

Lab manual: classical and photon-counting reflectometry

Alexey Shilko, Elena Anisimova, Vadim Makarov, Anton Benderskiy, and Vadim Rodimin
(Dated: April 7, 2023)

I. OBJECTIVES

In this lab exercise, you will learn how to use a classical and a photon-counting optical time-domain reflectometer (OTDR) to characterise fiber-optic communication lines, and see the difference between these two types of reflectometer.

II. PREREQUISITES

Please read the enclosed Russian-language manual that gives necessary theoretical background and program of the experiment.

A. Questions for preparation

- Explain the principles of Rayleigh scattering and total internal reflection.
- What wavelengths are used in telecommunication? Why exactly are these wavelengths used?
- How are discontinuities, irregularities, and the end of an optical line displayed on an OTDR trace?
- How can you measure the loss of the fiber (in dB/km) and the amount of loss a connector or other component introduces (in dB)?
- Explain the scheme of a photon-counting OTDR and how its components work.
- What are differences between the classical and photon-counting OTDR? Do you see any advantages of the latter over the former?

III. EQUIPMENT

1. Optical time domain reflectometer (Yokogawa AQ1000).
2. Educational system made by QRate. Includes: pulsed laser SWLD 1554.94-FC/PC-10PM with driver electronics, single-photon detector (based on an InGaAs/InP avalanche photodiode), fiber-optic circulator, time-tagger data acquisition for detector clicks, and computer with control software installed.
3. Two spools of single-mode optical fiber: 6 and 24 km in length.
4. Optical power meter Thorlabs PM400 with S155C fiber-optic photodiode power sensor.
5. Fiber-optic programmable attenuator (Grandway FHA2S02).
6. 10:90 fiber-optic coupler.
7. Short fiber patchcords.
8. Fiber cleaning kit.
9. Black cloth.

The operator's manuals for the equipment can be found on the course webpage.

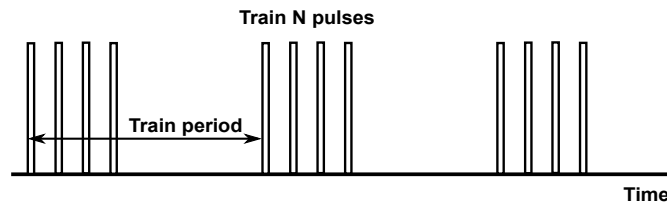


FIG. 1. Trains of laser pulses emitted from QRate laser module. The pulse period within the train is 200 ns.

IV. WORKFLOW

The workflow follows the instructions given in Sec. 4 of the Russian-language manual. We add a few clarifications below.

1. Reflectometry: reflections and irregularities (Sec. 4.1)

For operation of the AQ1000 OTDR instrument, refer to its Getting started guide.

Lab report should contain a sketch or a picture of the OTDR trace, with attenuation points and other features identified by you.

2. Determining loss and attenuation from OTDR trace (Sec. 4.2)

Lab report should contain: calculation of the fiber loss α (in dB/km) measured at both 1310 and 1550 nm, calculation of the insertion loss (i.e., attenuation) of a connector at both wavelengths.

3. Setting the required mean photon number (Sec. 4.3)

Figure 1 shows how laser pulses are grouped in packets, which QRate call trains. Please note that the maximum number of pulses in a train is 4000 and the maximum length of one train is thus about 0.8 ms.

In this section, set the parameters of the ‘Channel Test’ program as follows:

- (a) period – 4000
- (b) num of pulses – 4000
- (c) num of train – 4000
- (d) first pulse delay mode – none
- (e) first pulse delay – 0

Lab report should contain: optical scheme of the setup, calculation of attenuator setting that makes the energy of one pulse entering the power meter to be of the order of several photons ($\mu \approx 1-10$), and calculation of the energy of one pulse at the entrance of the optical line at this attenuator setting.

4. “Channel test” histogram and export of the data (Sec. 4.4)

Figure 2 shows the LabView interface with “Channel Test.vi” loaded. The small white arrow at the upper left corner starts the program, the large red STOP button stops the program, the green Done indicator signals the completion of the measurement, and the Histogram Graph plots OTDR counts accumulated into time bins that form an OTDR trace. The train.configuration group of parameters set the number of pulses in a train and total number of trains used to form the histogram.

Figure 3 shows how to save the histogram data. After a measurement finishes, right-click on the histogram, select ‘Export’ then ‘Export Data To Clipboard’.

Lab report should contain: sketches or pictures of the histogram from each measurement, period numbers corresponding to the reflection from each connector and the end of the fiber line.

5. Determining losses in the line (Sec. 4.5)

After you have exported the data, run ‘Jupiter Notebook’ file on the desktop. Create a text file (or copy an existing one) in the root directory of the ‘Reflectometry’ program as shown in Fig. 4.

After starting the ‘Reflectometry’ program, replace the characters ‘???’ with the values that you have calculated previously.

Lab report should contain: the plot obtained by executing the Python program.

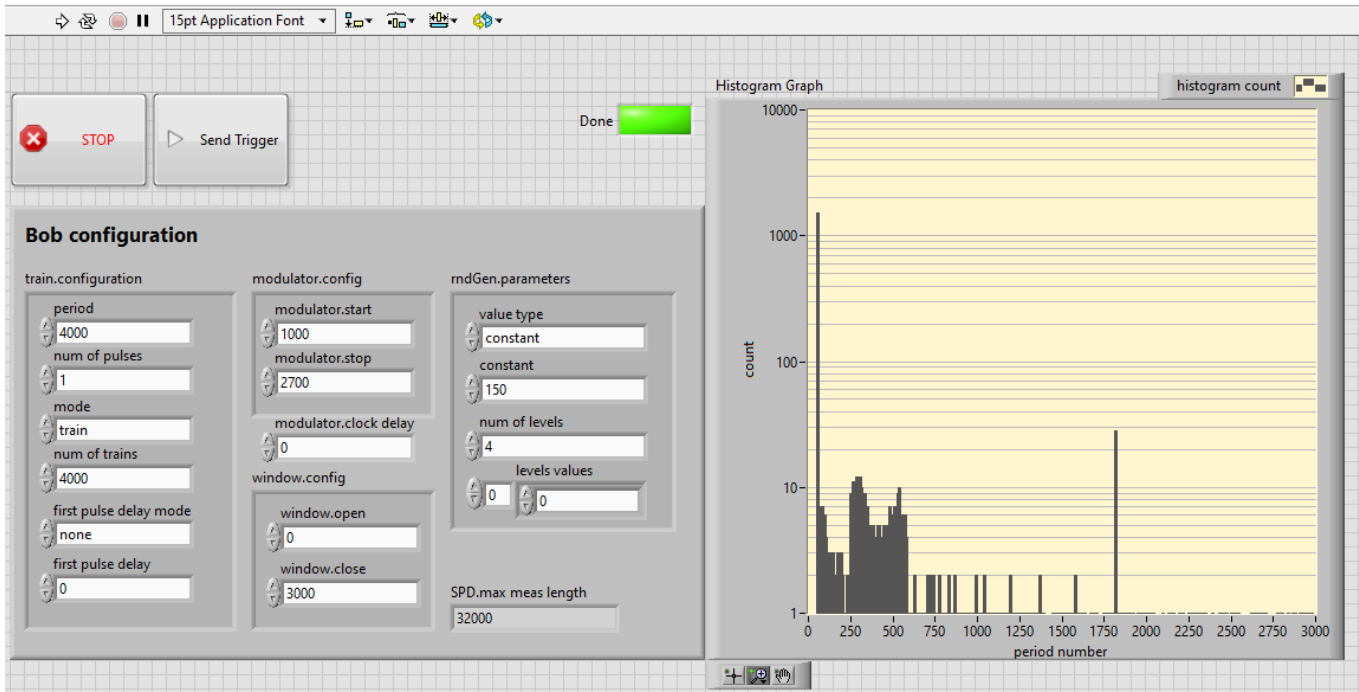


FIG. 2. LabView application window with “Channel Test” virtual instrument loaded.

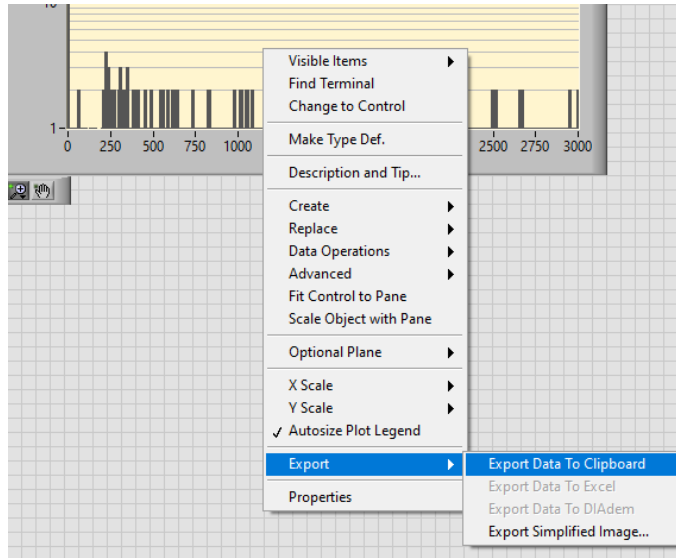


FIG. 3. Saving plotted data.

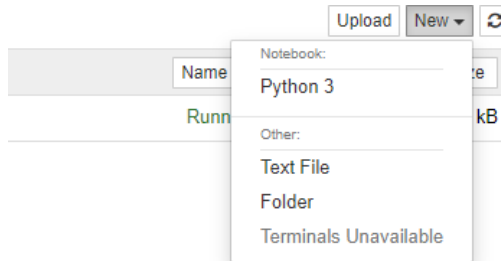


FIG. 4. Creating a text file in Jupiter Notebook.

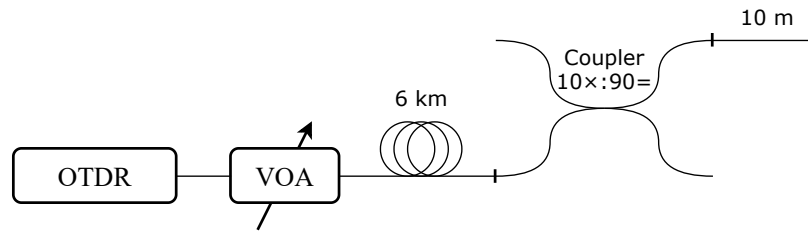


FIG. 5. Optical scheme for estimating the sensitivity limit of OTDR. VOA, fiber-optic programmable attenuator.

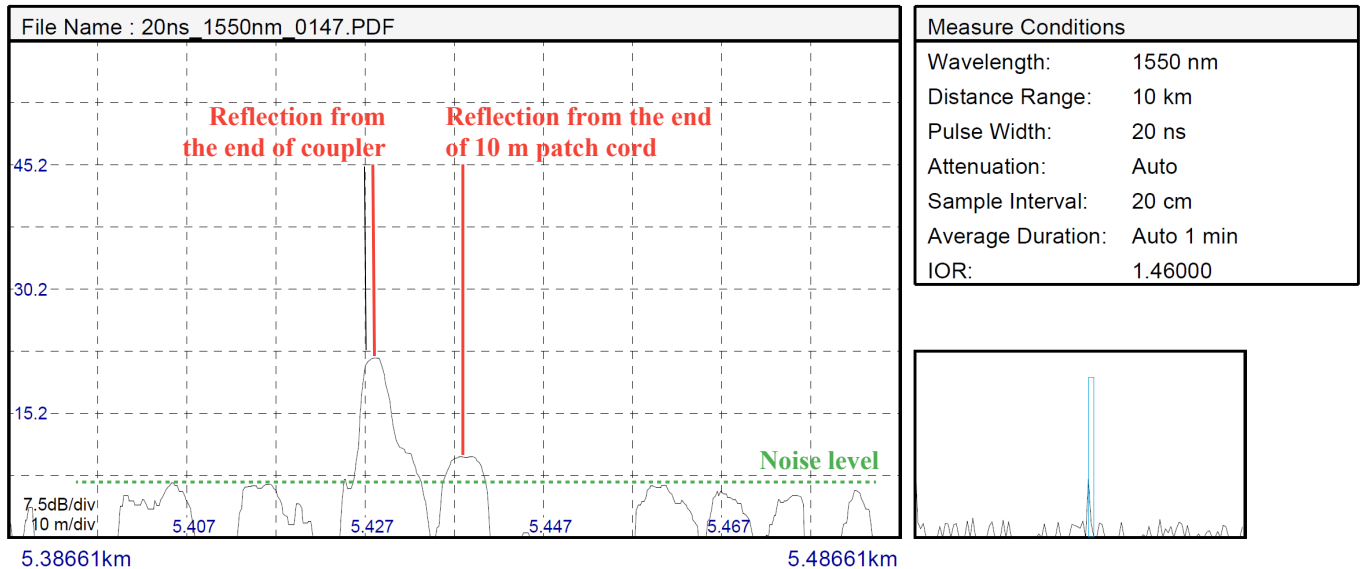


FIG. 6. Measurement of reflections at the sensitivity limit of classical OTDR.

6. Sensitivity limit of the two types of reflectometers

Now we will explore how sensitive each method is for distinguishing closely-spaced weak reflections. Assemble the scheme in Fig. 5. First, use the classical OTDR unit. Set its parameters as shown in Fig. 6, and the value of the attenuator to 0 dB. Cover the fiber scheme with the black cloth in order to prevent ambient light from increasing your noise level. Run the OTDR and observe the characteristic reflection peaks from the end of fiber coupler and the end of 10 m patchcord. Gradually increase the attenuation and repeat the OTDR measurement until the smaller of the two reflections becomes indistinguishable from noise. Note the attenuation.

Now replace the OTDR with the photon-counting one (with the laser inside it connected directly to the circulator without the programmable attenuator, for maximum sensitivity). Find the same two reflections in the histogram, see Fig. 7. Increase the attenuation until the smaller of the two peaks blends into noise, even with a long acquisition time of about a minute. Note the attenuation.

What OTDR method is more sensitive, for this particular fiber setup configuration under test?

Compare the classical and photon-counting OTDR. Discuss in detail the advantages and drawbacks (or limitations) of each. Can you give examples when the classical reflectometry would be better than photon-counting one?

Lab report should contain: screenshots of each OTDR method at the sensitivity limit (both reflection peaks barely above noise), with attenuator value listed in each case; a discussion comparing the advantages and limitations of classical and photon-counting OTDR.

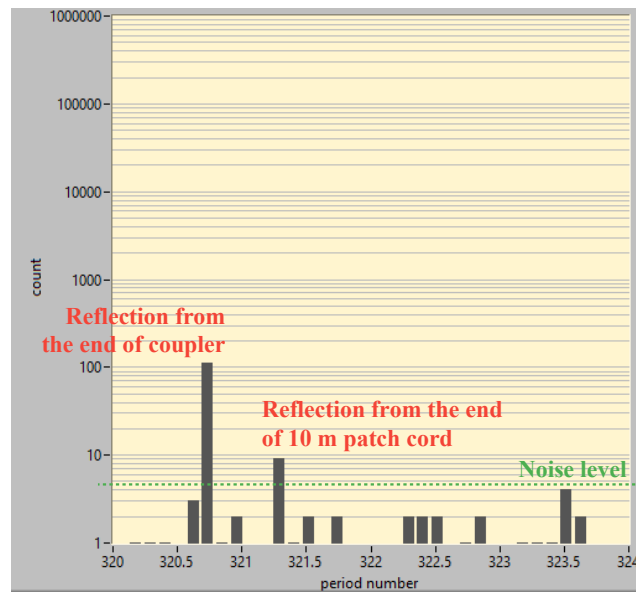


FIG. 7. Measurement of reflections at the sensitivity limit of photon-counting OTDR.

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО КВАНТОВОЙ ОПТИКЕ**

Лабораторная работа № 3

РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ

Содержание

1 Общие положения	4
1.1 Оптическое волокно	4
1.2 Тип разъёмов FC-PC	8
1.3 Устройство циркулятора	9
1.4 Оптический рефлектометр	10
1.5 Вывод формулы для расчёта затухания	12
2 Техника безопасности при работе лазерными источниками излучения	17
3 Описание лабораторной установки.....	18
4 Порядок проведения эксперимента	20
4.1 Рефлектометрия. Отражения и дефекты	20
4.2 Измерение затуханий на основе данных с рефлектометра.....	20
4.3 Расчёт мощности импульса для необходимого числа фотонов	21
4.4 Гистограмма Channel Test и экспорт полученных данных	22
4.5 Определение потерь в линии	23
5 Контрольные вопросы и задания	24
Приложение А.....	25
Приложение Б.....	29
Литература	30
Лист регистрации изменений.....	31

Цель работы – научиться работать с оптическим волокном; разобраться, как функционируют отдельные части оптической схемы; понять какие факторы влияют на отражения и потерю мощности в оптическом волокне.

Приобретаемые компетенции – обучаемые приобретают навыки работы с рефлектометром – инструментом измерения параметров оптоволоконных линий, определяют факторы, влияющие на точность измерений. После выполнения лабораторной работы обучаемые получают уверенные навыки, по изучению особенностей и поиску неисправностей оптических линий связи.

В работе используется: оптическое одномодовое волокно, коннекторы, переменный оптический аттенюатор, оптический циркулятор, оптический рефлектометр (YOKOGAWA), измеритель мощности, детектор одиночных фотонов (SPD), оптические линии — две катушки на 10 и/или 25 км.

1 Общие положения

1.1 Оптическое волокно

В основе работы неметаллического световода лежит полное внутреннее отражение на границе между световедущей сердцевиной и окружающей его средой. Простейший световод – прозрачный стержень из стекла или полимера, окруженный воздухом. Более совершенны волоконные световоды, где свет распространяется внутри сердцевины, окруженной материалом с меньшим, чем у сердцевины, показателем преломления. Сердцевина оптического волокна служит волноводом, в котором сосредоточена мощность переносимой им волны.

Зависимость поглощения как функции длины волны для типичного волокна представлена на рисунке 1.

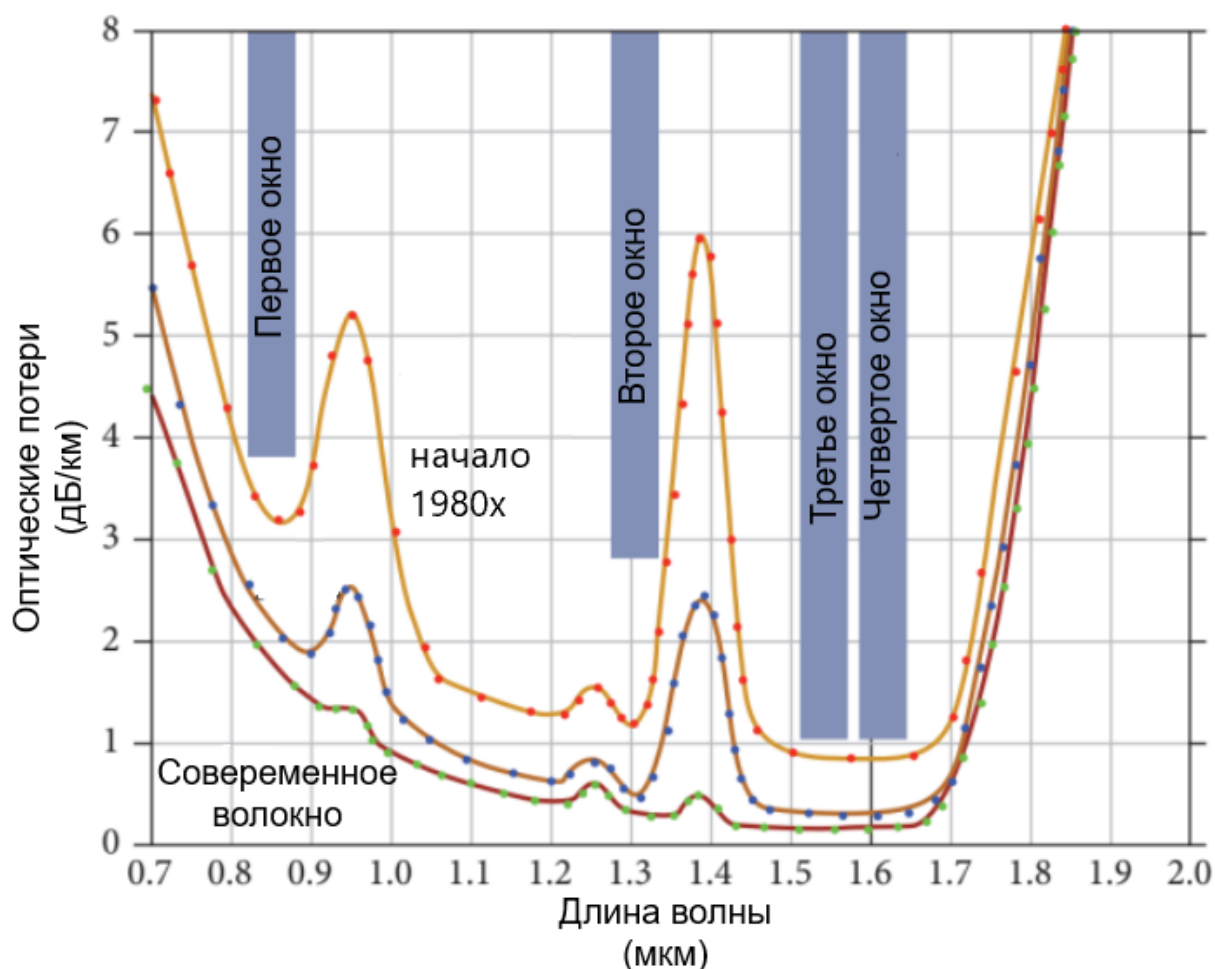


Рисунок 1 Потери в оптическом волокне в зависимости от длины волны и рабочие окна для оптической связи.

На рисунке 1 представлены зависимости для трех периодов в развитии технологии: начало 1980 г., конец 1980 г. и настоящее время. Чтобы дать некоторое представление о числах, отметим, что в 1966 году потери в волокнах составляли около 1000 дБ/км. Отношение двух значений энергетической величины P , такой как мощность, энергия, плотность энергии и т. п., выраженное в децибелах, определяется по формуле:

$$D_p = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

К 1970 году удаление загрязняющих веществ привело к снижению потерь до уровня 20 дБ/км, что сопоставимо с 5-10 дБ/км в коаксиальном кабеле, который использовался в то время. При перемещении рабочих длин волн в инфракрасный диапазон на 1,3 мкм, было получено пропускание, соответствующее первой кривой на рисунке 1. Переход к длинным волнам стал возможен благодаря разработке InGaAs полупроводниковых лазеров, что привело к потерям, показанным кривой, обозначенной «Современное волокно».

Три пика поглощения, видимые на кривых, обусловлены ОН-поглощением при 980, 1380 и 1730 нм; появление ионов ОН связывают с парами воды, захваченными во время производства волокна или из атмосферы во время его использования. Общее увеличение затухания на коротких волнах происходит из-за рассеяния Рэлея, которое пропорционально $\sim \frac{1}{\lambda^4}$ и делает длины волн ниже примерно 800 нм непригодными для дальней связи. Пики выше примерно 1,6 мкм обусловлены молекулярным поглощением SiO₂ в инфракрасном диапазоне, что делает волны выше 1,6 мкм также непригодными для дальней связи.

Окна прозрачности (области с низким коэффициентом поглощения), указанные на рисунке, связаны со спектральными диапазонами, используемыми в телекоммуникациях, представлены в таблице 1. Полосы связаны с различными источниками света, доступными в качестве передатчиков в системе связи. Наличие недорогих светодиодов (LED) привело к использованию первого окна с длиной волны 850 нм для обеспечения недорогой системы с потерями около 2 дБ/км. Однако высокие потери ограничивают применение короткими дистанциями.

Таблица 1 Спектральные диапазоны, используемые в телекоммуникациях

Обозначение	Наименование	Диапазон, нм
O	Основной	1260-1360
E	Расширенный	1360-1460
S	Коротковолновый	1460-1530
C	Стандартный	1530-1565
L	Длинноволновый	1565-1625
U	Сверхдлинноволновый	1625-1675

В конце 1970-х годов были разработаны полупроводниковые лазеры InGaAs с длиной волны около 1310 нм (второе окно). Это привело к созданию волокон с потерями до 0,5 дБ/км и позволило создавать оптоволоконные сети, использующие одномодовые волокна.

В 1986 году волоконные оптические усилители на основе эрбия (Er) позволили ретрансляционным системам, работающим на 1550 нм (третье и четвертое окна), устранить необходимость понижать и повышать преобразование в электронные частоты для восстановления сигналов. Результатом стало создание дальних (до 100 км) систем связи. Именно на этой длине волны (1550 нм) будет проводиться данная лабораторная работа.

Стекло, используемое в оптоволоконном кабеле, представляет собой сверхчистый, ультрапрозрачный диоксид кремния. В процессе изготовления стекловолоконного кабеля примеси преднамеренно добавляют к чистому стеклу для получения желаемых показателей преломления, необходимых для направления света. Германий, титан или фосфор добавляют для увеличения показателя преломления. Бор или фтор добавляют для уменьшения показателя преломления.

Потери рассеяния и поглощения называются собственными потерями. Существует также внешнее затухание из-за макроизгиба или микроизгиба. Макроизгиб – это видимый изгиб, которые можно устранить, отрегулировав положение волокна. Микроизгиб – это изгиб, определяемый несовершенством формы волокна, получаемого в процессе производства. Конструкция стандартных оптоволоконных соединителей позволила снизить потери, связанные с

оптоволоконными соединениями, которые часто требуются для ремонта канала связи при эксплуатации.

Различают волокна со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления, зависимости показателя преломления от расстояния до оси световода представлены на рисунке 2.

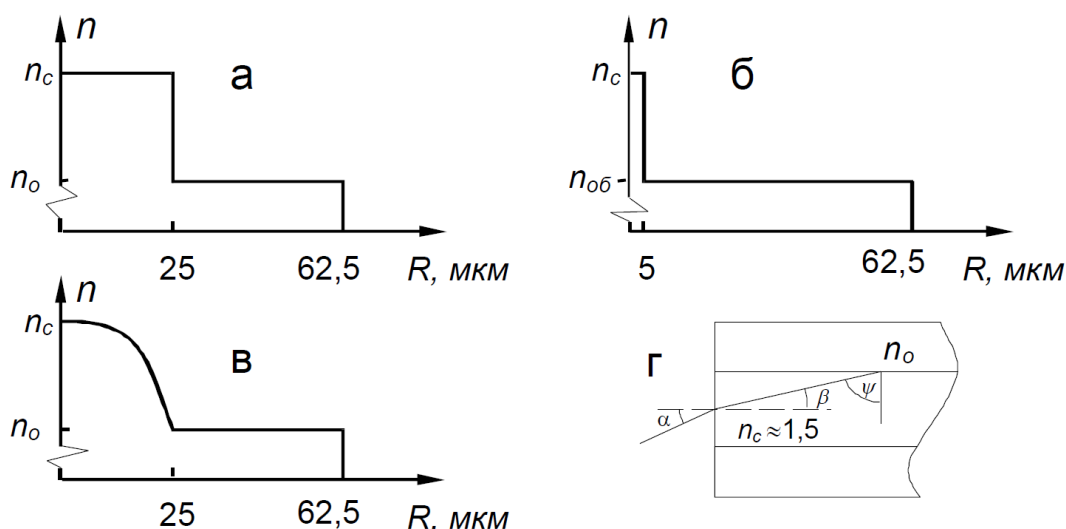


Рисунок 2 Зависимость показателя преломления от расстояния до оси световода: а – резкий профиль показателя преломления в многомодовом волокне; б – одномодовое волокно, резкий профиль; в – градиентное волокно; г – ввод луча в сердцевину световода

При углах α менее критического луч, падающий на границу раздела сердцевины и оболочки, испытывает полное внутреннее отражение и поэтому распространяется вдоль сердцевины, пока не затухнет из-за поглощения и рассеяния. Из оценки числовой апертуры волокна следует:

$$\gamma = \sin \alpha = n_c \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_c^2}} \approx n_c \sqrt{\frac{2(n_c - n_0)}{n_c}} = \sqrt{2n_c \Delta}, \quad (2)$$

где Δ – скачок показателя преломления. В типовых волокнах скачок Δ изменяется в диапазоне от 0,003 до 0,01.

При скачке показателя преломления $\Delta=10^{-2}$ числовая апертура γ равна 0,2. Если конец волокна расположен в воздухе, то угол при вершине конуса захваченных лучей $2\alpha \approx 24^\circ$, что значительно меньше, чем расходимость излучения обычных инжекционных лазеров. Поэтому при непосредственной

стыковке лазера и волокна неизбежны существенные потери энергии. Так же необходимо помнить о механическом загрязнении открытого конца волокна. Для ее устранения используется очистка специальной лентой или спиртовая салфетка.

1.2 Тип разъемов FC-PC

Для соединения различных частей оптической схемы используют всевозможные оптические коннекторы. В данной лабораторной работе рассматривается только один конкретный тип FC (Ferrule Connector) и его ответную часть – PC (Physical Contact). FC стал предпочтительным соединителем для одномодовых волокон и в основном используется в волоконно-оптических приборах, оптоволоконных компонентах и в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи. Этот высокоточный керамический соединитель с наконечником оснащен противовращательным ключом, снижающим повреждение торца волокна (рисунок 3). Ключ также используется для выравнивания волокон в оптимальном положении для достижения минимальных потерь.



Рисунок 3 Части оптоволоконного разъема FC/PC

Полировка ответной части Physical Contact (PC) приводит к слегка изогнутой поверхности разъема, что способствует взаимному хорошему механическому контакту пары сопряженных волокон. Это исключает возникновение промежуточного волоконно-воздушного слоя (который привёл бы к большим обратным отражениям от минус 30 до минус 40 дБ/м). PC – это самая популярная подготовка торцевого разъема ответной части, используемая в большинстве приложений.

Во время работы с коннектором важно проверять, чтобы разъемы оставались чистыми. На рисунке 4 представлены примеры грязного и чистого разъемов. Для защиты неиспользуемых разъемов их необходимо закрывать

специальными колпачками, а также протирать коннекторы спиртом перед подключением.

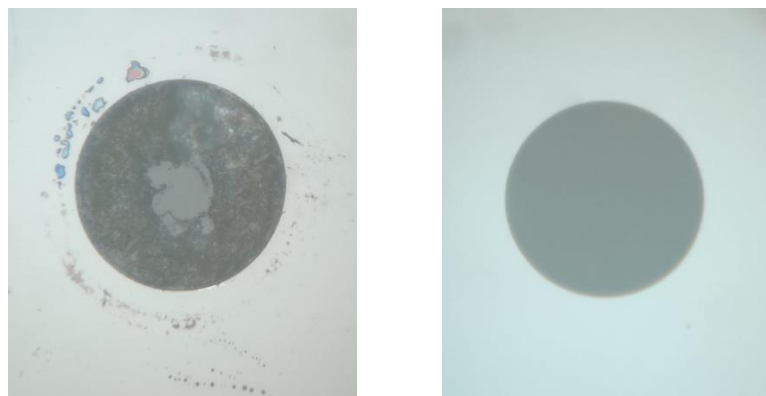
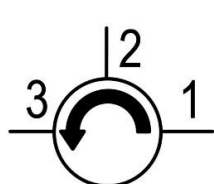


Рисунок 4 Коннектор под микроскопом. Слева пример грязного разъема. Справа – чистого.

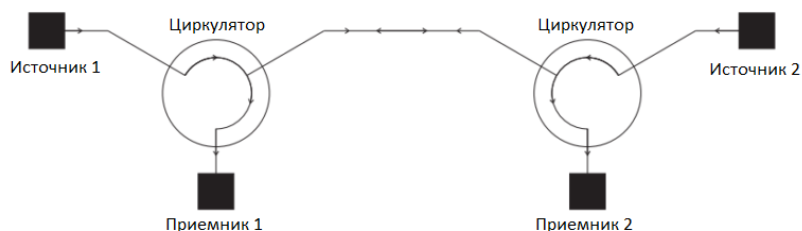
Оптическое волокно является достаточно хрупким и царапающимся материалом. Поэтому осуществлять соединения надо предельно осторожно: сначала необходимо аккуратно вставить коннектор в ответную часть, затем совместить ключ с пазом, после чего закрутить резьбовой фиксатор.

1.3 Устройство циркулятора

Оптический циркулятор предназначен для передачи света от одного оптического волокна к другому, он перенаправляет свет в зависимости от направления его распространения. Оптический циркулятор (рисунок 5) обычно состоит из трех портов.



а) Схема циркулятора



б) Пример использования циркуляторов для организации двусторонней связи по одному волокну

Рисунок 5 Устройство и применение оптического циркулятора

Сигнал передается от порта 1 к порту 2, а другой сигнал передается от порта 2 к порту 3. Наконец, третий сигнал может быть передан с порта 3 на порт 1.

Оптический циркулятор содержит компоненты вращателя Фарадея, двулучепреломляющий кристалл, волновую пластину и вытеснитель пучка. Вращатель Фарадея использует эффект Фарадея, который представляет собой явление, когда плоскость поляризации электромагнитной (световой) волны вращается в материале под магнитным полем, приложенным параллельно направлению распространения световой волны.

В соответствии с поляризацией, оптические циркуляторы подразделяются на поляризационно-зависимые и поляризационно-независимые. Первые используются для света с определенным состоянием поляризации, а вторые не ограничиваются состоянием поляризации света.

Оптические циркуляторы могут использоваться для обеспечения двусторонней передачи по одному волокну (рисунок 5 б). Передатчик 1 отправляет сигнал через порт 1 циркулятора 1 и через оптоволокно в порт 2 циркулятора 2, так что он направляется на приемник 2. Сигнал от передатчика 2 идет по противоположному пути к приемнику 1.

1.4 Оптический рефлектометр

Оптический рефлектометр обеспечивает возможность дистанционного мониторинга и быстрой диагностики состояния оптических волокон. Рефлектометр позволяет:

- определять распределение потерь вдоль оптического волокна;
- выявлять дефектные участки оптического волокна;
- измерять потери в разъёмных и неразъёмных (сварных) соединениях;
- измерять коэффициенты отражения.

Принцип работы оптического рефлектометра основан на реализации метода обратного рэлеевского рассеяния, схема оптического рефлектометра представлена на рисунке 6. Зондирующие импульсы от лазера относительно высокой мощности вводятся в исследуемое оптоволокно через оптический разветвитель. Высокочувствительный фотоприемник регистрирует и измеряет временную зависимость той части оптического излучения, которая возвращается

из оптического волокна в результате рассеяния и отражений обратно в рефлектометр.

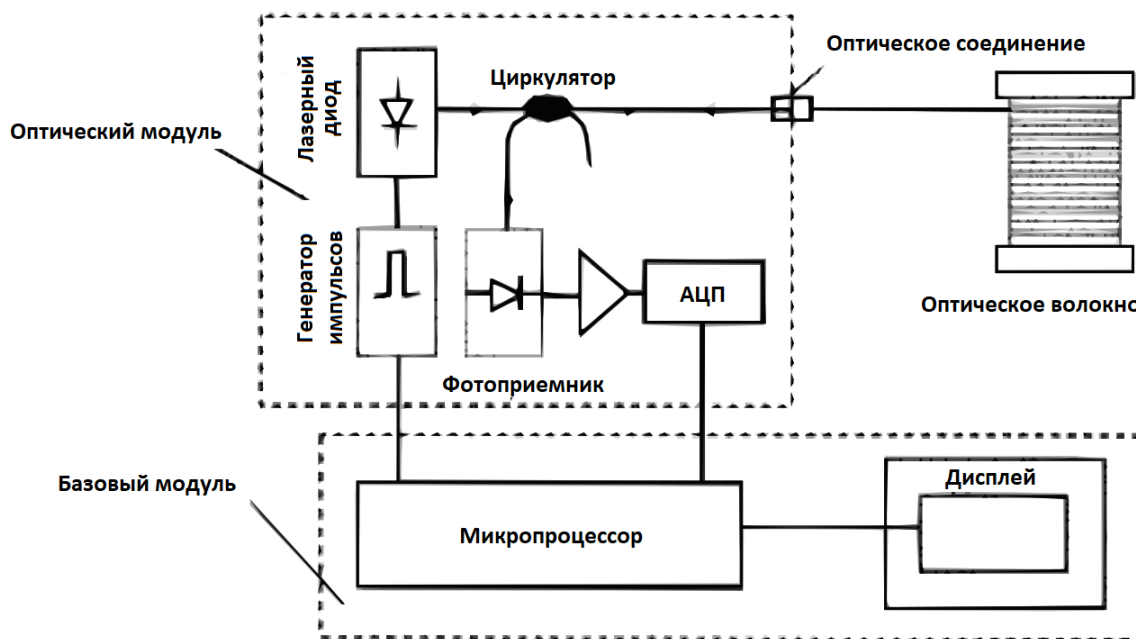


Рисунок 6 Схема оптического рефлектометра

Зондирующий световой импульс попадает в тестируемую оптическую линию через циркулятор. С помощью него сигнал обратного рассеяния от оптического волокна попадает на фотоприемник, который преобразует оптические сигналы в электрические так, что величина электрического тока прямо пропорциональна мощности светового сигнала.

Основные требования к фотоприемнику: высокая чувствительность, малый уровень шумов, широкая полоса частот, высокая линейность преобразования в большом динамическом диапазоне мощностей светового сигнала.

Базовый модуль обеспечивает обработку данных электрических сигналов фотоприемника. На экране дисплея формируется изображение, которое носит название рефлектограммы, представляющей собой зависимость уровня принятого сигнала от расстояния вдоль оптического волокна.

Пример исследования оптической линии с несколькими оптическими соединениями, имеющей повреждение, и соответствующая этой линии рефлектограмма представлены на рисунке 7.

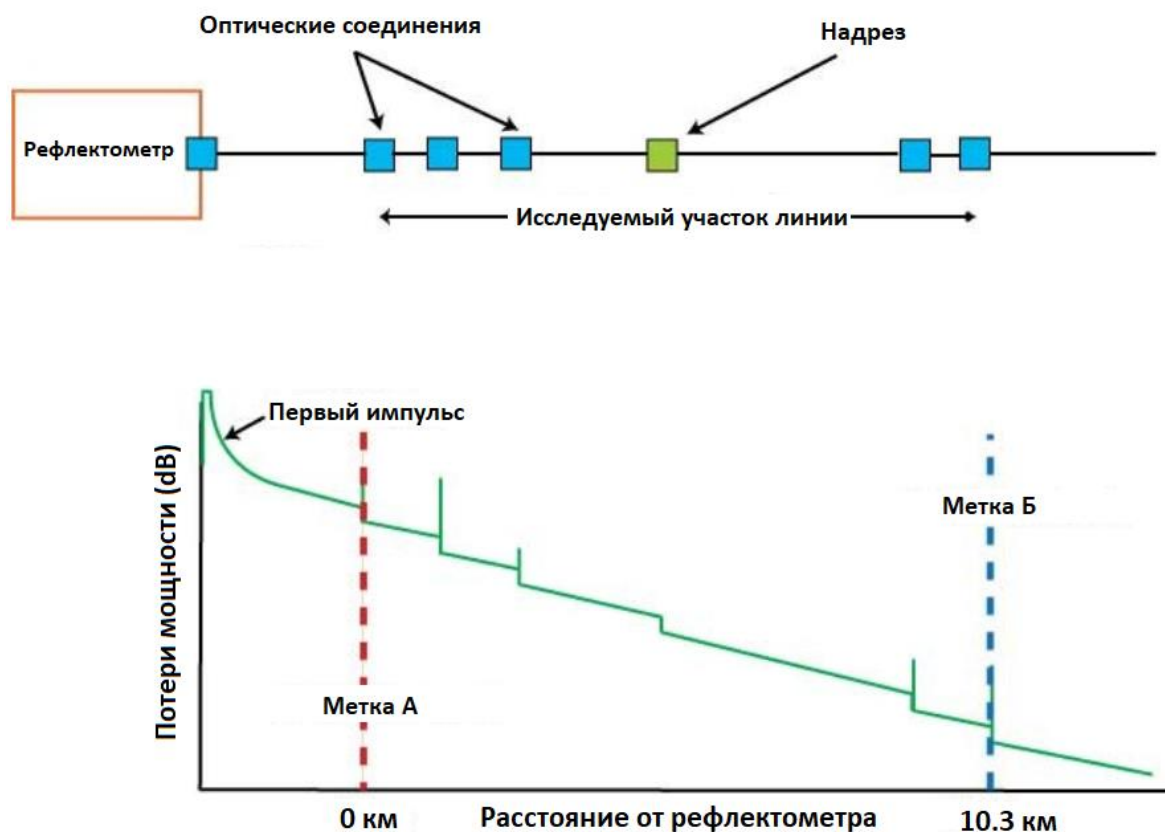


Рисунок 7 Пример линии и соответствующей ей рефлектограммы

1.5 Вывод формулы для расчёта затухания

Одна из задач эксперимента — при помощи лабораторной установки реализовать основную функцию рефлектометра. В роли фотоприёмника, который используется в стандартном рефлектометре, будет выступать детектор одиночных фотонов (SPD). Но, поскольку, в отличие от фотоприёмника, SPD не способен различать энергию лазерного импульса (он либо срабатывает, либо нет), нужно использовать метод множественных замеров. Если посылать в линию большое количество достаточно слабых одинаковых импульсов, то можно судить об их энергии, дошедшей до детектора, по статистике его срабатываний.

Детектор одиночных фотонов так устроен, что, если импульс достаточно слабый (его энергия измеряется единицами фотонов), то вероятность его срабатывания линейно зависит от энергии этого импульса:

$$pr = \mu \cdot \eta, \quad (3)$$

где μ — количество фотонов в импульсе, а η — эффективность детектора (вероятность срабатывания детектора на приход одиночного фотона). Эффективность SPD в лабораторной установке от 5% до 15%.

При увеличении энергии импульса, эта линейная зависимость пропадает и детектор начинает срабатывать со 100% вероятностью на приход каждого импульса, поэтому результаты таких измерений получаются бесполезными.

Соответственно, нужно будет подобрать такое значение аттенюации лазера, которое даст достаточное ослабление импульсов.

Далее, обозначим t_n — конец n -го такта по шкале времени. Рассмотрим, что происходит в оптической линии, соответствующее срабатыванию SPD во временном интервале n -го такта ($t_{n-1} \dots t_n$).

Если пренебречь двойными отражениями, но в этом интервале SPD срабатывает на импульсы, которые дошли до участка оптической линии $I_n : X_{n-1} \dots X_n$, частично рассеялись на неоднородностях, часть этой рассеянной энергии была поймана волокном в обратную сторону, и дошла до начала линии. См. рисунок 8.

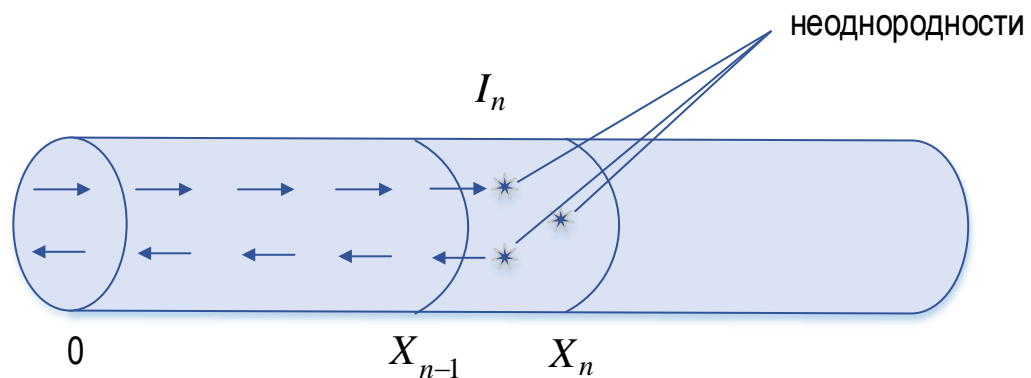


Рисунок 8 Распространение импульса в оптоволокне

Соответственно,

$$x_n = v \frac{t_n}{2}, \quad (4)$$

где v — скорость света в оптоволокне.

Обозначим (единицы берутся в беллах для сокращения расчётов, чтобы не тянуть через все формулы множитель 0.1), см. рисунок 9:

β_n — коэффициент затухания на участке I_n , в беллах;

$B_n = \sum_1^n \beta_n$ — коэффициент затухания на всём участке $0 \dots X_n$ в беллах;

ϱ_n — отношение мощности света, на участке I_n захваченного волокном в обратную сторону, ко всей потерянной мощности на этом участке;

E_{n-1} — энергия одиночного импульса, дошедшего до участка I_n , кол-во фотонов;

R_n — энергия импульса, отражённого обратно от участка I_n , кол-во фотонов;

R_n^m — энергия импульса, отражённого обратно от участка I_n , и дошедшего до начала линии, кол-во фотонов;

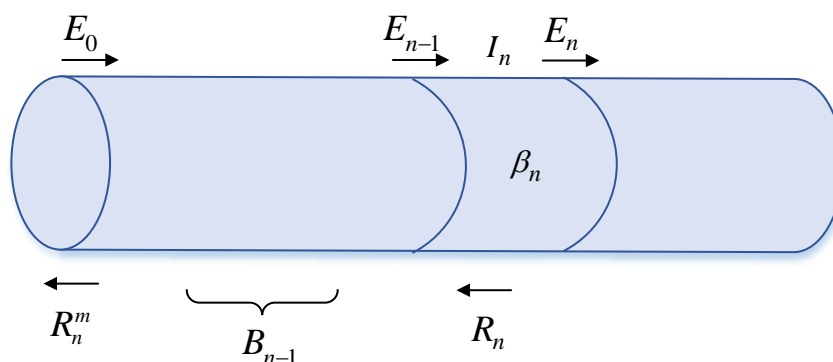


Рисунок 9 Иллюстрация к вводимым обозначениям

Имеем, по определению:

$$E_{n-1} = E_0 10^{-B_{n-1}} \quad (5)$$

$$E_n = E_{n-1} 10^{-\beta_n} \quad (6)$$

$$R_n = \varrho_n (E_{n-1} - E_n) \quad (7)$$

$$R_n^m = R_n 10^{-B_{n-1}} \quad (8)$$

Из этого следует:

$$R_n^m = \varrho_n E_0 10^{-B_{n-1}} (1 - 10^{-\beta_n}) 10^{-B_{n-1}} \quad (9)$$

$$\langle \Rightarrow \rangle \beta_n = -\lg \left(1 - \frac{R_n^m 10^{-2B_{n-1}}}{\varrho_n E_0} \right) \quad (10)$$

Вероятность срабатывания SPD на n -м такте равна:

$$pr_n = R_n^m \eta \quad (11)$$

Далее, обозначим:

N — суммарное число импульсов, выпущенных в оптическую линию;

$D_n = Npr_n$ — количество срабатываний SPD на n -м такте за всё время измерений;

$E_\Sigma = E_0 N$ — суммарная энергия всех импульсов за всё время измерений;

С учётом этих обозначений можно выразить β_n следующим образом:

$$\beta_n = -\lg \left(1 - \frac{D_n 10^{-2B_{n-1}}}{\varrho_n E_\Sigma \eta} \right) \quad (12)$$

Поскольку $B_n = B_{n-1} + \beta_n$, получилась формула, по которой можно рекурсивно вычислить коэффициенты затухания $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, и т.д., при условии, что известны все D_n, ϱ_n, E_Σ и η .

При проведении эксперимента, точно будут известны только D_n (количество срабатываний SPD на n -м такте), которые можно будет получить из гистограммы LabView при помощи функции «Export». Величины E_Σ (суммарная энергия всех импульсов) и η (эффективность SPD) можно взять приблизительные (поскольку они входят множителями в знаменатель вместе с ϱ_n и больше нигде в формуле не участвуют), а коэффициенты затухания ϱ_n на участках оптической линии подобрать эмпирически (при помощи компьютерного подбора), исходя из следующих соображений:

- затухание во всех неповреждённых участках оптоволоконных катушек приблизительно одинаковое, коэффициент захвата волокном рассеянного излучения тоже одинаковый;

- обе катушки состоят из оптоволокна с одинаковыми свойствами;

- затухание и отражение на участке стыка какое-то другое.

Соответственно, сначала в нижеприведённом алгоритме осуществляется подбор правильного значения ϱ для всех участков оптической линии, кроме стыка. Потом осуществляется подбор значения ϱ на участке стыка.

2 Техника безопасности при работе лазерными источниками излучения

При выполнении лабораторных работ, связанных с использованием когерентных лазерных источников излучения, необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Не смотреть в выходной порт источника и на торцы коннекторов патч-кордов или оптических адаптеров.
2. Контроль чистоты и исправности оптического коннектора или адаптера допускается только при отсутствии в волокне излучения.
3. Для определения активности оптического волокна необходимо использовать измеритель оптической мощности или специальный индикатор излучения.



Внимание! Лазерное излучение, используемое в телекоммуникационных системных и измерительных приборах, невозможно обнаружить визуально!

3 Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием Установки академической модульной квантовой оптики EMQOS 1.0. Исследуемая оптическая схема представлена на рисунке 10.

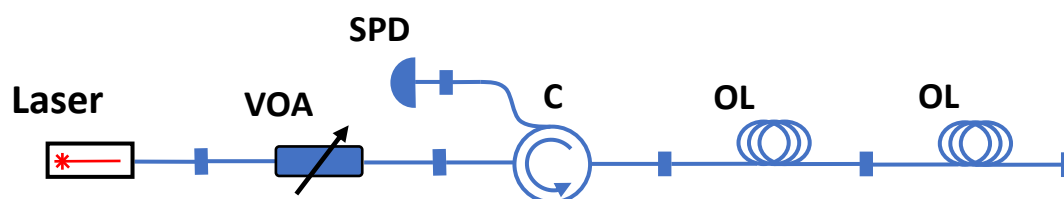


Рисунок 10 Исследуемая оптическая схема

На схеме обозначены:

Laser – лазерный модуль;

VOA – variable optical attenuator – переменный оптический аттенюатор;

SPD – single photon detector – детектор одиночных фотонов;

C – оптический циркулятор;

OL – оптическая линия.

Лазерный модуль генерирует последовательность одинаковых многофотонных оптических импульсов, которую мы будем называть трейном (схема распространения импульсов представлена на рисунке 11).

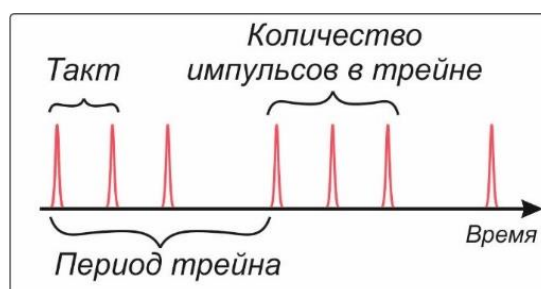


Рисунок 11 Схема распространения импульсов на выходе из лазерного модуля

В нашем случае длина волны оптических импульсов $\lambda = 1550$ нм, Частоту следования лазерных импульсов обозначим как ν_0 , а соответствующий ей период – T_0 , эти промежутки времени мы будем называть тактами. В трейне n

импульсов и трейны следуют с периодом T_t – период трейна. Всего за сеанс формируется пакет из N трейнов. Исследуемый канал состоит из двух катушек. Запаздывания на линии определяется формулой:

$$t_{DL} = \frac{n_0 \Delta l}{c_0}, \quad (13)$$

где $n_0 \approx 1,47$ – коэффициент преломления среды, Δl – длина исследуемого участка, c_0 – скорость света.

Удобно использовать следующее соотношение: за 5 нс световой импульс проходит 1 м оптоволокна, т.е. получается, что скорость света в оптоволокне примерно равна $2 \cdot 10^8$ м/с.

4 Порядок проведения эксперимента

4.1 Рефлектометрия. Отражения и дефекты

1. Соберите оптическую схему, представленную на рисунке 12.

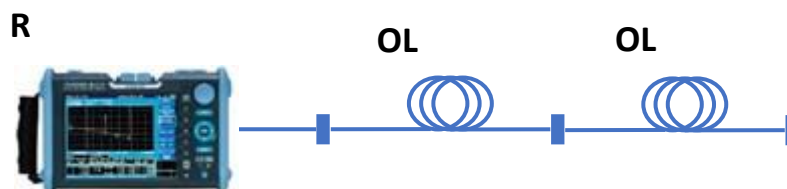


Рисунок 12 Схема экспериментальной установки для рефлектометрии.

R – рефлектометр, OL – оптическая линия

2. Запустите рефлектометр. Проанализируйте результаты теста, изменяя параметры длительности импульса с 5 нс, 300 нс и 20 мкс. Что можно сказать по поводу точности измерений? Можете ли вы определить все события на всех длинах импульсов?

3. Выберите оптимальное значение для длины импульса и диапазона и запустите трассировку. Тщательно изучите полученные результаты. Что вы видите на экране и что вы можете сделать с этой информацией? Нарисуйте черновой рисунок результата трассировки рефлектометра и отметьте также события на своем рисунке. Можно ли идентифицировать какие-либо негативные события ослабления с помощью рефлектометра? Какие события?

5. Вставьте небольшой кусочек волокна в линию. Согните небольшой добавленный элемент в несколько колец диаметром 10 см, 5 см и 1,5 см. Запускайте трассировку после каждого нового сформированного кольца. Какой вы можете сделать вывод? Что такое микроизгиб?

4.2 Измерение затуханий на основе данных с рефлектометра

1. Выберите однородный участок оптической линии. Заметьте, что затухание вызвано различными факторами, а не только рассеянием света. Найдите средний коэффициент затухания между двумя точками по формуле:

$$\alpha = \frac{P_1 - P_2}{l_2 - l_1}, \quad (14)$$

где $l_{1,2}$ – расстояние начала и конца выбранного участка от начала оптической линии, а $p_{1,2}$ – мощность сигнала (в dBm) в начале и конце участка $l_1..l_2$ соответственно.

2. Выберите участок оптической линии с разъемным соединением. Вносимые потери можно определить из рефлектограммы по трем точкам. См. рисунок 13.

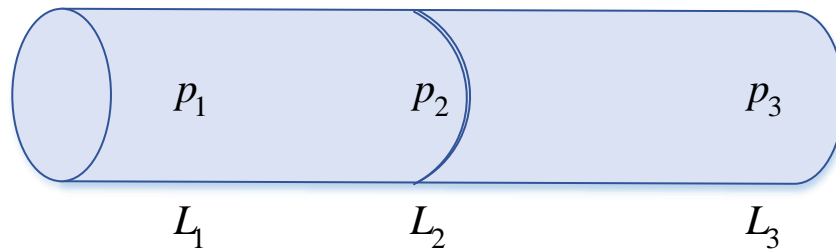


Рисунок 13 Участок линии

Для точек 1, 2 и 3 фиксируют соответственно уровни сигналов (в dBm) и расстояния. Точка 1 находится в начала стыка на расстоянии l_1 от начала линии. Точку 2 следует располагать непосредственно после стыка в точке, которая лежит на линейном участке сигнала обратного рассеяния. Точка 3 должна лежать как можно дальше от стыка, но на линейном участке сигнала обратного рассеяния. Тогда для вносимых потерь в разъемном соединении будет справедлива формула:

$$\alpha = p_1 - p_2 \frac{l_3 - l_1}{l_3 - l_2} + p_3 \frac{l_2 - l_1}{l_3 - l_2} \quad (15)$$

4.3 Расчёт мощности импульса для необходимого числа фотонов

1. Соберите оптическую схему, изображенную на рисунке 10 с открытым концом, не подключая детектор одиночных фотонов.



Обязательно отключите детектор одиночных фотонов, чтобы не вывести его из строя!

2. Вместо SPD подключите измеритель мощности светового излучения.
3. Запустите программу Channel Test.vi. Установите режим непрерывной генерации лазерных импульсов.

4. Подберите такое значение аттенюации VOA, чтобы энергия, приходящая в измеритель мощности, от одного импульса имела порядок нескольких фотонов.

Для определения количества фотонов в одном импульсе можно использовать следующую формулу:

$$\mu = \frac{\lambda P}{hc_0\nu_0}, \quad (16)$$

где λ — длина волны, P — средняя мощность излучения (как её видит измеритель мощности), h — постоянная Планка, c_0 — скорость света в вакууме, ν_0 — частота следования импульсов.

5. При данном значении аттенюации, определите E_0 — энергию одного импульса на входе в оптическую линию, подключив для этого вместо оптической линии, измеритель мощности.

6. Отключите режим непрерывной генерации лазерных импульсов и подключите обратно оптическую линию и SPD.

4.4 Гистограмма Channel Test и экспорт полученных данных

1. Зная длины оптических линий (катушек), найдите номера тактов, соответствующие отражением от соединительных элементов цепи.

2. В интерфейсе программы Channel Test.vi установите режим генерации трейнов, один импульс на трейн и запустите программу.

3. На экране вы увидите гистограмму, отражающую статистику срабатываний детектора одиночных фотонов по номерам тактов. Охарактеризуйте полученные данные. Совпадают ли ваши расчеты с реальным положением тактов? Заметим, что импульсы на гистограмме могут удваиваться, это происходит потому, что регистрация счета детекторов одиночных фотонов происходит в более мелкие временные окна, чем отображает шкала гистограммы, так что сигнал может быть зарегистрирован в 2 разных окна.

4. Сделайте экспорт данных гистограммы в текстовый файл lv_barchart_data.txt. Эти данные понадобятся для дальнейшего анализа при помощи Python-программы «reflectometry.py» (см. Приложение А).

5. На открытый конец оптической схемы установите терминатор и вновь запустите программу Channel Test.vi. Почему меняются данные Channel Test? Охарактеризуйте полученные результаты.

6. Вместо оптических линий к выходу из циркулятора подключите терминатор, вновь запустите программу Channel Test.vi и сделайте экспорт данных гистограммы в отдельный файл lv_barchart_data_noise.txt. Эти данные характеризуют шум лазера, SPD и циркулятора. Они потребуются в алгоритме для более точного расчёта потерь в линии.

4.5 Определение потерь в линии

1. Используя текст программы «reflectometry.py», приведённой в приложении А, в качестве заготовки, подставьте вместо «???» правильные значения индивидуальных параметров, постройте график затухания и проанализируйте его (пример графика представлен на рисунке 14). Он иллюстрирует, уменьшение количества фотонов (падение энергии) на каждом участке линии. Чему равны потери на отражение? Сравните полученные результаты с данными рефлектометра.

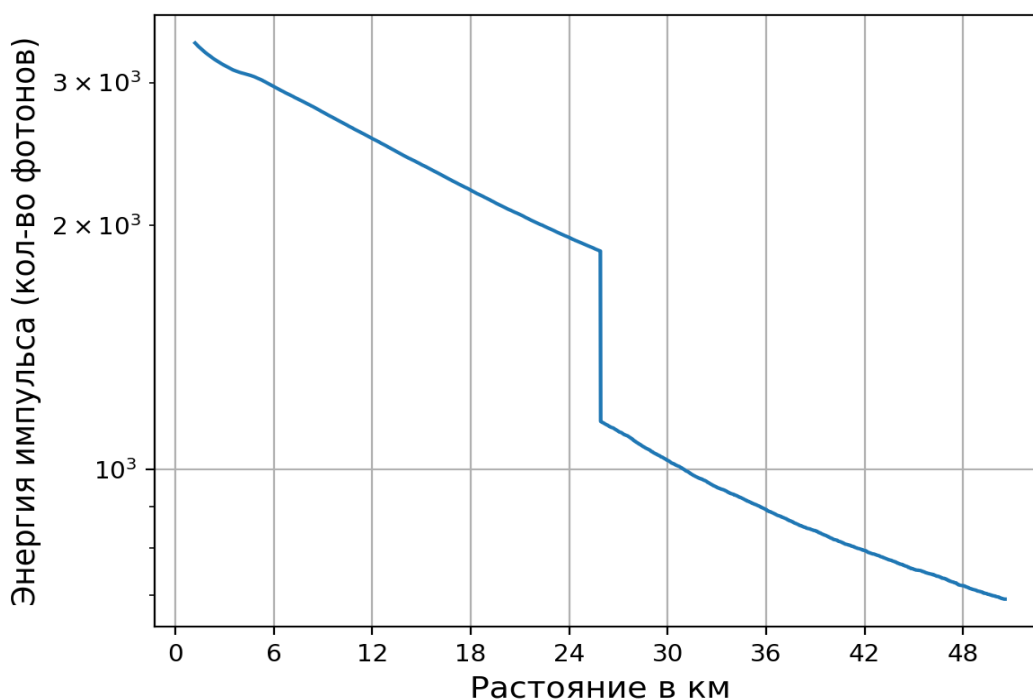


Рисунок 14 График уменьшения числа фотонов на каждом участке линии

5 Контрольные вопросы и задания

1. Какие механизмы потерь могут присутствовать в волоконно-оптической линии связи?
2. Какие длины волн являются стандартами для телекоммуникации? Почему именно они?
3. Зная отношение показателей преломления и диаметры сердцевины и оболочки одномодового волокна, найдите минимальный радиус катушки, которую можно использовать для оптической линии.
4. Каков принцип работы рефлектометра? Опишите схему устройства.
5. Выведите формулу (5).
6. Почему вычисление потерь в линии проводится в режиме сильной аттенюации? Соответствует ли это однофотонному режиму?

Приложение А

Текст программы «reflectometry.py»

Данную программу следует запускать в среде «Jupyter Notebook».

```
%matplotlib notebook

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from math import sqrt, log10
from statistics import mean

#
# параметры лабораторной установки
#
wave_length = 1550*10**(-9) # длина волны (м)
beats_freq = 5.0*10**(6) # частота следования тактов (Гц)
beat_length = 1/beats_freq # длительность такта (с)
cv = 2.0*10**8 # скорость света в оптоволокне
train_period = 4000 # период трейна (кол-во тактов)
num_of_trains = 40000 # количество трейнов
η = 0.08 # квантовая эффективность детектора фотонов

useful_beats_start_at = 60 # минимальный учитываемый такт (то, то ближе -
отбрасываем)
connection_beat_num = ??? # такт, на который приходится соединение
useful_beats_end_at = ??? # такт, на котором заканчивается вторая катушка

#
# Подгружаем сырые данные, экспортированные из гистограмм LabView.
#

# лабораторная схема
lv_barchart_data = np.loadtxt('lv_barchart_data.txt', skiprows=1)

# терминатор вместо катушек
lv_barchart_data_noise = np.loadtxt('lv_barchart_data_noise.txt', skiprows=1)

E_pulse = ??? # энергия импульса на входе в оптоволокно при данной
аттенюации, кол-во фотонов

#
# формируем массив суммарных срабатываний детектора по тактам
#

clicks_by_beat = [0] * train_period # массив полезных срабатываний
clicks_by_beat_noise = [0] * train_period # массив шумовых срабатываний

# суммируем зарегистрированные импульсы по тактам
```

```

for (i, val) in lv_barchart_data:
    beat_num = int(i)
    if beat_num < useful_beats_start_at:
        continue
    clicks_by_beat[beat_num] += val

# суммируем шум по тактам
for (i, val) in lv_barchart_data_noise:
    beat_num = int(i)
    if beat_num < useful_beats_start_at:
        continue
    clicks_by_beat_noise[beat_num] += val

# вычитаем шум
for i in range(0, train_period):
    if clicks_by_beat[i] > clicks_by_beat_noise[i]:
        clicks_by_beat[i] -= clicks_by_beat_noise[i]
    else:
        clicks_by_beat[i] = 0

#
# вспомогательная функция
# рекурсивно вычисляет затухание энергии импульса и распределение
коэффициента затухания по длине линии
# параметры:
#   ρ_func(n) - коэффициент захвата рассеянного излучения волокном в
обратную сторону на n-м участке линии
#   E_pulse   - энергия одного импульса на входе в оптоволокно, кол-во
фотонов
# возвращает три массива:
#   E[n]      - суммарная энергия после n-го участка, кол-во фотонов
#   B[n]      - затухание на n-м участке (в беллах)
#   BS[n]     - суммарное затухание на участке с 0 по n включительно
#
def calc_att_distribution(ρ_func, E_pulse):
    E_sum = num_of_trains * E_pulse # суммарное кол-во фотонов на входе в
оптоволокно за всё время измерения

    E = [E_sum] + [np.nan] * train_period
    B = [0]     + [np.nan] * train_period
    BS = [0]   + [np.nan] * train_period

    # рекурсивно вычисляем E, B, BS для всех n, начиная с 1
    for n in range(1, train_period+1):
        x = 1 - clicks_by_beat[n-1]*10**(2*BS[n-1]) / (E_sum*ρ_func(n)*η)
        if x < 0:
            # если меньше нуля - результат всех вычислений неопределён -
возвращаем пустоту
            return (None, None, None)
        B[n] = -log10(x)
        BS[n] = BS[n-1] + B[n]
        E[n] = E_sum*10**(-BS[n])

    return (E, B, BS)

```



```

#
# методом двоичного приближения определяем ρ и ρ_conn
#

ρ_precision = 10**(-10) # требуемая точность

#
# сначала подбираем ρ - добиваемся, чтобы коэффициент затухания получился
# одинаковый в начале и в конце 1-й катушки
#
ρ_low = 10**(-9) # заведомо слишком маленькое значение
ρ_high = 1 # заведомо слишком большое значение
while ρ_high-ρ_low > ρ_precision:
    ρ_mid = (ρ_high+ρ_low)/2
    E, B, BS = calc_att_distribution(lambda n: ρ_mid, E_pulse)
    if E == None: # решения не существует - слишком маленькое значение ρ
        ρ_low = ρ_mid
        continue
    mean1 = mean(B[100:connection_beat_num//2-100]) # средний коэффициент
    # затухания в первой половине 1-й катушки
    mean2 = mean(B[connection_beat_num//2+100: connection_beat_num-100]) #
    # средний коэффициент затухания во второй половине 1-й катушки

    if mean1 < mean2: # график задирается вверх - значит слишком низкое
    # значение ρ
        ρ_low = ρ_mid
    else: # график снижается или горизонтальный
        ρ_high = ρ_mid

# требуемое значение ρ найдено
ρ = ρ_high
print("ρ =", ρ)

#
# теперь подбираем ρ_conn - добиваемся, чтобы коэффициент затухания во 2-й
# катушке получился такой же как и в 1-й
#
ρ_low = 10**(-9) # заведомо слишком маленькое значение
ρ_high = 1 # заведомо слишком большое значение
while ρ_high-ρ_low > ρ_precision:
    ρ_mid = (ρ_high+ρ_low)/2
    E, B, BS = calc_att_distribution(lambda n: ρ_mid if n==
    connection_beat_num else ρ, E_pulse)
    if E == None: # решения не существует - слишком маленькое значение ρ_conn
        ρ_low = ρ_mid
        continue
    mean1 = mean(B[100: connection_beat_num//2-100]) # средний коэффициент
    # затухания в первой половине 1-й катушки
    mean2 = mean(B[connection_beat_num+100:(useful_beats_end_at+
    connection_beat_num)//2-100]) # средний коэффициент затухания в первой
    # половине 2-й катушки

    if mean1 < mean2: # график задирается вверх - слишком низкое значение
    # ρ_conn
        ρ_low = ρ_mid
    else: # график снижается или горизонтальный

```

```

    rho_high = rho_mid

# коэффициент найден
rho_conn = rho_high
print("rho_conn = ", rho_conn)

# вычисляем распределение с учётом найденных коэффициентов
E, B, BS = calc_att_distribution(lambda n: rho_conn if n== connection_beat_num
else rho, E_pulse)

#
# рисуем график
#
y = np.array(E) [0:useful_beats_end_at]/num_of_trains

# для красоты убираем нулевые точки и отброшенное начало
y[y == 0] = np.nan
for i in range(0, useful_beats_start_at):
    y[i] = np.nan

fig, main_ax = plt.subplots()
main_ax.plot(y)
main_ax.grid(True)
main_ax.set_xticks((np.arange(0, len(y), 300)))
main_ax.set_xticklabels((np.arange(0, len(y), 300))*beat_length*cv//2//1000)

main_ax.set_yscale('log')

main_ax.set_xlabel('Расстояние в км', fontsize=13)
main_ax.set_ylabel('Энергия импульса (кол-во фотонов)', fontsize=13)

plt.show()

```

Приложение Б

Инструкция по установке Jupyter Notebook

1. Зайти на сайт <https://www.python.org>, скачать и установить Python 3.
2. Зайти на сайт <https://jupyter.org/install> и установить Jupyter Notebook по инструкции.
3. Инструкции, как запустить Jupyter Notebook находится тут: <https://jupyter.readthedocs.io/en/latest/running.html>

Литература

1. Lord Rayleigh F.R.S. Xxxiv. on the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 47(287):375–384, 1899.
2. Alberto Tosi, Adriano Della Frera, Andrea Bahgat Shehata, and Carmelo Scarcella. Fully programmable single-photon detection module for InGaAs/InP single-photon avalanche diodes with clean and subnanosecond gating transitions. *Review of Scientific Instruments*, 83(1):013104, 2012.
3. Листвин А.В. Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. Москва, ЛЕСАРпт, 2005.

