

ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ EDFA: практическое применение

Н.Варава
М.Никоноров
С.Пронин
info@optotech.ru

Оптические усилители – это неотъемлемый элемент ВОЛС различных типов. Наиболее популярный тип таких усилителей – на основе оптического волокна, легированного эрбием (EDFA). Благодаря ряду своих характеристик усилители EDFA широко используются в оптических системах передачи информации, в том числе – в системах с плотным спектральным уплотнением DWDM. Линейку таких оптических усилителей предлагает и российская научно-производственная фирма "Оптоэлектронные технологии" (группа компаний ООО "АИБИ") при ФТИ им. Иоффе.

Потребность в оптических усилителях (ОУ) для цифровых волоконно-оптических сетей возникла уже при внедрении технологии SDH (синхронная цифровая иерархия). При высоких скоростях передачи (от 2,5 Гбит/с и выше) и достаточно протяженных участках волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) приходилось часто использовать различного рода преобразователи – электрооптические (ЭОП) и оптоэлектронные (ОЭП), а также регенераторы – устройства, восстанавливающие исходную форму передаваемого сигнала после прохождения регенерационного участка. В то же время уже с 1980-х годов стало развиваться направление чисто оптической обработки сигналов. В оптических регенераторах, как правило, происходит прием оптического сигнала, его усиление, восстановление формы и передача на вход следующего регенерационного участка. Сегодня реализовать полностью оптическую схему в ВОЛС не представляется возможным, но это дело ближайшего будущего. Однако, используя ОУ, можно существенно увеличить длину регенерационного участка, уменьшить их число. Тем самым упрощается схема передачи и снижаются расходы на оборудование.

Оптические усилители успешно используются и в сетях кабельного аналогового телевидения CATV, когда один общий сигнал передается значительному числу потребителей. Для уверенного приема аналоговых сигналов CATV необходимо большее соотношение сигнал/шум на стороне получателя, чем для цифровых систем. Общий сигнал в сетях CATV должен быть весьма мощным, так как он распределяется

между сотнями и тысячами абонентов. ОУ способны решать подобные задачи. Найдут ОУ применение и в технологиях FTTH (Fiber to the Home – волокно в квартиру). Действительно, в этом случае необходимо обеспечить абонентов недорогими, а значит, не очень чувствительными приемниками. Следовательно, в сетях FTTH также необходима высокая мощность сигнала.

EDFA-УСИЛИТЕЛИ – ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Чаще всего в качестве активной среды ОУ применяются легированные отрезки оптических волокон. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки. Для легирования волокна используются редкоземельные элементы. Так, неодим (Nd) и празеодим (Pr) применяются в ОУ, работающем в диапазоне 1300 нм, для диапазона 1550 нм – эрбий (Er), в диапазоне 1470–1650 нм используется еще один редкоземельный элемент – тулий (Tm).

Наибольшее распространение получили ОУ на волокне, легированном эрбием – EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). В основном это связано с развитием технологии плотного оптического мультиплексирования (DWDM). Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств, как у EDFA, линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными. Действительно, обычные электронные регенераторы, чтобы восстановить уровень оптического сигнала, преобразуют входной оптический сигнал в электрический, с последующим



усилением и коррекцией формы, и далее преобразуют его снова в оптический сигнал. Если учесть, что в технологии DWDM используются до нескольких десятков каналов на различных длинах волн в пределах окна прозрачности, то регенератор становится наиболее сложной и дорогостоящей частью системы. В отличие от них, усилители EDFA не распознают и не преобразовывают сигнал, а просто увеличивают его мощность, сразу во всей рабочей полосе – примерно от 1525 до 1565 нм. Поэтому они, в отличие от регенераторов, практически не зависят от протокола и скорости передачи. Рабочий диапазон EDFA шириной порядка 40 нм практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого волокна (рис.1). В эти 40 нм умещается несколько десятков каналов DWDM.

Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно непосредственно подключать к различному оборудованию, не опасаясь, что они помешают друг другу. Сети с усилителями EDFA обладают рядом достоинств. Например, пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности. Применение оптических усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными устройствами происходит только в начальной и конечной точках сети.

Разумеется, применение EDFA – далеко не панацея от всех проблем. Ведь усилитель без функции регенерации повышает суммарную мощность входного сигнала, включая аддитивные шумы – в результате падает отношение сигнал/шум. Не компенсирует он и воздействие различных нелинейных эффектов, включая дисперсию различной природы (если, конечно, не усилители оснащены встроенными компенсаторами дисперсии). Поэтому, несмотря на определенную простоту использования ОУ, необходимо тщательно учитывать их параметры и некоторые особенности применения. В первую очередь, снижение отношения сигнал/шум на выходе ОУ приводит к уменьшению пороговой чувствительности оконечного приемного устройства. Причем это соотношение тем меньше, чем больше ОУ использовано при созда-

нии конкретной линии связи. Поэтому в сетях SDH на участках большой протяженности предпочтительнее использовать обычные электрооптические регенераторы с восстановлением формы транслируемых оптических сигналов. К недостаткам применения ОУ в системах DWDM необходимо отнести и неравномерность амплитудно-волновой характеристики. Ее компенсация приводит к снижению выходной мощности и, следовательно, к уменьшению длины ВОЛС. Рассмотрим основные параметры EDFA и их влияние на применение ОУ в ВОЛС.

Помимо аналогичных электронным усилителям характеристик, таких как коэффициент усиления, коэффициент шума, динамический диапазон, амплитудно-волновая характеристика, у ОУ есть свои уникальные параметры. Основные из них – это мощность насыщения, коэффициент усиления среды, усиленное спонтанное излучение (УСИ) и чувствительность к поляризации входного оптического сигнала.

Как и в электронных усилителях, коэффициент усиления ОУ зависит от уровня входного сигнала. До некоторого (малого) уровня входного сигнала усиление практически постоянно. Далее оно начинает экспоненциально падать (рис.2.) с ростом уровня входной мощности. Этот пологий участок характеристики является областью насыщения ОУ и объясняется уменьшением коэффициента размножения k , вызванным дефицитом рабочих частиц, способных генерировать вторичные фотоны с ростом входного сигнала. Эта область может быть охарактеризована мощностью насыщения $P_{\text{н}}$ на выходе усилителя по уровню -3 дБ выходной характеристики (коэффициент усиления среды падает в два раза). Необходимо здесь также отметить, что на величину усиления может влиять поляризация входного сигнала, которая в ВОЛС не контролируется, но может меняться под действием случайных изменений формы сердцевины и других причин.

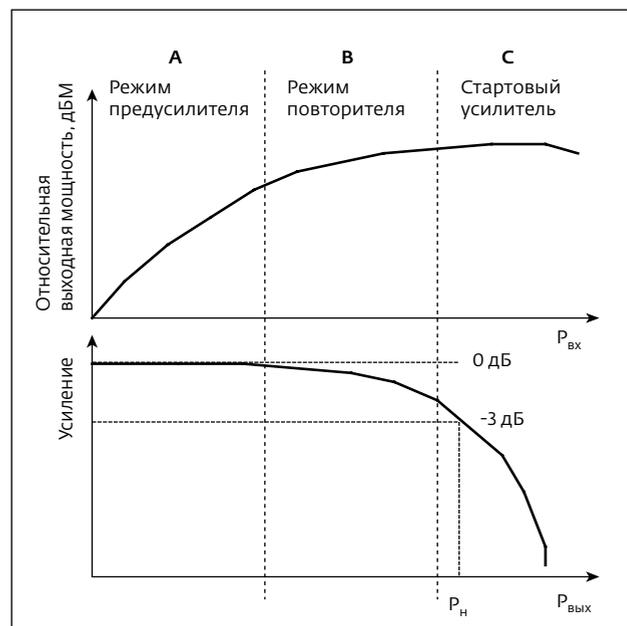


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала и различные режимы работы EDFA

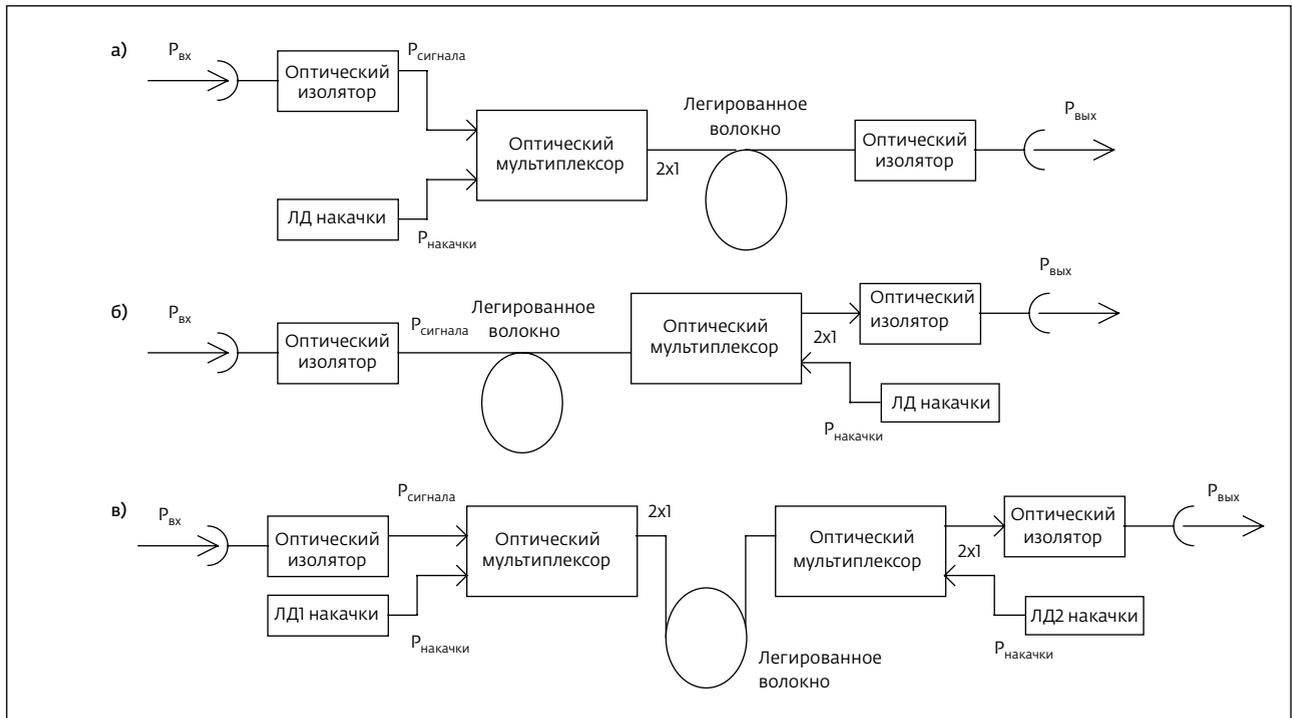


Рис.3. Типовые режимы накачки EDFA

Динамический диапазон (SNR) определяется как диапазон входной мощности оптического сигнала, при котором коэффициент усиления остается постоянным. Естественно, он связан с другим параметром – коэффициентом шума, зависящим от уровня УСИ, остаточного сигнала накачки и перекрестных помех. Наибольшее влияние на коэффициент шума оказывает УСИ. Оно возникает под воздействием случайных возмущающих факторов, например при нагреве ОУ. Такой шум не только уменьшает динамический диапазон, но и снижает максимально допустимое усиление.

Уменьшение динамического диапазона характеризуется коэффициентом шума $F = \text{SNR}_{\text{ВХ}} / \text{SNR}_{\text{ВЫХ}}$, где $\text{SNR}_{\text{ВХ}}$ и $\text{SNR}_{\text{ВЫХ}}$ – значения динамического диапазона на входе и выходе ОУ.

Усиление в ОУ вызвано тем, что под воздействием излучения лазерного диода (ЛД) в некоторой активной среде, имеющей два энергетических состояния, создается повышенная населенность уровня, у которого больше потенциальная энергия. В результате такой накачки среда становится активной, т.е. способной генерировать вторичные фотоны с коэффициентом размножения k . В некоторых ОУ для накачки используется более сложный, трехуровневый механизм взаимодействия. Схема создания перенаселенности при этом следующая: с первого уровня частицы переводятся на второй, с него они в результате релаксации переходят на третий уровень. За счет существенной разницы во временах жизни на третьем уровне создается достаточная для усиления населенность. К данному типу ОУ относятся и EDFA.

Для накачки EDFA подходят ЛД с длинами волн 980 и 1480 нм. ЛД на 980 нм используют трехуровневую модель взаимодействия с активной средой, а ЛД на 1480 нм – двухуровневую. ЛД на 980 нм позволяют получить очень низкий коэффициент шума, 3–5 дБ, что лучше для мно-

гоканальных систем и предусилителей систем DWDM. С другой стороны, ЛД на 1480 нм с коэффициентом шума 5 дБ более надежные и дешевые. В некоторых моделях усилителей EDFA используется накачка на двух длинах волн, что в какой-то степени позволяет совместить преимущества обоих способов.

Возможно несколько схем накачки ОУ EDFA на длинах волн 1480 или 980 нм (рис.3). Прямое направление накачки (рис.3а) дает наиболее низкий уровень шумов. Это предпочтительно при небольшом уровне входного сигнала и максимальном значении коэффициента усиления (область А на рис.2). При обратном направлении накачки (рис.3б) проще достичь режима насыщения. Он предпочтителен, когда на выходе требуется достичь максимальной мощности (область С на рис.2). При совместном применении двух ЛД накачки с различными длинами волн предпочтительно осуществлять накачку на 1480 нм в обратном направлении, а накачку на 980 нм – в прямом.

В EDFA с одноступенчатой накачкой максимально достижимая мощность выходного сигнала – около 16 дБм. При этом коэффициент шума в области сигнала низкой мощности (область А на рис.2.) составляет 5–6 дБ. В EDFA с двойной накачкой (980 и 1480 нм) достигнуты более высокие значения выходной мощности – до 26 дБ. Для снижения уровня шумов в такой конструкции применяют многокаскадную схему: после первого каскада усиления размещается оптический изолятор, который препятствует распространению в обратном направлении УСИ второго каскада.

Амплитудно-волновая характеристика (АВХ) EDFA с неравномерностью ± 10 дБ практически перекрывает полосу 1520–1570 нм, имеет максимум усиления (40 дБ при $P_{\text{ВХ}} = -30$ дБм) на длине волны 1535 нм и плато (усиление 30 дБ) в интервале 1540–1569 нм. Выровнять ха-

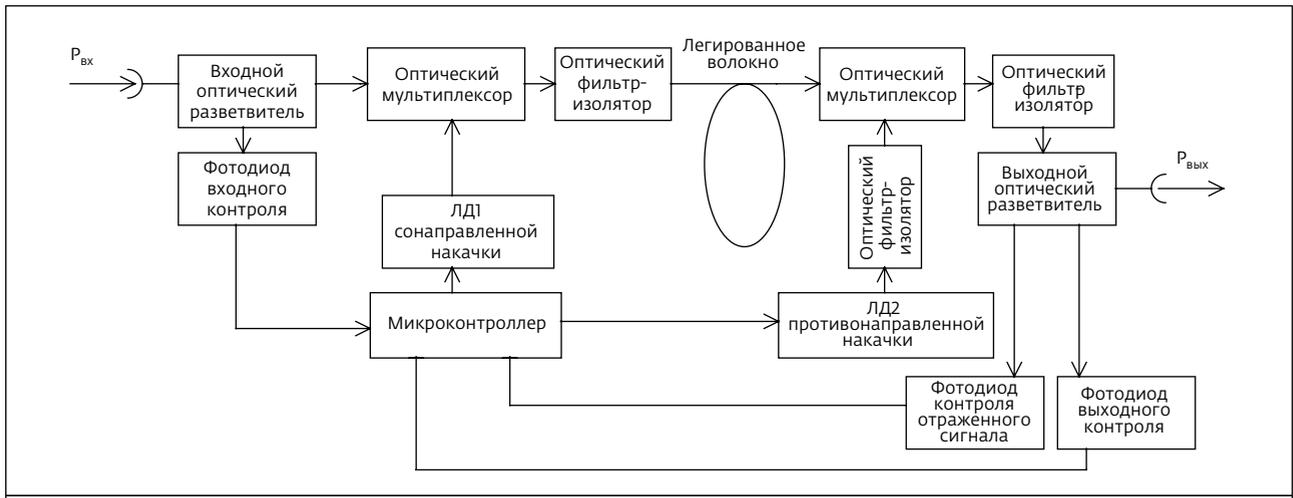


Рис.4. Функциональная схема промышленных EDFA серии OA-X-XX

рактические усилители для использования в системах DWDM можно за счет различных фильтров. В результате можно достичь неравномерности ABX 0,1-0,2 дБ. Однако при этом коэффициент усиления снижается до 16-18 дБ в ОУ с одним ЛД накачки и до 19-22 дБ – при двух ЛД. Другой путь снижения неравномерности ABX – использование в качестве активной среды волокон на фторидной основе, поскольку у них более однородное спектральное распределение коэффициента усиления, чем для кварцевых волокон. Но у таких усилителей более высокий уровень шумов.

Для выравнивания временных задержек, возникающих при распространении в ВОЛС сигналов различных длин волн, в EDFA (особенно двухкаскадных) применяют устройства компенсации дисперсии.

Усилители EDFA по функциональному назначению можно разделить на три основных класса:

- **мощные усилители** (бустеры), устанавливаемые непосредственно за передатчиком. Они работают с большим сигналом на входе, обеспечивают максимально допустимое усиление и высокий уровень сигнала на выходе и не критичны к уровню шумов;
- **линейные усилители** устанавливаются на линии связи в качестве повторителей. Они усиливают сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума;
- **предусилители**, устанавливаемые непосредственно перед приемником. Они работают с очень слабыми

сигналами (от -45 до -30 дБм) и потому чрезвычайно критичны к уровню шумов усилителя.

EDFA-УСИЛИТЕЛИ КОМПАНИИ "ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Российская научно-производственная фирма "Оптоэлектронные технологии" предлагает линейку оптических усилителей для практического применения, включающую все три основных типа: бустеры (стартовые усилители), линейные (повторители) и предусилители. Усилители выполнены с учетом самых современных требований, включая непрерывный контроль входной и выходной мощности, мощности, отраженной от выхода, температуры чувствительной части изделия (рис.4).

Вся информация обрабатывается встроенным микроконтроллером, что позволяет эффективно управлять устройствами накачки. Схема накачки состоит из двух ЛД с длиной волны 1480 нм, работающих на одно и то же волокно. Один из них действует в сонаправленном, другой – в противонаправленном режиме накачки. Чтобы устранить взаимовлияние двух ЛД, а также свести к минимуму влияние УСИ и устранить воздействие отраженных сигналов, в состав устройства введены три оптических фильтра-изолятора. Для контроля входных и выходных сигналов предусмотрены встроенные фотодиоды.

Устройство выполнено в стандартном 19-дюймовом корпусе (рис.5). Напряжение питания – 48 В постоянного тока или 100-240 В переменного, потребляемая

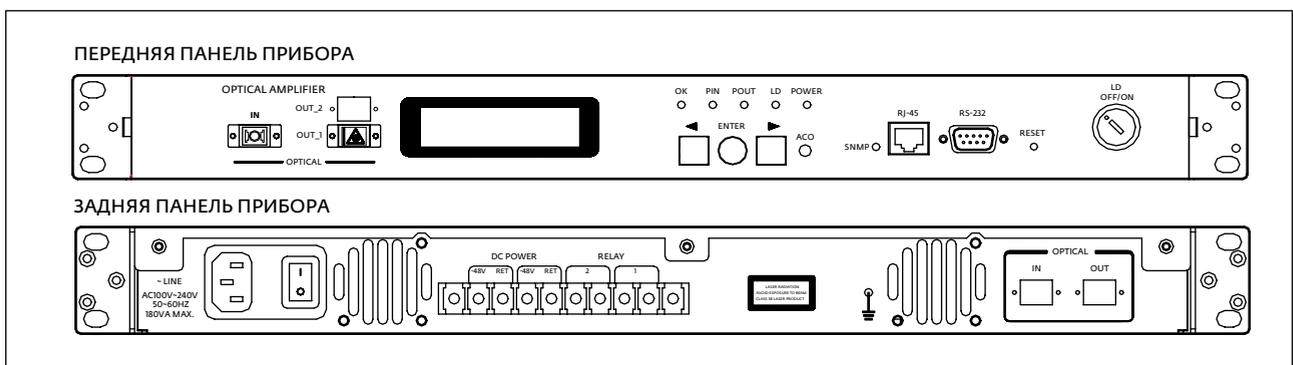


Рис.5. Передняя и задняя панели ОУ

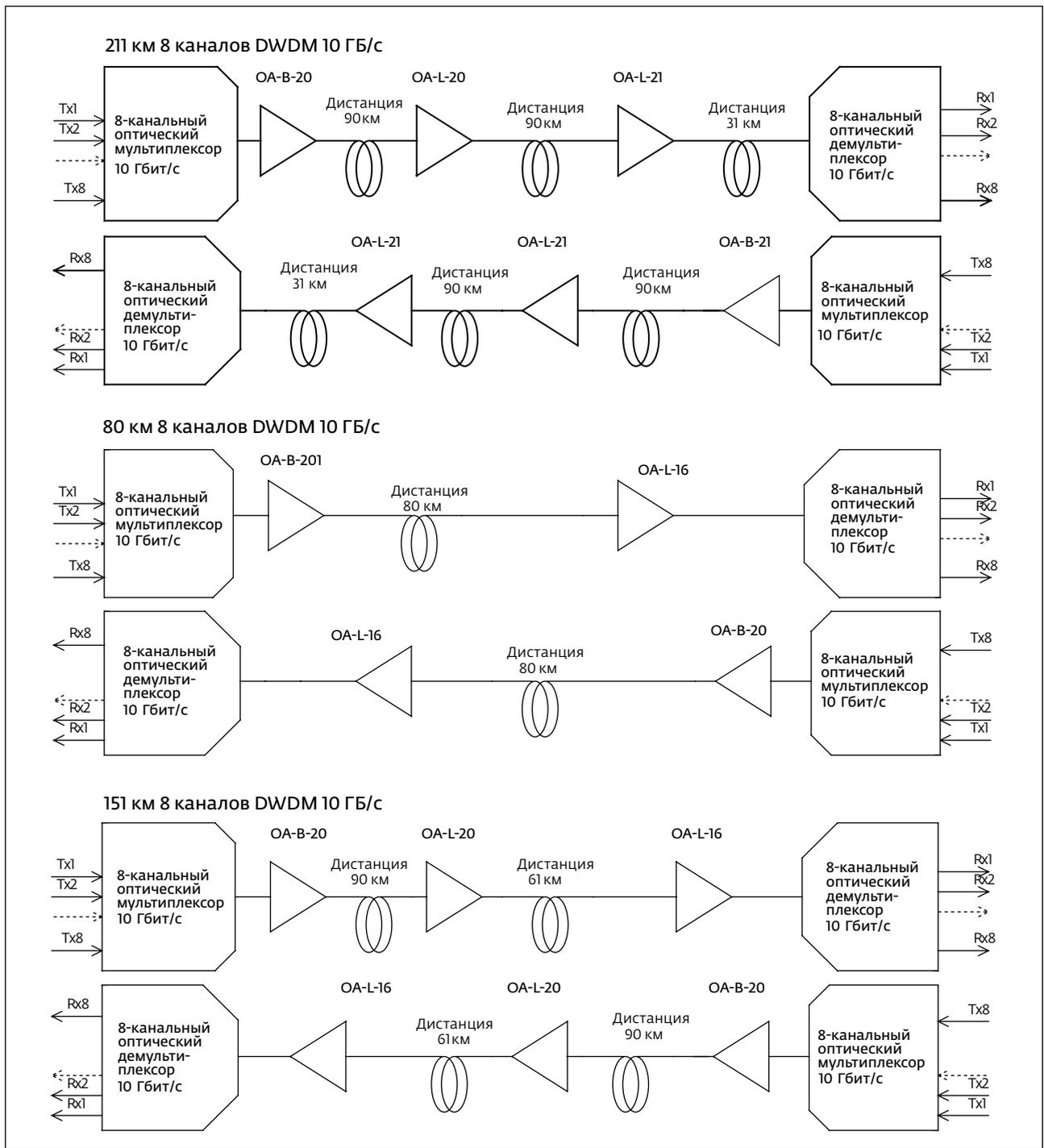


Рис.6. Схемы тестирования различных типов ОУ в конкретных условиях эксплуатации

мощность – порядка 30 Вт. Устройство предназначено для эксплуатации при температурах от 0 до 50°C при относительной влажности 20–85%. Для принудительного охлаждения предусмотрены два вентилятора. Ряд параметров ОУ отображается на ЖК-индикаторе, управляемом при помощи клавиатуры. Более подробная информация о состоянии устройства может быть получена по протоколу удаленного доступа SNMP.

Оптические усилители линейки OA-X-XX были протестированы в нескольких проектах ВОЛС различной протяженности. Три варианта конкретного ис-

пользования ОУ в системах DWDM (10 Гбит/с) представлены на рис.6. В этих проектах использовались комбинации различных типов ОУ серии OA-X-XX.

Практическое применение ОУ в системах DWDM предполагает использование и других элементов волоконной оптики, прежде всего – устройства компенсации дисперсии. Линейку DCU таких устройств также предлагает компания "Оптоэлектронные технологии". Они предназначены для компенсации дисперсии в стандартных одномодовых волокнах (стандарт G.652) или других оптических волокнах с положительной дисперсией, позволяя системам

Основные параметры ОУ EDFA

Параметры	Линейный Усилитель Оа-I-20	Бустер Оа-b-20	Предусилитель Оа-I-16
Рабочая длина волны, нм	1530–1563		
Общая входная мощность, дБм	-20...0	-10...10	-30...-10
Усиление сигнала, дБ	20...26	14...20	14...30
Общая выходная мощность, дБм	0...20	4...20	-6...16
Мощность насыщения, дБм	20	20	16
Максимальная неравномерность усиления, дБ	±0,75	±0,75	±0,75
Коэффициент шума, дБ	6,0	6,0	5,5
Максимальное поляризационно-зависимое усиление, дБ	0,3		
Максимальная дисперсия поляризационной моды, пс	0,3		
Минимальные обратные потери, дБ	45		
Тип разъема	SC/PC		

DWDM или другим магистральным оптическим системам передачи данных сохранять высокое качество сигнала на больших расстояниях. Также важным компонентом полностью оптических систем является волоконно-оптический транспондер линейки TP компании "Оптотех". Эти устройства преобразуют сигналы определенного волнового диапазона в сигналы с длинами волн, соответствующих стандартному набору мультиплексора/емультимплексора DWDM.

В заключение отметим, что конечная задача компании "Оптоэлектронные технологии" – построение полностью оптических регенераторов, действующих по следующей схеме: прием оптического сигнала → усиление + регенерация оптического сигнала (используя ОУ и оптические регенераторы) → передача оптического сигнала. Для ее решения необходимо создать полный набор компонентов, входящих в состав подобных систем. Мы считаем, что это – вопрос ближайшего будущего. ■