



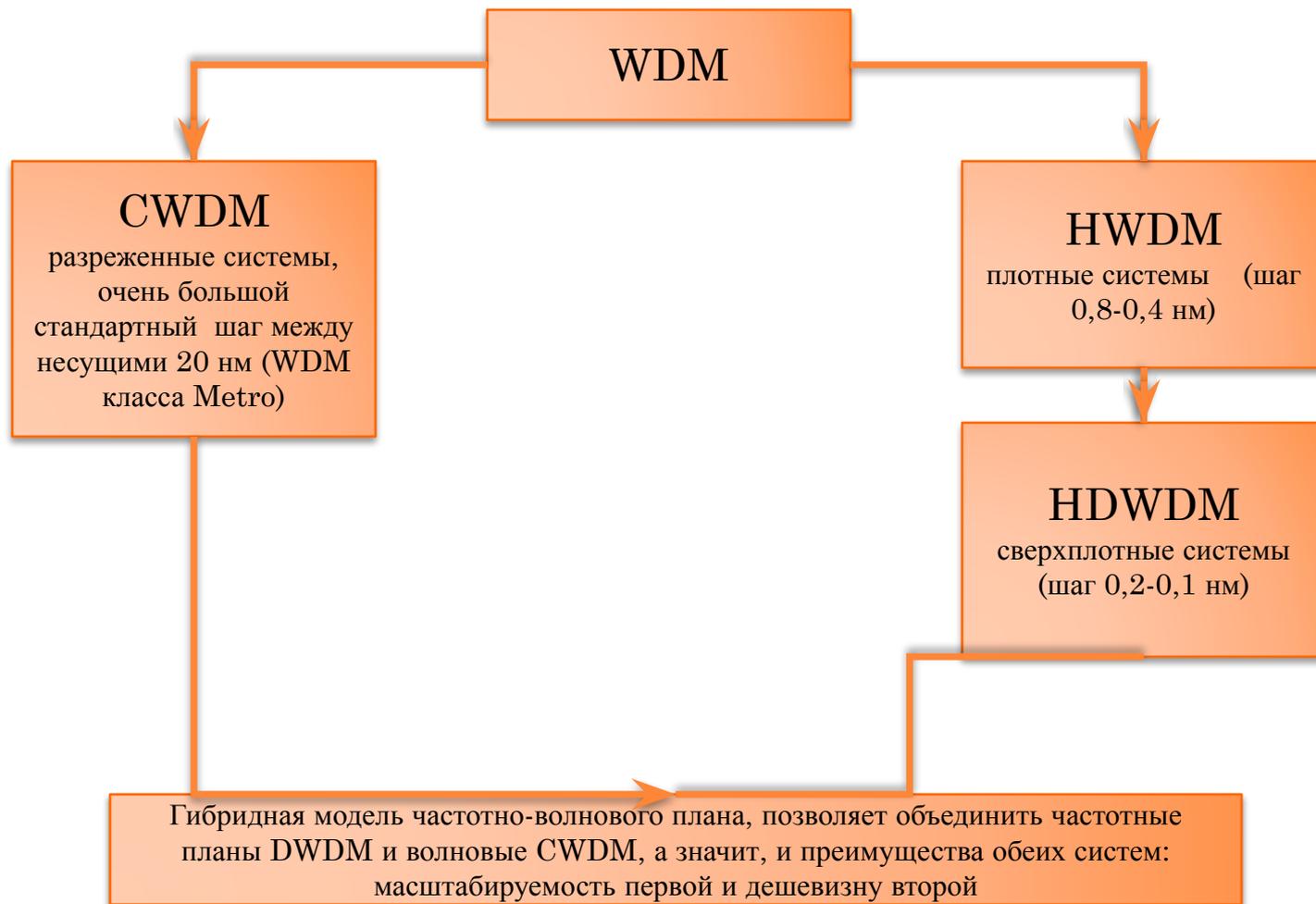
**ТЕХНОЛОГИИ
СПЕКТРАЛЬНОГО
УПЛОТНЕНИЯ КАНАЛОВ В
ВОСП**

СОДЕРЖАНИЕ

- Развитие систем WDM
- CWDM
- Волновые планы CWDM и DWDM
- Стратегии расширения числа несущих в системах WDM
- Перспективный частотный канальный план
- Проблемы использования WDM
- Перспективы использования WDM
- Особенности применения систем WDM в городских сетях, оборудование, архитектура и реализуемые сервисы
- Когерентные методы приема и передачи информации
- Решения компании Alcatel-Lucent



СИСТЕМЫ WDM (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)



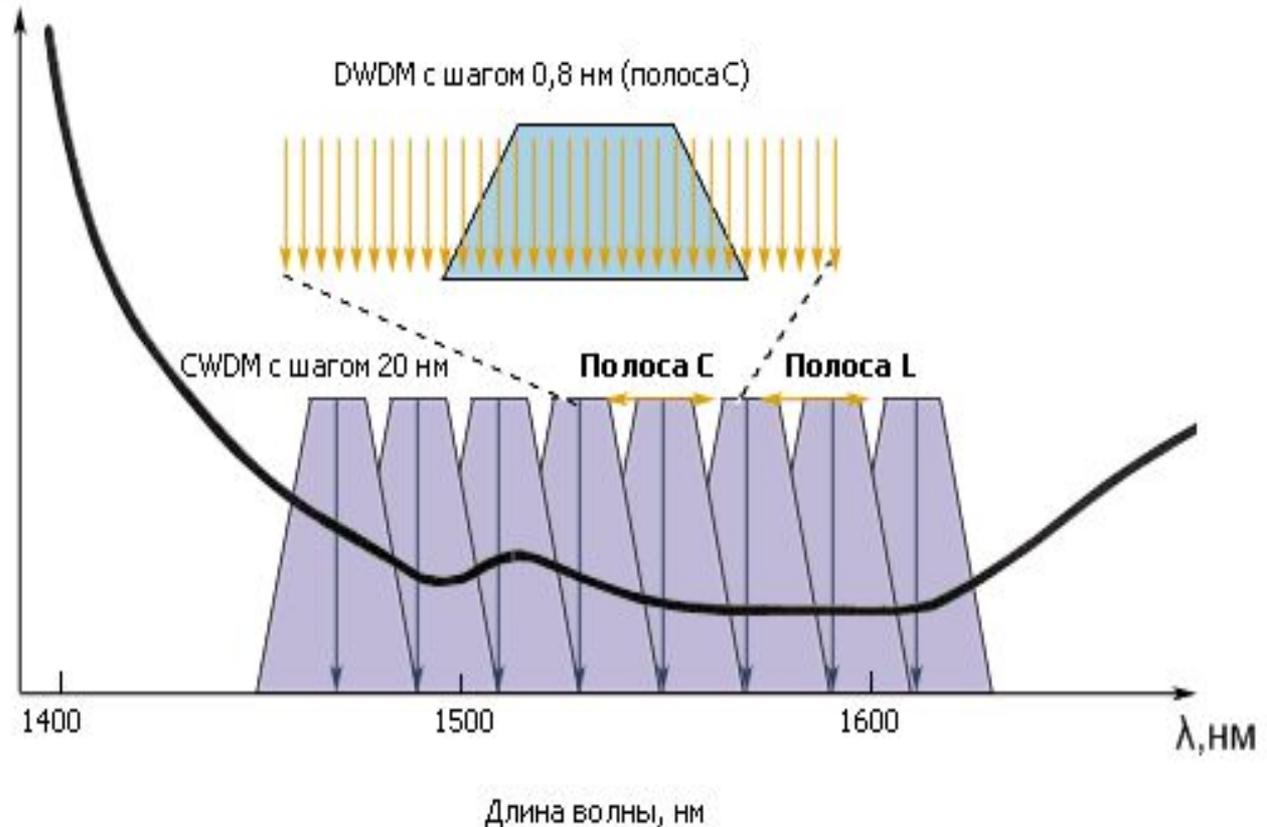
CWDM



Применение систем WDM такого класса стало возможным после того, как удалось ликвидировать "водяной" пик поглощения на кривой затухания ОВ в районе длины волны 1383 нм. В соответствии с рекомендацией МСЭ G.694.2 следует использовать не более **18** несущих с фиксированным шагом **20 нм**: **1270, 1290, 1310 ... 1570, 1590, 1610**, если требуемый диапазон длин волн не превышает 340 нм. Естественно, что затухание на краях такого диапазона достаточно велико, особенно на его левом крае в области коротких волн. Поэтому при передаче сигнала по стандартному одномодовому волокну (SSF) число несущих следует ограничить 8 длинами волн, лежащими в диапазоне 1470-1610 нм шириной в 140 нм.

Если требуется использовать больше несущих, то, оставаясь в рамках стандарта CWDM, мы имеем еще 200 нм полосы, или 10 дополнительных каналов с шагом 20 нм. Альтернативным вариантом является возврат к системам DWDM, однако это дорого и ведет к потере уже вложенных в систему CWDM средств. Другая альтернатива - использование гибридной модели частотно-волнового плана, позволяющей объединить частотные планы DWDM и волновые CWDM, а значит, и преимущества обеих систем: масштабируемость первой и дешевизну второй.

ВОЛНОВЫЕ ПЛАНЫ CWDM И DWDM



В верхней части рисунка показан план DWDM с шагом 0,8 нм (полоса С) и пересекающаяся область, в нижней - план CWDM с шагом 20 нм, а на нем позиции полос С и L плана DWDM. Известно, что в каждой из полос С и L можно разместить по 41 стандартному каналу с шагом 100 ГГц. Полоса С содержит длины волн в диапазоне **1528,77-1560,61 нм**, а полоса L - **1566,31-1612,65 нм**. В них попадают следующие несущие CWDM: **1530,1550,1570,1590 и 1610 нм**. С другой стороны, как видно из рисунка, в полосе пропускания фильтра одной из несущих CWDM может разместиться **восемь** несущих DWDM полосы С

ПЕРВАЯ СТРАТЕГИЯ

Метод формирования гибридного частотного плана и первая стратегия расширения числа несущих:

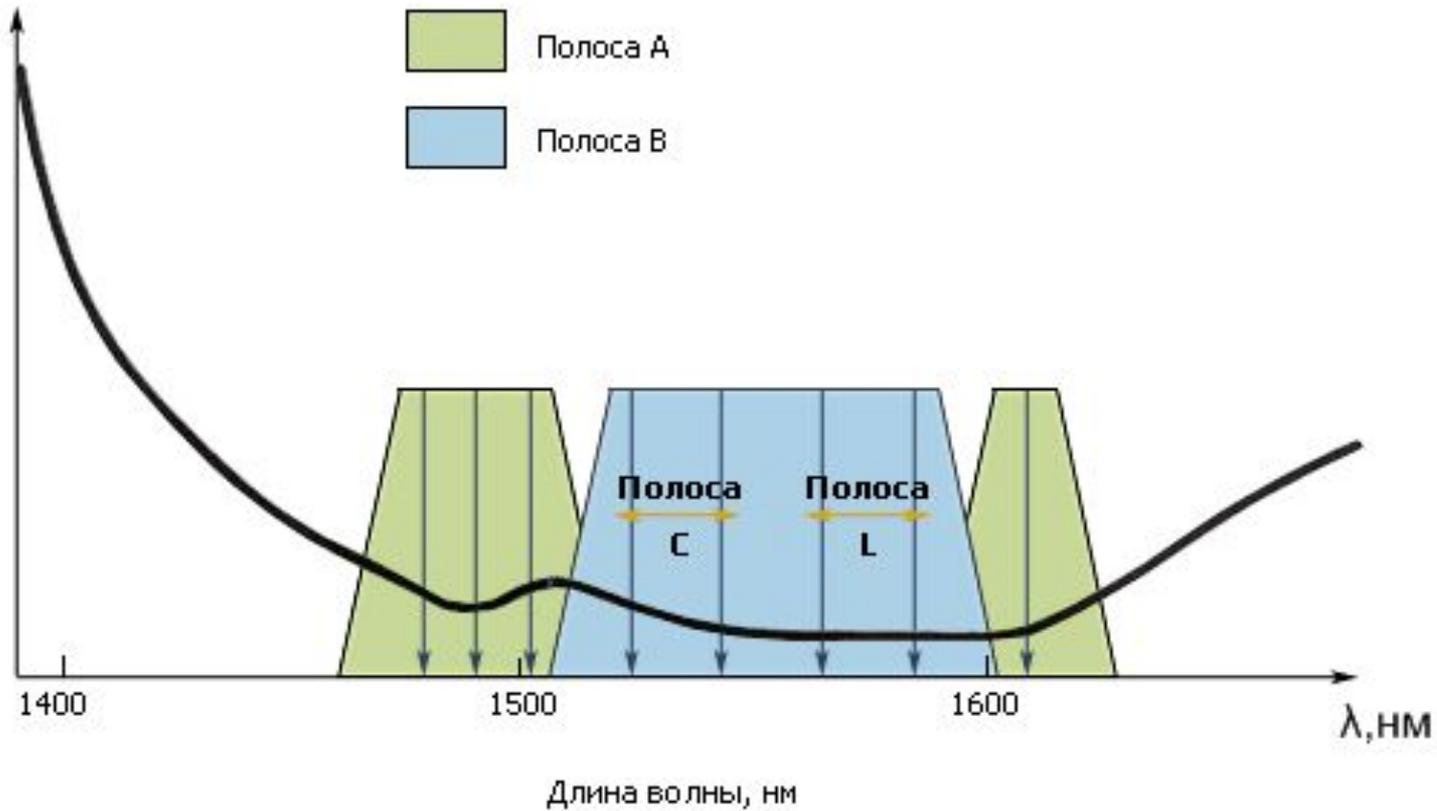
а) используя план CWDM, разместить восемь основных каналов (1470-1610 нм);

б) при необходимости увеличения числа каналов, заменить один из каналов CWDM на восемь каналов DWDM.

Существуют следующие недостатки. Во-первых, не все несущие DWDM попадают в полосу пропускания фильтров системы CWDM - примерно 50% приходится на переходную полосу фильтров. Во-вторых, часть общей полосы пропускания фильтров CWDM перекрывается полосами C и L не полностью. По этой причине несущую 1610 нм (CWDM) не используют для замены наряду с несущими 1470, 1490 и 1510 нм, а у оставшихся четырех (1530, 1550, 1570 и 1590 нм) полоса пропускания используется частично.



Схема гибридного несимметричного частотного плана



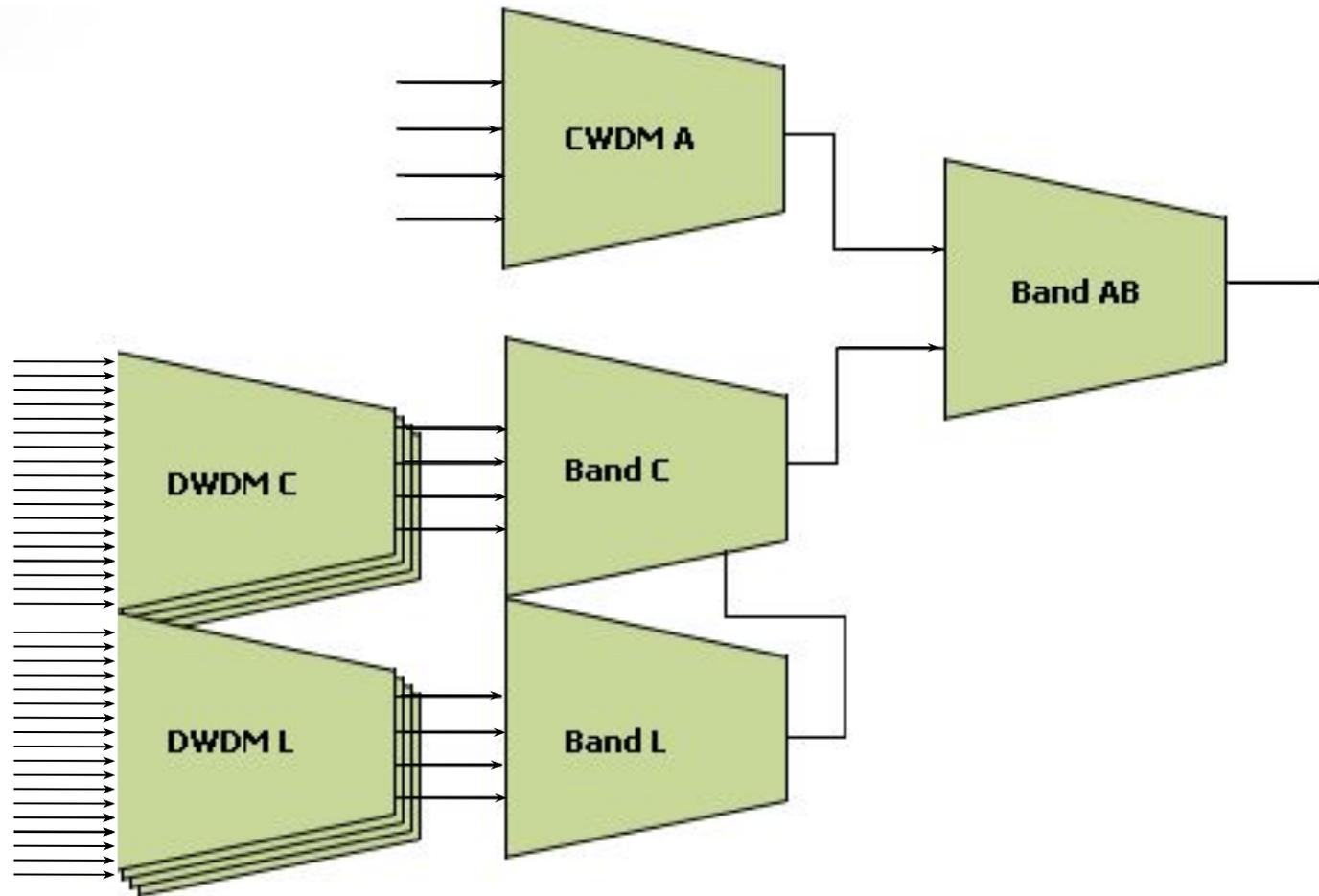
Первая стратегия обеспечивает использование **четырёх незаменимых** длин волн CWDM и четырёх длин волн, полосы которых заменяются возможными наборами длин волн DWDM. Наилучшей в этом случае является несимметричная схема, в которой незаменимая полоса А состоит из трех расположенных слева каналов (несущие **1470, 1490 и 1510** нм) и одного канала справа (несущая **1610** нм), а заменяемая полоса В расположена внутри общей полосы А + В. Максимально возможное число каналов в этом случае равно 32 (4 канала CWDM + 28 каналов DWDM). Таким образом, общее число каналов увеличивается в четыре раза: с 8 до 32

ВТОРАЯ СТРАТЕГИЯ

Существует и вторая стратегия расширения числа несущих. Она оставляет ту же исходную расстановку несущих: 4 незаменимых + 4 заменяемых, но использует всю освобождаемую формирующими фильтрами несущих полосу. То есть для этих каналов полностью меняется оборудование и используются не только канальные, но и полосовые фильтры DWDM. В результате оказывается возможным в полосе четырех заменяемых каналов сформировать 32 канала в полосе C и 32 канала в полосе L; таким образом, общее число каналов может достигать 68 (4 канала CWDM + 64 канала DWDM). При этом схема мультиплексирования каналов может быть такой: 4 (CWDM-A) + 32 (DWDM-C) + 32 (DWDM-L). В результате гибридный альтернативный план выглядит так: несущие CWDM 1470, 1490, 1510 нм + 64 несущие полос C и L DWDM + несущая CWDM 1610 нм.



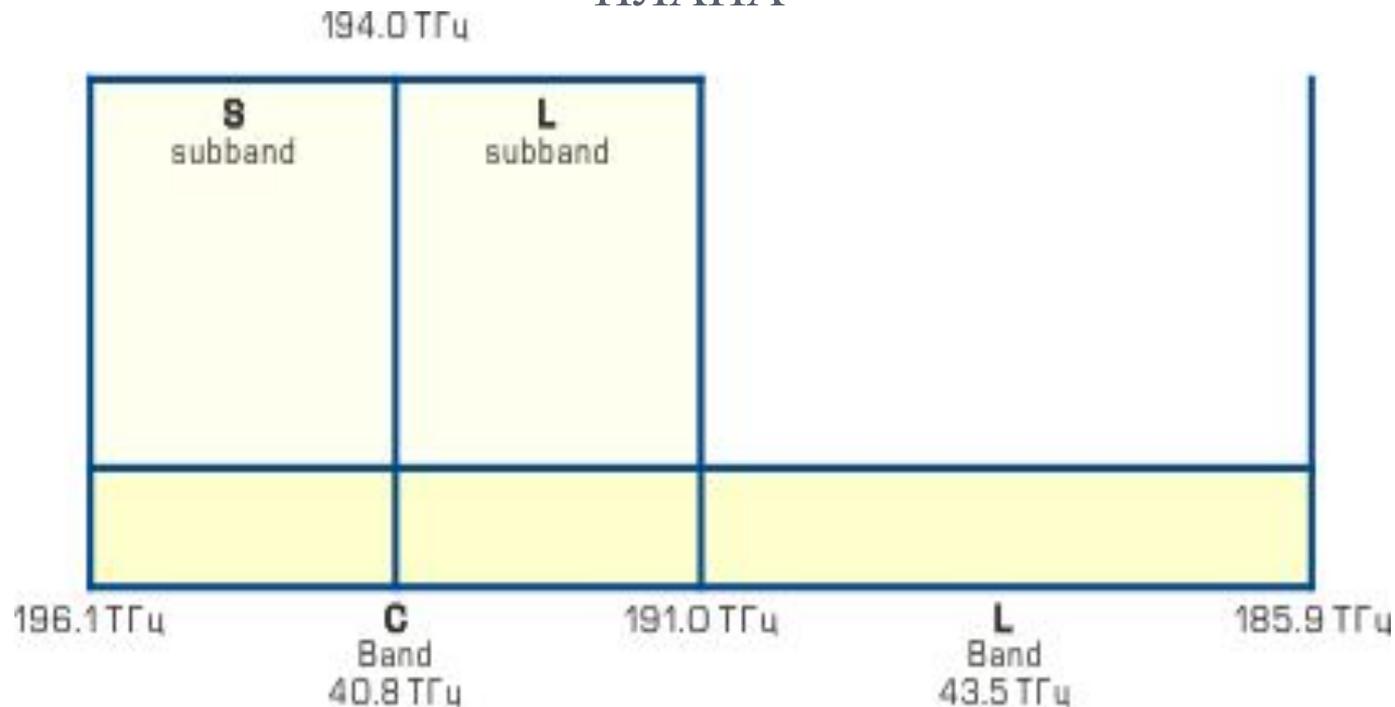
Схема мультиплексирования каналов CWDM DWDM



В результате гибридный альтернативный план выглядит так: несущие CWDM 1470, 1490, 1510 нм + 64 несущие полос C и L DWDM + несущая CWDM 1610 нм.



СХЕМА ПЕРСПЕКТИВНОГО ЧАСТОТНОГО КАНАЛЬНОГО ПЛАНА



В последнее время был предложен еще один перспективный каналный план, где расширения числа каналов можно достичь двумя путями: 1) уменьшением шага до 0,05 ТГц (50 ГГц) и частичным расширением частотного плана до 191,0 ТГц, что дает возможность довести число каналов максимально до **102**; 2) расширением стандартной полосы $D_{ст}=5.1\text{ТГц}$ вправо до частот порядка 186 ТГц (1612 нм), что позволяет удвоить $D_{ст}$ до величины 10,2 ТГц (84 нм) за счет частичного использования 4-го окна прозрачности (1600 нм).

Первый путь был использован компанией Ciena, второй – Lucent. Эксплуатация вдвое большей полосы (2x5,1 ТГц) хотя и требует использования специальных сверхширокополосных оптических усилителей СШПУ с АВХ (амплитудно- волновая характеристика), охватывающей полосу 10,2 ТГц, но дает возможность увеличить число каналов до 102 при шаге 100 ГГц и до 204 при шаге 50 ГГц. Это можно сделать, разбивая общую полосу усиления на две, называемые C-Band (Conventional Band) – обычная полоса и L-Band (Longwave Band) – длинноволновая полоса (в терминологии Bell Labs.). При этом поддиапазон L band в терминологии Alcatel, теперь оказывается расположенным в правой половине C-Band. Тогда, для систем WDM получаем следующую перспективную схему каналного плана на 102 канала с шагом 100 ГГц и на 204 канала с шагом 50 ГГц.

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WDM

- 1) влияния эффекта ЧВС (четырёхволнового смешения);
- 2) воздействия помех от соседних каналов;
- 3) ограничения суммарной мощности светового сигнала, вводимого в волокно



ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WDM

Влияние эффекта ЧВС достаточно успешно снижается за счет использования волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), неравномерного распределения частот несущих.

Влияние помех от соседних каналов может быть снижено разными способами: увеличением шага несущих (действует на обоих концах), использованием внешнего модулятора (уменьшающего уширение несущей), применением солитонной технологии или техники модуляции с подавлением одной боковой полосы (ОБП). Все три метода действуют на передающем конце.



ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WDM

Влияние третьего фактора обусловлено тем, что максимальная мощность каждой оптической несущей $P_{C \max}$ (в дБм) зависит от полной оптической мощности, подаваемой с выхода транспондера на вход волокна P_{total} (оптическая мощность в дБм на выходе агрегатного канала WDM) и числа мультиплексированных длин волн.

$$P_{C \max} = P_{total} - 10 \lg n.$$

Мощность P_{total} ограничена безопасным уровнем излучения лазера (или допустимым уровнем суммарных нелинейных искажений в сердцевине волокна) и составляет для разных производителей оборудования WDM величину от 17 до 30 дБм. По таблице можно оценить, как меняется эта мощность в расчете на 1 несущую для разного числа несущих в системе WDM при равномерном распределении.

Максимальная мощность на одну несущую WDM, дБм

Число несущих, n	2	4	8	16	32	64	128	256
$P_{total}=17$ дБм	14	11	8	5	2	-1	-4	-7
$P_{total}=30$ дБм	27	24	21	18	15	12	9	6



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WDM СВЯЗАНЫ С ТРЕМЯ ФАКТОРАМИ:

- технологическим
- сетевым
- экономическим



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР

Определяется развитием элементов систем WDM, что позволит:

- 1) перейти на более плотную сетку частотного плана, подготовив миграцию систем DWDM в сторону систем HDWDM;
- 2) увеличить максимальное число каналов в широко используемых диапазонах C, L и S;
- 3) использовать для этих диапазонов оптические усилители EDFA;
- 4) использовать оборудование SDH с увеличенной скоростью передачи на одной несущей: 40-160 Гбит/с;
- 5) использовать солитонную технологию с возможностью увеличения дальности передачи и уменьшения чувствительности высокоскоростных систем к поляризационной модовой дисперсии (PMD).



ФАКТОРЫ

Сетевой фактор определяется развитостью структуры сетей WDM. В настоящее время не существует единой сети WDM. Это значит, что нельзя в полной мере воспользоваться одним из самых главных преимуществ систем WDM - возможностью маршрутизации потокового трафика по длине волны λ .

Экономический фактор определяется высокой стоимостью систем WDM даже для топологии "точка - точка". Так, по оценкам одной из компаний - производителей оборудования WDM, секция системы (на основе STM-16/64) на 16 длин волн протяженностью 450-500 км с тремя промежуточными мультиплексорами, не обладающими возможностью оптического ввода-вывода, стоит примерно 1,5-2 млн дол. Эта стоимость может оцениваться как в абсолютной мере (цена за устройство или систему), так и в относительной (цена за бит переданной информации в расчете на километр). Относительная стоимость снижается довольно успешно как за счет увеличения числа бит (увеличение скорости передачи на одну несущую), так и за счет увеличения длины пролета/секции. Снижение же стоимости в абсолютном исчислении происходит пока за счет перехода от систем DWDM к системам CWDM благодаря более дешевым системам мультиплексирования/демультиплексирования на основе пассивных фильтров.



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ WDM В ГОРОДСКИХ СЕТЯХ

Системы WDM используются для организации городских или корпоративных сетей в рамках большого города. Характерными особенностями таких систем являются:

- относительно небольшая длина пролетов (в среднем 15-20 км и не больше 50-70 км либо не больше 100-200 км по периметру замкнутой кольцевой сети);
- компактная структура, использующая кольцевую, радиально-кольцевую и ячеистую топологии;
- относительно небольшое число каналов (не больше 32) на одно ОВ, что позволяет использовать частотные планы как DWDM, так и CWDM;
- широкий набор интерфейсов для доступа в сеть WDM наиболее известных технологий: PDH, SDH, ATM, FDDI, IP, Fast Ethernet (100BASE-F), Gigabit Ethernet (GE) и 10 Gigabit Ethernet (10GE);
- новые сервисы, стандартные для полностью оптических сетей (AON): ввод-вывод оптических несущих, маршрутизация по длинам волн.



ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ CWDM

При анализе возможности применения той или иной технологии для решения определенных задач обычно учитывают наличие конкурентных технологий для решения тех же задач. Конкурентные технологии сравнивают по ряду показателей, ранжированных по степени важности для оператора связи. Такими показателями могут быть: стоимость аналогичного решения, класс сетей и набор реализуемых приложений (сервисов), завершенность технологии (набор стандартов, регламентирующих ее применение), масштабируемость решения и, наконец, наличие технологической ниши, где данная технология имеет наибольшие конкурентные преимущества или просто незаменима.

Если взять, например, задачу выбора технологии, обеспечивающей пропускную способность волокна 40 Гбит/с, то нужно сравнить, как минимум, три конкурирующие технологии:

- SDH (с использованием одного мультиплексора STM-256);
- DWDM (с транспондером на 4 несущих и с 4 мультиплексорами SDH уровня STM-64 или с транспондером на 16 несущих с 16 мультиплексорами SDH уровня STM-16);
- CWDM (с транспондером на 16 несущих с 16 мультиплексорами SDH уровня STM-16).

Очевидно, что стоимость решения, использующего 16 несущих, будет существенно ниже у CDWM, чем у DWDM, и ниже, чем применение SDH. Однако в этом примере выбор CWDM оказывается тупиковым вариантом с точки зрения масштабируемости, так как при этом используется, по крайней мере, два предельных для этой технологии параметра : число несущих и скорость передачи сигнала. Это значит, что при развитии сети может возникнуть необходимость смены технологий и неизбежных при этом дополнительных затрат.



ОБОРУДОВАНИЕ

CWDM использует в транспондерах лазеры с распределенной обратной связью и скоростью передачи не выше 2,5 Гбит/с. Они обеспечивают узкую спектральную линию излучения сигнала несущей с большим коэффициентом подавления боковых мод, что, в свою очередь, уменьшает эффект уширения при распространении оптического сигнала по ОВ и позволяет без дополнительного усиления перекрывать пролеты длиной до 80 км.

Низкие затраты здесь достигаются за счет двух факторов: допустимой точности центральной частоты несущей и допустимого дрейфа этой частоты во времени. Так, для DWDM допустимая точность центральной частоты обычно лежит в пределах 0,5 ГГц (при 25 °С), то же можно сказать и о дрейфе, тогда как для CDWM этот показатель может быть увеличен до 6,5 нм при ширине полосы фильтров демодулятора 13 нм.

С другой стороны, лазеры систем DWDM (ввиду малого допуска) должны быть стабилизированы по температуре для компенсации температурного дрейфа. Для лазеров в системах CWDM такая стабилизация считается излишней, учитывая допустимый допуск на дрейф 6,5 нм.

Отсутствие охлаждения и стабилизации температуры позволяет получить значительную экономию потребляемой мощности: если в системах DWDM она составляет 5 Вт/канал передачи несущей, то в системах CWDM - только 0,25 Вт, причем эта разница увеличивается пропорционально числу используемых несущих.

Приемники в обеих системах обычно одинаковы. Это PIN- или ЛПД-диоды, обеспечивающие бюджет мощности системы порядка 20-25 дБ. Существенная разница, однако, наблюдается на этапе демультиплексирования. При малом числе каналов в обеих системах можно использовать одинаковые демультиплексоры с фильтрами на многослойных тонких пленках, однако требования к фильтрам могут значительно отличаться. Так, при шаге сетки несущих 200 ГГц в DWDM необходимо использовать фильтры со 125 слоями для обеспечения требуемого затухания в переходной полосе, тогда как в CWDM при разnose несущих на 20 нм достаточно 50 слоев (при этом вносимые потери фильтров не превышают 1 дБ).

СЕРВИСЫ

Традиционные системы CDWM первоначально строились по однопролетной схеме с терминальными мультиплексорами одного производителя в расчете на сетевую топологию "точка - точка" в корпоративных и локальных сетях. Набор интерфейсных карт давал, как правило, возможность использовать технологии ATM, PDH, Fast Ethernet (FE). При этом допускалось применение многомодового ОВ и работа в трех окнах прозрачности 850/1300/1550 нм. Мультиплексоры ввода-вывода при этом не использовались. На смену традиционным пришли открытые и гибридные системы CWDM.

В открытых системах CWDM сетевые операторы для повышения гибкости систем стали использовать маршрутизаторы, мультиплексоры ввода-вывода и коммутаторы с интерфейсами CWDM. Применение мультиплексоров ввода-вывода позволило расширить круг используемых топологий и освоить кольцевые сети в городских сетях, а также сети доступа транспортных сетей SDH.

Гибридные системы CWDM позволяли широко использовать преимущества обоих типов систем и освоить радиально-кольцевые топологии. Однако главным было то, что в результате переориентации на одномодовое ОВ и диапазон 1550 нм появилась возможность устанавливать интерфейсные DWDM-карты и осуществлять реконфигурацию несущих каналов CWDM в несущие каналы DWDM со всеми вытекающими из этого преимуществами в плане масштабирования.

Оказалось, что в результате такого развития систем CWDM появилась возможность использовать CWDM на трех нижних уровнях четырехуровневой иерархии сетей:

- магистральные транспортные сети (верхний уровень);
- магистральные городские сети (средний уровень);
- развитые сети доступа (средний уровень);
- сети "последней/первой мили" (нижний уровень).

При этом местом реализации открытых систем CWDM стали сети "последней/первой мили", тогда как местом реализации гибридных систем CWDM, которые стали обозначаться как системы C/DWDM, стали городские сети и сети доступа.

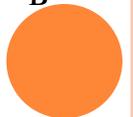
Набор физических интерфейсов (а значит, и набор сервисов/услуг) систем CWDM и C/DWDM при этом расширился и может теперь включать в себя (помимо интерфейсов, указанных выше): IP, SONET и STM-1/4/16 (SDH) и другие системы.

СИСТЕМЫ CWDM

В заключение покажем один из возможных вариантов реализации описанных сервисов в оборудовании на примере мультисервисной системы CWDM. Она позволяет агрегировать сигнальные потоки, формируемые сетевым оборудованием различных технологий, и может быть установлена на "последней/первой миле" и в сетях доступа.

Операторы смогут предлагать пользователям различные услуги в рамках одной унифицированной оптической инфраструктуры благодаря объединению в устройстве следующих сервисов:

- сервисы, агрегируемые низкоскоростным мультиплексором с временным разделением каналов, то есть сервисы T1/E1, T3/E3 и Ethernet, FE, GE, агрегируемые в потоки SONET или в потоки SDH STM-1/4/16; полученные потоки можно затем конвертировать в формат CWDM и передавать на оптические мультиплексоры ввода-вывода, которые объединяют подачу нескольких длин волн в одно волокно (формат CWDM допускает использование 9 и 18 длин волн на одно волокно);
- сервисы, агрегируемые мультиплексором, поддерживающим сервисы STM-1/4, то есть агрегирующим 4STM-1/4 в STM-16;
- сервисы, агрегируемые мультиплексором, поддерживающим 12 входных потоков, которые агрегируются в один STM-16;
- сервисы, агрегируемые мультиплексором, поддерживающим 2 потока GE или 8 потоков FE и 1 поток GE которые агрегируются в STM-16;
- сервисы CWDM (9 несущих в окне 1310 нм с защитой (кольцевая топология) или в двунаправленном варианте; 18 несущих без защиты (кольцевая топология) или в однонаправленном варианте.



СКОРОСТИ

Передача 40G в общем случае более чувствительна к оптическим параметрам системы, чем 10G:

- 4 x более раз (бдБ) к уровню оптического шума (OSNR)
 - 16 x более раз к Polarization Mode Dispersion (PMD) оптического волокна
 - 16 x более раз к Chromatic Dispersion (CD) оптического волокна
 - более чувствительна к внутриканальным нелинейным эффектам
- ⇒ для 10G, NRZ модуляция эффективна для большинства приложений
- ⇒ для 40G необходимо применять альтернативные форматы модуляции с тем, чтобы преодолевать физические ограничения

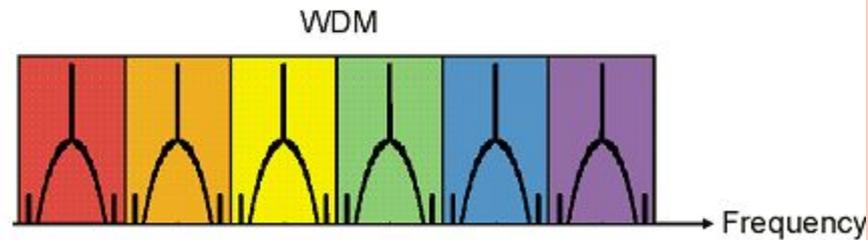
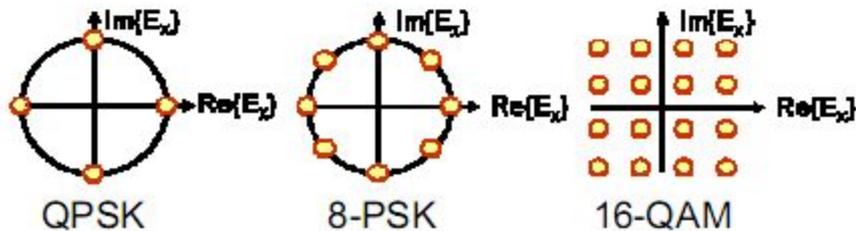
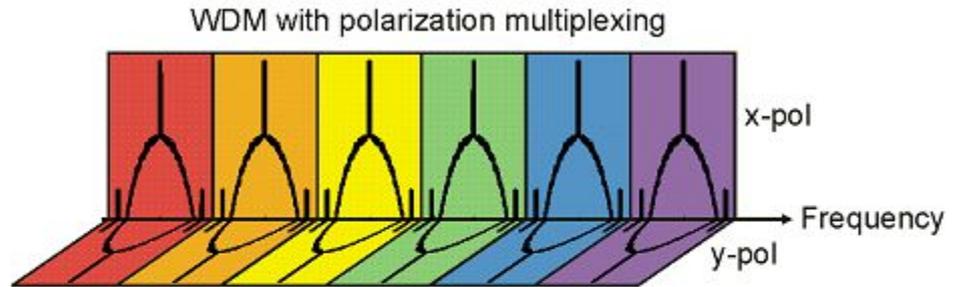
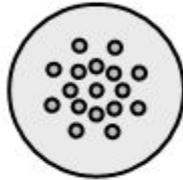
Передача 100G традиционными способами невозможна по техническим и экономическим причинам:

- Компенсация хроматической дисперсии второго порядка
- Компенсация поляризационных дисперсионных искажений (PMD)
- ...



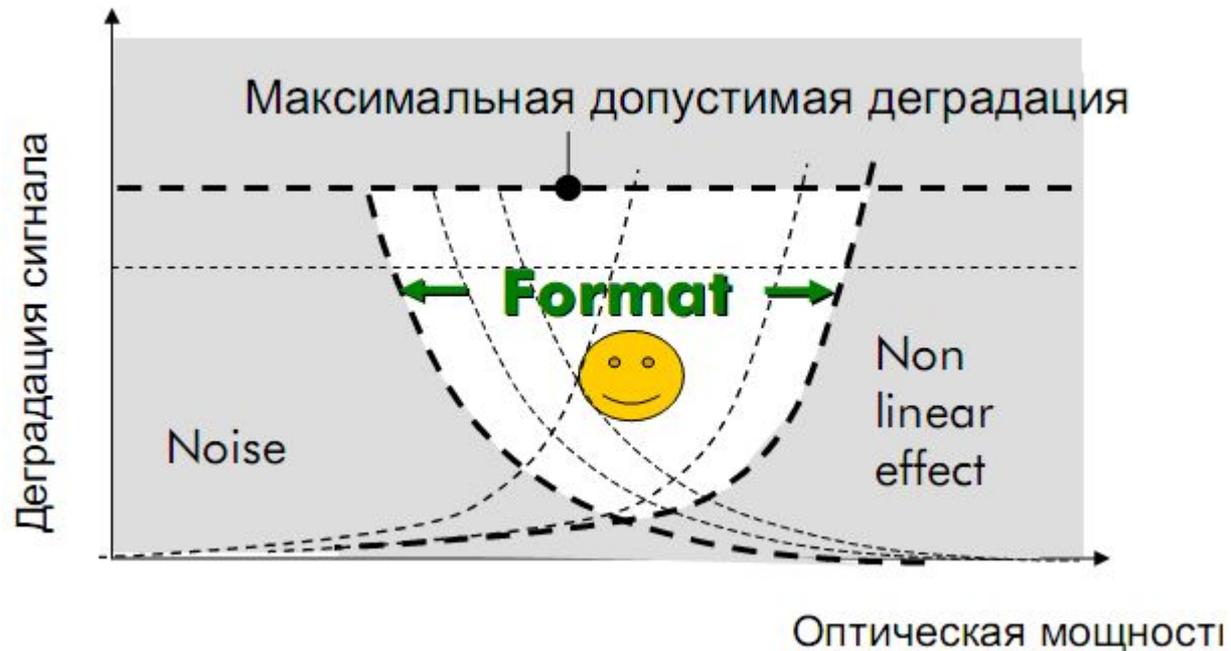
Как дальше масштабировать систему WDM?

Методы разделение сигналов в оптической связи



КАК УВЕЛИЧИТЬ СИСТЕМНЫЕ ЗАПАСЫ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ 40/100G WDM?

- Рамановское усиление : улучшает коэффициент шума (NF) усилителя и, таким образом, снижает ограничения на отношение сигнал/шум для оптического сигнала (OSNR)
- Коды с исправлением ошибок (FEC): повышают максимально допустимый уровень возможных искажений (ухудшений)
- Регулирование дисперсионных искажений: увеличивает пороги после которых начинаются нелинейные искажения
- Формат модуляции



40/100G: ВЫБОР ФОРМАТА МОДУЛЯЦИИ

Не существует формата модуляции, который бы одновременно преодолевал все возможные искажения при передаче

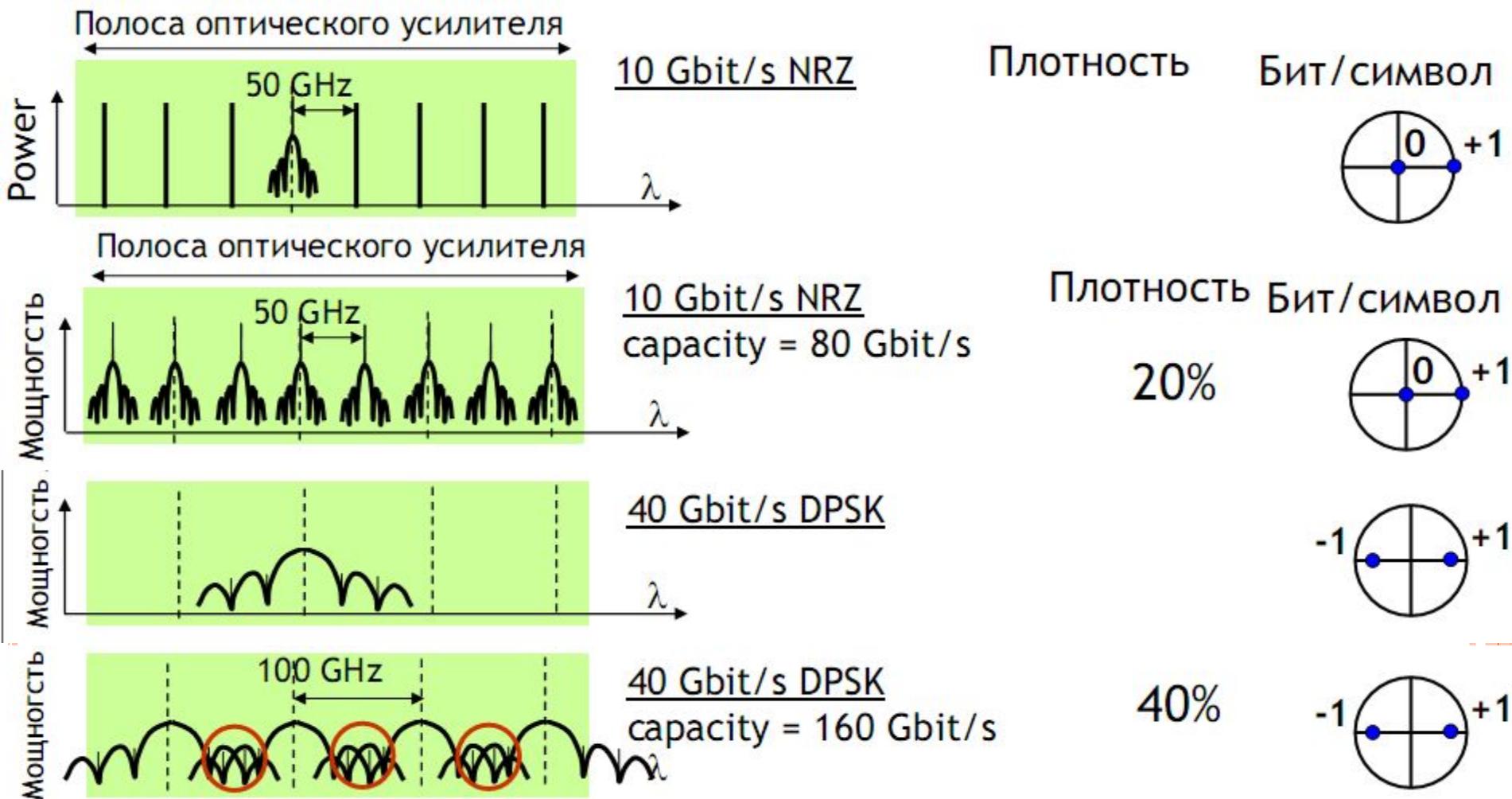
Различные форматы модуляции гарантируют достижение целей при разных условиях и требованиях при достижении компромисса между следующими требованиями:

- 1) Дальность передачи
 - 2) Совместимость с 10G трафиком
 - 3) Спектральная плотность (сетка размещения каналов)
 - 4) Подавление PMD
 - 5) Сложность , надежность, потребляемая мощность , занимаемый объем
- ...
- и стоимость!

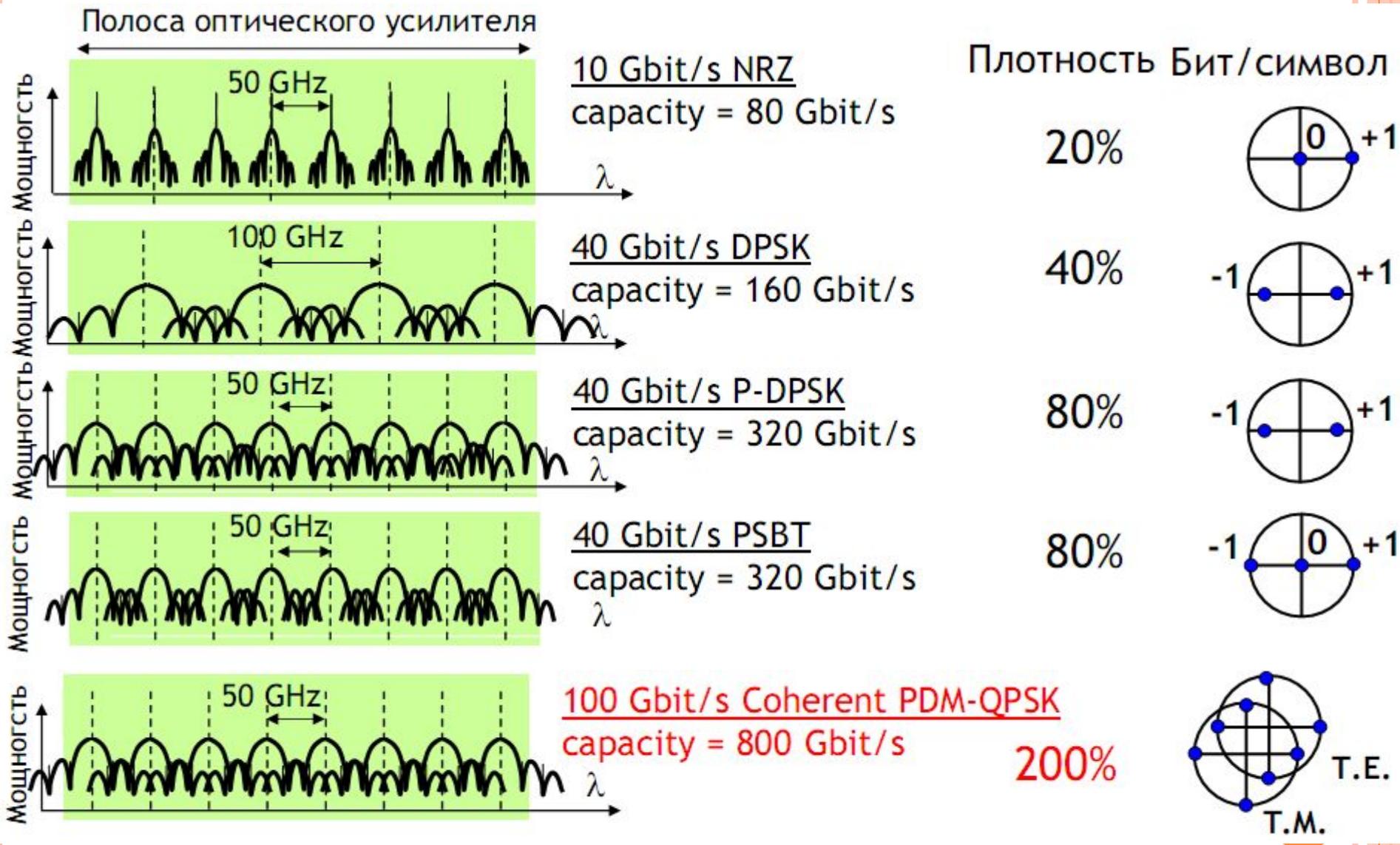
Нет формата модуляции , который был бы пригоден ко всем приложениям с минимальными затратами!



ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМ WDM ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ



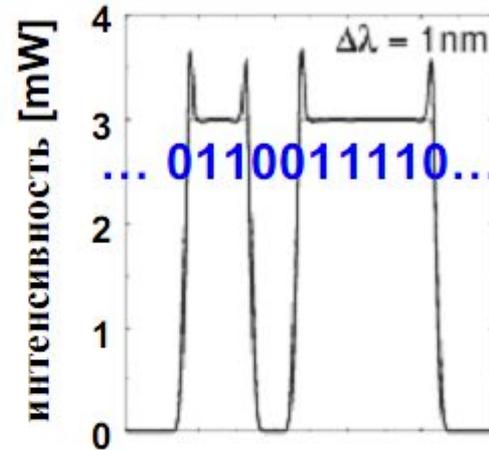
ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМ WDM ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ



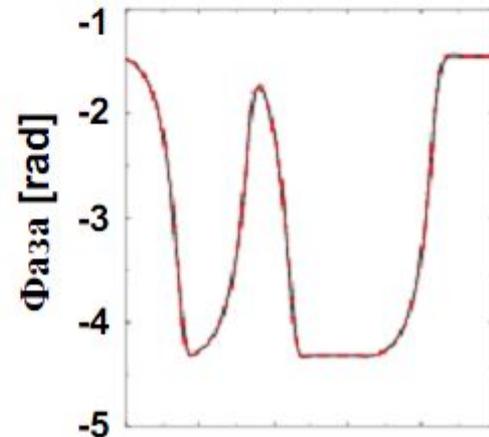
Кросс-фазовая модуляция. Что означает XPM?

XPM представляет собой
очень простой эффект:

В процессе
распространения по
оптическому волокну
интенсивность одного
канала приводит к
модуляции фазы в
соседних каналах



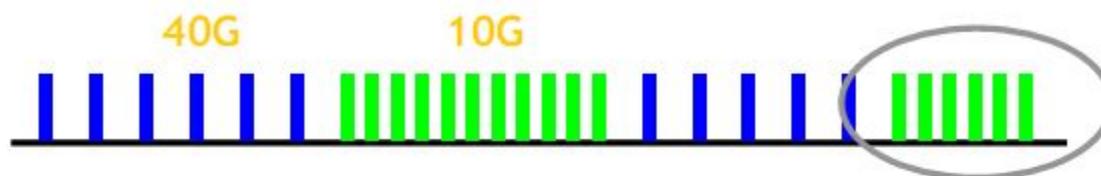
10G канал



XPM на сигнале
40G xPSK

Совместная передача 10G и 40G

Решение с 40G каналами (DPSK) с сеткой 100GHz и 10G каналов с сеткой 50GHz, без защитного интервала:



Решение для 40G RZ-DQPSK или 40G Coherent PDM(DP)-QPSK и 10G с сеткой 50GHz, с защитным интервалом:



Необходимость в защитном интервале во втором случае значительно снижает пропускную способность и/или лишает гибкости системы при выборе длин волн для организации оптических каналов в С-диапазоне

40G когерентное решение второго поколения

40G PDM-BPSK с когерентным приемом

Для того, чтобы уменьшить влияние XPM искажений от 10G каналов, Alcatel –Lucent предложил 2-ое поколение **40G когерентного решения**, для которого скорость передачи в Бодах в два раза выше (20 ГБод) по сравнению с DP-QPSK

В этом случае имеется в виду комбинация:

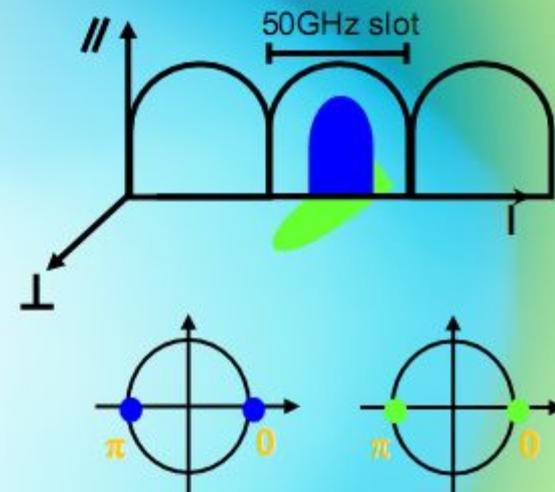
- **PDM** = Polarization Division Multiplexing
 - Означает то же самое, что и “DP” (Dual-Polarization) или Polarization Multiplexing)
- **BPSK** = **B**inary Phase Shift Keying

Уменьшает скорость передачи в символах только в два раза (с 40 до 20 ГБод)

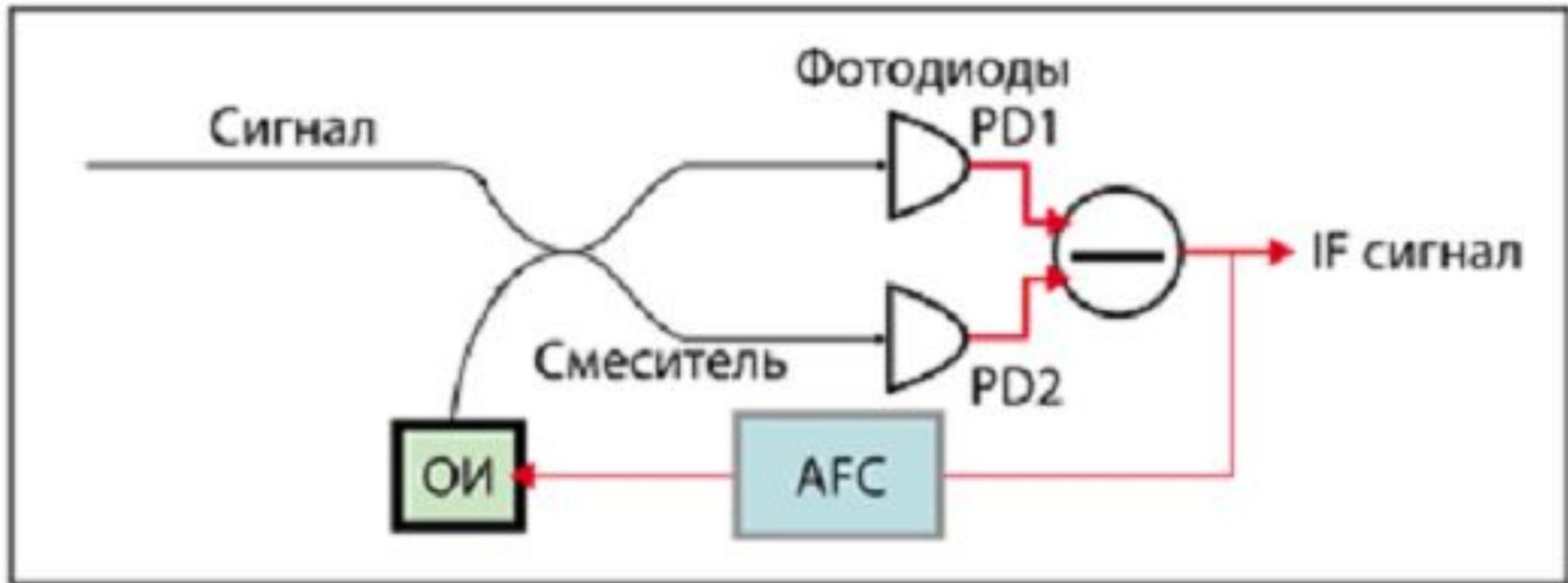
- Каждый символ передает 2 бита (по одному на каждую поляризацию)

Coherent Detection + Digital Post-Processing компенсирует влияние искажений в линии:

- **PMD** перестает влиять (предельные PMD сдвигаются до 30 пс)
- Не требуется измерять и компенсировать **Chromatic Dispersion**



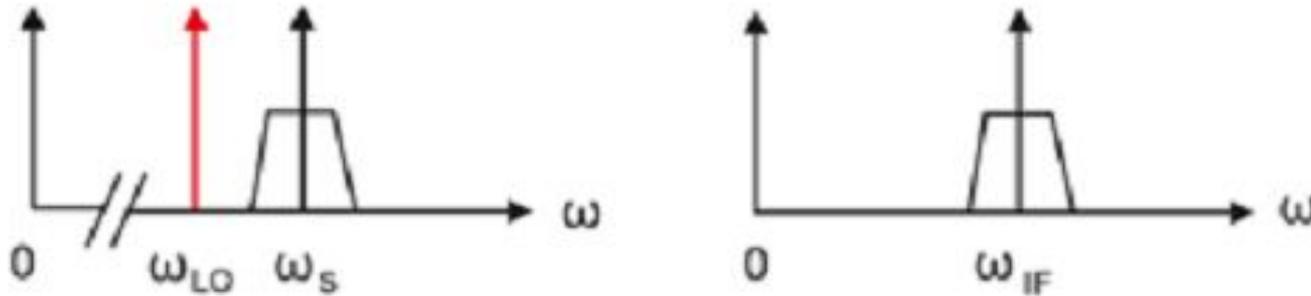
КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ (1)



Принцип работы традиционного когерентного приемника: оптический сигнал смешивается с опорным излучением (ОИ) и детектируется балансным фотоприемником, содержащим два фотодиода (PD1,2) и схему вычитания; для синхронизации ОИ используется схема автоподстройки (AFC)



КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ (2)

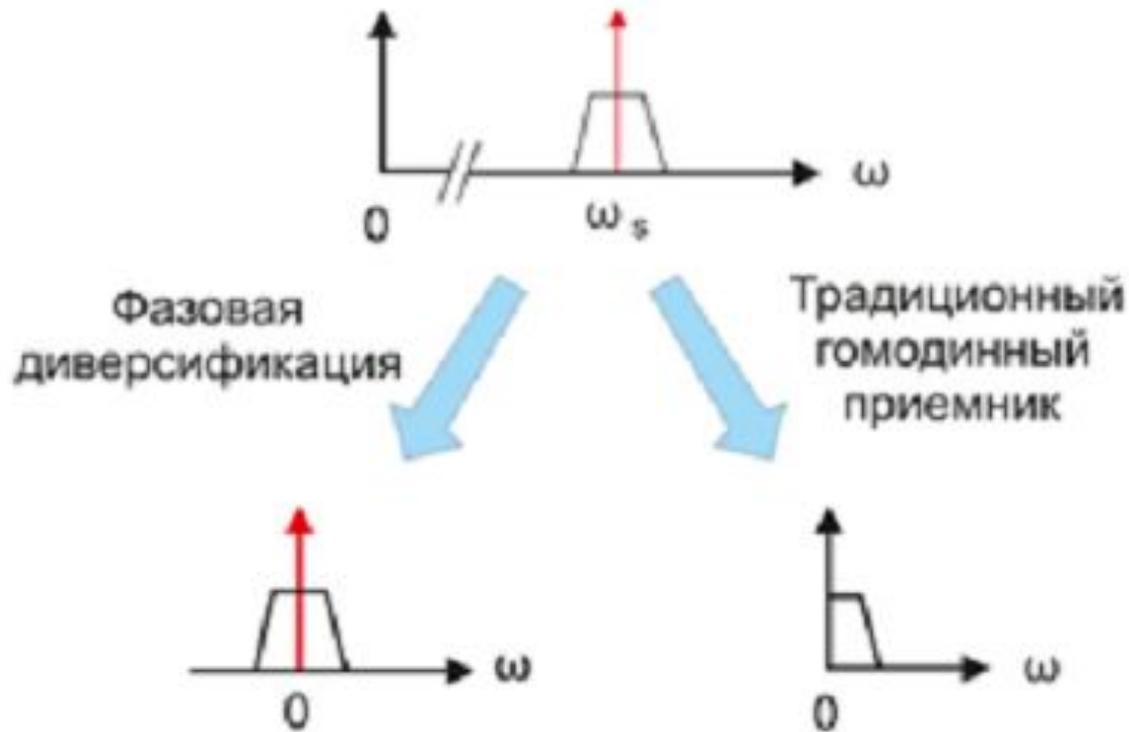


Преобразование спектра оптического сигнала в когерентном гетеродинном приемнике: слева показаны спектры оптического сигнала (трапеция), несущей волны (черная стрелка) и опорного излучения (красная стрелка); справа — спектры сигнала (трапеция) и несущей на промежуточной частоте.

Поскольку промежуточная частота должна быть значительно больше ширины полосы сигнала, то практическое применение гетеродинных приемников в системах связи со скоростью 100 Гбит/с маловероятно.

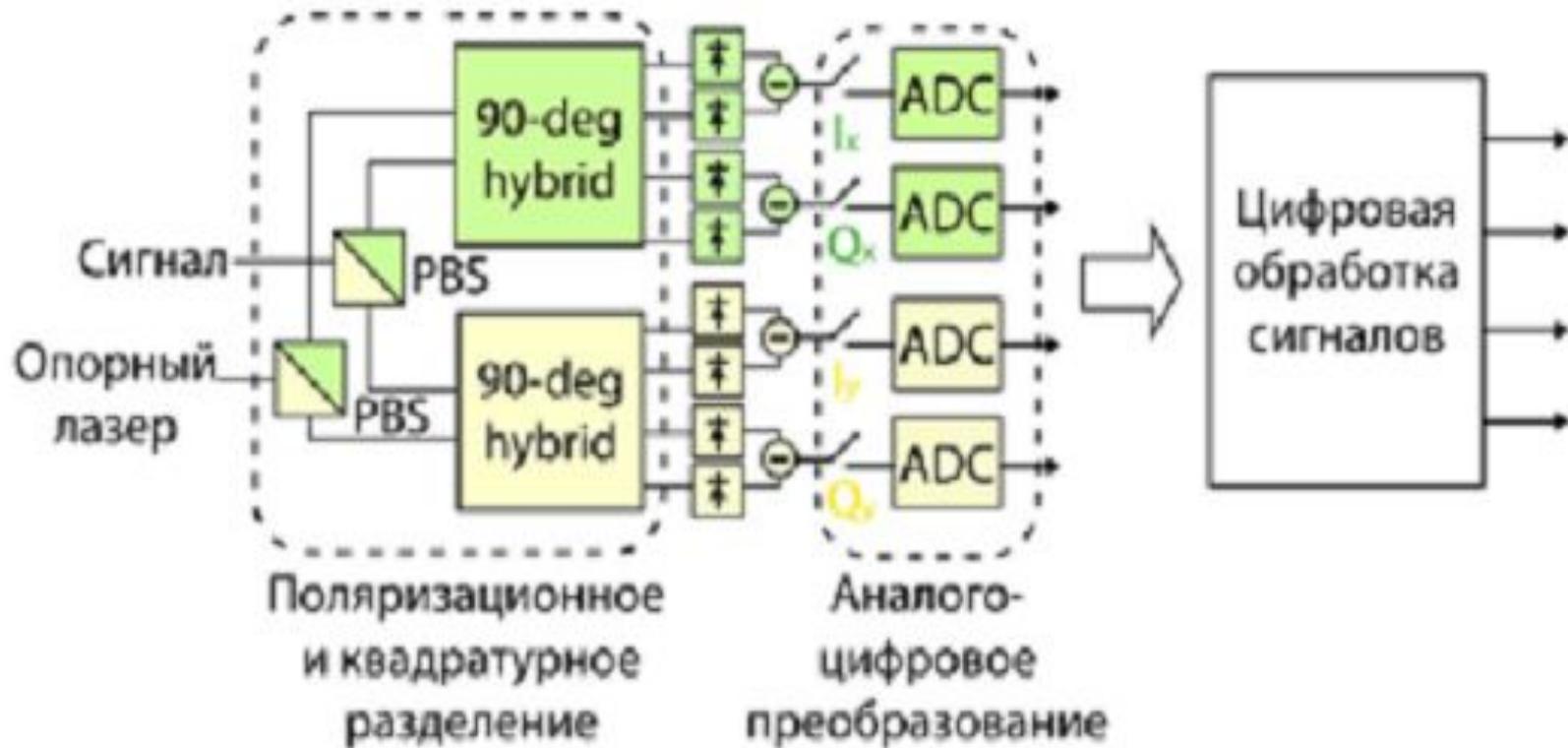


КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ (3)

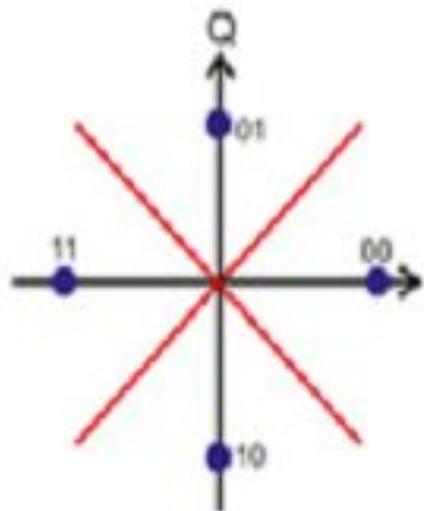


Преобразование спектра оптического сигнала в когерентном гомодинном приемнике: вверху показаны спектры оптического сигнала (трапеция) и опорного излучения (красная стрелка), спектр несущей совпадает со спектром опорного излучения; внизу справа — спектр сигнала биений (трапеция); слева — спектр комплексной огибающей несущей, восстанавливаемой с помощью фазовой диверсификации.

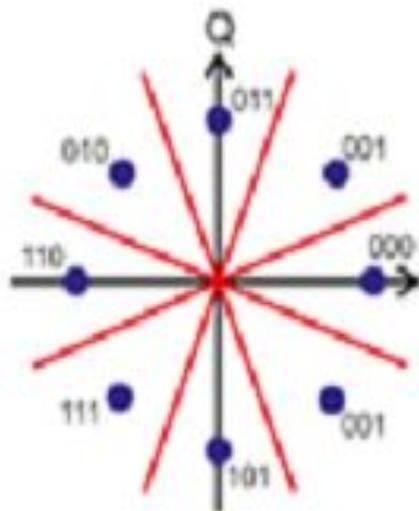
КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ (4)



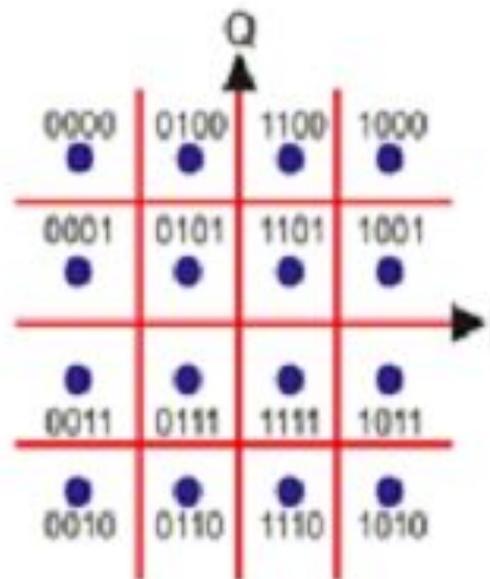
КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ (5)



QPSK
(2 бит/символ)



8-PSK
(3 бит/символ)



16-QAM
(4 бит/символ)



Когерентная система передачи 100G

Решение Alcatel-Lucent: 100G PDM-QPSK с когерентным приемом

На скорости 100G, некоторые эффекты, связанные с распространением сигнала в волокне (chromatic dispersion, PMD, single-channel nonlinearities) требуют **снижения скорости символов/сек (Бод)**

- Становятся необходимыми более сложные форматы модуляции и архитектура приемника

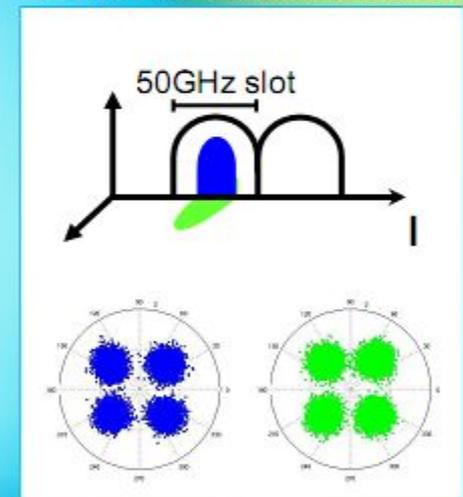
В этом случае имеется в виду комбинация:

- **PDM** = Polarization Division Multiplexing
 - то же значение, что и DP (Dual-Polarization)
- **QPSK** = Quadri-Phase Shift Keying
- Позволяет снизить скорость в символах в четыре раза (от 100 до 25 Гбод)
- Каждый символ переносит 4 бита

Coherent Detection + Digital Post-Processing компенсирует искажения в линейном тракте (PMD, Chromatic Dispersion):

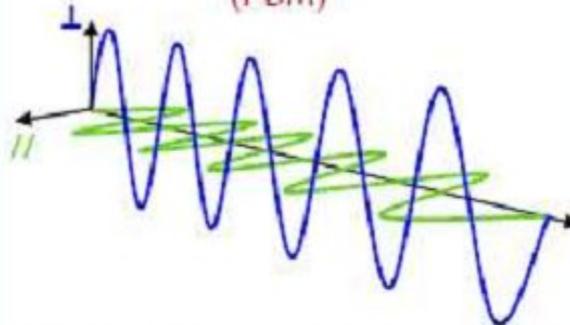
- **PMD** перестает влиять (предельные PMD сдвигаются до 30 пс)
- Не требуется измерять и компенсировать **Chromatic Dispersion**

PDM-QPSK modulation



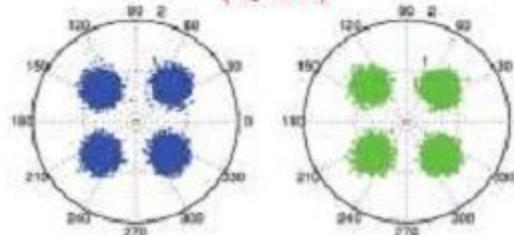
40/100G: ВЫБОР ФОРМАТА МОДУЛЯЦИИ

Polarization Division Multiplexing (PDM)



Single carrier travelling in the two light polarizations (50GHz slot)

Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)



Each polarization carries 4 phase-states (2 bits)



Стратегия Alcatel-Lucent в развитии и внедрении 100G

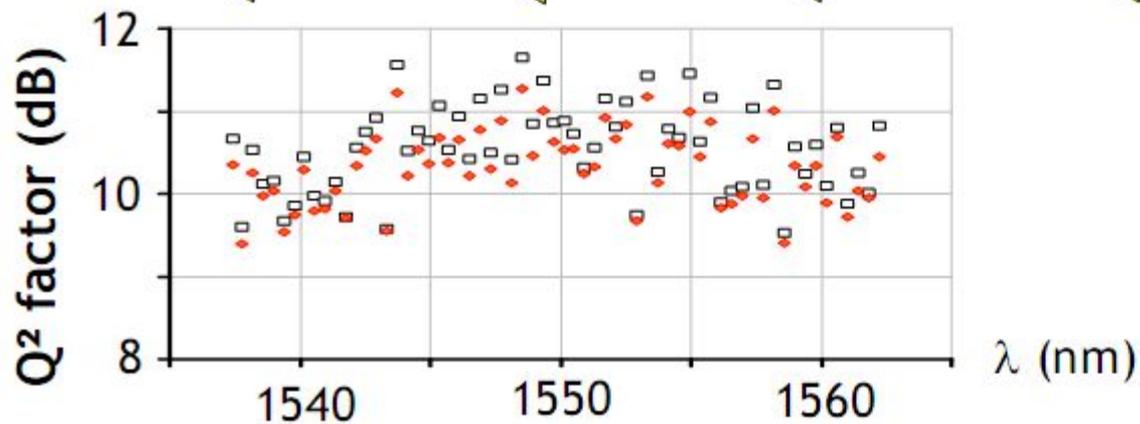
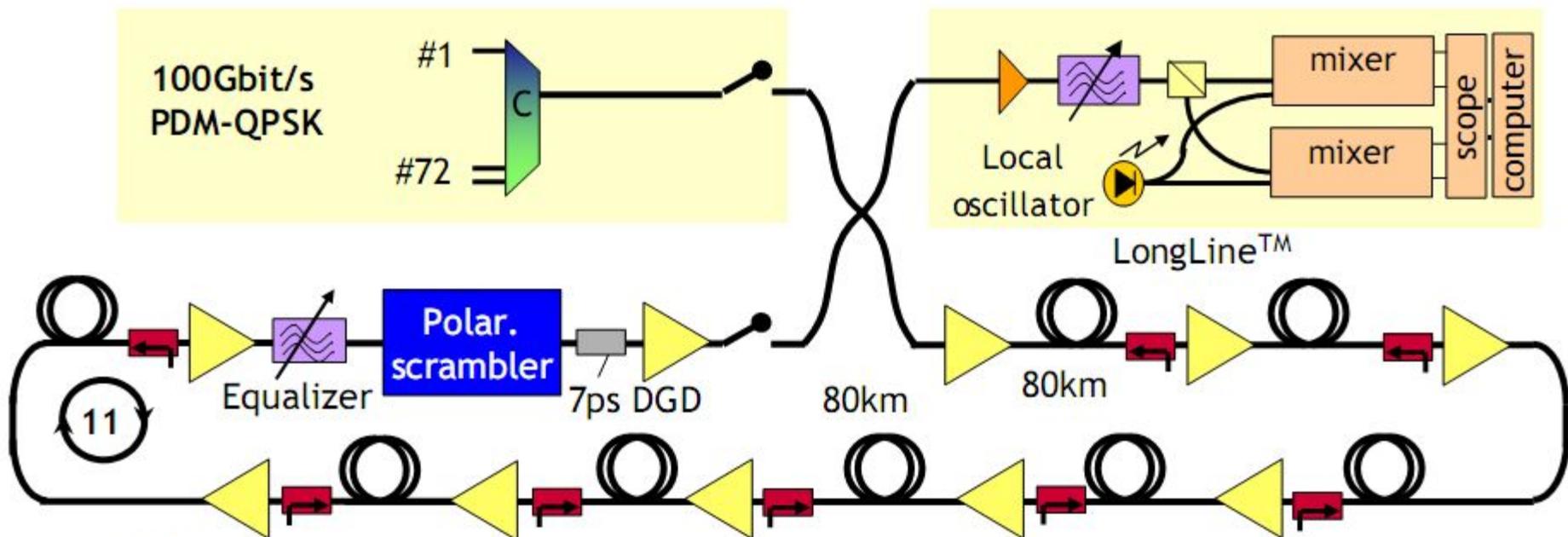
Описание решения

- PDM-QPSK с когерентным приемником
- Цифровая обработка
- Электронная **PMD** компенсация
- ⇒ до 30ps для PMD (90ps для DGD)
- Электронная **CD** компенсация: прорывная технология с компенсацией до **+/-40.000 ps/nm** (⇒ позволяет исключить *DCU* из линии!)

Характеристики

- | | |
|---------------------------|--|
| ▪ Прозрачная передача | >1.000 км с DCU (то есть с 10G)
(цель: 1500 км без DCU) |
| ▪ Сетка частот | 50 GHz |
| ▪ Количество каналов | 88 |
| ▪ Полная совместимость с/ | ранее установленным оборудованием |
| ▪ Полная совместимость с/ | существующими 10G & 40G каналами |

Экспериментальная подводная система передачи 72x100Gbit/s (7.2 Terabit/s) протяженностью 7,040 км



Первая в мире передача 100Гб/с на трансокеанские расстояния!