

6. Bourdine A. V. Method for chromatic dispersion estimation of high-order guided modes in graded index single-cladding fibers // Proceedings of SPIE. 2007. 6605. pp. 660509-1–660509-13.
7. Бурдин А. В., Дельмухаметов О. Р. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков на основе комбинации модифицированного приближения Гаусса и метода конечных элементов // Телекоммуникации. 2010. № 9. С. 33–40.
8. Bourdine A. V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. 2013. pp. 469389-1–469389-18.
9. Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres. ITU COM 15-273-E. 1996.
10. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов. М.: Физматгиз, 1962. 1100 с.
11. Бурдин А. В., Яблочкин К. А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. 2010. № 2. С. 22–27.
12. Боголюбов А. Н., Буткарев И. А., Свешников А. Г. Синтез волоконных световодов // Радиотехника. 2004. № 12. С. 4–12.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УВЕЛИЧЕНИЯ ДЛИНЫ ОДНОПРОЛЕТНОГО УЧАСТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

М.С. Былина, С.Ф. Глаголев, В.С. Кузнецов

Целью работы является исследование возможности увеличения длины однопролетного участка волоконно-оптической линии связи с плотным спектральным мультиплексированием без использования в оптических кабелях медных жил для дистанционного электропитания. В работе предложены и промоделированы варианты построения схем однопролетных участков с использованием эрбиевых оптических усилителей с удаленной накачкой. Полученные результаты можно использовать в качестве рекомендаций для разработчиков оптических усилителей и проектировщиков линий связи.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, оптический усилитель, оптическое волокно, однопролетный участок, оптический сигнал, излучение накачки, усиленное спонтанное излучение, спектральное мультиплексирование, оптический усилитель с удаленной накачкой

ANALYSIS OF POSSIBILITIES TO INCREASE THE LENGTH OF THE SINGLE-SPAN SECTION OF THE FIBER-OPTICAL COMMUNICATION LINE

Bylina M, Glagolev S, Kuznetsov V.

The article is devoted to the investigation of the possibilities to increase the length of the single-span section of the fiber-optical communication line with dense wavelength division multiplexing without using remote power supply. The work includes proposed and simulated variants of schemes of the single-span sections with linear optical amplifiers EDFA with remote pump signal. The results can be used as a recommendation for amplifier developers and communication line designers.

Keywords: fiber-optical communication line, optical amplifier, optical fiber, single-span section, optical signal, pump emission, amplified spontaneous emission, wavelength division multiplexing, remote optical pumped amplifier

Благодаря малым потерям и возможности компенсации дисперсии в одномодовых оптических волокнах (ОВ) длины усилительных участков волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с плотным спектральным мультиплексированием DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) при высоких скоростях передачи ($C = 10$ Гбит/с и более) имеют большие значения порядка $l_y = 60\text{--}100$ км и более. Поэтому обычно усилительные пункты (УП) можно разместить в обслуживаемых или необслуживаемых узлах связи и обеспечить электропитанием. Однако возможны ситуации, когда требуется обеспечить значительно большее расстояние между узлами с электропитанием. Такие однопролетные участки (ОПУ) большой протяженности могут найти применение в подводных, а также в наземных ВОЛС при прокладке оптического кабеля (ОК) в малонаселенных и труднодоступных для человека районах.

В данной работе рассматривается решение по увеличению длины ОПУ, предлагаемое компанией T8, для ОК без медных жил, в которых излучение накачки линейных оптических усилителей (ЛОУ) поступает от оконечных пунктов (ОП) по выделенным для этого ОВ [1]. Такие ЛОУ называют усилителями с удаленной накачкой ROPA (*Remote Optical Pumped Amplifier*).

Структурные схемы однопролетных участков ВОЛС

Рассмотрим общие соображения, положенные в основу предлагаемых для анализа структурных схем ОПУ ВОЛС, которые могут представлять собой усилительные или регенерационные участки.

В качестве ЛОУ могут использоваться только оптические усилители (ОУ) EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), так как они требуют для работы относительно малых уровней оптической накачки (порядка 10 мВт). Они могут использовать попутную, встречную и двунаправленную накачки, излучение для которой можно передавать от ближайших ОП по одному или нескольким ОВ. Для накачки ЛОУ EDFA используют излучение с длиной волны $\lambda_p = 1480$ нм, на которой затухание в кварцевых ОВ сравнительно мало ($\alpha \approx 0,2$ дБ/км). Излучение с $\lambda_p = 980$ нм нельзя использовать в качестве удаленной накачки из-за большого затухания на этой длине волны.

Рассмотрим структурную схему ОПУ (рис. 1) с двумя ОП и двумя необслуживаемыми усилительными пунктами с ЛОУ EDFA, которые могут располагаться в оптических муфтах.

Рассматривать схемы ОПУ с большим количеством УП нет смысла, так как только для двух УП можно обеспечить относительно малые расстояния от источника излучения (ИИ) накачки до ЛОУ. В ОП располагаются два предварительных оптических усилителя (ПОУ) встречных направлений и ИИ накачки. В качестве ПОУ могут использоваться ОУ EDFA или рамановские ОУ со встречной накачкой. Они должны обладать большим коэффициентом усиления и малыми шумами.

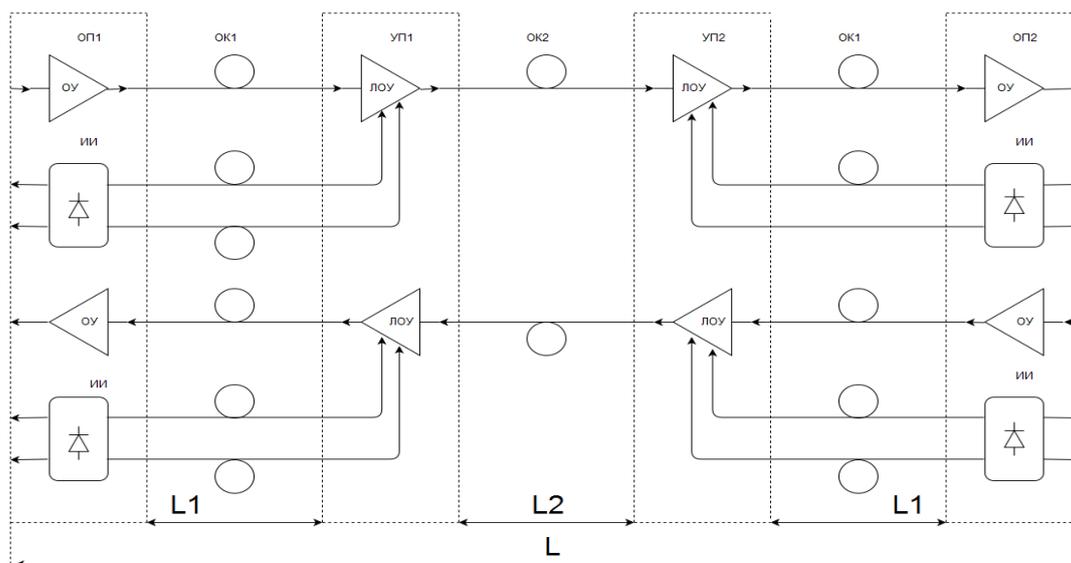


Рис. 1. Схема однопролетного усилительного участка ВОЛС с двумя необслуживаемыми усилительными пунктами

В этой схеме можно выделить два одинаковых подучастка с ОК₁ длиной L_1 , которые прилегают к ОП, и подучасток с ОК₂ длиной L_2 между УП. Общая длина ОПУ равна:

$$L = 2 L_1 + L_2.$$

При использовании в качестве ЛОУ EDFA с двунаправленной накачкой в ОК₁ общее количество ОВ составляет 6, а в ОК₂ только 2 ОВ.

Рассмотрим также структурную схему ОПУ (рис. 2), в которой используется в два раза меньше ЛОУ, ИИ накачки и ОК с меньшим количеством ОВ. В этой схеме также можно выделить аналогичные подучастки с длинами L_1 и L_2 . Общая длина ОПУ составляет:

$$L = L_1 + L_2.$$

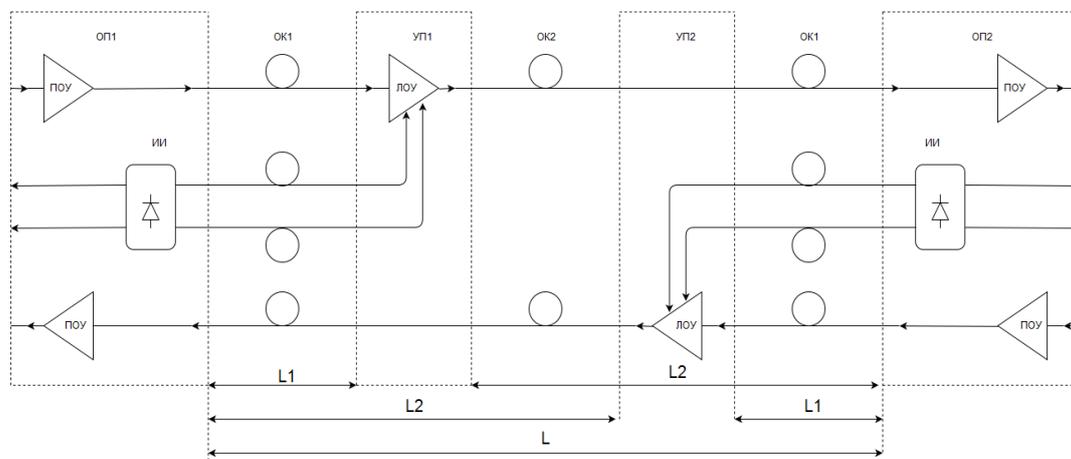


Рис. 2. Схема однопролетного регенерационного участка ВОЛС с двумя усилительными пунктами

При анализе схем на рисунках 1 и 2 можно выделить ряд общих задач, требующих отдельного рассмотрения.

Исследование ЛОУ EDFA

Будем исследовать ЛОУ с двунаправленной накачкой (рис. 3) с $n = 10$ каналами DWDM со скоростями передачи $C = 10$ Гбит/с и частотным интервалом $\Delta\nu = 25$ ГГц ($\Delta\lambda = 0,2$ нм). Каналы нумеруются от $i = 0$ до 9. Длина волны центрального канала $\lambda_{s4} = 1552,52$ нм, $\lambda_p = 1480$ нм.

Целью исследования является определение оптимальных параметров ЛОУ, которые обеспечивают относительно большой уровень выходной мощности сигнала p_{sout} при небольших уровнях накачки p_{pin} , малую неравномерность ΔG коэффициента усиления G . Для исследования использовалась моделирующая программа GainMaster™ [2], которая позволяет определять параметры ЛОУ при изменениях длины l и типа эрбиевого ОВ, уровней мощностей накачки p_p и входного сигнала p_{sin} . Определялись: G , ΔG , p_{sout} , а также уровень мощности усиленного спонтанного излучения (УСИ) p_{ase} и оптическое отношение сигнала к шуму OSNR (*Optical Signal-to-Noise Rate*) для центрального канала в полосе $\Delta\lambda = 0,2$ нм.

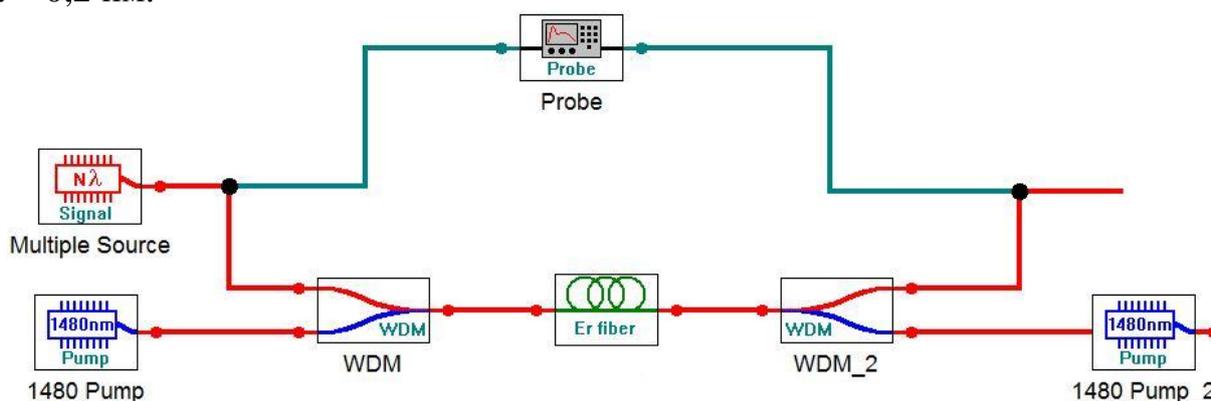


Рис. 3. Схема ОУ EDFA с двунаправленной накачкой

В таблице 1 приведены некоторые результаты моделирования ЛОУ при использовании эрбиевых ОВ IsoGane I-4, I-25 и MetroGain M-5 [2] при одинаковых уровнях попутной и встречной накачек $p_p = 13$ дБм и одинаковых $p_{sin} = -20$ дБм в каждом канале.

В таблице 1 и далее используются следующие обозначения:

- p_{sout} и $p_{sout\Sigma}$ – уровни выходной мощности в центральном канале и во всех каналах;
- S_{ase} и p_{ase} – спектральная плотность и уровень мощности УСИ на выходе ОУ в полосе одного канала $\Delta\lambda = 0,2$ нм.

Величины P_{ase} и OSNR в таблице 1 определялись по выражениям:

$$p_{ase} = 10 \cdot \lg \left(10^{S_{ase}/10} \cdot \Delta\lambda \right),$$

$$OSNR = p_{sout} - p_{ase}.$$

ТАБЛИЦА 1. Выбор эрбиевого ОВ

Тип ОВ	l , м	p_{sout} , дБм	$p_{sout\Sigma}$, дБм	S_{ase} , дБм/нм	p_{ase} , дБм	G , дБ	OSNR, дБ	ΔG , дБ
I-4	10	-0,8	9,2	-24,4	-31,4	19,2	30,6	0,11
	15	3,8	13,1	-21,1	-28,1	23,0	31,9	0,30
	20	4,1	14,1	-19,8	-26,8	24,1	30,9	0,55
I-25	3	4,1	14,2	-20,0	-27,0	24,2	31,1	0,64
	2	1,9	11,9	-22,0	-29,0	21,9	30,9	0,31
	1	-6,7	3,3	-31,9	-38,9	13,3	32,2	0,11
M-5	15	2,2	12,2	-21,3	-28,3	22,2	30,5	0,20
	20	3,7	13,7	-20,0	-27,0	23,7	30,7	0,43
	25	4,1	14,1	-19,8	26,8	24,1	30,9	0,69

По совокупности параметров для каждого ОВ выделены цветом лучшие варианты, отличающиеся эффективностью использования накачки и малой неравномерностью коэффициента усиления.

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают, что параметры ЛОУ с оптимально выбранной длиной эрбиевого ОВ мало зависят от его типа. Поэтому в дальнейших расчетах используется ОВ I-4. Для ЛОУ₁ при $p_p = 13$ дБм характерны следующие параметры: $G = 23$ дБ, $\Delta G = 0,3$ дБ, $p_{sout} = 3,8$ дБм, OSNR = 31,9 дБ. Шум-фактор ОУ $F_n = 4,7$ дБ.

Для ЛОУ₂ в качестве p_{sin} принимается ослабленный на расстоянии между УП сигнал p_{sout} (табл. 1). В таблице 2 приведены некоторые результаты моделирования ЛОУ₂ при $p_p = 13$ дБм и изменении p_{sin} .

ТАБЛИЦА 2. Выбор оптимального значения p_{sin} для ЛОУ₂

p_{sin} , дБм	p_{sout} , дБм	ΔG , дБ	$p_{sout\Sigma}$, дБм	S_{ase} , дБм/нм	p_{ase} , дБм	OSNR, дБ	G , дБ	F_n , дБ
-38	-7,6	0,1	2,4	-12,8	-19,8	12,2	30,4	4,7
-40	-9,5	0,13	0,5	-12,8	-19,8	10,3	30,5	4,7
-42	-11,5	0,13	-1,4	-12,8	-19,8	8,3	30,6	4,7

Исследование ПОУ EDFA для оконечных пунктов

Основными требованиями к ПОУ, который может быть выполнен по схеме на рисунке 3, являются: максимальный коэффициент усиления, небольшая неоднородность коэффициентов передачи разных каналов и малый коэффициент шума. Ограничений на уровень накачки ПОУ нет, поэтому примем его равным $p_p = 20$ дБм. Для ПОУ можно использовать излучение накачки на $\lambda_p = 980$ нм. В таблице 3 приведены некоторые результаты моделирования ПОУ с накачкой на $\lambda_p = 980$ нм с эрбиевым ОВ I-4 длиной $l = 15$ м для различных сигналов.

ТАБЛИЦА 3. Выбор оптимального значения p_{sin} для ПОУ

p_{sin} , дБм	p_{sout} , дБм	$p_{sout\Sigma}$, дБм	S_{ase} , дБм/нм	p_{ase} , дБм	G , дБ	ΔG , дБ	OSNR, дБ	F_n , дБ
-34	3,4	13,4	-5,5	-12,5	37,4	0,04	15,9	4,7
-38	-0,2	9,7	-5,2	-12,2	37,7	0,04	12,0	4,9
-40	-2,1	7,9	-5,0	-12,0	37,9	0,04	9,9	4,9

Определение длины ОПУ

Длина подучастка, прилегающего к ОП, определяется затуханием излучения накачки на $\lambda_p = 1480$ нм и может быть выбрана равной $L_1 = 100$ км. Для обеспечения уровня излучения накачки ЛОУ $p_p = 13$ дБм уровни мощности источников излучения накачки должны быть равны $p_p = 33$ дБм.

Входной сигнал для ЛОУ₁ для обеспечения $p_{sout} = 3$ дБм должен быть не менее -20 дБм, а на выходе ОП не менее 0 дБм.

Входной сигнал для ЛОУ₂ для обеспечения уровня $p_{sout} = 0$ дБм на выходе УП для дальнейшей передачи до ОП на расстояние 100 км не должен превышать уровня $p_{sin} = -27$ дБм. Тогда расстояние L_2 между УП составит:

$$L_2 = \frac{p_{sout} - p_{sin}}{\alpha} = \frac{3,8 - (-40)}{0,2} \approx 220 \text{ км.}$$

p_{sin} для ПОУ при коэффициенте усиления $G = 37$ дБ должен быть не менее -37 дБм, а для ЛОУ₂ $p_{sout2} = -17$ дБм и входной $p_{sin2} = -37$ дБм. Тогда:

$$L_2 = \frac{p_{sout1} - p_{sin2}}{\alpha} = \frac{3,8 - (-38)}{0,2} \approx 210 \text{ км.}$$

Общая длина ОПУ для схемы на рисунке 1 составит:

$$L = 2 \cdot L_1 + L_2 = 2 \cdot 100 + 220 = 420 \text{ км,}$$

а для схемы на рисунке 2:

$$L = L_1 + L_2 = 100 + 210 = 310 \text{ км.}$$

Заключение

Во многих случаях полученное значение длины ОПУ достаточно. Дальнейшее увеличение длины ОПУ возможно за счет использования большего числа ОБ для передачи излучения накачки к ЛОУ и увеличения суммарной мощности накачки. Эти вопросы и некоторые другие не вошли в статью ограниченного объема. Работы по проблеме увеличения длины ОПУ будут продолжены.

Список используемых источников

1. Листвин В. Н., Трещиков В. Н. DWDM системы: научное издание. М.: Наука, 2013. – 300 с. ISBN 978-5-94836-407-0.
2. GainMaster. Amplifier Design Software Manual. Revision 1.1. Fibercore Limited. 2004.