



# Оптическая рефлектометрия высокого разрешения

Б. Дж. Соллер, Д. К. Гиффорд, М. С. Вольф, М. Э. Фроггатт  
*Luna Technologies Incorporated, Блэксбург, США*

Технология оптической связи быстро развивается по причине возрастания спроса и требований к скорости передачи данных. При увеличении объема передачи информации и усложнении схем модуляции сигнала возрастают и требования к параметрам оптического тракта. Современное оборудование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) все чаще включает в себя компоненты, изготовленные на базе фотонных интегральных схем (ФИС). Использование новых элементов приводит к появлению дополнительных параметров, которые требуется учитывать при проектировании и монтаже надёжных систем передачи с высокой пропускной способностью. Измерение и комплексный анализ потерь в оптической линии связи является фундаментальной частью при конструировании и оптимизации характеристик компонентов оптоволоконных сетей. В этом обзоре приведен обзор различий между методами оптической рефлектометрии. Представлены преимущества оптической рефлектометрии обратного рассеивания (англ. Optical Backscatter Reflectometry – OBR) при решении ряда задач, включающих анализ параметров ФИС и волоконных сетей малой протяженности.

**Ключевые слова:** фотонные интегральные схемы, компоненты волоконной связи, частотная оптическая, методы оптической рефлектометрии (OTDR, OFDR, OLCR, OBR)

Статья получена: 24.06.2019. Принята к публикации: 22.07.2019.

## Optical Backscatter Reflectometry (OBR)

B. J. Soller, D. K. Gifford, M. S. Wolfe, M. E. Froggatt  
*Luna Technologies Incorporated, Blacksburg, USA*

Optical communications technology is rapidly evolving to meet the ever-growing demand for ubiquitous connectivity and higher data rates. As signaling rates increase and modulation schemes become more complex, guaranteeing a high-fidelity optical transmission medium is becoming even more critical. Additionally, modern networks are relying more on photonic integrated circuits (PICs) based on silicon photonics or other developing technologies, introducing additional variables into the design and deployment of robust high bandwidth optical systems. Measurement and full characterization of loss along the light path is a fundamental tool in the design and optimization of these components and fiber optic networks. The review considers the difference in optical reflectometry methods. The advantages of optical backscatter reflectometry (OBR) are presented for a number of applications, including short fiber networks and PIC.

**Keywords:** Optical communications technology, optical reflectometry methods (OTDR, OFDR, OLCR, OBR)

Received: 24.06.2019. Accepted: 22.07.2019.



Рефлектометры – это инструменты, применяющиеся для проведения измерений параметров разных видов оптических систем, таких как: обратные потери, вносимые потери, расположение отражающих событий в волоконном тракте. В то время, как стандартные оптические рефлектометры, работающие во временной области, (англ. Optical Time Domain Reflectometer – OTDR), являются приборами, широко применяющимися при характеристике оптоволоконных сетей средней и дальней длины, оптическая рефлектометрия обратного рассеяния OBR предлагает уникальную комбинацию высокого пространственного разрешения и чувствительности. Это делает OBR очень важным инструментом для анализа параметров менее протяженных локальных ВОЛС, компонентов и современных фотонных интегральных схем.

### ОТРАЖАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ПОТЕРИ НА ОТРАЖЕНИЕ

Независимо от того, стоит ли задача анализа характеристик миниатюрной ФИС или определения оптимальных методов устранения неисправности в дальнемагистральном оптоволоконном кабеле, понимание и количественная оценка потерь вдоль оптического пути является ключевым этапом работы.

Обратные потери на отражение (англ. Return Loss – RL) определяются как отношение мощности излучения, отраженного назад от устройства/участка ВОЛС ( $P_R$ ), к мощности излучения, вводимого в этот участок ( $P_{in}$ ). Величина является логарифмической и выражается в децибелах (дБ).

$$RL = 10 \log \left( \frac{P_R}{P_{in}} \right).$$

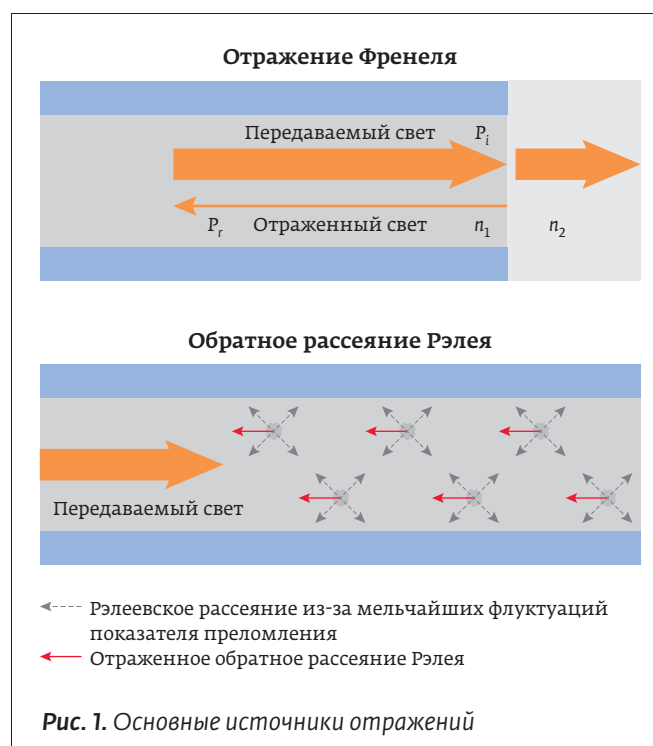
Высокие уровни оптических потерь на отражение могут снизить отношение сигнал/шум, способствовать увеличению частоты появления битовых ошибок, мешать работе оптического источника и в целом ухудшить характеристики работы того или иного оптического компонента или всей системы.

Два основных явления, вызывающие этот тип потерь, – обратное отражение Френеля и обратное рассеяние Рэлея (рис. 1). Обратное отражение Френеля происходит при попадании излучения на границу раздела двух сред с разными показателями преломления ( $n_i$ ). В оптическом волокне,

например, отражения Френеля вызваны наличием воздушных зазоров, микротрещин, макроизгибов, несоосностью сердцевин при стыковке и т.д. С другой стороны, обратное рассеяние Рэлея является внутренним свойством оптических сред и вызвано наличием естественных примесей и различных неоднородностей в световоде. Обратное рассеяние Рэлея происходит по всей длине оптического волокна.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НА ОТРАЖЕНИЕ

Рефлектометрия – это совокупность методов измерения обратных потерь (потерь на отражение). Принцип действия рефлектометра состоит в введении в исследуемый участок световода или ВОЛС зондирующего сигнала известной мощности, последующего измерения мощности отраженного светового сигнала и вычисления их отношения (рис. 2). Измерение позволяет получить либо количественную оценку отраженного света, либо вычислить потери вдоль оптического пути. Измерение совокупности или полной величины обратных оптических потерь (англ. Optical Return Loss – RL) в ВОЛС или в отдельном её участке – относительно простое действие и состоит в подаче светового сигнала известного уровня мощности в исследуемый компонент или участок с последующим измерением мощности отражённого излучения.



Наиболее простой прибор, использующийся при проведении этого типа измерения, – оптический рефлектометр непрерывной волны (англ. Optical Continuous-Wave Reflectometer – OCWR). Хотя нередко при эксплуатации бывает необходимо измерить полную величину оптических потерь на отражение, она не дает понимания того, в какой именно части ВОЛС существует проблема, вызывающая затухание.

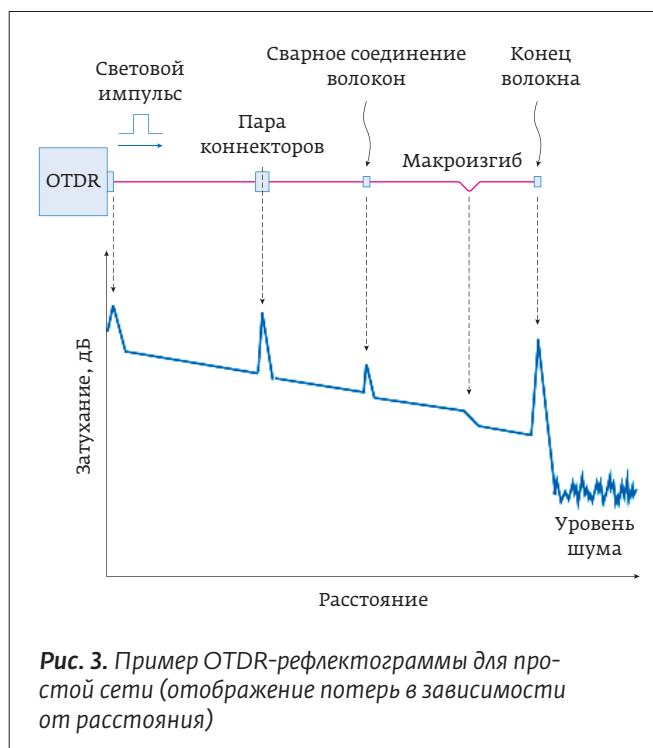
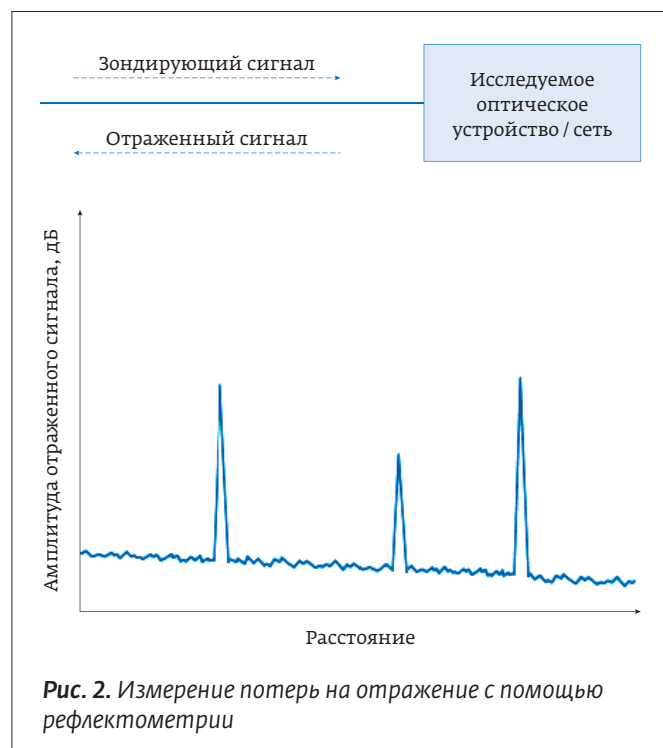
Однако с помощью оптического рефлектометра временной области (англ. Optical Time Domain Reflectometer – OTDR) или оптического рефлектометра частотной области (англ. Optical Frequency Domain Reflectometer – OFDR) можно измерить потери на отражение по всей длине исследуемого участка. Всего существуют три основных метода пространственно-разрешенной рефлектометрии: оптическая рефлектометрия временной области (OTDR), оптическая низкокогерентная рефлектометрия (OLCR) и оптическая рефлектометрия частотной области (OFDR).

### ОПТИЧЕСКИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРЫ ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ (OTDR)

OTDR являются наиболее известными и популярными приборами, используемыми для проведения рефлектометрических измерений параметров ВОЛС. Принцип работы OTDR состоит в подаче оптических импульсов в оптическое

волокно и измерении зависимости интенсивности отраженного и рассеянного света от временной задержки между введением сигнала и фиксацией его отражённой части на фотоприёмнике. Эти измерения используются для создания рефлектограммы или зависимости интенсивности полученного сигнала от длины оптического пути. Пример рефлектограммы OTDR показан на рис. 3.

Динамический диапазон OTDR определяет максимальную определяемую длину оптического тракта. Для OTDR характерно наличие диапазонов измерений, достигающих сотен километров, что делает их полезными для анализа дальних волоконно-оптических линий связи. Пространственное разрешение OTDR, определяемое как наименьшее расстояние между двумя различаемыми событиями отражения, обычно определяется шириной импульса оптического излучения. Более короткая ширина импульса обеспечивает более высокое разрешение (близко расположенные точки), но ограничивает динамический диапазон и диапазон расстояний OTDR. Обычно исполнение OTDR позволяет оператору уменьшить ширину импульса до величины, достаточной для того, чтобы разрешить события смежного отражения в границах 1 или 2 метров.





Пространственное разрешение OTDR также ограничено наличием мертвой зоны. Мертвая зона OTDR – это расстояние от точки отражения до следующего аналогичного события, которое OTDR не может идентифицировать как отражение. Мертвая зона OTDR обычно определяется шириной импульса, а также временем восстановления фотодетектора в пределах OTDR. Мертвые зоны часто наблюдаются на разъёме/входе OTDR и между любыми другими сильными отражателями.

Стандартные OTDR хорошо подходят для измерений относительно длинных участков, достигающих сотен километров и более. Для более коротких участков и в случаях, когда требуется более высокое разрешение, применяются OTDR с высоким разрешением, имеющие уменьшенную мертвую зону и повышенное пространственное разрешение до десятков сантиметров.

### ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ С НИЗКОЙ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ (OLCR)

Низкокогерентная оптическая рефлектометрия (англ. Optical Low-Coherence Reflectometry – OLCR) – это метод измерения, позволяющий определить координаты события отражения с высокой точностью. В основе этого метода лежит интерферометрический метод измерения, при котором используются широкополосный источник излучения с низкой когерентностью и перестраиваемая линия задержки.

Следует отметить, что, несмотря на то, что OLCR позволяет достигнуть высокого пространственного разрешения измерений в оптическом волокне (до нескольких десятков микрометров), максимальная длина исследуемого участка равна нескольким десяткам сантиметров. Таким образом, применение OLCR ограничено анализом характеристик отдельных оптических

компонентов, таких как волоконно-оптические коннекторы.

### ОПТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ (OFDR)

Если сравнивать максимальную длину исследуемого участка, то между OTDR и OLCR находятся приборы, работающие по принципу частотной рефлектометрии (англ. Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR). OFDR – интерферометрический метод измерений, в котором используется высококогерентный лазерный источник излучения с непрерывно перестраиваемой длиной волны. Анализ интерференционной картины производится с помощью преобразования Фурье, позволяющего получить зависимость интенсивности отражения от расстояния до точки введения зондирующего излучения.

OFDR является оптимальным методом измерений при решении задач, требующих сочетания высокой скорости, чувствительности и разрешения при анализе коротких и промежуточных длин линий передачи.

### ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (OBR)

Оптическая рефлектометрия обратного рассеяния (англ. Optical Backscatter Reflectometry – OBR) является методом, полученным путем добавления к OFDR поляризационных измерений, что приводит к улучшению чувствительности и разрешения без уменьшения длины анализируемого оптического тракта.

Упрощенная схема измерения методом OBR приведена на рис. 4. Излучение перестраиваемого лазерного источника разделяется и распространяется по двум плечам интерферометрической схемы: опорному и рабочему. В опорное плечо входит контроллер поляризации, использующийся для равного распределения интенсив-

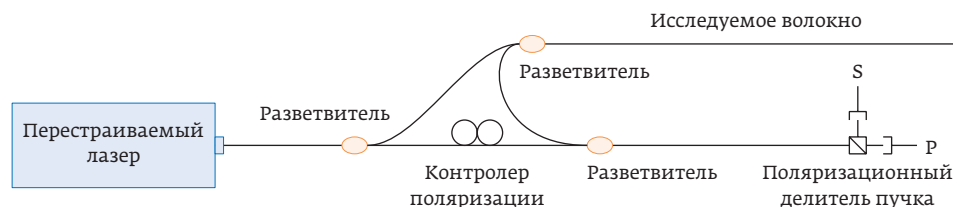


Рис. 4. Упрощенная схема системы оптической рефлектометрии обратного рассеяния (OBR)



ности излучения между двумя взаимортогональными поляризационными состояниями. Затем излучение, распространяющееся по опорному плечу, попадает на поляризационный светоделитель и на фотоприемники S и P, используемые для измерения интенсивности излучения с двумя различными поляризациями.

Результатом является получение значения комплексных коэффициентов отражения. Затем с помощью обратного преобразования Фурье из полученных данных вычисляют искомую зависимость. Высокое разрешение OBR определяет его незаменимость в анализе ФИС, компонентов интегральной фотоники и других малогабаритных компонентов. Благодаря расширению максимальной анализируемой длины отрезка волокна до 2 км, метод OBR также оказывается полезным при устранении неполадок относительно коротких волоконных сетей или измерения задержки передачи сигнала с точностью до нескольких пикосекунд. На рис. 5 приведено сравнение технологий оптической

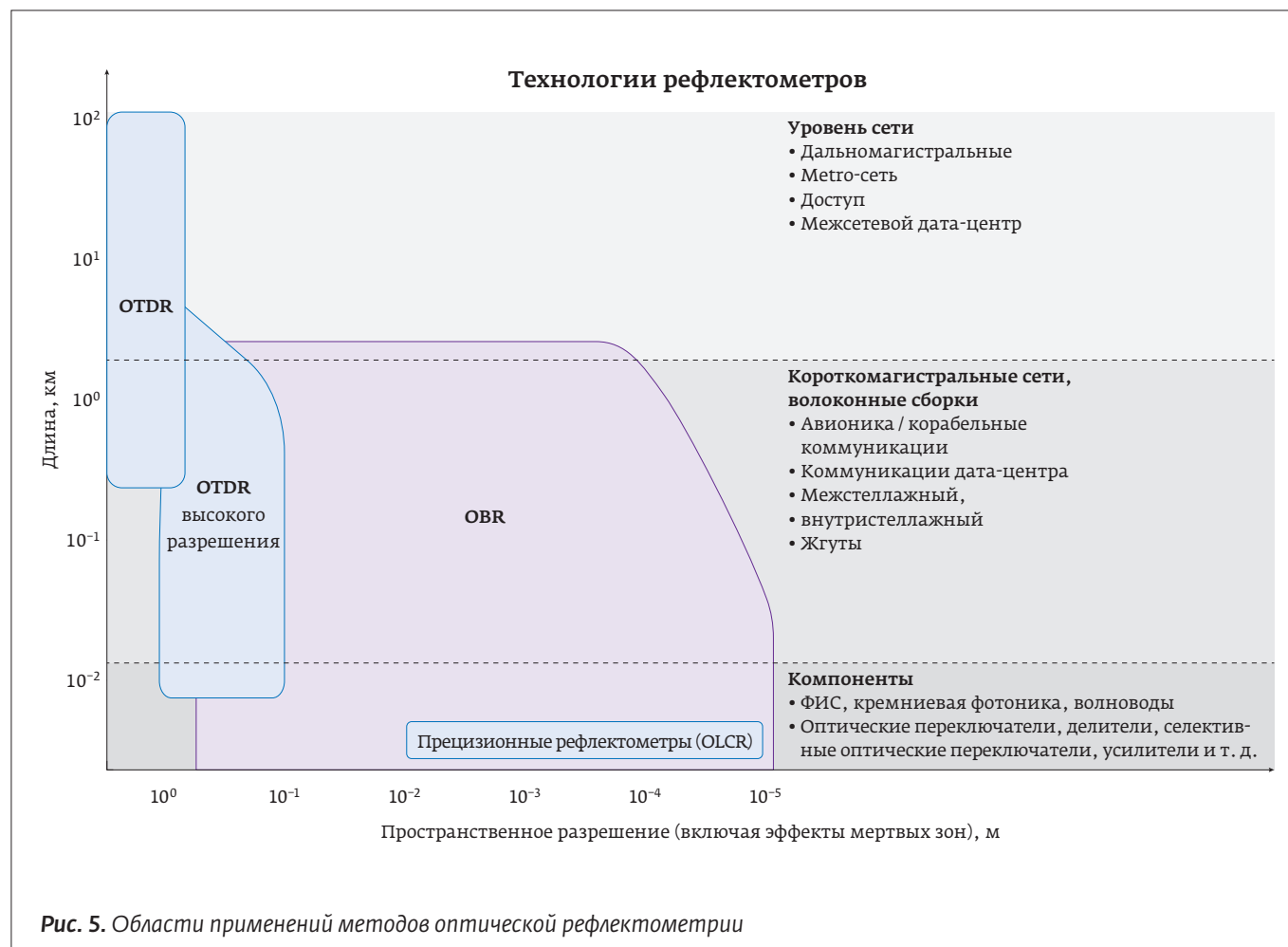
Таблица. Измерительные возможности OBR

Диапазон измерений	Пространственное разрешение (кварцевое оптоволокно)
30 м	20 мкм
70 м	20 мкм
2 км	1 мм

рефлектометрии. Сопоставляя длину исследуемого участка и пространственное разрешение, график иллюстрирует уникальный охват применений OBR рефлектометров.

### УЛЬТРАВЫСОКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И ОТСУТСТВИЕ МЕРТВЫХ ЗОН

Основное преимущество OBR перед другими рефлектометрами является беспрецедентное пространственное разрешение без ограничений, присущих OTDR, вызванных наличием мертвых зон.





Так как принцип работы приборов OBR основан на анализе в частотном диапазоне, мертвые зоны отсутствуют. События отражения, происходящие на малой дистанции друг от друга, с помощью OBR легко различимы. Пространственные разрешения этих рефлектометров достигают от 10 мкм для участков с длиной до 30 м и разрешения в 1 мм для участков длиной 2 км (см. таблицу).

Разрешение OBR увеличивается с ростом показателя преломления материала световода. Например, кремниевые ФИС можно исследовать с разрешением около 5 мкм.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ С OBR

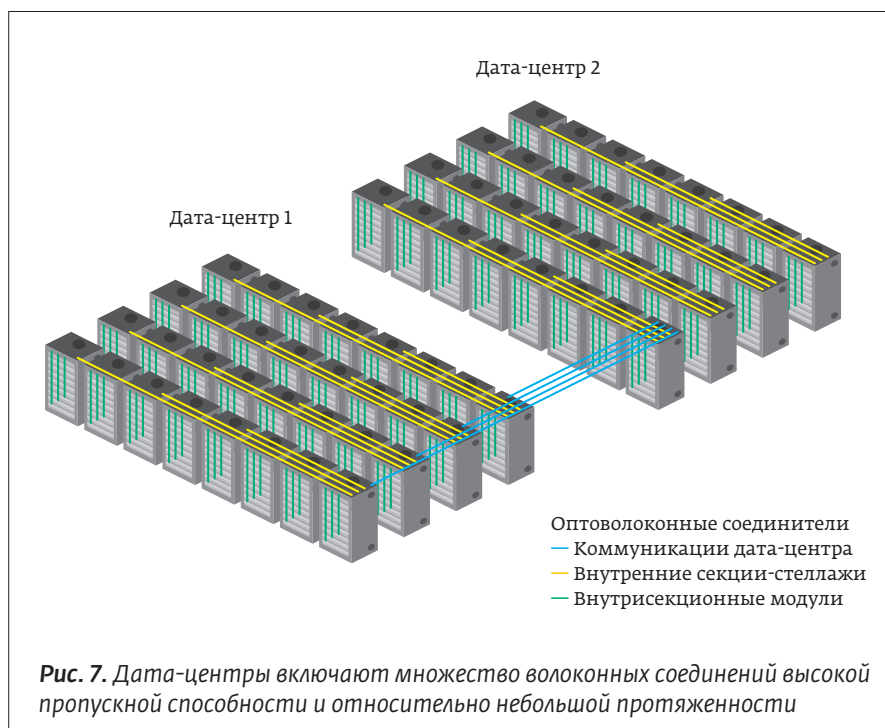
В дополнение к измерению пространственно-разрешённых обратных потерь RL, OBR-рефлектометр позволяет одновременно получить значения других важных характеристик оптических световодов:

- Вносимые потери (англ. Insertion Loss, IL);
- Спектральная зависимость RL;
- Задержка распространения сигнала в световоде;
- Групповая задержка (в зависимости от длины волны);
- Производная фазы сигнала;
- Эволюция поляризационного состояния.

Так как OBR позволяет проводить измерения спектрального сдвига в обратном рассеянии Рэллея с высокой точностью, его также можно использовать для измерения механических напряжений (деформаций) или температуры, используя оптическое волокно в качестве чувствительного элемента. Специалисты компании Luna воплотили эту возможность в отдельной измерительной платформе (ODiSI), которая позволяет провести измерения механических деформаций и температуры вдоль оптического волокна с пространственным разрешением меньшим, чем 1 мм.

### ПРИМЕНЕНИЯ OBR

Уникальная точность и разрешение OBR делают его основным инструментом для ряда применений, включая измерение параметров ФИС и волоконных сетей небольшой протяженности. Ниже приведены три применения, иллюстрирующие измерительные возможности OBR:



- Анализ параметров сетей небольшой протяженности;
- Анализ параметров волоконно-оптических компонентов и световодов;
- Измерение оптической задержки (или длины световода).

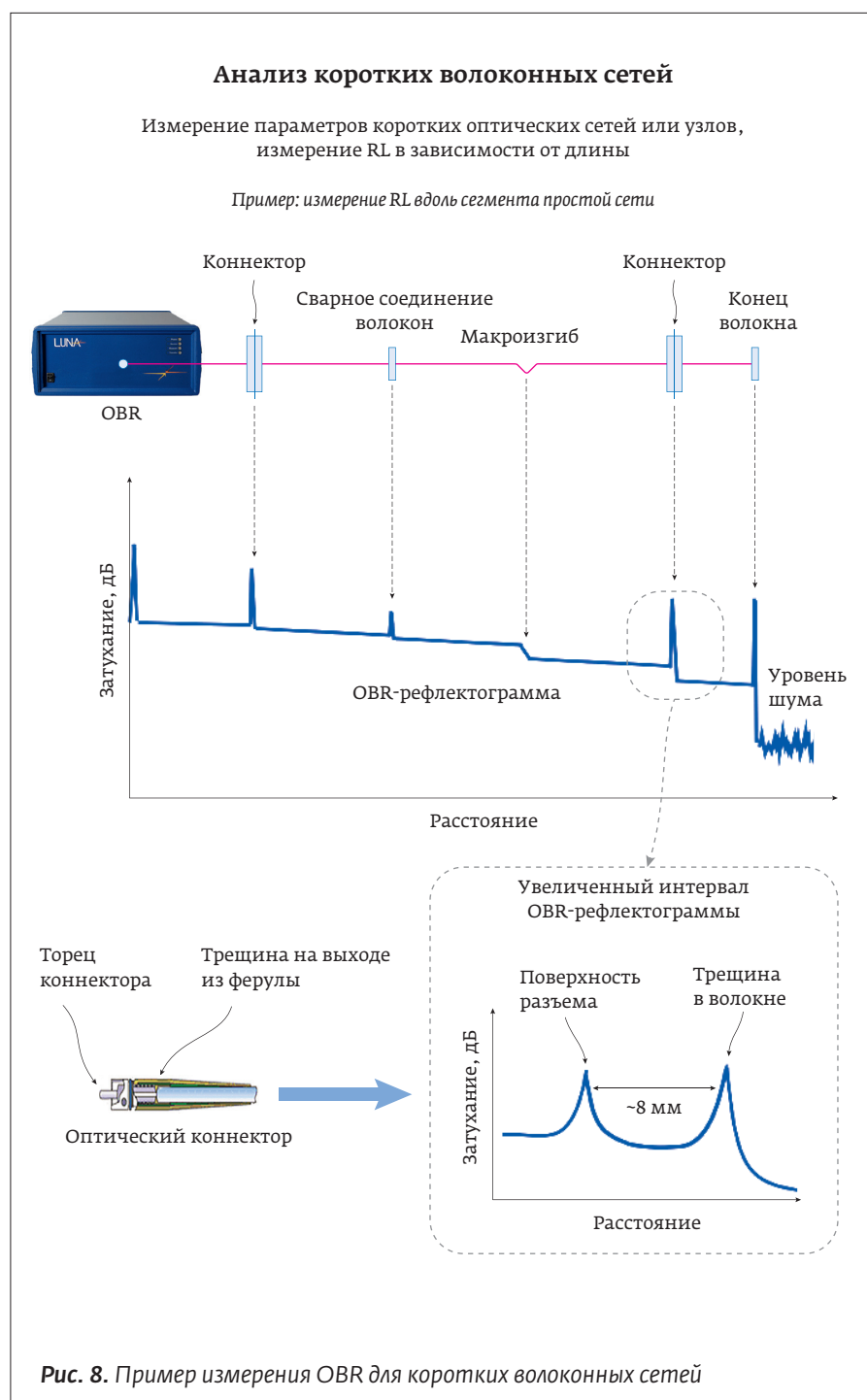
Вышеперечисленные применения не являются единственными, но наглядно иллюстрируют области, в которых эти приборы могут

быть полезны: проектирование оптических систем, тестирование, анализ и устранение неполадок.

## АНАЛИЗ ОПТОВОЛОКОННЫХ СЕТЕЙ НЕБОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

Высокое разрешение OBR также хорошо подходит для анализа неисправностей и их устранения в локальных ВОЛС небольшой протяженности. По мере продолжающегося роста объема передаваемых данных растёт общая доля FTTP сетей и высокоскоростных оптических линий связи в городских центрах обработки данных (ЦОД) (рис. 7). Оптоволоконные линии также применяются в воздушных судах, кораблях и других средствах передвижения для обеспечения бортовой связи. Для точного анализа этих линий в ходе монтажа и эксплуатации идеально подходят рефлектометры OBR.

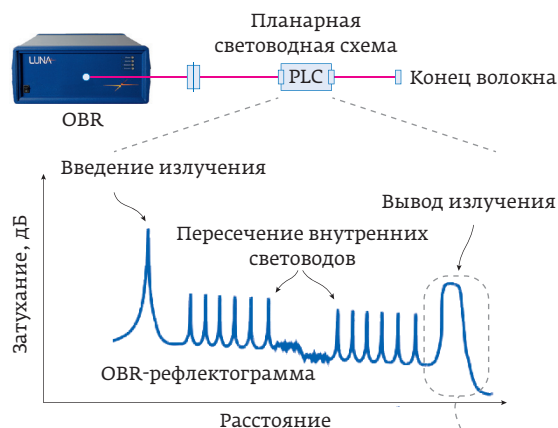
Пример измерения параметров относительно короткой линии связи приведен на рис. 8. OBR предоставляет детальный отчет о потерях в тракте аналогично OTDR. Однако взаимное положение событий определяется с высокой точностью благодаря преимуществу в разрешении и отсутствию мертвых зон. Например, в месте расположения второго коннектора наблюдается высокий уровень отражений, что позволяет предположить несоосность расположения сердцевин оптических волокон в месте стыка. Однако разрешение OBR позволяет более детально рассмотреть эту область и определить, что отражение также наблюдается за коннектором в 8 мм от его торца, на трещине в волокне. Ее появление, очевидно, связано с наличием механического напряжения



### Анализ компонента и волновода

Анализ оптического пути внутри интегрального фотонного устройства с измерением обратных потерь в зависимости от длины

Пример: измерение RL внутри и на входе / выходе планарной световодной схемы (PLC)



Расширение указывает на дисперсию

OBR может далее анализировать путь, измеряя групповую задержку в зависимости от длины волны

Склон кривой групповой задержки указывает на хроматическую дисперсию

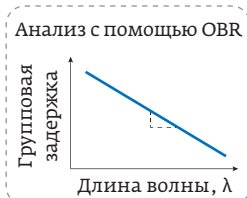


Рис. 9. Пример измерения OBR для компонента на основе планарной световодной схемы

оптическом исполнении. Способность измерительного прибора позволить разработчику «заглянуть» внутрь фотонной интегральной схемы (ФИС) и предоставить пространственную зависимость потерь, включая область стыковки оптического волокна с ФИС, является незаменимой для улучшения конструкции оптического световода и интегральной схемы.

В качестве примера на рис. 9 представлен результат анализа планарной световодной схемы с помощью OBR. Рефлектограмма показывает потери, возникающие в области ввода/вывода излучения, вносимые волноводом потери и даже малые отражения, возникающие в точках пересечения оптических путей внутри схемы. Также наблюдается уширение пика отражения на дальнем конце устройства. Это свидетельствует о наличии дисперсионной зависимости. Используя стандартные функции анализа OBR, оператор также может определить групповую задержку в зависимости от длины волны передаваемого излучения. Наклон групповой задержки указывает на наличие хроматической дисперсии, характерное для компонентов этого типа.

В качестве дополнительного примера на рис. 10 приведен результат проведенного с помощью OBR от компании Luna анализа световода, сформированного в кремниевой пластине. На рефлектограмме отчетливо видны 50 отражений внутри ФИС, находящихся на расстоянии 50 мкм друг от друга.

в области выхода волокна из ферулы.

Только OBR система сочетает в себе высокое пространственное разрешение и расширенный диапазон измеряемых длин отрезков, что позволяет обнаружить дефекты и оценить уровень сопутствующих им проблем.

### АНАЛИЗ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И СВЕТОВОДОВ

Измерения потерь оптической мощности и дисперсии являются критическими при проектировании и производстве устройств в интегрально-

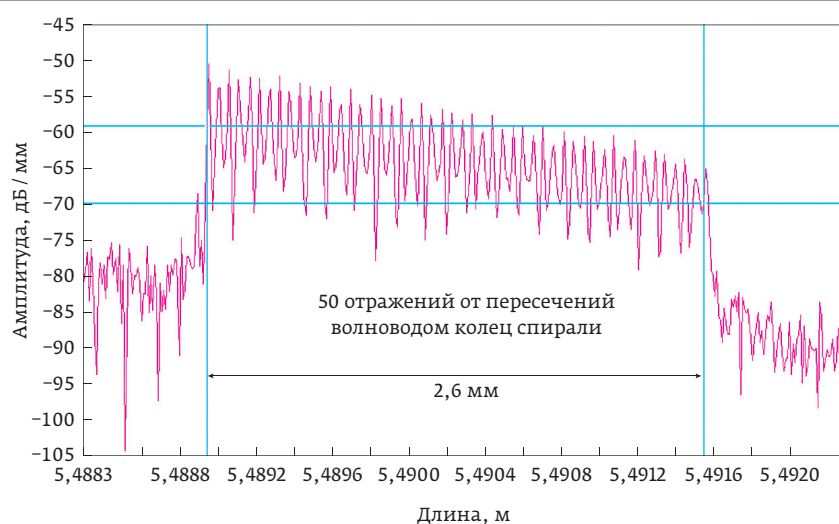
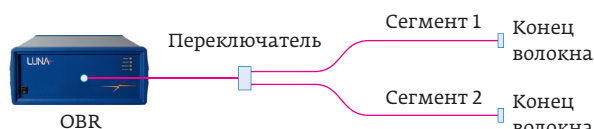


Рис. 10. Сканирование с помощью OBR волноводного устройства кремниевой фотоники

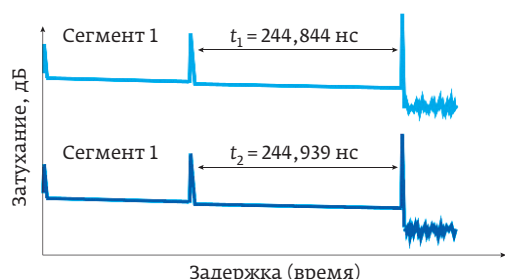
## Измерение задержки и длины

Точное измерение задержки (длины) в соединениях оптоволокон с пикосекундной точностью

Пример: измерение задержки в двух сегментах (50 м) в дата-центре



Результаты измерений с OBR:



Для этого примера измерения двух 50-метровых сегментов дают различие 95 пс, что соответствует длине 19,3 мм

**Рис. 11.** Пример измерения задержки и длины оптического волокна

## ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАДЕРЖКИ И ДЛИНЫ СВЕТОВОДА

Длину оптического волокна, а также временную задержку передачи сигнала можно точно измерить при помощи OBR-рефлектометра. Такие измерения необходимы для контроля качества высокоточных соединений специальных оптических волокон, диагностики проблем и сертификации в случаях повышенных требований к временным задержкам в каналах передачи информации, в финансовых центрах обработки данных, системах передачи эталонных сигналов времени и частоты, активных фазированных антенных решетках.

Благодаря высокой частоте дискретизации OBR позволяет измерить задержку с точностью до пикосекунд. На рис. 11 представлено в качестве примера измерение задержки в двух оптических волокнах, каждое из которых имеет длину около 50 м. OBR рефлектометр определяет разницу в задержке между двумя соединениями как 95 пс, что для этого волокна соответствует разнице в длине в 19.3 мм.

С помощью системы OBR LUNA 4600 задержка измеряется с точностью <0.0034% от полной длины исследуемого участка. Для отрезка оптического



**Рис. 12.** Оптический рефлектометр обратного рассеяния OBR LUNA 4600

волокна длиной в 30 м это соответствует точности около 5 пикосекунд, а для двухкилометрового – 0,34 наносекунд.

## ЛИНЕЙКА OBR-РЕФЛЕКТОМЕТРОВ КОМПАНИИ LUNA

Инновационные OBR-рефлектометры от компании Luna (<https://sphotonics.ru/catalog/reflektometryvysokogo-razresheniya-ot-luna/>) предоставляют уникальные возможности измерений параметров оптических световодов. Среди них высокая производительность и удобство эксплуатации при решении различных задач в научно-исследовательских лабораториях, на производстве, при контроле качества изделий и в полевых условиях. OBR-рефлектометры включают в себя линейку приборов:

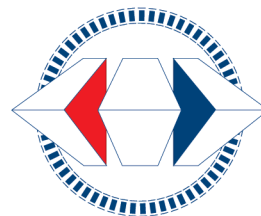
- OBR4600: разрешение 10 мкм и длина исследуемого участка до 2 км, отлично подходит для лабораторий и производственных помещений;
- OBR5T-50: частота измерений >10 Гц, оптимизирован и модернизирован для производств;
- OBR4200: малогабаритный рефлектометр для проведения измерений в полевых условиях.

OBR4600 имеет лучшие характеристики, работает в C&L диапазоне (1525–1610 нм) или O (1270–1340 нм). Его отличает широкий динамический диапазон в 80 дБ при измерении RL. OBR-рефлектометры от Luna сочетают в себе интуитивно понятную и мощную программную платформу для проведения интерактивных измерений и анализа полученных данных, а также инструменты для легкой интеграции OBR в производственную/испытательную линию.



**13–15** 2019  
**НОЯБРЯ**

# **РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННИК**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ФОРУМ**



## **РАЗДЕЛЫ:**

- МАШИНОСТРОЕНИЕ
- МЕТАЛЛООБРАБОТКА,  
СТАНКОСТРОЕНИЕ
- АВТОМАТИЗАЦИЯ
- ПОДЪЁМНАЯ ТЕХНИКА
- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
ЭЛЕКТРОНИКА
- СОВРЕМЕННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ
- РЕГИОНЫ РОССИИ

**ОДНОВРЕМЕННО ПРОХОДЯТ:**

- **ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ**
- **ВЫСТАВКА-КОНГРЕСС  
«ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ»**

**ОРГАНИЗАТОР**

**EXPOFORUM**

**ПАРТНЁР**



**ГАЗПРОМБАНК**  
«Газпромбанк» (Акционерное общество)

**ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
МЕДИАПАРТНЁР**



**PROMEXPO.EXPOFORUM.RU | +7 (812) 240 40 40, доб. 2150, 2153**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ | ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1 | ЭКСПОФОРУМ**