

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОММУТАТОРОВ В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Гайворонская Галина Сергеевна, Рябцов Александр Васильевич

Аннотация: Настоящая статья посвящена вопросам применения коммутаторов оптических сигналов в информационных сетях. Рассмотрены различные методы и средства отклонения и модуляции оптического излучения, на основе которых возможно построение полностью оптических коммутаторов. Проведен краткий анализ технических аспектов построения данных устройств.

Ключевые слова: Оптические коммутаторы, ООО и ОЕО коммутаторы, архитектура коммутаторов, технологии коммутации, параметры коммутаторов.

Ключевые слова классификации АСМ: [H.4.3 Communications Applications](#)

Введение

Известно, что главным достоинством оптоволоконных сетей является их практически неограниченная пропускная способность. Практическая ценность этого свойства заключается в возможности многократного увеличения скорости передачи информации по оптоволоконным каналам связи в глобальном масштабе. И это делает исследования в области оптических сетей весьма актуальными и перспективными.

Помимо важной задачи совершенствования параметров и конструкций магистральных волоконно-оптических кабелей не менее остро стоит вопрос создания надежных и доступных по цене коммутаторов оптических сигналов, без которых невозможно построение разветвленных оптических сетей.

Коммутаторы – одни из наиболее важных узлов систем передачи информации, построенных на основе иерархических структур. Без них практически невозможно осуществлять автоматическое управление перемещением потоков данных по разветвленной сети.

Коммутатором в обобщенном смысле обычно называют устройство, позволяющее передать мгновенно и с минимальными искажениями исходный сигнал, поступивший на один из нескольких входов, на один из нескольких выходов в соответствии с заданным алгоритмом переключения. Соответственно под оптическими коммутаторами подразумеваются коммутаторы, осуществляющие коммутацию сигналов, представленных в виде оптического излучения.

Огромное разнообразие применяемых в технике устройств, осуществляющих функцию коммутации оптических сигналов, определяется частными особенностями их применения в конкретном типе сети.

ООО и ОЕО коммутаторы

В настоящий момент в стадии разработки находятся два основных типа коммутаторов оптических сигналов: оптические коммутаторы (all-optical switches), которые называют также прозрачными, световыми (photonic) или ООО (optical-optical-optical) коммутаторами, и оптико-электрооптические коммутаторы, называемые также непрозрачными или ОЕО (optical-electrical-optical) коммутаторами. Полностью оптические ООО-коммутаторы принимают оптический сигнал на входе, осуществляют его коммутацию, и направляют через оптический выход далее без преобразования в электрический сигнал. Оптико-электрооптические ОЕО-коммутаторы принимают оптические сигналы на входе, преобразуют их в электрические сигналы, осуществляют процесс коммутации при помощи электронных компонентов, при этом могут выполнять определенные функции, такие как, например, поиск адресов в базе данных маршрутизации, после чего вновь преобразуют электрический сигнал в оптические сигналы на выходе.

Хотя оба типа оптических коммутаторов преследуют единую цель - увеличение эффективности сетей с помощью гибкой переадресации трафика, разница в их технологических подходах существенна. Каждый из применяемых методов имеет свои достоинства и недостатки, что порождает не только конкуренцию технических решений, но и их технологическую несовместимость. То есть их одновременное внедрение может привести к созданию двух типов оптических сетей, работающих на различных принципах. Именно этот фактор, по нашему мнению, тормозит внедрение новых типов оптических коммутаторов, поскольку ведущие производители сетевого оборудования и сетевые провайдеры до сих пор не пришли к единому мнению, какой из этих двух видов коммутаторов им лучше избрать. Различия в физических принципах действия и в методах управления разными типами коммутаторов, отличия их интерфейсов и отсутствие общепринятых стандартов, и при этом необходимость разработки специализированного программного обеспечения, усложняют выбор. Поэтому в настоящее время мало кто берется предсказать, возможно ли общее решение для всех коммутаторов, применяемых в настоящее время в разнообразных оптических сетях.

В то же время, очевидно, что осуществление коммутации информационных пакетов на фотонном уровне, без промежуточного превращения их в электрические сигналы, позволяет избежать высоких расходов, связанных с преобразованием сигналов, а самое главное, позволяет на несколько порядков увеличить скорость передачи информации.

К сожалению, на сегодняшний день эта идея пока не вышла за пределы исследовательских лабораторий и до ее практической реализации еще весьма далеко. Сегодня еще невозможно обойтись без совместного присутствия в сетях и фотонов, и электронов. Оптико-электрооптические коммутаторы могут извлекать служебную сетевую информацию, например, адресную, и восстанавливать затухающий сигнал. На сегодняшний день ни одна из этих функций не может быть выполнена исключительно оптическими средствами.

Электрооптические методы коммутации применяются, например, в упорядочивающих (grooming) коммутаторах, которые просматривают входящий STM-л-поток, идентифицируют пункты назначения мультиплексированных каналов, а затем реорганизуют каналы таким образом, чтобы сделать передачу максимально эффективной. При этом полностью оптические мультиплексоры лишь объединяют информационные кадры в единый поток и направляют их в выходной порт вне зависимости от того, куда они пересылаются.

Принято считать, что в оптико-электрооптических коммутаторах невозможно добиться высокой плотности портов, в большинстве случаев этот показатель ограничивался 256 портами. Но, благодаря развитию полупроводниковых технологий, сегодня для ОЕО коммутаторов уже достижима плотность, достигающая 1024 портов. Однако, ООО коммутаторы обладают более высокими значениями этого показателя, потенциально достигающего десятков тысяч портов, при соответствующем развитии нанотехнологий. В случае ООО из одного порта в другой перемещается, как правило, вся полоса пропускания волоконно-оптического кабеля. Коммутаторы ОЕО обычно допускают возможность дифференцированного перемещения отдельных волновых каналов. Разработки в области ОЕО-коммутаторов сосредоточены, в основном, на совершенствовании технологии изготовления основных компонентов и их микроминиатюризации. В то же время область исследований полностью оптических коммутаторов второго типа чрезвычайно обширна и открыта для принципиально новых разработок.

И все же, поскольку непрозрачные коммутаторы не в состоянии в полной мере обеспечить те характеристики масштабируемости и независимости протоколов, которые свойственны прозрачным коммутаторам, сосуществование обеих технологий, по всей видимости, будет сохраняться. В то время как непрозрачные коммутаторы применяются для организации доступа к упорядоченному трафику, прозрачные коммутаторы используются в центральной части сети либо для агрегации данных с целью повышения скорости передачи через порт, либо для обеспечения ремаршрутизации трафика в случае отказа одного из сегментов сети без преобразования сигналов в электрическую форму. По мере того как усиливаются возможности оконечных коммутаторов за счет DWDM и интеллектуальной маршрутизации,

эти коммутаторы, обладающие улучшенными возможностями упорядочения трафика, могут обрабатывать все большее число каналов. В результате этого создаются благоприятные условия для расширения масштабов применения методов оптической коммутации в сети.

Технологии создания оптических коммутаторов

За сравнительно короткую историю развития оптических сетей было разработано огромное число различных типов коммутаторов оптических сигналов, основанных на самых различных физических принципах. Главной задачей таких устройств является обеспечение максимально высокого быстродействия, достаточного для разрабатываемых терабитных оптических линий связи, обеспечение минимально возможной удельной стоимости, а также снижение потребляемой мощности по сравнению с существующими электронными аналогами.

Оптические коммутаторы могут быть построены на основе целого ряда известных устройств, таких как электромеханические модуляторы и дефлекторы луча, дифракционные решетки, электрооптические элементы и т.д.

За последнее время значительное число публикаций было посвящено разработке или совершенствованию различных конструкций оптических коммутаторов с электростатическим управлением. В основном это мембранные или лепестковые отражатели, представляющие собой подвижное зеркало на гибкой подвеске, или выполненные в виде гибкого элемента из эластичного непроводящего материала, например, в виде полимерной пленки с высококачественным зеркальным покрытием. Такие отражающие свет поверхности приводятся в движение электростатическими силами, и, обладая малой инерционностью, обеспечивают нужные показатели быстродействия при отклонении световых потоков в оптическом коммутаторе. Однако чувствительность этих конструкций к внешним полям не позволяет им получить широкого распространения в современной технике связи.

Незначительную долю модуляторов светового потока, которые могли бы быть использованы для коммутации оптических каналов в информационных сетях, составляют магнитооптические модуляторы, действие которых основано на эффекте Фарадея. Этот эффект заключается в изменении направления поляризации оптического излучения, проходящего через вещество при наведении в нем магнитного поля. Магнитооптические модуляторы характеризуются большой потребляемой мощностью и малым быстродействием порядка 10-5с, они также подвержены саморазогреву и недостаточно нетехнологичны, поэтому они практически не используются в современной оптической технике.

В настоящее время основную массу устройств, применяемых для модуляции светового потока в выпускаемых промышленностью оптических системах, составляют: управляемые зеркальные и оптомеханические отражатели, термооптические, пузырьковые, жидкокристаллические, электрооптические преобразователи и акустооптические преобразователи, электроголографические коммутируемые решетки Брэгга.

За недавнее время было разработано большое количество микромеханических оптических модуляторов различных типов. Наиболее известны оптические модуляторы, построенные на микрозеркальной технологии с пьезоэлектрической отклоняющей системой (АМА), в которой на двух одинаковых пьезоэлектрических столбиках крепится миниатюрное зеркало. При приложении к столбикам напряжения противоположной полярности зеркало отклоняется, так как один столбик сжимается, а другой расширяется. Угол отклонения зеркала составляет 0,25°, при приложенном напряжении порядка 30 В. Другой примером может служить бистабильный микрозеркальный оптический модулятор (DMD), в виде матрицы ячеек, каждая из которых состоит из микрозеркала, укрепленного на поворотной системе сложной конструкции, и управляющей его отклонением ячейки памяти. Ячейка памяти находится под микромеханической системой и содержит 8 МДП транзисторов. Размер элементарной ячейки DMD матрицы - 17 мкм, угол отклонения зеркала 10° в каждую сторону, время переключения 15 мкс.

Такие зеркальные отражатели, иначе называемые микроэлектромеханическими системами (microelectromechanical systems - MEMS), могут представлять собой сотни и даже тысячи миниатюрных

зеркал, размещенных на одной подложке, которые могут поворачиваться на определенный угол в течение долей миллисекунд. Сфокусированные световые лучи, попадая в эти зеркала, отражаются от них и перенаправляются в соответствующий выходной порт. Коммутаторы на основе MEMS разрабатываются в многоплоскостных вариантах исполнения. Так, например, существуют одно-, двух- и трехплоскостные конструкции, в зависимости от количества координат, в которых отклоняется световой луч.

Эти микроминиатюрные зеркала изготовлены с высочайшим оптическим качеством, что включает в себя, прежде всего, отражательную способность близкую к 100%, малую дисперсию и абберацию. Зеркала перемещаются или вращаются с помощью актуаторов - приводов, основанных на различных физических принципах. К таким актуаторам можно отнести электростатические, электромагнитные и магнитоэлектрические, пьезоэлектрические и магнитоэлектрические приводы. Основным критерий при выборе типа актуатора – максимальное быстродействие при минимальной потребляемой мощности.

Особого внимания на наш взгляд заслуживают пьезоэлектрические актуаторы. К их достоинствам неизменно относят твердость и монолитность, обеспечивающую высокую надежность и долговечность, а также очень высокое входное сопротивление, что позволяет свести практически к нулю входные токи и, соответственно, потребляемую коммутатором мощность.

Основным недостатком таких коммутаторов на основе управляемых зеркальных отражателей MEMS является их низкая механическая прочность. Единственным путем преодоления этого недостатка на сегодняшний день является резервирование путем введения в конструкцию избыточного количества запасных каналов. Еще одним недостатком MEMS является потеря мощности сигнала при его многократных отражениях, достигающая нескольких децибел. Кроме того, пока не удается обеспечить достаточно высокую плотность заполнения, что в принципе, определяется лишь недостаточной проработанностью технологии изготовления. Существуют коммутаторы с конфигурацией 64x64 портов, однако это достигается за счет ухудшения общей надежности. Все еще находится в стадии разработки и вопрос обеспечения точности и стабильности угла поворота зеркала. Использование зеркал, а не электроники, позволяет перенаправлять световые потоки вне зависимости от объема передаваемой информации, что является значительным преимуществом. С другой стороны, такие коммутаторы не в состоянии разбивать потоки данных, т.е. коммутируют весь полный оптический канал данных.

Известны также оптомеханические коммутаторы, в которых для коммутации сигналов от входного порта в выходной наиболее часто используется подвижный отрезок оптического волокна, перемещаемый с помощью механического ползунка. Несмотря на очевидную простоту, такие устройства не нашли широкого применения, так как передвижение коммутирующих элементов должно осуществляться с высочайшей точностью. Даже незначительные перекосы или отклонения волокна от нужного положения приводят к безвозвратной потере информации. Однако этот метод коммутации, тем не менее, находит применение, особенно для уже упоминавшихся целей резервирования, поскольку его проще всего реализовать, и он наиболее дешев. Этот метод используется в основном тогда, когда требуется осуществить обход сбойных компонентов сети и где не требуется частое переключение. Также этот тип оптических коммутаторов часто применяется в некоторых видах испытательного оборудования.

Одной из оригинальных технологий, применяемых при построении оптических коммутаторов является пузырьковая, суть которой заключается в использовании двух наборов кремниевых подложек с продольными полосками. Нижняя подложка имеет слой, состоящий из вытравленных в кремнии продольных микроскопических канавок, пересекающихся друг с другом. Эти канавки заполнены специальной жидкостью, имеющей тот же показатель преломления, что и кремний. Они играют роль волноводов, по которым может распространяться входящий световой поток. На верхней подложке располагаются электроды, протекание токов по которым вызывает нагрев жидкости и образование пузырьков газа в месте пересечения канавок.

В обычных условиях свет беспрепятственно проходит через жидкость. Но когда в одном из пересечений образуется пузырек, входной луч свет, несущий информационный сигнал, отражается от него, изменяет свое направление и направляется в другой канал. В пузырьковых коммутаторах отсутствуют подвижные

части, что обеспечивает значительно более высокую надежность, чем в случае MEMS или оптомеханических коммутаторов. Однако низкое быстродействие, низкая стабильность и потери в тракте передачи сигнала все еще не позволяют таким коммутаторам получить широкое распространение.

Несомненные преимущества высокой надежности из-за отсутствия подвижных частей и пренебрежимо малая потребляемая мощность привели к использованию в оптических коммутационных технологиях жидких кристаллов. Электрическое напряжение, приложенное к жидкому кристаллу, заставляет молекулы изменить свою ориентацию, в результате чего изменяется показатель преломления. В известных в настоящее время оптических жидкокристаллических коммутаторах для переадресации света из одного порта в другой наиболее часто используется явление поляризации, так как известно, что до 50% интенсивности теряется, если проходящий через такой коммутатор свет не был предварительно поляризован. В современных жидкокристаллических коммутаторах входной световой поток попадает в линзу, которая разделяет поляризованный сигнал на два пучка, обладающие противоположной поляризацией. Оба пучка отражаются от жидкокристаллических слоев и собираются на другой линзу, где они рекомбинируют. На каждый из жидкокристаллических элементов нанесены электроды, меняя величину напряжения на которых, можно изменять поляризацию оптических сигналов, направляя их в нужный выходной порт.

Существенным недостатком таких модуляторов является низкий коэффициент передачи светового потока в канале оптического коммутатора.

В оптической технике применяются еще два способа применения жидких кристаллов для отклонения светового луча. В первой технологии используется дисперсионный жидкий кристалл (PDLC), представляющий собой полимерную матрицу с пузырьками, заполненными молекулами ЖК. Ориентация молекул в разных пузырьках различна, и в отсутствие электрического поля свет, проходящий через матрицу, рассеивается. При приложении к матрице напряжения молекулы жидкого кристалла во всех пузырьках разворачиваются вдоль электрического поля, и свет проходит с минимальным рассеянием. Во второй технологии изготовления оптических коммутаторов на жидких кристаллах мономолекулярный слой жидкого кристалла возбуждается таким образом, чтобы в участках, соответствующих светлым элементам изображения, молекулы образовывали дифракционную решетку, на которой рассеивается входной оптический сигнал.

Однако описанные технологии не получили распространения на практике вследствие явлений температурной нестабильности и фотодеградациии жидких кристаллов, а также взаимного влияния соседних активных областей в кристалле.

В настоящее время жидкокристаллические оптические модуляторы проходящего или отраженного света являются самыми распространенными устройствами в области формирования видеоизображений. К сожалению, в коммутационных технологиях жидкие кристаллы, несмотря на массу своих достоинств, не нашли широкого применения из-за высокой инерционности ЖК молекул, которая обычно составляет от 1 до 10 мс.

Похожая технология применяется и в электроголографических ячейках на основе решеток Брэгга, где управление появлением и исчезновением решетки осуществляется с помощью электрического поля. Для этих целей используются голографические изображения решетки Брэгга, которые создаются в специальных кристаллах, называемых KLTN (potassium lithium tantalate niobate — танталат-ниобат лития-калия). Эти кристаллы образуют ряды и столбцы, где ряды представляют отдельные оптические волокна, а столбцы — волновые каналы. Каждый кристалл управляется электрическим полем с помощью нанесенных электродов. При отсутствии напряжения свет беспрепятственно проходит через все кристаллы, но когда прикладывается напряжение и активизируется голограмма, входящий световой сигнал отклоняется в определенный выходной порт. В основе второй технологии, называемой электрически коммутируемыми решетками Брэгга (electrically switchable Bragg gratings или ESBGs) лежит тот же принцип. Однако чтобы заставить решетку «появляться», слой жидкого кристалла наносится на полимерный слой, покрывающий оптический световод. При отсутствии напряжения решетка отклоняет

распространяющиеся по световоду волны определенной длины. При подаче электрического напряжения решетка исчезает, и свет проходит по световоду без потерь. В электроголографических коммутаторах также отсутствуют подвижные части, а скорость коммутации в ESBG составляет примерно 100 микросекунд, что делает ESBG значительно более быстрыми, чем MEM или пузырьковые коммутаторы. Световые потери составляют порядка 1 дБ. Однако такие коммутаторы характеризуются высоким энергопотреблением, порядка 50 милливатт на коммутационный элемент.

К настоящему моменту основное внимание разработчиков оптической коммутационной техники сосредоточено на создании и совершенствовании электрооптических и акустооптических модуляторов. В полностью оптических коммуникационных сетях AON для коммутации информационных потоков в основном используется электрооптическая модуляция как наиболее эффективный способ управления световым потоком.

Электрооптические коммутаторы, выполненные на основе ячеек Керра или Поккельса, обычно содержат активные участки с электродами, к которым приложено электрическое поле. Эффект Поккельса проявляется в том, что при воздействии электрического поля на некоторые оптически прозрачные кристаллы происходит изменение показателя преломления материала, и соответственно меняется интенсивность света, прошедшего через кристалл. В оптоволоконной технике широко применяются X-ответвители на основе сплавных ячеек Поккельса. При отсутствии напряжения на электродах ячейки эффективность связи между волноводами составляет 100%. Это значит, что оптические сигналы полностью кроссуются, т.е. входят в один волновод, а выходят из другого. При подаче соответствующего напряжения на электроды эффективность передачи уменьшается до нуля. Модулируя величину напряжения на электродах, можно менять такие параметры излучения, как интенсивность света в канале или его фазу, блокируя отдельные каналы и перенаправляя тем самым информацию в виде оптического излучения из одного порта в другой.

Преимуществом электрооптического эффекта является твердотельность конструкции и высокая скорость коммутации. А недостатками является высокое напряжение на электродах, достигающее тысяч вольт. Особые сложности возникают при построении неблокирующих коммутаторов большой размерности.

На рынке сетевых технологий представлены также термооптические коммутаторы, в которых для изменения характеристик оптического волокна применяется температурное воздействие, позволяющее добиться того же эффекта, что и в электрооптических коммутаторах. К ним относятся интерферометрические и цифровые оптические коммутаторы (digital optical switches — DOS). Простейшими являются коммутаторы со структурой портов 1 x 2. Увеличение температуры в одном плече вызывает увеличение коэффициента затухания и блокирует прохождение света в этом плече. Термооптические коммутаторы имеют меньшие размеры, отличаются большей надежностью, но их эксплуатационные характеристики зависят от длины волны пропускаемого света, вследствие чего требуется применение дополнительных средств контроля, обеспечивающих поддержание температуры отдельных соединений в строго установленных пределах.

В последнее время активизировались разработки в области создания оптических модуляторов, основанных на изменении коэффициента преломления полупроводниковых материалов, и в частности кремния, который является оптически прозрачным в типичном для оптоволоконных коммуникаций диапазоне длин волн (от 1,3 до 1,55 мкм) и обладает высоким коэффициентом преломления.

В настоящее время разработаны микроминиатюрные модуляторы светового потока на основе кольцевых кремниевых световодных структур. Световоды выполнены методом плазменного напыления PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) и изолированы стенками из двуокиси кремния. Входной оптический сигнал, в виде линейно поляризованного когерентного излучения с заданной длиной волны, направляется по линейному световоду, выполненному на подложке из кристаллического кремния. Центральная часть световода имеет меньший коэффициент преломления, чем границы, а его геометрические размеры соответствуют длине волны распространяющегося излучения (1,9 мкм).

Главная деталь модулятора - кольцевой резонатор. В нем может распространяться только пучок света с фиксированной длиной волны, которая определяется исходя из геометрических размеров кольца. Было доказано, что если расположить два волновода достаточно близко друг к другу, то энергия может передаваться между ними так, словно разделяющего их пространства (материала, барьера) не существует. При этом имеется возможность подстраивать частоту резонанса и полосу пропускания кремниевого световода с помощью второго пучка света, называемого «накачивающим». Так как кольцо резонатора располагается в непосредственной близости от линейного волновода, то свет проникает через разделяющее их пространство. При этом излучение с резонансной длиной волны будет "поглощаться". Соединяя посредством резонатора два параллельных волновода, имеется возможность получить "оптический вентиль", пропускающий между ними свет только на частотах, кратных резонансной.

Поскольку на частоте резонанса оптическая пропускная способность кольца составляет более 80%, а для других длин волн её значение снижается ниже 5%, то, изменяя таким образом коэффициент передачи, можно осуществлять модуляцию оптических сигналов с заданной длиной волны. Конфигурация из нескольких волноводов и колец, настроенных на разные частоты резонанса, в совокупности может представлять собой оптический многоканальный коммутатор.

К очевидным недостаткам такого устройства можно отнести высокую зависимость полупроводниковых материалов от температуры (как известно, коэффициент преломления кремния нелинейно уменьшается с ростом температуры), а также быстрое действие, ограниченное временем релаксации свободных носителей в кремнии, равным 450 пс.

Наиболее перспективными в настоящее время с точки зрения быстрого действия представляются акустооптические коммутаторы, основанные на эффектах Джекффри или Брэгга, в которых используются акустические волны для создания в оптически прозрачном кристалле областей с повышенной и пониженной плотностью. Образующиеся под действием ультразвука чередующиеся неоднородности в плотности кристалла образуют своего рода дифракционную решетку, которая может отклонять проходящие световые пучки под различными углами. Изменяя картину акустического поля, можно перемещать оптические сигналы между различными портами. Эта технология обеспечивает интервал времени переключения между портами от 500 нс до 10 мкс при полном отсутствии подвижных частей. Недостатком таких коммутаторов является чувствительность к акустическим и температурным шумам.

Еще одним хорошо зарекомендовавшим себя средством коммутации оптических сигналов является использование усовершенствованных элементов традиционной дискретной оптики, например таких, как дифракционные решетки.

В настоящий момент одновременно развиваются три конкурирующие технологии.

Первая применяется в многоканальных мультиплексорах/демультиплексорах и использует выделение оптических несущих на основе дифракционной решетки AWG (Arrayed Waveguide Grating), образованной массивом волноводов разной длины в объеме оптически прозрачной пластины. Свет распространяется по массиву волноводов с разным фазовым запаздыванием и отражается в зеркале на торце пластины, при этом происходит интерференция входной и отраженных волн. Размеры и форма самой пластины и массива внутренних световодов выбираются так, чтобы интерференционные максимумы располагались в районе выходного порта. При демультиплексировании происходит обратный процесс. Входной оптический поток, образованный совокупностью излучений разных длин волн, подается во входной оптический волновод и распределяется по всем внутренним портам, откуда, отразившись от зеркала, распространяется по выходным световодам.

В основе второй технологии лежит применение изогнутой дифракционной решетки CG (Concave Grating), которая позволяет пространственно разнести входы и выходы такого коммутационного узла. При этом для фокусирования и интерференционного разделения каналов используется не одна, а две волноводных пластины. Процессы, происходящие в таком мультиплексоре, аналогичны вышеописанным.

В третьей технологии применяется миниатюрная дискретная оптика, использующая трехмерное оптическое мультиплексирование – 3DO (3-D Optics WDM) с классической оптической схемой,

включающей плоскую отражательную дифракционную решетку, вогнутое зеркало и массив волокон, размещенных в пазах решетки с фиксированным шагом. Принцип работы устройства в режиме демультиплексора: мультиплексированный поток из входного волокна, расходясь конусом, отражается от зеркала и падает на дифракционную решетку, отражающую под разными углами свет разной длины волны. Эти дифрагированные лучи, отражаясь от зеркала, фокусируются в определенных точках, где расположены приемные порты массива волокон, выделяющих соответствующие несущие.

К сожалению, все эти рассмотренные конструкции обладают хорошо известным недостатком прецизионных оптических устройств – низкой эксплуатационной надежностью, необходимостью тщательной юстировки и высокой стоимостью.

Большинство из существующих в настоящее время оптических сетей, а соответственно и коммутаторов оптических сигналов для них, работают с постоянной длиной волны. Однако в настоящее время существует настоятельная необходимость иметь возможность менять длину волны сигналов в процессе их передачи. Поэтому в ближайшем будущем следует ожидать широкого развертывания систем передачи с преобразованием длин волн. И в этой связи разработка коммутаторов с преобразованием длин волн является весьма актуальной задачей. Возможно, наиболее перспективными в этом качестве могут явиться OADM (optical add-drop multiplexers), которые позволяют извлекать или добавлять в линии DWDM отдельные волновые каналы. В настоящее время они используются, в основном, в качестве упорядочивающих коммутаторов, или агрегируют низкоскоростной трафик для передачи его по каналам ОС-3 или ОС-12. В центральной части общегородских сетей они выступают в роли оптических кросс-соединителей, осуществляющих подключение множества входящих линий, и могут работать с частью полосы пропускания отдельных волоконно-оптических кабелей, полосами пропускания и целыми волновыми каналами.

Архитектура оптических коммутаторов

Современные оптические коммутаторы в основном строятся на основе двух структур. Для более простой из них характерно использование координатных (матричных) коммутаторов. Линии входных и выходных оптических каналов образуют прямоугольную сетку. В случае ОЕО коммутаторов эта сеть обычно образована электронными ключами. В полностью оптических коммутаторах вместо электронных ключей применяются оптические ответвители (optical couplers). При этом различные порты соединяются между собой путем задания различных положений этих ответвителей.

В таких координатных коммутаторах основные проблемы связаны с большим размером матрицы коммутирующих элементов, т.е. числа электронных или оптических ключей, достигающих в современных коммутаторах десятков или даже сотен тысяч. Для каждого из этих пересечений требуется делитель (splitter) или объединитель (combiner), что увеличивает стоимость системы. В связи с этим координатные коммутаторы используются в основном в качестве конструктивных матриц небольшой емкости при разработке иерархических коммутаторов увеличенной емкости. В случае коммутаторов подобного конструктивного типа, называемого архитектурой Клоза (Clos architecture), имеется три яруса соединений. В такой структуре входные порты подключены к одному набору координатных коммутаторов, а выходные — к другому. И при этом и входной и выходной наборы подключены к третьему.

При использовании транспозиционных коммутаторов архитектура Клоза может быть использована в коммутационной структуре Бенеша (Benes switch fabric), где коммутаторы с конфигурацией 2×2 применяются для осуществления произвольных комбинаций. При этом половина портов любого из промежуточных коммутаторов Клоза расположена с одной стороны коммутатора и играет роль входных портов, а вторая, расположенная с другой стороны, — выходных. Каждый из этих коммутаторов также может быть разбит на две группы, и так далее, пока вся схема не будет образована соединителями 2×2 .

Однако, при том, что архитектура Бенеша достаточно близка к оптимальной с точки зрения использования аппаратных средств, в таких матричных коммутаторах все же целесообразнее использовать

коммутирующие элементы с размерностью, большей чем 2,2 иначе при большом числе каналов возникают проблемы с масштабированием. Коммутаторы общего типа со сходными архитектурами имеют аналогичные недостатки из-за еще большего числа коммутирующих элементов. Кроме того координатным коммутаторам свойственно ослабление сигналов, происходящее при двухстадийном процессе разделения и объединения сигналов, что требует использования энергетически управляемого разделения и объединения (power-dividing and power-combining) сигналов.

Основные функции коммутаторов

Все современные оптические коммутаторы, как ООС, так и ОЕО, выполняют в сети несколько ключевых функций. К ним можно отнести резервирование, собственно процессы коммутации и функции контроля.

Суть оптического резервирования практически не отличается от традиционной задачи автоматической защиты сетевого трафика от любых сбоев в линейных компонентах сети (в данном случае - от обрывов волоконно-оптических кабелей или отказов EDFA-усилителей). Оптическое резервирование обеспечиваются заблаговременным размещением таких коммутаторов в местах критических соединений сети с созданием возможности обходных путей.

При изменении направления потока информации в оптической сети коммутатор должен решать две важные задачи. В коммутаторах оптического мультиплексирования методом добавления/ответвления каналов (optical add-drop multiplexers - OADM) коммутирующие матрицы используются для добавления или извлечения данных, передаваемых по магистральным волновым каналам (wavelength). Краевые (Edge) коммутаторы используются для переключения входящих низкоскоростных линий для передачи данных в магистрали OC-3 или OC-12. Кросс-соединители (photonic crossconnects), называемые также оптическими коммутаторами (photonic switches) или маршрутизаторами по длине волны (wavelength routing), размещаются в местах критических соединений в пределах центральной части сети, коммутируя из одного порта в другой всю полосу пропускания волоконно-оптического кабеля или его отдельные волновые каналы.

Оптические коммутаторы могут быть также использованы для проверки качества отдельных компонентов сетей или для контроля активности трафика путем добавления в трафик некоего тестового сигнала, не нарушающего прохождения основных информационных потоков. Например, в таких испытательных приборах, как оптические рефлектометры, коммутаторы используются для проверки множества волоконно-оптических кабелей на удаленных узлах.

Наиболее распространенными ООС коммутаторами являются оптические кросс-соединители (optical crossconnects — ОКС), которые принимают данные от одного из входных портов и коммутирует их на два или более выходных.

Сейчас в оптических сетях используются два типа кросс-соединителей, или, как их принято называть, пространственных (space-division) коммутаторов: транспозиционные (permutation) и общего типа (generalized). Транспозиционные коммутаторы, или оптические прерыватели, состоят из соединений типа «один вход - один выход» между различными портами. Соединение типа «один вход-множество выходов» для данного типа коммутаторов невозможно. При этом общее число возможных кросс-соединений определяется количеством транспозиций, т.е. суммарным количеством попарных комбинаций возможных выходов и входов.

Второй тип кросс-коннекторов может соединять любой входной порт с множеством выходных или же наоборот. При этом число различных возможных комбинаций соединения портов увеличивается. Их разновидностью являются специальные коммутаторы, называемые линейными делителями-объединителями (linear divider-combiner - LDC), которые позволяют равномернее распределять входную мощность оптического сигнала между выходными портами для обеспечения улучшенных характеристик затухания.

Основными недостатками таких кросс-коннекторов является то, что каждый входной оптический сигнал должен обязательно пройти на выход через какой-либо выходной порт коммутатора во избежание его

отражения обратно ко входу. Если коммутаторы общего типа и LDC в большинстве случаев позволяют это сделать, то в случае транспозиционных коммутаторов это невозможно. При этом сети, содержащие транспозиционные коммутаторы, должны обладать сложной структурой, предотвращающей непреднамеренные оптические соединения соседних каналов, например, замкнутые кольцевые маршруты в случае сетей.

Кроме того в таких коммутаторах необходимы оптические усилители, являющиеся источником шумов, и в случае образования кольцевых маршрутов эти шумы накапливаются и достигают значительной величины, а также интерферируют с другими волновыми каналами.

Основные характеристики и параметры коммутаторов

Ключевыми параметрами, применяемыми при оценке и анализе технических и эксплуатационных характеристик коммутаторов, являются: размерность коммутационной матрицы, масштабируемость, структурируемость (granularity) и скорость коммутации, а также вносимые потери.

Размерность матрицы — В современных городских условиях потенциальное число линий связи, подключенных к одному коммутационному устройству, может достигать тысяч и даже десятков тысяч. Поэтому количество портов, которые способен поддерживать коммутатор, является его важнейшей характеристикой. Некоторые современные оптические коммутаторы достигают конфигурации 4000 x 4000, однако для подавляющего большинства приложений не требуется такой размерности. Поэтому основная масса коммутаторов рассчитана на гораздо меньшее количество портов, например 16x16 или 64 x 64 порта.

Масштабируемость — Многие сетевые провайдеры используют архитектуры или системы коммутации, для работы которых необходимо несколько десятков портов, например схемы Клоза и Бенеша. Если имеющаяся в настоящее время система коммутации построена на базе коммутационных элементов, имеющих малую размерность, например 2 x 2, то при её масштабировании до большего количества портов, вызванном, например, увеличением числа потребителей услуг, коммутационное устройство придется дополнительно дооборудовать сложными управляющими элементами, что может привести к неоправданным расходам.

Структурируемость — При построении оптического коммутационного устройства особую важность приобретают вопросы, связанные с размерами портов и их согласованием. Весьма желательно, чтобы система поддерживала все типы портов (OC-3, OC-12, OC-48, OC-192, OC-768). Число портов имеет значение не только в случае использования оптических кросс-соединителей, но и при маршрутизации волновых каналов, когда ключевой характеристикой является число коммутируемых каналов, а не только число подключенных кабелей.

Скорость коммутации — Сейчас практически невозможно точно ответить, какова должна быть реальная скорость перемещения светового потока из одного порта коммутатора в другой.

Этот параметр в основном ограничивается допустимым уровнем финансовых затрат. В настоящее время считается вполне достаточным, если коммутация осуществляется в течение нескольких миллисекунд. SONET проигрывает в этом отношении, обеспечивая поддержку соединений со скоростью 50 миллисекунд, в то же время, обеспечивая преимущество по сравнению с протоколами более высокого уровня.

Известные в настоящее время полностью оптические коммутаторы уверенно работают при скоростях 40-160 Gb/s. В то же время перспектива создания терабитных сетей требует переключения отдельных пакетов оптическими средствами с пикосекундными периодами коммутации.

Потери — В оптических коммутаторах присутствуют два основных вида потерь. Первые вносятся в месте сопряжения волоконно-оптических кабелей с коммутатором, а вторые определяются свойствами самого коммутационного элемента или коммутационной матрицы. Несмотря на устойчивую тенденцию к минимизации, потери в современных оптических коммутаторах могут составлять от 1-2 дБ до 4-5 дБ.

Помимо вышеупомянутых немаловажными показателями эффективности коммутатора при его выборе могут также служить переходные и перекрестные искажения, вносимые в исходный оптический сигнал паразитными явлениями рефракции, дисперсии и интерференции. Немаловажными критериями, определяющими выбор типа коммутатора, являются также массо-габаритные показатели, удельная стоимость, приходящаяся на один коммутируемый канал, а также надежность.

Одной из важнейших характеристик коммутаторов является характеристика блокирования. Этим термином обычно обозначается невозможность, по каким либо причинам, обеспечить одновременное соединение между произвольно взятыми входным и выходным портами.

В некоторых случаях, в зависимости от структуры коммутатора или быстродействия коммутирующего элемента, не удастся организовать некоторые межсоединения, и они оказываются заблокированными.

В настоящее время известны несколько видов неблокирующих коммутаторов, и каждый из них обладает определенными недостатками. Например, в неблокирующих коммутаторах с изменяемой структурой (rearrangeably nonblocking switches) отдельные элементы коммутатора, например, отрезки световода, механически перемещаются так, чтобы создать новое соединение. Однако не всегда возможно осуществления нового соединения без прерывания одного или нескольких уже установленных соединений.

Матричные коммутаторы вида $N \times M$ также часто относят к числу перестраиваемых неблокирующих коммутаторов. Но при этом задание непересекающегося пути следования оптического сигнала по коммутационной матрице не всегда просто осуществить. Вследствие этого, несмотря на сравнительную простоту аппаратной части, сложность управления остается довольно высокой. Неблокирующие коммутаторы с архитектурой Клоза позволяют избежать временного отключения существующих соединений лишь в том случае, когда для установления нового соединения использован правильный алгоритм переключения. Но для осуществления сложных алгоритмов маршрутизации требуется дополнительное оборудование и соответствующее программное обеспечение. В коммутаторах Бенеша для установления новых соединений может быть выбран любой свободный маршрут. Но при этом резко возрастает стоимость оборудования в связи с увеличением общего количества коммутационных элементов.

Проблема совместимости оптических коммутаторов

В настоящее время существуют два глобальных подхода к построению систем оптической коммутации. Одним из подходов к задаче внедрения оптических коммутаторов является полная замена существующей структуры уже работающих электронных коммутаторов их оптическими аналогами. При этом замене подлежат все элементы существующей сети, а также применяемые протоколы и программное обеспечение.

Второй подход заключается в постепенной замене существующих электронных коммутаторов на их оптические аналоги с увеличением быстродействия и пропускной способности, при сохранении прежней структуры сети. При этом сохраняется и существующая иерархия применяемых коммутаторов, которая включает в себя настольные коммутаторы, предназначенные для работы с небольшим числом пользователей, магистральные коммутаторы и коммутаторы для рабочих групп.

Настольные оптические коммутаторы должны послужить заменой используемых концентраторов 10Base-T. Для этого они будут иметь до 24 портов, каждый из которых поддерживает персональный (private) канал (например, для рабочей станции). Дополнительно такой коммутатор должен иметь один или несколько портов, аналогичных нынешним 100Base-T или FDDI, для подключения к магистрали (backbone) или серверу. Настольные коммутаторы должны быть также как и сейчас просты в установке и обслуживании.

Магистральные коммутаторы применяются в основном для соединения сетей или сегментов, поддерживающих множественную адресацию для своих портов. Такие коммутаторы будут использоваться для соединения настольных оптических коммутаторов, аналогичных концентраторам 10Base-T, групповых

коммутаторов и серверов. Магистральные коммутаторы должны одновременно передавать трафик между несколькими сегментами с полным использованием полосы пропускания среды. Для магистральных коммутаторов будет характерно модульное устройство и способность поддерживать до нескольких тысяч MAC-адресов на каждый порт. Установка таких коммутаторов более сложна по сравнению с настольными коммутаторами, за счет необходимости настройки функций маршрутизации. Так же как и в современных электронных устройствах такого типа, обязательными будут являться резервные источники питания, горячая замена модулей, поддержка всех видов протоколов для магистральных коммутаторов, обеспечение всех известных возможностей и технологий коммутации, как например виртуальные сети.

Коммутаторы для рабочих групп, которые сейчас используются главным образом для соединения изолированных настольных коммутаторов или концентраторов 10Base-T с остальными частями сети. Эти устройства объединяют в себе свойства как настольных, так и магистральных коммутаторов. Подобно магистральным, коммутаторы рабочих групп должны будут поддерживать множественную адресацию (до нескольких тысяч MAC-адресов на коммутатор) и позволять использование в качестве маршрутизаторов. Как и настольные коммутаторы они могут служить для подключения к портам отдельных узлов. Это позволит пользователям перейти от работы с разделяемой средой к персональным (private) каналам за счет одновременной передачи по оптическому кабелю нескольких волновых каналов

Заключение

Приведенный в данном докладе обзор существующих в настоящее время оптических коммутаторов и тенденций их развития позволяет сделать однозначный вывод, что несмотря на широкое разнообразие физических принципов, на которых построены известные на сегодня средства коммутации световых потоков, ни одно из них пока не способно полностью удовлетворить всех требований, предъявляемых к узлам современных информационных сетей, а именно: высочайшей надежности, достаточному быстродействию, высокой технологичности и соответственно, целесообразной стоимости. Данный обзор не претендует на всеобъемлющую полноту, но может быть полезен для анализа современного состояния проблемы создания полностью оптических информационных сетей и выбора направлений исследований.

Библиография

Авторы не приводят список литературы к докладу ввиду его значительного объема.

Информация об авторах



Гайворонская Галина Сергеевна – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой ИКТ Одесской Государственной Академии Холода, Одесса, Украина.

e-mail: gayvoronska@osar.odessa.ua

Главные области научного исследования: общие теоретические исследования в информационных технологиях, информационные и телекоммуникационные системы.



Рябцов Александр Васильевич – к.т.н., доцент кафедры ИКТ Одесской Государственной Академии Холода, Одесса, Украина.

e-mail: ryabtsov@usa.com

Главные области научного исследования: информационные системы, коммутационная техника, оптические технологии, полностью оптические коммутаторы.