

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Анализ рефлектограмм протяженных оптоволоконных сетей

Выполнили: Вазюля Василиса
Шувайникова Татьяна
Сметанина Елена

г.Долгопрудный, 2023

1 Анотация

В настоящее время основная доля магистральных сетей передачи данных построена по технологии волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). С развитием портативной мобильной телефонии и технологий высокоскоростного доступа в Интернет, большая пропускная способность оптических волокон необходима в 21 веке, в связи с чем значительное внимание уделяется вопросам измерения качества систем передачи и способам их улучшения.

Собраны данные для различных конфигураций оптических линий с помощью рефлектометра Anritsu MT9085A-063-010-037-ES210. Сняты рефлектограммы на длинах волн 1310 и 1550 нм. Проведены измерения потерь в одномодовых оптоволоконных типах SMF и PCSF. Оценены численно: динамический диапазон рефлектометра, потери мощности на коннекторах и погонное затухание, потери мощности на изгибах оптоволокна в зависимости от радиуса и угла, мертвые зоны и их зависимость от ширины подаваемого импульса.

На основе экспериментальных данных создан анализатор рефлектограмм, способный определять следующие параметры: конец линии волокна, количество и координаты соединения катушек, погонные потери волокна. Программа находит предположительные места соединения коннекторов и оценивает в них дополнительные потери.

Исследование выполнено при поддержке Кафедры общей физики МФТИ. Авторы благодарят А.Ю. Игуменова за организацию проведения измерений.

2 Теоретические сведения

2.1 Релеевское рассеяние

Рассеяние света в оптоволокне на неоднородностях, имеющих размер меньше длины волны излучения, называется релеевским рассеянием. В основном релеевское рассеяние происходит на флуктуациях показателя преломления, вызванных флуктуациями плотности кварца (рис. 2). Помимо флуктуаций плотности кварца, неоднородности в сердцевине волокна могут быть вызваны внесением в ее состав примесей на этапе производства.

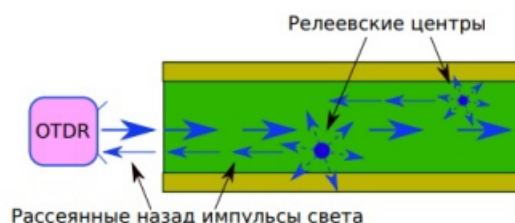


Рис. 1: Релеевское рассеяние

Одной из важных характеристик оптического волокна является апертурный угол - угол относительно оси волокна, при попадании в который излучение может туннелировать по волокну. Релеевское рассеяние происходит во всех направлениях - от 0 до 180° относительно исходного луча. Если угол между рассеянным лучом и осью волокна меньше апертурного, рассеянный луч распространяется вдоль волокна. Рассеянные в обратном направлении лучи регистрируются рефлектометром. Благодаря эффекту релеевского рассеяния возможно местоположение неотражающих событий (сварных соединений и изгибов) рефлектометрическим методом.

Релеевское рассеяние – протяженный эффект. Размер области, в которой происходит рассеяние, всегда больше длины волны. Отражение локально, поскольку граница раздела

материалов с разным коэффициентом преломления резкая. При отражении сохраняются длительность импульса и фронты волн.

Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны $\sim 1/\lambda^4$, а инфракрасное поглощение увеличивается. Абсолютный минимум потерь находится вблизи длины волны 1550 нм.

2.2 Оптический рефлектометр

Единственным прибором, способным локализовывать события внутри оптического элемента, является оптический рефлектометр (OTDR, Optical Time-Domain Reflectometer). Оптический рефлектометр - это измерительный прибор, предназначенный для определения расстояния до неоднородностей показателя преломления оптического волокна и измерения потерь в них. Возможен анализ сварных соединений, макроизгибов, коннекторов, обрывов и т.д., что очень важно для протяженных волоконно-оптических линий. Работа OTDR основана на детектировании вернувшихся сигналов вследствие релеевского рассеяния и френелевского отражения.

В ходе диагностики оптического волокна оптический рефлектометр посылает в него мощный зондирующий оптический импульс определенной амплитуды и длительности и измеряет мощность и амплитуду импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр.

Одновременно с подачей зондирующего импульса рефлектометр начинает отсчет времени. Распространяясь по оптическому волокну, импульс сталкивается с различными препятствиями (повреждениями, неоднородностями), от которых происходит отражение части сигнала. Отраженный сигнал распространяется в обратном направлении и время его поступления на вход рефлектометра фиксируется. Те неоднородности показателя преломления, параметры которых (затухание, амплитуда) больше установленных порогов, в рефлектометрии называются события. В свою очередь, события делятся на отражающие (вызванные френелевским отражением) и неотражающие (вызванные релеевским рассеянием).

В качестве зондирующего импульса используются излучения следующих длин волн.

Длина волны, нм	Типичные значения погонного затухания, дБ/км
1310	0,33
1380	0,50
1490	0,21
1550	0,2
1625	0,22

Таблица 1: Длины волн зондирующего импульса и их погонное затухание

Ослабление излучения на единицу длины (дБ/км) называется погонным затуханием и зависит от длины волны зондирующего импульса. Чаще всего в рефлектометрах используются длины волн 1310 и 1550 нм с соответствующими значениями погонного затухания 0,33 дБ/км и 0,2 дБ/км. Погонное затухание вызвано релеевским рассеянием и инфракрасным поглощением, является одной из характеристик качества волокна.

В качестве примера на рис. 3 приведены рефлектограммы, записанные при длинах волн 1310 и 1550 нм.

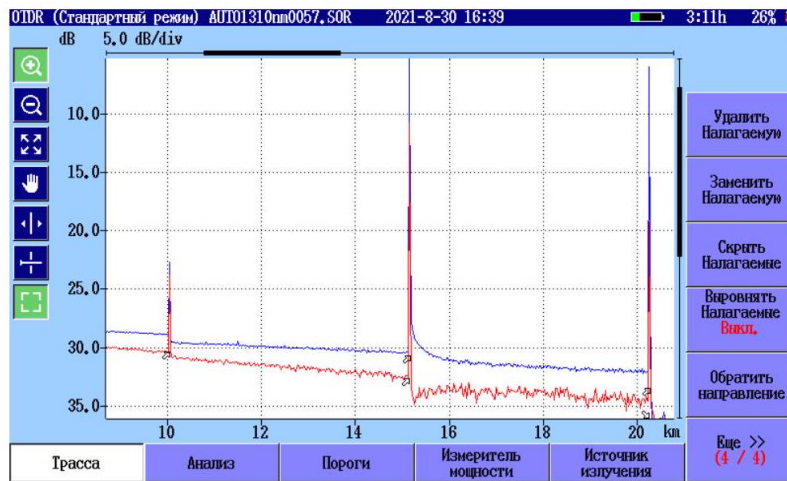


Рис. 2: Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, 2 катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами. Верхняя рефлектограмма записана при длине волны 1550 нм, нижняя - 1310 нм

Видно, что угол наклона рефлектограммы при длине волны 1550 нм меньше, чем при длине волны 1310 нм, что связано с меньшим погонным затуханием на длине волны 1550 нм.

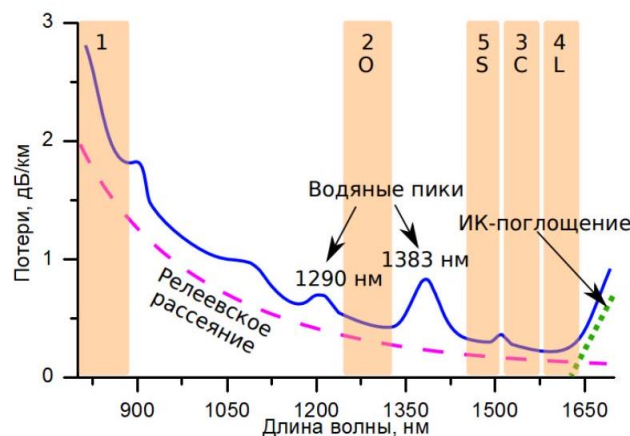


Рис. 3: Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых волокнах

Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых волокнах На данном графике наблюдаются пики при длинах волны 1290 и 1383 нм, называемые также водяными пиками. Эти пики обусловлены наличием примесей и ОН-группами, колебательные уровни которых поглощают свет на этих длинах волн. В области коротких длин волн спектра потери ограничиваются релеевским рассеянием, а в области больших длин волн - инфракрасным поглощением. Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны $\sim 1/\lambda^4$, а инфракрасное поглощение увеличивается. Абсолютный минимум потерь находится вблизи длины волны 1550 нм.

2.3 Измерение потерь мощности оптическим рефлектометром

Результат измерения рефлектометр представляет в виде графика, называемого рефлектограммой, по оси абсцисс откладывается расстояние, по оси ординат - затухание (рис. 4).

В начале рефлектограммы наблюдается пик обратного рассеяния от входного коннектора, имеющий протяженную форму - это так называемая мёртвая зона. Далее могут присутствовать пики, ступеньки вверх и вниз. Заканчивается рефлектограмма шумами прибора. Далее рассматриваются причины возникновения потерь мощности и особенности их проявления на рефлектограмме.

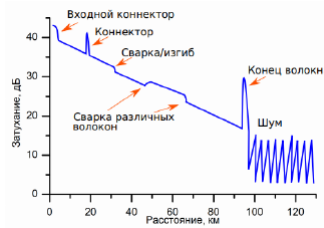


Рис. 4: Схема рефлектограммы с типичными потерями мощности

Математическая модель работы рефлектометра

Мощность сигнала обратного рассеяния в однородном оптическом волокне уменьшается во времени по двум причинам:

1. уменьшающаяся мощность (энергия) зондирующего сигнала;
2. рассеянное излучение ослабляется во столько же раз при распространении вдоль волокна в обратном направлении.

Обозначим через $P(L)$ мощность оптического сигнала зондирующего импульса на расстоянии L , выраженную в линейных единицах (Вт). Для коротких зондирующих импульсов обозначим мощность $P_R(z_1, z_2)$ (Вт) излучения, рассеянного на некотором малом участке с координатой z_1 , измеренную в точке z_2 .

В точке рассеяния $z_2 = z_1 = L$ справедливо следующее выражение для мощности рассеянного излучения:

$$P_R(z_1, z_2) = P(L)X(\tau_0, L)(\tau/\tau_0),$$

где $X(\tau_0, L)$ - коэффициент обратного рассеяния волокна в точке L для импульса единичной длительности τ_0 , τ - длительность тестирующего импульса.

Мощность $P(L)$ зондирующего импульса в области рассеяния на расстоянии L определяется формулой

$$P(L) = P_0/A(0, L) = P_0/A(L)$$

где $P_0 = P(0)$ - мощность импульса на входе в волокно ($z = 0$), а $A(z_1, z_2)$ - затухание (потери) (в раз) на участке $[z_1, z_2]$, причем $A(z_1, z_2) = A(z_2, z_1)$, потери на участке не зависят от направления распространения сигнала. Рассеянное излучение при распространении назад от точки L до нуля также затухает в $A(0, L)$ раз. Поэтому мощность рассеянного излучения, попадающая на фотоприемник, как функция расстояния до точек рассеяния L определяется следующим выражением:

$$P_R(L) = P_R(L, 0) = P_R(L, L)/A(0, L) = P_0 A^{-2}(0, L) X(\tau_0, L)(\tau/\tau_0). \quad (1)$$

Были введены обозначения $P_R(z_1, z_2)$ - мощность рассеянного обратного излучения в точке z_1 , пришедшая в точку z_2 , и $P_R(z) = P_R(z, 0)$. В оптическом рефлектометре регистрируется мощность рассеянного сигнала в логарифмических единицах - децибелах на милливатт (дБм), а отношения в децибелах (дБ). Перепишем формулу (1), используя логарифмические единицы:

$$p_R(L) = p_R(L, 0) = p_0 - 2a(0, L) + \chi(\tau_0, L) + 10 \lg(\tau/\tau_0)$$

где

$$\chi(\tau_0, L) = 10 \lg(X(\tau_0, L)) \text{ [дБ]}. (2)$$

Как следует из формулы (2) в общем случае регистрируемая приемником мощность $p_R(L)$ зависит от коэффициента рассеяния $\chi(\tau_0, L)$ в точке L . Если в линии связи используется волокно с постоянным значением $\chi(\tau_0)$, не зависящим от координаты (по крайней мере на некотором участке), то разность мощностей $\Delta p_R(L) = p_R(L_A) - p_R(L_B)$, где $p_R(L_A)$ и $p_R(L_B)$ измерены в моменты времени, соответствующие отражению от двух точек А и Б, будет равна удвоенному затуханию на участке от А до Б :

$$\Delta p_R(L) = p_R(L_A, 0) - p_R(L_B, 0) = 2a(0, L_B) - 2a(0, L_A) = 2a(L_B).$$

Поскольку задачей измерений является измерение затухания, а не его удвоенного значения, то для удобства работы с рефлектометром прибор пересчитывает измеренную зависимость так, что на вертикальной шкале значения разности между уровнем мощности в измеряемой точке и начальным уровнем мощности рассеянного излучения:

$$a_{\text{OIDR}}(L) = 0,5(p_R(L, 0) - p_R(0, 0)).$$

Измеренное значение затухания на некотором участке

$$a_{\text{OTDR}}(L_A, L_B) = a(L_B) - a(L_A)$$

между точками А и Б будет определяться следующим выражением:

$$a_{\text{OIDR}}(L_A, L_E) = a(L_E) - a(L_A) + [\chi(\tau_s, L_A) - \chi(\tau_0, L_B)]/2.$$

При использовании в точках А и Б волокна с одинаковым коэффициентом рассеяния $\chi(\tau_0, L_A) = \chi(\tau_0, L_E)$ получается, что измеренное по шкале рефлектометра затухание равно действительному затуханию:

$$a_{\text{OTDR}}(L_A, L_B) = a(L_E) - a(L_A) = a(L_A, L_E).$$

По горизонтальной оси рефлектометра отложено расстояние, равное половине произведения временной задержки t на групповую скорость света в волокне v_{GR} :

$$L = 0,5tv_{GR}$$

Расстояние до тестируемого участка ВОЛС определяется путем пересчета измеренной временной задержки соответствующего этому участку рассеянного или отраженного сигнала. Для получения высокой пространственной точности измерений необходимо: во-первых, обеспечить высокую точность измерения временных задержек, а во-вторых, установить точное значение показателя преломления n_{GR} . Групповая скорость определяется соотношением $v_{GR} = c/n_{GR}$.

Величина группового показателя преломления обычно приводится в спецификациях на оптические волокна кабеля. Если этого не сделано, то в данном случае в рефлектометре можно установить среднее значение группового показателя преломления для одномодового волокна $n_{GR} = 1,467$

В современных рефлектометрах блок обработки данных состоит из аналогово-цифрового преобразователя и блока цифровой обработки специализированного компьютера. Для уменьшения уровня шума и, следовательно, расширения динамического диапазона при сохранении пространственного разрешения в блоке цифровой обработки осуществляется накопление данных от большого числа отраженных сигналов. Уровень шума уменьшится пропорционально корню квадратному из числа сигналов.

Сформированная блоком обработки данных в электронном виде рефлектограмма подается на дисплей либо обрабатывается в специальных блоках автоматической обработки, и на дисплей подаются результаты обработки. Рефлектограмма может записываться в память рефлектометра либо может сравниваться с хранящимися в памяти рефлектограммами [3-5].

Динамический диапазон рефлектометра

Дальность работы рефлектометра определяется динамическим диапазоном (ДД). Динамический диапазон зависит от отношения максимальной мощности рассеянного сигнала к уровню (мощности) шума. Увеличить динамический диапазон можно, увеличивая мощность рассеянного излучения, уменьшая уровень шума, или и то, и другое одновременно. Динамический диапазон (D_R , [дБ]) рефлектометра рассчитывается по следующей формуле:

$$D_R = 5 (\lg S_0 - \lg S_n)$$

где S_0 — мощность рассеянного сигнала (измеряется от начала рефлектограммы), S_n — уровень шума. Мощность сигнала S_0 однозначно определена и может быть измерена по рефлектограмме (рис. 5), уровень шума может быть определен как среднеквадратичный уровень шума или шум по уровню 98%. В первом случае S_n определяется как среднеквадратичное значение шума, поэтому его еще называют уровнем шума при SNR = 1. Этот уровень равен стандартному отклонению при гауссовой статистике шума. Шум по уровню 98% определяется так, чтобы на оцифрованной рефлектограмме в 98% случаев оцифрованное значение лежало ниже заданного уровня и только в 2% случаев — выше. 98% уровень шума лежит на 1,8 дБ выше среднеквадратичного уровня шума (рис. 5).



Рис. 5: Определение динамического диапазона по рефлектограмме

Наряду с динамическим диапазоном используется диапазон измерений (ДИ), определяющий диапазон изменения мощности обратного рассеяния, при которой измерения можно проводить с некоторым заданным коэффициентом сигнал/шум. С увеличением расстояния уменьшается коэффициент сигнал/шум, и ДИ показывает расстояние, которое можно проверить с отношением сигнал/шум не хуже заданного. Согласно [3] диапазон измерений определяется по формуле

$$\lg [(S_0 + S_n) / (S_0 - S_n)] = 0,2 \text{ дБ.}$$

где S_n — среднеквадратичная мощность шума. На динамический диапазон и диапазон измерений влияют следующие параметры рефлектометра:

1. Длительность импульса влияет на ДД/ДИ и на разрешающую способность рефлектометра. Чем больше длительность импульса, тем больше мощность сигнала, отраженного от различных точек, соответственно больше ДД/ДИ. В то же время увеличение длительности импульса приводит к ухудшению разрешающей способности рефлектометра (рис. 7).

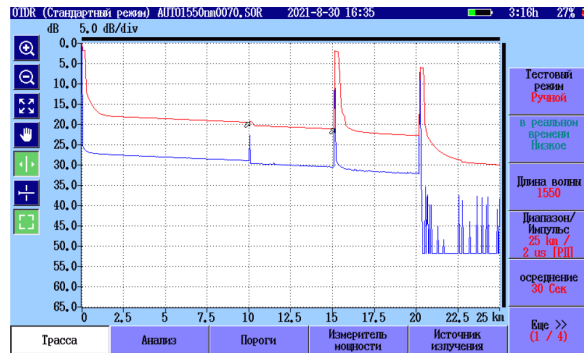


Рис. 6: Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, 2 катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами. Верхняя рефлектограмма записана при длительности импульса 2000 нс, нижняя – 20 нс

2. Время накопления рефлектограмм оптимизирует ДИ за счет времени проведения эксперимента. Усреднение большого количества рефлектограмм уменьшает шумовую составляющую.

3. Ширина полосы пропускания электрических фильтров на приемнике. Широкая полоса пропускания сохраняет высокочастотные компоненты спектра, при этом рефлектограмма содержит большее количество шума. Уменьшение ширины полосы пропускания повышает отношение сигнал/шум, отсекает высокие частоты, сглаживает рефлектограмму. Более точная локализация событий достигается при большой полосе пропускания и короткой длительности импульса.

4. Длина волны зондирующего сигнала может влиять на ДД/ДИ косвенно, поскольку от нее могут зависеть мощность лазера и чувствительность фотоприемника.

Величина динамического диапазона увеличивается с увеличением длительности импульсов τ и времени усреднения сигнала t . Например, при увеличении длительности импульса в 1000 раз (от $\tau_1 = 10$ нс до $\tau_2 = 10$ мкс) коэффициент обратного релеевского рассеяния увеличивается (по шкале рефлектометра) на $5 \log(\tau_1/\tau_2) = 15$ дБ. Так как уровень шумов (в отсутствие сигнала) при этом не меняется, то динамический диапазон тоже увеличивается на 15 дБ.

При увеличении времени усреднения уменьшается среднеквадратичное значение шума. В приближении белого (гауссова) шума его среднеквадратичное значение изменяется обратно пропорционально квадратному корню из времени усреднения сигнала. Увеличение времени усреднения от t_1 до t_2 соответствует уменьшению уровня шума и увеличению динамического диапазона по шкале рефлектометра на $2,5 \log(t_2/t_1)$. Например, при увеличении времени усреднения в 100 раз (от $t_1 = 1$ с, до $t_2 = 100$ с) динамический диапазон увеличивается на $2,5 \log(t_2/t_1) = 5$ дБ (что в два раза меньше, чем при аналогичном увеличении длительности импульсов).

Сварка одинаковых волокон (ступенька вниз)

Сварное соединение вызывает потери мощности, поскольку возможно наличие центрального рассогласования концов волокон и наличие дефектов в сварном шве. На рефлектограмме сварка двух одинаковых по свойствам волокон проявляется в виде так называемой ступеньки вниз. Сварка с затуханием 0,05 дБ и менее считается хорошей. Если сварка очень хорошая и оба сваренных волокна одинаковые по свойствам, она может быть не видна вообще. Сварное соединение дает меньшее затухание при меньших длинах волн зондирующего импульса.

Механическое соединение (пик)

При механическом соединении двух концов волокна с помощью оптического коннектора возникает обратное отражение, проявляющееся на рефлектограмме в виде пика. Уро-

вень сигнала после пика обычно несколько падает, причём сильнее, чем на сварном соединении. Разность между уровнем сигнала перед пиком и после него показывает величину потерь на этом соединении. На механическом соединении обычно падение мощности намного больше, чем на сварном - 0,1 и 0,02 дБ соответственно.

Сварка волокон с разными свойствами (ступенька вверх)

Сварка двух волокон с разными показателями преломления и разной дисперсией, (например, SMF и NZDSF/PSCF волокна) может проявляться на рефлектограмме в виде ступеньки вверх (мнимое усиление сигнала) (рис. 8).

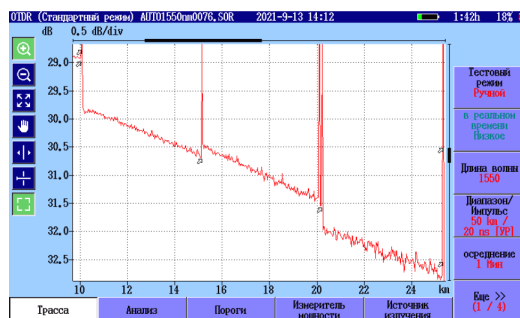


Рис. 7: 8. Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, катушка волокна YOFC SMF G652D 5 км, катушка PSCF волокна YOFC из чистого кварца со сверхнизкими потерями PH1010-C (SMF ultra) 5 км, катушка волокна YOFC SMF G652D 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами

На рис. 8 видно, что катушка волокна PSCF проявляется на рефлектограмме как ступенька вверх, после которой наблюдается более высокая ступенька вниз (при переходе в SMF волокно). Также на рисунке 8 видны пики, вызванные обратным отражением на LC-UPC коннекторах. Этот эффект вызван различной концентрацией релеевских центров рассеивания и соответственно различным километрическим затуханием. На входе в участок другого волокна рефлектометру кажется, что есть усиление на какую-то величину, которое больше реального затухания на той сварке, а на выходе из участка он эту же величину добавляет к затуханию на сварке, завышая потери на сварке. Сварку волокон с разными свойствами следует измерять, подключая рефлектометр сначала с одной, потом с противоположной стороны оптической сети. С одной стороны будет наблюдаться ступенька вверх, а с другой стороны - более сильная ступенька вниз, среднее затухание будет рассчитываться как арифметическая средняя высота ступенек.

Изгиб волокна (ступенька вниз)

При изгибе волокна возникают потери, связанные с выходом модового пятна за границы оптоволокна. Чем больше длина волны, тем больше диаметр модового пятна и соответственно потери при изгибе. Поэтому на рефлектограммах одного и того же участка схемы, содержащего изгиб, потери мощности (высота ступеньки вниз) будут зависеть от длины волны излучения в рефлектометре. При измерении на 1310 нм изгиб будет проявляться слабее, чем на 1550 нм - именно так можно понять, что это изгиб волокна, а не плохая сварка. На рис. 9 приведена зависимость мощности излучения, прошедшего через волокно от диаметра изгиба и количества витков.

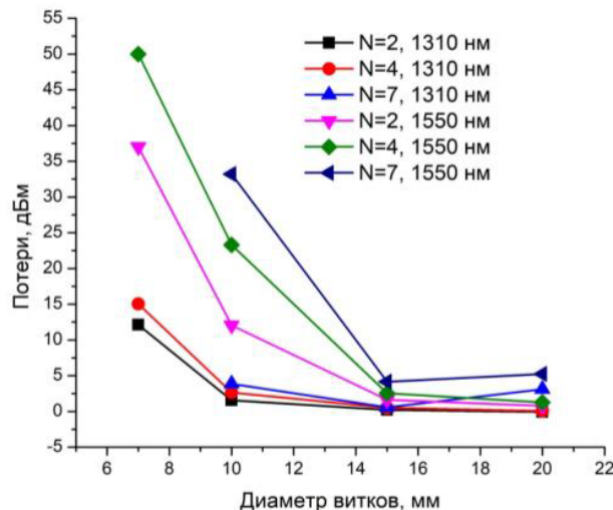


Рис. 8: Зависимость потерь мощности излучения, прошедшего через волокно, от диаметра изгиба и количества витков. Измерения проведены оптическим тестером при длинах волн 1310 и 1550 нм

Конец оптической схемы (шумы прибора)

Конец схемы на рефлектограмме имеет вид резкого падения мощности, за которым следуют собственные шумы прибора (рис. 7). Перед шумами может наблюдаться пик, в случае наличия на конце схемы отражающего элемента (например, UPC-коннектора) (рис. 10).

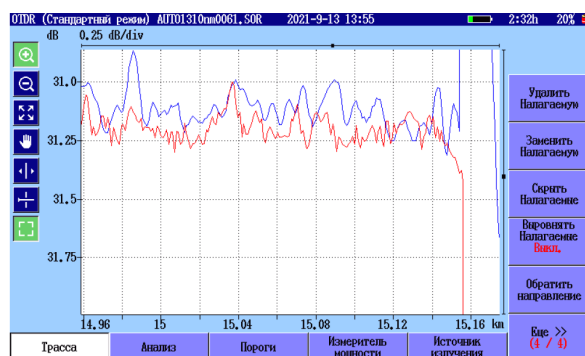


Рис. 9: Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, 2 катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами. Последняя катушка заканчивается LC-UPC коннектором, при записи рефлектограммы без пика в конце линии произведена намотка конца волокна на карандаш

2.4 Мертвые зоны и пространственное разрешение рефлектометра

Мертвые зоны в рефлектометрии используются для описания пространственного разрешения прибора. Выделяют два типа мертвых зон - мертвая зона для событий (EDZ - event dead zone) и мертвая зона по затуханию (ADZ - attenuation dead zone). Ширина EDZ определяется минимальным разрешимым расстоянием между двумя неоднородностями. EDZ для отражающей и неотражающей неоднородностей показаны на рисунке 11. Ширину EDZ по отражению определяют как полная ширина пика на уровне 1/2 амплитуды (FWHM - full-width at half-maximum). Ширина мертвой зоны прямо пропорциональна

динамическому диапазону, поскольку для обеспечения большего динамического диапазона при тестировании длинных линий требуется более широкий световой импульс.

По шкале рефлектометра уровень $1/2$ амплитуды отражающей неоднородности находится на 1,5 дБ ниже максимума пика (рис. 11а). Ширину мертвой зоны для неотражающей неоднородности определяют по ширине переходного участка, наблюдаемого на рефлектограмме в месте расположения этой неоднородности (рис. 11б). При этом полагают, что величина потерь в этой неоднородности < 1 дБ.

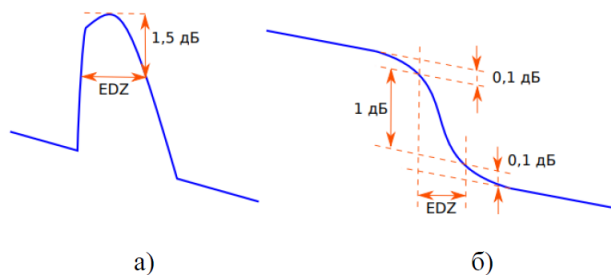


Рис. 10: . Мертвые зоны для событий отражающей (а) и неотражающей (б) неоднородностей

Для более подробного анализа мертвых зон рассмотрим рис. 12. На данном участке рефлектограммы изображены две одинаковые, близко расположенные отражающие неоднородности. Передний фронт отраженного импульса изображается там же, где находится неоднородность. Задний фронт отраженного импульса приходит на фотоприемник позже, чем передний фронт и изображается дальше от начала рефлектограммы. Результирующая ширина импульса соответствует расстоянию между передним и задним фронтом. В качестве примера мертвых зон отражающих неоднородностей на рис. 7 приведены рефлектограммы, полученные при разной длительности импульса в линии с катушками, соединенными LC-UPC коннекторами.

Величина перекрытия импульсов зависит от расстояния между неоднородностями - чем оно меньше, тем сильнее перекрываются импульсы. При расстоянии между неоднородностями, равном ширине импульса, отраженные импульсы сливаются в один импульс с небольшим провалом на вершине. Этот провал неразличим, когда расстояние между этими неоднородностями меньше ширины мертвой зоны, когда коэффициенты отражения от неоднородностей различаются, когда на рефлектограмме много шумов.

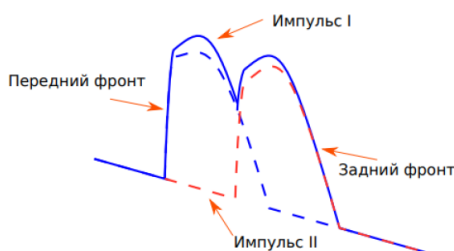


Рис. 11: Отражение импульса света от двух одинаковых неоднородностей I и II расположенных на расстоянии, равном ширине мертвой зоны

Помимо длительности импульсов света, испускаемых лазерным диодом, ширина и форма импульса на дисплее зависят от ширины полосы фотоприемника Δf .

Если длительность импульсов τ больше времени установления отклика ($0,35/\Delta f \approx 10$ нс), форма импульса близка к прямоугольной, а его ширина определяется длительностью

импульса и примерно равна $\tau \cdot \frac{v_r}{2}$ (например, ~ 10 м при $\tau = 100$ нс), где $v_r = 2 \cdot 10^5$ К/с = 0,2 м/с – групповая скорость света в волокне. При длительности импульса меньше времени установления отклика, ширина импульса ограничивается шириной полосы фотоприемника. Например, при $\tau = 1$ нс ширина импульса (1 м) на порядок больше, чем если бы она определялась длительностью импульса ($\tau \cdot \frac{v_r}{2} = 0,1$ м). Длительности импульсов на входе τ и на выходе фотоприемника Δt связаны между собой соотношением: $\Delta t = \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{0,35}{\Delta f}\right)^2}$.

Отсюда выводится выражение для ширины импульса: $u = \Delta t \cdot \frac{v_r}{2} = \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{0,35}{\Delta f}\right)^2} \cdot \frac{v_r}{2}$ (рис. 13).

При $\tau > 300$ нс ширина импульса пропорциональна τ : $u = \tau \cdot 0,1$ м. При τ меньше 10 нс ширина импульса не зависит от длительности импульсов и определяется шириной полосы фотоприемника Δf . В стандартном режиме порядка 2,5 м, а в режиме максимального разрешения ($\Delta f \sim 30$ МГц $\tau < 10$ нс) ширина импульса чуть больше 1 м. В режиме максимального динамического диапазона ($\Delta f \sim 3$ МГц и $\tau < 10$ нс) ширина импульса порядка 10 м.

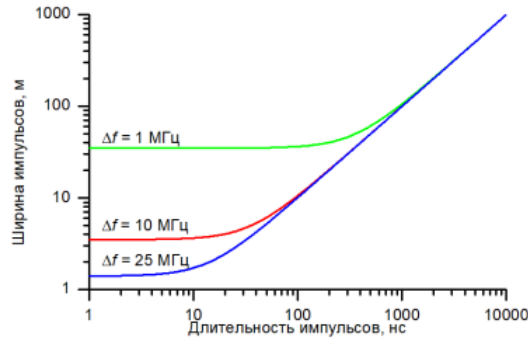


Рис. 12: Зависимость ширины импульсов на дисплее от длительности импульсов света, испускаемых лазерным диодом, и ширины полосы фотоприемника

Мертвая зона по затуханию возникает из-за конечной длительности импульса, генерируемого лазерным диодом, и конечной крутизны заднего фронта импульса на выходе фотоприемника. Ширина мертвой зоны по затуханию складывается из двух величин: $(\tau + t_x) v_r / 2$, где x – длительность импульса генерируемого лазерным диодом, $t_x \cdot v_r / 2$ – длина хвоста импульса, $v_r = 0,2$ м/нс – групповая скорость распространения света в волокне (рис. 14). Множитель 1/2 учитывает, что свет проходит через волокно дважды в прямом и обратном направлении.

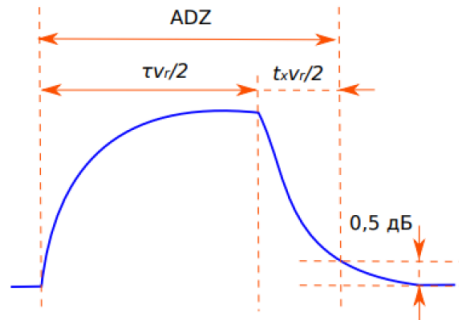


Рис. 13: Мертвая зона по затуханию

Длина хвоста импульса $t_x \cdot v_r/2$ зависит от того, насколько быстро он приблизился к пьедесталу. По определению мертвой зоны, хвост импульса должен отстоять от пьедестала на 0,5 дБ. Математически это условие записывается в виде уравнения

$$5 \log R(1 - \exp(-2\pi\tau\Delta f)) \cdot \exp(-2\pi t_x \Delta f) + 10^{q/5} - \frac{q}{2} = 0,5$$

где R — коэффициент отражения от неоднородности, $q = -80 \text{ дБ} + 10 \log(\tau[\text{нс}]/l[\text{нс}])$ — доля света рассеянная назад в моду волокна.

При $\tau > 1 \text{ мкс}$ ширина ADZ близка к полной ширине импульса на половине амплитуды (рис. 15) и однозначно определяется длительностью импульса. При $\tau < 20 \text{ нс}$ ширина ADZ зависит от ширины полосы фотоприемника и от значения коэффициента отражения от неоднородности и в 3-5 раз больше ширины импульса.

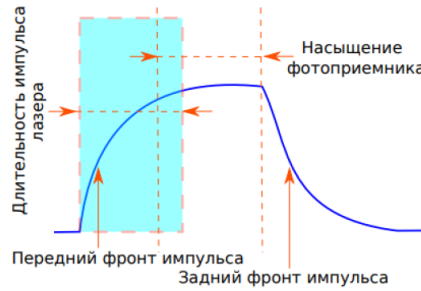


Рис. 14: Увеличение ширины мертвой зоны по затуханию (ADZ) при насыщении фотоприемника

Фотоприемник, как правило, насыщается при попадании на него мощного излучения, отраженного от оптического разъема или торца волокна. При большой мощности лазерного диода к насыщению фотоприемника может привести даже релеевское рассеяние излучения в начале волокна. Эффект насыщения проявляется в виде ограничения амплитуды импульса и увеличения ширины верхушки импульса за счет времени, необходимого для освобождения $p - n$ перехода от накопленного заряда [3]

2.5 Ложные сигналы

При наличии в ВОЛС двух и более сильно отражающих близко расположенных элементов возможны многократные отражения от каждой пары сильно отражающих элементов. Вследствие таких отражений на рефлектограмме наблюдаются ложные сигналы («духи»).

Рассмотрим прохождение зондирующего импульса через участок оптического волокна с двумя сильно отражающими стыками ОС-1 и ОС-2 (рис. 16).

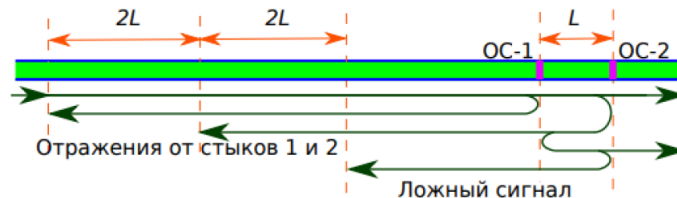


Рис. 15: . Формирование ложного сигнала рефлектометра при наличии двух отражающих элементов ВОЛС

Происходит три последовательных отражения - от стыка 2, стыка 1 и снова от стыка 2. Амплитуда ложного сигнала значительно меньше амплитуд сигналов от реальных отражающих стыков.

Наблюдение ложных сигналов также возможно при установке на рефлектометре значения длин меньше, чем длина измеряемого волокна. В данном случае появление ложных сигналов связано с тем, что прибор посылает первоначальный импульс раньше, чем успевает возвратиться предыдущий. В результате на приемник одновременно поступят два импульса, отраженные от разных участков волокна. При этом ложный импульс отображается ближе к началу рефлектограммы [3].

3 Результаты измерений и обработка данных

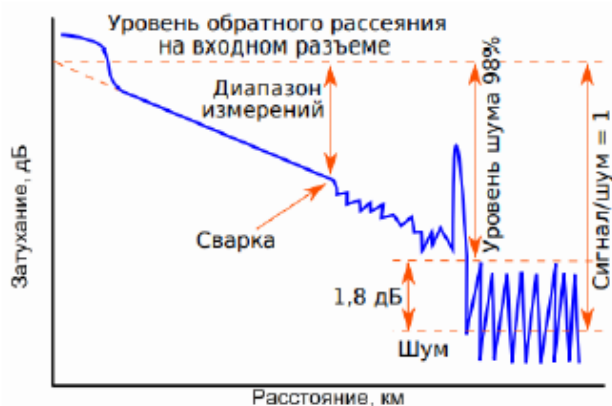
В работе используются: оптический рефлектометр; катушки оптоволокон SMF, NZDSF, PSCF по 5 км; сварки оптоволокон с коннекторами LC/UPC; оптические соединители LC/UPC; намотки оптоволокон различного диаметра и количества витков.

3.1 Определение динамического диапазона

Дальность работы рефлектометра определяется динамическим диапазоном (ДД). Динамический диапазон зависит от отношения максимальной мощности рассеянного сигнала к уровню (мощности) шума. Увеличить динамический диапазон можно, увеличивая мощность рассеянного излучения, уменьшая уровень шума, или и то, и другое одновременно. Динамический диапазон (D_R , [дБ]) рефлектометра рассчитывается по следующей формуле:

$$D_R = 5 (\lg S_0 - \lg S_n)$$

где S_0 — мощность рассеянного сигнала (измеряется от начала рефлектограммы), S_n — уровень шума. Мощность сигнала S_0 однозначно определена и может быть измерена по рефлектограмме (рис. 5), уровень шума может быть определен как среднеквадратичный уровень шума или шум по уровню 98%. В первом случае S_n определяется как среднеквадратичное значение шума, поэтому его еще называют уровнем шума при $\text{SNR} = 1$. Этот уровень равен стандартному отклонению при гауссовой статистике шума. Шум по уровню 98% определяется так, чтобы на оцифрованной рефлектограмме в 98% случаев оцифрованное значение лежало ниже заданного уровня и только в 2% случаев - выше. 98% уровень шума лежит на 1,8 дБ выше среднеквадратичного уровня шума (рис. 6).



В ходе лабораторной работы были определены фактические значения ДД для импульса $\tau = 20$ для $\lambda = 1310$ $D_R=10,1$ дБ для $\lambda = 1550$ $D_R=7,7$ дБ. Паспортное значение динамического

ческого диапазона для рефлектометра Anritsu MT9085A-063-010-037-ES210 - 39/37,5 Дб. Отличие паспортного и фактического значений вызвано тем что измерения проводились при $\tau = 20$, а в характеристиках рефлектометров динамический диапазон указан с учетом использования импульса максимальной ширины.

3.2 Потери мощности на коннекторах и погонное затухание

Оптический рефлектометр - это измерительный прибор, предназначенный для определения расстояния до неоднородностей показателя преломления оптического волокна и измерения потерь в них. Работа OTDR основана на детектировании вернувшихся сигналов вследствие релеевского рассеяния и френелевского отражения.

В ходе диагностики оптического волокна оптический рефлектометр посылает в него мощный зондирующий оптический импульс определенной амплитуды и длительности и измеряет мощность и амплитуду импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр.

Одновременно с подачей зондирующего импульса рефлектометр начинает отсчет времени. Распространяясь по оптическому волокну, импульс сталкивается с различными препятствиями (повреждениями, неоднородностями), от которых происходит отражение части сигнала. Отраженный сигнал распространяется в обратном направлении и время его поступления на вход рефлектометра фиксируется. Те неоднородности показателя преломления, параметры которых (затухание, амплитуда) больше установленных порогов, в рефлектометрии называются события. В свою очередь, события делятся на отражающие (вызванные френелевским отражением) и неотражающие (вызванные релеевским рассеянием).

Ослабление излучения на единицу длины (дБ/км) называется погонным затуханием и зависит от длины волны зондирующего импульса.

Результат измерения рефлектометр представляет в виде графика, называемого рефлектограммой, по оси абсцисс откладывается расстояние, по оси ординат - затухание

В начале рефлектограммы наблюдается пик обратного рассеяния от входного коннектора, имеющий протяженную форму - это так называемая мёртвая зона. Далее могут присутствовать пики, ступеньки вверх и вниз. Заканчивается рефлектограмма шумами прибора. Далее рассматриваются причины возникновения потерь мощности и особенности их проявления на рефлектограмме.

Определим расстояния на которых наблюдаются потери мощности X_i и погонное затухание K_i

погонное затухание	X1, км	X2, км	X3, км
1310 нм	9.8	14.9	19.9
1550 нм	9.8	14.9	19.9

Таблица 2: расстояния на которых наблюдаются потери мощности

погонное затухание	SMF 1310 нм	PSCF 1310 нм	SMF 1550 нм	PSCF 1550нм
K_1 дБ/км	0.33	0.34	0.19	0.19
K_2 дБ/км	0.34	0.33	0.18	0.18
K_3 дБ/км	0.34	0.29	0.19	0.14

Таблица 3: погонное затухание

Используются длины волн 1310 и 1550 нм с соответствующими значениями погонного затухания 0,33 дБ/км и 0,2 дБ/км. Погонное затухание вызвано релеевским рассеяни-

ем и инфракрасным поглощением, является одной из характеристик качества волокна. Полученные данные соответствуют табличным значениям.

По полученной рефлектограмме не наблюдается сварка(ступенька вверх)

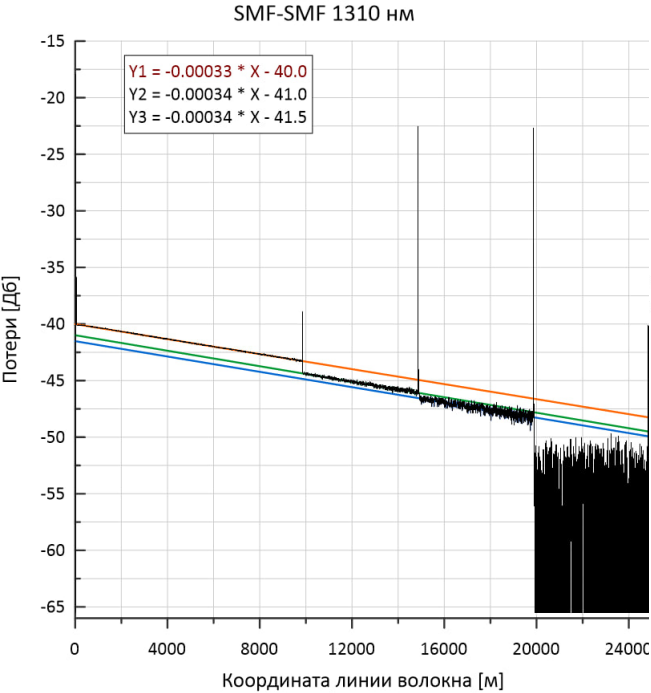


Рис. 16:

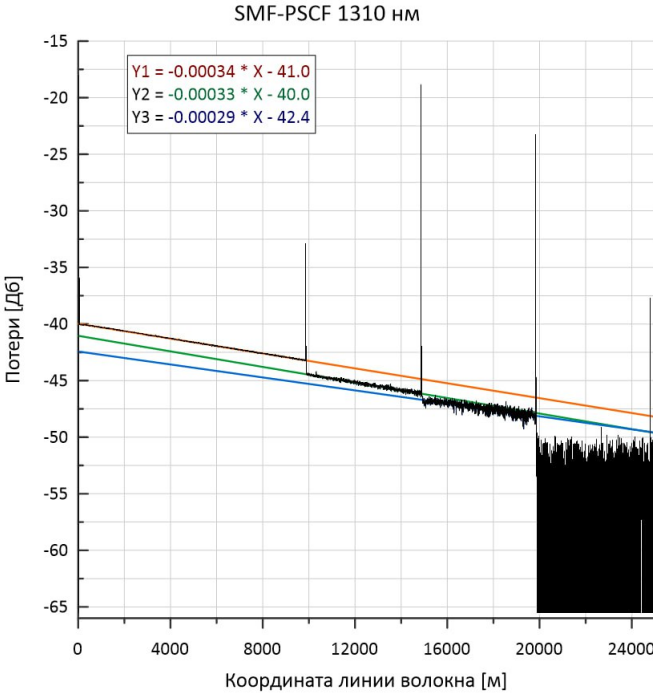


Рис. 17:

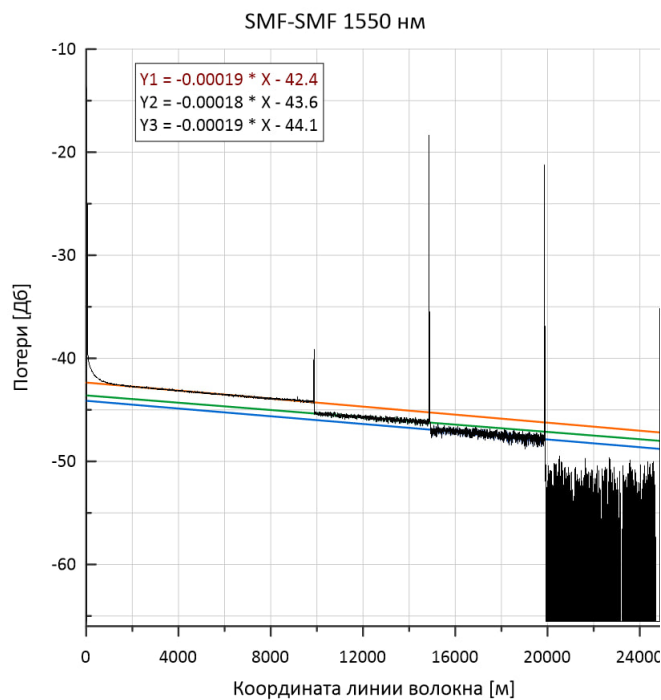


Рис. 18:

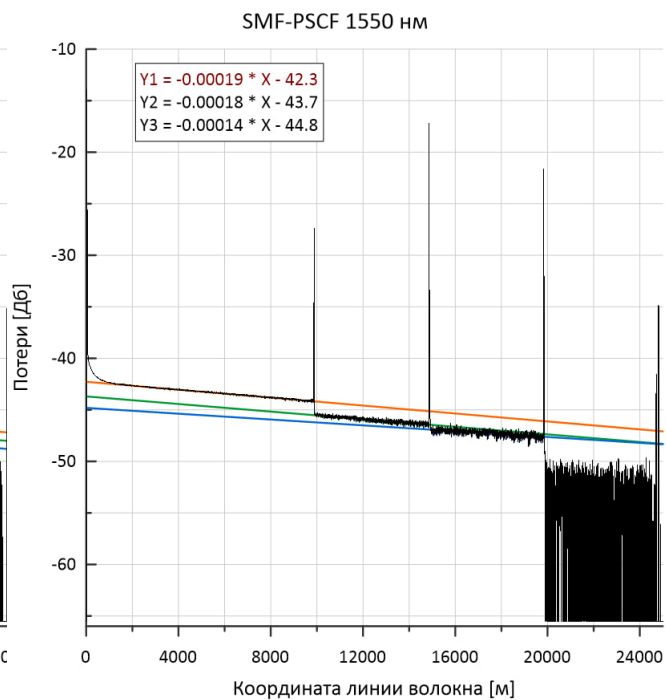


Рис. 19:

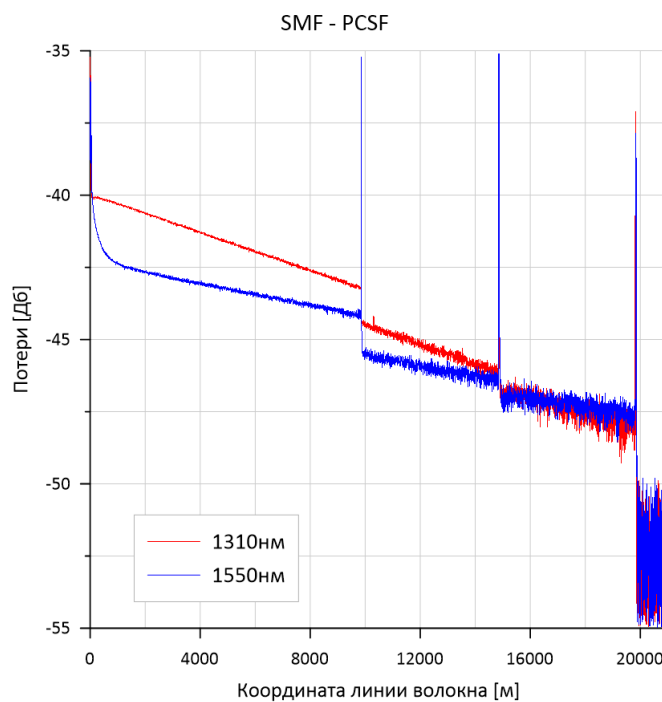


Рис. 20: Нижняя рефлектограмма записана при длине волны 1550 нм, верхняя - 1310 нм

Видно, что угол наклона рефлектограммы при длине волны 1550 нм меньше, чем при длине волны 1310 нм, что связано с меньшим погонным затуханием на длине волны 1550 нм. Оценим погрешности измерения потерь

Сварка одинаковых волокон (ступенька вниз)

Сварное соединение вызывает потери мощности, поскольку возможно наличие цен-

трального рассогласования концов волокон и наличие дефектов в сварном шве. На рефлектограмме сварка двух одинаковых по свойствам волокон проявляется в виде так называемой ступеньки вниз. Сварка с затуханием 0,05 дБ и менее считается хорошей. Если сварка очень хорошая и оба сваренных волокна одинаковые по свойствам, она может быть не видна вообще. Сварное соединение дает меньшее затухание при меньших длинах волн зондирующего импульса. Сварка

	1550нм мощность, дБм	1310 нм мощность, дБм	потери, дБ
1	4,78	4.75	0.03
2	3.44	2.95	0.04
3	3.29	2.79	0.04

Таблица 4: Сварка

Погрешность потерь $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$

3.3 Потери мощности на изгибах оптоволокна

При изгибе волокна возникают потери, связанные с выходом модового пятна за границы оптоволокна. Чем больше длина волны, тем больше диаметр модового пятна и соответственно потери при изгибе. Поэтому на рефлектограммах одного и того же участка схемы, содержащего изгиб, потери мощности (высота ступеньки вниз) будут зависеть от длины волны излучения в рефлектометре. При измерении на 1310 нм изгиб будет проявляться слабее, чем на 1550 нм - именно так можно понять, что это изгиб волокна, а не плохая сварка. Изгибные потери характеризуются критическим радиусом изгиба R при радиусах $r \gg R$ свет проходит участок волокна без заметных потерь, а при $r < R$ свет практически полностью гасится. Измерения потерь производились на двух длинах волн 1310 и 1550 нм для изгибов диаметрами 7, 10, 15 и 20 мм, расположенных на конце второй - начале третьей катушки.

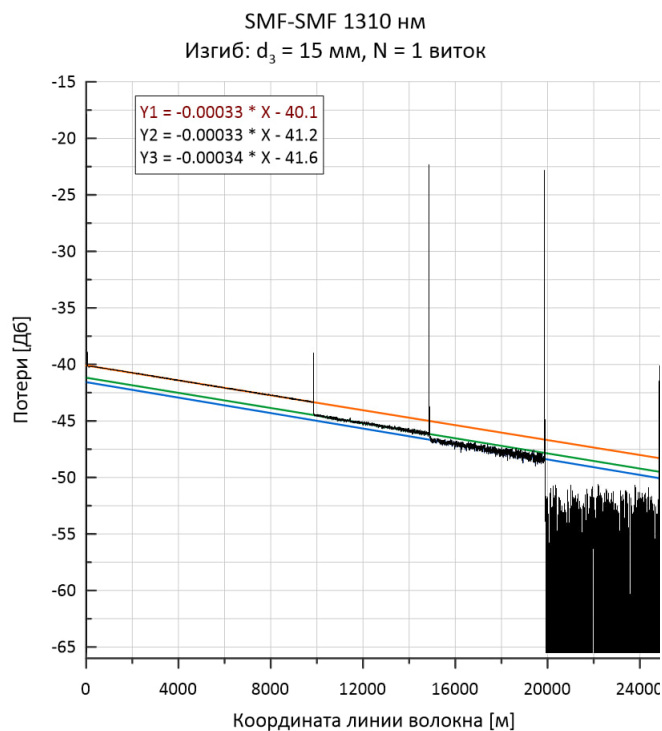


Рис. 21:

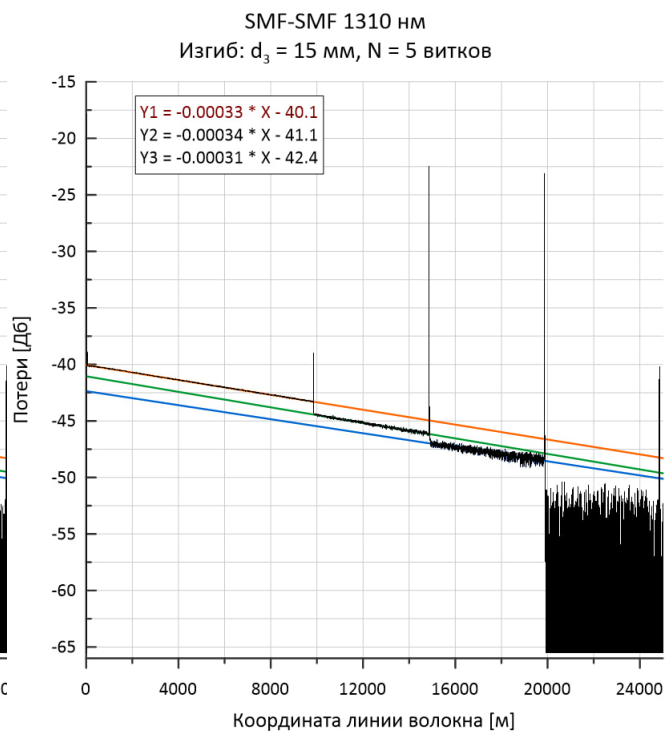


Рис. 22:

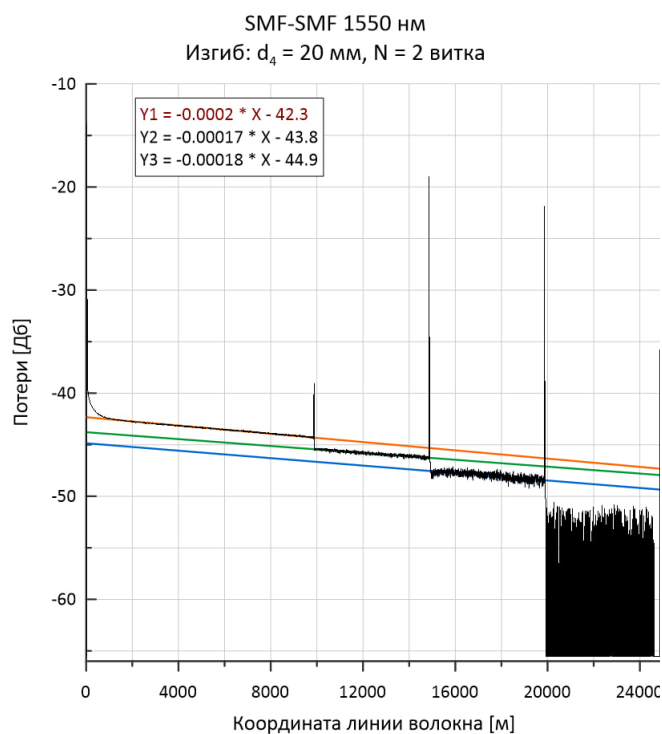


Рис. 23:

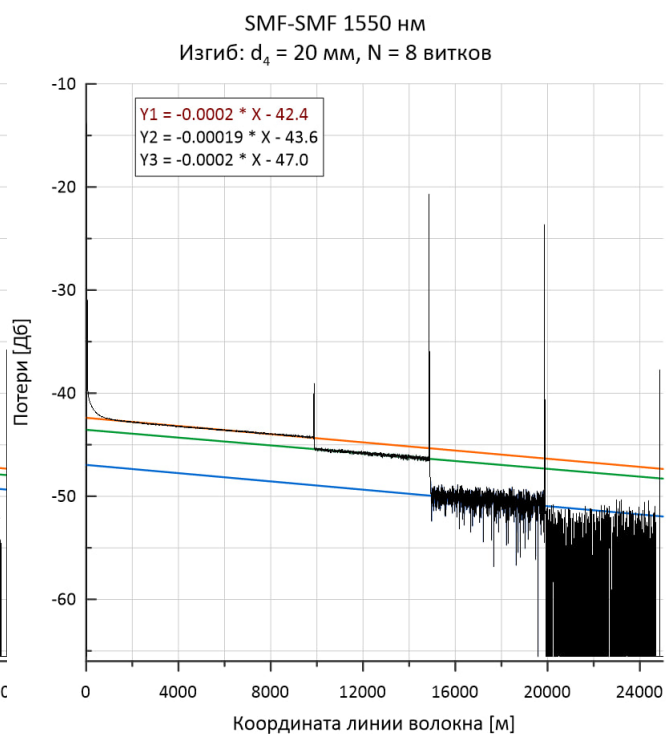


Рис. 24:

Аппроксимируя прямые катушек слева и справа были получены потери вблизи коннектора между второй и третьей катушками. По данным измерения без изгиба получено

значение потерь на коннекторах из-за неидеального соединения и зачистки волокна. Таким образом были найдены дополнительные потери, возникающие из-за изгибов. Потери без изгибов 0,53

D=10мм					
п витков	1	2			
Доп потери	1,4	2,8			
D=15мм					
п витков	1	2	3	4	5
Доп потери	0,05	0,15	0,2	0,3	0,35
D=20мм					
п витков	2	4	6	8	
Доп потери	-0,25	-0,05	-0,1	0,8	

Таблица 5: Дополнительные потери на длине волны 1310 нм

Потери без изгибов 0,67

D=15мм				
п витков	1			
Доп потери	2,05			
D=20мм				
п витков	2	4	6	8
Доп потери	0,5	1,35	1,85	2,9

Таблица 6: Дополнительные потери на длине волны 1550 нм

Зависимость дополнительных потерь на изгибе от количества витков

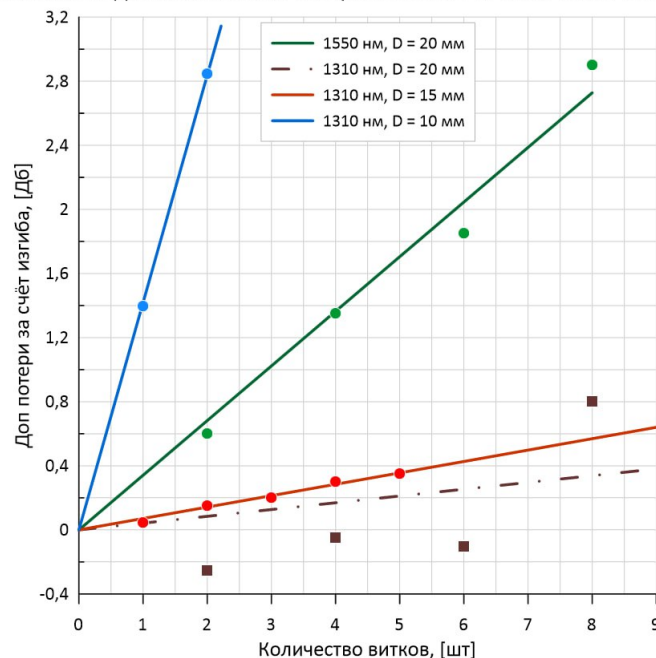


Рис. 25: Зависимость потерь от количества витков при фиксированном радиусе изгиба

На основе значений потерь на коннекторах построен график зависимости потерь от количества витков для изгибов разных диаметров. Как видим при малых потерях, сравнимых с погрешностями, рефлектометр может засекать наоборот прибавления энергии (значения для D=20 мм, при 1310 нм - коричневая прямая). Видим, что зависимость потерь от количества витков при фиксированном радиусе изгиба имеет линейную зависимость.

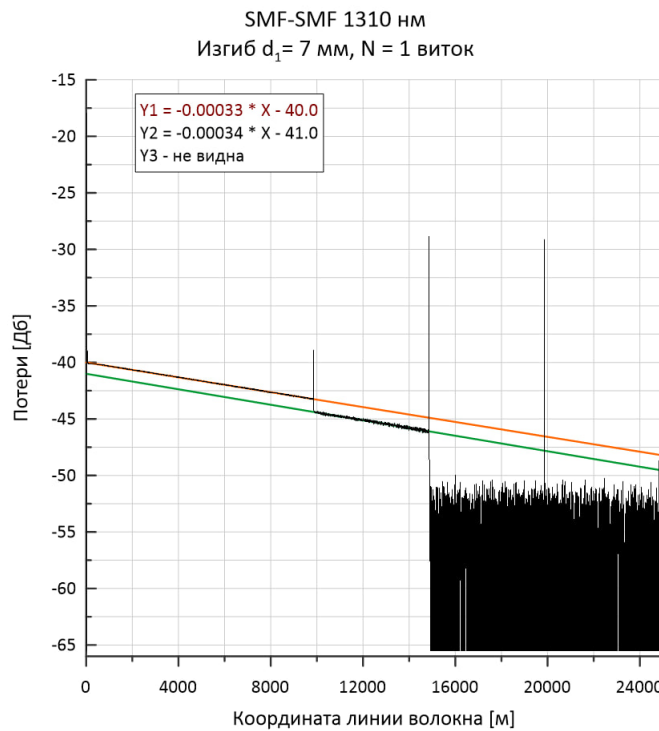


Рис. 26: Измерения потерь для критического радиуса на длине волны 1310 нм

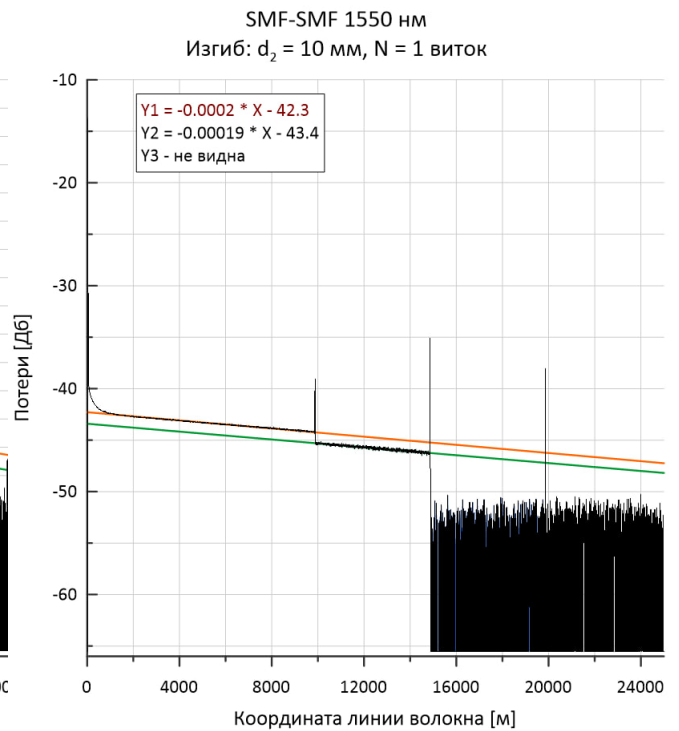


Рис. 27: Измерения потерь для критического радиуса на длине волны 1310 нм

Для радиусов больше критического были проведены измерения потерь при разном количестве витков n , до того момента, пока потери не станут неразличимо малы с погрешностью. При $r < R$ свет практически полностью гасится. Было выявлено, что для длины волны 1310 нм при изгибах < 10 мм свет полностью гасится, поэтому на рефлектограмме не видно третью катушку, следовательно критический радиус $R = 5$ мм. Для длины волны 1550 нм критический радиус составляет более 7.5 мм.

3.4 Мертвые зоны и их зависимость от настройки

Мертвые зоны в рефлектометрии используются для описания пространственного разрешения прибора. Выделяют два типа мертвых зон - мертвая зона для событий (EDZ - event dead zone) и мертвая зона по затуханию (ADZ - attenuation dead zone). Ширина EDZ определяется минимальным разрешимым расстоянием между двумя неоднородностями. EDZ для отражающей и неотражающей неоднородностей показаны на рисунке 26. Ширину EDZ по отражению определяют как полная ширина пика на уровне $1/2$ амплитуды (FWHM - full-width at half-maximum). Ширина мертвой зоны прямо пропорциональна динамическому диапазону, поскольку для обеспечения большего динамического диапазона при тестировании длинных линий требуется более широкий световой импульс.

По шкале рефлектометра уровень $1/2$ амплитуды отражающей неоднородности находится на ниже максимума пика. Ширину мертвой зоны для неотражающей неоднородности определяют по ширине переходного участка, наблюдаемого на рефлектограмме в месте расположения этой неоднородности (рис. 28). При этом полагают, что величина потерь в этой неоднородности < 1 дБ.

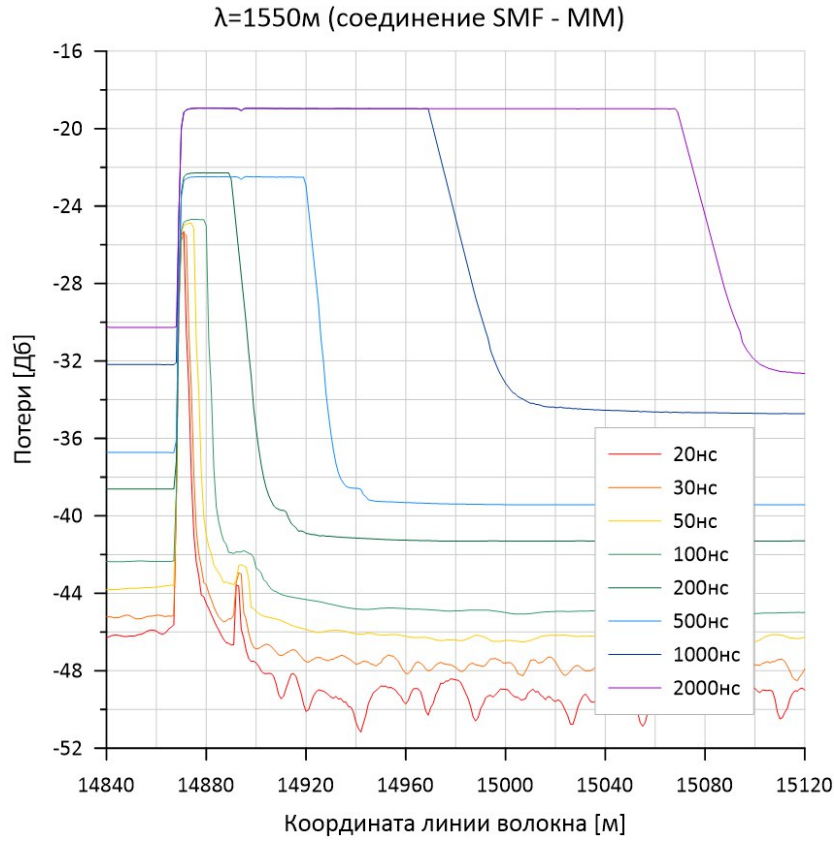


Рис. 28: График зависимости мертвых зоны для отражающей неоднородности для $\lambda = 1550$ нм в зависимости от τ

Проведены измерения рефлектограмм с различной длительностью импульса. Оценены для каждой рефлектограммы ширина мертвой зоны на событии EDZ (коннектор между катушками) и ширина мертвой зоны по затуханию ADZ. Так же на графиках 28, 29, 30 представлена часть рефлектограммы для интересующего события. Из них можно сделать вывод о том что для одной длины волны при увеличении τ мы видим увеличение мертвой зоны (рис. 28). Так же сигнал для двух волн имеет схожий образ, но для $\lambda = 1310$ нм амплитуда отражающей неоднородности меньше чем для $\lambda = 1550$ нм. На рис 29 представлены рефлектограммы для обычного подключения и для рефлектометра подключенного с противоположной стороны оптической схемы.

По рефлектограммам численно оценим ширину мертвой зоны:

λ , нм	τ , нс	EDZ, м	ADZ, м	Amp EDZ, Дб
1310	20	5	6	12
1310	100	12	18	8
1310	1000	104	121	4
1310	2000	198	219	4

Таблица 7: Данные для EDZ и ADZ для $\lambda = 1310$ нм

λ , нм	τ , нс	EDZ, м	ADZ, м	Amp EDZ, Дб
1550	20	5	30	21
1550	30	5	32	20
1550	50	8	34	18
1550	100	13	38	18
1550	200	27	49	16
1550	500	56	78	15
1550	1000	112	142	13
1550	2000	211	239	12

Таблица 8: Данные для EDZ и ADZ для $\lambda=1550$ нм

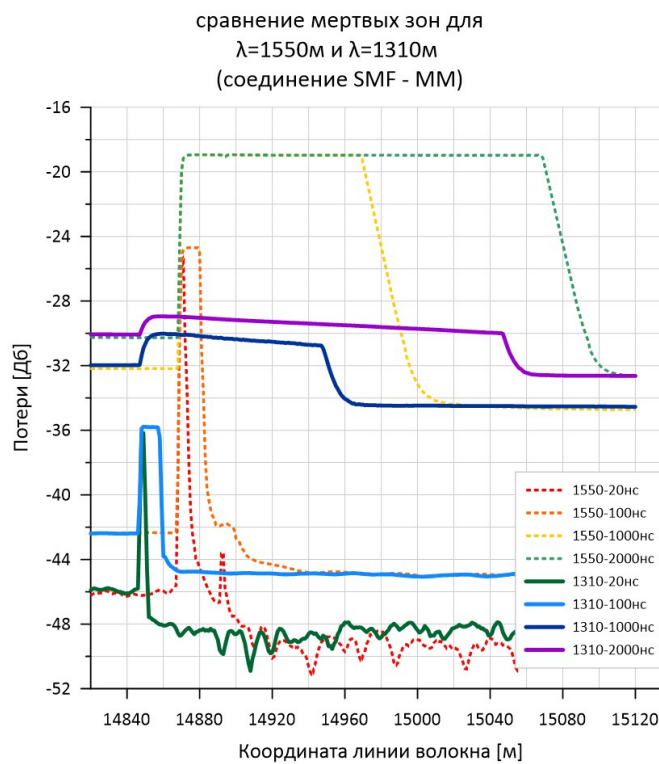


Рис. 29: сравнение для двух длин волн

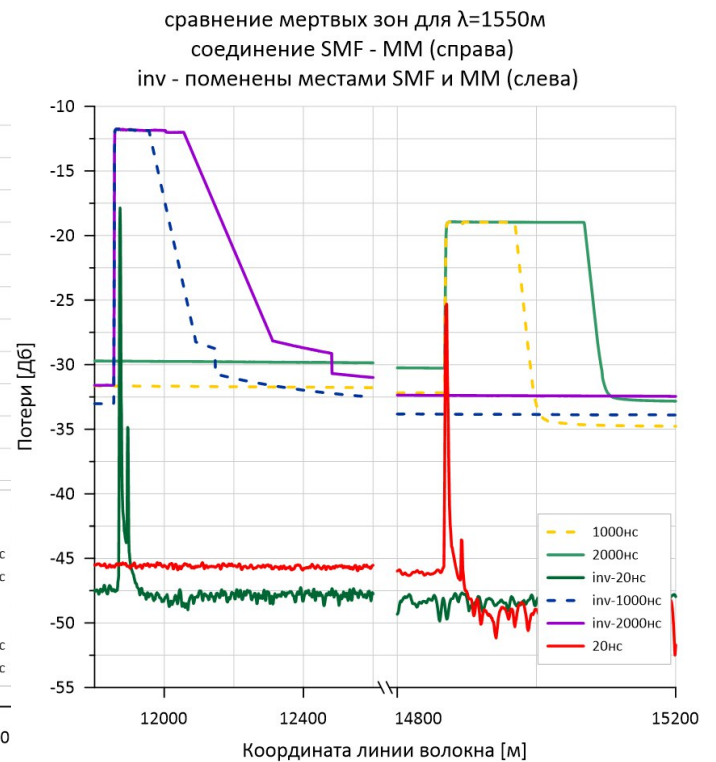


Рис. 30: сравнение двух конфигураций катушек

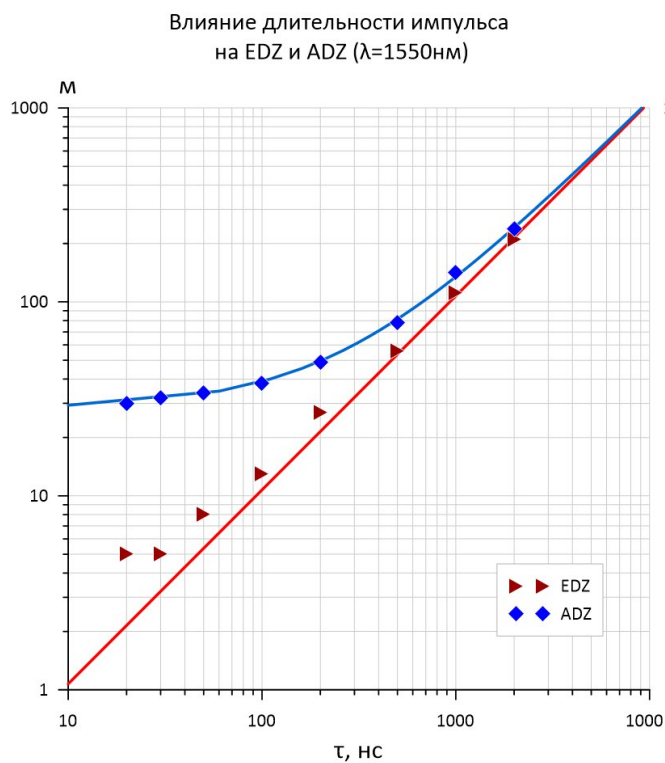


Рис. 31: $\lambda = 1550$

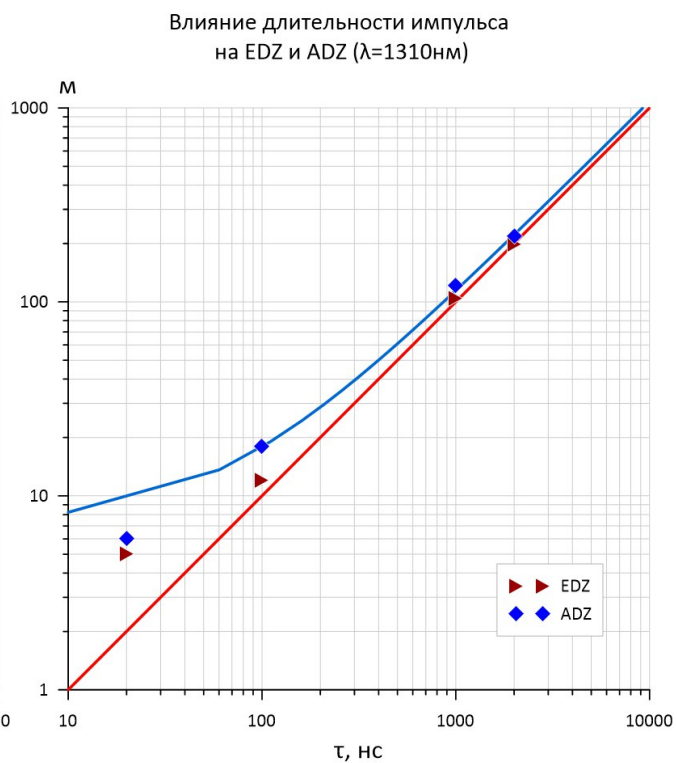


Рис. 32: $\lambda = 1310$

На рис. 31 и 32 показано влияние длительности импульса на EDZ и ADZ. Аппроксимированными линейными зависимостями:

для $\lambda = 1550$ $ADZ = 0.11\tau + 28.25$; $EDZ = 0.11\tau$

для $\lambda = 1550$ $ADZ = 0.11\tau + 7.15$; $EDZ = 0.10\tau$

3.5 Ложные сигналы

При наличии в ВОЛС двух и более сильно отражающих близко расположенных элементов возможны многократные отражения от каждой пары сильно отражающих элементов. Вследствие таких отражений на рефлектограмме наблюдаются ложные сигналы («духи»).

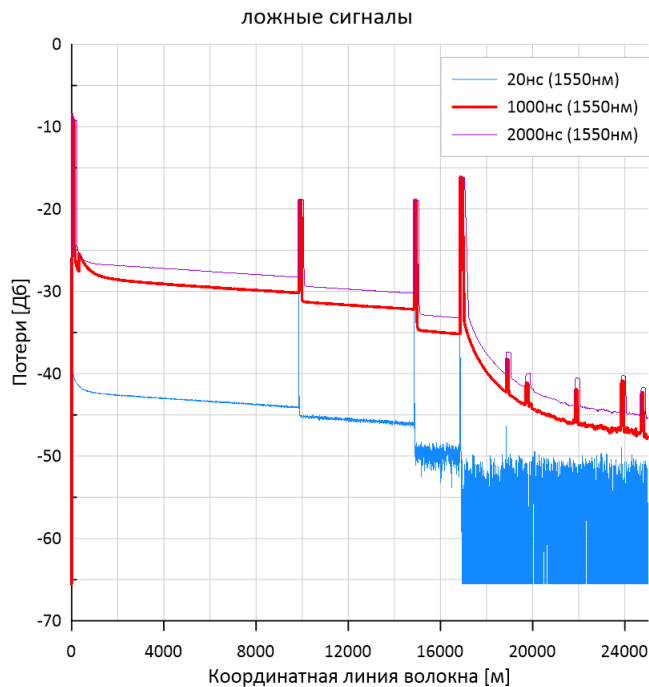


Рис. 33:

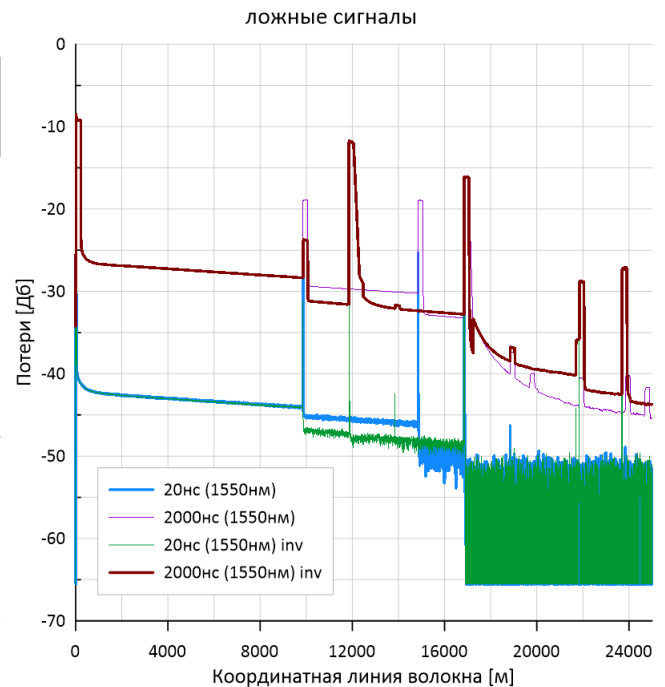


Рис. 34:

Расстояния на которых наблюдаются кажущееся усиление сигнала, отрицательные потери, пик на рефлектограмме - ложные сигналы

Ложные сигналы	X1, км	X2, км	X3, км	X4, км
прямое направление	19	19.9	21.9	23.9
обратное направление	19	19.9	21.9	23.9

Таблица 9: ложные сигналы

При измерении во встречном направлении событие будет трактоваться как оптические потери.

Если точка усиления идентифицирована как коннекторное соединение, выдается сообщение об отражающем событии с отрицательными потерями.

4 Анализ рефлектограмм протяженных оптоволоконных сетей

На основе экспериментальных данных создан анализатор рефлектограмм, способный определять следующие параметры: конец линии волокна, количество и координаты соединения катушек, погонные потери волокна. Программа находит предположительные линии

с наличием изгибов или сварки; оценивает дополнительные потери на коннекторах. Принцип работы основан на "дельта"способе, который заключается в вычислении разницы между следующим и текущим значениями. Для того чтобы определить подозрительные зоны, программа берет среднее значение шума 50 последних значений и сравнивает его со средним значением шума. Если среднее квадратичное отклонение больше 10, то этот участок помечается как конец линии. Кроме того, программа фиксирует количество катушек и координаты их начала, а так же тип каждой катушки и ее коэффициент погонного затухания. Программа численно оценивает потери на коннекторах и динамический диапазон рефлектометра, при помощи линейной аппроксимации катушек. Однако, несмотря на все эти возможности, программа не может точно определить положение сварки, изгиба и ширину мертвой зоны. Тем не менее, она может предоставить достаточно информации для проведения анализа и выявления проблемных участков линии. Покажем работу программы на примере рефлектограммы "1550SMF-PSCF.txt":

Выбор режима 1310 или 1550 нм Длина волны [нм]: 1550 Ширина импульса [нс]: 20
Координата конца линии: 19830 [м]
Количество катушек: 3 Координата начала 1 катушки: 46 [м] Координата начала 2 катушки: 9859 [м] Координата начала 3 катушки: 14878 [м]
Предположительный тип 1 катушки: SMF Погонное затухание 1 катушки: 0.208 Совпадает с табличным значением: 95.8 %
Предположительный тип 2 катушки: SMF Погонное затухание 2 катушки: 0.183 Совпадает с табличным значением: 91.3 %
Предположительный тип 3 катушки: PSCF Погонное затухание 3 катушки: 0.145 Совпадает с табличным значением: 96.3 %
Потери на коннекторе между 1 и 2 катушкой: 4.1 Дб Потери на коннекторе между 2 и 3 катушкой: 1.83 Дб
Динамический диапазон рефлектометра: 6.9

Рис. 35: Результат работы программы

Ознакомится с текстом программы и всеми полученными экспериментальными данными можно по ссылке "<https://github.com/shuvtan/Optovolokno/>"

5 Вывод

- В ходе работы изучены физические основы оптической рефлектометрии, получены практические навыки сборки оптических схем, работы с оптическим рефлектометром и измерения потерь на сварках, коннекторах и изгибах волокна.
- Был измерен динамический диапазон работы рефлектометра равный $D_R=10,1$ Дб
- Найдены значения погонного затухания для волокон SMF и PSCF, для длин волн 1310 и 1550 нм, соответственно 0,33 дБ/км и 0,2 дБ/км, совпадающие с табличными значениями.
- Были найдены дополнительные потери, возникающие из-за изгибов, получена линейная зависимость потерь от количества витков при фиксированном радиусе изгиба, экспериментально найден критический радиус изгиба, при котором свет полностью гасится.
- Оценены для каждой рефлектограммы ширину мертвой зоны на событии EDZ и ширину мертвой зоны по затуханию ADZ. Так же выявлена линейная зависимость ширины мертвой зоны от ширины зондирующего импульса.
- Пронаблюдали эффект ложных сигналов на рефлектограмме.
- На основе экспериментальных данных создан анализатор рефлектограмм, способный определять следующие параметры: конец линии волокна, количество и координаты соединения катушек, погонные потери волокна, потери на коннекторах, а так же динамический диапазон рефлектометра.