ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГИБРИДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ: как улучшить существующие ВОЛС

И. Сихалиев, инженер компании "Т8",
С. Лукиных, инженер компании "Т8" / lukinyh@t8.ru,
О. Наний, д.ф.-м.н., начальник отдела оптики компании "Т8",
В. Трещиков, к.ф.-м.н., генеральный директор компании "Т8",
Д. Старых, инженер компании "Т8",
В. Конышев, к.ф.-м.н., инженер компании "Т8",
Р. Убайдулаев, к.ф.-м.н., инженер компании "Т8"

УДК 681.7.068: 621.375, DOI: 10.22184/2070-8963.2018.71.2.68.72

Дано описание принципа работы и перспективных областей применения широкополосных гибридных эрбиево-рамановских усилителей (EDFA+DRA), представляющих собой комбинацию эрбиевого и распределенного рамановского усилителей. Рамановское усиление сигнала происходит в самой волоконной линии перед вводом в эрбиевый усилитель, чем достигается снижение уровня шума в приемнике и увеличение качества принимаемого сигнала. В свою очередь, уменьшение уровня шума позволяет увеличить расстояния между усилительными узлами, дальность безрегенерационной передачи, а также снизить затраты на эксплуатацию сети и повысить пропускную способность эксплуатируемых линий связи за счет использования многоуровневых форматов с высокой спектральной эффективностью.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких десятилетий наблюдается непрерывное увеличение спроса на пропускную способность и дальность передачи волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). За 40 лет емкость оптических систем связи выросла более чем в 100 тыс. раз (!). Если в начале 1970-х годов по одному волокну передавали менее 100 Мбит/с, то к настоящему времени емкость коммерческих систем может достигать десятков терабит в секунду [1–3]. Кроме того, возникает необходимость развития ВОЛС в удаленных труднодоступных районах, для

чего необходимо закладывать пролеты большой длины. Одним из вариантов повышения пропускной способности и дальности линии является использование гибридного усилителя, представляющего собой комбинацию эрбиевого и распределенного рамановского усилителя встречной накачки и предназначенного для усиления сигнала в С-диапазоне сетки DWDM.

Основное преимущество гибридного усилителя заключается в существенном уменьшении уровня шума на приемной стороне за счет распределенного рамановского усиления. Гибридный усилитель позволяет значительно

увеличить емкость действующих линий связи благодаря переходу к новым форматам передачи данных с увеличенной спектральной эффективностью, например, от DP-QPSK к DP-16QAM [4]. Более высокие требования к качеству сигнала (более высокое требуемое отношение сигнал-шум на входе приемника) не позволяют использовать высокоскоростные форматы модуляции в линиях связи с традиционными эрбиевыми усилителями. Кроме того, в существующих линиях связи с течением времени вследствие естественных причин или из-за ремонтных работ могут увеличиться потери и нарушиться работоспособность. Замена обычных эрбиевых усилителей на гибридные в таких линиях увеличит значение оптического отношения сигнал-шум (OSNR) и позволит восстановить работоспособность ВОЛС и тем самым увеличить срок службы кабельной инфраструктуры. Еще один пример применения гибридных усилителей – линии, содержащие пролеты большой протяженности, в которых невозможно добиться работоспособности стандартными эрбиевыми усилителями. Как следствие, при проектировании новой линии возможно увеличение длины пролета и соответственно сокращение количества усилительных пунктов, что приведет к снижению стоимости ВОЛС [5, 6].

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ

На рис.1 изображена концептуальная схема гибридного усилителя. Основными компонентами устройства являются полупроводниковые лазеры накачки со стабилизацией длины волны брэгговской решеткой и эрбиевый усилитель. В гибридном усилителе компании "Т8" используются лазер на длине волны 1452 нм с максимальной мощностью 300 мВт и лазер на длине волны 1427 нм с максимальной мощностью 220 мВт. Подробный анализ выбора длин волн и мощностей приведен в разделе "Достижение максимальной равномерности усиления". Контроль мощностей сигнала осуществляется с помощью входного и выходного фотоприемников. Для ввода излучения накачки в линию связи используется комбинация поляризационного и спектрального мультиплексоров. Поляризационный мультиплексор объединяет излучение двух лазеров накачки с длинами волн 1427 нм и 1452 нм и разными состояниями поляризации. Данная схема обеспечивает поляризационную независимость коэффициента рамановского усиления внутри С-диапазона.

Рис.1. Функциональная схема гибридного усилителя

Спектральный мультиплексор используется для объединения сигнала и накачки, распространяющейся во встречном направлении. Эрбиевый каскад гибридного усилителя представляет собой однокаскадный либо двухкаскадный эрбиевый усилитель в зависимости от конфигурации линии, для которой он предназначен. Гибридный усилитель работает в режимах, аналогичных режимам работы эрбиевых усилителей: стабилизируется величина коэффициента усиления или выходной мощности. При этом, поскольку усилитель состоит из двух различных усилителей, рамановского и эрбиевого, допускается стабилизация коэффициента усиления и выходной мощности, как каждого из усилителей, так и совместного гибридного. Также предусмотрен вырожденный режим работы усилителя с выключенным рамановским каскадом. Наличие такого режима делает гибридный усилитель более универсальным и позволяет использовать усилитель в более безопасном режиме. Для стабилизации коэффициента рамановского усиления (КРУ) используется линейная зависимость между КРУ и мощностью усиленной спонтанной рамановской люминесценции в логарифмическом масштабе. Для обеспечения минимальной неравномерности спектра усиления поддерживается постоянная разность мощностей рамановской накачки на двух длинах волн, обеспечивающая максимум равномерности.

Основным преимуществом гибридного усилителя является снижение шум-фактора предусилительной части с 6–9 дБ (шум-фактор эрбиевых усилителей) до 1,5–4 дБ. Кроме того, гибридный усилитель обладает большим по сравнению с только эрбиевым усилителем коэффициентом усиления (может достигать 31 дБ). Относительный же недостаток – большая неравномерность спектра усиления по сравнению с обычным эрбиевым усилителем. Это объясняется использованием только двух рамановских накачек на различных длинах волн. Использование дополнительных накачек или выравнивающего фильтра GFF позволит улучшить равномерность КУ, однако это приведет к более высокой стоимости продукта. Поэтому основной сферой применения гибридного усилителя являются линии, где недостаточно использования только эрбиевых усилителей, а использование мощных широкополосных рамановских усилителей будет избыточным. На рисунке 2 изображены примеры экспериментально измеренных спектральных зависимостей коэффициента усиления (Gain) и шум-фактора (NF) гибридного усилителя.

ДОСТИЖЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ РАВНОМЕРНОСТИ УСИЛЕНИЯ

Как уже было сказано, относительным недостатком гибридного усилителя на двух длинах волн

рамановской накачки является большая неравномерность спектра усиления. Наша компания провела расчетное исследование на основе скоростных уравнений рамановского усилителя с целью оптимизации мощностей и длин волн накачки [7, 8].

Фиксируя длину волны более мощной длинноволновой накачки $\lambda_2 = 1452$ нм и ее максимальную мощность 300 мВт, рассмотрим спектры усиления рамановского усилителя при различной длине волны коротковолновой накачки $\lambda_1 = \text{variable}$ и оптимальной мощности накачки (оптимальная разность мощностей накачки подбиралась экспериментально и равнялась примерно 100 мВт). Максимальной неравномерностью считаем разность между максимальным и минимальным значением коэффициента усиления на участке шириной 30 нм (ширина С-диапазона сетки DWDM). Таким образом, можно подобрать длину волны коротковолновой накачки, обеспечивающую максимальную равномерность на некотором участке шириной 30 нм. Если этот участок не совпадает с С-диапазоном сетки DWDM, то, изменив на одинаковую величину обе длины волны, мы сместим наш оптимальный диапазон в С-диапазон DWDM (рис.3).

Оптимальная разность длин волн накачек, обеспечивающая минимум неравномерности

Рис.4. Неравномерность спектра КУ при различных мощностях коротковолновой накачки

Рис.5. Расширение работоспособности линий связи с гибридными усилителями

спектра усиления, равна в нашем случае 27 нм. При этом малым изменением длины волны и мощности накачки λ_1 добиться меньшей неравномерности не получится. Исходя из найденной оптимальной разности длин волн накачек, определим оптимальную мощность коротковолновой накачки.

На рисунке 4 изображена зависимость неравномерности спектра усиления при различных мощностях коротковолновой накачки. Синей линией изображена первая конфигурация $\lambda_1 = 1425$ нм, $\lambda_2 = 1452$ нм; вторая конфигурация — красной $\lambda_1 = 1427$ нм, $\lambda_2 = 1452$ нм. Минимум неравномерности достигается в первой конфигурации, однако у второй конфигурации имеется существенное достоинство, так как неравномерность спектра усиления достигается в достаточно широком диапазоне мощности коротковолновой накачки. Этот факт позволяет не ухудшать неравномерность усилителя в достаточно большом диапазоне коэффициента усиления рамановского усилителя. Нами была выбрана вторая конфигурация для более ровной перестройки коэффициента усиления рамановского каскада.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Итак, гибридные усилители позволяют: увеличить длину пролета в многопролетной или

однопролетной линии; увеличить число пролетов в многопролетной линии; увеличить отношение сигнал-шум в текущей линии связи.

Рассмотрим одноканальную линию, состоящую из N одинаковых пролетов длиной 100 км каждый, и из N эрбиевых линейных усилителей (шум-фактор 9,5 дБ для минимального коэффициента усиления) между пролетами, компенсирующими потери в них. Примем потери в волокне 0,2 дБ/км. В качестве приемно-передающего оборудования рассмотрим 100G-транспондер "Волга" с требуемым отношением сигнал/шум на приемнике 11 дБ. Эксплуатационный запас линии примем равным 3 дБ. Максимальное число пролетов в такой линии будет $N = 27$. Если заменить эрбиевые усилители на гибридные, сохранив длину каждого пролета, то это существенно снизит уровень шума на приемнике. Отношение сигнал-шум увеличится на 6 дБ. Таким образом можно увеличить количество пролетов более чем в три раза (до $N = 92$). Если же количество пролетов оставить тем же ($N = 27$), то можно увеличить длину каждого пролета на 40 км. Параметры расчета многопролетной линии приведены в таблице.

В реальных же линиях используется некий промежуточный вариант, позволяющий повысить одновременно все три параметра. Требования определяются конкретными оптическими линиями связи.

Таблица. Повышение производительности линий связи за счет гибридных усилителей

Тип линии	На основе усилителей EDFA	На основе гибридных усилителей (увеличиваем длину пролета)	На основе гибридных усилителей (увеличиваем число пролетов)	На основе гибридных усилителей (увеличиваем OSNR на выходе линии)
Число пролетов	27	27	92	27
Длина пролета, км	100	140	100	100
Шум-фактор усилителя, дБ	9,5	1,3	1,1	1,1
Отношение сигнал-шум на выходе линии, дБ	14	14,5	14	19,8

Если изобразить область эффективного применения гибридных усилителей в осях ОХ – длина одного пролета, ОУ – число пролетов, ОZ – запас линии по отношению сигнал-шум (запасом по OSNR, или $OSNR_{\text{mar}}$ называется величина, равная разности отношения сигнал-шум на выходе линии и минимально требуемого отношения сигнал-шум для работоспособности линии), то она будет представлять собой пространство, заключенное между двух эллипсоидов и ограниченное полуплоскостями $N_{\text{span}} = 1$, $OSNR_{\text{mar}} = 0$ дБ, $Length_{\text{span}} = L_{\text{min}}$ (рис. 5).

Внутренняя область эллипсоида есть область применения эрбиевых усилителей. При их замене на гибридные усилители запас в каждой точке (длина пролета, количество пролетов) возрастает. Аналогично, если рассмотреть график в других плоскостях, в каждой точке плоскости (количество пролетов, запас по OSNR) возрастает длина каждого пролета. Внешняя граница является предельным случаем применения гибридного усилителя. Вне этой границы для увеличения дальности линии или повышения качества сигнала потребуются применение стандартных более мощных широкополосных рамановских усилителей, что, в свою очередь, повысит стоимость оборудования для ВОЛС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гибридные волоконно-оптические усилители, представляющие собой совместную реализацию рамановского и эрбиевого усилителей, являются перспективным решением увеличения производительности волоконно-оптических DWDM-линий связи. Гибридные усилители предназначены для увеличения дальности одного пролета, числа пролетов и повышения отношения сигнал-шум на выходе линии, что позволит использовать более

современные форматы модуляции. Гибридный усилитель позволяет снизить шум-фактор предусилительной части линии связи до 1,5 дБ при максимальном усилении более 30 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коньшев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Слепцов М.А., Трешиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р.** Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 15–27.
2. **Леонов А.В., Наний О.Е., Слепцов М.А., Трешиков В.Н.** Тенденции развития оптических систем дальней связи // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 2. С. 123–145.
3. **Гуркин Н.В., Трешиков В.Н., Наний О.Е.** Оптические когерентные DWDM-системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с // Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 4. С. 15–18.
4. **Леонов А.В., Слепцов М.А., Трешиков В.Н.** Скоростные 400G-системы // T-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2016. Спецвыпуск 1. С. 30–31.
5. **Ahmad A., Bianco A., Chouman H., Marchetto G., Tahir S., and Curri V.** Impact of fiber type and Raman pumping in NyWDM flexible-grid elastic optical networks // International Conference on Transparent Optical Networks. 2016, August.
6. **Curri V., Carena A.** Merit of Raman Pumping in Uniform and Uncompensated Links Supporting NyWDM Transmission // J. Light. Technol. 2016. Vol. 34. No. 2. P. 554–565.
7. **Headley C., Agrawal G.P.** Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. 2005.
8. **Chinn S.R.** Analysis of Counter-pumped Small-signal Fibre Raman Amplifiers // Electron. Lett. 1997. Vol. 33. No. 7. P. 607–608.