

УДК 621.391.64

ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗГИБОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПУТЕМ ОЦЕНКИ УРОВНЯ МОЩНОСТИ ОБРАТНОРАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. О. Зеневич, д. т. н., профессор, ректор

Г. В. Василевский, научный сотрудник

Е. В. Новиков, к. т. н., доцент; директор Института современных технологий связи

Т. А. Матковская, аспирант

УО «Белорусская государственная академия связи»

В статье показана возможность использования способа регистрации обратнорассеянного оптического излучения постоянной мощности для обнаружения изгиба в оптоволокне.

Определены условия применимости рассматриваемого способа обнаружения наличия изгиба. Наиболее сильная зависимость изменения оптических возвратных потерь при изменении диаметра макроизгиба имеет место для одномодовых оптических волокон G652 и G655 и длины волны 1625 нм, а наименьшая – для G657 и длины волны 1310 нм.

В процессе выполнения исследований оценена способность обнаружения дефекта в оптическом волокне, определяемая минимальным значением потери мощности оптического излучения в волокне, которое можно обнаружить. Приведены оценки способности обнаружения дефекта в оптическом волокне от величины мощности источника оптического излучения и пороговой мощности приемника излучения.

Ключевые слова: утечка информации, обратнорассеянное оптическое излучение, изгиб оптического волокна.

ВВЕДЕНИЕ

Для передачи информации в настоящее время широко используются волоконно-оптические линии связи [1], однако при монтаже и в процессе эксплуатации в оптическом волокне могут возникать дефекты различного рода. Эти дефекты приводят к уменьшению скорости передачи данных, а также позволяют создавать каналы утечки информации из волокна. Поэтому необходимо обнаруживать такие дефекты для их последующей ликвидации. Достаточно часто для этого используется метод оптической рефлектометрии, основанный на регистрации обратнорассеянного излучения от оптического импульса, распространяющегося по оптическому волокну [2].

Однако для рефлектометров характерно наличие мертвых зон, не позволяющих обнаруживать дефекты на отдельных участках оптического волокна [3], что особенно важно в начале оптического волокна, где наблюдается достаточно протяженная мертвая зона по затуханию. В связи с этим разработка эффективных способов обнаружения дефектов оптического волокна в мертвой зоне рефлектометров весьма актуальна.

Одним из таких способов является направление в волокно оптического излучения постоянной мощности

и регистрация вызванного им в этом волокне обратнорассеянного излучения. Однако возможности практического применения такого способа в настоящее время недостаточно изучены. Поэтому целью данной статьи является оценка возможности использовать способ регистрации обратнорассеянного оптического излучения, вызванного распространением по волокну излучения постоянной мощности, для обнаружения дефектов и каналов утечки информации в оптическом волокне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые и широко применяемые в оптических кабелях оптические волокна G651 (многомодовое), G652, G655 и G657 (одномодовые).

На рис. 1 показана структура экспериментальной установки, используемой для проведения исследований. Установка включает источник оптического излучения, набор оптических волокон, оптоэлектронный преобразователь, разветвитель, формирователь изгиба и оптический тестер. Обработка данных выполняется компьютером со специализированным программным обеспечением.

Длины волн оптического излучения источника И соответствуют «окнам прозрачности» оптических волокон и могут принимать значения 850, 1300, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Длины волн 850 и 1300 нм применяются для исследования многомодового волокна, а 1310, 1490, 1550 и 1625 нм – для одномодового волокна, что обусловлено применением этих длин волн при трансляции данных по волокну. Мощность оптического излучения для каждой из этих длин волн может изменяться в пределах от -3 до 10 дБм.

Оптическое излучения от источника И поступает на один из входов оптического разветвителя Р и далее направляется в оптическое волокно ОВ2. Длина оптического волокна может меняться в пределах от 1 до 100 м, что соответствует протяженности мертвых зон современных рефлектометров. В волокне ОВ2 при распространении излучения источника И происходит обратное рассеяние этого излучения. Также на входе ОВ2 происходит отражение этого излучения от границы раздела сред. Отметим, что одна из сред – это сердцевина волокна, а другая – воздух. Обратнорассеянное излучение поступает на вход оптического разветвителя Р, затем часть этого излучения подается через оптическое волокно ОВ3 на оптоэлектронный преобразователь ОЭП. Разветвитель делит поступающее излучения на две части с равной величиной мощности в каждой из этих частей. Таким образом, на оптоэлектронный преобразователь ОЭП поступает половина мощности обратнорассеянного излучения.

Оптоэлектронный преобразователь трансформирует поступающее на его вход оптическое излучение в электрический сигнал, который оцифровывается и далее обрабатывается компьютером К. Специализированное программное обеспечение позволяет определять мощность оптического излучения по величине электрического сигнала ОЭП.

Отметим, что источник И и оптоэлектронный преобразователь ОЭП входят в состав поверенного и калиброванного оптического тестера ОТ 3-1.

На волокне ОВ2 помещается механический формирователь Ф, который создает изгиб волокна в виде окружности.

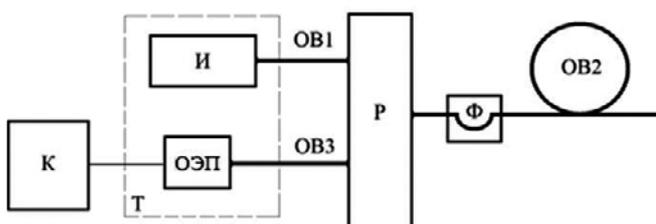


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки
 И – источник оптического излучения; ОВ1, ОВ2 и ОВ3 – оптические волокна; ОЭП – оптоэлектронный преобразователь; Р – разветвитель; К – компьютер; Ф – формирователь изгиба; Т – оптический тестер

При проведении измерений часть оптического излучения, распространяющегося по волокну ОВ2, возвращалась назад к разветвителю Р. Для исследуемых мощностей этот процесс в основном обусловлен отражением излучения в конце волокна ОВ2 от границы раздела двух сред. Оптическое излучение, распространяющееся в волокне ОВ2, как в прямом, так и в обратном направлении, затухает. Поэтому в ходе исследований определялись оптические возвратные потери D_s по следующей формуле:

$$D_s = 10 \lg \left(\frac{2P_{об}}{P_{вх}} \right), \quad (1)$$

где $P_{об}$ – мощность оптического излучения, поступающего на оптоэлектронный преобразователь ОЭП, $P_{вх}$ – мощность оптического излучения источника И. При вычислении D_s мощность $P_{об}$ увеличивалась в два раза для учета того, что разветвитель делит поступающее излучения пополам.

В процессе выполнения исследований определялась способность Δ обнаружения дефекта в оптическом волокне. Величина Δ определяет минимальное значение потери мощности оптического излучения в волокне, которое можно обнаружить. Для определения Δ используем следующую формулу:

$$\Delta = 10 \lg (1 - 10^{-0,1(P_{об} - P_n)}), \quad (2)$$

где P_n – пороговая мощность приемника излучения. Величины $P_{об}$ и P_n в выражении (2) должны иметь размерность децибел-милливатт.

Отметим, что при $P_{об} = P_n$ значение Δ становится равным нулю. Это значит, что при выполнении условия $P_{об} \leq P_n$ дефекты обнаружить нельзя.

Значение $P_{об}$ определяется следующим образом:

$$P_{об} = P_0 + 2\alpha L + K + R, \quad (3)$$

где P_0 – мощность оптического излучения, поступающего на вход оптического волокна, α – коэффициент затухания оптического излучения в волокне, L – протяженность оптического волокна ОВ2, K – коэффициент, учитывающий потери в разветвителе Р, R – коэффициент отражения оптического излучения от границы раздела сред. В выражении (3) мощность P_0 определяется в децибел-милливаттах, а все другие величины – в децибелах.

Измерение затухания мощности оптического излучения в волокне ОВ2 осуществлялась по методике работы [4] с использованием оптического тестера ОТ-3-1.

Измерения выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 при условиях окружающей среды: температура 20–25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление 975–1025 гПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе проведения исследований определялась зависимость оптических возвратных потерь $D_{\text{в}}$ от диаметра изгиба оптического волокна d . На рис. 2 показаны полученные зависимости для одномодового оптического волокна G655 и длины волны $\lambda = 1310$ нм, а также многомодового оптического волокна G651 и $\lambda = 1300$ нм. Отметим, что для других длин волн и исследуемых оптических волокон поведение зависимости $D_{\text{в}}$ от d было аналогичным. Протяженность оптического волокна составляла 1 м. В этом случае потерей мощности оптического излучения вне диаметра изгиба волокна и обратным рассеянием можно пренебречь.

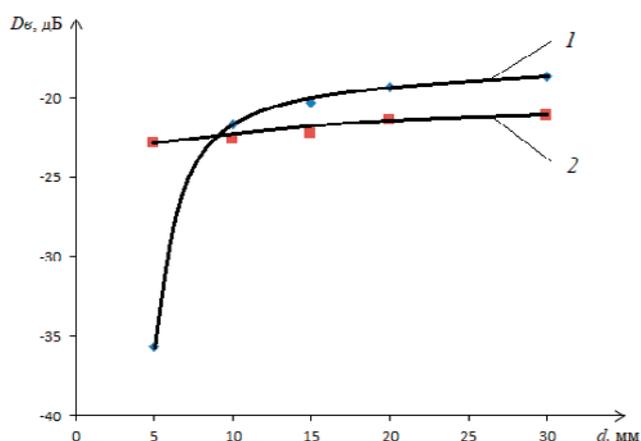


Рисунок 2 – Зависимость оптических возвратных потерь $D_{\text{в}}$ от диаметра изгиба оптического волокна d

1 – одномодовое оптическое волокно G655 ($\lambda = 1310$ нм),
2 – многомодовое оптическое волокно G651 ($\lambda = 1300$ нм)

Увеличение диаметра изгиба приводило к линейному росту величины $D_{\text{в}}$ для многомодового оптического волокна. Для одномодового волокна также происходит увеличение оптических возвратных потерь: при небольших диаметрах наблюдается резкое возрастание $D_{\text{в}}$, а при $d > 15$ мм рост замедляется.

Для оценки зависимости $D_{\text{в}}$ от диаметра изгиба использовалась величина $\Delta D_{\text{в}}/\Delta d$, где Δd – изменение диаметра в исследуемом интервале d от 5 до 30 мм, $\Delta D_{\text{в}}$ – соответствующее изменение оптических возвратных потерь. Выбор такого интервала диаметров изгиба обусловлен тем, что при $d < 5$ мм может произойти излом оптического волокна, а для $d > 30$ мм наличие изгиба не оказывало влияние на потерю мощности оптического излучения в волокне.

Увеличение длины волны приводило к росту величины $\Delta D_{\text{в}}/\Delta d$ для одномодовых оптических волокон. Наибольшее значение $\Delta D_{\text{в}}/\Delta d = 1,30$ дБ/мм было получено для одномодовых оптических волокон G652, G655 и длины волны 1625 нм, а наименьшая $\Delta D_{\text{в}}/\Delta d = 0,50$ дБ/мм – для G657 и длины волны 1310 нм. Таким образом, более сильная зависимость

$D_{\text{в}}$ от диаметра изгиба наблюдалось для длины волны 1625 нм для всех исследуемых одномодовых оптических волокон. Для многомодового волокна отношение $\Delta D_{\text{в}}/\Delta d$ составило 0,07 дБ/мм для обеих длин волн (850 и 1300 нм).

В процессе исследований были определены коэффициенты, учитывающие потери в разветвителе P и отражение оптического излучения от границы раздела сред. Значения этих коэффициентов являлись одинаковыми для всех исследуемых длин волн и составляли $K = -3$ дБ и $R = -15$ дБ.

Также определены величины Δ для исследуемых длин волн оптического излучения. Эта величина была получена для мощности оптического излучения $P_0 = 0$ дБм, поскольку источники оптического излучения с такой мощностью достаточно часто используются в рефлектометрах и системах передачи данных. Коэффициент затухания оптического излучения в оптическом волокне α был выбран -0,4 дБ/км для одномодового волокна и -3,5 дБ/км для многомодового волокна. Это наибольшие значения коэффициента α для современных одномодовых и многомодовых оптических волокон, соответствующие длинам волн излучения, на которых транслируются данные. Пороговая мощность приемника рефлектометра принята равной -30 дБм. Приемники с такой пороговой мощностью достаточно часто применяются в рефлектометрах и в системах передачи данных. Для протяженности оптического волокна 100 м наблюдалось наименьшее значение величины $\Delta = -0,29$ дБ для одномодовых оптических волокон, $\Delta = -0,32$ дБ для многомодового оптического волокна.

На рис. 3 показаны зависимости способности обнаружения дефекта Δ в оптических волокнах G651 и G655 от величины мощности источника оптического излучения, рассчитанная по формуле (2) с учетом полученных экспериментальных данных.

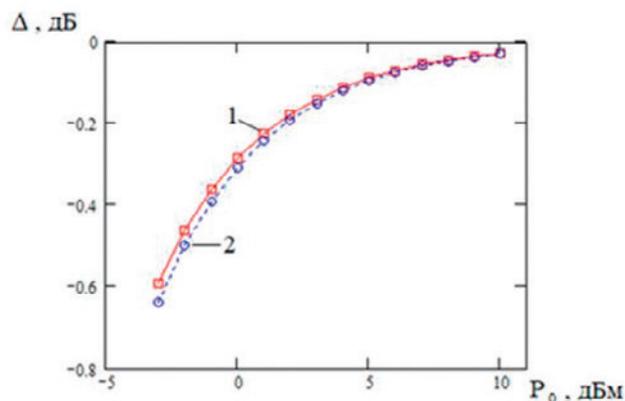


Рисунок 3 – Зависимость способности обнаружения дефекта Δ в оптическом волокне от величины мощности источника оптического излучения P_0

1 – оптическое волокно G655 ($\lambda = 1310$ нм),
2 – оптическое волокно G651 ($\lambda = 1300$ нм)

Данные, представленные на рис. 3, получены для протяженности оптического волокна 100 м.

Увеличение мощности источника оптического излучения рефлектометра приводит к росту способности обнаружения дефекта в оптическом волокне, т.к. чем выше мощность источника, тем большая часть мощности выводится из волокна в зоне дефекта и тем проще этот дефект обнаружить.

На рис. 4 показаны зависимости способности обнаружения дефекта Δ в оптических волокнах G651 и G655 от величины пороговой мощности приемника излучения при протяженности оптического волокна 100 м. Значения коэффициента затухания оптического излучения были теми же, что и для зависимостей, показанных на рис. 3. Мощность оптического излучения на входе ОВ также была выбрана равной $P_0 = 0$ дБм.

Уменьшение пороговой мощности приемника излучения приводит к росту способности обнаружения дефекта Δ в оптическом волокне. При величине пороговой мощности менее -50 дБм значение Δ становится меньше -0,004, что позволяет обнаруживать даже незначительные потери мощности. Это достаточно важно при обнаружении каналов утечки информации из оптического волокна, создаваемых на основе туннелирования излучения. При создании такого канала утечки информации потери мощности оптического излучения в волокне могут достигать -0,004 дБ [6].

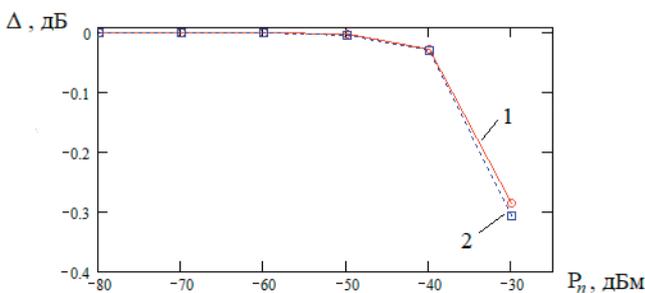


Рисунок 4 – Зависимость способности обнаружения дефекта Δ в оптическом волокне от величины пороговой мощности приемника излучения P_p
 1 – оптическое волокно G655 ($\lambda = 1310$ нм),
 2 – оптическое волокно G651 ($\lambda = 1300$ нм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования способа регистрации обратнорассеянного оптического излучения, вызванного распространением по волокну излучения постоянной мощности, для обнаружения наличия изгибов в этом волокне.

Показано, что наиболее сильная зависимость изменения оптических возвратных потерь при изменении диаметра макроизгиба имеет место для одномодовых оптических волокон G652 и G655 и длины волны 1625 нм.

Приведены оценки способности обнаружения дефекта в оптическом волокне от величины мощности источника оптического излучения и пороговой мощности приемника излучения.

Статья выполнена в рамках проекта БРФФИ «Принципы построения распределенных систем на амплитудных волоконно-оптических датчиках» № договора T22M-002 04.05.2022-31.03.2024.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоргачев, Д. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. – М.: Эко-Тренз, 2002. – 276 с.
2. Листвин, А. В. Рефлектометрия оптических волокон / А. В. Листвин. – М: ЛЕСАРарт, 2005. – 208 с.
3. Методы и средства измерения параметров волоконно-оптических линий: учебник / Н. И. Горлов [и др.] – Караганда.: КарГТУ, 2014. – 293 с.
4. Использование макроизгиба оптоволокна в качестве основы для создания датчика массы / Г. В. Василевский [и др.]. – Изв. вузов. Приборостроение. 2020. – Т. 63. – № 10. – С. 930–937.
5. Гулаков, И. Р. Компоненты волоконно-оптических линий связи: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности магистратуры «Радиофизика» / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Т. М. Мансуров. – Минск: Белорусская государственная академия связи, 2020. – 335 с.
6. Шубин, В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем / В. В. Шубин. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 257 с.

The article shows the possibility of using the method of registration of backscattered optical radiation of constant power to detect the presence of a bend in the optical fiber.

The applicability conditions for the considered method for detecting the presence of a bend are determined. The strongest dependence of the change in optical return loss with a change in the macrobend diameter takes place for single-mode optical fibers G652 and G655 and a wavelength of 1625 nm, and the smallest for G657 and a wavelength of 1310 nm.

In the process of performing research, the ability to detect a defect in an optical fiber was evaluated, which is determined by the minimum value of the optical radiation power loss in the fiber that can be detected. Estimates are given of the ability to detect a defect in an optical fiber as a function of the power of the optical radiation source and the threshold power of the radiation receiver.

Keywords: information leakage, backscattered optical radiation, bending of optical fiber.