



# Методы измерения обратных потерь в волоконно-оптических линиях и компонентах

С. Б. Бычков<sup>1</sup>, А. О. Погonyшев<sup>1</sup>, С. В. Тихомиров<sup>1</sup>, В. Р. Сумкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «ВНИИОФИ»), Москва, Россия

<sup>2</sup> «НПП «Измерительная техника связи»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются 3 метода измерения величины обратных потерь (ORL) в волоконно-оптических системах, применяемые в современных измерительных приборах – метод измерений на непрерывном излучении (CW), метод рефлектометрии во временной области (OTDR) и метод рефлектометрии в частотной области (OFDR). Проводится сравнительный анализ этих методов, рассматриваются преимущества и ограничения.

**Ключевые слова:** измерение, оптические обратные потери, ORL, рефлектометрия, OTDR, OFDR, метрологическое обеспечение

Статья получена: 08.02.2024

Статья принята: 26.07.2024

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных характеристик волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и волоконно-оптических устройств является уровень создаваемых ими обратных потерь (return loss, ORL, потеря на отражение) – величины, равной отношению мощности создаваемого в устройстве сигнала обратного рассеяния к мощности оптического сигнала на его входе, выраженной в децибелах (ГОСТ Р 54417-2011). Сигналы обратного рассеяния могут вызывать нестабильности и шумы в лазерных излучателях, используемых в волоконно-оптических системах связи, что может приводить к сбоям в работе телекоммуникационного оборудования или даже выходу лазерных излучателей из строя. В связи с этим уровни создаваемых элементами и устройствами ВОЛС обратных потерь обычно нор-

# Methods for Measuring Return Loss in Fiber Optic Lines and Components

S. B. Bychkov<sup>1</sup>, A. O. Pogonyshchev<sup>1</sup>, S. V. Tikhomirov<sup>1</sup>, V. R. Sumkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Optical and Physical Measurements" (FCBU "VNIIOFI"), Moscow

<sup>2</sup> LLC "Research and Development Enterprise "Measuring Communication Technology" ("Izmeritelnaya Tekhnika Svyazi") (NPP "ITS"), Saint-Petersburg

This article discusses 3 methods for measuring of optic return loss (ORL) in fiber optic systems being used in modern measuring instruments: continuous wave method (CW), time domain reflectometry (OTDR) and frequency domain reflectometry (OFDR). The authors perform a comparative analysis of these methods, and consider the advantages and limitations of these methods.

**Key words:** measurements, optical return loss, ORL, reflectometry, OTDR, OFDR, metrological support

Article received: 08.02.2024

Article accepted: 26.07.2024

## INTRODUCTION

One of the important characteristics of fiber-optic lines and fiber-optic devices is the level of return loss (ORL, reflection loss) they create – a value equal to the ratio of the power of the backscattering signal created in the device to the power of the optical signal at its input, expressed in decibels (GOST R 54417-2011). Backscattering signals can cause instability and noise in laser emitters used in fiber-optic communication systems, which can lead to failures in telecommunications equipment or even failure of laser emitters. In this regard, the levels of return loss created by the elements and devices of the fiber optic line are usually standardized, and return loss meters are widely used in measuring equipment of fiber-optic communication.

The article discusses the methods of measuring return loss used in such measuring devices, and their comparative analysis is carried out. Currently, the fol-

мируются, а измерители обратных потерь находят широкое применение в измерительной технике волоконно-оптической связи. В статье рассматриваются методы измерения обратных потерь, используемые в таких измерительных приборах, и проводится их сравнительный анализ.

В настоящее время наиболее распространены 3 метода измерения величины обратных потерь в оптическом волокне:

- CW-метод – метод, основанный на измерении средней мощности обратных отражений от исследуемой волоконно-оптической линии при постоянном зондирующем оптическом сигнале;
- OTDR-метод – метод оптической рефлектометрии во временной области, основанный на измерении изменения мощности отраженного сигнала при импульсно-модулированном зондирующем сигнале;
- OFDR-метод – метод оптической рефлектометрии в частотной области, основанный на анализе интерференционной картины, линейно перестраиваемого по длине волны лазера, используемого как источник зондирующего сигнала и сигнала обратного отражения.

Рассмотрим эти методы подробнее.

### CW-МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

CW-метод является наиболее очевидным способом измерения величины обратных потерь в ВОЛС. Схема, поясняющая принцип работы CW-измерителя представлена на рис. 1.

Лазер (ЛИ) генерирует непрерывное оптическое излучение, имеющее постоянную, известную мощность  $P_{\text{л}}$ , [дБм]. Через ветвь 1 разветвителя (сплиттера) СП это излучение поступает на его выход 3. К нему же подключается тестируемая волоконно-оптическая линия или тестируемое волоконное устройство. При этом СП вносит потери  $A_{\text{лз}}$ , [дБ], в сигнал, и в ветвь 3 поступает мощность  $P_{\text{л-двт}} < P_{\text{л}}$ . При прохождении излучения через ВО-линию, часть его отражается назад из-за рассеяния на неоднородностях среды передачи (рэлеевское рассеяние) и на зеркальных поверхностях (френелевское отражение). На вход 3 СП поступает сигнал обратного рассеяния и, терпя потери  $A_{\text{лз}}$ , [дБ], поступает на вход оптического ваттметра ИОМ, позволяющего измерить среднюю мощность  $P_{\text{ов}}$  этого сигнала. Таким образом, зная среднюю мощность оптического излучения на выходе ЛИ  $P_{\text{л}}$ , потери  $A_{\text{лз}}$  и  $A_{\text{лз}}$ , по показаниям ИОМ  $P_{\text{ов}}$ , [дБм], можно вычислить значение величины интегральных обратных потерь в тракте RL, [дБ], по формуле (1).

lowing 3 methods of measuring the return loss value in optical fiber are most common:

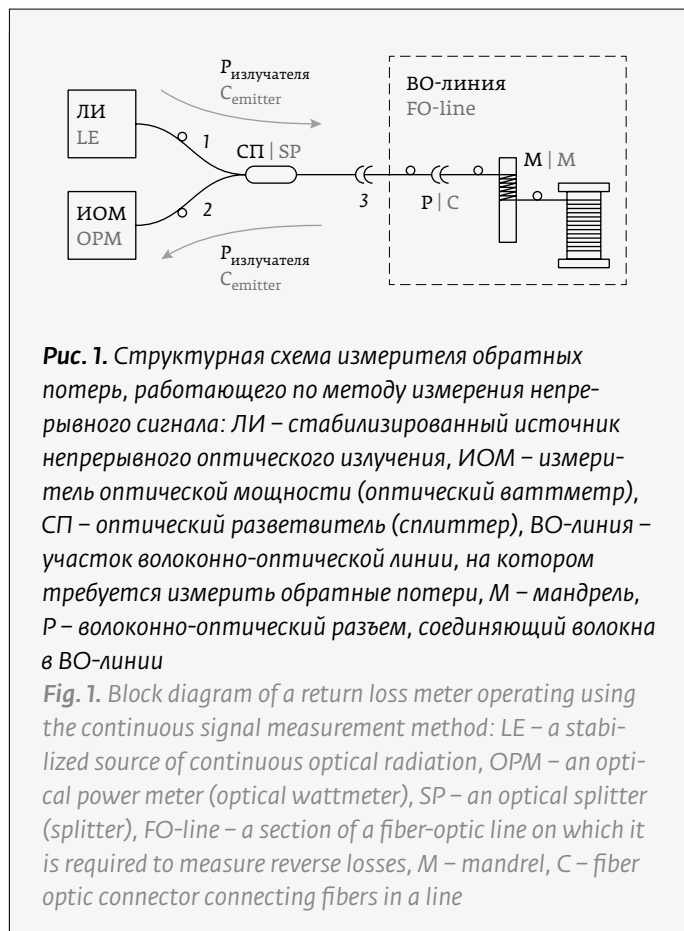
- CW-method based on measuring the average power of backscatter from the fiber-optic line under study with a steady probing optical signal;
- The method of optical time-domain reflectometry (OTDR) based on measuring the change in the power of the backscatter signal with a pulse-modulated probing signal;
- The method of optical frequency-domain reflectometry (OFDR) based on the analysis of an interference pattern linearly tunable along the wavelength of a laser used as a source of a probing signal and a backscatter signal.

Let's look at these methods in more detail below.

### CW MEASURING METHOD

The CW method is the most obvious way to measure the value of return loss in fiber-optic lines. A diagram explaining the principle of operation of the CW meter is shown in Fig. 1.

The laser (LE) generates continuous-wave optical radiation having a steady, known power of  $R_{\text{L}}$ , [dBm].



**Рис. 1.** Структурная схема измерителя обратных потерь, работающего по методу измерения непрерывного сигнала: ЛИ – стабилизированный источник непрерывного оптического излучения, ИОМ – измеритель оптической мощности (оптический ваттметр), СП – оптический разветвитель (сплиттер), ВО-линия – участок волоконно-оптической линии, на котором требуется измерить обратные потери, М – мандрель, Р – волоконно-оптический разъем, соединяющий волокна в ВО-линии

**Fig. 1.** Block diagram of a return loss meter operating using the continuous signal measurement method: LE – a stabilized source of continuous optical radiation, OPM – an optical power meter (optical wattmeter), SP – an optical splitter (splitter), FO-line – a section of a fiber-optic line on which it is required to measure reverse losses, M – mandrel, C – fiber optic connector connecting fibers in a line

$$RL = P_{ov} - P_L + A_{13} + A_{32} + 2 \cdot \alpha, \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где  $\alpha$ , [дБ] – величина потерь на оптическом разъеме, соединяющем исследуемую ВО-линию и выходную ветвь СП (считается постоянной и составляет примерно 0,15 дБ).

Измеряемые таким образом потери возникают благодаря всем оптическим компонентам, входящим в волоконно-оптическую линию. Для того, чтобы определить обратные потери от заданного участка линии, например, от места соединения оптических разъемов, используют т.н. мандрель. Мандрель представляет собой стержень заданного диаметра, на который наматывается оптическое волокно. Диаметр стержня таков, что в намотанном на него оптическом волокне нарушается условие полного внутреннего отражения, и излучение выходит из световода, не создавая обратных потерь, а на 5–7 витках намотки, обратные потери от следующего за мандрелью участка ВО-линии уменьшаются более чем на 70 дБ. Диаметр стержня мандрели определяется рабочей длиной волны и типом оптического волокна. Например, для оптического волокна класса G.652 он составляет 8 мм при проведении измерений на длине волны 1310 нм и 10 мм при проведении измерений на длине волны 1550 нм. Таким образом, например, в схеме, показанной на рис. 1, для измерения значения величины обратных потерь от оптического разъема Р, соединяющего два участка исследуемой ВО-линии, необходимо при помощи мандрели М убрать обратные потери от волокна, расположенного после разъема Р, затем измерить величину интегральных обратных потерь  $RL_{sum}$ , [дБ], от разъема Р и оптического волокна перед ним. После чего измерить величину  $RL_{before}$ , [дБ] – обратных потерь от участка трассы перед Р, намотав на мандрель волокно между измерителем и разъемом Р как можно ближе к разъему. Искомую величину обратных потерь  $RL_p$  можно вычислить по формуле (2).

$$RL_p = 10 \log_{10} \left( 10^{RL_{sum}/10} - 10^{RL_{before}/10} \right), \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

Описанный CW-метод измерения обратных потерь в оптическом волокне достаточно прост в реализации. Единица обратных потерь, измеренная таким способом, в Российской системе метрологического обеспечения прослеживается к Государственному специальному эталону единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем передачи информации (ГЭТ 170–2024) через единицы средней мощ-

Through branch 1 of the SP splitter, this radiation enters its output 3. The fiber optic line under test or the fiber device under test is connected to it. In this case, the SP introduces losses of  $A_{13}$ , [дБ], into the signal, and the power of  $R_{L\_dut} < R_L$  enters branch 3. When radiation passes through the fiber-optic line, part of it is reflected back due to scattering on inhomogeneities of the transmission medium (Rayleigh scattering) and on mirror surfaces (Fresnel reflection). A backscattering signal is received at the input 3 of the SP and, suffering losses of  $A_{32}$ , [дБ], it enters the input of an optical wattmeter OPM which allows measuring the average power of  $P_{of}$  of this signal. Thus, knowing the average power of optical radiation at  $P_L$  laser yield, losses  $A_{13}$  and  $A_{32}$ , according to the readings of the OPM  $P_{of}$ , [dBm], it is possible to calculate the value of the integral return losses  $RL$ , [дБ], in the tract according to the formula (1).

$$RL = P_{of} - P_L + A_{13} + A_{32} + 2 \cdot \alpha, \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

where  $\alpha$ , [дБ] is the loss value at the optical connector connecting the studied fiber-optic line and the output branch of the SP (it is considered steady and is approximately 0.15 дБ).

The losses measured in this way are due to all optical components included in the fiber-optic line. In order to determine the return loss from a given section of the line, for example, from the junction of optical connectors, the so-called mandrel is used. A mandrel is a rod of a given diameter on which an optical fiber is wound. The diameter of the rod is such that the condition of the total internal reflection is violated in the optical fiber wound on it, and radiation exits the fiber without creating return loss, and at 5–7 turns of winding, the return loss from the section of the line following the mandrel decreases by more than 70 дБ. The diameter of the mandrel rod is determined by the operating wavelength and the type of optical fiber. For example, for Class G.652 optical fiber it is 8 mm when measuring at a wavelength of 1310 nm and 10 mm when measuring at a wavelength of 1550 nm. Thus, for example, in the scheme shown in Fig. 1, to measure the value of the return loss from the optical connector C connecting the two sections of the studied fiber-optic line, it is necessary to remove the return loss from the fiber located after the connector C using the mandrel M, then measure the value of the integral return loss  $RL_{sum}$ , [дБ], from the C connector and the optical fiber before it. After that, measure the value of  $RL_{before}$ , [дБ] of the return loss from the section of the path before C, winding the fiber on the mandrel between the meter and the connector C as close as possible to the connec-

ности и ослабления оптического излучения. Диапазон измерения обратных потерь CW-методом определяется:

- диапазоном измерения средней мощности оптического ваттметра ИОМ,
- потерями сигнала в разветвителе СП,
- уровнем «нулевого» сигнала обратных потерь, возникающего в результате отражения излучения ЛИ от выходного разъема 3 (см. рис.) измерителя и разветвителя СП, а также благодаря наличию перекрестной помехи между линиями 1 и 2 разветвителя СП (*crosstalk, isolation*).

На практике, лимитирующим оказывается именно последний фактор. Если динамический диапазон современных оптических ваттметров обычно превышает 80 дБ, потери и в разветвителе СП составляют порядка 3 дБ, то уровень взаимной изоляции портов сильно зависит от конструкции. Эта характеристика нормируется далеко не для всех доступных на рынке разветвителей, обычно производителем указывается именно уровень обратных потерь. Вопрос применимости разветвителей разных типов к задаче измерения ORL был рассмотрен в ходе совместной работы ФГБУ «ВНИИОФИ» и НПП «ИТС». В табл. 1 представлены минимальные значения нулевого уровня, полученные в CW-измерителе обратных потерь с использованием измерителей трех различных типов: сварные разветвители Y-типа (имеющие 1 вход и 2 выхода – FBT 1x2), планарные разветвители Y-типа (PLC 1x2) и сварные разветвители X-типа (имеющие 2 входа и 2 выхода – FBT 2x2). Все разветвители имели коэффициент деления 50% – 50%. Неиспользуемый порт X-разветвителя наматывался на мандрель, что обеспечивало фактическое отсутствие обратных отражений от торца оптического волокна. Измерения проводились на длине волны 1550 нм.

Высокий уровень «нулевого» сигнала, получаемый при использовании сварного разветвителя FBT 1x2 можно объяснить тем, что сплиттеры данного типа выполняются сплавлением двух оптических волокон, затем один из портов откалывается для получения Y-конфигурации. Место скола при этом может создавать большие обратные потери, определяющие низкий коэффициент межканальной изоляции. Технология планарных разветвителей позволяет получить большую изоляцию каналов за счет более высокой точности и повторяемости производственных процессов. Наилучший результат обеспечил X-разветвитель, «лишний» порт которого был заглушен. Это позволило расширить диапазон измерения обратных потерь до уровня –70 дБ и можно утверждать, что, подобрав более качественный раз-

ветор. The required value of the return loss of  $RL_p$  can be calculated using the formula (2).

$$RL_p = 10 \log_{10} \left( 10^{RL_{sum}/10} - 10^{RL_{before}/10} \right), \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

The described CW method for measuring return loss in optical fiber is quite simple to implement. The unit of return loss measured in this way in the Russian metrological support system is traced to the State special measurement standard of units of length and time of signal propagation in a fiber optic, average power, attenuation and wavelength for fiber-optic information transmission systems (GET 170-2024) through units of average power and attenuation of optical radiation. The dynamic range of measurement of return loss by the CW method is determined by:

- The measuring range of the average power of the OPM optical wattmeter,
- Signal loss in the SP splitter,
- The “zero” level of the return loss signal resulting from the reflection of LE radiation from the output connector 3 (see Fig.) of the meter and the SP splitter, as well as due to the presence of crosstalk between lines 1 and 2 of the SP splitter (*crosstalk, isolation*).

In practice, it is the latter factor that turns out to be the limiting factor. If the dynamic range of modern optical wattmeters usually exceeds 80 dB, the losses  $A_{13}$  and  $A_{32}$  in the SP splitter are about 3 dB, then the level of mutual isolation ports are highly dependent on the design. This characteristic is not standardized for all splitters available on the market, usually the manufacturer indicates exactly the level of return loss. The question of the applicability of splitters of different types to the task of measuring ORL was considered during the joint work of FGBU “VNIIOFI” and NPP “ITS”. Tabl. 1 shows the minimum zero level values obtained in a CW return loss meter using three different types of meters: Y-type fused splitters (having 1 input and 2 outputs – FBT 1x2), Y-type planar splitters (PLC 1x2) and X-type fused splitters (having 2 inputs and 2 outputs – FBT 2x2). All splitters had a count-down ratio of 50% – 50%. The unused port of the X-splitter was wound on the mandrel, which ensured the actual absence of back reflections from the end of the optical fiber. Measurements were carried out at a wavelength of 1550 nm.

The high level of “zero” signal obtained when using a fused FBT 1x2 splitter can be explained by the fact that splitters of this type are performed by fusing two optical fibers, then one of the ports is split off to obtain a Y-configuration. In this case, the area of splitting can create large return loss which determines the low coefficient of inter-channel isolation. The technology



ветвитель, возможно расширить диапазон еще сильнее. Тем не менее, данный показатель можно считать близким к предельному для CW-измерителей. В процессе использования выходной разъем измерителя «затирается», в результате чего френелевское отражение от него увеличивается, что в конце концов приводит к возрастанию нулевого сигнала до уровня, превышающего  $-70$  дБ. Другим значительным недостатком CW-метода является необходимость использования мандрели для измерения потерь от заданного участка тракта, что портит оптическое волокно, кроме того, это не всегда представляется возможным.

Тем не менее, динамический диапазон в 70 дБ вполне достаточен для ряда приложений, а цена CW-измерителей обратных потерь весьма конкурента. Кроме того, величина обратных потерь, измеренная описанным способом, очевидным образом прослеживается к единице ослабления для оптического волокна. Поэтому данный метод традиционно используется в эталонной технике, в частности, в рабочих эталонах единицы обратных потерь в оптическом волокне (РЭОП, регистрационный номер в реестре СИ: 52363-13, 35981-07), производимых и поставляемых ФГБУ «ВНИИОФИ» в метрологические центры России.

## РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

В последнее время все чаще стали встречаться приборы, предназначенные для измерения распределенных обратных потерь – потерь от выбранного участка трассы, конкретного разъема или компонента. Такие приборы оказались востребованными, например, на производствах оптических патч-кордов, кабелей и сборок – для тестирования качества полировки разъемов. Эта область применения не позволяет портить тестируемое волокно, наматывая его на малый радиус. Здесь находят применение приборы, реализующие временной и фазовый рефлектометрические методы (OTDR и OFDR). К приборам, использующим OTDR-рефлектометрический метод, например, относятся MAP-200 (VIAVI, Франция) и Op-940 (OptoTest, США). OFDR-рефлектометрический метод использует, например, OVA-5000 (Luna, США). Данные системы могут измерять как интегральные обратные потери, так и потери от заданного участка ВОЛС и имеют более широкие динамические диапазоны, чем измерители CW-типа.

## OTDR-МЕТОД

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема OTDR-рефлектометра. Импульсный лазерный

**Таблица 1.** Минимальные значения нулевого уровня ORL, измеренные по методу CW с разветвителями разных типов

**Table 1.** Minimum values of the zero level of ORL, measured by the CW method with splitters of different types

Тип оптического разветвителя Type of optical splitter	Минимальный уровень «нуля» CW-измерителя обратных потерь, дБ The minimum "zero" level of the CW return loss meter, dB
FBT 1x2	-48
PLC 1x2	-63
FBT 2x2	-75

of planar splitters allows for greater channel isolation due to higher accuracy and repeatability of production processes. The best result was provided by the X-splitter, the "extra" port of which was jammed. This made it possible to expand the measurement range of return loss to the level of  $-70$  dB and it can be argued that by choosing a better splitter, it is possible to expand the range even more. Nevertheless, this indicator can be considered close to the limit for CW meters. During use, the output connector of the meter is "rubbed out", as a result of which the Fresnel reflection from it increases, which eventually leads to an increase in the zero signal to a level exceeding  $-70$  dB. Another significant disadvantage of the CW method is the need to use a mandrel to measure losses from a given section of the path, which spoils the optical fiber; moreover, this is not always possible.

Nevertheless, the dynamic range of 70 dB is quite sufficient for a number of applications, and the price of CW return loss meters is very competitive. In addition, the value of the return loss measured by the described method is obviously traced to the attenuation unit for the optical fiber. Therefore, this method is traditionally used in reference technology, in particular, in working measuring standards of return loss units in optical fiber (REOP, registration number in the Measuring Equipment Register: 52363-13, 35981-07), manufactured and supplied by FGBU "VNIIOFI" to metrological centers in Russia.

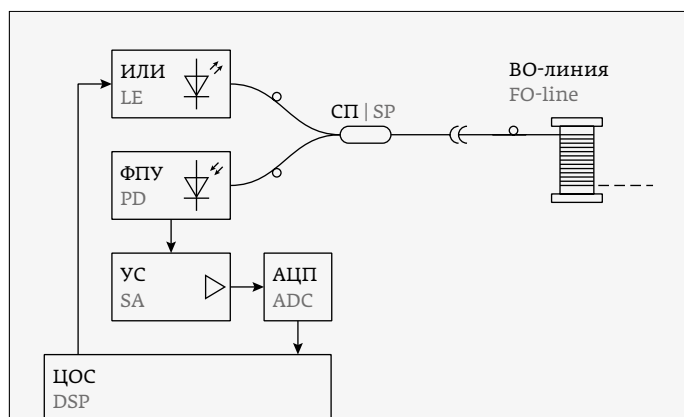
## REFLECTOMETRIC METHODS

Recently, devices designed to measure distributed return loss – loss from a selected section of the route, a specific connector or component – have become increasingly common. Such devices have proved to be in demand, for example, in the production of optical patch cords, cables and assemblies – to test the quality of connector polishing. This field of applica-

излучатель ИЛИ генерирует зондирующие оптические импульсы, поступающие через волоконно-оптический разветвитель СП в исследуемую ВО-линию. Распространяясь в ней, импульсы подвергаются обратному рассеянию, регистрируемому высокоскоростным фотоприемным устройством ФПУ, сигнал с которого усиливается при помощи широкополосного усилителя УС и подается на быстродействующий аналого-цифровой преобразователь АЦП [1]. Управление запуском ИЛИ и обработку сигналов АЦП осуществляет модуль цифровой обработки сигналов ЦОС. Отсчеты АЦП синхронизированы по времени с моментами запуска ИЛИ, каждому отсчету АЦП, произведенному через время  $n\Delta t$ , [с] (где  $\Delta t$  – время между преобразованиями АЦП,  $n$  – целое число) после излучения оптического импульса ИЛИ соответствует сигнал обратного рассеяния зондирующего импульса от конкретного участка ВО-трассы. Таким образом формируется рефлектограмма – зависимость относительной мощности сигнала обратного рассеяния от расстояния между измерителем и местом рассеяния. При проведении измерения излучатель ИЛИ генерирует последовательность оптических зондирующих импульсов, период следования которых настраивается таким образом, чтобы сигнал обратного отражения от самой удаленной точки ВО – трассы успевал попасть на фотоприемное устройство ФПУ до того, как будет сформирован следующий зондирующий импульс. Для каждой точки рефлектограммы производится множество усреднений измеренного значения сигнала обратного рассеяния, что позволяет снизить влияние шумов канала фотоприемника.

Описанный принцип работы одинаков для большого числа OTDR, применяющихся для измерения длины ВОЛС и поиска неисправностей на линиях, однако если рефлектометры оптимизированы для работы на большие дистанции (от 1 до 100 км), то OTDR-измерители обратных потерь оптимизируются для работы в ближней зоне. Для них характерными являются более высокое пространственное разрешение, более высокая точность и более широкий диапазон измерения уровней сигнала обратного рассеяния, но меньший диапазон рабочих длин оптических линий.

Принцип OTDR позволяет нивелировать факторы, ограничивающие динамический диапазон CW-измерителей обратных потерь – влияние перекрестных помех разветвителя и выходного оптического разъема. Для системы OTDR эти помехи могут не учитываться за счет выбора минимального интервала  $\tau$  временной отстройки запуска АЦП относительно момента генерации зондирующего



**Рис. 2.** Упрощенная структурная схема OTDR-измерителя: ИЛИ – импульсный лазерный излучатель, ФПУ – высокоскоростной фотоприемник, УС – усилитель сигналов, АЦП – быстродействующий аналого-цифровой преобразователь, ЦОС – устройство цифровой обработки сигналов, СП – волоконно-оптический разветвитель

**Fig. 2.** Simplified structural diagram of the OTDR measuring device: LE – pulse laser emitter, PD – high-speed photodetector, SA – signal amplifier, ADC – high-speed analog-to-digital converter, DSP – digital signal processing device, SP – fiber-optic splitter

tion does not allow spoiling the fiber under test by winding it over a small radius. Devices implementing time-domain and phase-domain reflectometric methods (OTDR and OFDR) are used here. Devices using the OTDR-reflectometric method, for example, include the MAP-200 (VIAVI, France) and Op-940 (OptoTest, USA). OFDR-reflectometric method is used, for example, in OVA5000 (Luna, USA). These systems can measure both integral return loss and loss from a given section of the fiber optic cable and have wider dynamic ranges than CW-type meters.

## OTDR-МЕТОД

Fig. 2 shows a generalized block diagram of an OTDR reflectometer. A pulsed laser emitter LE generates probing optical pulses coming through a fiber-optic SP splitter into the fiber-optic line under study. Propagating in it, the pulses are subjected to backscattering, recorded by a high-speed photodetector (PD), the signal from which is amplified using a broadband amplifier (SA) and fed to a high-speed analog-to-digital converter (ADC) [1]. The digital signal processing (DSP) module controls the start-up LE and the processing of ADC signals. The ADC counts are synchronized in time with the LE start-up moments, for each ADC count produced

импульса. Это позволяет расширить динамический диапазон измерителя распределенных обратных потерь до значений, соответствующих рэлеевскому рассеянию от участка оптического волокна (обычно составляет от -70 дБ до -80 дБ на 1 м). Однако, требование к увеличению пространственного разрешения OTDR вступает в противоречие с требованием увеличения динамического диапазона измерителя. Так как увеличение пространственного разрешения достигается за счет уменьшения длительности зондирующих оптических импульсов, уменьшается и мощность сигнала обратного рассеяния. Мощность же излучателей, применяемых для генерации зондирующих импульсов, ограничена сверху как техническими возможностями самих излучателей, так и нелинейными эффектами в оптическом волокне (и составляет обычно не более нескольких сотен мВт). Все это усложняет процесс измерения мощности сигнала обратных потерь и заставляет производителей OTDR использовать лавинные фотодиоды, обладающие худшими характеристиками стабильности при более высоких характеристиках чувствительности. Другим аспектом, препятствующим получению высокого пространственного разрешения, является быстрое действие АЦП. Так для получения разрешения в 10 см должна измеряться амплитуда сигнала обратного рассеяния каждые  $\Delta t \approx 1$  нс, что требует частоты преобразования более 1 ГГц и соответствующего ей быстрого действия от фотоприемника ФПУ и усилителя УС.

Вопрос определения динамического диапазона OTDR подробно рассмотрен в [1]. В отличие от классических рефлектометров, OTDR-измерители обратных потерь рассчитаны на работу как при низких, предельно-детектируемых значениях мощности сигнала обратных потерь, так и при более высоких значениях (например, для Or-940 производства Optotest, США – от -10 дБ). Нижняя граница чувствительности OTDR-измерителя может быть рассчитана из эквивалентной плотности мощности шума сигнала фотодетектора  $NEP$ ,  $\left[ \text{Вт}/\sqrt{\text{Гц}} \right]$ . Для фотодетекторов на основе p-i-n – фотодиодов и лавинных фотодиодов значение данной характеристики определяется по формуле (3).

$$NEP_{pd} = \frac{\Delta I}{S \cdot G}, \quad (3)$$

где  $\Delta I$  – спектральная плотность шумового тока фотодиода,  $\left[ \text{А}/\sqrt{\text{Гц}} \right]$ ,  $S$  – его спектральная чувствительность на рабочей длине волны,  $\left[ \text{А}/\text{Вт} \right]$ ,  $G$  – коэффициент лавинного умножения (обычно составляет от 1 до 100). Типовое значение  $NEP$  быстродействующих фотодиодов составляет порядка  $10^{-15}$ – $10^{-13}$   $\left[ \text{Вт}/\sqrt{\text{Гц}} \right]$ .

after the time  $n\Delta t$ , [s] (where  $\Delta t$  is the time between ADC samples,  $n$  is an integer) after the radiation of an optical pulse, LE corresponds to the backscattering signal of the probing pulse from a specific section of the fiber-optic path. Thus, a reflectogram is formed – the dependence of the relative power of the backscattering signal on the distance between the meter and the scattering site. During the measurement, the radiator (LE) generates a sequence of optical probing pulses, the period of which is adjusted so that the back reflection signal from the most distant point in the fiber-optic path has time to get to the photodetector (PD) before the next probing pulse is formed. For each point of the reflectogram, a set of averaging of the measured value of the backscattering signal is performed, which reduces the influence of noise from the photodetector channel.

The described principle of operation is the same for a large number of OTDRs used to measure the length of the fiber optic line and troubleshooting on the lines, however, if the reflectometers are optimized for long-range operation (from 1 to 100 km), then OTDR reverse loss meters are optimized for operation in the near zone. They are characterized by higher spatial resolution, higher accuracy and a wider range of backscattering signal levels, but a smaller range of operating lengths of optical lines.

The OTDR principle makes it possible to neutralize the factors limiting the dynamic range of CW return loss meters – the influence of crosstalk of the splitter and the output optical connector. For the OTDR system, these interferences may not be taken into account due to the choice of the minimum interval  $\tau$  of the time delay of the ADC start relative to the moment of generation of the probing pulse. This allows you to expand the dynamic range of the distributed return loss meter to values corresponding to Rayleigh scattering from the optical fiber section (usually from -70 dB to -80 dB per 1 m). However, the requirement to increase the spatial resolution of the OTDR conflicts with the requirement to increase the dynamic range of the meter. Since an increase in spatial resolution is achieved by reducing the duration of the probing optical pulses, the power of the backscattering signal also decreases. The power of the emitters used to generate probing pulses is limited from above both by the technical capabilities of the emitters themselves and by non-linear effects in the optical fiber (and usually does not exceed several hundred mW). All this complicates the process of measuring the power of the reverse loss signal and forces OTDR manufacturers to use avalanche photodetectors with worse stability characteristics at higher sensitivity characteristics. Another aspect that



Таким образом, мощность шума в полосе 1 ГГц может составлять порядка  $-75...-55$  [дБм]. Если мощность зондирующего импульса составляет 100 мВт (20 дБм), то ее отношение к мощности шума составит соответственно от 95 дБ до 75 дБ, что позволяет, учитывая требования к точности измерений, определить нижнюю границу измеряемых обратных потерь. Таким образом можно сделать вывод, что значение величины обратных потерь в  $-80$  дБ при пространственном разрешении OTDR в 10 см является вполне реализуемым. Однако, при этом, попадание в фотодиод ФПУ импульса оптического излучения мощностью 100 мВт должно перенасытить фотодиод и является недопустимым, что объясняет тот факт, что верхняя граница измерения величины обратных потерь у OTDR-измерителей обычно находится ниже  $-10$  дБ.

В России для метрологического обеспечения OTDR функционирует большой парк рабочих эталонов средней мощности оптического излучения, ослабления и времени распространения сигналов в световоде, а единицы прослеживаются к Государственному специальному эталону ГЭТ 170-2024.

## OFDR-МЕТОД

Другим рефлектометрическим методом измерения распределенных обратных потерь является метод с использованием оптической рефлектометрии в частотной области (OFDR). Аналогично OTDR, OFDR лишен недостатков CW-метода в виде влияния перекрестных помех сплиттера и выходного оптического разъема. Кроме того, метод OFDR лишен некоторых недостатков OTDR-метода таких, как описанное выше противоречие между пространственным разрешением и динамическим диапазоном при измерении распределенных обратных потерь, однако, имеет ограничения по длине исследуемых ВО-линий (для коммерческих образцов рассматриваемых приборов эта величина ограничена значением 2000 метров).

OFDR – интерферометрический метод измерений, в котором используется высоко когерентный лазерный источник оптического излучения с непрерывно перестраиваемой длиной волны. Анализ интерференционной картины производится при помощи преобразования Фурье, позволяющего получить зависимость интенсивности отраженного и рассеянного оптического излучения от расстояния до точки введения зондирующего оптического излучения [2]. Структурная схема прибора, реализующего метод OFDR измерения распределенных обратных потерь в волоконно-оптических системах, приведена на рис. 3.

prevents obtaining high spatial resolution is the speed of the ADC. For example, in order to obtain a resolution of 10 cm, the amplitude of the backscattering signal must be measured every  $\Delta t \approx 1$  ns, which requires a conversion frequency of more than 1 GHz and the corresponding speed from the PD photodetector and the SA amplifier.

The issue of determining the dynamic range of OTDR is discussed in detail in [1] unlike classical reflectometers, OTDR return loss meters are designed to operate both at low, maximum detectable values of the return loss signal power and at higher values (for example, for Op-940 manufactured by Optotest, USA – from  $-10$  dB). The lower limit of the sensitivity of the OTDR meter can be calculated from the equivalent noise power density of the photodetector signal,  $NEP [W/\sqrt{Hz}]$ . For photodetectors based on p-i-n photodiodes and avalanche photodiodes, the value of this characteristic is determined by the formula (3).

$$NEP_{pd} = \frac{\Delta I}{S \cdot G}, \quad (3)$$

where  $\Delta I$  is the spectral density of the photodiode noise current,  $[A/\sqrt{Hz}]$ ,  $S$  is its spectral sensitivity at the operating wavelength,  $[A/W]$ ,  $G$  is the avalanche multiplication coefficient (usually from 1 to 100). The typical NEP value of high-speed photodiodes is about  $10^{-15} - 10^{-13} [W/\sqrt{Hz}]$ . Thus, the noise power in the 1 GHz band can be on the order of  $-75...-55$  [дБм]. If the power of the probing pulse is 100 mW (20 dBm), then its ratio to the noise power will be from 95 dB to 75 dB, respectively, which allows, taking into account the requirements for measurement accuracy, to determine the lower limit of the measured return loss. Thus, it can be concluded that the value of the return loss of  $-80$  dB with a spatial resolution of OTDR of 10 cm is quite feasible. However, at the same time, an optical radiation pulse with a power of 100 mW entering the photodiode of the PD should oversaturate the photodiode and is unacceptable, which explains the fact that the upper limit of measuring the return loss value in OTDR meters is usually below  $-10$  dB.

In Russia, for metrological support of OTDR, there is a large fleet of working measuring standards for the average power of optical radiation, attenuation and propagation time of signals in the fiber, and the units are traced to the State Special Measuring Standard GET 170-2024.

## OFDR METHOD

Another reflectometric method for measuring distributed return loss is the method using optical frequency-domain reflectometry (OFDR). Similar to

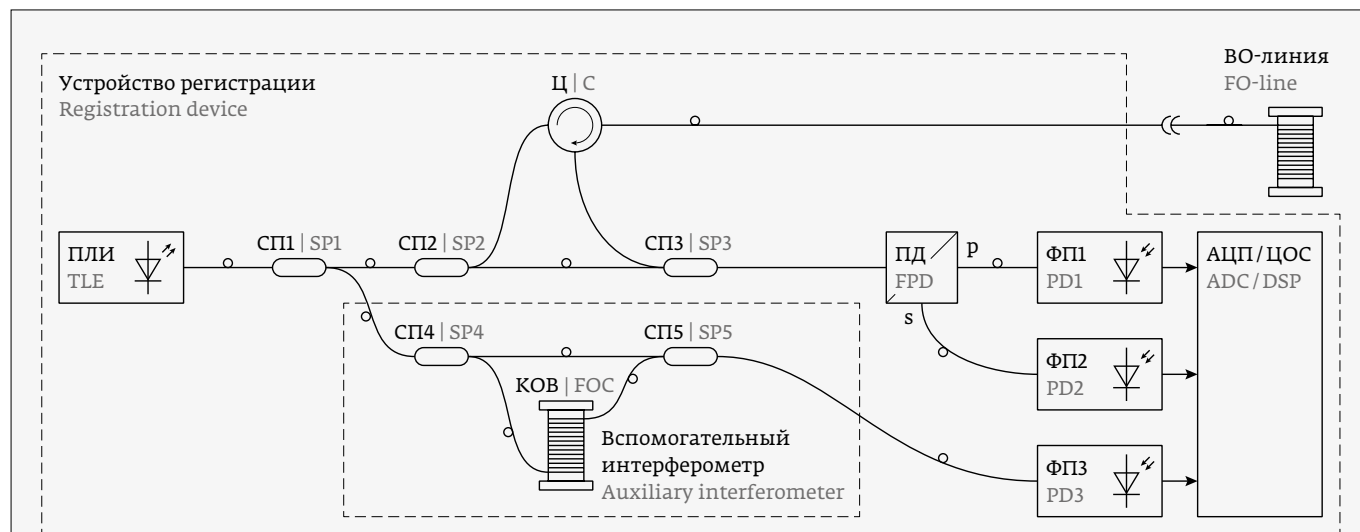
Блок источника лазерного излучения ПЛИ представляет собой высоко когерентный лазер, который обеспечивает спектральную перестройку оптического излучения по линейному от времени закону. Устройство регистрации состоит из основного интерферометра с поляризационным разнесением сигнала, вспомогательного интерферометра, фотодетекторов ФП1 – ФП3 и устройства обработки и сбора данных. Наконец, катушка оптического волокна КОВ является частью вспомогательного интерферометра, предназначенного для контроля оптической частоты излучения во время перестройки лазера по длине волны.

Оптическое излучение от перестраиваемого лазера при помощи волоконно-оптического разветвителя СП1 делится на две части, причем 90% мощности направляется в основной интерферометр, а 10% – во вспомогательный. В основном интерферометре половина мощности оптического излучения от волоконно-оптического разветвителя СП2 поступает на волоконно-оптический циркулятор и затем – в исследуемую ВО-линию, дифференциальные и абсолютные задержки распространения оптического излучения в которой подлежат предварительному определению и измерению. Оптическое

OTDR, OFDR is free from disadvantages of the CW method in the form of the influence of crosstalk of the splitter and the optical output connector. Besides, the OFDR method is free from some disadvantages of the OTDR method, such as the contradiction described above between spatial resolution and dynamic range when measuring distributed return loss, however, it has limitations on the length of the studied fiber-optic lines (for commercial samples of the devices under consideration, this value is limited to 2000 meters).

OFDR is an interferometric measurement method that uses a highly coherent laser optical radiation source with a continuously tunable wavelength. The interference pattern is analyzed using the Fourier transform, which makes it possible to obtain the dependence of the intensity of reflected and scattered optical radiation on the distance to the point of introduction of probing optical radiation [2]. The block diagram of the device implementing the OFDR method for measuring distributed return loss in fiber-optic systems is shown in Fig. 3.

The TLE laser source unit is a highly coherent tunable laser that provides spectral rearrangement of optical radiation according to a linear law of time.



**Рис. 3.** Структурная схема OFDR-измерителя распределенных обратных потерь в волоконно-оптических системах: ПЛИ – перестраиваемый по длине волны высоко когерентный лазер, СП1 – СП5 – волоконно-оптические РМ-разветвители, Ц – волоконный циркулятор, ПД – волоконный поляризационный делитель, ФП1 – ФП3 – быстродействующие фотоприемные устройства, АЦП/ЦОС – устройство цифровой обработки сигналов с быстродействующим АЦП, КОВ – катушка оптического волокна, ВО-линия – исследуемая волоконно-оптическая линия

**Fig. 3.** Structural diagram of the OFDR meter for distributed return loss in fiber-optic systems: TLE – wavelength-tunable highly coherent laser, SP1 – SP5 – fiber-optic PM splitters, C – fiber circulator, FPD – fiber polarization divider, PD1 – PD3 – high-speed photodetectors, ADC/DSP – digital signal processing device with high-speed ADC, FOC – fiber optical coil, FO-line – fiber-optic line under study

излучение, обратно рассеянное или отраженное от неоднородностей в исследуемой ВО-линии, объединяется с излучением второй (опорной) ветви основного интерферометра на волоконно-оптическом разветвителе СП4 и поступает в поляризационный делитель. Здесь излучение разделяется на две ортогональные поляризационные  $s$ - и  $p$ - составляющие и детектируется двумя фотодетекторами (ФП1, ФП2), которые подключены через усилитель к устройству обработки и сбора данных АЦП/ЦОС. Устройство сбора данных представляет собой высокоскоростной трехканальный аналого-цифровой преобразователь и вычислительное устройство, предназначенное для математической обработки собранных данных.

Если рассмотреть упрощенную модель процесса измерения, можно сказать, что на площадке фотодетектора измерительного интерферометра происходит интерференция сигнала опорного канала интерферометра и сигналов обратного отражения или рассеяния (обратных потерь) от каждой точки тестируемой линии. То есть каждая неоднородность ВО-линии рассматривается как индивидуальный отражатель. При линейной перестройке длины волны лазера мощность суммарного сигнала опорного канала и сигналов обратных потерь от каждой неоднородности будет меняться по синусоидальному закону. Частота синусоиды будет зависеть только от скорости перестройки длины волны лазера и разности длин оптических путей в ветвях интерферометра, а амплитуда – от интенсивности сигнала распределенных обратных потерь. Таким образом сигнал фотодетекторов ФП1 и ФП2 позволяет восстановить зависимость мощности сигнала обратных потерь от длины ВО-линии. Поляризационное разнесение сигнала обеспечивает независимость измеренного сигнала от изменений состояния поляризации излучения, вызванных рассеянием или отражением от неоднородностей в исследуемой ВО-линии [3]. Сигналы поляризационных составляющих излучения  $E_s$ ,  $E_p$ , приходящие на фотодетекторы основного интерферометра, описываются соотношениями (4) и (5).

$$E_s(\omega) = \sum_i 2r_{ti} g_s(\tau) \left[ \left( \dot{T}_s E_{и} \right) \left( \dot{T}_s E_{оп} \right) \right] \cos(\omega(t)\tau_i + \varphi_{ti}), \quad (4)$$

$$E_p(\omega) = \sum_i 2r_{ti} g_p(\tau) \left[ \left( \dot{T}_p E_{и} \right) \left( \dot{T}_p E_{оп} \right) \right] \cos(\omega(t)\tau_i + \varphi_{ti}), \quad (5)$$

где  $r_{ti}$ ,  $\varphi_{ti}$  – амплитуда и фаза комплексной отражательной способности неоднородности внутри исследуемой ВО-линии;  $g_s(\tau)$ ,  $g_p(\tau)$  – коэффициенты усиления измерительных каналов;  $\dot{T}_s$ ,  $\dot{T}_p$  – операторы, описывающие поляризационное раз-

The recording device consists of a main interferometer with polarization diversity of the signal, an auxiliary interferometer, photodetectors PD1 – PD3 and a data processing and collection device. Finally, the fiber optical coil FOC is a part of an auxiliary interferometer designed to control the optical frequency of radiation during wavelength tuning of the laser.

Optical radiation from a tunable laser using a fiber optic splitter SP1 is divided into two parts, with 90% of the power going to the main interferometer, and 10% to the auxiliary one. In the main interferometer, half of the optical radiation power from the SP2 fiber-optic splitter goes to the fiber-optic circulator and then to the line under study, the differential and absolute propagation delays of optical radiation in which are subject to preliminary determination and measurement. Optical radiation backscattered or reflected from inhomogeneities in the studied line is combined with radiation from the second (reference) branch of the main interferometer on the fiber-optic splitter SP4 and enters the polarization divider. Here, the radiation is divided into two orthogonal polarization  $s$ - and  $p$ - components and is detected by two photodetectors (PD1, PD2), which are connected via an amplifier to an ADC/DSP data processing and collection device. The data acquisition device is a high-speed three-channel analog-to-digital converter and a computing device designed for mathematical processing of the collected data.

If we consider a simplified model of the measurement process, we can say that at the site of the photodetector of the measuring interferometer, the interference of the signal of the reference channel of the interferometer and the signals of back reflection or scattering (return loss) from each point of the line under test occurs. That is, each inhomogeneity in the fiber-optic line is considered as an individual reflector. With linear adjustment of the laser wavelength, the power of the total signal of the reference channel and the return loss signals from each inhomogeneity will vary according to a sinusoidal law. The frequency of the sine wave will depend only on the rate of adjustment of the laser wavelength and the difference in the lengths of the optical paths in the branches of the interferometer, and the amplitude will depend on the intensity of the signal of distributed return loss. Thus, the signal of the photodetectors PD1 and PD2 makes it possible to restore the dependence of the return loss signal power on the length of the fiber-optic line. The polarization diversity of the signal ensures the independence of the measured signal from changes in the polarization state of radiation caused by scattering or reflection from inhomogeneities in the studied fiber-optic line [3].

деление сигнала;  $E_{и}$ ,  $E_{оп}$  – амплитуды векторов электрического поля измерительной и опорной ветвей основного интерферометра соответственно;  $\omega(t)$  – мгновенная частота излучения перестраиваемого лазера;  $\tau_i$  – разность временных задержек между измерительной и опорной ветвями основного интерферометра.

Уравнения (4), (5) описывают связь сигналов обратных потерь в исследуемой ВО-линии и наблюдаемого интерференционного сигнала в частотной области. Если преобразовать (с использованием прямого преобразования Фурье) сигналы  $E_s(\omega)$ ,  $E_p(\omega)$  в сигналы  $E_s(\tau_i)$ ,  $E_p(\tau_i)$  во временной области, то можно описывать указанные неоднородности как функцию интенсивности отраженного и рассеянного оптического излучения от временной задержки оптического излучения относительно точки его введения [2]. В результате итоговый сигнал  $E(\tau_i)$  примет вид, показанный в уравнении (6).

$$E(\tau_i) = \sqrt{E_s(\tau_i)^2 + E_p(\tau_i)^2}. \quad (6)$$

Полученный сигнал  $E(\tau_i)$  является ничем иным, как функцией распределения обратноотраженной (или рассеянной) оптической мощности от положения соответствующих неоднородностей в исследуемой ВО-линии. Для прецизионных измерений распределенных обратных потерь с помощью рассматриваемого метода производится калибровка величины  $E(\tau_i)$  при помощи меры – волоконно-оптического элемента с известным коэффициентом отражения и, соответственно, обратных потерь. В качестве данного волоконно-оптического элемента, как правило, используется волоконно-оптическое зеркало с золотым покрытием, коэффициент отражения которого известен с высокой степенью точности, что дает возможность производить измерения распределенных обратных потерь методом OFDR с погрешностью не хуже 0,1 дБ.

Динамический диапазон измерений ограничен в основном собственным шумом используемого перестраиваемого лазера. Использование перестраиваемых лазеров с низким относительным уровнем шума (RIN) порядка -160 дБ/Гц позволяет получить динамический диапазон измерений обратных потерь порядка 80 дБ. Также, следует отметить, что OFDR-метод обладает на порядок лучшим пространственным разрешением по сравнению с методом OTDR. Пространственное разрешение OFDR-рефлектометра  $\Delta L$ , м, определяется длиной волны лазера и может быть оценено с помощью соотношения (7).

Signals polarization components of the radiation  $E_s$ ,  $E_p$ , coming to the photo-detectors of the main interferometer, are described by the relations (4) and (5).

$$E_s(\omega) = \sum_i 2r_{ti} g_s(\tau) \left[ \left( \dot{T}_s E_{и} \right) \left( \dot{T}_s E_{оп} \right) \right] \cos(\omega(t)\tau_i + \varphi_{ti}), \quad (4)$$

$$E_p(\omega) = \sum_i 2r_{ti} g_p(\tau) \left[ \left( \dot{T}_p E_{и} \right) \left( \dot{T}_p E_{оп} \right) \right] \cos(\omega(t)\tau_i + \varphi_{ti}), \quad (5)$$

where  $r_{ti}$ ,  $\varphi_{ti}$  are the amplitude and phase of the complex reflectivity of the inhomogeneity inside the studied fiber-optic line;  $g_s(\tau)$ ,  $g_p(\tau)$  are the gain coefficients of the measuring channels;  $\dot{T}_s$ ,  $\dot{T}_p$  are operators describing the polarization separation of the signal;  $E_{и}$ ,  $E_{оп}$  are the amplitudes of the electric field vectors of the measuring and reference branches of the main interferometer, respectively;  $\omega(t)$  is the instantaneous radiation frequency of the tunable laser;  $\tau_i$  is the difference in time delays between the measuring and reference branches of the main interferometer.

Equations (4), (5) describe the relationship of return loss signals in the studied fiber-optic line and the observed interference signal in the frequency domain. If the signals  $E_s(\omega)$ ,  $E_p(\omega)$  are converted (using the direct Fourier transform) into signals  $E_s(\tau_i)$ ,  $E_p(\tau_i)$  in the time domain, then these inhomogeneities can be described as a function of the intensity of reflected and scattered optical radiation from the time delay of optical radiation relative to the point of its introduction [2]. As a result, the final signal  $E(\tau_i)$  will take the form shown in the equation (6).

$$E(\tau_i) = \sqrt{E_s(\tau_i)^2 + E_p(\tau_i)^2}. \quad (6)$$

The received signal  $E(\tau_i)$  is nothing more than a function of the distribution of back-reflected (or scattered) optical power from the position of the corresponding inhomogeneities in the studied fiber-optic line. For precision measurements of distributed return loss using the method under consideration, the  $E(\tau_i)$  value is calibrated using a reference – a fiber-optic element with a known reflection coefficient and, accordingly, return loss. As a rule, a gold-coated fiber-optic mirror is used as this fiber-optic element, the reflection coefficient of which is known with a high degree of accuracy, which makes it possible to measure distributed return loss by the OFDR method with an error of no more than 0.1 дБ.

The dynamic measurement range is limited mainly by the intrinsic noise of the tunable laser used. The use of tunable lasers with a low relative noise level (RIN) of the order of -160 дБ/Hz makes it possible to obtain a dynamic measurement range of return loss of the order of 80 дБ. It should also be noted that the OFDR method has a well better spatial resolution compared



$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n \cdot \Delta \lambda}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – центральная длина волны перестраиваемого лазера, [м] (рис. 3);  $\Delta \lambda$  – диапазон спектральной перестройки перестраиваемого лазера, [м];  $n$  – показатель преломления исследуемой ВО-линии.

Таким образом, в соответствии с соотношением (7) высокое пространственное разрешение измерений распределенных обратных потерь OFDR-типа не противоречит высокому динамическому диапазону измерений величины обратных потерь, в отличие от OTDR-измерителей. Так в измерителях OBR 4600 (Luna, США) OFDR-метод позволяет производить измерения распределенных обратных потерь с пространственным разрешением порядка 20 мкм при длине исследуемой ВО-линии до 70 метров и 1 мм при соответствующей длине до 2000 метров, что является наилучшим значением характеристики пространственного разрешения относительно других рассмотренных методов. К недостаткам описанного метода можно отнести то, что диапазон длин ВО-трассы ограничен длиной когерентности лазера. Так же, с ростом длины трассы возрастает ширина полосы частот сигнала интерференции при той же скорости перестройки лазера. Это требует использования более высокопроизводительных АЦП, работающих на частоте дискретизации в сотни МГц, и значительно повышает требования к вычислительной аппаратуре. Другим недостатком является высокая стоимость перестраиваемых лазеров с большой длиной когерентности. Однако, успехи современной лазерной техники приводят к тенденции на ее снижение.

Существующая в настоящее время в Российской Федерации эталонная база не предусматривает метрологическое обеспечение шкал длины OFDR-рефлектометров с точностями, заявляемыми производителями, однако работа в этом направлении ведется [4]. Для полноценного метрологического обеспечения таких приборов требуется разработка соответствующего рабочего эталона

### СРАВНЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ОПИСАННЫХ МЕТОДОВ

В табл. 2 приводится информация о технических и метрологических характеристиках упомянутых в статье измерительных приборов, реализующих OTDR, OFDR и CW-измерения обратных потерь в оптическом волокне. Необходимо отметить, что для большинства приборов данные взяты из спецификаций от производителей, т.е. эти приборы не проходили испытаний с целью утверждения типа на территории РФ. Однако, приведенные характери-

то к OTDR метод. The spatial resolution of the OFDR reflectometer  $\Delta L$ , m, is determined by the laser wavelength and can be estimated using the ratio (7).

$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n \cdot \Delta \lambda}, \quad (7)$$

where  $\lambda$  is the central wavelength of the tunable laser, [m] (Fig. 3);  $\Delta \lambda$  is the spectral tuning range of the tunable laser, [m];  $n$  – the refractive index of the studied fiber-optic line.

Thus, in accordance with the ratio (7), the high spatial resolution of measurements of distributed return loss of the OFDR type does not contradict the high dynamic range of measurements of the return loss value, unlike OTDR meters. Thus, in the OBR 4600 meters (Luna, USA), the OFDR method makes it possible to measure distributed return loss with a spatial resolution of about 20 microns with a length of the studied line up to 70 meters and 1 mm with a corresponding length up to 2000 meters, which is the best value of the spatial resolution characteristic relative to other methods considered. The disadvantages of the described method include the fact that the wavelength range of the fiber-optic path is limited by the coherence length of the laser. Also, as the path length increases, the bandwidth of the interference signal increases at the same laser tuning speed. This requires the use of higher-performance ADCs operating at a sampling rate of hundreds of MHz, and significantly increases the requirements for computing equipment. Another disadvantage is the high cost of tunable lasers with a long coherence length. However, the successes of modern laser technology lead to a tendency for its decline.

The currently existing reference base in the Russian Federation does not provide metrological support for the length scales of OFDR reflectometers with the accuracy claimed by manufacturers, however, work is underway in this direction [4]. For full-fledged metrological support of such devices, the development of an appropriate working standard is required.

### COMPARISON OF THE FIELDS OF APPLICATION OF THE DESCRIBED METHODS

Tabl. 2 provides information on the technical and metrological characteristics of the measuring devices mentioned in the article that implement OTDR, OFDR and CW measurements of return loss in optical fiber. It should be noted that for most devices, the data are taken out of the specifications from the manufacturers, i. e. these devices have not been tested for type approval in the territory of the Russian Federation. However, these characteristics make it possible to confirm the conclusions about the limitations and advantages of



стики позволяют подтвердить выводы об ограничениях и преимуществах описанных методов измерения. Символ «\*» рядом с названием измерительного прибора указывает, что прибор вносился в государственный реестр средств измерений (как тип или как единичный образец).

## ВЫВОДЫ

Развитие систем волоконно-оптической связи повышает требования к измерительной технике, необходимой для их строительства и эксплуатации. Непрерывное улучшение характеристик лазеров, фотодетекторов и информационно-измерительной техники, а также желание производителей измерительных приборов удовлетворить возрастающие потребности волоконно-оптической связи приводят как к совершенствованию и переосмыслению существующих методов измерений, так и к появлению новых методов измерения, а также к воплощению их в серийно-выпускаемых измерительных приборах. Рассмотренные методы измерения обратных потерь в оптическом волокне формировались от более простого CW-метода к высокотехнологичному методу OFDR-рефлетометрии, однако в настоящее время нельзя сказать о полном преобладании какого-то одного из них, они имеют свою специфику и области применения.

CW-измерители обратных потерь занимают нишу портативных приборов, обладающих ограниченным функционалом, но конкурентной стоимостью и эталонных измерителей, обладающих малыми погрешностями измерений, но предназначенных для редкого использования. Они применяются для измерения интегральных обратных потерь и имеют большие ограничения при измерении обратных потерь от заданного участка трассы. Если погрешность CW-рабочих средств измерения достаточно велика и составляет обычно около 0,5 дБ, то высокая точность эталонных измерителей достигается хорошей полировкой оптических разъемов и использованием специальных эталонных мер. Диапазон измерений обратных потерь CW-измерителями обычно составляет от 0 до -65...-70 дБ. Портативные CW-измерители обратных потерь часто входят в состав оптических тестеров, предназначенных для измерения вносимых потерь и средней мощности оптического излучения в волокне и находят применение при монтаже и обслуживании линий ВО-связи.

OTDR-измерители обратных потерь являются, по сути, адаптацией OTDR для работы в ближней зоне и в более широком диапазоне сигналов обратного рассеяния. Такие приборы позволяют

the described measurement methods. The symbol “\*” next to the name of the measuring device indicates that the device was entered into the state register of measuring instruments (as a type or as a single sample).

## CONCLUSIONS

The development of fiber-optic communication systems increases the requirements for measuring equipment necessary for their construction and operation. The continuous improvement of the characteristics of lasers, photodetectors and information and measuring equipment, as well as the desire of manufacturers of measuring devices to meet the increasing needs of fiber-optic communication, lead both to the improvement and rethinking of existing measurement methods, and to the emergence of new measurement methods, as well as to their implementation in mass-produced measuring devices. The considered methods for measuring return losses in optical fiber were formed from the simpler CW method to the high-tech OFDR reflectometry method, however, at present it is impossible to say about the complete predominance of any one of them, they have their own specifics and fields of application.

CW return loss meters occupy a niche of portable devices with limited functionality, but competitive cost, and reference meters with small measurement errors, but designed for rare use. They are used to measure integral return loss and have great limitations when measuring the return loss from a given section of the path. If the error of the CW-working measuring instruments is large enough and is usually about 0.5 dB, then the high accuracy of the reference meters is achieved by good polishing of the optical connectors and the use of special reference gauges. The return loss measurement range by CW meters is usually from 0 to -65...-70 dB. Portable CW return loss meters are often included in optical testers designed to measure insertion losses and average optical radiation power in fiber and are used in the installation and maintenance of fiber-optic communication lines.

OTDR return loss meters are, in fact, an adaptation of OTDR for operation in the near-field and in a wider range of backscattering signals. Such devices allow measuring the value of the return loss from a given section of the path, and are used, for example, in the production of optical components and patch cords. Error rate of OTDR meters, on average, are slightly higher than the error of CW meters, but it is provided in a wider measurement range (up to -80 dB). The spatial resolution ranges from ones to tens centimeters.

OFDRs are more often rather large multifunctional measuring systems (optical vector analyzers) that, in

Таблица 2. Сравнение характеристик измерителей обратных потерь разных типов

Table 2. Comparison of characteristics of return loss meters of different types

Метод Method	Диапазон измерения обратных потерь, дБ Return loss measurement range, dB	Погрешность измерения, дБ Measurement error, dB	Диапазон длин трассы, м Path length range, m	Пространственное разрешение Spatial resolution	Рабочие длины волн, нм Operating wavelengths, nm	Серийные приборы Serial devices
CW	От 0 до -70	±1	Интегральные измерения на трассе любой длины Integral measurements on a path of any length	-	1310, 1550	FOD-1206B (FOD, Россия)
	От 0 до -65	±1		-	1310, 1490, 1550, 1625	FX-85 (VeEX incorporated, США)
	От 0 до -65	±0,5		-	1310, 1490, 1550	FOT-930* (EXFO, Канада)
	От 0 до -85	±0,4 ±0,5 (до -60 дБм) ±0,6 (менее -60 дБм)		-	1310, 1490, 1550, 1625, 1650	BR1 (JGR optics, Канада)
OTDR	От -30 до -70	±1	От 0,7 м From 0,7 m	20 см	1310, 1490, 1550, 1625 или (850 для mORL-A11)	MAP-200 с модулями mORL-A13* и mORL-A11* (VIAVI, Франция)
	От -10 до -80	±0,5	От 2,5 м до 2400 м From 2,5m to 2400m	10 см	850 или 1310, 1550	Op-940 (OptoTest, США)
	От -30 до -8	±1 (до -30 дБ) ±2,2 (до -80 дБ)	1500 м 1500 m	Не указан Not specified	1310, 1550 или 1490, 1625	MS12* (JGR optics, Канада)
OFDR	От 0 до -80	±0,1	До 75 м Up to 75 m	Не хуже 20 мкм At least 20 μm	От 1525 до 1610	OVA-5000* (LUNA, США)
	От 0 до -80 (при длине трассы до 70 м) От 0 до -60 (при длине трассы до 2000 м) From 0 to 80 (with length of the path up to 70 m) From 0 to 60 (with length of the path up to 2000 m)	±0,1	До 2000 м Up to 2000 m	Не хуже 20 мкм (при длине трассы до 70 м), 1 мм (при длине трассы до 2000 м) At least 20 μm (with length of the path up to 70 m), 1 mm (with length of the path up to 2000 m)	От 1525 до 1610	OBR 4600 (Luna, США)
	До 80 дБ	±0,1	До 100 м Up to 100 m	Не хуже 20 мкм At least 20 μm	От 1260 до 1340	CLM-O (TESENSE, Китай)
	До 80 дБ	±0,1	До 100 м Up to 100 m	Не хуже 20 мкм At least 20 μm	От 1525 до 1625	CLM-C+L (TESENSE, Китай)



измерять величину обратных потерь от заданного участка трассы, и находят применение, например, на производствах оптических компонентов и соединительных патч-кордов. Погрешность OTDR-измерителей, в среднем, несколько выше, чем погрешность CW-измерителей, однако она обеспечивается в более широком диапазоне измерений (до -80 дБ). Пространственное разрешение составляет от единиц до десятков сантиметров.

OFDR чаще представляют из себя достаточно габаритные многофункциональные измерительные системы (оптические векторные анализаторы) которые помимо обратных потерь могут измерять вносимые потери, дисперсионные характеристики, поляризационную экстинкцию и поляризационно-зависимые потери в волоконно-оптических линиях. Но главной особенностью этих приборов является пространственное разрешение, сравнимое с длиной волны оптического излучения (порядка десятков мкм) на дистанциях порядка сотен метров. Диапазон измерения обратных потерь OFDR составляет от 0 до -80 дБ, а погрешность измерения составляет 0,1-0,2 дБ. Описанные характеристики делают OFDR идеальным решением для измерений на коротких дистанциях, в том числе, для приложений интегральной фотоники. Разрешение субмиллиметрового диапазона, характерное для OFDR, является для OTDR-измерителей принципиально недостижимым, однако, в настоящее время OTDR могут иметь компактную реализацию, более низкую стоимость и позволяют производить измерения на наборе различных дискретных длин волн, тогда как OFDR работают в не очень широком спектральном диапазоне перестраиваемого лазера.

## АВТОРЫ

Бычков С. Б., м. н. с., Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГБУ «ВНИИОФИ»), Москва, Россия.  
ORCID: 0009-0000-5118-6368

Погонышев А. О., м. н. с., ФГБУ «ВНИИОФИ», Москва, Россия.  
Web of Science Researcher ID: HJB-3251-2022  
Scopus Author ID: 57204943217

Тихомиров С. В., д. т. н., преподаватель аспирантуры ФГБУ «ВНИИОФИ», Москва, Россия.

Сумкин В. Р., генеральный директор, ООО «Научно-производственное предприятие «Измерительная техника связи», Санкт-Петербург, Россия.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

## ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива.

addition to return loss, can measure insertion loss, dispersion characteristics, polarization extinction and polarization-dependent loss in fiber-optic lines. But the main feature of these devices is the spatial resolution comparable to the wavelength of optical radiation (on the order of tens of microns) at distances of the order of hundreds of meters. The OFDR return loss measurement range is from 0 to -80 dB, and the measurement error is from 0.1 to 0.2 dB. The described characteristics make OFDR an ideal solution for short-range measurements, including for integrated photonics applications. The resolution of the submillimeter range specific to OFDR is fundamentally unattainable for OTDR meters, however, currently OTDRs can have a compact implementation, lower cost and allow measurements at a set of different discrete wavelengths, whereas OFDRs operate in a not very wide spectral range of a tunable laser.

## REFERENCES

1. Listvin A. V., Listvin V. N. *Fiber optics reflectometry*. Moscow. 2005; ISBN 5-902367-03-04. (In Russ.)  
Листвин А. В., Листвин В. Н. *Рефлектометрия оптических волокон*. - Москва, ЛЕСАРТ, 2005. 208 с; ISBN 5-902367-03-04.
2. Soller B. J., Gifford D. K., Wolfe M. S., Froggatt M. E. Optical Backscatter Reflectometry (OBR). *Photonics Russia*. 2019;13(5): 452-461; DOI: 10.22184/FROS.2019.13.5.452.460.
3. Soller B. J., Gifford D. K., Wolfe M. S., Froggatt M. E. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. *Opt. Exp.* 2005; 13(5): 666-674. DOI:10.1364/OPEX.13.000666.
4. Grigoriev V. V., Kravtsov V. E., Mityurev A. K., Naumenko E. A., Pogonyeshev A. O., Savkin K. B., Tikhomirov S. V. Methods of calibration of high-resolution optical reflectometers operating in the frequency domain. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2018; 9: 40-43. (In Russ.)  
Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митурев А. К., Мороз Е. А., Погонышев А. О., Савкин К. Б. Методы калибровки оптических рефлектометров высокого разрешения, работающих в частотной области. *Измерительная техника*. 2018; 9: 40-43. DOI: 10.32446/0368-1025it-2018-9-40-43.

## AUTHORS

Bychkov S. B., junior research scientist, Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Optical and Physical Measurements" (FGBU "VNIIOFI"), Moscow, Russia.  
ORCID: 0009-0000-5118-6368

Pogonyeshev A. O., junior research scientist, VNIIOFI, Moscow, Russia.  
Web of Science Researcher ID: HJB-3251-2022  
Scopus Author ID: 57204943217

Tikhomirov S. V., Dr. of Science (Eng.), postgraduate teacher, VNIIOFI, Moscow, Russia.

Sumkin V. R., general director "Research and Production Enterprise "Measuring Communications Equipment" ("NPP"ITS"), Saint-Petersburg, Russia.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors state that they have no conflict of interest. All the authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

## CONTRIBUTION OF THE MEMBERS OF THE AUTHOR'S TEAM

The article is based on the work of all members of the author's team.

XXVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

# INTERPOLITEX



СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

**19–21 НОЯБРЯ 2024**

МОСКВА • ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР «ТИМИРЯЗЕВ»

ОРГАНИЗАТОР



**INTERPOLITEX.RU**