

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-907-912

УДК 681.787

**Методика компенсации постоянной составляющей шумов
рефлектограммы волоконно-оптической линии связи
в условиях недостаточного динамического диапазона
оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области**

**Александр Андреевич Сандровский¹✉, Илья Александрович Шарков²,
Михаил Юрьевич Плотников³, Святослав Анатольевич Ушанов⁴,
Денис Борисович Гончаров⁵, Евгений Евгеньевич Карпов⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{1,5} АО «Управление перспективных технологий», Москва, 111033, Российская Федерация

¹ aasandrovskii@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0003-1562-9362>

² isharkov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2047-5738>

³ plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

⁴ saushanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>

⁵ denis.goncharov.1998@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0021-9737>

⁶ eeekarpov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9822-9898>

Аннотация

Введение. Предложена методика компенсации постоянной шумовой составляющей рефлектограмм для когерентного оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области. Представленное решение обеспечивает корректную визуализацию рефлектограмм, улучшает их читаемость и позволяет осуществлять регистрацию слабых отраженных сигналов с волоконной линии связи. Экспериментальная апробация методики проведена на действующем образце когерентного оптического рефлектометра. **Метод.** Для компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограммы предложено регистрировать сигнал шумов со входного тракта рефлектометра непосредственно до отправки оптического зондирующего сигнала в линию связи. Полученные таким образом данные не несут в себе полезного сигнала с линии связи. При этом данные можно использовать для определения постоянной составляющей уровня шума с помощью вычисления его среднеквадратического значения. Компенсация постоянного уровня шума осуществляется путем вычитания постоянной составляющей шумов из данных всей рефлектограммы. **Основные результаты.** Апробация описанной методики выполнена на действующем образце когерентного оптического рефлектометра, разработанного в научно-исследовательском центре световодной фотоники Университета ИТМО. Методика апробирована на двух тестовых волоконных линиях: оптическом волокне длиной 200 км и линии длиной 300 км с тремя оптическими усилителями. Показано, что применение методики позволяет существенно расширить динамический диапазон сигналов, представленных на рефлектограммах, на величину более 10 дБ, и повысить различимость слабых сигналов на уровне шумов прибора. **Обсуждение.** Практическая значимость работы заключается в возможности компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограммы волоконно-оптической линии связи с оптическими усилителями без калибровок и предварительных настроек когерентного оптического рефлектометра.

Ключевые слова

когерентный рефлектометр, оптическая рефлектометрия, шум, волоконно-оптическая линия связи

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Сандровский А.А., Шарков И.А., Плотников М.Ю., Ушанов С.А., Гончаров Д.Б., Карпов Е.Е. Методика компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограммы волоконно-оптической линии связи в условиях недостаточного динамического диапазона оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 907–912. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-907-912

© Сандровский А.А., Шарков И.А., Плотников М.Ю., Ушанов С.А., Гончаров Д.Б., Карпов Е.Е., 2024

Method for compensating the constant component of noise in the reflectogram of a fiber-optic communication line under conditions of insufficient dynamic range of an optical backscatter reflectometer in the time domain

Alexandr A. Sandrovskii¹✉, Ilya A. Sharkov², Mikhail Yu. Plotnikov³, Svyatoslav A. Ushanov⁴, Denis B. Goncharov⁵, Evgenii E. Karpov⁶

^{1,2,3,4,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{1,5} JSC Department of Advanced Technologies, Moscow, 111033, Russian Federation

¹ aasandrovskii@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-1562-9362>

² isharkov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2047-5738>

³ plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

⁴ saushanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>

⁵ denis.goncharov.1998@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0021-9737>

⁶ eekarpov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9822-9898>

Abstract

A method for compensating for the constant noise component of reflectograms for a coherent optical backscatter reflectometer in the time domain is proposed. The presented solution ensures correct visualization of reflectograms, improves their readability and allows recording weak reflected signals from a fiber communication line. The experimental testing of the method was carried out on a working sample of a coherent optical reflectometer. To compensate for the constant component of reflectogram noise, it is proposed to record the noise signal from the input path of the reflectometer immediately before sending the optical probing signal to the communication line. The data obtained in this way do not contain a useful signal from the connection line. In this case, the data can be used to determine the constant component of the noise level by calculating its root mean square value. Compensation for the constant noise level is performed by subtracting the constant component of the noise from the data of the entire reflectogram. The described method was tested on a working sample of a coherent optical reflectometer developed at the Light-Guided Photonics Research Center of ITMO University. The technique was tested on two test fiber lines: a 200-km-long optical fiber and a 300-km-long line with three optical amplifiers. It was shown that the application of the technique allows to significantly expand the dynamic range of signals presented on reflectograms by more than 10 dB and to increase the distinguishability of weak signals at the noise level of the device. The practical significance of the work lies in the possibility of compensating for the constant component of noise in the reflectogram of a fiber-optic communication line with optical amplifiers without calibrations and preliminary settings of the coherent optical reflectometer.

Keywords

coherent reflectometer, optical-reflectometry, COTDR, noise, fiber-optic communication line

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Sandrovskii A.A., Sharkov I.A., Plotnikov M.Yu., Ushanov S.A., Goncharov D.B., Karpov E.E. Method for compensating the constant component of noise in the reflectogram of a fiber-optic communication line under conditions of insufficient dynamic range of an optical backscatter reflectometer in the time domain. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 907–912 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-907-912

Введение

Развитие телекоммуникационных систем, передающих огромные объемы информации на все большие расстояния, неразрывно связано с появлением протяженных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), использующих оптические усилители для компенсации потерь в линии и восстановления мощности сигнала. На данный момент подолные ВОЛС являются одним из основных средств передачи данных между удаленными регионами по всему миру [1].

Анализ состояния ВОЛС с оптическими усилителями производится при помощи специализированных приборов — когерентных оптических рефлектометров обратного рассеяния во временной области (Coherent Optical Time Domain Reflectometer, COTDR) [2–4]. COTDR позволяют определять оптические потери в линиях связи, производить локализацию дефектов, а также контролировать работоспособность и режимы работы оптических усилителей [5, 6].

Результатом работы рефлектометра является рефлектограмма. В общем случае рефлектограмма представляет собой график, отображающий уровень оптического сигнала, рассеянного неоднородностями волокна в обратном направлении при прохождении мощного зондирующего импульса в линии связи.

В регистрируемом сигнале COTDR всегда присутствует шум, обусловленный наличием как собственных шумов рефлектометра, так и уровнем спонтанного оптического излучения от оптических усилителей при их наличии в исследуемой линии связи. Этот шум в ходе накопления и усреднения данных COTDR преобразуется в сумму постоянной и шумовой составляющих, которые затрудняют распознавание слабоотражающих событий на уровне шума в линии связи. Этот эффект значительно уменьшает возможность регистрации дефектов и влечет за собой недооценку динамического диапазона рефлектометра [7].

Оптические рефлектометры обратного рассеяния во временной области (Time Domain Reflectometer, OTDR),

как правило, работают с оптическими волокнами в линиях без усилителей, где постоянная составляющая шумов определяется только их собственными шумами и не зависит от линии связи. В OTDR обычно производится предварительный расчет постоянной составляющей шумов (их калибровка). Для этого осуществляется запуск прибора без подключения к ВОЛС, затем вычисляется среднеквадратичное значение полученных шумовых данных. В дальнейшем при снятии рефлектограммы полученное значение известной и неизменной постоянной составляющей шумов вычитается из сигнала рефлектометра.

COTDR, в отличие от OTDR, работает с ВОЛС с оптическими усилителями, которые вносят основной вклад в шумовую составляющую за счет шумов усиленного спонтанного излучения (Amplified Spontaneous Emission, ASE). В подобных линиях отсутствует возможность предварительной оценки уровня шума, поскольку он зависит от количества и режимов работы расположенных в линии оптических усилителей [8–12]. Таким образом возникает необходимость компенсации постоянной составляющей шумов при каждом запуске COTDR.

В известных научных работах не представлены методики по компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограмм COTDR. В настоящей работе предложена новая методика, которая позволяет проводить компенсацию постоянной составляющей шумов рефлектограмм COTDR за счет предварительной оценки ее шумов, получаемых после подключения к исследуемой линии связи с оптическими усилителями, непосредственно до ввода в линию зондирующего оптического сигнала.

Методика компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограммы волоконно-оптической линии связи в условиях недостаточного динамического диапазона оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области

При работе COTDR в линии связи с оптическими усилителями невозможно заранее определить величину шумов, так как она зависит от количества усилителей в линии и их рабочих характеристик. В предложенной методике сначала выполняется измерение шумов в сигнале с рефлектометра непосредственно до отправки зондирующего импульса в линию связи (37 км (участок А) на рис. 1). Как видно из рис. 1 уровень сигнала в области участка А соответствует уровню сигнала в конце линии (область после 237 км).

Участок А используется для расчета среднеквадратического значения шумов (RMS) в линии по формуле:

$$RMS = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2},$$

где X_i — отсчеты, снятые рефлектометром на участке А; $N = 14\,000$ — количество отсчетов, снятых рефлектометром до отправки зондирующего сигнала в линию связи.

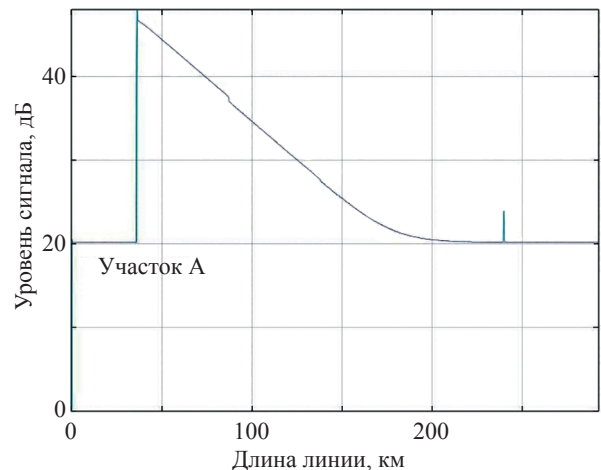


Рис. 1. Рефлектограмма, снятая с помощью COTDR на макете линии без оптических усилителей

Fig. 1. Reflectogram taken with COTDR on a line layout without optical amplifiers

Последующий участок рефлектограммы рассчитывается с использованием вычисленного значения RMS:

$$Y_{ilog} = 5 \times \log_{10}(Y_{iuncor} - RMS),$$

где Y_{iuncor} — данные, снятые с фотоприемника; Y_{ilog} — значения рефлектограммы после компенсации постоянной составляющей шумов.

Далее от исходной рефлектограммы отсекается участок А, т. е. первые 14 000 точек, не отображающих полезный сигнал с линии.

Описание эксперимента

В результате эксперимента были исследованы рефлектограммы, полученные с помощью действующего образца COTDR на двух тестовых макетах линий связи: без и с использованием оптических усилителей. Схема COTDR описана в работах [13, 14].

Основные оптические параметры рефлектометра, использовавшегося при проведении эксперимента: тип исследуемого оптического волокна — ITU-T G.652/G.654; длительность импульсов — 3, 10, 30, 60, 100 мкс; средняя выходная мощность оптического излучения — от 0 дБм до +10 дБм (шаг 0,5 дБм); длина измеряемой линии связи — не менее 1000 км (с участками регенерации не более 125 км); диапазон усреднений кратный степени «2» — от 2^8 до 2^{24} ; динамический диапазон (SWDR) (длительность импульсов 3 мкс, выходной оптической мощности 10 дБм и числе усреднений 2^{16} с применением разработанной методики) — 35,4 дБ.

Первый макет линии связи без усилителей (рис. 2, а) представлял собой катушку волокна ITU-T G.654, протяженностью около 200 км, подключенного к COTDR при помощи оптического патчкорда с FC/APC коннекторами. На конце линии располагался прямой оптический разъем типа FC/UPC для создания сигнала френелевского отражения, делающий конец линии более различимым. Регистрация и запись рефлектограмм про-

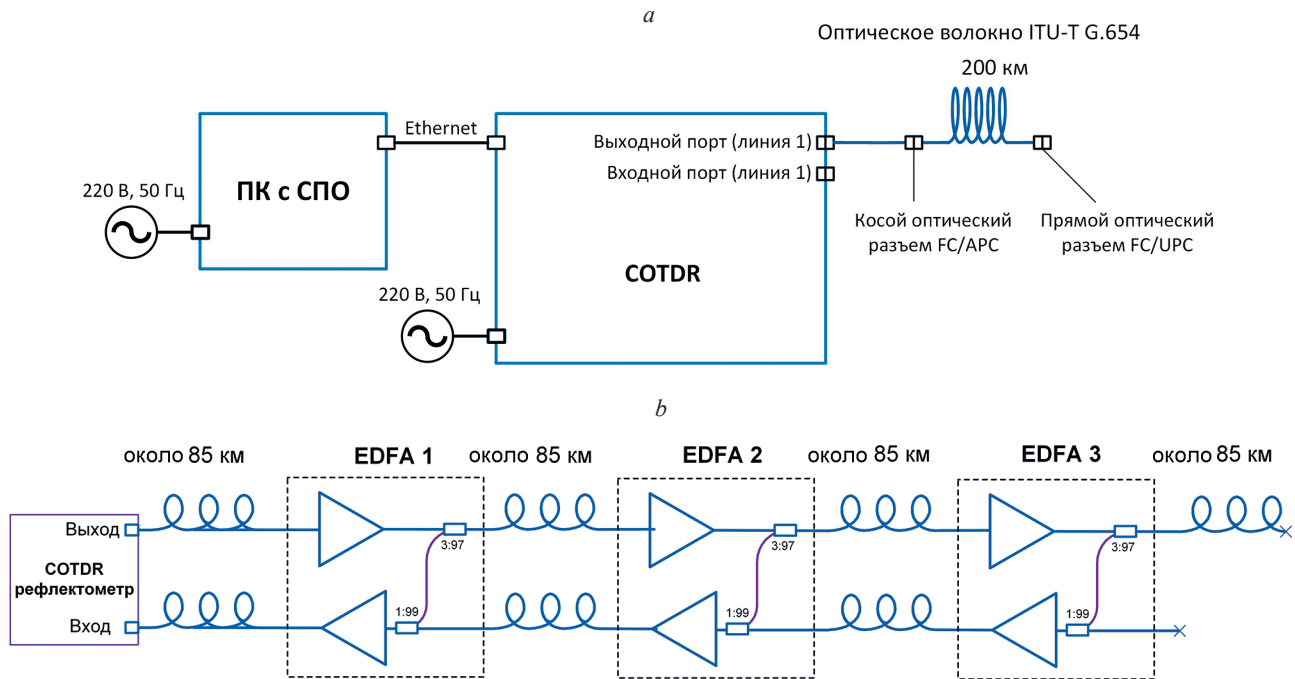


Рис. 2. Схемы волоконно-оптических линий связи без (а) и с (б) усилителями.

ПК с СПО — персональный компьютер со специальным программным обеспечением

Fig. 2. Schemes of fiber-optic communication lines without (a) and with (b) amplifiers.

ПК с СПО — personal computer with special software; COTDR рефлектометр — reflectometer COTDR

изводилась персональным компьютером, подключенным к рефлектометру через сетевой интерфейс Ethernet, при помощи специального программного обеспечения.

Второй макет линии связи с усилителями был собран по схеме, изображенной на рис. 2, б.

Линия связи (рис. 2, б) состояла из четырех последовательно расположенных участков волокна (катушки ITU-T G.654), соединенных оптическими усилителями (EDFA). Длина каждого участка оптического волокна

между усилителями составляла около 85 км. Метод подключения, регистрации и записи сигналов аналогичны схеме, показанной на рис. 2, а.

Результаты

На рис. 3, а представлены рефлектограммы первого макета исследуемой ВОЛС без усилителей без компенсации шумовой составляющей и с компенсацией

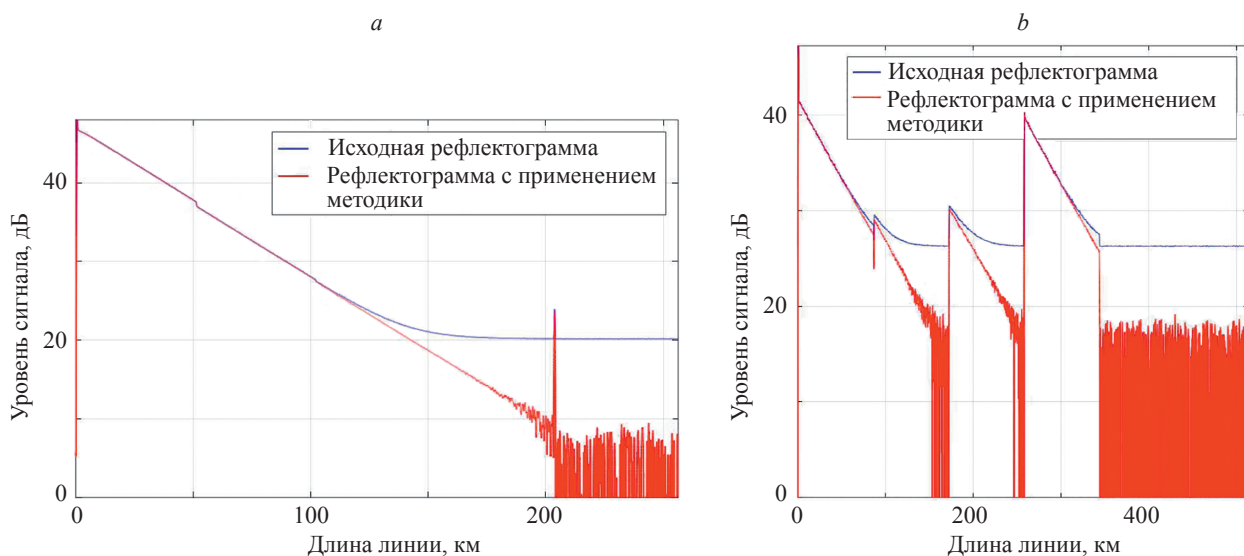


Рис. 3. Рефлектограммы первого (а) и второго (б) макетов линий связи при отсутствии оптических усилителей без уровня шума и с компенсацией по предложенной методике

Fig. 3. Reflectograms of the first (a) and second (b) communication line layouts in the absence of optical amplifiers without noise level and with compensation according to the proposed method

по предложенной методике без начального участка. Снятие рефлектограмм выполнено при длительности импульсов 3 мкс, средней выходной мощности оптического излучения 10 дБм, числе усреднений 2^{16} и диапазоне измерения 250 км.

Как видно из рис. 3, а, после компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограмма становится более линейной в области после 112 км. Также улучшается ее читаемость и возможность детектирования слабых дефектов линии в области свыше 180 км. В том числе увеличился видимый динамический диапазон COTDR [7].

На рис. 3, б представлена рефлектограмма, снятая со второго исследуемого макета линии связи с тремя оптическими усилителями без компенсации уровня шума и с компенсацией по предложенной методике без начального участка. Параметры COTDR использовались подобные, как и для рефлектограмм, представленных на рис. 3, а, за исключением диапазона измерений, который составил 500 км.

На рефлектограмме рис. 3, б четко прослеживаются участки усиления сигналов на 85 км, 170 км и 255 км — происходит резкое увеличение уровня регистрируемого оптического сигнала за счет работы оптических усилителей. Видно, что после компенсации шумов рефлектограмма линии с оптическими усилителями также становится более линейной в области, где значения полезного сигнала приближаются к постоянной составляющей (участки 140–170 км, 220–250 км); улучшается возможность детектирования возможных дефектов и увеличивается видимый динамический диапазон COTDR. Полученные результаты соответствуют известным особенностям работы COTDRs, описанных в работе [7].

Из рис. 3 также можно заметить значительную разницу в уровне шумов [7] COTDR в линии без оптических усилителей (около 20 дБ) и в линии с оптическими усилителями (около 26 дБ), что еще раз подтверждает необходимость применения предложенной методики при каждом измерении.

Заключение

В работе приведена методика компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограммы когерентного оптического рефлектометра, путем предварительного вычисления постоянного уровня шумов на участке рефлектограммы до момента ввода зондирующего импульса в линию связи. Разработанная методика позволяет проводить компенсацию шумовой составляющей в регистрируемых рефлектограммах во время работы, тем самым исключив необходимость калибровки прибора.

Проведенные измерения подтвердили, что уровень сигнала, принимаемого рефлектометром до ввода зондирующего импульса в волоконную линию, соответствует уровню шумов рефлектограммы после окончания линии связи. Таким образом, он может быть использован для компенсации постоянной составляющей шумов, увеличения видимого динамического диапазона, а также повышения читаемости рефлектограмм.

Предложенная методика компенсации постоянной составляющей шумов рефлектограммы волоконно-оптической линии связи используется в действующем образце когерентного оптического рефлектометра, разработанного в научно-исследовательском центре световой фотоники Университета ИТМО.

Литература

1. Undersea Fiber Communication Systems / ed. by J. Chesnoy. Academic Press, 2016. 702 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00778-X>
2. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
3. Hisashi I. Highly developed coherent detection OTDR technology and its applications to optical fiber networks monitoring. PhD dissertation, Waseda University, 2008 [Электронный ресурс]. URL: <http://waseda.repo.nii.ac.jp/record/20306/files/Honbun-4898.pdf> (дата обращения: 04.09.2024).
4. Yan K., Yang T., Wang L., Ren Z., Shi S., Zhao Y., Zhang Y., Chen X. A large dynamic range and polarization independent coherent OTDR scheme // Proc. of the Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2017). 2017. P. M1H.7. <https://doi.org/10.1364/acpc.2017.m1h.7>
5. Hiroyuki I., Kunihiro T., Fumihiko I. Frequency-division-multiplexing coherent OTDR for realizing effective construction and maintenance of submarine optical cable systems // NTT Technical Review. 2014. V. 12. N 10. P. 47–53. <https://doi.org/10.53829/ntr201410ra1>
6. Gautheron O., Leroy J.B., Marmier P. COTDR performance optimization for amplified transmission systems // IEEE Photonics Technology Letters. 1997. V. 9. N 7. P. 1041–1043. <https://doi.org/10.1109/68.593393>
7. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and Using Your Optical Time-Domain Reflectometer. Elsevier, 2004. 473 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-058661-5.X5020-4>

References

1. Undersea Fiber Communication Systems. Ed. by J. Chesnoy. Academic Press, 2016, 702 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00778-X>
2. Listvin A.V., Listvin V.N. *Reflectometry of Optical Fibers*. Moscow, LESARpt Publ., 2005, 208 p. (in Russian)
3. Hisashi I. *Highly developed coherent detection OTDR technology and its applications to optical fiber networks monitoring*. PhD dissertation, Waseda University, 2008. Available at: <http://waseda.repo.nii.ac.jp/record/20306/files/Honbun-4898.pdf> (accessed: 04.09.2024).
4. Yan K., Yang T., Wang L., Ren Z., Shi S., Zhao Y., Zhang Y., Chen X. A large dynamic range and polarization independent coherent OTDR scheme. *Proc. of the Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2017)*, 2017, pp. M1H.7. <https://doi.org/10.1364/acpc.2017.m1h.7>
5. Hiroyuki I., Kunihiro T., Fumihiko I. Frequency-division-multiplexing coherent OTDR for realizing effective construction and maintenance of submarine optical cable systems. *NTT Technical Review*, 2014, vol. 12, no. 10, pp. 47–53. <https://doi.org/10.53829/ntr201410ra1>
6. Gautheron O., Leroy J.B., Marmier P. COTDR performance optimization for amplified transmission systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, vol. 9, no. 7, pp. 1041–1043. <https://doi.org/10.1109/68.593393>
7. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. *Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and Using Your Optical Time-Domain Reflectometer*. Elsevier, 2004, 473 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-058661-5.X5020-4>

8. Furukawa S., Tanaka K., Koyamada Y., Sumida M. High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems // *Proc. of the 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.94CH3424-9). V. 1. 1994. P. 106–109. https://doi.org/10.1109/IMTC.1994.352115*
9. Tebe L.O., Efiyeseimokumo S.I., Ayibapreye K.B. MATLAB based simulation of BER performance of cascaded optical fibre amplifiers // *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development. 2022. V. 8. N 10. P. 8–14.*
10. Harun S.W., Subramaniam T., Tamchek N., Ahmad H. Gain and noise figure performances of L-band EDFA with an injection of C-band ASE // *Jurnal Teknologi. 2004. V. 40. P. 9–16. https://doi.org/10.11113/jt.v40.411*
11. Semmalar S., Malarkkan S. ASE noise analysis in cascaded EDFA-EYCDFA // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. V. 10. N 5. P. 2126–2131.*
12. King J., Smith D., Richards K., Timson P., Epworth R., Wright S. Development of a coherent OTDR instrument // *Journal of Lightwave Technology. 1987. V. 5. N 4. P. 616–624. https://doi.org/10.1109/JLT.1987.1075523*
13. Нестеров Е.Т., Слепцов М.А., Трещиков В.Н., Наний О.Е., Сусьян А.А. Когерентный оптический рефлектометр. Концепция создания прибора // *T-Comm. 2010. Т. 4. № 8. С. 51–54.*
14. Koyamada Y., Nakamoto H., Ohta N. High performance coherent OTDR enhanced with erbium doped fiber amplifiers // *Journal of Optical Communications. 1992. V. 13. N 4. P. 127–133. https://doi.org/10.1515/JOC.1992.13.4.127*
8. Furukawa S., Tanaka K., Koyamada Y., Sumida M. High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems. *Proc. of the 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.94CH3424-9). V. 1, 1994, pp. 106–109. https://doi.org/10.1109/IMTC.1994.352115*
9. Tebe L.O., Efiyeseimokumo S.I., Ayibapreye K.B. MATLAB based simulation of BER performance of cascaded optical fibre amplifiers. *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development, 2022, vol. 8, no. 10, pp. 8–14.*
10. Harun S.W., Subramaniam T., Tamchek N., Ahmad H. Gain and noise figure performances of L-band EDFA with an injection of C-band ASE. *Jurnal Teknologi, 2004, vol. 40, pp. 9–16. https://doi.org/10.11113/jt.v40.411*
11. Semmalar S., Malarkkan S. ASE noise analysis in cascaded EDFA-EYCDFA. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2015, vol. 10, no. 5, pp. 2126–2131.*
12. King J., Smith D., Richards K., Timson P., Epworth R., Wright S. Development of a coherent OTDR instrument. *Journal of Lightwave Technology, 1987, vol. 5, no. 4, pp. 616–624. https://doi.org/10.1109/JLT.1987.1075523*
13. Nesterov E.T., Sleptcov M.A., Treshchikov V.N., Nanii O.E., Susian A.A. Coherent optical reflectometer. The concept of the device creating. *T-Comm, 2010, vol. 4, no. 8, pp. 51–54. (in Russian)*
14. Koyamada Y., Nakamoto H., Ohta N. High performance coherent OTDR enhanced with erbium doped fiber amplifiers. *Journal of Optical Communications, 1992, vol. 13, no. 4, pp. 127–133. https://doi.org/10.1515/JOC.1992.13.4.127*

Авторы

Сандровский Александр Андреевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер-программист, АО «Управление перспективных технологий», Москва, 111033, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-1562-9362>, aasandrovskii@itmo.ru

Шарков Илья Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55768865100](https://orcid.org/0000-0002-2047-5738), <https://orcid.org/0000-0002-2047-5738>, isharkov@itmo.ru

Плотников Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57193069973](https://orcid.org/0000-0003-2506-0379), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>, plotnikov-michael@yandex.ru

Ушанов Святослав Анатольевич — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>, saushanov@itmo.ru

Гончаров Денис Борисович — инженер, АО «Управление перспективных технологий», Москва, 111033, Российская Федерация; инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-0021-9737>, denis.goncharov.1998@gmail.com

Карпов Евгений Евгеньевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9822-9898>, eearpov@itmo.ru

Authors

Alexandr A. Sandrovskii — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Software Development Engineer, JSC Department of Advanced Technologies, Moscow, 111033, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-1562-9362>, aasandrovskii@itmo.ru

Ilya A. Sharkov — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55768865100](https://orcid.org/0000-0002-2047-5738), <https://orcid.org/0000-0002-2047-5738>, isharkov@itmo.ru

Mikhail Yu. Plotnikov — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57193069973](https://orcid.org/0000-0003-2506-0379), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>, plotnikov-michael@yandex.ru

Svyatoslav A. Ushanov — Researching Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-9812-4447>, saushanov@itmo.ru

Denis B. Goncharov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, JSC Department of Advanced Technologies, Moscow, 111033, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-0021-9737>, denis.goncharov.1998@gmail.com

Evgenii E. Karpov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9822-9898>, eearpov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

Одобрена после рецензирования 09.10.2024

Принята к печати 25.11.2024

Received 19.06.2024

Approved after reviewing 09.10.2024

Accepted 25.11.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»