

Рис. 10.13. Полное демультиплексирование сигнала с помощью дифракционной фазовой решетки

Устройство оптических кросс-коннекторов

В сетях с ячеистой топологией необходимо обеспечить гибкие возможности для изменения маршрута следования волновых соединений между абонентами сети. Такие возможности предоставляют оптические кросс-коннекторы, позволяющие направить любую из волн входного сигнала каждого порта в любой из выходных портов (конечно, при условии, что никакой другой сигнал этого порта не использует эту волну, иначе необходимо выполнить трансляцию длины волны).

Существуют оптические кросс-коннекторы двух типов:

- **оптоэлектронные кросс-коннекторы** с промежуточным преобразованием в электрическую форму;
- **полностью оптические кросс-коннекторы**, или **фотонные коммутаторы**.

Исторически первыми появились оптоэлектронные кросс-коннекторы, за которыми и закрепилось название оптических кросс-коннекторов. Поэтому производители полностью оптических устройств этого типа стараются использовать для них другие названия: фотонные коммутаторы, маршрутизаторы волн, лямбда-маршрутизаторы. У оптоэлектронных кросс-коннекторов имеется принципиальное ограничение — они хорошо справляются со своими обязанностями при работе на скоростях до 2,5 Гбит/с, но на скоростях 10 Гбит/с и выше габариты таких устройств и потребление энергии превышают допустимые пределы. Фотонные коммутаторы свободны от такого ограничения.

Для коммутации волн в фотонных коммутаторах используются различные оптические механизмы, в том числе дифракционные фазовые решетки AWG и **микроэлектронные механические системы** (Micro-Electro Mechanical System, MEMS).

MEMS представляет собой набор подвижных зеркал очень маленького (диаметром менее миллиметра) размера (рис. 10.14). Коммутатор на основе MEMS включается в работу после демультиплексора, когда исходный сигнал уже разделен на составляющие волны. За счет поворота микрозеркала на заданный угол исходный луч определенной волны направляется в соответствующее выходное волокно. Затем все лучи мультиплексируются в общий выходной сигнал.

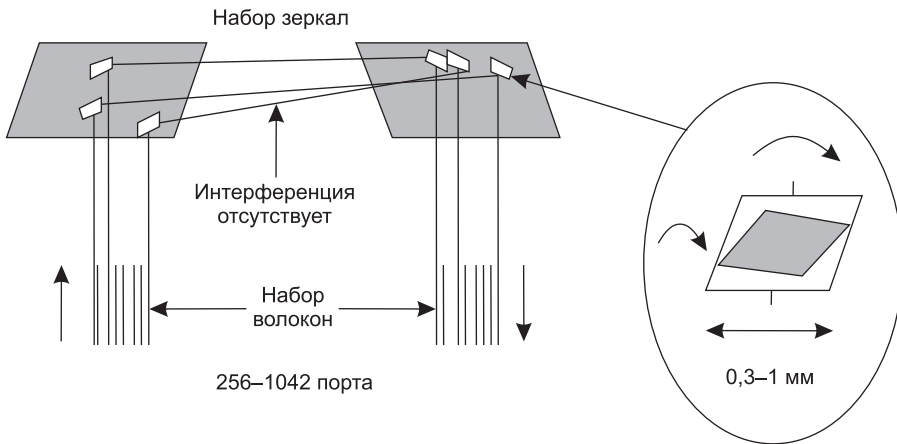


Рис. 10.14. Микроэлектронная механическая система кросс-коммутации

Для коммутации волн могут также использоваться устройства на жидких кристаллах.

Реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода-вывода (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers, ROADM) представляют собой *новое поколение фотонных кросс-коннекторов*, позволяющих удаленно динамически изменять маршрутизацию различных волн, передаваемых мультиплексором.

До появления ROADM добавление новой волны (операция Add) и выведение ее из общего сигнала (операция Drop) обычно требовали физической установки нового модуля на шасси мультиплексора и его локального конфигурирования, что, естественно, требовало посещения инженером точки присутствия оператора, в которой был установлен мультиплексор. Ранние сети DWDM были достаточно статическими в отношении реконфигурации вводимых и выводимых потоков данных, поэтому с необходимостью выполнять эту операцию путем физической перекоммутации операторы мирились. Развитие сетей DWDM привело к усложнению их топологии и повышению динамизма, когда появление новых клиентов сети стало достаточно частым явлением, а значит, операции добавления или выведения волн из магистрали стали выполняться регулярно и требовать более эффективной поддержки.

Типичная схема ROADM показана на рис. 10.15. Мультиплексор на этом рисунке поддерживает три магистральных направления (порты маршрутов 1, 2 и 3 связывают его с другими мультиплексорами), а также три банка транспондеров, связанных через клиентский кросс-коннектор с портами ввода-вывода.

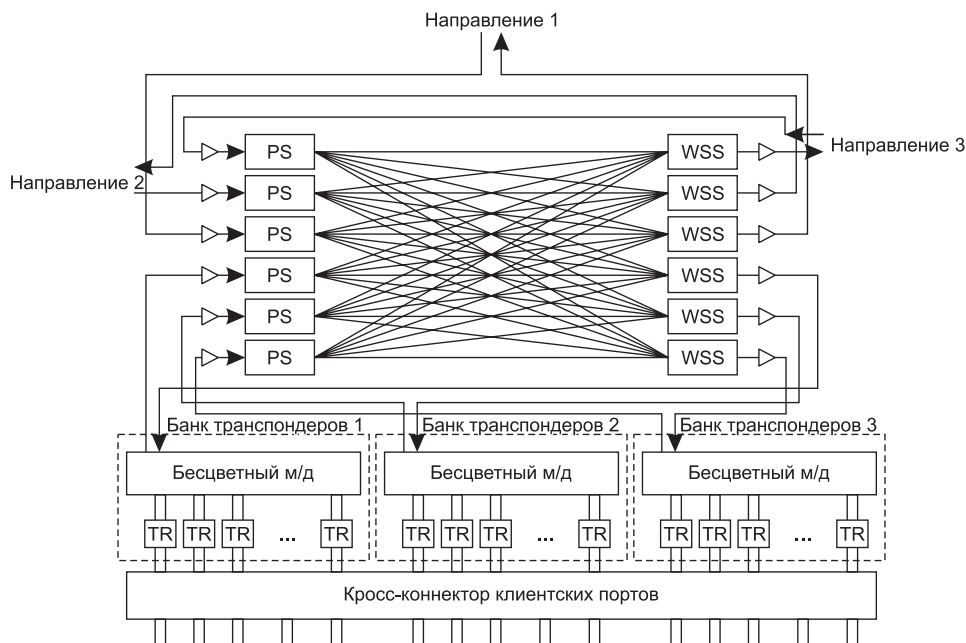


Рис. 10.15. Структурная схема ROADM

Коммутационная матрица ROADM состоит из **устройств селективной коммутации волн** (Wavelength Selective Switch, **WSS**). Каждое устройство WSS связано с одним из выходных магистральных портов ROADM или с одним из банков транспондеров. На каждое из устройств WSS с помощью оптического *разветвителя мощности* (Power Splitter, PS) подается исходный «цветной» сигнал (то есть сигнал, содержащий сигналы всех волн DWDM) с входного магистрального порта или от банка транспондеров. Основной функцией WSS является расщепление поступающих на его входы цветных сигналов на составляющие волны, выбор определенных волн из каждого сигнала и их направление (маршрутизирование) в свой выходной порт. Коммутатор WSS может быть реализован на основе систем MEMS, жидких кристаллов или любого другого механизма, выполняющего фотонную коммутацию.

Количество транспондеров в банках соответствует количеству волн, поддерживаемых сетью DWDM, например 80. Клиентские порты ввода-вывода волн соединены с помощью отдельного кросс-коннекта с банками транспондеров таким образом, что любой порт может быть соединен с любым транспондером любого банка. Такая гибкая коммутация позволяет разделять дорогостоящие транспондеры между клиентскими портами и таким образом повысить коэффициент их использования.

Каждый банк транспондеров соединен со своим разветвителем мощности с помощью мультиплексора, который объединяет сигналы отдельных волн, генерируемых транспондерами, в общий «цветной» сигнал. Соответственно «цветной» сигнал от коммутатора WSS, выделенного для обслуживания определенного банка транспондеров, расщепляется на сигналы

отдельных волн с помощью демультиплексора банка, передающего эти сигналы на соответствующие транспондеры. Количество банков транспондеров должно соответствовать количеству N направлений, поддерживаемых ROADM, так как одна и та же волна может быть выведена из любого направления, следовательно, может быть представлена N раз в наборе пользовательских портов ввода-вывода (в нашем примере $N = 3$).

Особенностью представленной архитектуры ROADM является возможность вывести любую волну из любого направления в любой пользовательский порт ввода-вывода. Говорят, что ROADM, обладающий такой функциональностью, является **бесцветным (colorless) ненаправленным (directionless)**. Необходимо подчеркнуть, что не каждое устройство ROADM является бесцветным ненаправленным, так как название устройства этого типа отражает только возможность его программного реконfigurирования, но не его степень. Например, устройства ROADM первого поколения имели только один банк транспондеров, так что пользовательские порты ввода-вывода были физически привязаны к определенной волне и программное реконfigurирование позволяло вывести определенную волну только в определенный порт, изменение волны для некоторого пользователя требовало физического переключения его кабеля к другому порту. Поэтому такие устройства ROADM не могли быть названы бесцветными. Аналогично обстояло дело и с ненаправленностью, так как эти устройства ROADM были рассчитаны на кольцевые или линейные топологии и поддерживали только одно направление.

Новое поколение устройств ROADM способно поддерживать еще одно полезное свойство — они могут быть **неблокирующими (contentionless)**. Неплокирующее устройство ROADM позволяет обслуживать любой запрос на маршрутизацию волны независимо от того, какие запросы на маршрутизацию других волн он уже обслуживает.

Сети OTN

Причины и цели создания

Сети DWDM не являются собственно цифровыми сетями, так как они лишь предоставляют пользователям отдельные спектральные каналы, являющиеся не более чем несущей средой. Для того чтобы передавать по такому каналу цифровые данные, необходимо каким-то образом договориться о методе модуляции или кодирования двоичных данных, а также предусмотреть такие важные механизмы, как контроль корректности данных, исправление битовых ошибок, обеспечение отказоустойчивости, оповещение пользователя о состоянии соединения и т. п.

Исторически мультиплексоры DWDM были также и мультиплексорами SDH, то есть в каждом из волновых каналов для решения перечисленных задач они использовали технику SDH. Однако по прошествии некоторого времени эксплуатации сетей SDH/DWDM стали заметны определенные недостатки, связанные с применением технологии SDH в качестве основной технологии передачи цифровых данных по спектральным каналам DWDM.

Перечислим эти недостатки.

- *Недостаточная эффективность кодов FEC, принятых в качестве стандарта SDH.* Это препятствует дальнейшему повышению плотности спектральных каналов в мульти-

плексорах DWDM. Логика здесь следующая: при увеличении количества спектральных каналов в оптическом волокне увеличивается взаимное влияние их сигналов, следовательно, возрастают искажения сигналов и, как следствие, битовые ошибки при передаче цифровых данных по этим спектральным каналам. Если же процедуры FEC настолько эффективны, что позволяют «на лету» устранить значительную часть этих ошибок, то этими ошибками можно пренебречь и увеличить количество спектральных каналов. Или же можно не увеличивать количество каналов, а увеличить длину регенерируемых секций сети.

- ❑ *Слишком «мелкие» единицы коммутации для магистральных сетей, работающих на скоростях 10, 40 и 100 Гбит/с.* Учет таких клиентских каналов, как каналы со скоростью 1,5, 2 или 34 Мбит/с, усложняет оборудование сети, поэтому желательно наличие единиц коммутации, более соответствующих битовой скорости современного клиентского оборудования. Механизм виртуальной конкатенации SDH частично решает эту проблему, но в целом она остается.
- ❑ *Не учтены особенности трафика различного типа.* Разработчиками технологии SDH принимался во внимание только голосовой трафик, тогда как сегодня преобладающим является компьютерный трафик.

На преодоление этих недостатков нацелена новая технология **оптических транспортных сетей** (Optical Transport Network, OTN), которая обеспечивает передачу и мультиплексирование цифровых данных по волновым каналам DWDM более эффективно, чем SDH. В то же время сети OTN обеспечивают обратную совместимость с SDH, так как для мультиплексов OTN трафик SDH является одним из видов пользовательского трафика наряду с такими клиентами, как Ethernet и GFP.

Нужно отметить, что технология OTN не заменяет технологии DWDM, а дополняет ее волновые каналы «цифровой оболочкой»¹ — этим термином называют кадры данных OTN, позволяющие передавать в канале DWDM дискретные данные пользователей.

Архитектура сетей OTN описана в стандарте ITU-T G.872, а наиболее важные технические аспекты работы узла сети OTN описаны в стандарте G.709.

Иерархия скоростей

Технология OTN многое взяла от SDH, в том числе коэффициент кратности скоростей 4 для построения своей иерархии скоростей. Однако начальная скорость иерархии скоростей OTN гораздо выше, чем у SDH: 2,5 Гбит/с вместо 155 Мбит/с.

В настоящее время стандартизована четырехступенчатая иерархия скоростей OTN, которые выбраны так, чтобы прозрачным образом передавать клиентские кадры вместе со служебными заголовками (табл. 10.3).

Из-за наличия служебной информации в заголовках кадров OTN приведенные значения скоростей кадров OTN выше скоростей клиентских данных, вложенных в эти кадры.

¹ Термин «цифровая оболочка» (digital wrapper) иногда даже используется в качестве названия самой технологии OTN.