

УДК 621.396.2

СТРУКТУРА И ИНТЕРФЕЙСЫ ФОТОННОЙ СЕТИ

В. Н. Гордиенко, декан факультета МТУСИ, д. т. н., профессор; mes@mtuci.ru

М. С. Тверецкий, профессор МТУСИ, к. т. н.

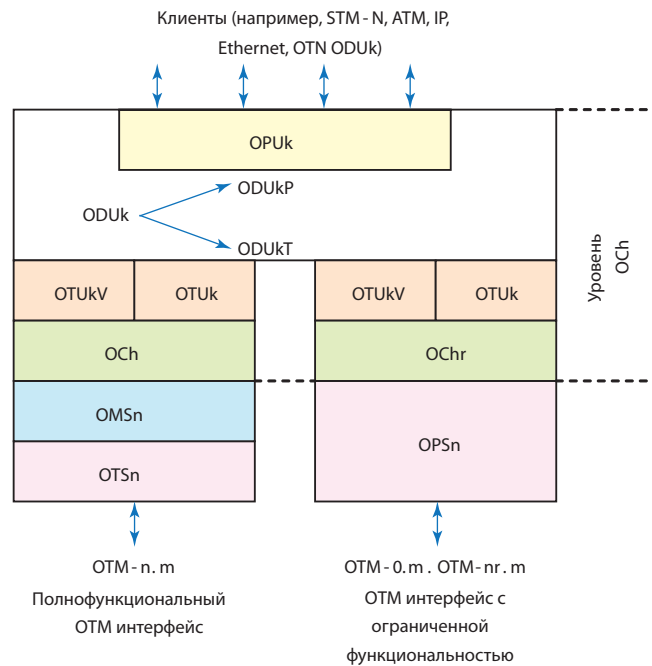
Ключевые слова: оптическая транспортная сеть, фотонная сеть, домены фотонной сети, оптические интерфейсы, транспортные модули.

Сегодня во всем мире наблюдается переход к оптической транспортной сети (Optical Transport Network, OTN), которая должна стать базовой для реализации глобальной информационной инфраструктуры. Согласно концепции OTN, на физическом уровне во всех звеньях тракта передачи исключаются оптоэлектронные и электронно-оптические преобразования сигнала. Полностью оптическое преобразование сигнала. Полностью оптическую (фотонную) транспортную сеть предполагается строить путем создания в существующих оптических сетях, базирующихся преимущественно на технологии синхронной цифровой иерархии (СЦИ), островков — доменов фотонной сети. Увеличиваясь по мере развития, домены будут примыкать друг к другу, вытесняя СЦИ как слой между OTN и сетями доступа (ATM, IP, Ethernet и др.). Внедряемая в оборудование СЦИ технология NGN обеспечит интерфейсы для сетей доступа, а создаваемые открытые оптические интерфейсы позволят этим сетям подключаться непосредственно к фотонной сети.

Успешной фотонизации телекоммуникационных сетей способствует создание и совершенствование таких элементов фотонной технологии, как оптические коммутаторы и переключатели с управлением оптическим сигналом, оптические регенераторы и системы спектрального уплотнения и маршрутизации оптических сигналов по длине волны [1]. Появление промышленных образцов оптических усилителей, увеличивающих протяженность полностью оптических секций до нескольких сотен километров, и систем с плотным волновым уплотнением (DWDM) [2, 3], реализующих принцип пассивной маршрутизации потоков, уже сегодня позволяет реализовывать фотонные участки транспортной сети. По мере совершенствования оптических коммутаторов, а следовательно, реализации оптической аппаратуры оперативного переключения (АОП) будет создаваться гибкая и эффективная фотонная транспортная сеть. Применение АОП позволит трансформировать традиционные кольцевые структуры в ячеистые, обеспечивая большую гибкость сетевого управления, защиты и восстановления сети при повреждениях.

Структура фотонной сети. Пользовательская нагрузка поступает на уровень оптического канала OCh (Optical Channel) (см. рисунок), где происходит формирование информационных структур оптической транспортной иерархии — оптических транспортных модулей OTM (Optical Transport Module). Интерфейсы фотонной сети подразделяются на полнофункциональные и с ограниченной функциональностью. Первые рекомендуются использовать для соединения доменов фотонной сети, вторые — для внутри-доменной маршрутизации.

Ниже уровня OCh в интерфейсе с ограниченной функциональностью располагается уровень физической секции OPS (Optical Physical Section), на котором происходит мультиплексирование оптических каналов по принципу волно-



вого разделения и осуществляется сопряжение оборудования со средой распространения сигналов — оптическими одномодовыми волокнами. В полнофункциональном интерфейсе этот уровень разделен на подуровни OMS (Optical Multiplex Section — оптическая секция мультиплексирования) и OTS (Optical Transmission Section — оптическая секция передачи). Такое разделение обусловлено тем, что в полнофункциональном интерфейсе предусмотрен отдельный оптический канал для служебной информации, передаваемой отдельными блоками, соотношенными с функциями оптических каналов, мультиплексных и оптических секций.

Преобразование информации. В оптическом канале информация пользователя преобразуется. Вначале она упаковывается в блоки нагрузки оптических каналов OPUk (Optical Channel Payload Unit) порядка k , соответствующие той или иной скорости передачи информации. Информация может вводиться синхронно или асинхронно, с двусторонним побитным согласованием скоростей. Затем блоки OPUk преобразуются в блоки данных оптического канала ODUk (Optical Channel Data Unit) путем присоединения к первому заголовку, содержащему сервисную информацию для поддержки оптического канала. Эта информация различна для каналов типа точка-точка (ODUkP) и каналов, поддерживающих транзитные соединения (ODUkT).

Далее информация, присоединив к себе соответствующий заголовок, преобразуется в транспортные блоки оптического канала OTUk, являющиеся основными транспортными структурами, передаваемыми по фотонной сети. Транспортные блоки представлены двумя версиями — полностью стандартизированной (OTUk) и частично стандартизированной (OTUkV). Последняя на данный момент яв-

ляется основной. Таким образом, нагрузочные блоки OPUk сначала преобразуются в соответствующие блоки данных ODUk, а затем в оптические транспортные блоки OTUk. Блоки данных нижних уровней посредством мультиплексирования с коэффициентами 4 или 16 могут объединяться в блоки более высокого уровня.

В интерфейсах с ограниченной функциональностью блоки OTUk тождественны блокам оптического канала OCh, а в полнофункциональных сопровождаются блоками отдельного оптического сервисного канала OSC (Optical Supervisory Channel). Блоки OCh могут передаваться по оптическим волокнам как с мультиплексированием по длинам волн (модули OTM-*n.m*, OTM-*nr.m*), так и без него (OTM-0.*m*). В последнем случае, а также при использовании модулей OTM-*nr.m* сервисный канал не организуется.

Оптические каналы OCh посредством индивидуальных оптических несущих OCC (Optical Channel Carrier) образуют группы несущих оптических каналов OCG-*n.m* (Optical Carrier Group), где *n* — число оптических несущих в группе, а *m* — порядковый номер входящих в нее блоков данных. Например, группу OCG-8.123 образуют 8 несущих и блоки данных 1-го, 2-го и 3-го порядков.

Разработка оборудования фотонной сети пока далека от завершения. Не решены вопросы полной регенерации оптических сигналов (3R) без преобразования их в электрическую форму, не найдены оптические методы обработки заголовков транспортных структур и, конечно, формирования самих структур оптическими методами. Однако требования к оптическим стыкам, в том числе к полнофункциональным (междоменным) интерфейсам, сформулированы довольно полно [4—6 и др.], что позволяет производителям создавать оборудование, обладающее поперечной совместимостью.

Междоменный интерфейс IrDI (Inter-Domain Interface) может быть реализован как одноканальный, так и многоканальный. Многоканальные IrDI включают оборудование для мультиплексирования и демultipлексирования по длине волны, и, как правило, оптические усилители. Пропускная способность линий при этом оказывается существенно выше, чем при использовании одноканальных IrDI. Многоканальные интерфейсы могут содержать до 16 оптических каналов с центральными частотами, соответствующими стандартной сетке частот [2]. Интерфейсы разделяются по скоростям передачи и относятся к определенным классам (табл. 1).

Интерфейсы определяются для следующих эталонных точек:

- **MPI-S** — эталонная точка непосредственно после выходных оптических разъемов интерфейса каждого оптического сетевого элемента;

- **MPI-R** — эталонная точка в оптическом волокне непосредственно перед входным оптическим разъемом интерфейса каждого оптического сетевого элемента.

Эталонные точки многоканальных интерфейсов отмечаются индексом М.

Таблица 1

Класс	NRZ 2,5 G	NRZ 10 G	NRZ 40 G	RZ 40 G
Скорость передачи, Гбит/с:				
от	0,622	2,4	9,9	9,9
до	2,67	10,7	43,02	43,02
Стандартные трибутарные сигналы	STM-16, OTU1	STM-64, OTU2	STM-256, OTU3	STM-256, OTU3
Код оптического сигнала	NRZ	NRZ	NRZ	RZ 33; 50 или 67 %

Прикладные коды идентифицируют сеть, реализацию и архитектурные характеристики приложения, например $PnWx-xyz$, где

- *P* — множественный прикладной код, относящийся к IrDI. Множественные коды применимы к любому оптическому трибутарному сигналу внутри определенного класса;

- *n* — максимальное число каналов, поддерживаемых прикладным кодом;

- *W* — длина интервала (коэффициент ослабления), в частности: *I* — внутриофисное приложение (*W* на участке до 7 дБ); *S* — малое расстояние (*W* на участке до 11 дБ); *L* — большое расстояние (*W* на участке до 22 дБ); *V* — очень большое расстояние (*W* на участке до 33 дБ);

- *x* — максимальное число участков, поддерживаемое прикладным кодом;

- *y* — наивысший класс поддерживаемого оптического трибутарного сигнала: 1 — NRZ 2,5 G; 2 — NRZ 10 G; 3 — NRZ 40 G; 7 — RZ 40 G.

- *t* — предположение об уровне мощности для прикладного кода, например: *A* — уровни мощности, подходящие для усилителя на передаче (бустерного), а также пригодные для входного усилителя приемника; *B* — уровни мощности, подходящие только для бустерного усилителя; *C* — уровни мощности, подходящие только для входного усилителя приемника; *D* — уровни мощности, подходящие для работы без использования усилителей;

- *z* — тип источника и волокна: 1 — источники для диапазона 1310 нм и волокно, соответствующее Рек. G.652 МСЭ-Т; 2 — источники для диапазона 1550 нм и волокно, соответствующее Рек. G.652; 3 — источники для диапазона 1550 нм и волокно, соответствующее Рек. G.653; 5 — источники для диапазона 1550 нм и волокно, соответствующее Рек. G.655.

В настоящее время определены физические параметры для IrDI только с одним участком, т. е. без промежуточных усилителей ($x = 1$). При двунаправленной системе передачи это будет обозначаться символом *B* перед прикладным кодом ($BnWx-xyz$).

В некоторых прикладных кодах в конце добавляется суффикс. Суффикс *F* означает, что приложению для передачи требуются байты FEC; *D* — приложение включает адаптивную компенсацию дисперсии; *r* — уменьшенное целевое расстояние из-за ограничения по дисперсии; *a* — код имеет уровни мощности передатчика, соответствующие приемникам с лавинными фотодиодами ЛФД, а *b* — соответствующие приемникам с *p-i-n*-фотодиодами.

Примеры прикладных кодов приведены в табл. 2.

В качестве примера в табл. 3 приведена классификация многоканальных кодов для некоторых стандартизированных к настоящему времени приложений.

Определение некоторых параметров стандартизированных оптических интерфейсов фотонной сети. Максимальный коэффициент битовых ошибок (BER) относится к каждому оптическому каналу при наибольшем ослаблении на опти-

Таблица 2

Пример прикладного кода	Множественный код	Максимальное число каналов	Максимальный коэффициент ослабления на участке, дБ	Максимальное число участков	Наивысший класс оптического трибутарного сигнала	Уровни мощности, подходящие для типа ONE	Тип волокна
P1 I1—1D1	Да	1	6	1	NRZ 2,5G	Без усилителей	G.652
P16 S1—2C5	Да	16	11	1	NRZ10G	Только с усилителем приема	G.655
16 S1—2B5	Нет	16	11	1	NRZ10G (OTU2)	Только бустер	G.655

Таблица 3

Приложение	Внутриофисное (I)			Для небольших расстояний (S)		
Диапазон длин волн, нм	1550			1550		
Тип волокна, Рек. МСЭ-Т	G.652	G.653	G.655	G.652	G.653	G.655
Целевое расстояние, км	20	2	20	40	40	40
Класс сигнала NRZ 2,5 G	—	—	—	P16 S1—1D2	—	P16 S1—1D5
Класс сигнала NRZ 10 G	P16I1—2D2	P16I1—2D3	P16I1—2D5	P16S1—2B2 P16S1—2C2	P16S1—2C3	P16S1—2B5 P16S1—2 C5

ческом пути в заданных условиях дисперсии. В случае прикладных кодов, требующих передачу байтов FEC (т.е. кодов с суффиксом *F*), BER должен вычисляться только после коррекции ошибок (если она используется). Для всех других прикладных кодов BER вычисляется без использования FEC.

Центральная частота выбирается по сетке частот, приведенной в Рекомендации МСЭ-Т G.694.1. Допустимые центральные частоты для многоканального IrDI определены в табл. 14.9 Рек. G.694.1. При пересчете частоты и длины волны используется значение скорости света: $c = 2,99792458 \times 10^8$ м/с.

Максимальное отклонение центральной частоты — разность между номинальной и фактической центральной частотой. В отклонение центральной частоты включены все процессы, влияющие на мгновенное значение центральной частоты источника. Это скачки частоты излучения источника (chirp), пропускная способность канала, изменение частоты в результате самомодуляции, влияние температуры и старения.

Межканальный интервал определяется как номинальная разность частот между двумя соседними каналами.

Максимальная ширина спектра на уровне -20 дБ SLM-лазера определяется максимальной полной шириной центрального пика длины волны, измеряемой на уровне -20 дБ от максимальной амплитуды центральной длины волны при стандартных условиях работы.

Максимальная (оптическая) спектральная плотность мощности определяется как максимальный усредненный во времени уровень мощности в интервале 10 МГц в любой части модулированного спектра оптического сигнала. Этот параметр обычно используется для подавления режима бриллюэновского рассеяния для мощных источников с потенциально узкой собственной шириной спектра излучения, например для систем типа лазер-усилитель-модулятор.

Минимальный коэффициент экстинкции (коэффициент гашения) в канале определяется как $EX = 10 \lg (A/B)$, где *A* — средний уровень оптической мощности в центре ло-

гической «1» (эмиссия света); *B* — средний уровень оптической мощности в центре логического «0» (отсутствие света).

Максимальный коэффициент ослабления на оптическом пути, обеспечивающий заданное значение BER при наихудшем сигнале на передающей стороне и максимальной дисперсии. Целевые расстояния для IrDI получены при коэффициенте потерь в волокне 0,275 дБ/км (с учетом сростков и разъемов) в диапазоне 1530—1565 нм и при коэффициенте потерь 0,55 дБ/км на длине волны 1310 нм. Для практического применения определены коэффициенты ослабления, равные: 11 дБ на участке 40 км и 22 дБ на участке 80 км при длине волны 1550 нм; 11 дБ на участке 20 км и 22 дБ на участке 40 км при длине волны 1310 нм.

Максимальная хроматическая дисперсия установлена равной произведению целевого расстояния на 20 пс/нм км для волокна, отвечающего Рек. G.652 МСЭ-Т, и на 3,3 пс/нм км для волокна, отвечающего Рек. G.653 МСЭ-Т, в диапазоне 1550 нм, а также для волокна, отвечающего Рек. G.653 МСЭ-Т, в диапазоне 1310 нм, что рассматривается как максимальное значение дисперсии для соответствующих типов волокон. При этом обеспечивается некоторый запас чувствительности приемника, благодаря чему можно увеличить протяженность передачи для волокон с малыми потерями.

Максимальный дискретный коэффициент отражения определяется как отношение отраженной оптической мощности в точке к оптической мощности падающего света в этой точке. Для снижения влияния множественных отражений (например, интерференционных шумов) максимальное значение дискретного коэффициента отражения между эталонными точками источника и эталонными точками приемника принято равным -27 дБ, что гарантирует приемлемые потери из-за множественных отражений для всех вероятных конфигураций систем, включая несколько соединителей, и т. д.

Минимальная эквивалентная чувствительность на входе оптического приемника — это мощность, которая потребовалась бы для помещенного в эту точку приемника многоканального интерфейса для достижения заданного

максимума BER прикладного кода при удалении всех каналов, кроме одного (с идеальным фильтром, не имеющим потерь). При этом учитываются потери мощности, вызванные использованием передатчика при стандартных условиях работы с наихудшими значениями коэффициента гашения, времени нарастания и спада импульса, а также оптических возвратных потерь в точке передачи, деградации разъемов, перекрестных помех со стороны передатчика, оптического шума усилителя и погрешностей измерения. Минимальная эквивалентная чувствительность не учитывает потери мощности, связанные с дисперсией, флуктуацией, нелинейностью или отражениями на оптическом пути. При этом минимальная средняя мощность на передаче должна превышать минимальную эквивалентную чувствительность на величину оптических потерь в пути.

Для реализации фотонной транспортной системы, выполняющей функции оперативного переключения и мультиплексирования ввода-вывода, предлагается много технологий. В первую очередь это способы маршрутизации по длине волны, многократного использования длин волн, пакетного переключения с многократными пересылками сигнала. За счет полностью оптической обработки сигнала скорость его передачи можно довести до 10 Тбит/с. Таким образом могут быть созданы гибкие сети, способные модульно увеличивать свою мощность до очень больших значений. Это позволит существенно повысить не только про-

пускную способность сети, но и технико-экономические показатели, а также надежность оборудования телекоммуникационных систем. Кроме того, фотонные сети располагают каналами передачи данных практически неограниченной емкости для организации контроля, управления и технического обслуживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фокин В.Г.** Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие для вузов. — М.: Эко-Трендз, 2008. — 288 с.
2. **Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С.** Многоканальные телекоммуникационные системы: Учебник для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2005. — 416 с.
3. **Алексеев Е.Б., Гордиенко В.Н., Крухмалев В.В. и др.** Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей: Учебное пособие для вузов/Под ред. В.Н. Гордиенко и М.С. Тверецкого. — М.: Горячая линия-Телеком, 2008. — 392 с.
4. Рекомендация МСЭ-Т G.692. **Оптические стыки для многоканальных систем с оптическими усилителями.**
5. Рекомендация МСЭ-Т G.709/Y.1331. **Интерфейсы оптической транспортной сети (OTN).**
6. Рекомендация МСЭ-Т G.959.1. **Стыки физического уровня оптической транспортной сети.**

Получено 15.11.10