

НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОЛОКНУ ДЛЯ ВОЛС ДАЛЬНЕЙ СВЯЗИ

Зельда Гиллс (Zelda Gills) и Артур Джуди (Arthur Judy)

Компания OFS, Отдел проектирования систем волоконной оптики
2000 Northeast Expressway, Norcross, Georgia 30071

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Новые передовые технологии позволили увеличить объем передаваемой по волокну информации за счет увеличения скорости передачи данных в канале, увеличения числа каналов и полных длин кабелей систем связи. Плотное спектральное уплотнение (DWDM), эрбиевые волоконные усилители (EDFAs), и временное уплотнение каналов (TDM) при низких скоростях передачи Гбит/с — все эти зрелые технологии коммерчески доступны и успешно эксплуатируются. Более высокие скорости TDM дополнительно снижают стоимость передачи бита в каждом новом поколении изделий, причем экономнее всего оказываются решения с наибольшей доступной скоростью передачи для связи типа «точка-точка».

Так как кабели ВОЛС обычно переживают 4-5 поколений аппаратуры передачи данных, правильный выбор волокна для оптической линии связи минимизирует проблемы недостаточной пропускной способности и позволяет обеспечить максимум доступных функций в оптической сети связи. В частности, линии ВОЛС, способные работать на скоростях 40 Гбит/сек, построены в основном на волокнах с ненулевой дисперсией (NZDF), причем наблюдается тенденция быстрого увеличения доли NZDF волокон в глобальных сетях.

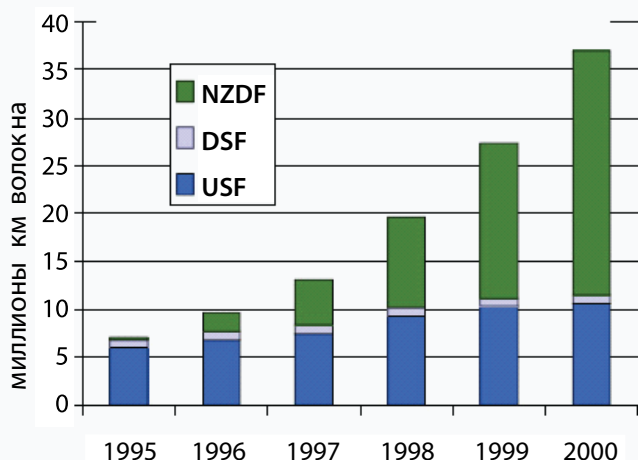
ТЕХНОЛОГИИ

Основные технологии обеспечения широкополосной связи либо были проверены экспериментально, либо в некоторых случаях уже находятся в коммерческой эксплуатации, они позволяют создать модернизируемые решения, обеспечивающие повышение пропускной способности на дальних расстояниях связи.

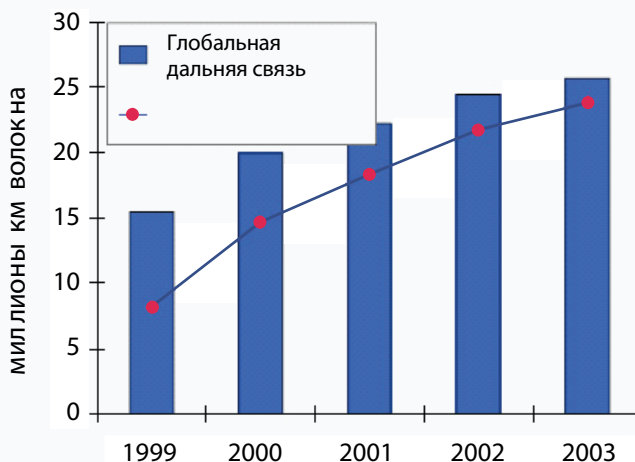
Распределенное усиление на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), или «рамановское усиление» или «ВКР-усиление») позволяет дополнить возможности эрбиевых волоконных усилителей EDFA и обеспечить улучшение качества оптического сигнала, необходимое для практической реализации систем как обычной, так и сверхдальней оптической связи. Поскольку в распределенном рамановском усилении в качестве усиливающей среды используется волокно линии связи, то для достижения оптимальной эффективности усиления необходимо волокно с определенными свойствами и параметрами. Уже объявлено о коммерческой эксплуатации сверхдальних систем связи, использующих пригодное для рамановского усиления волокно с низким наклоном дисперсии, дальность связи в таких системах в 6 раз превышает дальность традиционных систем дальней связи.

Рис. 1. (а) Суммарные данные по системам ВОЛС в Северной Америке за 1995-1999 годы и прогнозы на 2000 год показывают, что доля использования волокна NZDF превышает любой другой тип волокна. (б) Объемы глобального рынка по годам показывают, что волокно NZDF занимает место фактического стандарта в индустрии ВОЛС.

Развитие разных типов одномодового волокна для дальней связи в США



Глобальный рынок кабелей с волокном для дальней связи



Другие используемые усовершенствованные технологии — это метод непосредственной коррекции ошибок (forward error correction — FEC) и динамическое выравнивание усиления. В методе FEC в передаваемый сигнал добавляются избыточные контрольные биты, которые позволяют восстановить сигнал на приемнике при наличии искажений в тракте передачи (помехоустойчивое кодирование).

Эта технология «снижает» остроту требования увеличения на 6 дБ отношения оптического сигнала к шуму (OSNR), необходимого для увеличения в четыре раза скорости передачи данных в канале. Технология динамического выравнивания усиления минимизирует разницу в качестве сигнала в разных каналах в многоканальных системах дальней связи.

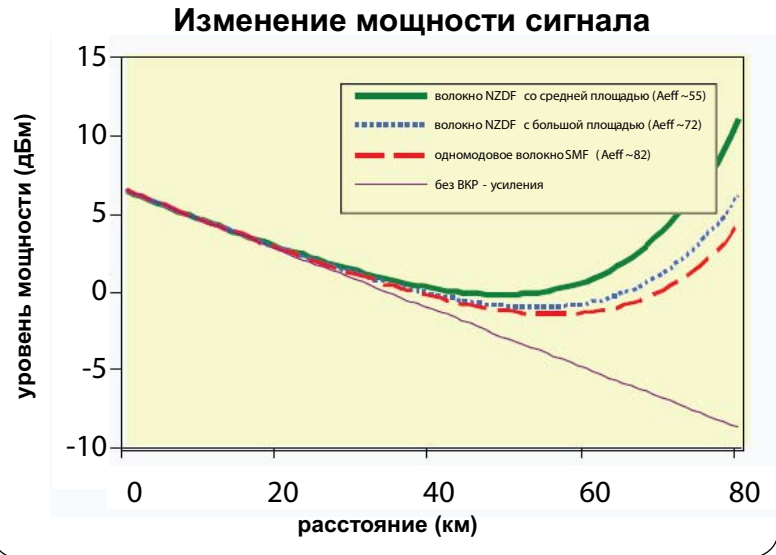
Без выравнивания усиления в системе EDFA с широкой спектральной областью передачи коэффициент усиления в коротковолновых каналах будет больше, чем в длинноволновых каналах, и разница коэффициентов усиления возрастает при увеличении числа каналов. Если разница станет слишком большой, то процесс интерпретации принятых данных станет слишком сложным. Таким образом, за счет уменьшения различий в уровне сигнала разных каналов динамическое выравнивание усиления позволяет увеличить дальность связи. Для достижения в одном волокне пропускной способности порядка одного Тбит/с при использовании терминалов со скоростью передачи 40 Гбит/с и увеличении общего числа каналов в С и L диапазонах к типу волокна и характеристикам всей линии связи предъявляются специальные требования.

Умеренная локальная дисперсия в волокне обеспечивает большую гибкость при подключении компенсаторов дисперсии и элементов оптической сети. Низкая остаточная дисперсия линии связи является обязательным требованием для достижения однородного качества во всем используемом спектральном диапазоне, этого можно добиться с помощью волокон с низкой дисперсией и компенсации, согласованной с наклоном дисперсии.

РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВОЛОКНУ

В настоящее время недостаточно планировать только увеличение пропускной способности. Провайдеры сетевых служб все чаще выдвигают требования к системам ВОЛС, которые обеспечивают: (1) наибольшую спектральную эффективность, достигаемую при (2) наиминимизированной стоимости модернизации, при которой (3) имеется четко определенный сценарий встраивания оптических коммутацион-

Рис. 2. Изменение уровня мощности сигнала в различных типах волокон и при отсутствии ВКР усиления. Волокно со средней (умеренной) эффективной площадью обладает наибольшим усилением сигнала в конце системы и за счет этого наилучшие характеристики всей системы.



ных элементов. В таких системах к волокну предъявляются особые требования.

Эффективная площадь: волокно с умеренной эффективной площадью, с улучшенными характеристиками рамановского усиления

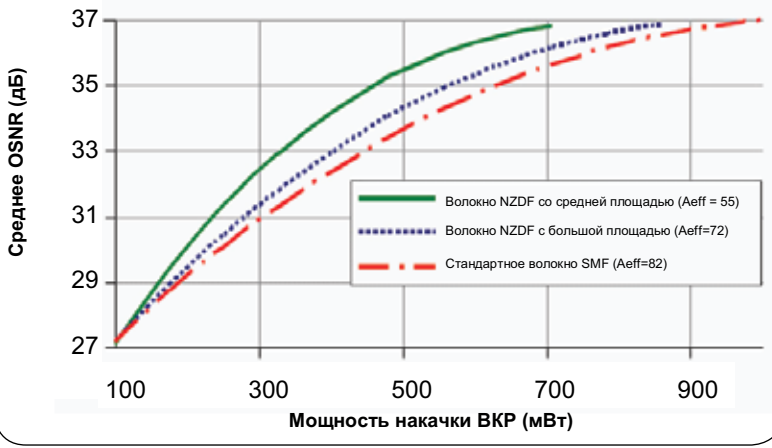
Поскольку нелинейный процесс распределенного рамановского усиления происходит внутри оптического волокна, то усиление более эффективно в волокнах с умеренной эффективной площадью поперечного сечения, как показано на Рис. 2.

Фактически ВКР усиление в волокне с ненулевой дисперсией NZDF со средней эффективной площадью обеспечивает выигрыш системы на 1-2 дБ по сравнению с волокном NZDF с большой эффективной площадью при условии одинаковой мощности начального сигнала и оптической накачки ВКР-усилителя. Это означает, что для оптимального использования параметров волокна со средней эффективной площадью в системах с ВКР-усилением сигналов необходимо увеличить мощность излучения, несущего поток данных, либо использовать более мощные ВКР-усилители.

Высокие мощности сигналов и применение мощных лазеров для накачки ВКР-усиления приводит к появлению проблем с обеспечением безопасности и с практической реализацией. Ожидается, что такие системы окажутся дорогостоящими. Например, на Рис. 3 показано, что при мощности 500 мВт (верхняя граница мощности для лазера класса III) волокно 55 мкм будет иметь отношение оптического сигнала к

Рис 3. При одинаковой мощности накачки степень улучшения OSNR больше, чем в волокне NZDF с большой площадью и SMF.

Улучшение OSNR



шуму OSNR на 2 дБ лучше, чем «обычное» одномодовое волокно с несмещенной дисперсией (SMF). Аналогичным образом эта система имеет выигрыш в 1-2 дБ по сравнению с волокном NZDF 72 мкм.

Дисперсия: Умеренная (средняя) локальная дисперсия волокна понижает стоимость и степень сложности систем компенсации дисперсии

Большая дисперсия волокна, например, в стандартном одномодовом волокне SMF, оказывается

не нужной для подавления перекрестных помех и даже вредна в некоторых системах. Установлено, что в коммерческих системах DWDM для эффективного подавления основных нелинейных эффектов оказывается достаточной некоторая «умеренная» величина дисперсии. Поскольку в волокне SMF дисперсия примерно в четыре раза больше, чем в волокне NZDF с малым наклоном дисперсии в диапазоне работы эрбиевых оптических усилителей EDFA, то стоимость компенсации дисперсии для SMF волокна соответственно намного выше.

Компенсация большой дисперсии волокна SMF не только существенно повышает стоимость системы связи, но и вносит заметные дополнительные потери в оптический тракт. В частности, при много-каскадном включении линейных оптических усилителей мощности потери из-за компенсации дисперсии в системах SMF на 6 дБ выше, чем в системах NZDF. Этот дополнительный запас среднего каскада усилителя величиной 6 дБ при использовании волокна NZDF можно применить для: (1) снижения стоимости усилителя, (2) достижения меньшего коэффициента шума в усилителе, или (3) улучшения функциональности оптической сети за счет наличия допуска на компенсацию потерь подключения дополнительных ответвлений линии.

Хотя в нескольких новых технологиях широко рекламируется наличие альтернативных вариантов

Рис. 4. Волокно NZDF с низким наклоном дисперсии имеет однородные характеристики дисперсии в обоих спектральных диапазонах C и L.

Волокно типа NZDF с низким наклоном дисперсии имеет оптимальное значение дисперсии для имеющихся и разрабатываемых систем связи

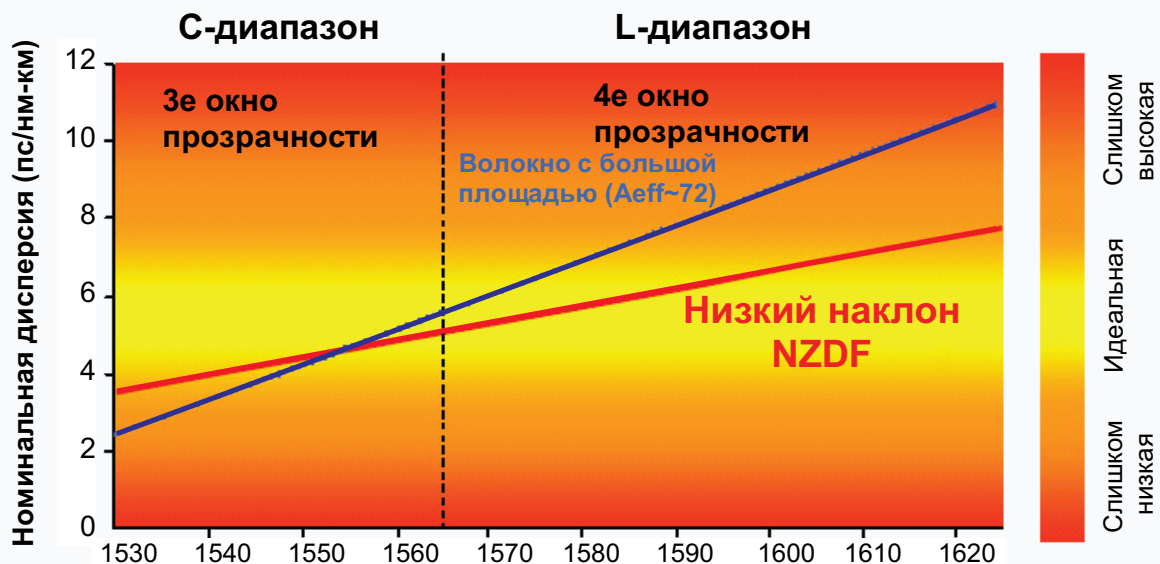
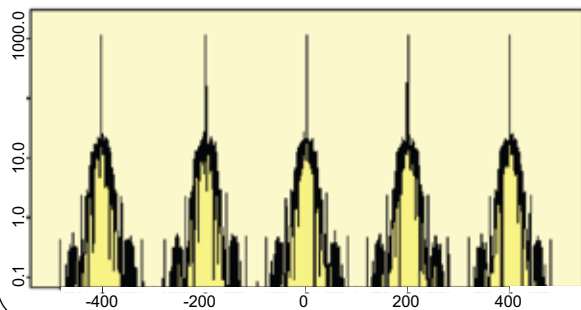


Рис 5. Каналы RZ с узкими импульсами имеют меньшую спектральную эффективность, чем каналы с сигналами NRZ, и поэтому им требуется большее расстояние между каналами для подавления когерентных перекрестных помех. Например, на схеме выше показано расстояние между каналами 200 ГГц для импульсов 40 Гбит/с.



Скорость передачи на канал (Гбит/с)	Расстояние между каналами (ГГц)	Спектральная эффективность (бит/Гц)
2.5	50	0.05
10	100	0.10
40	100	0.40
Теоретический предел (двоичное кодирование)		0.50

компенсации дисперсии, волокно с компенсацией дисперсии (DCF) является самой развитой и коммерчески доступной технологией для компенсации дисперсии.

Эта технология достаточно гибкая, ее можно легко модифицировать для улучшения имеющихся и новых типов оптических волокон. Эксплуатационные показатели других методов компенсации дисперсии, например, с помощью дифракционной решетки или технологии моды высшего порядка (higher order mode — HOM), остаются заметно ниже тех, которые достигнуты в технологии DCF, и нет никаких свидетельств, что при их использовании удастся получить экономичные коммерческие системы.

Технология дифракционной решетки все еще не может преодолеть ограничений, вызванных нестабильностью дисперсии, и она не годится для одновременной компенсации дисперсии на многих длинах волн, передаваемых в широком спектральном диапазоне, как это имеет место в случае волокон с широкополосной DCF. Методы компенсации с использованием моды высшего порядка ограничены в применении из-за модового шума и поляризационных эффектов.

Наклон дисперсии: Низкий наклон дисперсии для оптимальных показателей во всем диапазоне эрбиевых волоконных усилителей EDFA.

По мере того, как в волокне используется все больше каналов в диапазонах C и L, величина наклона спектральной зависимости дисперсии становится все более важным параметром волокна. Низкое значение наклона дисперсии означает более равномерные значения дисперсии во всем спектральном диапазоне передачи. При этом большее число каналов имеет для себя оптимальное значение дисперсии без использования дополнительных дорогих и сложных систем компенсации дисперсии. Если же

наклон дисперсии слишком большой, как это имеет место в волокне NZDF с большой эффективной поперечной площадью, то может потребоваться дополнительная компенсация дисперсии.

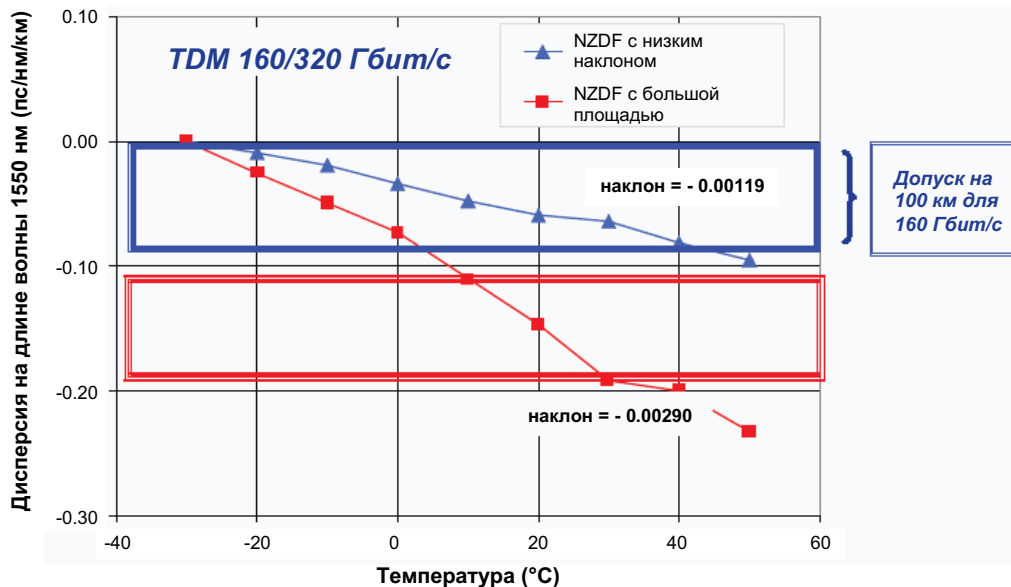
Соображения о спектральной эффективности: Волокно NZDF более эффективно поддерживает больше схем модуляции, чем обычное волокно SMF

Плотность каналов и скорость передачи определяет так называемую спектральную эффективность, то есть степень плотности «упаковки» каналов в определенном диапазоне. Хотя передаваемые сигналы в модуляционном формате с возвратом к нулю (RZ) менее чувствительны к ошибкам, связанным с дисперсией, сигналы с форматом без возврата к нулю (NRZ) обрабатываются более простой и сравнительно менее дорогой электроникой. Практически во всех имеющихся сегодня коммерческих системах используется формат модуляции NRZ, а для экспериментальных схем с модуляцией RZ потребовалась бы быстродействующая и поэтому более дорогая электроника, позволяющая выработать узкие импульсы. Солитоны фактически являются ультра узкими импульсами RZ с широким спектром, и они не годятся для систем с плотным расположением каналов. Простой анализ доказывает более высокую спектральную эффективность системы с возможностью рамановского усиления, спроектированной для каналов NRZ со скоростью передачи 40 гбит/с.

Более того, имеются следующие параметры волокна, отвечающие за реализацию системы с высокой спектральной эффективностью: (а) волокно со средней (умеренной) эффективной площадью для наибольшего ВКР-усиления сигнала с (б) умеренной однородной дисперсией во всем спектральном диапазоне передачи для более простой и дешевой компенсации дисперсии.

Рис. 6. Температурный наклон дисперсии для двух типов волокон NZDF.

В волокне NZDF с малым наклоном дисперсии температурная зависимость дисперсии на 40% меньше, чем в волокне NZDF с большой эффективной площадью



Соображения об еще более плотном временном мультиплексировании

Хотя в настоящее время отсутствуют коммерческие потребности в системах с временным уплотнением TDM свыше 40 Гбит/с, в лабораториях уже были продемонстрированы системы со скоростью передачи 160 и 320 Гбит/с. При таких высоких скоростях передачи оптимизация дисперсии волокна имеет еще большее значение. Исследования показали, что хотя изменения дисперсии из-за флуктуаций температуры сами по себе малы, однако итоговые нестабильности дисперсии имеют значительную величину и ограничивают характеристики системы. Поскольку такие температурные изменения дисперсии пропорциональны наклону дисперсии, можно ожидать, что волокно NZDF с низким наклоном дисперсии будет более надежно поддерживать высокие скорости TDM, как показано на рис. 6.

Выводы

При реализации систем дальней связи с большим количеством каналов с высокими скоростями передачи к выбору волокна предъявляются очень высокие требования. В системах связи, созданных на основе стандартного волокна SMF, необходима дорогостоящая компенсация дисперсии, и к тому же такие системы более чувствительны к нестабильности дисперсии. Проектирование систем на базе волокна с ненулевой дисперсией (NZDF) с низким наклоном

и оптимальными параметрами дисперсии позволяет удовлетворить требованиям как существующих, так и вновь разрабатываемых высокоскоростных систем передачи. NZDF волокно обеспечивает экономичное решение в сравнении со стандартным одномодовым волокном SMF для современных систем с плотным спектральным мультиплексированием каналов (DWDM) со скоростью передачи от 10 Гбит/с. В сравнении с другими волокнами NZDF, волокна NZDF с малым наклоном дисперсии обеспечивают недорогие решения, причем система поддерживает большое количество высокоскоростных каналов в дальних линиях связи. Они также предоставляют очень практичный вариант для модернизации систем до скорости 40 Гбит/с с большой независимостью от формата и пригодных для проектирования с применением рамановских усилителей для достижения наибольшей спектральной эффективности, соответственно качества и дальности передачи. При переходе к еще более высоким скоростям временного мультиплексирования TDM погрешности дисперсии и ее температурная зависимость становятся очень важными параметрами, привлекающими все большее внимание исследователей. Волокно типа NZDF с малым наклоном дисперсии слабо чувствительно к связанным с флуктуациями температуры нестабильности дисперсии, а это важнейший фактор для обеспечения надежной высокоскоростной связи.