

# СИСТЕМЫ SDH УРОВНЯ STM-1024: ЭКСПЕРИМЕНТЫ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

**С**истемы SDH используют для передачи сигнала одну оптическую несущую. Их развитие, с момента создания иерархии SDH в 1988 году, шло по пути увеличения скорости передачи данных. Эта скорость, в соответствии с законами иерархии SDH [1], составляла сначала 155 Мбит/с (1-й уровень синхронного транспортного модуля – STM-1), а затем возрастала в четыре раза от уровня к уровню. Сегодня скорость промышленных SDH-систем достигла 40 Гбит/с (STM-256). Следующий шаг – 160 Гбит/с (STM-1024) – дается с трудом. Об этом и повествует краткий обзор лабораторных систем этого класса, разработанных за последние годы.

## ПРОБЛЕМЫ

Основные проблемы, которые пришлось преодолевать для достижения нужных показателей скорости и длины пролета (или секции), общеизвестны [1, 2]. Это затухание сигнала, вызванное рэлеевским рассеянием, и уменьшение интенсивности сигнала из-за хроматической дисперсии (CD), а на высоких скоростях и из-за поляризационной модовой дисперсии (PMD). Сказываются и нелинейные эффекты в оптическом волокне (ОВ) при большой мощности входного сигнала, нужной для достижения максимальной длины пролета/секции. Для скоростей до 40 Гбит/с эти проблемы, можно считать, преодолены, так как серийные мультиплексоры уровня STM-256 уже эксплуатируются на линиях связи. Последние несколько лет специалисты пытаются разрешить данные проблемы для следующей скорости иерархии SDH – 160 Мбит/с (STM-1024).

Рэлеевское рассеяние [1] – это неизбежное зло для оптических систем на всех скоростях. Оно преодолевается использованием третьего окна прозрачности (диапазон длин волн 1525–1575 нм) и современных ОВ, где получено затухание порядка 0,17–0,18 дБ/км, а также оптических усилителей (ОУ), компенсирующих потери на длине пролета/секции.

Хроматическая дисперсия компенсируется либо выбором ОВ типа DSF с нулевой дисперсией на частоте оптической несущей (1550 нм), либо (если выбрано или проложено ОВ другого типа) применением модуля компенсации дисперсии (DCM) нужного типа, позволяющего компенсировать накопленную на длине пролета/секции дисперсию [1], или других средств компенсации дисперсии (например, оптических или электронных), или, наконец, применением схемы ОВ с управлением дисперсией [3].

Поляризационная модовая дисперсия пока еще трудно поддается компенсации [4], но ее влияние и раньше можно было минимизировать путем выбора подходящего ОВ и замены формата двоичного кодирования без возврата к нулю (NRZ) на формат с возвратом к нулю (RZ) [5]. Уже появились и сообщения о возможности автоматической компенсации PMD [6].

Влияние нелинейных эффектов, вызванных мощным сигналом, вводимым в ОВ, можно уменьшить, используя ОВ с большим сечением. Но получаемый при этом выигрыш невелик (из-за ограничений на диаметр сердцевины) и такое решение обычно не используют. Вместо этого ограничивают уровень сигнала, подаваемого в ОВ, и применяют тандем ОУ EDFA-Raman (ОУ на ОВ, легированном эрбием, и ОУ на эф-



фекте Рамана), вытягивая за их счет нужный уровень сигнала на приеме. Этого же можно достичь, снижая требования к допустимому уровню ошибок (BER) на приемной стороне (вход демультиплексора) и добиваясь нужной надежности приема за счет упреждающего кодирования, корректирующего ошибки (FEC), а также выбирая оптимальный модуляционный формат для представления двоичных данных [3].

Выбор оптимального модуляционного формата для высокоскоростных систем в последнее время стал предметом особого внимания. Так, для систем с одной несущей в одних работах [7, 8] демонстрируют эффективность форматов CS-RZ (RZ с подавленной несущей). В других [4, 9] говорят об эффективности формата DBM (дубинарная модуляция) или его обобщения PSBT (двоичная передача с фазированием и фильтрацией сигнала), в частности, версии BL-PSBT (PSBT с общим ограничением по ширине полосы), или же chirпованного формата DBM (CDBT) [10]. В большинстве последних работ [3, 4, 11–13], однако, демонстрируются результаты, свидетельствующие в пользу сочетания форматов RZ-PSK: RZ-DPSK, RZ-QPSK, RZ-DQPSK, RZ-8DPSK (RZ с различными типами фазовых манипуляций: дифференциальной, квадратурной, дифференциальной квадратурной и 8-фазной дифференциальной). В этих работах не только показана эффективность данных методов в противостоянии различным типам дисперсии (CD и PMD), но и их меньшая чувствительность к уровню накопленного усиленного спонтанного излучения (ASE) [1]. Отмечается, что в общем случае эти методы модуляции характеризуются более высоким порогом, при котором нелинейности ОВ влияют на качество передачи.

Недавно (2003 г.) был предложен подход, конкурирующий с оптимизацией модулирующего формата и основанный на применении оптического преобразования Фурье (OFT) во временной области [14]. OFT в комбинации с использованием ограниченного процессом преобразования оптических импульсов (TL-импульсов) позволяет оперировать при передаче спектральным, а не временным, представлением оптического импульса, которое практически не искажается при трансляции. Форма TL-импульсов, как показано в [14], описывается функцией гиперболического секанса (sech), как и для солитонов [15]. Для их существования необходима среда с отрицательной дисперсией групповых скоростей (GVD) [15]. Реализация этой идеи позволила группе исследователей [16] получить феноменальные результаты, описанные ниже.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Экспериментальные исследования одноканальных оптических систем передачи со скоростью 160 Гбит/с начались на рубеже последних столетий. Охватить все посвященные им публика-

ции невозможно, однако рассмотренные ниже источники достаточно хорошо покрывают период с 2000 по 2007 год.

Одной из первых была работа 2000 года [17], где описывались результаты лабораторных модельных экспериментов по передаче в формате RZ потока данных со скоростью 160 Гбит/с по стандартному ОВ G.652 на длине волны 1550 нм. Достигнутая дальность передачи составила 160 км. Примерно этот же состав авторов через год сообщил [18] о результатах натурального эксперимента по передаче потока 160 Гбит/с по такому же волокну, но проложенному в полевых условиях, на той же длине волны. Достигнутая длина передачи составила 116 км, что на 27,5% меньше (это, видимо, объясняется ухудшением дисперсионных характеристик ОВ в реальных условиях). При этом демодуляция проводилась путем демультиплексирования потока 160 Гбит/с в формате оптического TDM (OTDM) в потоки 40 Гбит/с в формате электрического TDM (ETDM).

Большую длину передачи (200 км) удалось достичь коллективу экспериментаторов в том же году [19], используя аналогичную лабораторную модель, но с другим типом волокна (NZDSF) [1]. Спустя два года (2003 г.) длина передачи потока 160 Гбит/с сигнала по стандартному волокну G.652 была увеличена до 240 км [20], но уже благодаря методу управления дисперсией, основанному на чередовании ОВ с положительной и отрицательной дисперсией.

## Система с форматом сигнала CS-RZ

Существенный прогресс в увеличении длины передачи в 2003 году все же был достигнут только благодаря прогрессивным модуляционным форматам, в частности – CS-RZ [8]. В этом эксперименте сигнал 160 Гбит/с формировался по стандартной процедуре OTDM из четырех 40-Гбит/с компонентных сигналов (трибов). Для высокоскоростных систем с подавлением несущей было важно контролировать оптические фазы каждого TDM-канала, для чего применялись четыре электроабсорбционных модулятора (EAM). Они работали по



Рис. 1 Оптический спектр выходного 160 Гбит/с сигнала: а) формат CS-RZ; б) формат синфазного RZ

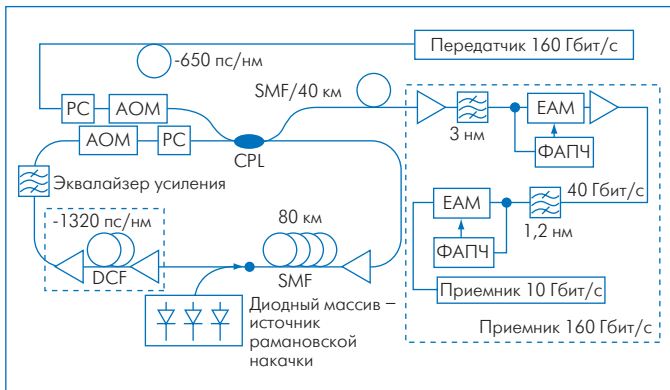


Рис.2 Блок-схема эксперимента по передаче 160 Гбит/с сигнала в формате CS-RZ

схеме с бит-интерливингом [1] и формировали сначала пару 80-Гбит/с TDM-сигналов, а затем сигнал 160 Гбит/с в двух вариантах: CS-RZ (с начальными оптическими фазами 0 и 180°) и синфазный (с фазой 90°) RZ (см. их спектры на рис.1).

Схема эксперимента (рис.2) включала маршрутную петлю (для многократного прохождения сигнала), состоящую из одномодового ОВ (ОМ ОВ) длиной 80 км и волокна для компенсации дисперсии (DCF), обрешенного двумя усилителями EDFA для компенсации вносимого затухания. Для увеличения длины передачи сигнал 160 Гбит/с подавался на вход системы chirпованным (путем включения ОВ с отрицательной GVD, равной -650 пс/нм, которая компенсировалась перед приемником отрезком стандартного ОМ ОВ), а также дополнительно усиливался на выходе распределенным (за счет диодного массива DRA – источника рамановской накачки) усилителем Рамана. В приемнике сигнал демодулировался в два приема: 160→40 и 40→10 Гбит/с. В результате эксперимента (рис.3) максимальная длина передачи составила 640 км для формата CS-RZ и 560 км для синфазного RZ формата.

### Система с форматом сигнала RZ-DPSK

В работе [12] представлены результаты эксперимента по передаче на 650 км (5 пролетов по 130 км) сигнала со скоростью 170,6 Гбит/с в формате RZ-DPSK (скорость сигнала 160

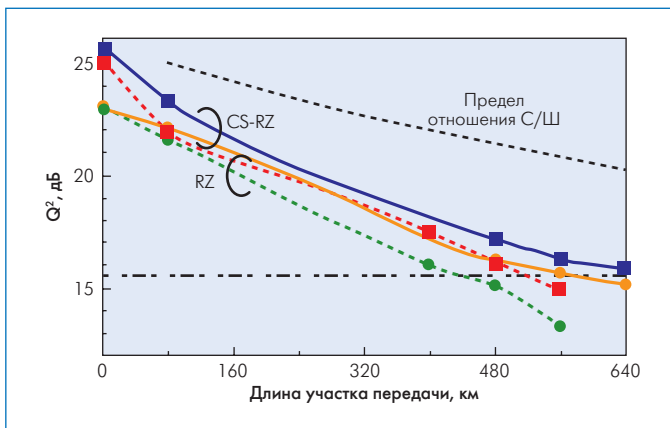


Рис.3 Измеренный показатель качества Q (добротность) для форматов CS-RZ и RZ для 10-Гбит/с каналов

Гбит/с была формально увеличена на 7% с учетом возможности последующего применения FEC с кодом Рида-Соломона для увеличения длины передачи).

В эксперименте (рис.4) передатчик был представлен настраиваемым лазерным диодом с синхронизацией мод (TMLL), излучающим 2-пс импульсы с длиной волны 1551,5 нм и частотой повторения 10,7 ГГц, которые мультиплексируются с помощью оптического мультиплексора (Pulse OMUX) в агрегатный сигнал 42,6 ГГц (рассматриваемый далее как оптический триб [1]). Четыре таких триба подаются на модуляторы (источник данных – псевдослучайная двоичная последовательность ПСП (PRBS) длиной 2<sup>7</sup> - 1 бит) и линейные кодеры, представленные манипулятором DPSK, а затем – на двухступенчатый OTDM-мультиплексор Data OMUX, формирующий агрегатный сигнал 170,6 Гбит/с. В отличие от эксперимента с форматом сигнала CS-RZ [8], в данном случае модуляторы не обеспечивали фиксированных фазовых соотношений между OTDM-трибами.

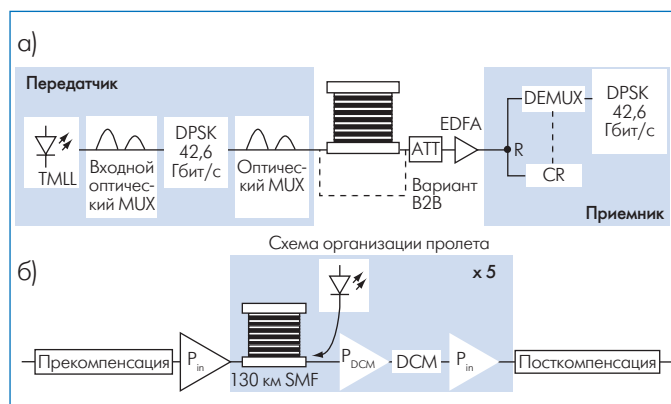
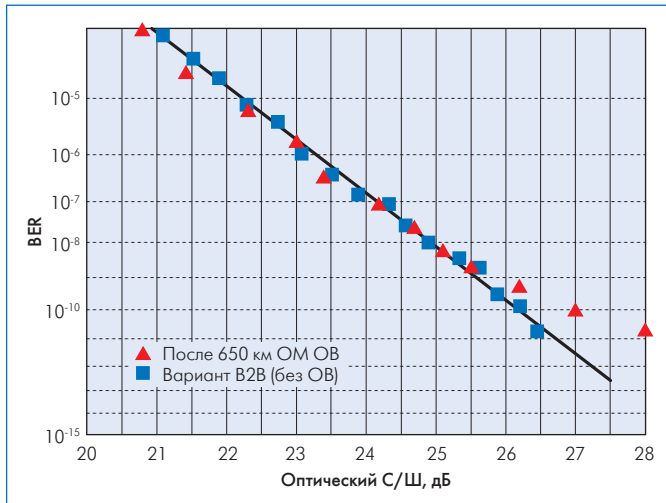


Рис.4 Эксперимента по передаче 160 Гбит/с сигнала в формате RZ-DPSK: а) блок-схема, б) схема организации пролета ОМ ОВ длиной 130 км

Сигнал 170,6 Гбит/с, прошедший пять пролетов стандартного ОМ ОВ (рис.4б), демультимплексировался до уровня 42,6-Гбит/с сигнала DPSK стандартным EAM с помощью блока восстановления синхронизации (CR). Сигналы DPSK детектируются балансным PSK-приемником, настроенным по уровню оптического отношения сигнал/шум (С/Ш) в точке R с помощью аттенюатора АТТ (см. рис.4а), и демодулируются интерферометром Маха-Цендера.

Схема организации одного пролета стандартного ОМ ОВ длиной 130 км (см. рис.4б) включает прекомпенсатор дисперсии (-180 пс/нм); контроллер поляризации, позволяющий настроить требуемый уровень PMD; связку усилителей EDFA-Raman в начале и конце пролета; модуль компенсации дисперсии DCM с усилителем EDFA (PDCM); посткомпенсатор дисперсии (сегмент ОВ с положительной дисперсией), позволяющий свести к нулю накопленную на длине пролета дисперсию.

На рис.5 приведены данные измерений зависимости уровня BER от отношения оптического С/Ш для двух случаев: непосредственного соединения передающего и приемного



**Рис. 5** Зависимость реализуемого BER от уровня оптического отношения C/Ш

модулей системы (Back-to-Back – В2В) и с учетом прохождения сигналом 170,6 Гбит/с пяти ОВ-пролетов длиной по 130 км.

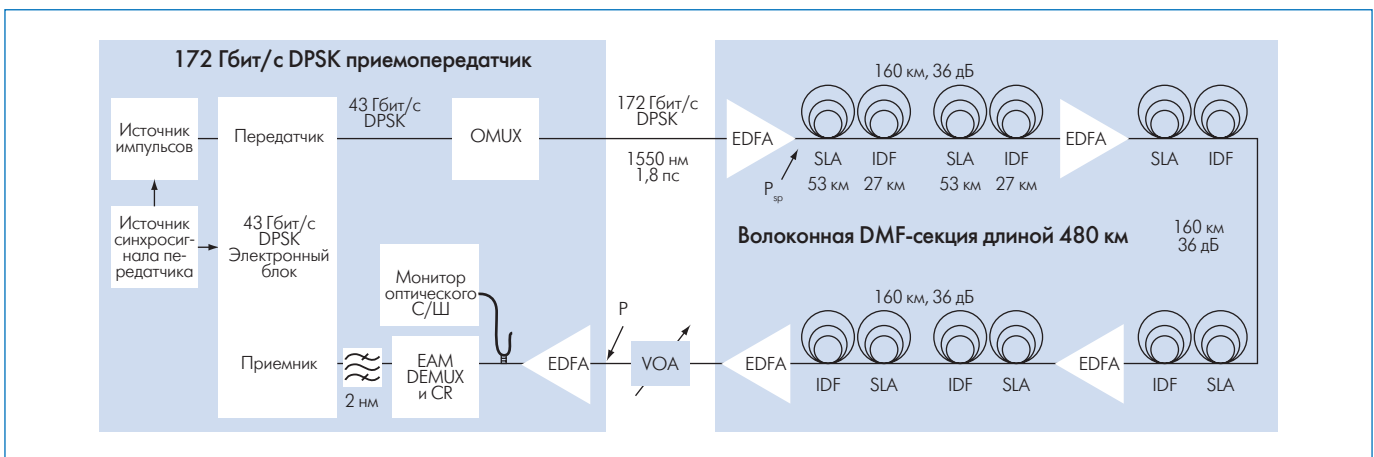
**Система с форматом сигнала RZ-DPSK и кодированием FEC**

На предыдущий эксперимент формально похожи и исследования по передаче OTDM-сигнала в формате RZ-DPSK [3]. Они отличаются тем, что в эксперименте DPSK и FEC не эмулировались, а были реализованы с помощью модулей се-

рийной аппаратуры. Линия передачи ВОЛС (длиной 480 км) была составлена из трех пролетов по 160 км, использующих схему ОВ с управлением дисперсией (DMF). Затухание порядка 36 дБ/пролет компенсировалось только усилителями EDFA. Суть DMF в использовании перемежающихся сегментов ОВ одного типа, но с положительным или отрицательным дисперсионным параметром D [15], совпадающим в каждой точке по модулю величины и модулю угла наклона (последнее более важно для систем WDM).

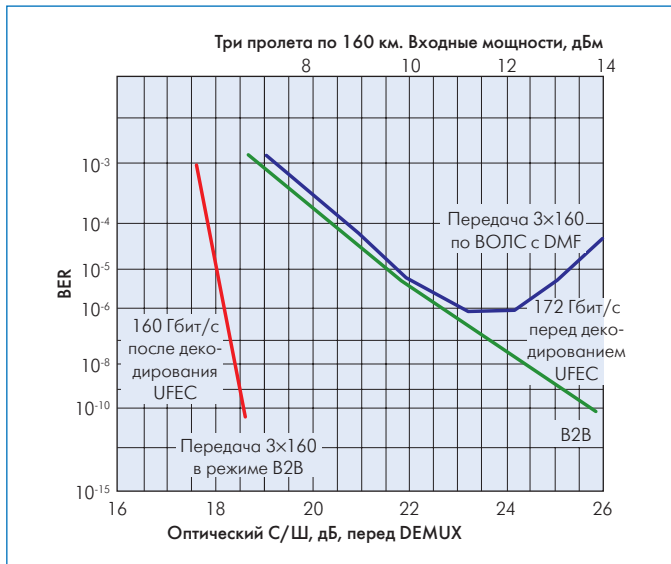
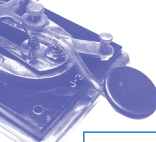
Схема эксперимента (рис.6) включала приемопередатчик линейного кода DPSK и собственно звено передачи. В передатчике с помощью лазера с синхронизацией мод TMLL с длиной волны 1553 нм и блока умножения с фазовой стабилизацией создается несущий поток оптических импульсов частотой 43 ГГц и шириной импульсов 1,8 пс. Этот поток модулируется источником сигнала с помощью двухтактного модулятора Маха-Цендера и кодируется передатчиком, который включает кодер линейного кода DPSK и усовершенствованный кодер упреждающей коррекции ошибок (UFEC), который дает дополнительный выигрыш 2 дБ в отношении C/Ш по сравнению со стандартным кодером FEC типа Рида-Соломона (255,239) при BER=10<sup>-16</sup>.

Так как в качестве источника сигнала обычно используется двоичная ПСП, а характеристики передачи системы чувствительны к ее длине [3], то для UFEC-кодера в



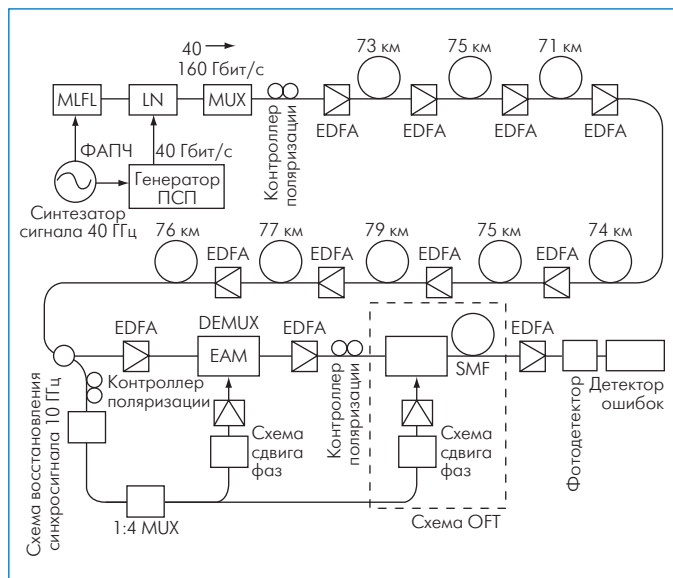
**Рис. 6** Блок-схема эксперимента по передаче 160 Гбит/с сигнала в формате RZ-DPSK с кодированием FEC





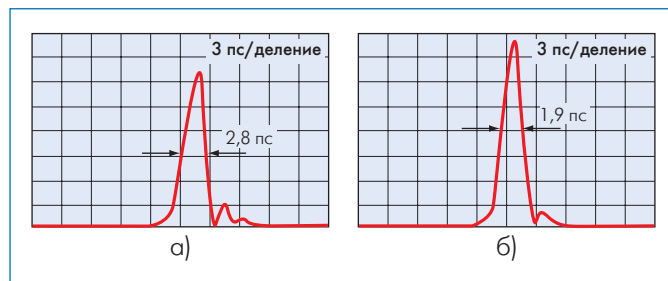
**Рис.7** Зависимость BER от оптического отношения С/Ш (вариант В2В) при использовании UFEC: отношение С/Ш подстраивается путем изменения затухания перед приемником после прохождения 480 км и соответствует мощности на входе пролета

этом эксперименте использовалась максимально длинная ПСП ( $2^{31}$  - 1 бит). В этой связи отметим, что фактически характеристики передачи чувствительны не к длине ПСП, а к ее периоду, который определяет корреляционные свойства ПСП и может быть, при неудачном выборе схемы ее генерации, много меньше ее длины (об особенностях выбора ПСП см. работу [21]). Из-за использования UFEC-кодера DPSK-сигнал, передаваемый на скорости 43 Гбит/с, терял структуру (и свойства) ПСП. Этот сигнал на выходе мультиплексировался в поток 172 Гбит/с ( $4 \times 43$  Гбит/с) с помощью оптического мультиплексора OMUX, сконструированного так, чтобы сохранить хотя бы структуру ПСП длиной  $2^7$  - 1 в потоке 172 Гбит/с. Это обеспечивало достаточную некоррелированность оптических трибов 43 Гбит/с, сформированных по технологии OTDM.



**Рис.8** Блок-схема эксперимента по передаче 160 Гбит/с сигнала с использованием OFT

Поток данных передавался через три 160-км пролета по волокну типа Ultrawave компании OFS Denmark с управлением дисперсией. Каждый пролет состоял из последовательно соединенных двух пар сегментов, состоящих из ОБ с большой площадью поперечного сечения (SLA) длиной 53 км и положительной дисперсией  $D = 20$  пс/нм/км и ОБ с отрицательной дисперсией (IDF)  $D = -40$  пс/нм/км длиной 27 км. Длина каждой пары составляла 80 км, а двух пар – 160 км. Средние потери на пролете порядка 36 дБ компенсировались усилителями EDFA. В эксперименте мощность потока  $P_{sp}$  на входе пролетов менялась от 6 до 14 дБм (средняя дисперсия GVD для пролета была порядка 0,4 пс). Отметим, что в этом эксперименте на линии передачи не использовались контроллеры поляризации и не предпринимались меры по ослаблению влияния PMD или какие-то дополнительные устройства компенсации хроматической дисперсии.



**Рис.9** Форма импульсов без использования OFT (а) и с использованием OFT (б)

В приемном тракте сигнал усиливался с помощью EDFA и подавался на демультиплексор, состоящий из схемы восстановления синхронизации на основе EAM [22] и оптического переключателя, также построенного на базе EAM. Полученный в результате поток 43 Гбит/с фильтровался полосовым оптическим фильтром с полосой пропускания 2 нм, а затем детектировался в приемной части приемопередатчика. Она включала интерферометр с линией задержки 23,3 пс, балансный детектор и UFEC-декодер. Параметры приемника автоматически настраивались на оптимальный уровень BER, требуемый для UFEC. В режиме прямого соединения блоков (B2B) оптическое отношение С/Ш подстраивалось переменным оптическим аттенуатором (VOA), включенным между передатчиком и предусилителем приемной части.

На рис.7 приведены значения BER в зависимости от отношения С/Ш для варианта измерения B2B до и после передачи на 480 (3x160) км. Для получения  $BER = 10^{-9}$  при скорости 172 Гбит/с, кодировании UFEC и варианте B2B требуется  $C/N=24,8$  дБ, тогда как при скорости 43 Гбит/с достаточно 18,3 дБ. Соответственно, для получения такого же BER, но применительно к исходному потоку данных 160 Гбит/с, требуется отношение  $C/N=18,3$  дБ (а при 40 Гбит/с – 13,3 дБ).

Оптимальные показатели системы были получены при уровне сигнала на входе пролетов 11,5 дБм (что соответству-

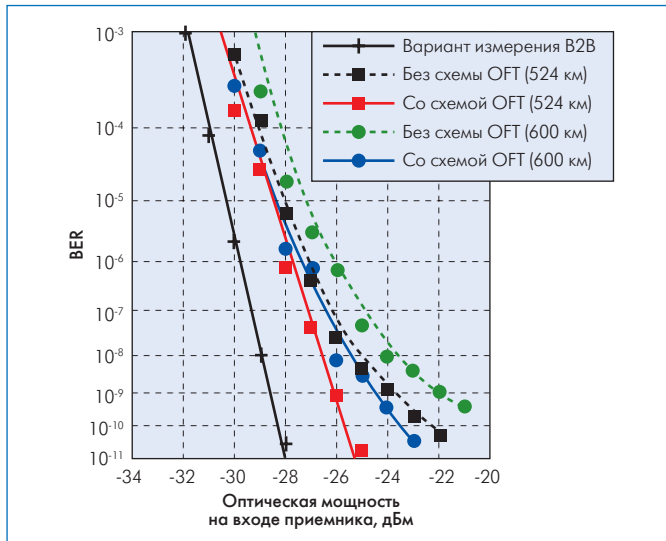


Рис. 10 Зависимость BER от мощности принятого оптического сигнала для разных вариантов

ет уровню BER  $10^{-6}$  при кодировании кодом типа UFEC). При мощности на входе пролета выше 12 дБм сигнал начинает деградировать из-за нелинейных искажений в ОВ, что ухудшает показатели всей системы в целом. Типичными значениями BER были  $(1,3...2,8) \cdot 10^{-6}$  при отношении С/Ш = 22 дБ. Эти результаты указывают, что для скорости 160 Гбит/с, даже применяя сверхдлинные пролеты (160 км), можно эксплуатировать ВОЛС длиной не меньше 1000 км [3, 23].

### Система с прямым и обратным оптическим преобразованием Фурье

При разработке описанных выше 160-Гбит/с систем передачи все исследователи столкнулись с проблемой высокой чувствительности систем к дисперсии (CD, PMD) и ее изменениям во времени. Дисперсия вызывала существенные искажения формы сигнала. Единственным решением проблемы было сведение всех дисперсий к нулю. Поэтому интересным было бы любое новое решение, позволяющее добиться тех же результатов, но без специальных мер по компенсации влияния дисперсии (CD и PMD) на форму сигнала. Такое решение предлагала система с OFT, описанная в работе [16] и основанная на результатах работы [14].

Идея заключалась в том, чтобы преобразовать на входе системы с помощью OFT исходный временной сигнал, форма которого искажается дисперсией, в частотный сигнал, спектр которого не меняется под действием дисперсии, передать его на нужное расстояние, а на выходе системы снова преобразовать его, но с помощью обратного OFT, во временной сигнал, форма которого воспроизведет исходную, т.е. останется практически неизменной.

Результаты эксперимента показывают [16], что этого можно достичь, если применить OFT не к исходным временным сигналам, а к упомянутым выше ТЛ-импульсам, или чирп-импульсам (импульсам с наложенной линейной частотной модуляцией – ЛЧМ) [15]), пропущенным через

дисперсионную среду определенной длины (с отрицательной дисперсией групповых скоростей  $D=1/K$ , где  $K$  – скорость изменения частоты). Выполнение этих ограничений гарантирует, что выход OFT будет пропорционален спектру исходного сигнала, а значит при обратном OFT исходный временной сигнал будет точно восстановлен.

В эксперименте [16] (рис.8) источником оптических импульсов служил волоконный лазер с синхронизацией мод MLFL, использующий ФАПЧ. Он генерировал гауссовские ТЛ-импульсы длительностью 1,7 пс на длине волны 1550 нм с тактовой частотой 40 ГГц. Поток импульсов затем модулировался модулятором (LN) по методу амплитудной манипуляции (On-Off Keying - OOK) сигналом ПСП длиной  $2^{15} - 1$ . Четыре потока 40 Гбит/с на выходе оптически мультиплексировались (MUX) в OTDM-сигнал 160 Гбит/с, состояние поляризации которого оптимизировалось контроллером поляризации.

Сигнал 160 Гбит/с передавался через восемь пролетов длиной около 75 км каждый (общая длина ВОЛС – 600 км) по схеме ОВ с управлением дисперсией: чередовались ОВ типа стандартный ОМ ОВ и ОВ с отрицательной дисперсией. Затухание в пролетах компенсировались оптическими усилителями типа EDFA. На выходе системы сигнал демультиплексировался (DEMUX) с помощью EAM и подавался на схему OFT [14]. Сигнал синхронизации восстанавливался аналогично описанному выше [22].



На рис.9 показаны формы сигнала, не подвергнутого преобразованию OFT (а), и подвергнутого такому преобразованию (б) (регистратор – оптический осциллограф). Видно, что в первом случае сигнал уширился с 1,7 до 2,8 пс и приобрел хвост (внизу справа), а во втором случае он уширился только до 1,9 пс и не имел хвоста. Результаты измерений (рис.10) показывают, что выигрыш по мощности на приеме при BER =  $10^{-9}$  в случае использования OFT составляет 2 дБ (при передаче на 600 км).

Таким образом, различные эксперименты продемонстрировали, что сегодня для передачи одноканального сигнала на скорости 160 Гбит/с (stm-1024) на большие расстояния можно использовать различные форматы модуляции. Однако для достижения высоких показателей систем передачи следует применять определенные решения:

- схемы с управлением дисперсией ОВ на участке передачи или (по крайней мере) схемы компенсации дисперсии (CD, PMD);
- коды с коррекцией ошибок (типа FEC);
- схемы контроля состояния поляризации;
- оптические усилители для компенсации вносимых затуханий и др.

Отметим, что все проведенные эксперименты свидетельствуют о возможности безошибочной передачи данных на расстояние от 480 до 650 км, которое при определенных условиях может быть увеличено до 1000 км.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Слепов Н.Н.** Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е испр. изд. – М.: Радио и связь, 2003. – 468с.
2. **Слепов Н.** Современные оптоволоконные технологии. Чем ударить по бездорожью. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, №1, с.20-23.
3. **R.Ludwig et al.** 160 Gb/s RZ-DPSK OTDM-transmission over 480 km using 160 km repeater spans and advanced FEC. – OFC 2007. Paper OWE-4.
4. **S.Herbst et al.** Final report on physical layer network issues. – IST IP NOBEL – "Next generation Optical network for Broadband European Leadership". Phase 2. 2008. – D5.5\_final[2].pdf
5. **H.Shunnerud et al.** A comparison between NRZ and RZ data formats with respect to PMD-induced system degradation. – OFC 2001. Paper WT3-1.
6. **S.Kieckbusch.** Automatic Compensation of PMD and Chromatic Dispersion in a 160 Gb/s Transmission Experiment. – ECOC 2006. Paper Th3.5.1.
7. **L.Moller.** Generation of 160 Gb/s Carrier-Suppressed Return-to-Zero Signals. – ECOC 2003. Paper Mo363.
8. **Hitoshi Murai et al.** Single Channel 160 Gbit/s Carrier-Suppressed RZ Transmission over 640 km with EA Modulator

- based OTDM Module. – ECOC 2003. Paper Mo364.
9. **G.Charlet et al.** Cost-optimized 6.3 Tbit/s capacity terrestrial link over 17x100 km using Phase-Shaped Binary Transmission in a conventional all-EDFA SMF-based system. – OFC 2003. Paper PD25.
10. **M.Wichers, W.Rosenkranz.** Chirped duobinary transmission (CDBT) for mitigating the self-phase modulation limiting effect. – OFC 2001. Paper WDD43-1.
11. **A.Gnauck et al.** 1-Tb/s (6x170.6 Gb/s) transmission over 2000-km NZDF using OTDM and RZ-DPSK format. – IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, vol.15, p.1618.
12. **S.Weisser et al.** 170 Gbit/s single-polarization transmission over 650 km SSMF with 130 km spans using RZ-DPSK. – Proc. OFC 2005. Paper OFF4.
13. **M.Zaacks et al.** Demonstration of 1000 km 43 Gb/s RZ-DPSK transmission through a 50 GHz channel spaced WSS. – OFC 2007, Paper JWA92.
14. **M.Nakazawa et al.** Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and transform-limited ultra short pulses. – ECOC-2003. Paper PDP Th4.3.8.
15. **Агравал Г.** Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. под ред. П.В. Мамышева. – М.: Мир, 1996. – 324 с.
16. **T.Hirooka et al.** 160 Gbit/s-600 km OTDM Transmission Using Time-domain Optical Fourier Transformation. – ECOC 2006. Paper Tu1.5.4.
17. **R.Ludwig et al.** Unrepeated 160 Gbit/s RZ single channel transmission over 160 km of standard fiber at 1.55 mkm with hybrid MZI optical Demux. – Proc. ECOC 2000. Paper 6.1.3.
18. **U.Feiste et al.** 160 Gbit/s transmission over 116 km field-installed fiber using 160 Gbit/s OTDM and 40 Gbit/s ETDM. – OFC 2001. Paper ThF3-1.
19. **J.Yu et al.** 160 Gb/s single-channel unrepeated transmission over 200 km of NZDSF. – Proc. ECOC 2001, PD.M.1.10.
20. **J. Berger et al.** 160 Gbit/s Transmission over Dispersion Managed Fibre Set. – ECOC 2003. Paper Mo366.
21. **N.N.Slepov.** A Portable Package for Assessment of the Uniformly Distributed Random Number Generators. "Advances in Modeling and Analysis", pt.A, vol.13, n.1, pp.43-53. – AMSE Press, Paris, 1992.
22. **C.Boerner et al.** 320 Gbit/s clock recovery with electro-optical PLL using a bidirectionally operated electroabsorption modulator as phase comparator. – Proc. OFC 2005, Paper OTuO3.
23. **Людвиг Р.** и др. Передача OTDM-сигнала со скоростью 160 Гбит/с на расстояние 480 км с кодом коррекции ошибок. – Фотоника, 2008, №5, с.22–25.