

Научная статья

УДК 681.7

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-116-126>

EDN:MSJKKQ



Анализ схем реализации длиннопролетных линий связи на базе волоконно-оптических усилителей с удаленной накачкой

Иван Игоревич Шестаков✉, ivansche2007@rambler.ru

Ефим Иванович Гниломедов, efimi@mail.ru

Елена Александровна Минина, adm@uisi.ru

Уральский технический институт связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге, Екатеринбург, 620109, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Организация длиннопролетных волоконно-оптических линий связи (например, DWDM) с использованием традиционных эрбиевых усилителей, требует их размещения в населенных пунктах, с целью электропитания и проведения регламентных работ. Это сказывается на увеличении длины секций, количества усилительных пунктов и накопление шума, что влечет рост стоимости сети и необходимости установки регенераторов. Альтернативой является технология удаленной накачки усилителя (ROPA). Однако ее внедрение требует решения вопросов о максимальной мощности накачки, ее влияния на информационный сигнал при разных форматах модуляции и об оптимальной длине усилительного участка. Исследования в этой области нуждаются в углубленном анализе и проверке полученных результатов другими учеными.

Целью работы является анализ схем построения длиннопролетных линий связи на базе ROPA-усилителей для систематизации и расширения теоретических аспектов в области исследования, определения параметров сигнала накачки и оптимальной конфигурации линии. В работе применены **методы** системного анализа, аналитического обзора литературы, обобщения, а также аналитический расчет мощности накачки и длины усилительного участка.

Результат. Показано, что для линии протяженностью 350 км с двумя ROPA-усилителями требуется источник накачки мощностью 2 Вт по выделенному волокну ITU-T G.652B. Для секции 500 км рекомендуется использовать волокна ITU-T G.652B и ITU-T G.654E, а также гибридные усилители (рамановский и эрбиевый) на концах линии, с передачей информационного сигнала и сигнала накачки по одному волокну. Отмечено, что такая концепция может вызвать нелинейные искажения, требующие дополнительного исследования.

Научная новизна заключается в сравнительном анализе двух схем удаленной накачки и в выдвижении гипотезы о возрастании нелинейных эффектов и ошибок при совместной передаче мощного сигнала накачки и информационного сигнала по одному волокну.

Практическая значимость. Результаты могут применены при проектировании магистральных сетей DWDM протяженностью до 500 км для телекоммуникационных и энергетических компаний.




Теоретическая значимость. Работа систематизирует и обобщает знания в области удаленной накачки EDF-волокна, позволяя точнее оценить пределы и перспективы технологии.

Ключевые слова: длиннопролетная ВОЛС, эрбиевый усилитель, удаленная накачка, мощность накачки, EDF-волокно

Ссылка для цитирования: Шестаков И.И., Гниломедов Е.И., Минина Е.А. Анализ схем реализации длиннопролетных линий связи на базе волоконно-оптических усилителей с удаленной накачкой // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 116–126. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-116-126. EDN:MSJKKQ

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-116-126>
EDN:MSJJKQ

Analysis of Schemes for the Implementation of Long-Span Communication Lines Based on Fiber-Optic Amplifiers with Remote Pumping

 Ivan I. Shestakov✉, ivansche2007@rambler.ru
 Yefim I. Gnilomedov, efimi@mail.ru
 Elena A. Minina, adm@uisi.ru

Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State University of Telecommunications and Informatics» in Yekaterinburg, Yekaterinburg, 620109, Russian Federation

Annotation

Relevance. The organization of long-span fiber-optic communication lines (for example, DWDM) using traditional erbium amplifiers requires their placement in populated areas for the purpose of power supply and routine maintenance. This affects the increase in the length of sections, the number of amplification points and the accumulation of noise, which leads to an increase in the cost of the network and the need to install regenerators. An alternative is Remote Booster Pumping (ROPA) technology. However, its implementation requires addressing the issues of maximum pumping power, its effect on the information signal in different modulation formats, and the optimal length of the amplification section. Research in this area needs in-depth analysis and verification. Research in this area requires in-depth analysis and verification of previously obtained results by other scientists.

The purpose of the work is to analyze schemes for building long-span communication lines based on ROPA amplifiers in order to systematize and expand theoretical aspects in the field of research, determine the parameters of the pump signal and the optimal configuration of the line.

The methods of system analysis, analytical review of literature, generalization, as well as analytical calculation of pumping power and length of the amplification section are applied in the work.

Result. It is shown that a 350 km long line with two ROPA amplifiers requires a 2-Watt pumping source using a dedicated ITU-T G.652B fiber. For a 500 km section, it is recommended to use ITU-T G.652B and ITU-T G.654E fibers, as well as hybrid amplifiers (Raman and erbium) at the ends of the line, with the transmission of an information signal and a pump signal over a single fiber. It is noted that such a concept can cause nonlinear distortions that require additional research.

The scientific novelty lies in the comparative analysis of two remote pumping schemes and in the hypothesis of an increase in nonlinear effects and errors during the joint transmission of a powerful pumping signal and an information signal over a single fiber.

Practical significance. The results can be applied in the design of DWDM backbone networks with a length of up to 500 km for telecommunications and energy companies.

Theoretical significance. The work systematizes and summarizes knowledge in the field of remote EDF fiber pumping, allowing a more accurate assessment of the limits and prospects of the technology.

Keywords: long-span fiber-optic, erbium amplifier, remote pumping, pumping power, EDF fiber

For citation: Shestakov I.I., Gnilomedov E.I., Minina E.A. Analysis of Schemes for the Implementation of Long-Span Communication Lines Based on Fiber-Optic Amplifiers with Remote Pumping. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1):116–126. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-116-126. EDN:MSJJKQ

Введение

Длиннопролетные волоконно-оптические линии систем связи, в частности DWDM (*аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing*), организуются при помощи линейных оптических усилительных пунктов. В качестве усилителя применяются эрбиевый волоконно-оптический усилитель. Как правило, линейные усилительные пункты размещают в населенных пунктах с целью организации электропитания и при необходимости проводить регламентные работы. Такой пункт принято называть обслуживаемым (ОУП)

Обслуживаемые усилительные пункты характеризуются следующими недостатками:

1) для их размещения требуется отапливаемое, электрифицированное и охраняемое помещение, например, в здании администрации или муниципального учреждения населенного пункта;

2) при отсутствии подходящего здания применяются контейнер связи или климатический шкаф, устанавливаемые на территории или границе населенного пункта для обеспечения электропитания и доступности при проведении регламентных работ;

3) такое размещение ведет к увеличению длины пролета линии связи и, как следствие, к росту количества ОУП, в отличие от необслуживаемых усилительных пунктов (НУП), и тем самым ухудшая соотношение сигнал / шум (OSNR) на приеме, что создает необходимость установки в секции дополнительного регенератора.

Решить эту проблему можно тремя способами. Первым способом является дистанционное электропитание линейных оптических усилителей с применением гибридного оптоэлектронного кабеля связи. Это позволит максимально возможно сократить длину пролета секции, уменьшить количество ОУП за счет прокладки кабеля в пределах прямой видимости между оконечными пунктами связи. С одной стороны, за счет уменьшения ОУП, на приеме возрастет OSNR, а с другой стороны, для организации ОУП на открытой местности в полевых условиях потребуется установка либо контейнеров связи, либо климатические шкафы, что ограничит доступ технического персонала к оборудованию для проведения регламентных работ из-за погодных условий или отсутствия транспортности доступности.

Вторым способом является организация НУП с дистанционным электропитанием EDFA-усилителя по гибриднему оптоэлектронному кабелю. Учитывая миниатюрность компонентов EDFA, их можно разместить в оптической муфте. Реализация такой схемы вполне возможна, но является крайне сомнительной по следующим причинам. Во-первых, потребуются мощные блоки дистанционного электропитания, что скажется на электро-

безопасности работников, занимающихся эксплуатацией такой сети. Во-вторых, возникает критическая зависимость надежности EDFA от микроклимата (температура / влажность) внутри муфты. Подобных исследований в данной области нет, а в случае реализации потребуются постановка дорогостоящего натурального эксперимента, длящегося как минимум один год и в разных климатических зонах. В случае положительных результатов, можно полагать, что реализация на практике подобной схемы потребует разработать и / или внести изменения в технические требования к оптическим муфтам. Например, увеличить рабочий температурный диапазон и повысить класс защищенности до IP68. Возможно потребуется применение термостабилизирующих элементов в EDFA-усилителе, а также – интеграция телеметрии и телеконтроля для каждого НУП. Все это приведет к разработке нового регламента профилактических проверок муфт, в которых будут установлены активные компоненты EDFA-усилителя.

Первый и второй способы организации ОУП и НУП при помощи гибридного кабеля связи являются менее эффективными, по сравнению с третьим способом.

Оптический усилитель с удаленной накачкой

Третьим способом является организация НУП с применением технологии удаленной накачки EDF-волокна путем «выноса» активных компонентов усилителя (блок питания, лазерные диоды накачки) за пределы усилительного пункта с размещением их на стороне оконечного пункта линии связи. Пояснение представлено на рисунке 1, где изображена схема усилительного участка тракта передачи. Такая технология получила название ROPA (*аббр. от англ. Remote Optically Pumped Amplifier* – удаленная оптическая накачка усилителя), а сам усилитель принято называть ROPA-усилитель.

Оптическую удаленную накачку можно реализовать несколькими способами. Первый и очевидный способ – это оптическая накачка по специально выделенным оптическим волокнам волоконно-оптического кабеля, не предназначенным для передачи информационного сигнала. Передача информационных сигналов осуществляется в других волокнах этого кабеля. За счет миниатюрности пассивных компонентов EDFA-усилителя, таких как EDF-волокно, WDM-смесители и оптические изоляторы, их можно устанавливать непосредственно в оптической муфте, что делает такой усилитель необслуживаемым. Как правило, пассивные компоненты усилителя находятся в пластиковом боксе, который можно закрепить на заднюю стенку сплайс-кассеты оптической муфты при помощи винтов или нейлоновыми стяжками, как показано на рисунке 2.

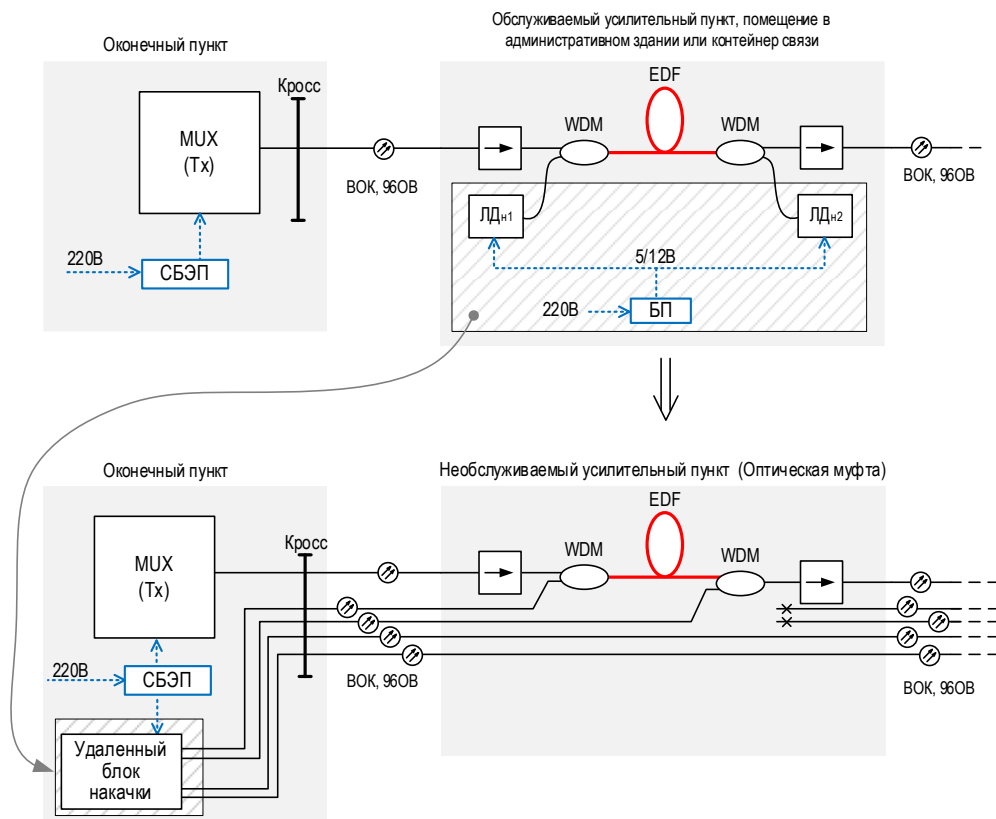


Рис. 1. Концепция реализации EDFA-усилителя с удаленной накачкой по выделенному оптоволокну

Fig. 1. The Concept of Implementing an EDFA Amplifier with Remote Pumping over a Dedicated Fiber

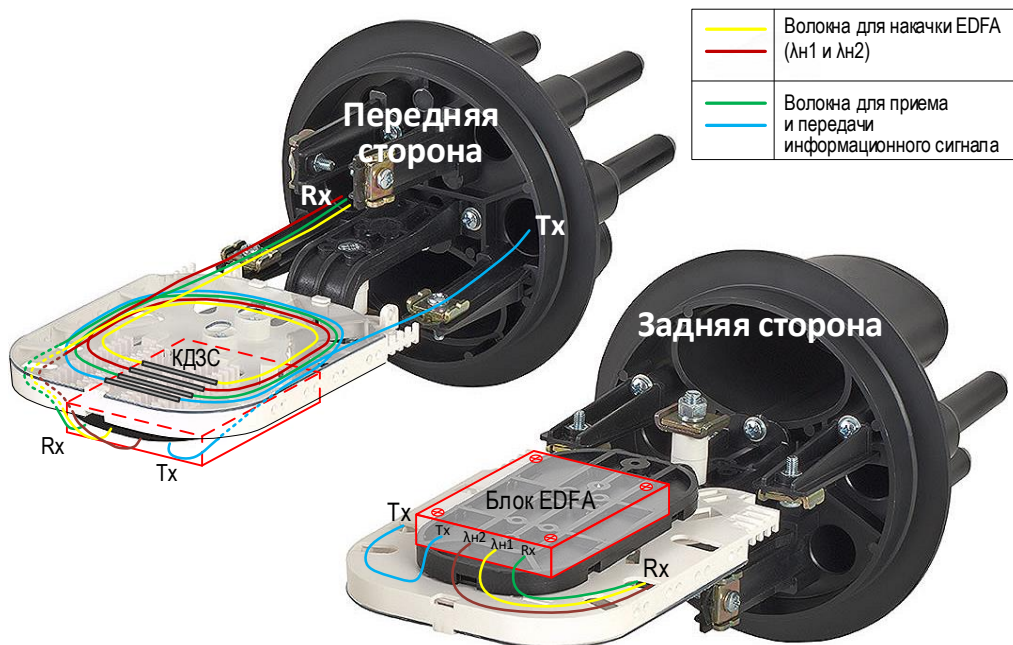


Рис. 2. Предполагаемая схема размещения блока EDFA в оптической муфте

Fig. 2. The Proposed Layout of the EDFA Block in the Optical Coupling

Основным недостатком схемы, представленной на рисунке 1, является то, что на один оптический усилитель выделяется два волокна. В случае, если в линии предусматривается установка, например, четырех усилителей с удаленной накачкой, потре-

буется выделить 16 волокон (8 волокон в тракте передачи и 8 в тракте приема) при накачке с одной стороны. Если накачку реализовать с двух сторон – потребуется выделить 8 волокон. Для уменьшения количества волокон для накачки EDF-волокна

можно применить схему с общей оптической шиной (рисунок 3). Для этого дополнительно в оптической муфте потребуется установить ответвитель оптической мощности FBT 1:2.

Применение шинной архитектуры позволит задействовать два волокна, даже если накачка будет реализована как с двух сторон, так и с одной. Оче-

видно, что применение оптического разветвителя приведет к уменьшению мощности сигнала накачки, что скажется на снижении коэффициента усиления. Это подтверждается зависимостью коэффициента усиления (G) от мощности сигнала накачки ($P_{\text{накач.}}$), вводимого в EDF-волокно (рисунок 4).

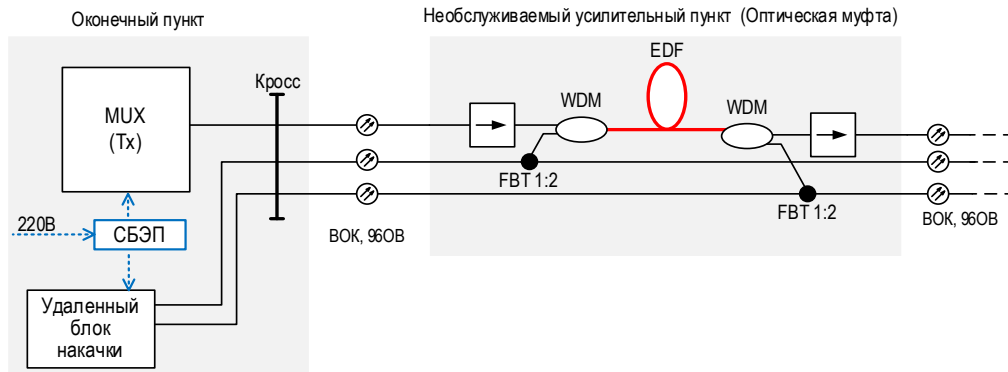


Рис. 3. Концепция удаленной накачки EDF-волокна по оптоволоконной шине
Fig. 3. The Concept of Remote Pumping of EDF Fiber over a Fiber Optic Bus

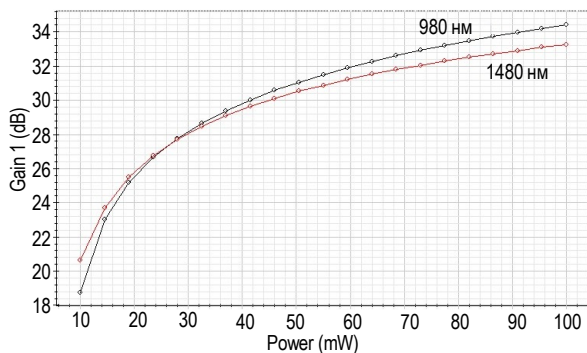


Рис. 4. Зависимость $G(P_{\text{накач.}})$ EDFA-усилителя
Fig. 4. Dependence of the $G(P_{\text{pump}})$ EDFA Amplifier

Потери в оптическом разветвителе можно компенсировать за счет увеличения мощности сигнала накачки путем установки более мощного блока накачки.

Расчет требуемой мощности удаленного блока накачки выполняется аналитически:

$$P_{\text{БН}} - N_{\text{уу}}L_{\text{уу}}\alpha_{\text{км}} - N_{\text{НС}}\alpha_{\text{НС}} - N_{\text{РС}}\alpha_{\text{РС}} - N_{\text{ОР}}\alpha_{\text{ОР}} - \alpha_{\text{WDM}} = P_{\text{НАКАЧ.}} \quad (1)$$

где $P_{\text{БН}}$ – мощность сигнала накачки на выходе удаленного блока накачки, дБм; L – длина усилительного участка, км; $\alpha_{\text{км}}$ – километрическое затухание оптоволоконна, дБ/км; $N_{\text{НС}}$ – количество неразъемных (сварных) соединений; $\alpha_{\text{НС}}$ – затухание в неразъемном (сварном) соединении, дБ; $N_{\text{РС}}$ – количество разъемных соединений; $\alpha_{\text{РС}}$ – затухание в разъемном соединении, дБ; $N_{\text{ОР}}$ – количество оптических разветвителей; $\alpha_{\text{ОР}}$ – затухание в оптическом разветвителе, дБ; α_{WDM} – затухание в WDM-смесителе, дБ.

Количество разъемных соединений составляет минимум два – в кроссе и в удаленном блоке накачке.

Количество неразъемных соединений рассчитывается аналитически:

$$N_{\text{НС}} = N_{\text{уу}} \left(\frac{L_{\text{уу}}}{L_{\text{СТР}}} + 2 \right), \quad (2)$$

где $L_{\text{уу}}$ – длина усилительного участка; $L_{\text{СТР}}$ – строительная длина волоконно-оптического кабеля; 2 – учет сварок в кроссе и в муфте при разварке оптического разветвителя, пояснение представлено на рисунке 5.

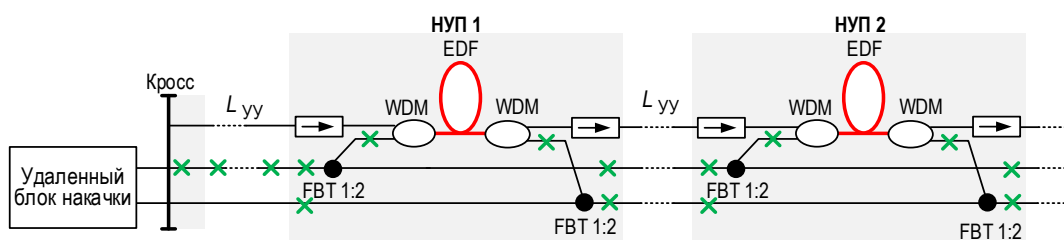


Рис. 5. Визуализация количества сварных соединений
Fig. 5. Visualization of the Number of Welded Joints

Из рисунка 5 видно, что $N_{OP} = N_{yy}$. Подставляя (2) в (1) и вынося множитель $N_{yy}L_{yy}$ за скобки, выражение (1) примет вид (3):

$$P_{BH} - N_{yy}L_{yy}\alpha_{км} - N_{yy}\left(\frac{L_{yy}}{L_{СТР}} + 2\right)\alpha_{НС} - N_{РС}\alpha_{РС} - N_{yy}\alpha_{OP} - \alpha_{WDM} = P_{НАКАЧ.},$$

$$P_{BH} - N_{yy}L_{yy}\alpha_{км} - \frac{N_{yy}L_{yy}\alpha_{НС}}{10} - 2N_{yy}\alpha_{НС} - N_{yy}\alpha_{OP} - N_{РС}\alpha_{РС} - \alpha_{WDM} = P_{НАКАЧ.},$$

$$P_{BH} - N_{yy}L_{yy}\left(\alpha_{км} + \frac{\alpha_{НС}}{L_{СТР}} + \frac{2\alpha_{НС}}{L_{yy}} + \frac{\alpha_{OP}}{L_{yy}}\right) - N_{РС}\alpha_{РС} - \alpha_{WDM} = P_{НАКАЧ.} \quad (3)$$

Для известных значений, встречающихся на практике, $\frac{2\alpha_{НС}}{L_{yy}}$ и $\frac{\alpha_{НС}}{L_{СТР}}$ можно пренебречь, тогда:

$$P_{BH} - N_{yy}L_{yy}\left(\alpha_{км} + \frac{\alpha_{OP}}{L_{yy}}\right) - N_{РС}\alpha_{РС} - \alpha_{WDM} = P_{НАКАЧ.} \quad (4)$$

Полагая, что $P_{НАКАЧ.} = 23$ дБм, $\alpha_{РС} = 0,3$ дБ и $\alpha_{WDM} = 4$ дБ, получены графики зависимости $P_{BH}(N_{yy}; L_{yy})$ для двух длин волн накачки 980 нм и 1480 нм, при длине усилительного участка 120 км и количества НУП, равных трем (рисунок 6). Затухания сигналов накачки в стандартном одномодовом волокне принято равными 0,6 и 0,25 дБ/км.

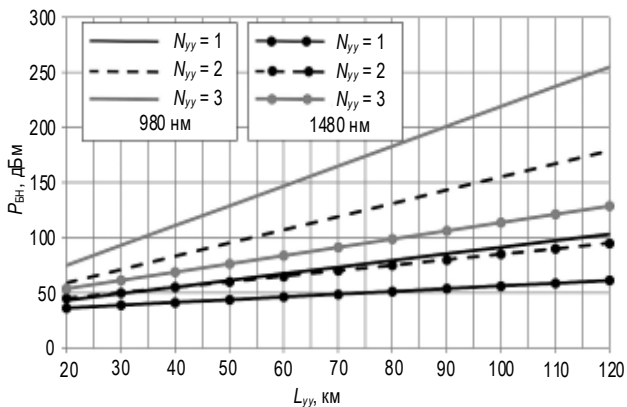


Рис. 6. Графики зависимости $P_{BH}(N_{yy}; L_{yy})$, накачка по оптоволоконной шине

Fig. 6. Graphs of $P_{BH}(N_{AS}; L_{AS})$ Dependence, Fiber-Optic Bus Pumping

Из графика видно, что длина волны накачки 1480 нм является более подходящей для организации удаленной накачки EDF-волокна. Для удаленной накачки трех усилителей по общей оптической шине, размещенных равномерно в линии протяженностью 480 км, потребуется блок накачки мощностью 129 дБм (7,9 ГВт). Очевидно, что реализовать схему, представленную на рисунке 3, невозможно, по причине того, что нет подобных источников излучения и подходящих оптических волокон, способных передать сигнала такой мощности. В случае, если накачку EDF-волокна реали-

зовать с двух сторон, то даже в этом случае требуется применить достаточно мощный блок накачки – 95 дБм (3,1 МВт).

Выражение (4) справедливо и для схемы с накачкой по выделенному оптоволокну (см. рисунок 1). Поскольку в этой схеме отсутствуют оптические разветвители, тогда в формуле (4) $\alpha_{OP} = \alpha_{НС}$ и величиной $\frac{\alpha_{OP}}{L_{yy}}$ можно пренебречь:

$$P_{BH} - N_{yy}L_{yy}\alpha_{км} - N_{РС}\alpha_{РС} - \alpha_{WDM} = P_{НАКАЧ.} \quad (5)$$

Для схемы на рисунке 1 также получены графики зависимости $P_{BH}(N_{yy}; L_{yy})$, представленные на рисунке 7, на котором для визуального сравнения приведены графики для схем удаленной накачки по оптоволоконной шине и выделенному оптоволокну. Видно, что отсутствие оптического разветвителя FBT в большей степени не влияет на снижение мощности блока накачки. Для линии протяженностью 480 км с тремя НУП потребуется применить удаленный блок накачки мощностью 117 дБм (0,5 ГВт) (см. рисунок 7). В случае, если накачка в схеме с выделенным волокном будет реализована также с двух сторон, то потребуется применить удаленный блок накачки мощностью 87 дБм (500 кВт), что также нереализуемо на практике.

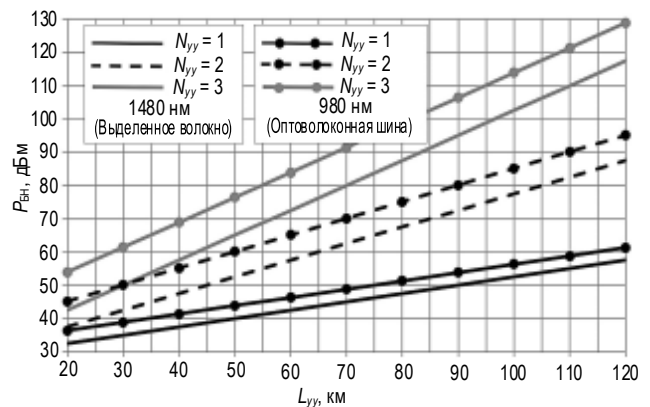


Рис. 7. Графики зависимости $P_{BH}(N_{yy}; L_{yy})$, накачка по выделенному волокну

Fig. 7. Graphs of $P_{BH}(N_{AS}; L_{AS})$ Dependence, Pumping via Dedicated Fiber

Однако, если длину секции сократить до 360 км, в которой будет задействовано два EDFA-усилителя, и удаленную накачку реализовать с двух сторон по выделенным волокнам (рисунок 8), то потребуется применить удаленный блок накачки мощностью 57 дБм (501 Вт).

Применяемые на магистральных линиях связи оптические волокна стандартов G.652.D, G.657.A1 и G.655.D не позволят эффективно передать сигнал накачки мощностью 57 дБм (501 Вт) из-за малой эффективной площади, которая в среднем составляет 80 мкм². Передача сигнала такой мощности может привести к его разрушению из-за оптического разряда [1]. Что касается источника оптического излучения мощностью до 500 Вт, то такие

источники имеются, но применение их в телекоммуникациях нецелесообразно из-за короткого срока службы (составляет несколько тысяч часов)

по сравнению с десятками тысяч часов у лазерных диодов, применяемых в телекоммуникационном оборудовании для передачи сообщений.

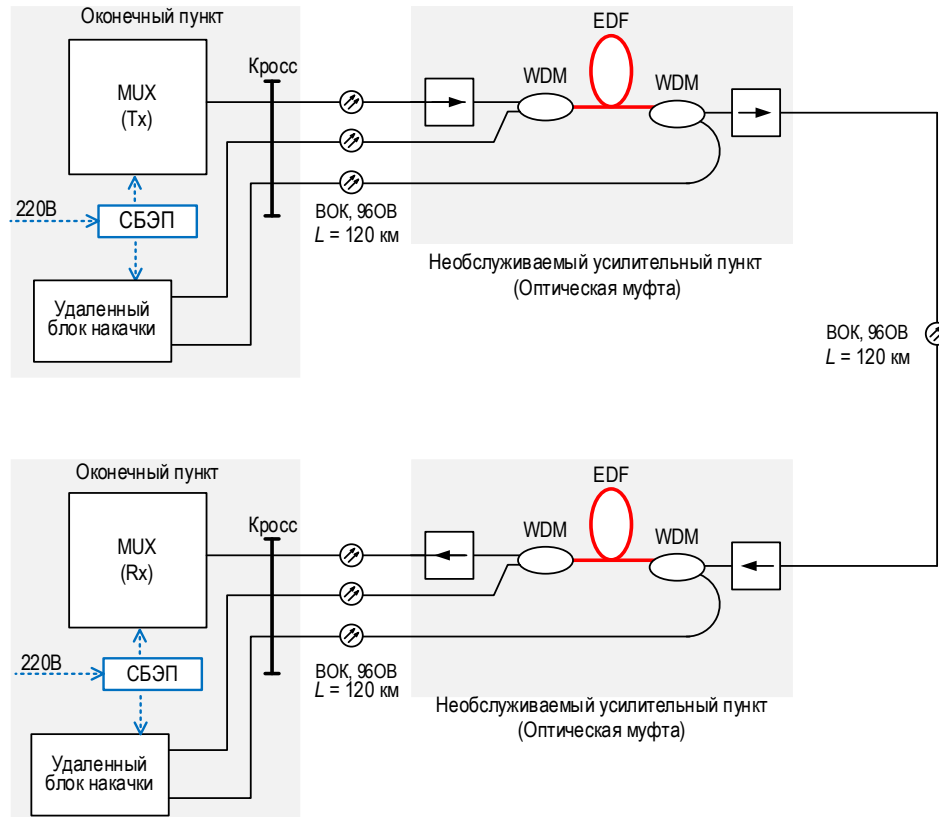


Рис. 8. Концепция длиннопротяжного тракта передачи с удаленной накачкой EDF волокна по выделенному волокну

Fig. 8. The Concept of a Long-Span Transmission Path with Remote Pumping of EDF Fiber Over a Dedicated Fiber

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что преградой в реализации удаленной накачки EDF-волокна является оно само и оптическое волокно, по которому передается сигнал накачки. Решить эту задачу можно комплексно.

Во-первых, можно применить оптоволокно с более эффективной площадью, чем у волокон стандарта G.652.D, G.657.A1 и G.655.D, и с меньшим километрическим затуханием, например, оптоволокно стандарта G.654.E. Это волокно характеризуется эффективной площадью 125 мкм^2 и километрическим затуханием $0,21 \text{ дБ/км}$ на длине волны 1480 нм . Выигрыш в мощности блока накачки, по сравнению с километрическим затуханием $0,25 \text{ дБ/км}$ в усилительном участке длиной 120 км , составит $4,8 \text{ дБ}$, то есть потребуется применить блок накачки мощностью $52,8 \text{ дБм}$ (190 Вт).

Во-вторых, можно уменьшить мощность сигнала накачки на вводе EDF-волокна до минимальной величины, при которой коэффициент усиления будет эквивалентен затуханию усилительного участка. Для этого можно применить EDF-волокно марки AOB I-25 производства компании Fibercore, которое позволяет усилить сигнал на 31 дБ при мощности сигнала накачки $11,7 \text{ дБм}$ (15 мВт) и

длины EDF-волокна $3,5 \text{ м}$ (рисунок 9) [2]. Тогда, из зависимости $P_{\text{БН}}(N_{\text{УУ}}; L_{\text{УУ}})$ (рисунок 10), полученной при $P_{\text{НАКАЧ.}} = 11,7 \text{ дБм}$ и $\alpha_{\text{км}} = 0,21 \text{ дБ/км}$, мощность удаленного блока накачки для схемы с удаленной накачкой двух НУП по выделенному волокну составит $41,5 \text{ дБм}$ (14 Вт). Если $P_{\text{НАКАЧ.}} = 7 \text{ дБм}$ (5 мВт), то при тех же условиях $P_{\text{БН}} = 36,8 \text{ дБм}$ ($4,8 \text{ Вт}$). При таких условиях реализация ROPA-усилителя становится потенциально возможной как на проектируемых, так и на действующих ВОЛС (волоконно-оптическая линия связи).

Рассмотренные схемы реализации удаленной накачки EDF-волокна имеют общий недостаток – требуется выделить два оптоволокна на один НУП. В случае, если в действующей или проектируемой ВОЛС потребуется реализация НУП с удаленной накачкой, а свободных волокон не окажется, можно применить схему (рисунок 11), в которой сигнал накачки можно передавать в сигнальном волокне (в волокне, где передается информационный сигнал). Тогда EDF-волокно будет подключаться непосредственно к сигнальному волокну без использования WDM-смесителей и оптических изоляторов.

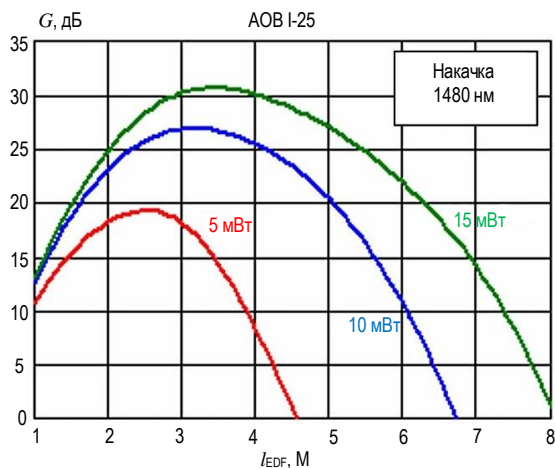


Рис. 9. Зависимости $G(L_{EDF})$ волокна АОВ I-25 (попутная или встречная накачка) [2]

Fig. 9. Dependencies $G(L_{EDF})$ of AOV I-25 Fiber (Passing or Counter Pumping) [2]

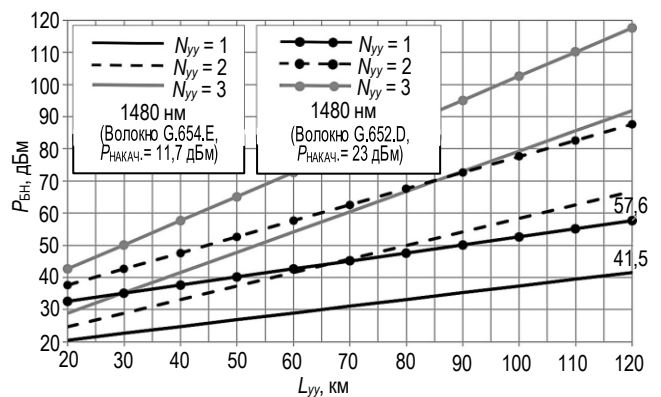


Рис. 10. Графики зависимости $P_{ВН}(N_{УУ}; L_{УУ})$, накачка по выделенному волокну при $P_{НАКАЧ.} = 11,7$ и 23 дБм

Fig. 10. Graphs of $P_{ВН}(N_{УУ}; L_{УУ})$ Dependence, Dedicated Fiber Pumping at $P_{PUMP.} = 11,7$ dBm and $P_{PUMP.} = 23$ dBm

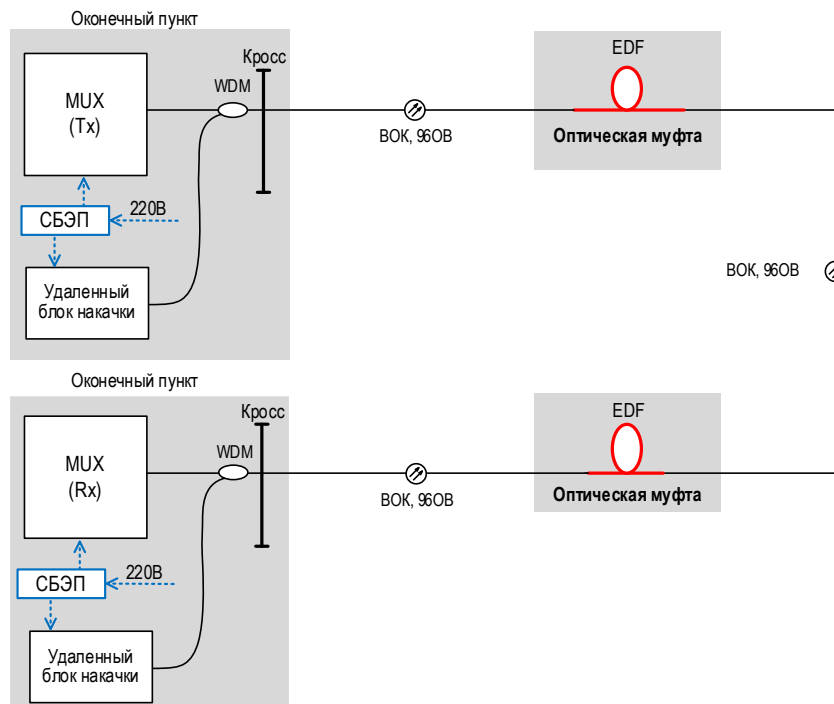


Рис. 11. Концепция длиннопротяжного тракта передачи с удаленной накачкой EDF-волокна по информационному волокну

Fig.11. The Concept of a Long-Span Transmission Path with Remote Pumping of EDF Fiber Over an Information Fiber

WDM-смеситель, как и блок накачки, будет размещаться в оконечном пункте связи. В такой схеме имеются недостатки. Во-первых, из-за односторонней накачки EDF-волокна данная схема будет менее эффективна на 2–3 дБ в сравнении с двухсторонней накачкой [3]. Во-вторых, сложность разварки EDF-волокна с волокном G.652.D или G.654.E из-за разных структур показателей преломления и примесей в волокнах. В-третьих, возможное искажение информационного сигнала нелинейными явлениями, вызванными за счет параллельной передачи более мощного сигнала накачки (более 17 дБм) в информационном волокне.

Сравнительный анализ схем удаленной накачки EDF-волокна

На основании проведенного анализа и расчетов мощности накачки можно провести сравнительную оценку трех основных схем организации удаленной накачки EDF-волокна в НУП. Критериями для сравнения служат: требуемая мощность источника накачки, необходимое количество оптических волокон, максимальная достижимая длина секции, технологическая сложность реализации и риск нелинейных искажений. Результаты сравнения сведены в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные характеристики схем удаленной накачки EDF-волокна

TABLE 1. Comparative Characteristics of EDF Fiber Remote Pumping Schemes

Критерий	Накачка по выделенному волокну	Накачка по волоконной шине	Накачка по сигнальному волокну
Требуемая мощность накачки	Средняя	Очень высокая	Низкая
Расход волокон	Высокий (2 волокна на НУП)	Низкий (2 волокна на всю линию)	Отсутствует (используется сигнальное волокно)
Потенциальная длина секции	Высокая	Низкая	Средняя
Технологическая сложность	Низкая	Средняя	Высокая
Риск нелинейных искажений	Отсутствует	Отсутствует	Высокий

Как видно из таблицы 1, схема с накачкой по выделенному волокну является наиболее сбалансированным и предсказуемым решением для новых проектов, обеспечивая баланс между реализуемой мощностью, дальностью и надежностью. Схема с оптоволоконной шиной из-за потерь в разветвителях признана непрактичной. Схема накачки по информационному волокну представляет особый интерес для модернизации действующих волоконно-оптических линий при дефиците свободных волокон, однако ее внедрение требует проведения предварительных исследований, моделирования и натурных испытаний для количественной оценки воздействия нелинейных эффектов (фазовая кросс-модуляция, четырехволновое смешение) на фазовые форматы модуляции (DP-QPSK, DP-16QAM) при скоростях передачи данных от 100 до 400 Гбит/с. Таким образом, выбор схемы определяется конкретными условиями проекта: наличием резерва волокон, требуемой дальностью и допустимым уровнем технологического риска.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сформулировать практико-ориентированные заключения, позволяющие принимать обоснованные инженерные решения при проектировании длиннопролетных ВОЛС на базе НУП, представляющих собой оптическую муфту, в которой установлено EDF-волокно.

1) С технической точки зрения организация удаленной накачки EDF-волокна по выделенному или информационному оптоволокну не вызывает принципиальных затруднений.

2) Схема с выделенным волокном для удаленной накачки позволяет организовать линию связи с двумя НУП протяженностью 360 км, что отчетливо видно из полученных графиков зависимости $P_{\text{БН}}(N_{\text{УУ}}; L_{\text{УУ}})$. При этом, дальность связи в 360 км будет достигнута за счет применения дистанционного блока накачки мощностью 36,8 дБм (4,8 Вт) и волокна стандарта G.654.E.

Стоит отметить, что результаты коррелируют с результатами других научных работ [2, 4–8]. Особо

стоит отметить работы [5–8], в которых была достигнута длина пролета в 500–600 км, также при двух линейных НУП, но при наличии бустера и предусилителя, представляющие собой совместную работу ROA- и EDFA-усилителей. Достигается такая дальность связи в случае, если длины усилительных участков бустерной и предусилительной части обеспечат баланс между мощностью блока накачки (до 2 Вт), минимальной мощностью сигнала накачки в EDF-волокне (при которой уровень мощности информационного сигнала на выходе EDF-волокна будет больше 0 дБм) и его чувствительностью. А за счет применения ROA-усилителей длину усилительного участка между первым и вторым НУП можно увеличить до 250–300 км. Также стоит обратить внимание на оптимальный уровень мощности информационного сигнала на входе EDF-волокна, от которого зависит коэффициент усиления и уровень мощности сигнала на выходе EDF-волокна (рисунок 12). Таким образом, на практике следует уделять особое внимание применяемой разновидности EDF-волокна.

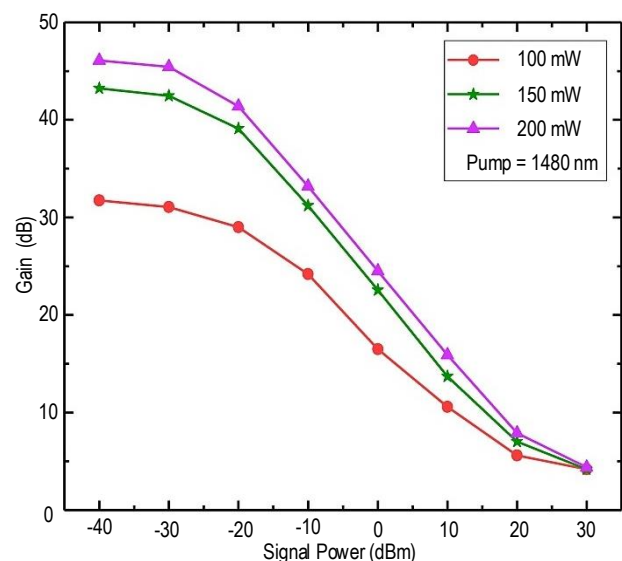


Рис. 12. Графики зависимости коэффициента усиления от мощности сигнала накачки и информационного сигнала [3]

Fig. 12. Gain Dependence on the Information Signal and Pump Power [3]

3) В схеме с накачкой по информационному волокну имеется высокий риск нелинейных искажений (FWM, SBS, XPM) информационного сигнала, вызванных за счет параллельной передачи более мощного сигнала накачки (более 17 дБм). Очевидно, что реализация такой схемы на практике возможна, но длина пролета будет значительно меньше 360 км. Для решения этой проблемы можно применить специальное оптоволокно с большей эффективной площадью, например, 160–320 мм².

4) Зная пороговую чувствительность EDF-волокна (P_{MIN_EDFA}) и максимально допустимый уровень информационного сигнала (P_{MAX_INF}) в начале линии, при котором влияние нелинейных явлений не ведет к существенному росту ошибок на приеме, для расчета мощности блока питания можно применить упрощенную формулу:

$$P_{MAX_INF} - L_{yy}\alpha_{км} - \left(\frac{L_{yy}}{L_{СТР}} + 2\right)\alpha_{НС} - N_{РС}\alpha_{РС} - \alpha_{WDM} = P_{MIN_EDFA}. \quad (6)$$

Выражая из (6) длину усилительного участка и подставляя в (5), пренебрегая величинами $\frac{\alpha_{НС}}{L_{СТР}}$ и $2\alpha_{НС}$, поскольку $\alpha_{НС}$ варьируется на практике от 0,03 до 0,06 дБ, для $N_{yy} = 1$ получим:

$$P_{БН} = P_{НАКАЧ.} + P_{MAX_INF} - P_{MIN_EDFA}.$$

Практические рекомендации по реализации НУП с удаленной накачкой

В схеме с удаленной накачкой по выделенному оптоволокну следует:

- заложить запас оптической мощности блока накачки в 3–5 дБм для компенсации дополнительных потерь за счет старения компонентов ВОЛС;

Список источников

1. Зими́на Т. Свет разрушает световоды // Наука и жизнь. 2008. URL: <https://www.nkj.ru/news/12589> (дата обращения 20.11.2025)
2. Белаиди М., Былина М.С. Исследование возможности применения оптического усилителя EDFA с удаленной накачкой // VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2017, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 01–02 марта 2017 г.). СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2017. Т. 2. С. 78–83. EDN:YRPZUZ
3. Malakzadeh A., Pashaie R., Mansoursamaei M. Gain and noise figure performance of an EDFA pumped at 980 nm or 1480 nm for DOFSs // Optical and Quantum Electronics. 2020. Vol. 52. Iss. 2. P. 75. DOI:10.1007/s11082-019-2186-0. EDN:UYCHMW
4. Шихалиев И.И. Увеличение производительности однопролетных когерентных линий связи с рамановскими усилителями. Автореферат дис. ... канд. техн. наук М.: Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 2019. 25 с.
5. Гайнов В.В., Гуркин Н.В., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Сверхдлинные однопролетные линии связи с удаленной накачкой оптических усилителей // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 4. С. 83–89. EDN:UJMNTB
6. Анпилов С.А. Приангарье. Первое в России внедрение каналов связи на 360 км в один пролет // Фотон-экспресс. 2015. № 4(124). С. 26–27. EDN:UXQDTN
7. Попов С. Рекорд российских разработчиков оборудования DWDM // Первая миля. 2019. № 1(78). С. 42–45. DOI:10.22184/2070-8963.2019.78.1.42.45. EDN:SRUDGX
8. Zhu B., Borel P.I., Geisler T., Jensen R., Jiang X.D.W. Peckham Unrepeated Transmission of 400Gb/s over 557km and 100Gb/s over 590km with Single Fibre Configuration // Proceedings of the European Conference on Optical Communication (ECOC, Rome, Italy, 23–27 September 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/ECOC.2018.8535138

References


1. Zimina T. Light destroys light guides. *Science and Life*. 2008. (in Russ.) URL: <https://www.nkj.ru/news/12589> [Accessed 20.11.2025]
2. Belaidi M., Bylina M.S. Study of the Opportunity of Application of the EDFA Removable Pumping. *Proceedings of the VIth International Scientific, Technical and Scientific-Methodical Conference on Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education, 01–02 March 2017, St. Petersburg, Russian Federation, vol.2*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2017. p.78–83. (in Russ.). EDN:YRPZUZ
3. Malakzadeh A., Pashaie R., Mansoursamaei M. Gain and noise figure performance of an EDFA pumped at 980 nm or 1480 nm for DOFSs. *Optical and Quantum Electronics*. 2020;52(2):75. DOI:10.1007/s11082-019-2186-0. EDN:UYCHMW
4. Shikhaliev I.I. *Increasing the Productivity of Single-Span Coherent Communication Lines with Raman Amplifiers*. Ph.D. Thesis. Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology Publ.; 2019. 25 p.
5. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinykh S.N., Naniy O.E., Treshchikov V.N. Ultra-long single-span communication lines with remote pumping of optical amplifiers. *Technical Physics*. 2015;60(4):561–567. (in Russ.) EDN:UFTDEN
6. Anpilov S.A. Angara region. The first in Russia implementation of communication channels for 360 km in one span. *Photon-express*. 2015;4(124);26–27. (in Russ.) EDN:UXQDTN
7. Popov S. Record of Russian DWDM equipment developers. *Last Mile*. 2019;1(78):42–45. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2019.78.1.42.45. EDN:SRUDGX
8. Zhu B., Borel P.I., Geisler T., Jensen R., Jiang X.D.W. Peckham Unrepeated Transmission of 400Gb/s over 557km and 100Gb/s over 590km with Single Fibre Configuration. *Proceedings of the European Conference on Optical Communication, ECOC, 23–27 September 2018, Rome, Italy*. IEEE; 2018. DOI:10.1109/ECOC.2018.8535138

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена после рецензирования 12.12.2025; принята к публикации 19.12.2025.


The article was submitted 20.11.2025; approved after reviewing 12.12.2025; accepted for publication 19.12.2025.

Информация об авторах:


**ШЕСТАКОВ
Иван Игоревич**

кандидат технических наук, доцент кафедры многоканальной электрической связи Уральского технического института связи и информатики (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге
 <https://orcid.org/0009-0007-9381-9179>

**ГНИЛОМЕДОВ
Ефим Иванович**

доцент кафедры многоканальной электрической связи Уральского технического института связи и информатики (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге
 <https://orcid.org/0009-0006-5208-2804>

**МИНИНА
Елена Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры многоканальной электрической связи Уральского технического института связи и информатики (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге
 <https://orcid.org/0009-0002-0460-1228>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.