

УДК 621.382: 621.395

ФОТОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Я.В. АЛИШЕВ, В.Н. УРЯДОВ, Н.М. ЧЕРЕДНИЧЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 9 января 2003

Осуществлен обзор путей развития полностью оптических (фотонных) систем и сетей телекоммуникаций и их основных компонентов. Приведены технико-экономические показатели создания их и элементы имитационного моделирования проектируемых фотонных систем и сетей связи.

Ключевые слова: лазер, волновое мультиплексирование, оптические усилители.

Введение

Производительность электронных микросхем в соответствии с законом Мура удваивается (без изменения их цены) каждые 18 мес, а по закону Боско производительность оптических систем удваивается в 2 раза быстрее, т.е. каждые 9 мес [1]. Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) при использовании одночастотных квантово-размерных лазеров и одномодовых волокон с нулевой дисперсией (на длине волны $\approx 1,3$ мкм) и смещенной дисперсией (1,55 мкм) позволяют применять оптический линейный тракт синхронной цифровой иерархии STM-64 со скоростью передачи ≈ 10 Гбит/с, что эквивалентно длине тактового интервала ≈ 10 пс. Такая скорость является предельной для технологии в области полупроводниковой микроэлектроники, т.е. пределом возможности увеличения пропускной способности ВОСП способом временного разделения каналов (ВРК).

Преимущества ВОСП перед системами на коаксиальном кабеле известны более 20 лет, и все эти годы они стоили на 20–40 % дороже [2]. Появившиеся стандартные узкополосные оптические фильтры и оптические усилители резко снизили их цену. Если раньше было необходимо копать траншеи и прокладывать в них дополнительные кабели, то теперь достаточно установить новое мультиплексирующее оборудование с волновым разделением каналов с терабитовой пропускной способностью. Смонтированная проводка на ВОК не дороже, чем на медных кабелях 6-й и 7-й категории. Оптические сети удается монтировать теперь быстро и без существенных затрат. Они надежны и просты в эксплуатации, полностью защищены от электромагнитных помех и несанкционированного доступа. ВОСП не только альтернатива медным проводам, но и единственно возможный способ построения быстрой и надежной сети с высокой пропускной способностью.

Теоретический анализ

Есть два пути резкого увеличения пропускной способности.

1. Добавлять новые и все более мощные каналы связи на базе плотного волнового (спектрального) разделения сигналов.
2. Переход на полностью оптические системы и сети (фотонные).

Вместо оптоэлектронных регенераторов используются оптические усилители и «интеллектуальные» оптические коммутаторы (коммутаторы длин волн на базе очень быстрых заказных микросхем и специального программного обеспечения; они определяют топологию сети, обнаруживают отказы и автоматически направляют трафик в обход последних — "интеллектуальных").

Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM) — сравнительно новая технология оптического (волнового или спектрального) разделения каналов. Принято выделять три типа WDM-мультиплексоров: обычные (WDM), плотные (DWDM), высокоплотные (HDWDM). Хотя точные границы между этими классами пока четко не определены, вслед за специалистами компаний Alcatel и EC1 можно предложить вариант классификации, основанный на исторической практике разработки WDM-систем и указанном выше стандарте G. 692 с его канальным планом [3]. Большинство одномодовых ВС не подходят для плотного волнового мультиплексирования, но фирма Corning выпустила в 1998 г. одномодовый кабель LEAF, который обеспечивает передачу сигналов (без регенерации) на огромные расстояния.

Известно, что при нулевой дисперсии в волоконных световодах (ВС) ярко проявляются нелинейные эффекты — четырехволновое смешивание, резко ограничивающее длину регенерационного участка. Суть этого эффекта заключается в том, что при введении в ВС оптического излучения на двух длинах волн λ_1 и λ_2 регистрируется на выходе оптическое излучение на четырех длинах волн [4]:

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = 1/(2/\lambda_1 - 1/\lambda_2) \text{ и } \lambda_4 = 1/(2/\lambda_2 - 1/\lambda_1); \lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4. \quad (1)$$

Четырехволновое смешивание имеет место для любой пары одновременно передаваемых длин волн. Из-за этого энергия излучения перекачивается на паразитные "боковые" волны, увеличивается затухание сигнала, а интерференция полезного сигнала с паразитным излучением при равностоящих исходных длинах волн ведет к увеличению вероятности ошибки. Описываемый эффект наиболее существенно сказывается при нулевой дисперсии. Учитывая это обстоятельство, известные производители волоконных световодов фирмы Corning и Lucent Technologies (США) предложили оптические волокна с ненулевой дисперсией, отвечающие требованиям Рекомендации G.655 МСЭ-Т.

Коэффициент дисперсии этих волокон в диапазоне длин волн 1530–1565 нм больше 1, но меньше 6 пс/(нм·км). Преимущество ВС G.655 особенно существенно при использовании плотного волнового мультиплексирования (DWDM), так как число паразитных волн за счет четырехволнового смешивания резко возрастает при увеличении числа каналов N.

Одним из ключевых элементов фотонных систем и сетей являются полупроводниковые лазеры (ППЛ), к которым специфика DWDM предъявляет следующие требования [5]:

длина волны излучения оптического сигнала должна соответствовать частотному плану МСЭ-Т G.692; ширина спектра излучения — менее 1 ГГц; точность и стабильность установки длины волны не хуже 10^{-6} .

В настоящее время наиболее широко используются РОС-лазеры (лазеры с распределенной обратной связью), ППЛ с распределенной брегговской решеткой (БР) и лазеры на вертикальных резонаторах (VCSEL — Vertical cavity surface emitting laser).

Разработаны и серийно выпускаются лазеры с параметрами, удовлетворяющими требованиям с шагом $\Delta\nu=100$ ГГц и даже $\Delta\nu=50$ ГГц. Дальнейшее развитие лазеров для HDWDM предполагает обеспечение шага $\Delta\nu=25$ ГГц.

Преимущество короткого высокодобротного резонатора в VCSEL состоит в одночастотном режиме генерации и высокой технологичности: на одном чипе можно разместить матрицу лазеров, каждый из которых излучает заданную длину волны согласно сетке частот.

Для коммутации оптических информационных потоков и управления топологией сети в DWDM-системах необходимо использовать перестраиваемые лазеры. В качестве таких лазеров используется ППЛ с внешним резонатором на основе дифракционной решетки (ДР). Перестройка лазера происходит при повороте ДР, а время перестройки с канала на канал — порядка наносекунды [5].

Другим, наиболее важным компонентом фотонных систем и сетей являются оптические усилители. Существует несколько типов оптических усилителей: с резонатором Фабри–Перо, ис-

пользующие бриллюэновское или рамановское рассеяние; легированные эрбием и полупроводниковые. Типы и области их применения приведены в таблице.

Таблица. Типы и области применения оптических усилителей

Типы усилителей	Область применения
1. Усилитель с резонатором Фабри–Перо	Усиление одного канала (одной длины волны)
2. Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние	Усиление одного канала
3. Усилители, использующие рамановское рассеяние	Усиление нескольких каналов одновременно
4. Полупроводниковые лазерные усилители	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно
5. Усилители на примесном волокне	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно

Усилители Фабри–Перо оснащены плоским резонатором с зеркальными полупрозрачными стенками. Они обеспечивают высокий коэффициент усиления (до 25 дБ) в очень узком (1,5 ГГц), но широко перестраиваемом (800 ГГц) спектральном диапазоне. Кроме этого, такие усилители не чувствительны к поляризации оптического сигнала и характеризуются сильным подавлением боковых составляющих (ослабление на 20 дБ за пределами интервала в 5 ГГц). В силу своих характеристик усилители Фабри–Перо идеально подходят для работы в качестве демультимплексоров, поскольку они всегда могут быть перестроены для усиления только одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM.

Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние, благодаря нелинейному эффекту, возникающему в кремниевом волокне, обеспечивают переход энергии оптической волны на частоте f_1 в энергию новой волны на смещенной частоте f_2 . При мощной накачке на частоте f_1 стимулированное бриллюэновское рассеяние способно усиливать входной слабый сигнал на частоте f_2 . Выходной сигнал сосредоточен в узком диапазоне, что позволяет выбирать канал с погрешностью 1,5 ГГц.

Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние, используют тот же нелинейный эффект, что и использующие бриллюэновское рассеяние, однако в данном случае частотный сдвиг между сигнальной волной и волной накачки ($|f_2 - f_1|$) больше, а выходной спектральный диапазон усиления шире, что допускает усиление сразу нескольких каналов в WDM сигнале. Большие переходные помехи между усиливаемыми каналами представляют основную проблему при разработке таких усилителей.

Усилители на волокне, легированном эрбием EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), за последние несколько лет произвели революцию в телекоммуникационной промышленности. Они обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно, обладают низким уровнем шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна. Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линий связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными.

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки. В простейших конструкциях EDFA усиление происходит в достаточно узком диапазоне длин волн — примерно от 1525 до 1565 нм. В эти 40 нм уместается несколько десятков каналов DWDM.

Обычные электронные повторители, чтобы восстановить уровень сигнала на протяженной линии связи, считывают сигнал с волокна, преобразуют его в электрические импульсы, усиливают их, преобразуют усиленный сигнал снова в оптическую форму и передают дальше по линии связи. В отличие от них, усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию — коммутаторам ATM или компонентам протокола IP, не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость — одно из основных преимуществ использования их в системах DWDM. Наряду с этим при использовании усилителей EDFA требуется определенная мощность накачки ППЛ. В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки.

Для такой накачки подходят лазеры с длинами волн излучения 980 и 1480 нм. Излучение обеих длин волн соответствует уровням энергии возбужденных ионов и хорошо поглощается волокном, легированным эрбием. Однако при выборе того или иного типа лазеров накачки приходится идти на компромисс. С одной стороны, усилители EDFA с лазерами 980 нм обладают более низким коэффициентом шума, чем усилители с лазерами 1480 нм, что лучше для многоканальных систем и предусилителей систем DWDM. С другой стороны, использование лазеров 1480 нм позволяет создать более мощные усилители за меньшую цену. Выбор осложняется тем, что тип лазеров накачки необходимо определить в самом начале проектирования сети, когда еще неизвестно окончательное число каналов и достаточно сложно определить, что важнее — высокая мощность усилителя или низкий уровень его шума. В некоторых усилителях EDFA используется накачка на двух длинах волн, что позволяет совместить преимущества обоих способов.

В EDFA с одноступенчатой накачкой максимальная мощность выходного сигнала, достигаемая в режиме насыщения (область С, рис. 1), составляет около +16 дБм. Его коэффициент шума в области сигнала низкой мощности (область А) равен 5–6 дБ. В EDFA с двумя лазерами накачки (980 и 1480 нм) достигается более высокая мощность выходного сигнала — до +26 дБм. Чтобы снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций (что необходимо для многих предусилителей), применяют многокаскадную конструкцию: сразу за первым каскадом усиления помещается оптический изолятор, который препятствует распространению в обратном направлении усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission) второго каскада.

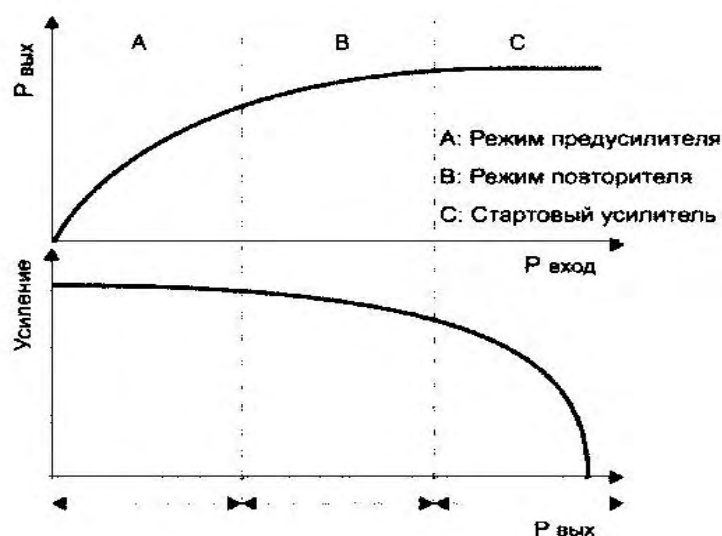


Рис. 1. Характеристика усилителей на основе EDFA

Усилители EDFA могут использоваться по-разному, в зависимости от выбранной области коэффициента усиления:

в режиме насыщения (область С) — как усилитель мощности (УМ) сразу после лазера передатчика. УМ повышает мощность сигнала и позволяет максимально увеличить мощность сигнала до первого повторителя;

в режиме промежуточных значений усиления (область В) — как повторитель. Повторитель усиливает сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума;

в режиме наименьшего шума (область А) — как предусилитель перед приемником. Предусилитель повышает мощность слабого сигнала в конце линии связи. Предусилитель практически всегда используется вместе с узкополосным фильтром.

Усилитель EDFA имеет неравномерное спектральное распределение коэффициента усиления входных сигналов (рис. 2).

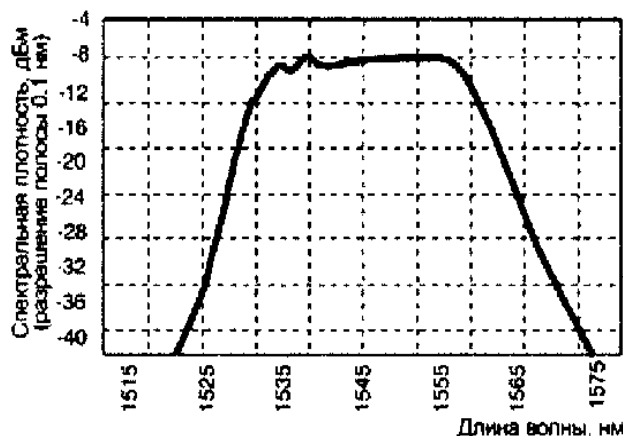


Рис. 2. Спектральное распределение коэффициента усиления входных сигналов

В спектральном распределении коэффициента усиления EDFA имеется и относительно ровная область между 1540 и 1560 нм. Эта область шириной около 20 нм и является рабочим диапазоном усилителя EDFA, в пределах которого должны лежать длины волн всех каналов систем DWDM.

В современных усилителях EDFA имеется ряд компонентов, которые увеличивают их надежность. Изоляторы подавляют обратное распространение усиленной спонтанной эмиссии и предохраняют усилитель от попадания всевозможных отраженных сигналов и излучения накачки от EDFA, расположенных далее по линии связи. Устройства компенсации дисперсии выравнивают временные задержки, возникающие при распространении сигналов различных длин волн, особенно между двумя каскадами двухкаскадного EDFA.

В настоящее время разрабатываются также полупроводниковые лазерные усилители [6]. В них излучение фотонов стимулируется рекомбинацией электронов и дырок в полупроводнике посредством прямой инжекции тока (а не внешней накачкой оптическим излучением, как в случае волокна, легированного эрбием). Такие усилители представляют значительный интерес, поскольку позволяют достичь высокой эффективности усиления и гибкости рабочей длины волны.

Реализации фотонных сетей телекоммуникаций с полным набором услуг предшествует технико-экономическое обоснование (ТЭО), которое является результатом моделирования их. Известны математические (аналитические) и имитационные модели, применяемые для получения количественных результатов. Подобные сети (например, интерактивного кабельного телевидения) имеют гораздо более сложную специфику, а числовые значения основных параметров их могут значительно отличаться от значений тех же параметров телефонных сетей общего использования, в них проявляются неожиданные события в процессе функционирования ("взрывной" характер изменения трафика, внезапные разбалансировки, скачки в скорости развития и т.п.).

В условиях неопределенности и риска наиболее предпочтительными оказались имитационные модели, т.е. человеко-машинные программы, алгоритмы которых воспроизводят процесс эволюции такой сложной системы, как интерактивное телевидение, сохраняя динамику ее функционирования с учетом стохастичности процесса, а также позволяют прогнозировать состояние системы в любой момент времени, даже при недостаточности исходной информации, неопределенных условиях функционирования сети.

Эти модели дают возможность предсказать поведение сети в заданных условиях без реализации самой сети, что экономит большие средства на этапе ее создания, позволяет оценить ТЭО и стратегическое планирование развития сети.

PHOTON SYSTEMS AND TELECOMMUNICATION NETWORKS

YA.V. ALISHEV, V.N. URYADOV, N.M. CHEREDNICHENKO

Abstract

The evolution of the Photon (full optical) systems and communication networks with their basic components are reviewed. Both economical properties of the systems development and elements of the systems and communications under design are specified.

Литература

1. *Кокарева Т.В.* // Сети и системы связи. 2000. №8. С.20–22.
2. *Заркевич Е.А., Павлов Н.М., Скляр О.К., Устинов С.А.* // Электросвязь. 2000. №6. С.12–14.
3. Рекомендация Г. 692 МСЭ-Т "Оптические интерфейсы многоканальных систем с оптическими усилителями".
4. *Крейнин Р.Б., Цым А.Ю.* // Электросвязь. 2000. №8. С.12–14.
5. *Саутенков В.А., Свинцов А.Г.* // Электросвязь. 2002. №2. С.45–46.
6. *Удовиченко В.Н., Шумаев В.В.* // Электросвязь. 1996. №3. С.15–18.