyn K.S., Turitsyn S.K. *Opt. Lett.*, **37**, 3600 (2012).
23. Sorokina M., Turitsyn S. *Nature Commun.*, **5**, 3861 (2014).
24. Sorokina M., Sygletos S., Ellis A., Turitsyn S. *Opt. Lett.*, **40**, 3117 (2015).