

Фотонные коммутаторы

Владимир МАККАБЕЕВ,
д. т. н., профессор
display1@mail.ru

В статье предлагается аналитический обзор перспективных компонентов полностью оптических оптоволоконных сетей связи — фотонных коммутаторов, и обсуждается их классификация. Рассматриваются фотонные коммутаторы в сетях с коммутацией каналов и с коммутацией пакетов AOLS (All-Optical Label Swapping) — полностью оптическим обменом меток. Формулируются задачи, которые следует решать при построении полностью оптических сетей связи с фотонными коммутаторами.

В современных условиях устойчивое функционирование систем передачи информации достигается высокой готовностью и пропускной способностью системы (линии) связи. Тенденция развития номенклатуры основных услуг сетей связи РФ и требуемые для их реализации скорости передачи показывают необходимость значительного повышения пропускной способности сетей связи. Создание и развитие сетей связи РФ предполагает комплексное использование цифровых волоконно-оптических средств передачи и обработки информации (ВОСП) с преимущественным обеспечением автоматической коммутации.

Анализ основных направлений развития цифровых сетей связи для нужд государственного управления, обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка в РФ показал, что в таких сетях не в полной мере учтены возможности, которые открываются при внедрении ВОСП и достижений в сфере новых технологий и разработок. В современных ВОСП в основном применяется модуляция оптической несущей по интенсивности, их пропускные способности относительно малы, неэффективно используется спектральная полоса окна прозрачности одномодового оптического волокна, где установлены ретрансляционные пункты регенеративного типа с преобразованием оптических сигналов в электрические, что затрудняет создание прозрачных оптических трактов. Недостаточно используются научные и технологические достижения в области фотонных коммутаторов, интегральной оптики и фотонных интегральных цепей.

Анализ состояния и направлений развития сетей связи на сегодняшний день ставит проблему разработки перспективных отечественных средств волоконно-оптической связи на основе применения новой компонентной базы и с использованием информационных технологий, оптимизированных с учетом характеристик новых компонентов и узлов.

Указанная проблема находится в числе первоочередных задач совершенствования системы связи, ее решение позволит значительно повысить эффективность функционирования систем связи по большинству их составляющих в различных условиях применения.

Дальнейшее развитие волоконно-оптической связи видится в создании полностью оптических фотонных сетей и линий связи. В подобных системах все процессы передачи, приема, обработки и коммутации сигналов будут происходить на чисто фотонном уровне, без участия электронных процессов и электронных устройств. Для этого разрабатываются такие фотонные устройства, как оптические коммутаторы с оптическим управлением, оптические усилители с дистанционным оптическим питанием, генераторы оптических импульсов с заданными параметрами и ряд пассивных оптических элементов: оптические ответвители и разветвители, оптические вентили (изоляторы), компенсаторы хроматической дисперсии, оптические фильтры, поляризаторы и циркуляторы, устройства вставки/выделения каналов, а также мультиплексоры/демультиплексоры. Продолжаются интенсивные исследования по созданию оптических бистабильных устройств и оптических процессоров на их основе.

Широкое внедрение ВОСП различного уровня стимулировало появление новых архитектур и методов маршрутизации сетей связи с коммутацией оптических информационных потоков. Непрерывный рост потребностей в новых видах услуг связи при параллельном увеличении числа абонентов требует не только увеличения скорости и объема передаваемой информации, но и значительного повышения быстродействия оптических коммутационных устройств и создания новых коммутационных технологий. Указанная задача технически успешно решается на основе физических принципов, использующих квантово-оптические, электрооптические, магнитооптические, акустооптические

и другие явления, происходящие в соответствующих полупроводниковых и оптических структурах. Совершенствуются и создаются новые типы всех элементов и устройств, на основе которых строятся современные ВОСП и оптические сети связи: разработаны новые типы одномодовых оптических волокон (TRUEWAVE, ALLWAVE, LEAF и др.), оптических соединителей, волоконно-оптических пассивных элементов, излучателей и фотоприемников, а также оптических усилителей. Быстрый рост объема и скорости передачи информации в современных ВОСП при одновременном увеличении длины участков регенерации привели к тому, что наряду с такими факторами, влияющими на качество связи и энергетический потенциал ВОСП, как потери в волокне вследствие рэлеевского рассеяния, хроматическая дисперсия, потери на локальных неоднородностях, возникла необходимость учитывать и другие физические процессы — например, поляризационную модовую дисперсию (PMD), поляризационные модовые потери (PML) и нелинейные оптические явления, проявляющиеся при передаче по волокну оптического излучения с мощностью более 10 мВт.

Современные технологии фотонной коммутации основаны на использовании микроэлектронных механических систем (Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS), электрооптических коммутаторов, устройств на основе нелинейных эффектов в оптических волокнах и полупроводниковых материалах.

Фотонные коммутаторы для оптических сетей с коммутацией каналов

Классификация фотонных коммутаторов

- 2D:
 - объемный (полное внутреннее отражение);
 - термо-оптический (стекло или кремний);
 - электрооптический.

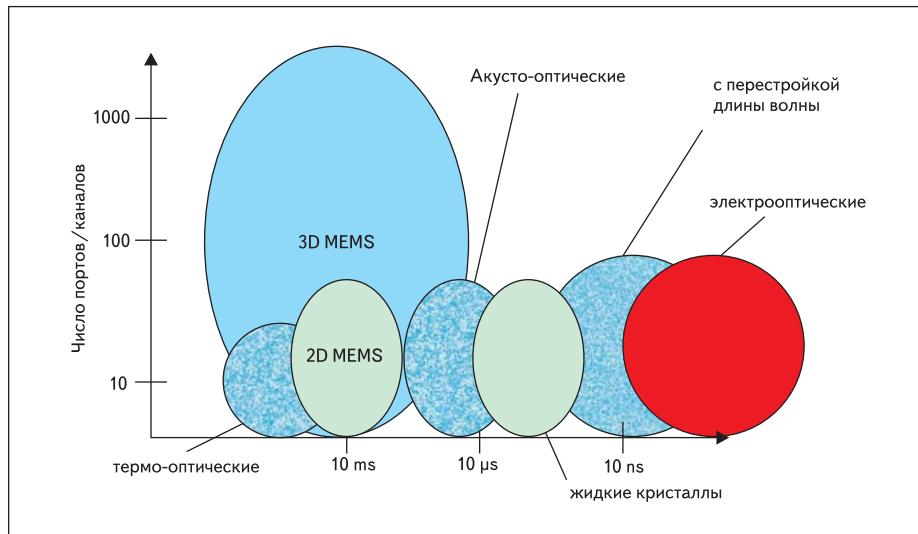


Рис. 1. Классификация фотонных коммутаторов для полностью оптических сетей связи с коммутацией каналов. По горизонтали отложены значения быстродействия (времени коммутации), по вертикали — число портов/каналов

- LiNbO_3 , InGaAsP , GaAs , жидкие кристаллы.
- Маха-Цендера, Фабри-Перо, интерферометры Майкельсона:
 - акусто-оптический;
 - с усилителем (расщепитель с усилением в каждом плече).
- Er :
 - SiO_2 ;
 - InGaAsP ;
 - MEMS (Micro Electro Mechanical System).
- 3D:
 - дифракционные;
 - MEMS.
- Замкнутые архитектуры для большого числа коммутаций:
 - коммутаторы с переключением оптического излучения управляющим оптическим излучением.
- На основе нелинейных оптических волокон.
- На основе полупроводниковых оптических кристаллов.

Классификация фотонных коммутаторов для оптических сетей связи с коммутацией каналов представлена на рис. 1.

В фотонных коммутаторах используются различные оптические механизмы, в том числе дифракционные фазовые решетки и микроэлектронные механические системы (MEMS).

Система MEMS представляет собой набор подвижных зеркал очень маленького размера, с диаметром менее миллиметра. Коммутатор MEMS применяется после демультиплексора, когда исходный сигнал уже разделен на составляющие волны. За счет поворота микрзеркала на определенный угол исходный луч определенной волны направляется в соответствующее выходное волокно. Затем все лучи мультиплексируются в общий выходной сигнал.

По сравнению с оптоэлектронными кросс-коннекторами фотонные коммутаторы

MEMS занимают объем в 30 раз меньше и потребляют примерно в 100 раз меньше энергии. Однако этот тип устройств обладает и недостатками, в первую очередь низким быстродействием и чувствительностью к вибрации. Тем не менее системы MEMS находят широкое применение в новых моделях фотонных коммутаторов. Сегодня подобные устройства могут обеспечивать коммутацию 256×256 спектральных каналов, и планируется выпуск устройств с возможностями 1024×1024 и выше.

Разрабатываются также фотонные коммутаторы на других принципах — термооптические, электрооптические, на фотонных кристаллах (микроструктурированных волокнах), на жидкокристаллических матрицах.

Таким образом, существует большое количество различных типов фотонных коммутаторов, причем разработки в этой области интенсивно развиваются и взаимно увязываются с разработками других функциональных элементов оптической сети связи, с учетом ее конфигурации.

Примеры конструкций элементов MEMS фотонных коммутаторов показаны на рис. 2.

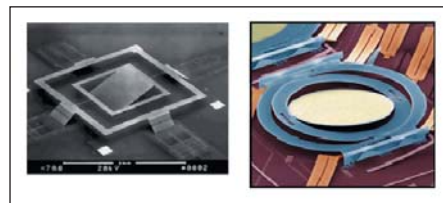


Рис. 2. Примеры конструкций MEMS фотонных коммутаторов

Фотонные коммутаторы для сетей связи с коммутацией каналов строятся также на основе устройств, управляемых оптическим сигналом, — нелинейных оптических устройств: нелинейного оптического петлевого

зеркала (рис. 3) и свету управляемого транспаранта с использованием полупроводникового оптического прозрачного кристалла на основе CdTe (рис. 4).

Нелинейные оптические петлевые зеркала

В нелинейном оптическом петлевом зеркале (НОПЗ) применяется нелинейный интерферометр Саньяка (рис. 3), в котором используется оптическая обработка сигналов, основанная на относительном фазовом сдвиге двух встречно распространяющихся оптических импульсов. Фазовый сдвиг создается за счет эффекта фазовой кросс-модуляции оптическим импульсом, изменяющим нелинейный показатель преломления в петле интерферометра Саньяка (эффект Керра). Интерферометр Саньяка состоит из направленного ответвителя (НО), два выхода которого соединены с волоконно-оптической петлей задержки. Оптический сигнал поступает на вход А и разделяется на два сигнала, распространяющихся во встречных направлениях.

При слабом входном сигнале и отсутствии управляющего импульса два встречно-распространяющихся сигнала возвращаются к разветвителю с одинаковыми задержками и, следовательно, результирующий фазовый сдвиг равен нулю. В этом случае входной сигнал полностью отражается от НОПЗ назад, то есть интерферометр Саньяка действует как зеркало со 100%-ным отражением.

Если коэффициент связи НО для управляющего импульса k_c равен нулю и входной сигнал точно синхронизирован с управляющим импульсом, то сильный управляющий импульс, возбуждающий плечо В, не расщепляется в НО, а распространяется в одном направлении с сигналом S_{co} и одновременно пересекает сигнал S_{cnl} . В результате этого сигнал S_{co} подвергается фазовой кросс-модуляции (ФКМ) на всей петле под воздействием управляющего импульса, и баланс между встречно-распространяющимися сигналами S_{co} и S_{cnl} нарушается. Это приводит к относительной разности фаз $\Delta\phi$. Если интенсивность управляющего импульса отрегулирована так, что $\Delta\phi = \pi$, то весь входной сигнал проходит через интерферометр Саньяка в плечо В. Это означает, что входной сигнал может переключаться управляющим импульсом между плечами А и В.

Вследствие того, что фазовый сдвиг попутно распространяющегося сигнала возрастает пропорционально длине петли, уменьшение управляющей мощности может быть достигнуто за счет увеличения длины петли.

В общем случае, поскольку временной интервал температурных и акустических флуктуаций в петле значительно больше, чем время задержки, два встречно распространяющихся импульса проходят одинаковые оптические пути при отсутствии управляющего импульса. Следовательно, в этом слу-

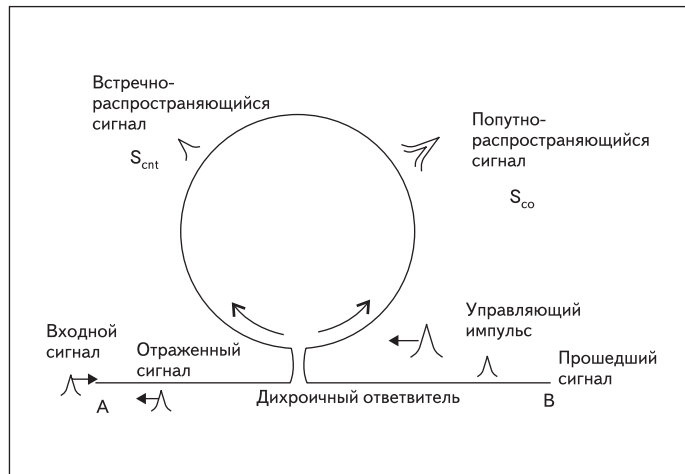


Рис. 3. Схема нелинейного оптического петлевого зеркала на основе интерферометра Саньяка

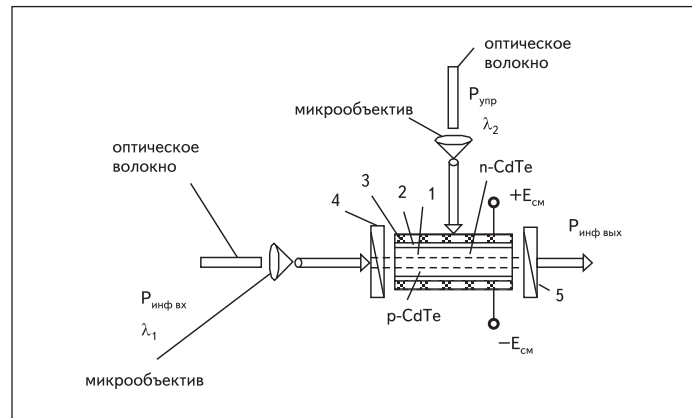


Рис. 4. Схема фотонного коммутатора на основе электрооптической структуры теллурида кадмия: 1 — полупроводниковый оптический кристалл на основе CdTe, состоящий из *n*- и *p*-областей; 2 — туннельно прозрачный диэлектрический слой; 3 — напыленные металлические электроды; 4 — поляризатор; 5 — анализатор

чае разность фаз между двумя встречно-распространяющимися сигналами остается равной нулю даже после распространения через длинную петлю интерферометра Саньяка. Поэтому высокостабильное переключение при низком управляющем сигнале может быть достигнуто с помощью конфигурации интерферометра Саньяка.

Используя входной сигнал и управляющий импульс с различными длинами волн или различными поляризациями, можно реализовать НО с коэффициентом связи 0,5 для входного сигнала и 0 для управляющего импульса. Чтобы получить стабильный режим работы, предпочтительнее использовать входной сигнал и управляющий импульс с различными длинами волн.

Фотонный коммутатор на основе электрооптической структуры теллурида кадмия

Информационный оптический поток $P_{\text{инф}}$ направляется через поляризатор 4 на входную грань коммутатора. Если к электродам 3 приложено напряжение смещения $E_{\text{см}}$, а управляющий оптический поток отсутствует, то информационный поток проходит через коммутатор без изменения состояния поляризации. Анализатор 5 при этом ориентируют на максимальное пропускание $P_{\text{инф}}$. При поступлении на управляющий вход сигнала $P_{\text{упр}}$ в оптическом кристалле 1 поворачивается плоскость поляризации на 90° и информационный сигнал не проходит через анализатор 5.

Приведенные варианты фотонных коммутаторов можно конструктивно реализовать в интегрально-оптическом исполнении.

Кремниевая фотоника

Революционные преобразования в области расширения полосы пропускания сетей могут быть достигнуты за счет разработки крем-

ниевых оптоэлектронных устройств, предназначенных для телекоммуникационной индустрии. Цель состоит в увеличении пропускной способности и одновременном сокращении стоимости построения и поддержки высокоскоростных, надежных оптических сетей. Одной из технологий, которые исследуются и разрабатываются для достижения такого результата, является кремниевая фотоника. С помощью кремния и стандартных технологий его обработки создаются микроскопические оптические или фотонные устройства, обладающие более активными функциональными возможностями, чем простые пассивные волноводы. В будущем эти миниатюрные кремниевые компоненты предполагается применять в оптических модулях для сокращения их стоимости и размера. Для сочетания возможностей оптоэлектроники и кремниевых технологий можно использовать стандартные технологии изготовления интегральных схем, которые значительно снизят стоимость компонентов, необходимых для внедрения оптических сетей, таких как оптические коммутаторы, модуляторы и конфигурируемые фильтры.

Мультипротокольная лямбда-коммутация

Перспективной технологией в сетевой индустрии является мультипротокольная лямбда-коммутация (MultiProtocol Lambda Switching — MPLambdaS). Иногда в качестве аббревиатуры данной технологии применяется выражение MPLS — такое же, как и для мультипротокольной коммутации с использованием меток (MultiProtocol Label Switching). Технология MPLambdaS является еще одним блоком для построения полностью оптических, или фотонных, сетей, обещающих радикально изменить существующую сейчас архитектуру. Современные сети передачи данных в основном базируются на четырехуровневой архитектуре. Это

уровень TCP/IP — для передачи приложений, ATM — для формирования трафика (traffic engineering, то есть указания как, когда и где должна осуществляться передача данных), SONET/SDH — для транспорта и DWDM — в качестве механизма мультиплексирования. Многоуровневой архитектуре присущ так называемый «эффект наименьшего общего знаменателя», когда один уровень может ограничить масштабируемость всей сети. Это делает ее неперспективной в качестве основы для построения фотонных сетей. С наиболее общих позиций модель фотонных сетей предусматривает разделение на два домена. Один обеспечивает требуемые сервисы, а другой — оптический транспорт. При таком делении сервисная платформа может быть построена на оборудовании NG SDH, в этом случае переходящем на уровень сервисов. Транспортный же уровень составляют фотонные коммутаторы и система DWDM. При данной архитектуре фотонные сети должны осуществлять мультиплексирование и маршрутизацию с использованием только оптических технологий, основываясь на свойствах оптического излучения с различными длинами волн. Сегодня в качестве базового элемента мультиплексирования, как правило, применяются временные слоты (разделение по времени), а на физическом уровне маршрутизаторов и коммутаторов — оптико-электронные преобразователи. Решение проблемы заключается в объединении технологий DWDM и лямбда-коммутации. Схожесть аббревиатур для коммутации с использованием меток (MPLS) и лямбда-коммутации обусловлена тем, что концептуально обе технологии почти идентичны. Основное назначение технологии MPLS — заменить ресурсоемкую и медленную часть алгоритма поиска выходного порта в таблице маршрутизации более эффективным алгоритмом обмена метками (label swapping). Здесь под меткой

понимается короткий, фиксированной длины числовой идентификатор, который встраивается в заголовок IP-пакета. Устройства, реализующие данную технологию, называются Label-Switching Router (LSR). Фронтальные (граничные) LSR классифицируют входящий поток пакетов, разбивая его на определенные классы эквивалентности по отношению к маршруту (например, по одинаковому префиксу IP-адреса получателя). Затем пакеты снабжаются соответствующей меткой и передаются ближайшему по маршруту LSR. Когда LSR получает отмеченный пакет, он использует метку в качестве индекса для поиска выходного порта в таблице маршрутизации. Таким образом, после прохождения первого пакета вдоль маршрутизаторов LSR создается виртуальный коммутируемый с помощью меток путь (Label-Switched Path — LSP). В результате анализ информации на уровне 3 IP-пакета выполняется только в начале и в конце домена MPLS. Лямбда-коммутация расширяет парадигму коммутации на основе меток на оптическую область, модифицируя компонент управления MPLS для фотонной коммутации. Здесь роль метки выполняет длина оптической волны, на которой ведется передача. Естественно, что электронные коммутаторы заменяются на оптические. На концептуальном уровне существует ряд общностей между LSR и фотонными коммутаторами, с одной стороны, и между LSP и устанавливаемым оптическим каналом с другой. По аналогии с переключением по метке в LSR фотонный коммутатор переключает излучение с разной длиной волны со входного порта на выходной. Для установки LSP в каждом промежуточном LSR формируется таблица отношений <входная метка, входной порт> и <выходная метка, выходной порт>. Подобно этому для установки оптического канала в каждом транзитном фотонном коммутаторе строится аналогичная таблица <lambda_{вх}, порт_{вх}> и <lambda_{вых}, порт_{вых}>. Как и LSR, фотонные коммутаторы для вычисления маршрута требуют протоколов маршрутизации, например таких, как OSPF и IS-IS, с помощью которых осуществляется обмен информацией о состоянии каналов. Они также нуждаются в протоколах сигнализации, подобных RSVP для автоматизации процесса установки пути. Одна из уникальных особенностей фотонных коммутаторов заключается в том, что если несущие каналы распределены, они становятся прозрачными. Это значит, что управляющая информация должна передаваться отдельно от несущего канала. А потому в конфигурацию канала будут входить один двунаправленный канал управления и ряд однонаправленных несущих. При этом не требуется, чтобы канал управления и связанные с ним несущие каналы использовали одну и ту же физическую среду переда-

чи. К примеру, канал управления может быть оптическим с уникальной длиной волны или каналом Ethernet между двумя фотонными коммутаторами. Для решения проблемы управлением каналом разработан соответствующий протокол (Link Management Protocol — LMP). Хотя LMP предусматривает, что данные поступают как IP-пакеты, он не регламентирует явный транспортный механизм для передачи информации по каналу управления. В настоящее время для построения фотонных MPLambdaS-сетей необходимо разработать такие сетевые элементы, как маршрутизаторы, системы передачи DWDM и фотонные коммутаторы. Уже сейчас можно представить в общих чертах одноранговую сеть, где все сетевые элементы работают на одном (и единственном) уровне иерархии с тем, чтобы динамически устанавливать через всю сеть пути между конечными узлами.

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 данного порта не использует эту волну, иначе необходимо выполнить преобразование длины волны).

Существуют оптические кросс-коннекторы двух типов: с промежуточным преобразованием в электрическую форму и полностью оптические. Исторически первыми появились более традиционные оптоэлектронные кросс-коннекторы, за которыми и закрепилось название оптических кросс-

коннекторов. Вот почему производители полностью оптических устройств этого типа стараются использовать для них отличные названия — фотонные коммутаторы (Photonic Switches) или маршрутизаторы волн (Wave или Lambda Routers). У оптических кросс-коммутаторов имеется принципиальное ограничение — они хорошо выполняют свои функции при работе на скоростях до 2, 5 Гбит/с, но, начиная со скорости 10 Гбит/с и выше, габариты таких устройств и потребление энергии становятся недопустимыми. Фотонные коммутаторы свободны от такого ограничения.

Полностью оптические сети связи MPLS, MPLambdaS с фотонной коммутацией пакетов

Полностью оптические сети связи с фотонной коммутацией пакетов без преобразования пакетов в электрические сигналы используют полностью оптический обмен меток (AOLS) и соответствующее кодирование пакетов. Индивидуальные пакеты или группы пакетов снабжаются меткой на входе оптической сети (рис. 5). Оптическая метка удаляется и переписывается заново (электрическими или оптическими методами) в каждом фотонном коммутаторе пакетов, в то время как поток данных остается в оптической области. Существуют две основные технологии AOLS: на основе последовательности битов (рис. 6а) и на основе мультиплексирования на поднесущих (рис. 6б). Возможно комбинированное применение этих технологий, а также ортогональных форматов модуляции сигналов.

В таблице приведены технологии, необходимые для обеспечения заданных функций AOLS.

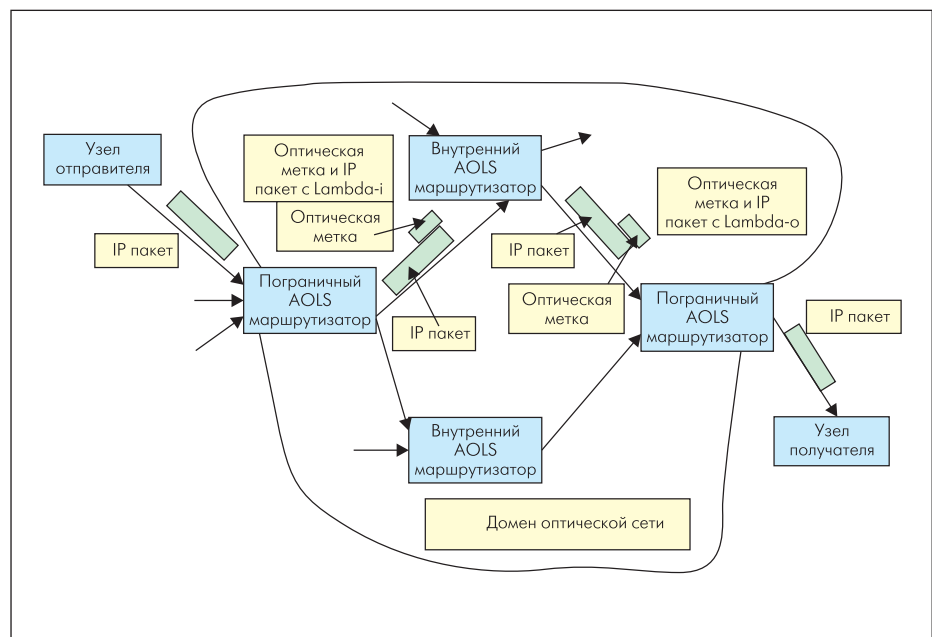


Рис. 5. Оптическая сеть связи с фотонной коммутацией пакетов и с использованием AOLS

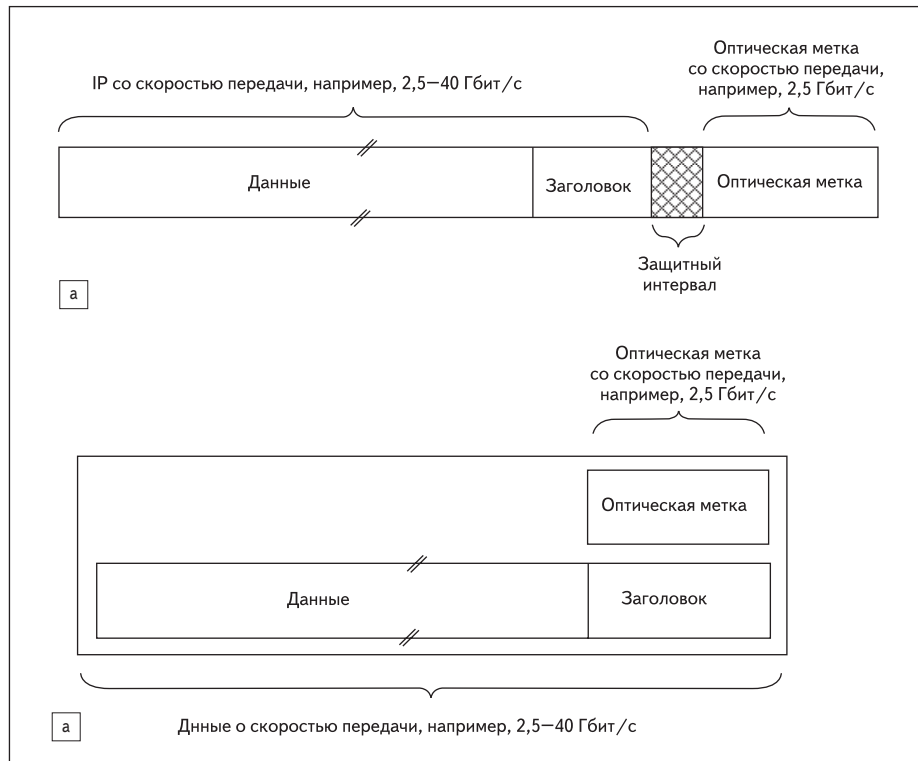


Рис. 6. Технологии AOLS а) с использованием последовательности битов, б) на основе поднесущих

Таблица. Технологии, необходимые для обеспечения заданных функций AOLS

Методы кодирования и мультиплексирования	Функции AOLS				
	Восстановление (возврат) метки	Удаление метки	Преобразование длины волны	Запись метки	Быстрая перестройка длины волны
Метки с последовательностями битов	Оптические отводы + приемники в режиме выбросов	Волновые конвертеры на основе полупроводниковых оптических усилителей и кросс-модуляции усиления (ПОУ-КМУ) Волновые конвертеры на основе фазовой кросс-модуляции в оптических волокнах (ФКМ-ВК)	ПОУ-КМУ волновые конвертеры Волоконные ФКМ-ВК	ПОУ-КМУ волновые конвертеры	Перестраиваемые мультисекционные лазеры с технологией быстрого возбуждения
Метки с оптическими поднесущими	НОПЗ+ приемники в режиме выбросов	Оптические отводы + монолитно-интегрированные конвертеры размера пятна + приемники в режиме выбросов	ПОУ-КМУ волновые конвертеры		
Быстрые пакеты	Низковольтные электроабсорбционные модуляторы бегущей волны				

Разработки техники и технологий проектирования базовых элементов оптических сетей связи с фотонной коммутацией

При изготовлении элементов и узлов волоконно-оптических систем и сетей связи, как правило, возникает определенное несоответствие между проектом и изделием: прямые и обратные потери превышают расчетные, спектральные характеристики спектрально-селективных элементов существенно отличаются от расчетных в худшую сторону. Это, в частности, объясняется расчетами характеристик элементов по упрощенным методикам с использованием аналитических методов расчета. Поэтому необходимо применение современных методов и алгоритмов проектирования, свободных от указанных недостатков.

Для выработки технических требований к компонентной базе, изготовления и испытаний опытных образцов в составе систем связи и сетей следует широко использовать новые эффективные системы автоматизированного проектирования, позволяющие проектировать основные компоненты (выполнять как анализ, так и синтез) без ограничений, присущих применяемым до сих пор методам проектирования.

Новые перспективные оптические технологии, которые должны быть использованы для разработок новых поколений оптических сетей связи с фотонными коммутаторами

Следует использовать новые оптические технологии, связанные с фотонной коммутацией и полностью оптическими сетями связи:

- оптическую коммутацию;
- улучшенные схемы спектрального мультиплексирования/демультиплексирования, в частности, на основе брэгговских и голографических решеток;
- настраиваемые оптические фильтры;
- лазеры со стабильным по длине волны излучением (стабилизированные схемы лазеров);
- новые методы модуляции (варианты RZ, NRZ, CSRZ — carrier suppressed RZ, DPSK, ASK-DPSK);
- улучшенные оптические усилители с плоской спектральной характеристикой и уменьшенной стоимостью;
- новые крупные оптические кросс-коммутаторы;
- оптические мультиплексоры ввода/вывода;
- волновые конвертеры на основе полупроводниковых оптических усилителей и нелинейных оптических петлевых зеркал;
- технику сигнализации в оптической области.

Следует рассматривать системы и средства передачи информации по каналам связи в составе оптических сетей, в том числе двунаправленные системы.

Таким образом, разработки новых поколений оптоволоконных сетей связи должны быть выполнены на основе теоретических и экспериментальных исследований, компьютерного моделирования, использования современных систем автоматизированного проектирования (САПР, САД) фотонных коммутаторов и их элементов, а также сетей связи с фотонными коммутаторами и с современными перспективными компонентами сетей: оптическими усилителями различных типов (полупроводниковыми, эрбиевыми, рамановскими, параметрическими), технологиями WDM и их разновидностями, волновыми конверторами, оптическими маршрутизаторами, спектральными фильтрами, устройствами вставки/выделения спектральных каналов.

Литература

1. Маккавеев В. И., Светиков Ю. В. Оптические методы обработки сигналов — основа волоконно-оптических систем будущего // Электросвязь. 1992. № 5.
2. Optical Fiber Communication Conference. OFC. 1996–2005.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир. 1996.
4. Jinno M. Et al. Nonlinear Sagnac Interferometer Switch and Its Applications // IEEE Journal of Quantum Electronics 1992. Vol. 28, N 4.
5. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера. 2003.
6. Internet: 2001–2006.
7. Гольдштейн А. Б., Гольдштейн Б. С. Технология и протоколы MPLS. СПб. 2005.
8. Скляров О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи. М. 2001.