

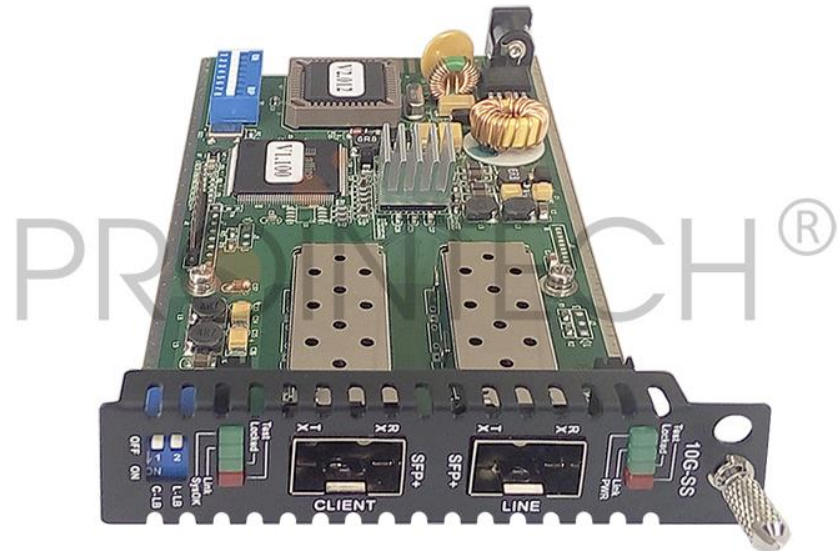
Изучение оптических модулей и транспондеров

Лабораторно-практическое занятие.

Время изучения 2 часа

Цель работы, порядок выполнения и содержание

- Цель работы – изучить устройство, принцип действия и характеристики оптических модулей и транспондеров
- Порядок выполнения: изучить по представленным материалам современные оптические модули и транспондеры, возможности применения в системах передачи; составить краткие ответы на контрольные вопросы; решить задачу по вариантам; составить отчёт.



Список литературы для самостоятельного изучения

- 1. Фокин В.Г. Гибкие оптические сети : учебное пособие для вузов / В.Г.Фокин, Р.З. Ибрагимов.- Санкт-Петербург : Лань, 2021/2022.- 252с.
- 2. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети. [Текст] : учеб. пособие. СибГУТИ, 2015. - 370 с.
- 3. Фокин В.Г. Оптические мультиплексоры OADM/ROADM и коммутаторы РХС в мультисервисной транспортной сети. [Текст] : учеб. пособие. СибГУТИ, 2011. - 204 с.
- 4. Фокин В.Г. Волоконно-оптические системы передачи. [Текст] : учеб. пособие. СибГУТИ, 2009. - 314 с.
- 5. Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи. [Текст]; учебное пособие, СибГУТИ, 2016. - 162с.

Содержание отчёта

- 1. Название работы. Ф.И.О. исполнителя с подписью. Руководитель занятия. Дата выполнения.
- 2. Цель лабораторно-практического занятия.
- 3. Содержание занятия с перечислением изучаемых разделов .
- 4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
- 5. Решение задачи и выводы по результатам выполнения работы.

Введение. Понятие оптического конвертора

- Оптические конверторы имеют ряд форматов реализации: трансиверы (от англ. *transmitter* – передатчик и *receiver* – приемник); транспондеры (от англ. *transmitter-responder* – передатчик – ответчик); мукспондер (от англ. *muxponder* – транспондер, но с дополнительной функцией объединения и разделения).
- Оптические трансиверы, как правило, представляют собой простые устройства для соединения между собой по волоконно-оптическим линиям связи сетевых устройств: абонентских терминалов; коммутаторов-маршрутизаторов; цифровых мультиплексоров различных технологий (PDH, SDH, Ethernet и др.). Трансиверы преобразуют электрические сигналы аппаратуры в оптические сигналы волоконных линий связи на передаче и выполняют обратные функции преобразования сигналов на приеме, т. е. оптические сигналы приема становятся электрическими сигналами для обработки в аппаратуре. Исполнение таких функций оптическими конверторами обусловило другое название этим изделиям – оптические интерфейсные модули или просто оптические интерфейсы, т. е. определенные международными стандартами (например, ITU-T или IEEE) границы взаимодействия. Трансиверы применяются на однопролетных и малопроектных линиях (не более 4) местных сетей связи. Под пролетом принято понимать участок волоконно-оптической линии с оптическим усилителем.

Введение. Понятие оптического транспондера и мукспондера (агрегирующего или мультиплексирующего транспондера)

- Оптические транспондеры, в отличие от трансиверов, представляют более сложные технические реализации по передаче и приему оптических сигналов со сложными алгоритмами упаковки информационных потоков на передаче и распаковкой этих данных на приеме с анализом качества передачи на ошибки и их последующим устранением. Транспондеры предназначены для завершения протяженных оптических каналов с высокими скоростями передачи (обычно свыше 10 Гбит/с на расстояния 2–4 тыс. км).
- Транспондеры также являются предметом стандартизации оптических интерфейсов. Особенности когерентных транспондеров (англ. – *coherent transponder*) являются следующие показатели: узкого спектра излучения передатчика, совпадающего со спектром излучения оптического гетеродина на приемной стороне; минимальные фазовые сдвиги между частотами передачи и гетеродина; многократное (до 10 раз) превышение оптической мощности гетеродина мощности принимаемого оптического информационного сигнала на приеме.
- Транспондеры с мультиплексированием, как правило, поддерживают ряд протокольных функций по объединению и разделению цифровых данных различных технологий, например, технологий нулевого и первого уровней OTN/OTN и технологии второго уровня 100G Ethernet, или мультиплексирования потоков 10G Ethernet в поток 40/100/400/800G Ethernet с последующей упаковкой в OTU4 и т. д. Мукспондеры часто обозначают как многоскоростные (*multi-rate*) и многопротокольные (*multiprotocol*) сетевые устройства оптических каналов.

Оптические трансиверы – модули: SFP, SFP+, XFP, QSFP, QSFP28, CFP

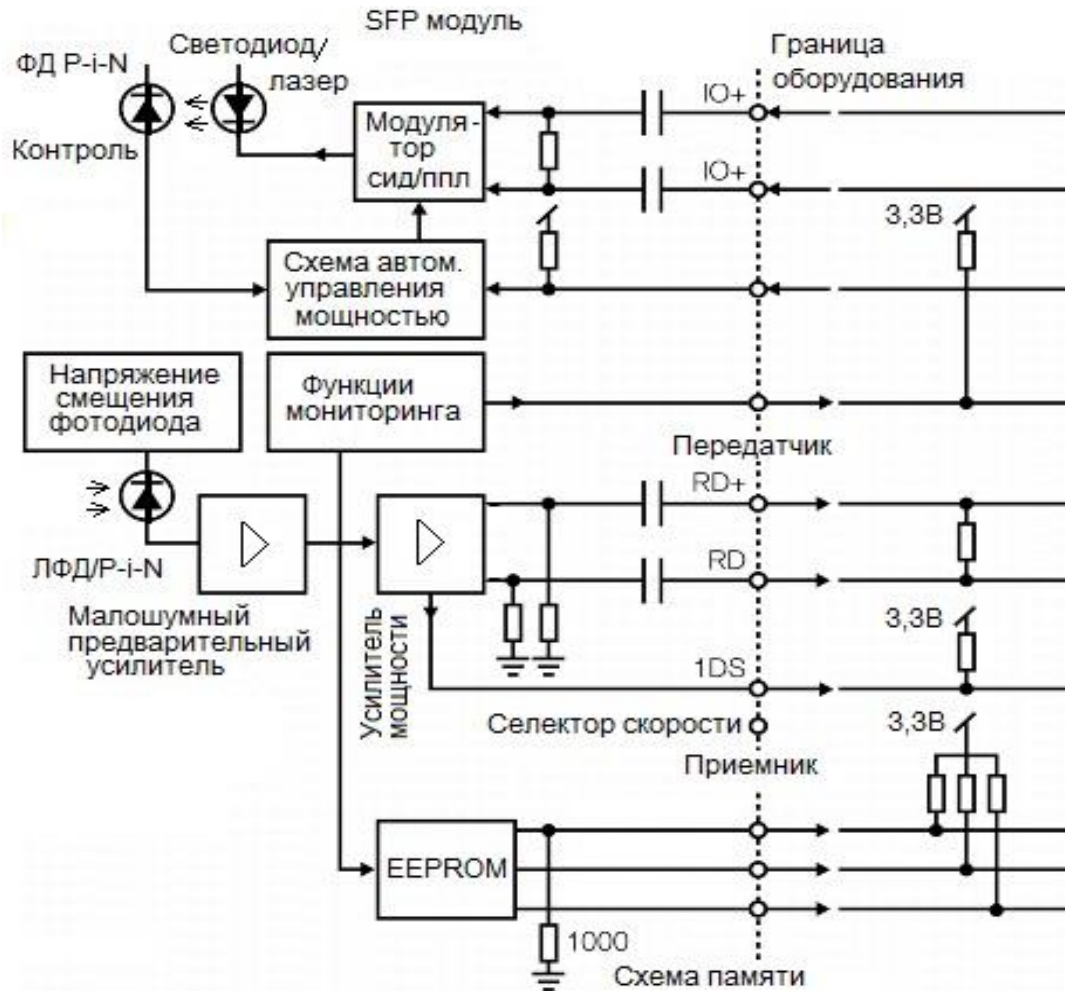
- SFP, SFP+, SFP28, QSFP+ и QSFP28 - это разные типы оптических моделей. Все они являются модулями сетевого интерфейса с возможностью горячей замены для подключения коммутаторов и других сетевых устройств (таких как серверы или медиаконвертеры) для передачи данных. Итак, в чем разница между SFP и [SFP+](#), SFP28 и SFP+, QSFP и QSFP28? Совместим ли QSFP28 с QSFP+? Можно ли использовать SFP28 модуль в портах SFP+?
- Прежде чем прояснить различия между SFP и SFP+, SFP28 и SFP+ или QSFP и [QSFP28](#) необходимо узнать, что такое SFP, SFP+, SFP28, QSFP, QSFP28 и CFP.



Оптические трансиверы – модули: SFP, SFP+, XFP, QSFP, QSFP28, CFP

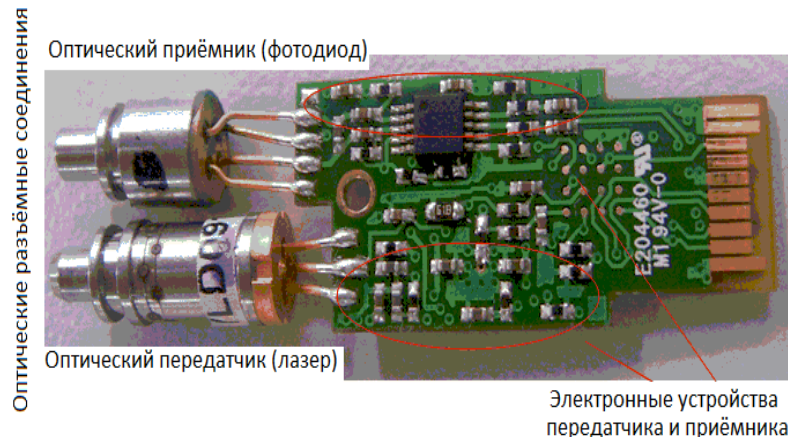
- Оптические трансиверы имеют различное модульное построение, различные скорости передачи цифровых данных, различные форматы линейного кодирования и модуляции, различные мощности передатчиков и чувствительность приемников, одноволоконную и двухволоконные схемы организации передачи, поддерживают различные сетки частот WDM (CWDM, DWDM) и различные дистанции передачи в одномодовых и многомодовых волокнах. Трансиверы (SFP, XFP, CFP) применяются как самостоятельные устройства в составе различных мультиплексоров и коммутаторов, так и в виде клиентских интерфейсов в составе транспондеров и мукспондеров.
- *SFP-трансиверы* – это компактные оптические устройства, соответствующие промышленному стандарту модулей SFP (Small Form-factor Pluggable — компактный сменный форм-фактор). Модификации SFP-модулей обеспечивают передачу данных, как по медной витой паре, так и по одномодовому или многомодовому оптическому волокну по одному или двум волокнам.
- SFP-модули можно использовать для работы на стандартных длинах волн 850/1310/1550 нм и в сетях с системами спектрального уплотнения WDM, CWDM и DWDM. Упрощенная электрическая схема SFP представлена на рис. Скорость передачи данных SFP колеблется от 100 Мбит/с до 4 Гбит/с.

Оптические трансиверы – модули: SFP, SFP+, XFP, CFP (электрическая схема)



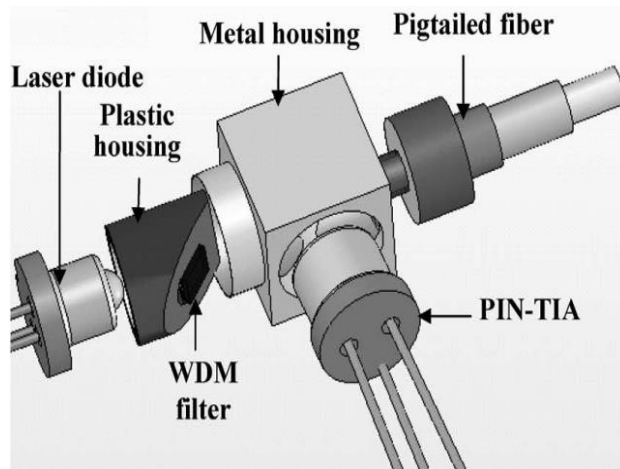
Оптические трансиверы – модули: SFP, SFP+, XFP, CFP (электрическая схема)

- В качестве оптических передатчиков в модулях применяются светодиоды (СИД), многомодовые полупроводниковые лазеры Фабри–Перо (ППЛ-ФР), одномодовые лазеры с распределенной обратной связью DFB, распределенная обратная связь или DBR и лазеры вертикального излучения VCSEL. Одномодовые лазеры могут перестраиваться по длине волны излучения и иметь управляемую мощность излучения, что необходимо при построении систем передачи CWDM и DWDM.
- В качестве оптических приемников чаще всего используются простые фотодиоды конструкций p-i-n и лавинные фотодиоды ЛФД (APD) для протяженных линий, совмещаемых с электрическими трансимпедансными усилителями (TIA). Для обеспечения более эффективного функционирования оптических систем передачи в приемники модулей SFP могут помещать фотодетекторы с функциями селекции оптических волн и предварительным оптическим усилением, что может быть необходимо для сверхпротяженных участков передачи с DWDM (до 120 и 180 км).
- Для поддержки функций мониторинга SFP применяется память EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство, ПЗУ), в которой записываются идентификационные признаки модуля, и которые могут считываться через схему поддержки. Это получило в документах название мониторинга цифровой диагностики DDM (Digital Diagnostic Monitoring). При этом цифровая диагностика не обязательно ограничивается только идентификацией, она нацелена на контроль исправности передатчика и приемника. Также возможна реализация схем управления длиной волны и мощностью излучения. По спецификации для мониторинга, на SFP и XFP модулях, установлен EEPROM объемом 128 байт. Первые 96 байт специфицированы, оставшиеся – отводятся производителю. В схеме поддержки используются программируемые модули PECL (PHP Extension Community Library), которые согласуют передачу и прием линейных сигналов с кодированием и декодированием, представлением данных на передачу и восстановлением на приеме по стандартным алгоритмам процессора гипертекстов PHP (Hypertext Preprocessor). Конструктивное исполнение модуля SFP представлено на рис.



Оптические трансиверы – одноволоконные модули

- *Одноволоконные (мультиплексирование с разделением волн WDM) SFP-модули* используются для формирования оптических сигналов в оптических линиях связи с технологией спектрального уплотнения WDM. WDM SFP применяются для двунаправленной передачи данных по одному оптическому волокну. Для образования дуплексного канала передачи данных в системе WDM модули SFP используются «попарно», при этом излучатели и приемники WDM SFP модулей имеют различное значение длины волны, например, 850/1310 нм или 1310/1550 нм.
- В таких модулях используется оптическая сборка на метало-пластиковой основе типа BOSA (Bidirectional Optical Sub. Assembly), которая сочетает в себе приемник (PIN-TIA) и передатчик (Laser diod) (рис.). Она позволяет осуществлять передачу и прием данных через один оптический коннектор (*pigtail fiber*). Разделение волн передачи и приема происходит в тонкопленочном оптическом фильтре (WDM-filter). В приемной части модулей используется интегрированный InGaAs детектор с предусилителем или детектор высокой чувствительности APD.
- WDM SFP-трансиверы поддерживают работу всех используемых на различных скоростях передачи данных протоколов: STM-1/SDH/FE – на скорости до 155 Мбит/с; STM -4/SDH – на скорости до 622 Мбит/с; GbE/FC – на скорости до 1,25 Гбит/с; STM-16/SDH/GbE/FC – на скорости до 2,5 Гбит/с; GbE/FC – на скорости до 4,25 Гбит/с. Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM. Функция DDM позволяет в режиме реального времени контролировать такие параметры, как: мощность входящего сигнала (RX), мощность исходящего сигнала (TX), температурные параметры работы модуля. Изменения данных параметров позволяют судить об износе оптической системы и состоянии трассы в целом.
- *Особенности: скорость передачи данных: до 4,25 Гбит/с; доступны трансиверы многоскоростные со скоростью передачи данных 155 Мбит/с ~2.67 Гбит/с; дальность передачи: до 180 км; напряжение питания: 3.3 В с логическим интерфейсом TTL; тип разъема: SC, LC; возможность «горячей замены»; рабочая температура: Standard: 0°C~ + 70°C; Industrial -40°C~ + 85°C; соответствие стандарту MSA SFP Specification; функция DDM в соответствии с SFF-8472.*



Оптические модули SFP+, SFP28, QSFP+, QSFP28

- **SFP+** (small form-factor pluggable plus) - это расширенная версия SFP, поддерживающая 8 Гбит/с Fibre Channel, 10 Gigabit Ethernet и стандарт оптической транспортной сети OTU2. SFP+ также предлагает прямое подключение для соединения двух портов SFP+ без дополнительных оптических модулей, включая DAC (Direct Attach Cable) и AOC (Active Optical Cable), которые являются довольно блестящими решениями для прямого соединения на коротком расстоянии между двумя соседними коммутаторами.
- **SFP28** (small form-factor pluggable 28) - это расширенная версия SFP+, SFP28 и SFP+ имеют одинаковый размер, но SFP28 поддерживает 25 Гбит/с на одном канале. SFP28 предоставляет новый метод обновления сети: 10G-25G-40G-100G, который представляет собой энергосберегающее решение для удовлетворения растущих потребностей сетей центров обработки данных следующего поколения.
- **QSFP+** — промышленный стандарт модульных компактных сетевых трансиверов, применяющихся в высокоскоростных сетях передачи данных. Это эволюция QSFP (quad small form-factor pluggable). QSFP может переносить 4 канала одновременно, и каждый канал может обрабатывать скорость передачи данных 1 Гбит/с, поэтому он называется Quad SFP. В отличие от QSFP, [QSFP+](#) поддерживает четыре канала 10 Гбит/с. И эти 4 канала могут быть объединены в канал 40 Gigabit Ethernet. QSFP+ может заменить 4 стандартных SFP+ модулей, которые могут улучшить плотность портов и снизить общую стоимость системы по сравнению с традиционными SFP+ продуктами.
- **QSFP28** (quad small form-factor pluggable 28) – это эффективное решение для организации высокоскоростных соединений, который предназначен для приложений 100G. Он предлагает высокую скорость передачи, компактные габариты и высокую плотность портов в рамках 1 Rack Unit. Он обеспечивает четыре канала высокоскоростных дифференциальных сигналов со скоростями передачи данных от 25 Гбит/с до потенциально 40 Гбит/с для удовлетворения требований 100 Гбит/с Ethernet (4x25 Гбит/с) и 100 Гбит/с 4X InfiniBand Enhanced Data Rate (EDR). Обратите внимание, что QSFP28 может выполнять breakout подключение 4x25G и 2x50G или 1x100G в зависимости от используемого типа модуля.



Сравнение SFP vs SFP+ vs SFP28 vs QSFP+ vs QSFP28

- **SFP vs SFP+:** одинаковый размер с различной скоростью и совместимостью
- SFP и SFP+ модули практически идентичны по размеру и внешнему виду. Это позволяет производителю оборудования повторно использовать существующие физические схемы SFP для коммутаторов с портами SFP+. Что касается разницы, то очевидным является то, что они поддерживают разные скорости передачи, SFP - до 4 Гбит/с, а SFP+ - 10 Гбит/с. Кроме того, они соответствуют различным спецификациям. SFP основан на протоколе SFF-8472, а SFP+ соответствует SFF-8431 и SFF-8432. С точки зрения совместимости порты SFP+ часто принимают SFP модуль с пониженной скоростью 1 Гбит/с. А SFP+ модуль нельзя подключить к порту SFP, в противном случае продукт или порт могут быть повреждены.
- **SFP28 vs SFP+:** можно ли использовать SFP28 модуль в портах SFP+?
- Да, можно. Из вышесказанного ясно, что SFP28 является обновленной версией SFP+, которую SFP28 был модернизирован для обработки 25 Гбит/с на линию. Они используют одинаковый форм-фактор, а расположение контактов разъемов SFP28 и SFP+ совместимо с разъемами. Таким образом, SFP28 будет работать с SFP+ модулями с пониженной скоростью 10 Гбит/с. Если порт можно настроить для передачи 10G, SFP+ модуль может нормально работать с портом SFP28 на коммутаторе, в противном случае SFP+ модуль не будет работать. Что касается медного кабеля, SFP28 медный кабель обладает значительно большей пропускной способностью и меньшими потерями по сравнению с версией SFP+.
- **SFP28 vs QSFP28:** работа по разным принципам
- Хотя в их наименованиях есть число 28, SFP28 и QSFP28 модули фактически используют разные размеры и принципы работы. SFP28 поддерживает только один канал с 25 Гбит/с, в то время как QSFP28 поддерживает 4 отдельные полосы, и каждый имеет скорость 25 Гбит/с. Оба они могут использоваться в сетях 100G, но SFP28 применяется в виде Breakout кабелей QSFP28 - SFP28. Ниже показано прямое подключение 100G QSFP28->4x SFP28 DAC.
- **QSFP+ vs QSFP28:** разные скорости для разных целей
- QSFP+ и QSFP28 модули объединяют 4 передающих и 4 приемных канала и имеют одинаковый размер. Кроме того, семейство продуктов QSFP+ и QSFP28 включает модуль и кабель DAC/AOC с разными скоростями. QSFP+ модуль поддерживает 1x 40 Гбит/с, а кабель QSFP+ DAC/AOC поддерживает 4x 10 Гбит/с. QSFP28 модуль способен передавать данные со скоростью 100 Гбит/с, а QSFP28 кабель DAC/AOC может работать со скоростью 4x 25 Гбит/с или 2x 50 Гбит/с. Обратите внимание, что обычно модули QSFP28 не могут быть разделены на 10G. Но если коммутатор поддерживает его, вы можете подключить модуль QSFP+ к порту QSFP28(как реализовать режим 4x10G на порте QSFP28 100G, посетите порт игры QSFP28 100G с 40G, 25G и 10G). В этой ситуации QSFP28 может разделиться на 4x10G, как модуль QSFP+.

Оптические трансиверы - двухволоконные модули

- *Двухволоконный модуль SFP* используется для двунаправленной передачи данных по двум одномодовым или многомодовым оптическим волокнам. Обычно в двухволоконных модулях SFP используются передатчики, работающие на волнах длиной 850/1310/1550 нм с различной оптической мощностью.
- *Особенности: скорость передачи данных: до 4,25 Гбит/с; дальность передачи: до 160 км; функция DDM в соответствии с SFF-8472.*
- *Оптические трансиверы с разреженным мультиплексированием CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexin)* предназначены для формирования сигналов на длинах волн CWDM диапазона (с 1270 нм по 1610 нм с шагом 20 нм). Для образования дуплексных каналов передачи данных в системе CWDM трансиверы используются «попарно».
- CWDM трансиверы производятся в различных форм-факторах: SFP, SFP+, GBIC, X2, XFP. Линейка предлагаемых трансиверов позволяет реализовывать гибкие технические решения и обеспечить скорость передачи данных в CWDM системах от 155 Мбит/с до 10 Гбит/с.
- CWDM Трансиверы поддерживают работу всех используемых на различных скоростях передачи данных протоколов: STM-1/SDH/FE – на скорости до 155 Мбит/с; STM-4/SDH – на скорости до 622 Мбит/с; GbE/FC – на скорости до 1,25 Гбит/с; STM-16 SDH/GbE/FC – на скорости до 2,5 Гбит/с; GbE/FC – на скорости до 4,25 Гбит/с; 10 GbE/10 FC/STM-64 – на скорости 10 Гбит/с.
- В зависимости от скорости передаваемого сигнала в передатчиках модулей устанавливаются лазеры различных типов: EML (Electroabsorptive Modulated Laser) – электроабсорбционный модулированный лазер для внешней модуляции излучения; DFB (Distributed Feedback) – лазер с распределенной обратной связью для прямой модуляции излучения.
- Типовой DFB-лазер имеет высокую температурную стабильность, что дает изменение генерируемой длины волны в пределах 2–3 нм в диапазоне температур 0–70°C.
- В приемной части модулей используются приемники высокой чувствительности APD либо обычные PIN.
- Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM. Пример конструкции модуля приведен на рис.

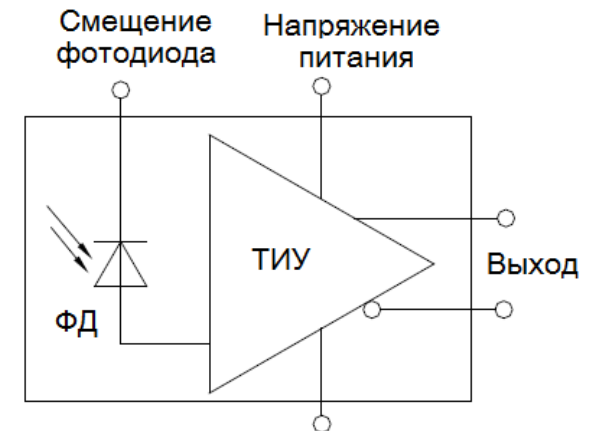
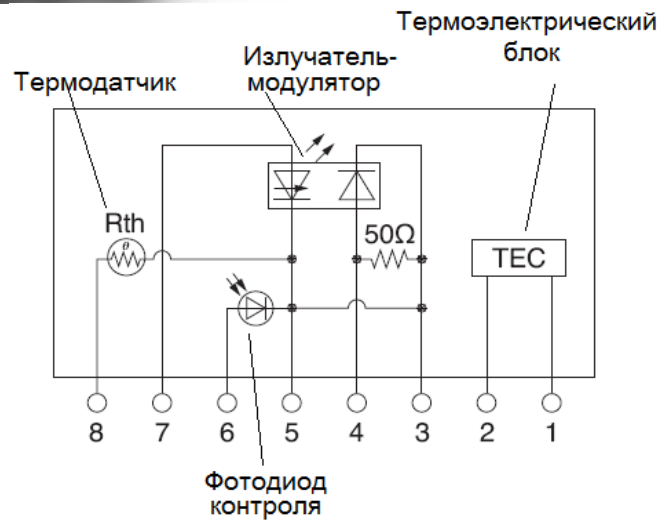
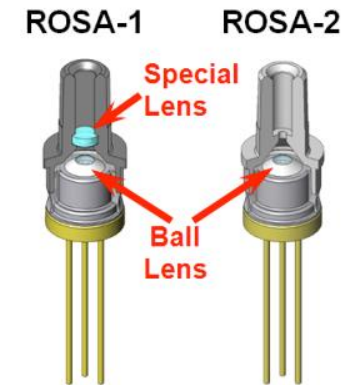
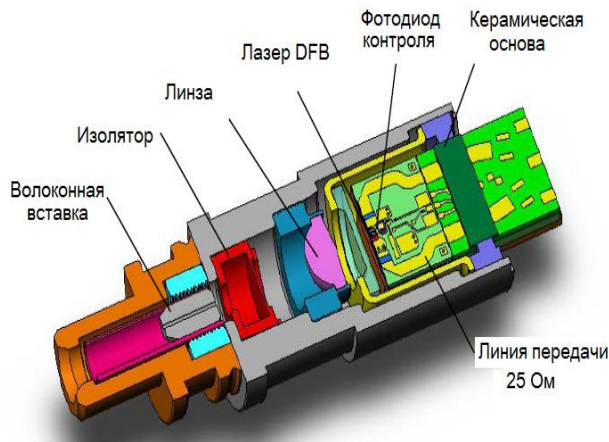


Оптические трансиверы- двухволоконные модули DWDM

- **Оптические DWDM трансиверы** предназначены для формирования сигналов на длинах волн C-диапазона из сетки DWDM (с 1528,77 нм по 1565,50 нм с шагом 0,8 нм). Для образования дуплексных каналов передачи данных в системе DWDM трансиверы используются «попарно».
- DWDM трансиверы производятся в различных форм-факторах (модулях): SFP, SFP+, X2, XFP, XENPAK, что позволяет реализовывать гибкие технические решения и обеспечить скорость передачи от 155 Мбит/с до 10 Гбит/с.
- DWDM трансиверы поддерживают работу всех используемых на различных скоростях передачи данных протоколов: STM-1/SDH/FE – на скорости до 155 Мбит/с; STM -4/SDH – на скорости до 622 Мбит/с; GbE/FC – на скорости до 1,25 Гбит/с; STM-16/SDH/GbE/FC – на скорости до 2,5 Гбит/с; GbE/FC – на скорости до 4,25 Гбит/с; 10 GbE/10 FC/STM-64 – на скорости 10 Гбит/с.
- В зависимости от скорости передаваемого сигнала в передатчиках модулей устанавливаются лазеры различных типов: EML – электроабсорбционный модулированный лазер с внешней модуляцией излучения; DFB – лазер с распределенной обратной связью с прямой модуляцией излучения. Типичный DFB-лазер имеет высокую температурную стабильность, что дает изменение генерируемой длины волны в пределах 2–3 нм в диапазоне температур 0°–70°С.
- В приемной части модулей используются приемники высокой чувствительности APD либо PIN. Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM.
- Модули SFP+ также представляют собой оптические трансиверы как и SFP, но с уменьшенными габаритами и повышенной скоростью передачи оптических сигналов по волоконным линиям до 10 Гбит/с. Они также соответствуют промышленному стандарту SFP и рассчитаны на рабочие волны 850/1310/1550 нм, используемые на коротких, средних и протяженных дистанциях. Кроме того, они могут применяться в сетях связи со спектральным мультиплексированием WDM в вариантах CWDM и DWDM. Модули SFP+ выпускаются с комплектами физических стыков для одномодовых и многомодовых волоконных световодов. При этом предусмотрены возможности одноволоконной и двухволоконной организации связи.

Оптические трансиверы - двухволоконные модули

Особенность двухволоконных модулей стандарта SFP+ состоит в использовании отдельных миниатюрных оптических сборок, которые называют TOSA-передатчик (*transmitter optical sub-assembly*) (рис. слева) и ROSA-приемник (*reciver optical sub-assembly*) (рис. справа). Электрические схемы этих устройств приведены на рис. ниже. TOSA содержит микрохолодильник для температурной стабилизации лазера.



Оптические трансиверы - модули SFP+, XFP

- **Одноволоконные WDM SFP+** -модули применяются для двунаправленной передачи данных по одному оптическому волокну. В таких модулях используется оптическая сборка типа BOSA, которая сочетает в себе приемник и передатчик [97]. Она позволяет осуществлять передачу и прием данных через один оптический коннектор.
- SFP+ -трансиверы поддерживают работу следующих протоколов: 10 GbE/10FC/STM-64. Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM.
- *Особенности: скорость передачи данных 11,13 Гбит/с; дальность передачи до 80 км; расширенная функция DDM в соответствии с SFF-8472.*
- **XFP-трансиверы** – это компактные оптические трансиверы, соответствующие промышленному стандарту модулей XFP (10Gigabit Small Form-factor Pluggable – 10 гигабитный компактный сменный форм-фактор). XFP-модули обеспечивают передачу данных в оптических линиях связи на скорости 10 Гбит/с.
- XFP-модули могут работать на стандартных длинах волн 850/1310/1550 нм, а также в сетях с системами спектрального уплотнения WDM, CWDM и DWDM.
- **Двухволоконные XFP-модули** используются для двунаправленной передачи данных по двум одномодовым или многомодовым оптическим волокнам. В таких модулях устанавливаются оптические сборки типа TOSA-передатчик и ROSA-приемник. Пример конструкции модуля XFP приведен на рис.
- **Одноволоконные WDM XFP-модули** применяются для двунаправленной передачи данных по одному оптическому волокну. В таких модулях используется оптическая сборка типа BOSA, которая сочетает в себе приемник и передатчик. Она позволяет осуществлять передачу и прием данных через один оптический коннектор.
- XFP-трансиверы поддерживают работу следующих протоколов: 10 GbE/ 10 FC/STM-64.
- Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM.
- *Особенности: скорость передачи данных: от 9,95 Гбит/с до 11,13 Гбит/с; дальность передачи: до 80 км; расширенная функция DDM в соответствии с SFF-8472.*

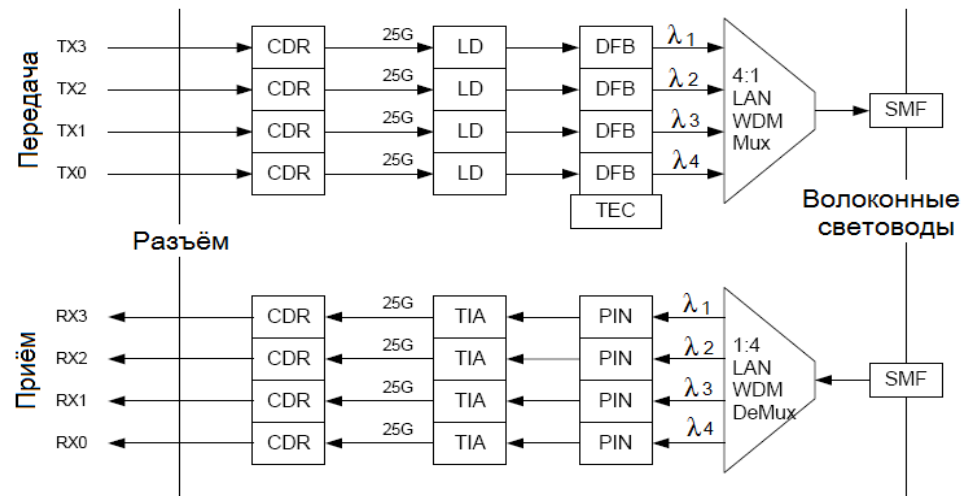
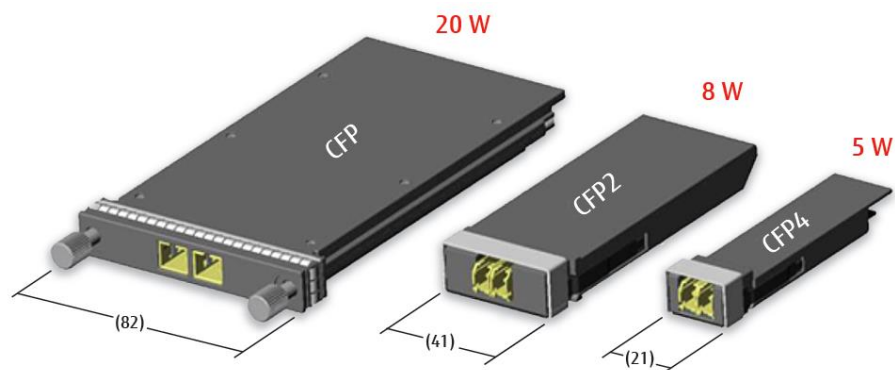


Оптические трансиверы - модули X2, QSFP

- **Трансиверы X2** – оптические трансиверы, предназначенные для формирования сигналов в оптоволоконных линиях связи на скорости 10 Гбит/с.
Модули X2 выпускаются для работы по двум одномодовым или многомодовым оптическими волокнам. Трансиверы X2 могут работать на стандартных длинах волн 850/1310/1550 нм, а также в сетях с системами спектрального уплотнения WDM, CWDM и DWDM.
- **Двухволоконные X2-модули** используются для двунаправленной передачи данных по двум одномодовым или многомодовым оптическим волокнам. В таких модулях устанавливаются оптические сборки типа TOSA-передатчик и ROSA-приемник.
- **Одномодовые WDM X2-модули** применяются для двунаправленной передачи данных по одному оптическому волокну. В таких модулях используется оптическая сборка типа BOSA, которая сочетает в себе приемник и передатчик. Она позволяет осуществлять передачу и прием данных через один оптический коннектор.
- X2-трансиверы поддерживают работу следующих протоколов: 10 GBE/ 10 FC/STM-64.
- Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM.
- *Особенности: скорость передачи данных: 10,31 Гбит/с; дальность передачи: до 80 км; функция DDM в соответствии с SFF-8472.*
- **QSFP+ -модули** – компактные оптические трансиверы, соответствующие новому промышленному стандарту QSFP+ (Quad Small Form-Factor Pluggable Plus).
- QSFP+ -модули используются для дуплексной передачи данных по двум одномодовым или многомодовым оптическим волокнам на скорости 40 Гбит/с. Модули выступают в качестве оптического интерфейса для активного телекоммуникационного оборудования (коммутаторов, маршрутизаторов и др.).
- В модулях QSFP+ используются передатчики, работающие на волнах длиной 850/1300 нм с различной оптической мощностью. В таких модулях устанавливаются оптические сборки типа TOSA-передатчик и ROSA-приемник.
- QSFP+ -трансиверы поддерживают работу всех используемых протоколов: STM-256/SDH/ – до 40 Гбит/с; 40 GbE/FC – на скорости до 41,25 Гбит/с.
- Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используется функция DDM.
- *Особенности: скорость передачи данных: до 41.25 Гбит/с; дальность передачи до 10 км; MDIO (Management Data Input/Output) интерфейс с интегрированной функцией цифровой диагностики DDM.*

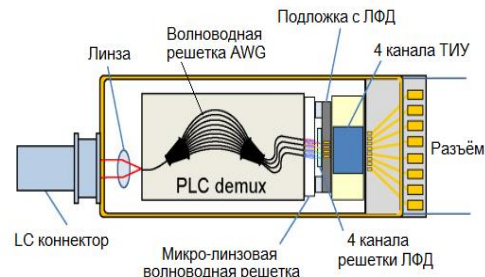
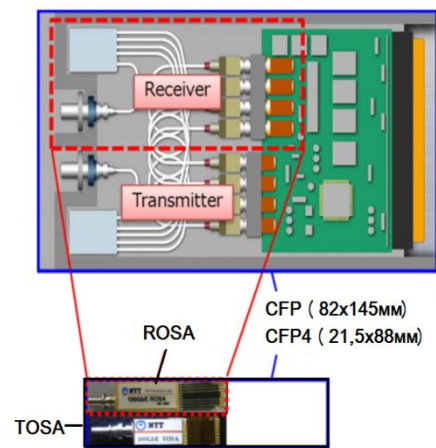
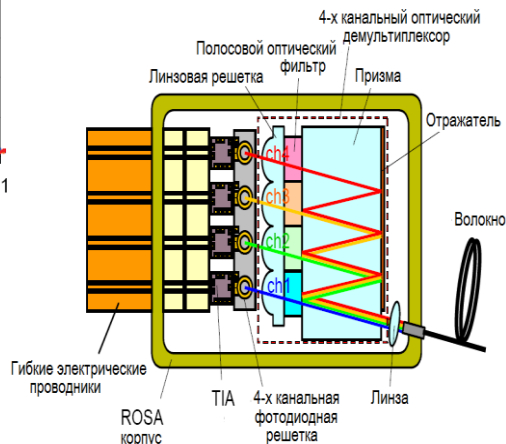
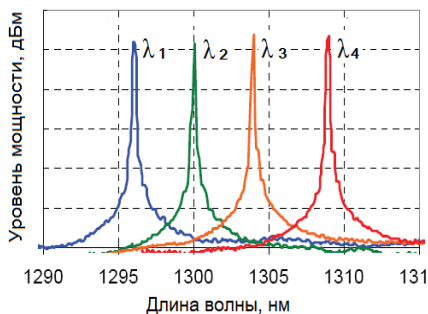
Оптические трансиверы- модули CFP

CFP-модули – оптические трансиверы, соответствующие новому промышленному стандарту CFP (C-Form-Factor Pluggable). CFP-модули обеспечивают передачу данных в оптических многомодовых и одномодовых линиях связи на скорости свыше 40 Гбит/с и 100 Гбит/с. CFP модули реализуются в трех разновидностях форм-факторов: CFP, CFP2 и CFP4 с различным потреблением мощности электропитания (рис.), которые отличаются габаритами внешне и внутренним исполнением схем передатчиков и приемников. Модули CFP в электрической части имеют 12×10 Гбит/с пар передатчиков Tx и приемников Rx. Модули CFP2 в электрической части имеют 8×25 Гбит/с пар передатчиков Tx и приемников Rx. Модули CFP4 в электрической части имеют 4×25 Гбит/с пар передатчиков Tx и приемников Rx. Также модули CFP2 могут реконфигурироваться под нагрузку 10×10 Гбит/с пар Tx, Rx. В модули интегрирована система MDIO. Пример внутренней структуры модулей CFP2/4 представлен на рис. (clock and data recovery – CDR).



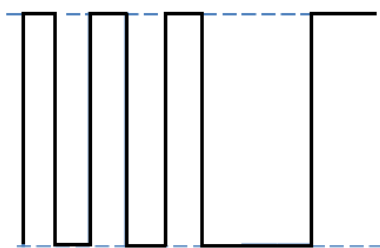
Оптические трансиверы - модули CFP

- В модулях CFP используются группы оптических передатчиков и приемников, настроенные на 4 отдельные оптические волны, например, 1295,1 нм; 1300,1 нм; 1304,6 нм; 1309,1 нм (рис. слева). В передатчиках может реализовываться прямая и внешняя модуляция оптического излучения в формате сигналов NRZ. В приемниках применяется прямое детектирование оптического излучения отдельных волн. Такое решение характерно для стандартных интерфейсов Ethernet для коротких линий (до 10 км) 100GE-LR4.
- Практическое исполнение четырех волновых каналов представлено в ROSA (рис. слева центр) и TOSA (рис. справа центр). В структуре многоканальных оптических передатчиков/приемников TOSA и ROSA могут использоваться оптические мультиплексоры не только на основе тонкопленочных оптических фильтров, но и волноводных решеток AWG на основе PLC технологии (рис.справа). Волноводные решетки обеспечивают изоляцию каналов не менее 20 дБ при интервале между каналами 100 ГГц или 0,8 нм и более.
- Еще одной принципиальной особенностью модулей CFP является возможность реализации сложного кодирования/декодирования на одной волне, например, DPSK, QPSK, DP-QPSK, 16QAM в составе модуля и применения когерентного приема на скоростях 40 и 100 Гбит/с. Такие решения пригодны как для коротких соединительных линий, так и для построения городских магистралей транспортных сетей Ethernet.

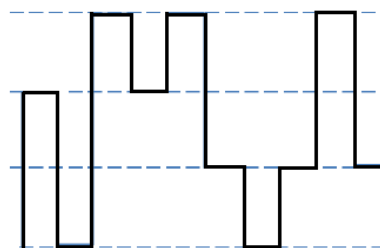


Оптические модули CFP-2 ACO, DCO и QSFP-DD, OSFP

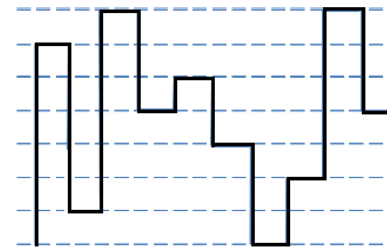
- Форматы реализации когерентных модулей представлены в виде CFP2 - ACO (Analog Coherent Optics), CFP2 – DCO (Digital Coherent Optics), QSFP, QSFP-DD. Форматы ACO, DCO отличаются местом исполнения схемы цифровой обработки детектированного оптического сигнала.
- В модуле CFP2-ACO располагается только аналоговая оптическая часть, а цифровая обработка вынесена на стыкуемую плату с электронными компонентами. В модуле CFP2-DCO цифровая схема совмещена в одном корпусе с аналоговой оптической схемой.
- Кроме того, часто на скоростях 40/100/400 Гбит/с используются модули QSFP-DD (Double Density, двойная плотность), OSFP (Octal Small Form Factor Pluggable) с параллельной передачей оптических сигналов на нескольких несущих оптических частотах с простым кодированием PAM-n (Pulse Amplitude Modulation, $n=2, 4, 8, \dots$), где n число кодируемых уровней, каждый из которых соответствует определённой двоичной кодовой комбинации. Таким образом, за счёт использования нескольких волн, порождаемых линейкой интегрированных на одной подложке узкополосных одномодовых лазеров, и применения многоуровневого кодирования, возможно в двухволоконной линии поддержать различную дистанцию передачи при наращивании скорости до 400 Гбит/с.



PAM2 (NRZ): $2^1 = 2$

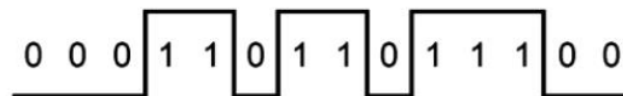


PAM4: $2^2 = 4$



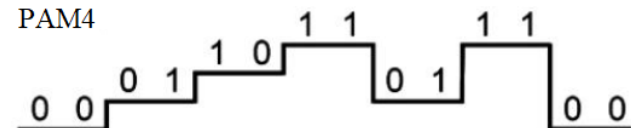
PAM8: $2^3 = 8$

PAM2 (NRZ)



Информационные символы

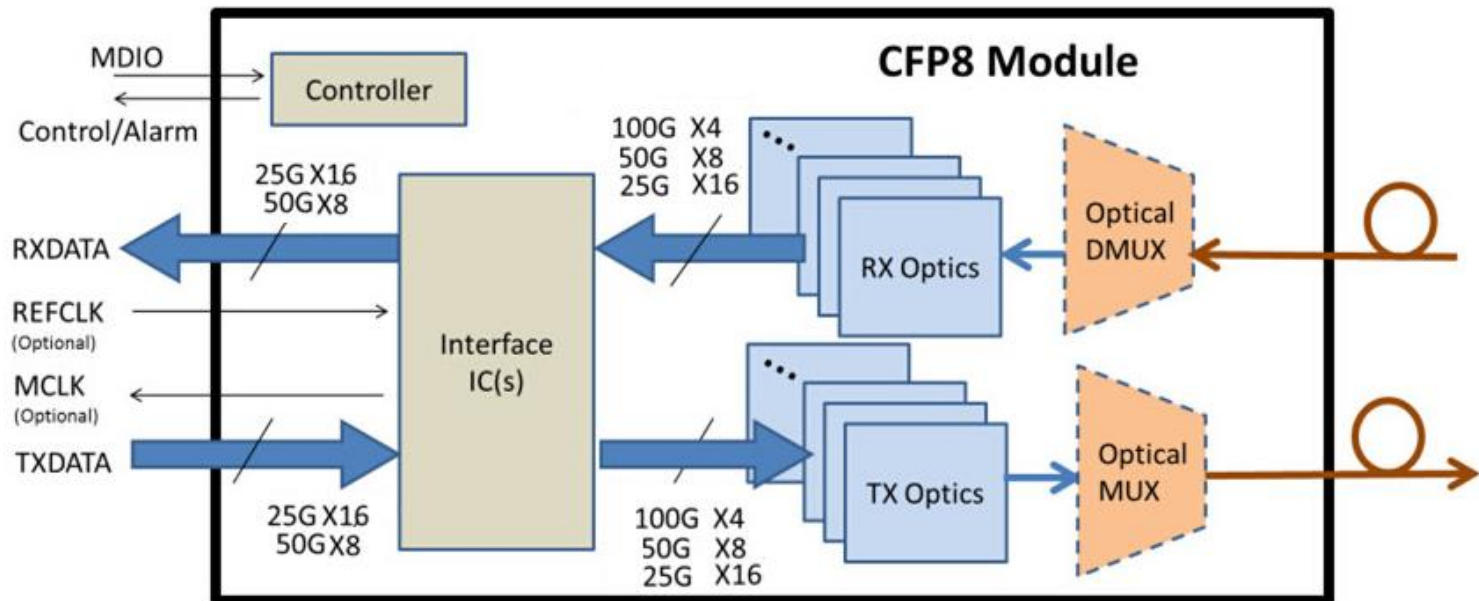
PAM4



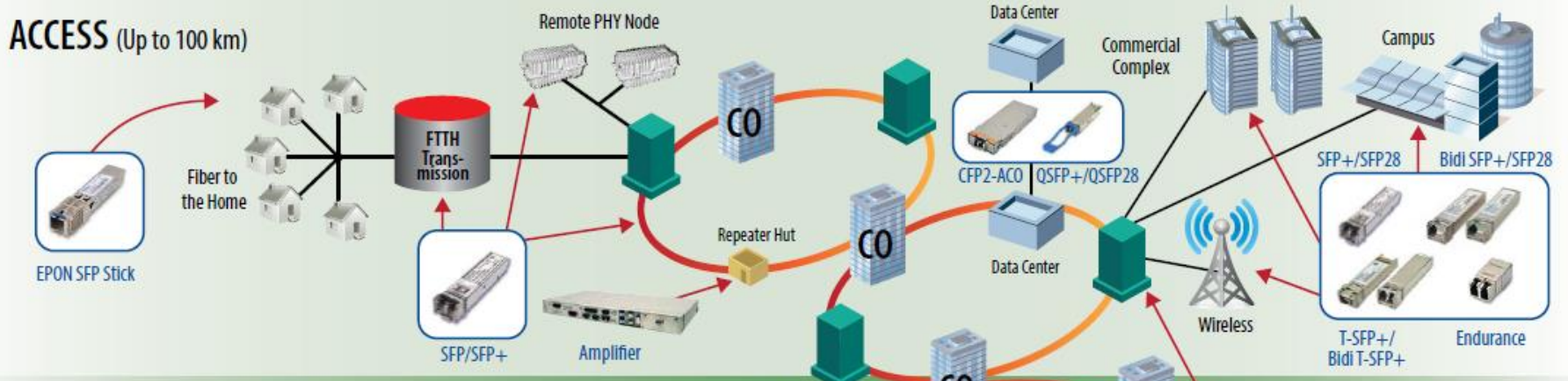
Блоки информационных символов

Пример модуля CFP-8

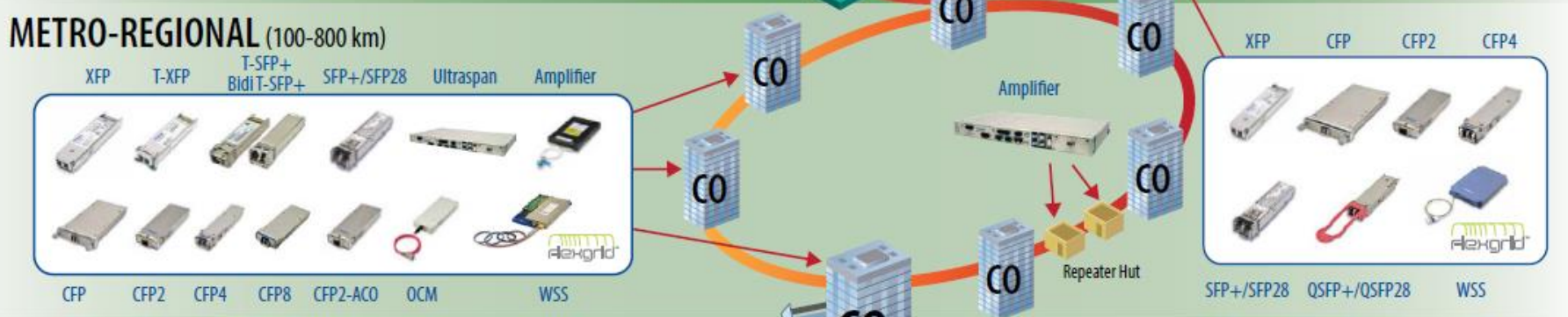
Для модулей CFP-8 (рис.), поддерживающих скорости передачи до 425 Гбит/с и определённых стандартом IEEE802.3bs, назначена группа из 8 волн CWDM (от 1270 до 1410 нм с интервалом 20 нм). Пример интерфейса на модуле CFP8 технологии Ethernet: 400GBASE-FR8 - достигается расстояние передачи в 2 километра по двум одномодовым волокнам, для организации 400G используется 8 каналов с модуляцией PAM4, объединенных по технологии спектрального уплотнения CWDM или LAN-WDM. При этом поддерживается скорость более 50 ГБод в каждом из спектральных каналов. Реальные дистанции передачи достигают 10 км. Изучаются возможности по увеличению дистанций до 40/100 км. Также исследовательскими группами IEEE P802.3cm, сейчас ведутся разработки стандартов для скоростных режимов 800 Гбит/с и 1,6 Тбит/с.



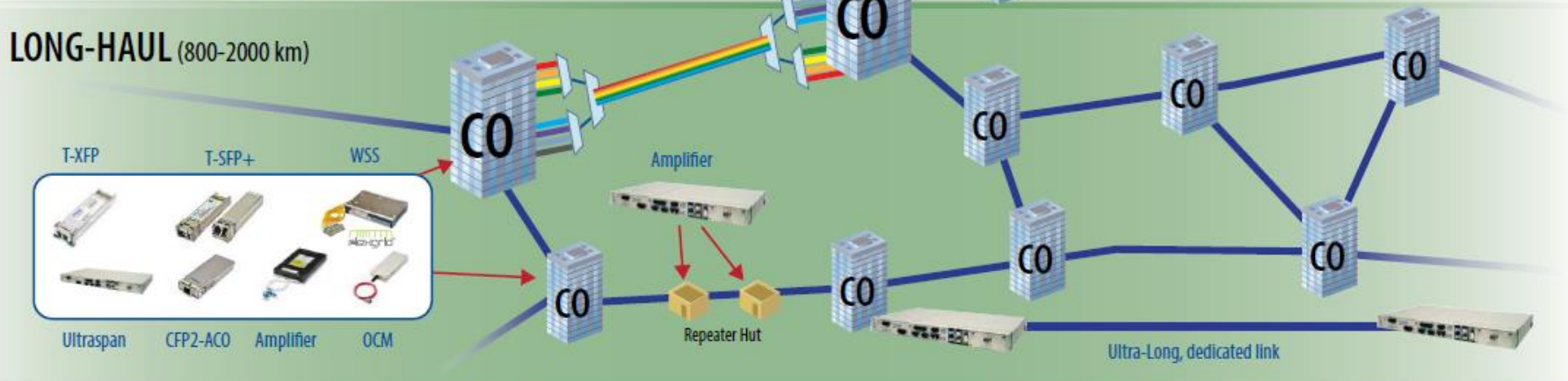
ACCESS (Up to 100 km)

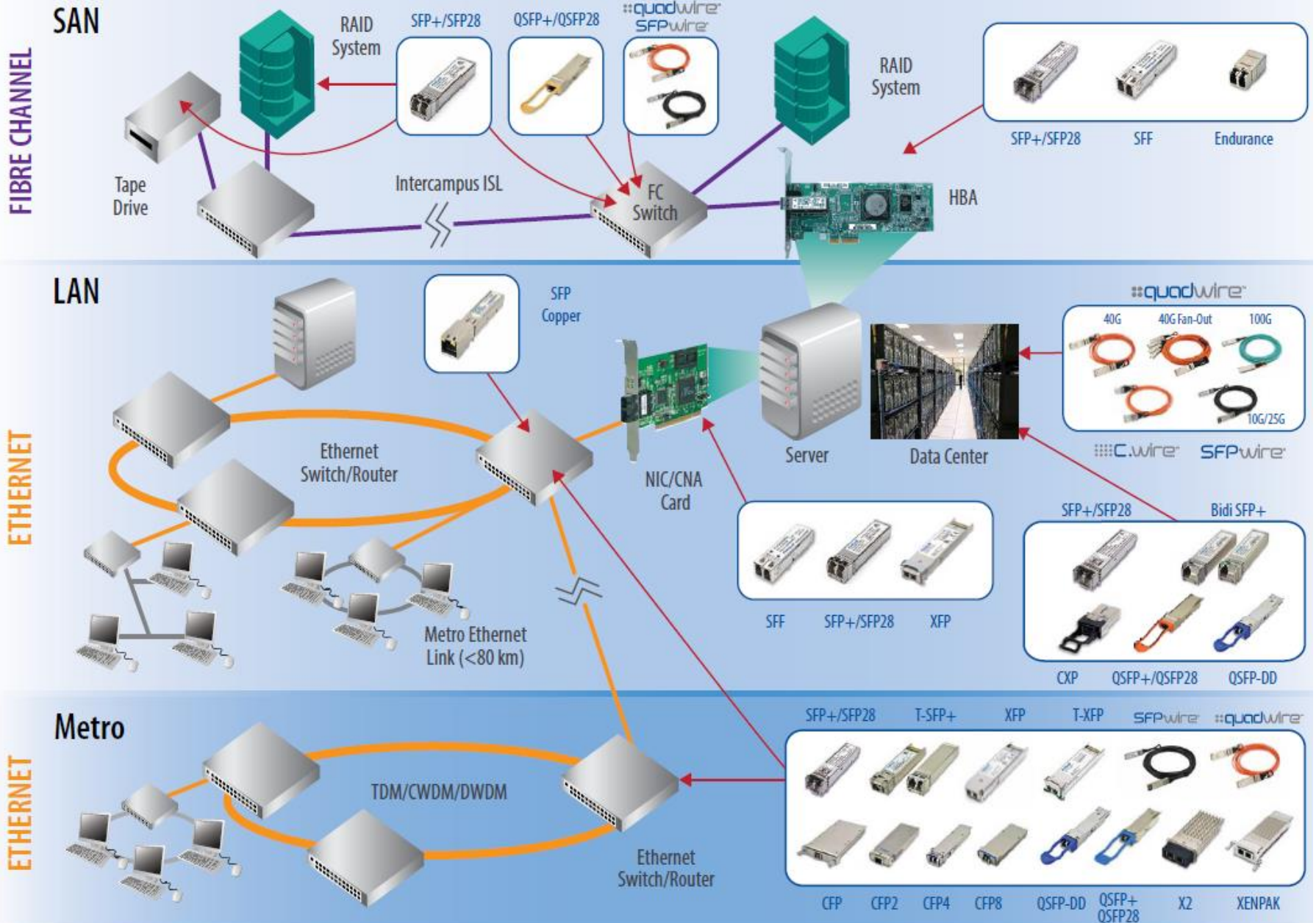


METRO-REGIONAL (100-800 km)



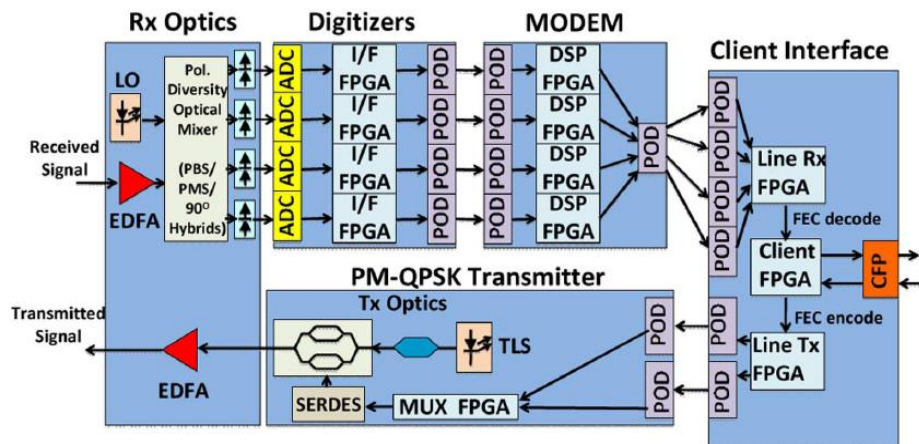
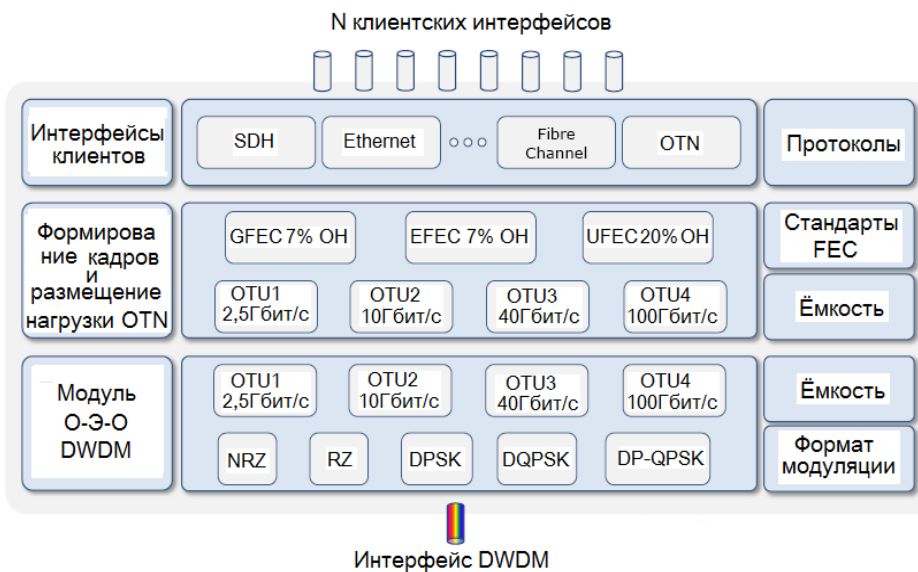
LONG-HAUL (800-2000 km)





Транспондеры и мукспондеры

Транспондеры для оборудования оптических сетей имеют существенно более сложное построение в аппаратной электронной и оптической частях и в алгоритмическом наполнении в сравнении с модулями SFP, XFP и CFP. Достаточно рассмотреть составляющие общей структуры транспондера (рис.слева), чтобы убедиться в возможностях модуля преобразования DWDM (О-Э-О), формирования кадров оптической иерархии и размещения нагрузки пользователей (клиентов транспортной сети). При этом в транспондере обычно задействован один из N клиентских интерфейсов и один из интерфейсов DWDM с подходящим форматом модуляции на передаче и детектирования на приеме. Пример структурного исполнения такого транспондера представлен на рис.



Транспондеры и мукспондеры

- Коротко о структуре транспондера необходимо отметить следующее:
- в передающей части два параллельных потока на скоростях около 63 Гбит/с, входящие через схемы мультиплексирования MUX FPGA и SERDES, преобразуются в четыре потока кодовых групп QPSK и поступают параллельные оптические модуляторы, через которые проходят импульсы оптического излучения, сформированные от источника непрерывного излучения TLS вспомогательным модулятором;
- импульсы оптического излучения делятся по мощности на два ортогональных канала, в каждом из которых производится модуляция QPSK;
- в приемной части оптические сигналы после усиления смешиваются с оптическим сигналом гетеродина LO и после разделения в оптической гибридной схеме попадают на фотодетекторы;
- аналоговые электрические сигналы после фотодетекторов преобразуются в цифровые схемами АЦП (ADC) и далее устраняются дисперсионные искажения, корректируются фазовые сдвиги и т. д.;
- в схеме модема принимается решение о восстанавливаемых четырех потоках цифровых последовательностей (двоичные 0, 1);
- в клиентском интерфейсе восстанавливается кадр OTU4 с коррекцией ошибок по одному из алгоритмов Рида–Соломона (GFEC, UFEC, HG-FEC).
- Три разновидности кодов FEC для систем передачи с DWDM определены международными стандартами ITU-T G.709, G.975, G.975.1. Они имеют различную емкость в кадре OTUk для коррекции ошибок (от 7 % до 25 %), что отражает их исправляющие возможности, допустимую величину OSNR и требуемый скоростной режим передачи (примеры в табл. следующий слайд).
- Универсальным к применению в 100 Гбит/с системах по рекомендации G.975.1 принято считать код HG-FEC (High-Gain FEC). Особо важно это для оптических сетей с широким использованием ROADMs с полосно-ограниченными оптическими каналами.

Характеристики транспондера: общая, передатчика (справа), приёмника (слева)

Интерфейс клиента		Способ размещения нагрузки	Характеристики интерфейса оптического канала		
Формат данных	Скорость, Гбит/с		Формат передачи	Скорость при 7 % GFEC или HG-FEC OH, Гбит/с	Скорость при 20 % UFEC OH, Гбит/с
100GE LAN-PHY	101,125	Побитовое согласно G.709v3	OTU4	111,809	124,964
OTU4	111,809	Стандартное по G.709			

Допустимая хроматическая дисперсия	Тип FEC и задержка кодирования	Ошибки перед декодером FEC	Ошибки после декодера FEC	Уровень мощности на приеме (чувствительность)	Групповое время задержки	OSNR При полосе спектра 0,5 нм
Широкого диапазона применения транспондера						
0 пс/нм 0 пс/нм ±70000 пс/нм	UFEC 20 % OH 39 мкс	<1 × 10 ⁻²	<10 ⁻¹⁵	0...-14 дБм при -20 дБм штраф OSNR 0,5 дБ	- 180 пс 180 пс	7,5 дБ 8,0 дБ 9,0 дБ
0 пс/нм 0 пс/нм ±70000 пс/нм	HG-FEC 7 % OH 20 мкс	<4,0×10 ⁻³	<10 ⁻¹⁵	0...-14 дБм при -20 дБм штраф OSNR 0,5 дБ	- 180 пс 180 пс	8,0 дБ 8,5 дБ 9,5 дБ
0 пс/нм 0 пс/нм ±70000 пс/нм	GFEC 7% OH 4мкс	<1 × 10 ⁻³	<10 ⁻¹⁵	0...-14 дБм при -20 дБм штраф OSNR 0,5 дБ	- 180 пс 180 пс	9,5 дБ 10 дБ 11 дБ
Применение в метрополитенных (городских) оптических сетях						
0 пс/нм ±5000 пс/нм	HG-FEC 7% OH 20мкс	<4,0×10 ⁻³	<10 ⁻¹⁵	0...-14 дБм при -20 дБм штраф OSNR 0,5 дБ	- 30 пс	11,0 дБ 11,5 дБ

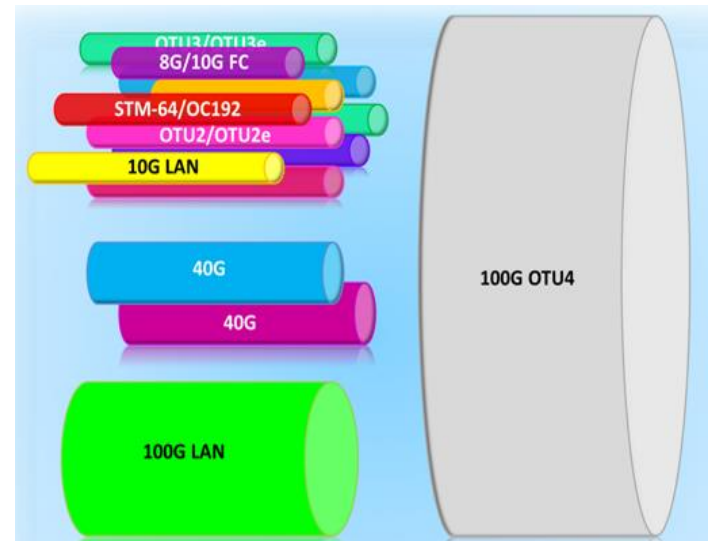
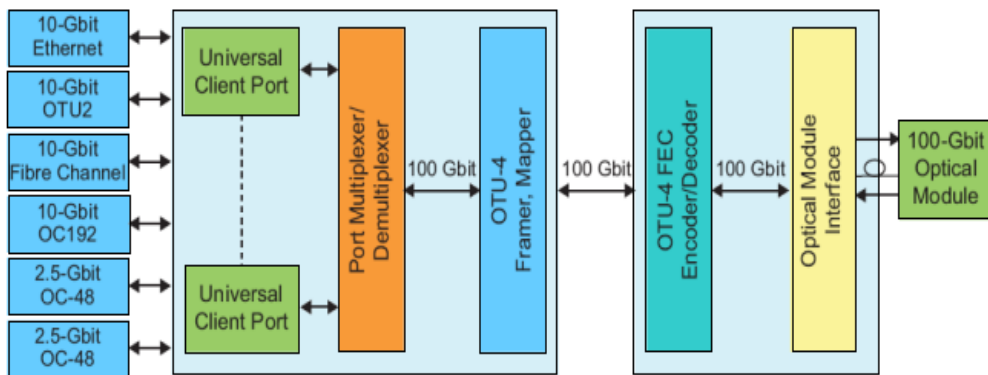
№	Параметры	Числовые характеристики
1	Скорость	27,952 Гбод ± 20 × 10 ⁻⁶ (OTU4 GFEC, HG-FEC 7 % OH) 31,241 Гбод ± 20 × 10 ⁻⁶ (OTU4 UFEC 20 % OH)
2	Автоматическое отключение и включение лазера	ITU-T G.664
3	Номиналы волн	Перестройка в диапазоне 1528,77–1566,72 нм (полоса С сетка 50 ГГц)
4	Тип коннектора (Tx/Rx)	LC, дуплекс
Оптический передатчик		
5	Тип	Модуляционный формат CP-DQPSK
6	Выходные уровни мощности	-2... +0,5 дБм (в сетях метро) -1... +1,5 дБм (в других приложениях)
7	Возвратные потери на отражение	27 дБ
8	Класс лазера	1
Оптический приемник		
9	Допустимая хроматическая дисперсия	±70,000 пс/нм
10	Перегрузка	0 дБм
11	Коэффициент отражения приемника	30 дБ
12	Принимаемая оптическая полоса частот	1528,77–1566,72 нм (полоса С сетка 50 ГГц)

Транспондеры – корректирующие возможности

- Корректирующее кодирование Ultra FEC реализуется сложным решением с использованием ортогонально конкатенированного BCH (Bose Chaudhuri Hocquenghem) кодека EFEC (Enhanced FEC). Оно позволяет иметь наименьшее OSNR, но за счет увеличения емкости исправляющего поля, повышения скорости передачи в ортогональных каналах с 28 Гбод до 31,241 Гбод и большей задержки при обработке сигнала. Код рекомендован в G.975.1 к применению в протяженных подводных магистральных с DWDM.
- *Пример характеристик транспондерного модуля Cisco ONS MSTP 15454 на скорость 100 Гбит/с*
- Модуляция: Coherent Polarized Differential Quadrature Phase-Shift Keying (CP-DQPSK):
- перенастраиваемый лазер на 96 каналов 50 ГГц C-band;
- символьная скорость Baud rate: 28–32 Гбод.
- Программно-настраиваемые алгоритмы FEC, для выбора оптимального соотношения Полоса/Дальность:
- 7 % ОН на базе Standard G.975 ReedSolomon FEC;
- 20 % ОН на базе Standard G.975.1 I.7 EFEC (1×10^{-2} Pre-FEC BER);
- 7 % ОН используя 3rd Generation EFEC (4.6×10^{-3} Pre-FEC BER).
- Устойчивость к хроматической дисперсии – до 70000 пс/нм, возможностью программной перенастройки до 40000 пс/нм.
- Устойчивость к PMD – до 30 пс (100 пс DGD).
- В соединении В2В OSNR – 14,5 дБ.
- Чувствительность приемника: +0 дБм – –18 дБм.

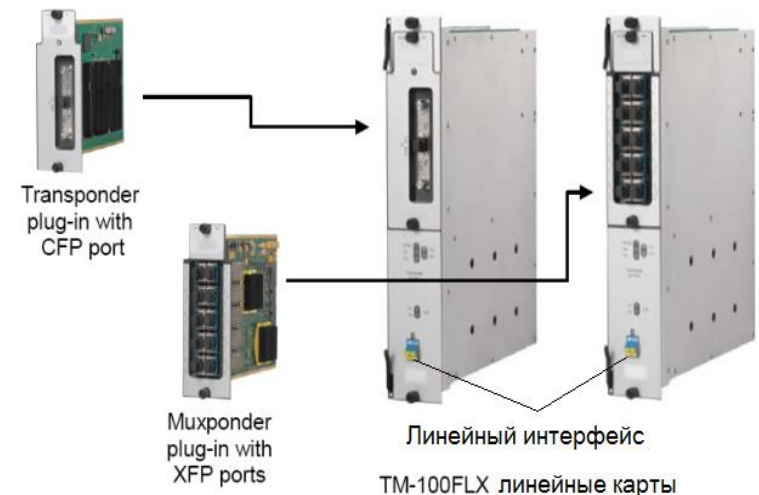
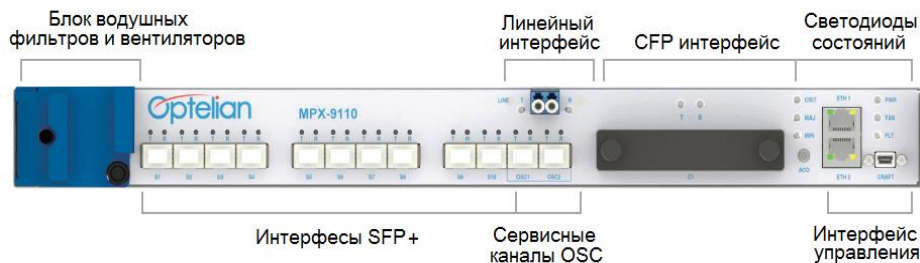
Мультиплексоры

- Принципиально мультиплексоры отличаются от транспондеров только в клиентской и цифровой (мультиплексной) частях, где обеспечивается ввод/вывод цифровых потоков нескольких клиентов с одинаковыми или различными скоростями и протоколами (рис.). При этом клиентские порты (интерфейсы) представляют собой модульные решения SFP, SFP+, XFP, CFP и другие в различном сочетании. Примеры построения интерфейсной панели оборудования стандартного мультиплексора размещены на рис. следующего слайда, где представлены модули CFP, XFP и SFP+, линейный и другие интерфейсы.



Мукспондеры. Примеры

- Интерфейсная панель когерентного мукспондера MPX9110 (слева на рис.)
- Пример вариантов схем мультиплексирования когерентных мукспондеров: 10×10 Гбит/с; 1×40 Гбит/с + 6×10 Гбит/с; 2×40 Гбит/с + 2×10 Гбит/с.
- Пример типов клиентского оборудования когерентных мукспондеров: 10 GbE, 40 GbE, 100 GbE, STM-64, OTU-2/3/4 (модули SFP+, CFP).
- Тип линейного протокола (интерфейса) когерентного мукспондера/транспондера G.709 OTN OTU4 (HG-FEC).
- К дополнительным возможностям транспондеров/мукспондеров относятся функции APS (Automatic Protection Switching) для линейного интерфейса, т. е. применение делителя оптической мощности на передаче на два равнозначных канала и использование автоматического оптического коммутатора на входе приемника для подключения одного из двух исправного канала, встраивание оптических усилителей EDFA, EDRA.
- Варианты формирования линейных (транспондерной и мукспондерной) карт в оптическом мультиплексоре TM2000 TRANMODE представлены справа на рис.



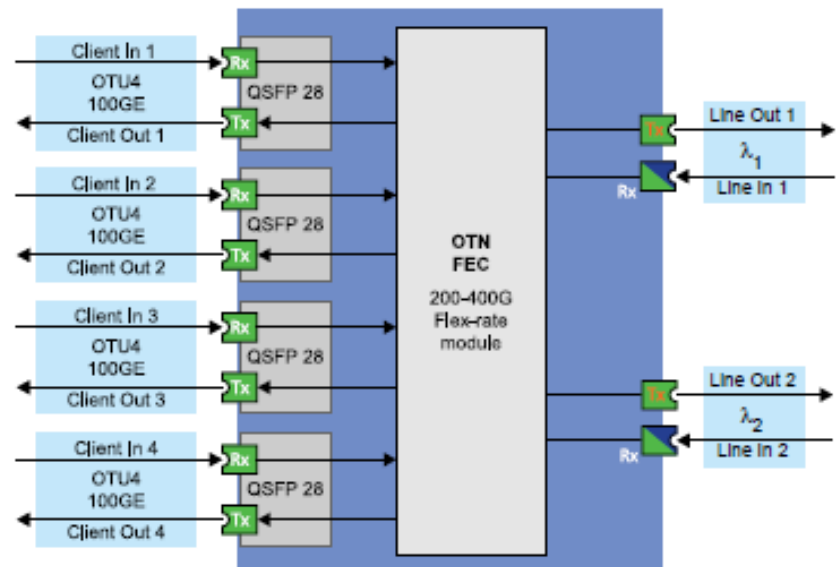
Мультиплексор (агрегирующий транспондер) MS-400E от Т8. Вариант исполнения на 6 режимов работы

Передача до 4 x 100 Гбит/с клиентских сигналов в 2 x 200 Гбит/с или 1 x 400 Гбит/с



- Передача до 4 клиентских сигналов 100GE или OTU4 RS FEC
- Коррекции ошибок Soft-FEC 15% и 20%
- Перестраиваемый в C-диапазоне лазер
- Автоматическая коррекция дисперсии до ± 70 нс/нм
- $OSNR_T$ от 10,2 дБ (0,1 нм, BER = 10^{-12})

Блок поддерживает передачу по двум длинам волн по 200 Гбит/с или по одной 400 Гбит/с. MS-400E передает данные в OTN формате с использованием коррекции ошибок Soft-FEC. Лазер с перестройкой длины волны с шагом 12,5 ГГц позволяет организовать до 96 DWDM каналов 400 Гбит/с в C-диапазоне и сетке 100 ГГц.



Мукспондер (агрегирующий транспондер) MS-400E от T8. Вариант исполнения на 6 режимов работы

Характеристики

Линейный интерфейс	Режим работы					
	2 x 100 Гбит/с	2 x 150 Гбит/с	2 x 200 Гбит/с	1 x 200 Гбит/с	1 x 300 Гбит/с	1 x 400 Гбит/с
Количество интерфейсов	2	2		1	1	1
Тип интерфейса	LC/UPC			LC/UPC		
Формат модуляции	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-QPSK	DP-16QAM	DP-32QAM
Автомат. коррекция дисперсии	до ± 70 нс/нм	до ± 30нс/нм		от -35 до +226,5 нс/нм	до ± 35 нс/нм	до ± 17,5 нс/нм
Диапазон длин волн	1528,7-1567,1 нм			1528,7-1567,1 нм		
OSNR _T (0.1 нм, BER=10 ⁻¹²)	10,3 дБ	15 дБ	10,2 дБ	14,5	19,8	24,7
FEC	Soft-FEC 15%, Soft-FEC 20%			Soft-FEC		
Выходная мощность (BER=10 ⁻¹²)	-10...+2,5 дБм			- 9 ... + 4 дБм		
Чувствительность приемника	-18 дБм			-13 дБм		
Перегрузка приемника	0 дБм			+5 дБм		
Клиентский интерфейс						
Количество	2	3	4	2	3	4
Тип интерфейса	QSFP28			QSFP28		
Стандарт интерфейса	100GE, OTU4			100GE, OTU4		
Потребляемая мощность	150 Вт			110 Вт		

Контрольные вопросы

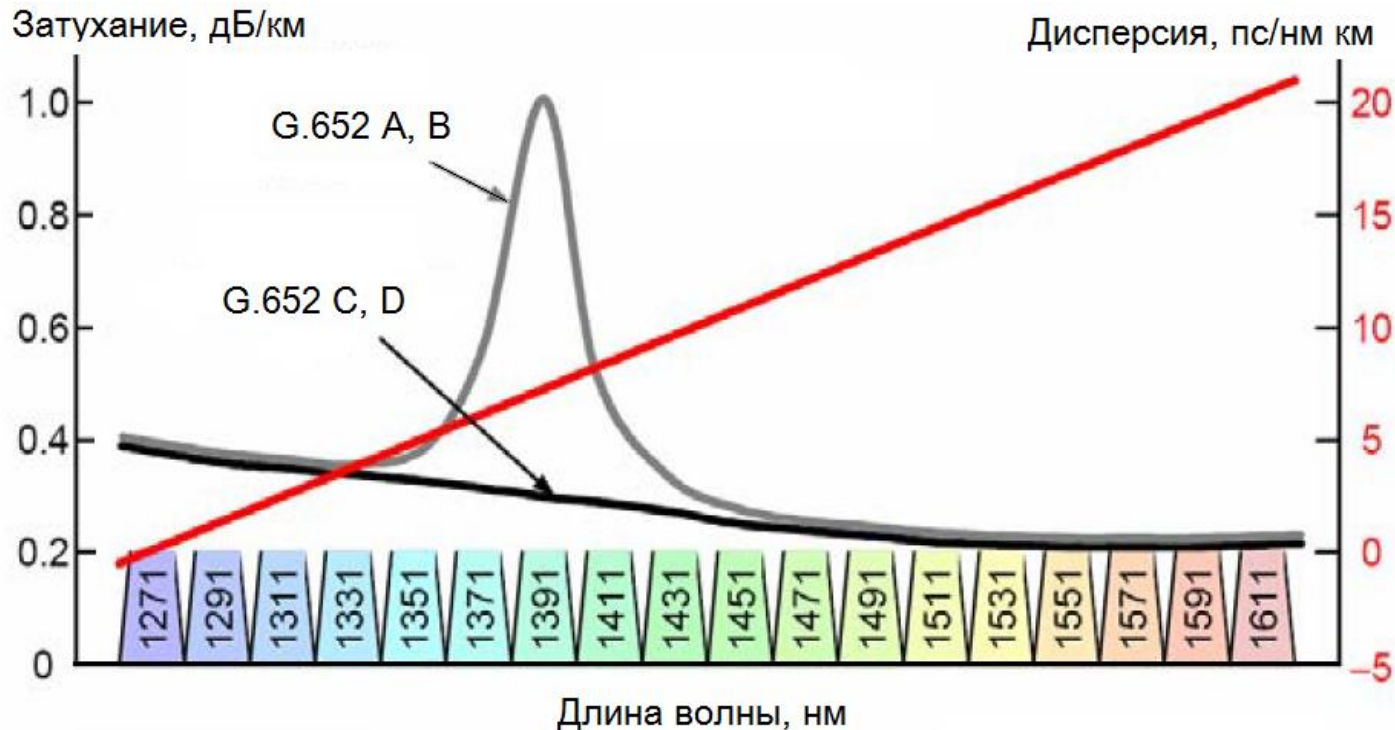
- 1. Что называют оптическим трансивером?
- 2. Что называют оптическим транспондером?
- 3. Что называют оптическим мукспондером?
- 4. Чем отличается когерентный транспондер от некогерентного?
- 5. Что представляют собой оптические модули SFP и XFP?
- 6. Чем отличаются модули SFP от модулей SFP+?
- 7. В каких сетях передачи информации используются модули SFP, XFP, CFP, QSFP?
- 8. Чем отличаются в конструкциях и характеристиках одноволоконные и двухволоконные модули SFP, XFP?
- 9. Что в схеме модуля SFP обеспечивает функции DDM?
- 10. Какое назначение имеют модули TOSA и ROSA в составе SFP, XFP, CFP?
- 11. Какие источники оптического излучения могут входить в состав модулей SFP, XFP, CFP?
- 12. Какие приемники оптического излучения могут входить в состав модулей SFP, XFP, CFP?
- 13. Какие оптические волны используются для передачи сигналов модулями SFP, XFP, CFP?
- 14. Чем отличаются модули CFP, CFP2, CFP4, CFP8?
- 15. Для чего в модулях CFP используется WDM?
- 16. Для чего в модулях SFP, XFP используется WDM?
- 17. Что в ROSA может использоваться для разделения оптических волн?
- 18. Чем принципиально отличаются модули SFP, XFP и другие от транспондеров и мукспондеров?

Контрольные вопросы

- 19. Что входит в структуру когерентного транспондера 100 Гбит/с?
- 20. Какие характеристики используются для описания когерентного транспондера?
- 21. Чем различаются кодеры GFEC, HG-FEC, UFEC?
- 22. Чем характеризуют мукспондеры?
- 23. Какими устройствами реализуются клиентские интерфейсы транспондеров и мукспондеров?
- 24. Какие дополнительные функции могут быть предусмотрены в структуре транспондера/мукспондера?
- 25. От чего зависит дистанция (расстояние) волоконно-оптической линии между передатчиком и приёмником?
- 26. Чем может определяться скорость передачи информационного сигнала в модулях и транспондерах?
- 27. Какие форматы оптической модуляции можно реализовать в когерентных транспондерах и мукспондерах?
- 28. Какие преимущества и недостатки имеет одноволоконная организация связи модулями?
- 29. Какое назначение имеет мультиплексирование с разделением по длине волны в модулях?
- 30. В чём преимущество термостабилизированных модулей?
- 31. Какие особенности в конструкциях модулей CFP-2, CFP-2ACO, CFP-2 DCO?
- 32. Чем отличаются режимы в мукспондере MS400E?
- 33. Что представляет собой допустимая дисперсия участка передачи оптических сигналов?
- 34. Что обозначает штраф за дисперсию?

Задача

Используя данные реальных модулей SFP/XFP, приведённые в табл.1.1, оценить возможность их применения на волоконно-оптических линиях различной протяженности (табл.1.2), представляющих собой волокна стандарта G.652 A, B, C, D (SMF). Оценку применимости модулей на соответствующих волокнах подтвердить расчётами энергетических параметров дисперсионных искажений. Значения затухания и дисперсии выбрать по рис.ниже. Оценить возможную перегрузку приёмника.



Исходные данные: табл.1

Табл. 1.1 Характеристики модулей SFP/XFP

Параметры модулей	Предпоследняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип модуля SFP/XFP	SFP 100 Base LX	SFP 100 Base ZX	SFP 1000 Base LX	SFP 1000 Base XD CWD M	SFP 1000 Base ZX CWD M	SFP 1000 Base EX	XFP 10G Base LR	XFP 10G Base ER/EW	XFP 10G Base DWD M 1	XFP 10G Base DWD M 2
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Скорость передачи, Мбит/с	100	100	1000	1000	1000	1000	10 Гбит/с	10 Гбит/с	10 Гбит/с	10 Гбит/с
Рабочая волна, нм	1310	1550	1310	1471	1571	1550	1310	1550	1530, 33	1545, 32
Мощность передатчика, дБм	-14... -23,5	-2... -3	-3... -9	+1... -4	+5... 0	+50	+0,5 ... -8.2	+4 ... -4,7	+3 -1	+5 0
Чувствительность приёмника, дБм	-33,5	-30	-20	-21	-24	-30	-12,6	-11,3	-24,5	-24,5
Макс. вх. уровень на приёме, дБм	-8	-5	-3	-3	-3	-9	+1,5	+4	+1	+1
Штраф за дисперсию, дБ	0,5	1	1	1	2	2	3,2	3	3	3
Энергетический потенциал	10	27	10,5	17	24	30	9,4	15	23	24

Исходные данные: табл.2

Табл. 1.2 Типы и длины волоконных световодов

Типы и длины световодов	Последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип световода G.652	A	B	C	D	A	B	C	D	A	C
Длина кабельной линии, км	2	3	6	10	18	24	30	48	56	100
Число строительных длин кабеля	2	3	4	5	6	8	10	12	14	20
Потери на стыке строительных длин, дБ	0,5	0,4	0,1	0,15	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07

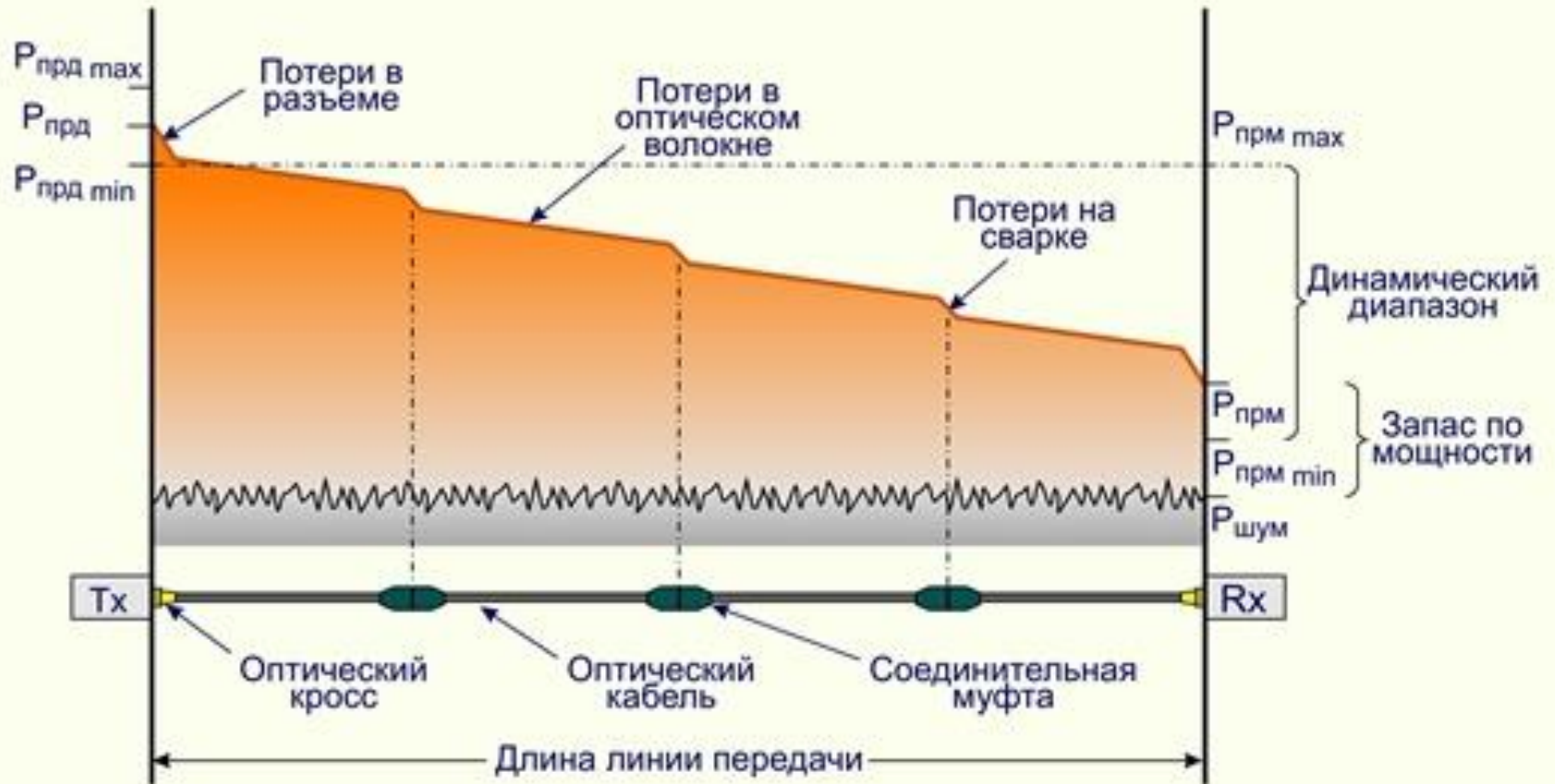
Методические указания к решению задачи

- 1. Расчёт энергетических параметров рекомендуется произвести по формуле:

$$L_{\text{py}} \leq \frac{P_s - P_R - P_D - M_e - (N-1) \times l_s - N_c \times l_c}{\alpha_c + \alpha_m},$$

- где принять, P_s , P_R и P_D по таблице 1.1, M_e рассчитать, как разность между максимальным и минимальным уровнями мощности передатчика, N – число строительных длин кабеля; l_s – потери энергии на стыках строительных длин (дБ); N_c – число разъёмных соединений между точками S и R (считать 4); l_c – потери энергии на разъёмном соединении (для всех вариантов 0,5 дБ); α_c – коэффициент затухания кабеля (дБ/км) – определяется по рисунку 1;
- α_m – запас на повреждения кабеля (дБ/км) принять 0,05дБ/км. Полученная в расчёте длина L_{py} должна быть больше или равна длине кабельной линии, указанной в табл.1.2 с учётом числа строительных длин. В противном случае делается вывод о несовместимости по энергетическому потенциалу модулей и линии.
- Также необходимо оценить перегрузку приёмника. Для этого из максимального уровня мощности передатчика вычитается затухание кабельной линии (с учётом потерь на стыках) и полученное значение уровня мощности сравнивается с максимальным входным уровнем на приёме (табл.1.1), и делается вывод о возможной перегрузке приёмника.
- 2. Величина уширения оптического импульса в указанной длине кабеля не должна превышать 10% длительности импульса оптического информационного сигнала в формате NRZ. Например, при скорости передачи 10 Гбит/с длительность импульса составит 100 пс. На волне передачи 1511 нм величина дисперсии составит 15пс/нм*км, что при ширине спектральной линии 1 нм уже превысит 10% от допустимой величины дисперсии. Необходимо выбирать модуль с шириной спектральной линии до 0,1 нм и/или применять компенсацию дисперсии стандартными пассивными модулями DCF (10, 20, 30 км и т.д.). При использовании DCF в энергетических расчётах нужно учесть затухание такого модуля.
- В предлагаемой задаче нужно только оценить возможность использования предложенного по варианту модуля SFP/XFP вслед за энергетической оценкой произвести оценку дисперсионных искажений и сделать вывод о целесообразности использования заданного модуля или выбора другого.

Приложение. Учёт потерь оптической мощности в линии

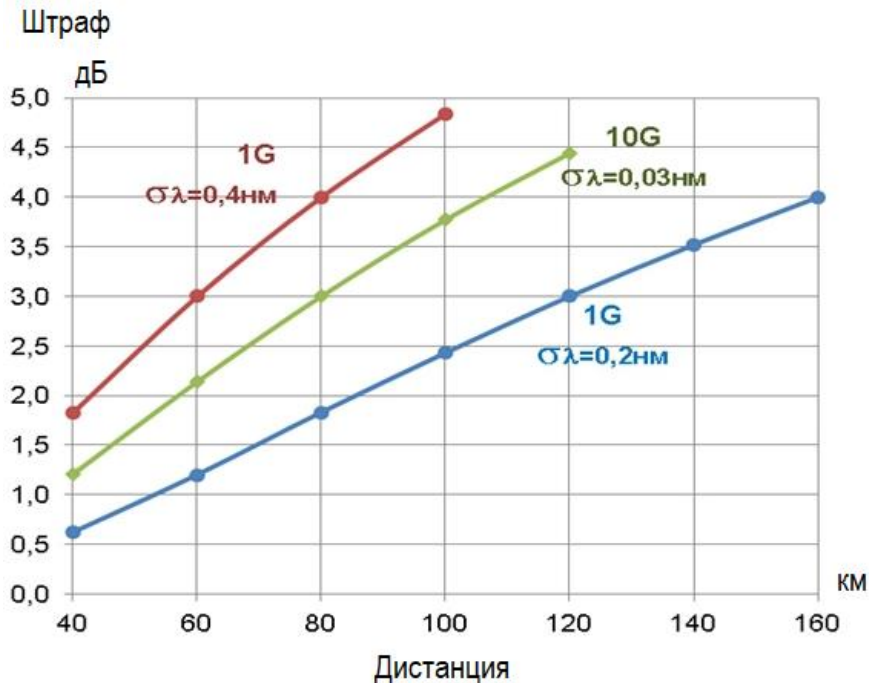


Приложение. Что есть допустимая дисперсия?

- Допустимая дисперсия (Dispersion Tolerance, DT) показывает максимальное значение дисперсии, которое допускается на линии передачи (или регенерационном участке), без существенного ухудшения качества информации. Ухудшение происходит вследствие межсимвольной интерференции (частичном наложении импульсов соседних тактовых интервалов) при передаче цифровой последовательности сигналов. Это может привести как к переходным влияниям между каналами и ошибкам цифрового приёма, так и к шумам и сбою синхронизации на приеме.
- Допустимая дисперсия специфицируется для передачи по одномодовым волокнам. В принципе, в качестве допустимой должна учитываться среднеквадратическая сумма хроматической и поляризационной дисперсии. Но на практике при скоростях до 10 Гбит/с и длинах линий до 100 км существенна только первая составляющая. Во-первых, она значительно больше, особенно в диапазоне длин волны 1550 нм. А во-вторых, суммарная хроматическая дисперсия растет пропорционально длине линии, а поляризационная – пропорционально квадратному корню из длины.
- Допустимая дисперсия указывается в пс/нм. Если специфицированное значение разделить на коэффициент хроматической дисперсии волокна в пс/(нм•км), то можно примерно определить допустимую длину линии передачи, ограниченную дисперсионными искажениями. Этот параметр не всегда указывается в спецификациях производителя, чаще — для одноволновых трансиверов, работающих в диапазоне 1550 нм или трансиверов CWDM в диапазоне 1470 – 1610 нм. Обычные значения DT составляют 800 пс/нм (для линий до 80 км), 1600 пс/нм – до 80 км, 2400 пс/нм – до 120 км.
- Для меньших расстояний дисперсия обычно не нормируется.

Приложение. Штраф за дисперсию

Ухудшение качества передачи за счет дисперсии (Dispersion Penalty, DP) - параметр характеризует ухудшение соотношения сигнал/шум на приеме вследствие влияния дисперсии на проходящий сигнал. Влияние заключается в уменьшении амплитуды сигнала и растягивании фронтов на соседние тактовые интервалы. Соответственно, ухудшение будет больше, чем больше общая дисперсия в линии и меньше интервал. Численно DP определяется логарифмом величины обратно пропорциональной произведению коэффициента хроматической дисперсии, ширины спектральной линии источника, длины линии и линейной скорости передачи информации в квадрате. Обычно значение DP специфицируется для высокоскоростных интерфейсов, рассчитанных на длинные линии передачи. Приемлемое значение параметра находится в пределах до 4 дБ. В противном случае нужно делать более точный расчет проекта по результирующим шумам и предпринимать какие-то технические меры. Например, использование оптической или электронной компенсации хроматической дисперсии.



Зависимость ухудшения качества передачи за счет дисперсии от длины линии при различной скорости передачи и ширине спектральной линии излучателя.