

# **Контроль нарушений волоконно-оптических линий в распределенных информационно- вычислительных сетях методами интегральной рефлектометрии и прямого детектирования**

**К. И. Балашов, В. В. Шубин**

*Представлены результаты разработки способа контроля нарушений волоконно-оптических линий в распределенных информационно-вычислительных сетях методами интегральной рефлектометрии и прямого детектирования. Показано, что недостаток оптической рефлектометрии во временной области – слабый сигнал обратного рассеяния – можно устранить, используя метод интегральной рефлектометрии. Для повышения надежности и быстродействия предлагается одновременное использование методов интегральной рефлектометрии и прямого детектирования в одном устройстве контроля. Приведены расчет параметров и структурная схема предлагаемого устройства.*

## ***Введение***

В современных распределенных волоконно-оптических информационно-вычислительных сетях большое внимание уделяется надежности их функционирования. Для этого необходимо своевременно обнаруживать и реагировать на нарушения волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), вызванные различными причинами, в т. ч. преднамеренной попыткой отвода сигнала [1]. Поэтому современные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) снабжаются системами мониторинга, которые отслеживают и сигнализируют об изменениях прямых и обратных потерь в оптических волокнах (ОВ). Для оперативного обнаружения нарушений и реагирования используются системы контроля, входящие в состав приемопередающей аппаратуры ВОСП, которые работают непрерывно и круглосуточно. Наиболее важными параметрами систем контроля являются его чувствительность к нарушению ОВ и время реакции на нарушение. Современные алгоритмы контроля построены на методе обнаружения и выделения детерминированных сигналов на фоне случайных помех, разработанном достаточно давно [2]. Общие принципы и алгоритмы работы систем контроля методом прямого детектирования были описаны в работе [3]. Для обнаружения нарушений ОВ помимо метода прямого детектирования существует метод оптической

рефлектометрии [4]. Традиционный метод оптической рефлектометрии во временной области (Optical Time Domain Reflectometer – OTDR) для систем контроля до последнего времени практически не применялся из-за его инерционности. Метод интегральной рефлектометрии позволяет анализировать обратнорассеянный сигнал без его накопления. Вопросу анализа и использования обоих методов в системах контроля нарушений ОВ посвящена настоящая статья.

### Анализ методов обнаружения нарушений

Сравним два метода обнаружения нарушений ОВ – метод прямого детектирования и OTDR. Обобщенная структурная схема системы контроля методом прямого детектирования представлена на рис. 1. Контрольный оптический сигнал, сформированный оптическим передатчиком ОПДК, суммируется с помощью WDM (Wavelength Division Multiplexing – спектральное уплотнение каналов) мультиплексора MUX с информационным оптическим сигналом (сигналами), поступающим от оптического передатчика ОПДИ. Информационные и контрольные оптические сигналы передаются на различных рабочих длинах волн. После этого суммарный оптический сигнал через замкнутый оптический переключатель (ОП) передается по ОВ на заданное расстояние и демультиплексируется по длинам волн с помощью WDM демультиплексора DEM.

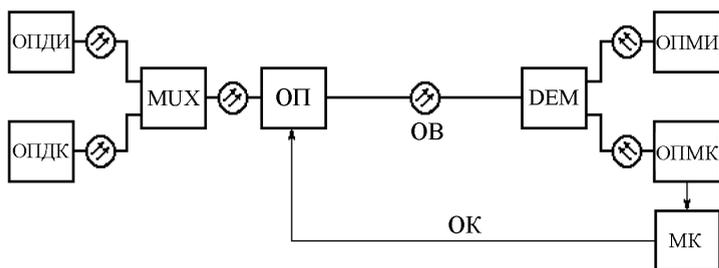


Рис. 1. Структурная схема системы контроля методом прямого детектирования

Информационные оптические сигналы поступают на оптический приемник ОПМИ, а контрольные – на оптический приемник ОПМК, где они преобразуются в электрические сигналы и усиливаются. Контрольный сигнал поступает на микроконтроллер (МК), где происходит его аналого-цифровая обработка (АЦП) и дальнейшая обработка по специальному алгоритму [3]. В случае обнаружения нарушения МК по обратному каналу ОК с помощью ОП отключает передачу оптических сигналов.

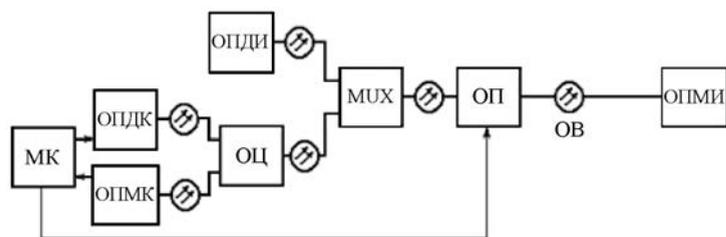


Рис. 2. Структурная схема системы контроля методом оптической рефлектометрии во временной области

Обобщенная структурная схема системы контроля методом оптической рефлектометрии во временной области представлена на рис. 2.

МК формирует периодические зондирующие сигналы, которые поступают на оптический передатчик ОПДК, где преобразуются в оптические сигналы. После этого сигналы через оптический циркулятор (ОЦ) передаются

на вход WDM мультиплексора MUX, где складываются с информационными оптическими сигналами, поступающими от передатчика ОПДИ. Информационные и контрольные оптические сигналы передаются на различных рабочих длинах волн. Суммарный оптический сигнал через оптический переключатель ОП поступает в ОВ. Информационные оптические сигналы поступают на вход приемника ОПМИ, а обратнорассеянное от контрольных импульсов излучение через ОП, MUX и ОЦ попадает на вход приемника ОПМК. Приемник преобразует оптический сигнал в электрический и усиливает его. Обратнорассеянный сигнал поступает на МК, где обрабатывается по специальному алгоритму (формируется рефлектограмма). В случае обнаружения на рефлектограмме локального дефекта МК с помощью ОП отключает передачу оптических сигналов.

OTDR измеряет непосредственно прямые потери на локальном дефекте, вызванном нарушением ОВ, а метод прямого детектирования измеряет изменение коэффициента передачи между оптическими полюсами ВОЛП, по которому делается вывод о появлении локального дефекта. Для метода прямого детектирования обязательно требуется обратный канал, для OTDR такой канал не нужен. Точность измерения методом прямого детектирования зависит от стабильности мощности контрольного сигнала, OTDR сразу измеряет относительную величину потерь и поэтому не зависит от стабильности источника излучения. К единственному недостатку метода оптической рефлектометрии во временной области следует отнести низкий уровень мощности обратнорассеянного излучения и связанную с этим высокую инерционность, обусловленную необходимостью накопления сигнала длительное время. Для устранения этого недостатка, как уже отмечалось, может быть использован метод интегральной рефлектометрии.

### ***Сравнение метода интегральной рефлектометрии и OTDR***

Метод интегральной рефлектометрии отличается от обычной OTDR рефлектометрии тем, что длительность зондирующего импульса выбирается большей или равной удвоенному времени распространения излучения в тестируемом волокне [5] и регистрируется обратнорассеянное излучение не с началом зондирующего импульса (передним фронтом), а с его окончанием (задним фронтом) [6]. Энергия зондирующего импульса максимальна, и, соответственно, максимальна мощность обратнорассеянного сигнала, что позволяет сократить время обработки и принятия решения.

Составляющая коэффициента затухания ОВ, обусловленная рэлеевским рассеянием в ОВ, хорошо интерполируется формулой, дБ/км [7]:

$$\alpha_{rel} = K_{rel} \lambda^{-4}, \quad (1)$$

где  $K_{rel} = 0,8 \text{ мкм}^4 \text{ дБ/км}$ ;  $\lambda$  – рабочая длина волны, мкм.

С одной стороны, чем больше значение потерь на рэлеевское рассеяние, тем больше мощность обратнорассеянного излучения. Но при этом необходимо учитывать, что при прохождении сигнала по ОВ мощность излучения падает пропорционально коэффициенту затухания в волокне. Увеличение коэффициента затухания приводит к большему динамическому диапазону, который необходимо обеспечить. В табл. 1 приведены потери на рэлеевское рассеяние, коэффициент затухания и динамический диапазон для длины ОВ 100 км и длин волн 1310, 1550 и 1625 нм. Из таблицы следует, что наименьший динамический диапазон достигается при использовании длин волн 1550 и 1625 нм. Кроме того, прямые потери на локальных дефектах увеличиваются при

увеличении длины волны [8]. Поэтому для рефлектометрии целесообразно использование длин волн на участке С диапазона (от 1530 до 1565 нм) и L-диапазона (от 1565 до 1625 нм).

Таблица 1

Параметры оптических волокон длиной 100 км в зависимости от длины волны

Длина волны $\lambda$ , нм	Потери на рэлеевское рассеяние $\alpha_{rel}$ , дБ/км	Коэффициент затухания $\alpha$ , дБ/км	Динамический диапазон $D$ , дБ
1310	0,27	0,40	40
1550	0,14	0,25	25
1625	0,11	0,20	20

В ОВ только часть рассеянного излучения канализируется сердцевинной и распространяется вдоль волокна в направлении входного торца. Величину обратнорассеянного излучения можно оценить с помощью коэффициента  $G$  – отношения мощности, распространяющейся в ОВ в обратном направлении, к мощности, соответствующей полным потерям, который может быть вычислен по формуле, дБ [8]:

$$G = 10 \lg \left( \frac{\ln(10)}{10} S \alpha_{rel} \Delta x \right), \quad (2)$$

где  $S$  – фактор обратного рассеяния, отн. ед.;  $\alpha_{rel}$  – потери на рэлеевское рассеяние, дБ/км;  $\Delta x$  – длина участка ОВ, с которого собирается обратное рассеяние, км.

Для одномодового ОВ фактор обратного рассеяния вычисляется по формуле [8], отн. ед.:

$$S = \left( \frac{NA}{n} \right)^2 / 4,55, \quad (3)$$

где  $NA$  – числовая апертура волокна (для SMF-28 на  $\lambda = 1550$  нм  $NA = 0,128$ );  $n$  – показатель преломления сердцевинной ОВ (для SMF-28 на  $\lambda = 1550$  нм  $n = 1,4504$ ).

Длина участка ОВ, с которого собирается обратное рассеяние и длительность зондирующего импульса взаимосвязаны формулой [4], км:

$$\Delta x = \frac{\tau_n c}{2n}, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, км/с.

Как показывает практика, использование в расчетах формулы (4) для вычисления коэффициента обратного рэлеевского рассеяния возможно лишь при небольших  $\Delta x$  и  $\tau_n$ , не превышающих типовых значений для OTDR рефлектометрии. Как правило, в OTDR применяются импульсы длительностью не более 20 мкс [9], что соответствует длине участка ОВ, с которого собирается обратное рассеяние в 2 км. Как ранее отмечалось, в интегрирующих рефлектометрах длительность импульса соответствует удвоенной длине линии. При таких значениях длительностей зондирующих импульсов длина участка ОВ, с которого собирается обратное рассеяние, будет равна эффективной длине волокна, расчет которой ведется по формуле [10], км:

$$L_{eff} = \alpha^{-1} (1 - e^{-\alpha L}), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\text{км}^{-1}$ ;  $L$  – физическая длина ОВ, км.

График зависимости эффективной длины ОВ от физической для различных длин волн приведен на рис. 3 (см. также цветную вкладку) [11].

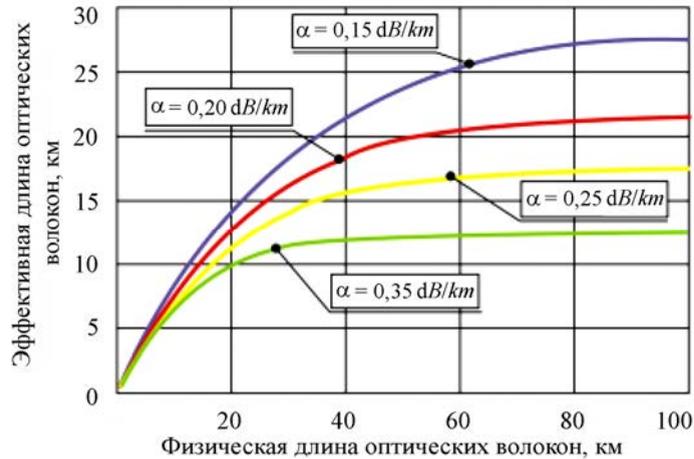


Рис. 3. График зависимости эффективной длины оптических волокон от их физической длины

Таким образом, формула для вычисления коэффициента обратного рэлеевского рассеяния для метода интегральной рефлектометрии примет вид, дБ:

$$G = -13 + 10 \lg \left[ (NA/n)^2 \alpha_{rel} L_{eff} \right]. \quad (6)$$

Результаты расчета длительности зондирующего импульса  $\tau_{и}$ , эффективной длины ОВ  $L_{eff}$ , коэффициента обратного рассеяния  $G$  при интегральной рефлектометрии для длины волны 1550 нм в зависимости от физической длины ОВ  $L$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Длительность импульса, эффективная длина оптических волокон, коэффициент обратного рассеяния в зависимости от физической длины оптических волокон для длины волны 1550 нм

Физическая длина оптических волокон $L$ , км	Длительность импульса $t_{и}$ , мкс	Эффективная длина оптических волокон $L_{eff}$ , км	Коэффициент $G$ , дБ
0,1	1	0,1	-52,64
10	100	7,6	-33,77
50	500	16,4	-30,43
100	1000	17,3	-30,20

Для OTDR длительность зондирующего импульса выбирается не в зависимости от физической длины линии, а в зависимости от необходимой точности обнаружения места нарушения. Чем меньше длительность зондирующего импульса, тем выше точность. Как при физической длине

ОВ  $L = 1$  км, так и при  $L = 100$  км при одинаковой точности обнаружения места нарушения длительность зондирующего импульса будет одинакова и, соответственно, значение коэффициента  $G$  будет одинаково  $-52,64$  дБ.

Из табл. 2 видно, что при физической длине линии  $100$  км использование метода интегральной рефлектометрии дает значительное увеличение ( $22,44$  дБ) коэффициента обратного рэлеевского рассеяния, по сравнению с OTDR при длительности импульса  $1$  мкс, что приводит к значительному увеличению мощности обратнорассеянного сигнала.

Расчет мощности на ОПМК производится по формуле [9], дБм:

$$W_r = W_0 - 2\eta - 2L\alpha + G, \quad (7)$$

где  $W_0$  – мощность излучения источника зондирующих импульсов, дБм;  $\eta$  – потери при прохождении света через пассивные оптические компоненты, дБ.

Оценки максимальной и минимальной мощностей сигнала на входном полюсе ОПМК для метода интегральной рефлектометрии для разных мощностей зондирующих импульсов  $W_0$ , коэффициента обратного рассеяния  $G = -30,2$  дБ приведены в табл. 3 для потерь  $\eta = 1,0$  дБ, длины ОВ  $L = 100$  км и коэффициента затухания  $\alpha = 0,25$  дБ/км.

Таблица 3

Мощность на входе ОПМК при разной мощности зондирующего импульса

Мощность $W_0$ , дБм (мВт)	Максимальная мощность $W_{r_{\max}}$ , дБм	Минимальная мощность $W_{r_{\min}}$ , дБм
13,0 (20)	- 19,2	- 69,2
16,0 (40)	- 16,2	- 66,2
19,0 (80)	- 13,2	- 63,2
21,7 (150)	- 10,5	- 60,5
23,0 (200)	- 9,2	- 59,2

Значения максимальной и минимальной мощностей обратнорассеянного сигнала для OTDR будут на  $22,44$  дБ меньше, при тех же значениях мощностей зондирующего импульса.

Важно, чтобы мощность, попадающая на оптический приемник, превышала его порог чувствительности  $P_{\text{пр}}$ . При типичном значении пороговой чувствительности лавинного фотодиода

$10^{-14}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и ширине полосы  $1$  МГц получаем, что  $P_{\text{пр}} = -80$  дБм [9]. Из табл. 3 видно, что даже при минимальной мощности зондирующего импульса указанное условие выполняется. Что касается OTDR, то даже при максимальной мощности зондирующего импульса порог чувствительности фотоприемника не превышает (минус  $81,64$  дБм).

На рис. 4 (см. также цветную вкладку) приведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных зависимости мощности обратнорассеянного сигнала от длительности зондирующего импульса для одномодового волокна Corning SMF-28 длиной  $50$  км с коэффициентом затухания  $\alpha = 0,18$  дБ/км на длине волны  $1550$  нм. Мощность зондирующего импульса  $13$  дБм, потери на пассивных компонентах  $2,1$  дБ. На оси абсцисс находятся значения длительности зондирующего импульса  $\tau_n$ , мкс, а на оси ординат – значения мощности обратнорассеянного сигнала  $W_{r_{\max}}$ , дБм. Из рис. 4 видно, что начиная примерно с длительности импульса  $70$  мкс экспери-

ментальные и теоретические значения начинают расходиться, что свидетельствует о влиянии на мощность обратнорассеянного сигнала нелинейных эффектов, увеличивающихся с ростом эффективной длины ОВ [10], которые накладывают ограничение на мощность зондирующего импульса.

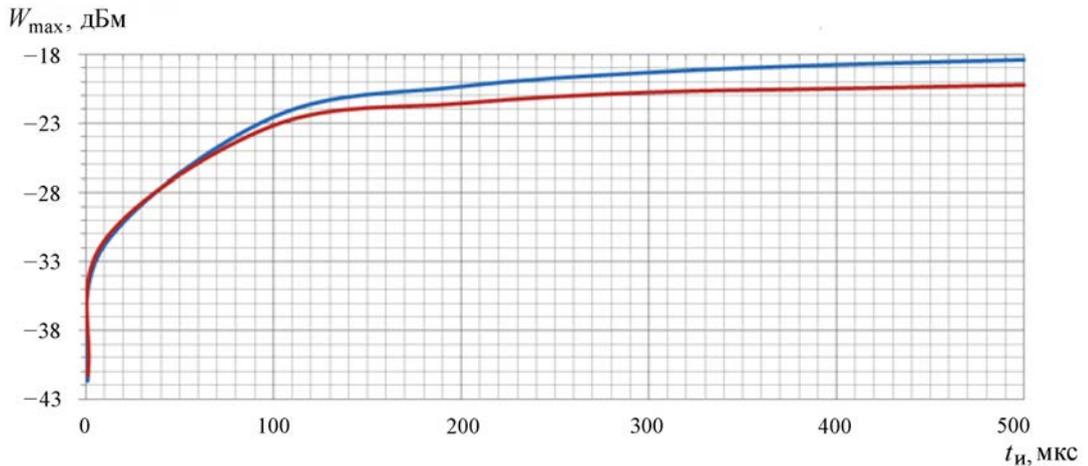


Рис. 4. Зависимость мощности обратнорассеянного сигнала от длительности зондирующего импульса:  
 — теоретическая мощность обратнорассеянного излучения  $P_T$ ,  
 — экспериментальное значение мощности обратнорассеянного излучения  $P_O$

### ***Устройство контроля методами интегральной рефлектометрии и прямого детектирования***

Как известно [3], вероятный диапазон времени вывода составляет от 0,5 с (быстрые нарушения) до  $3 \cdot 10^3$  с (медленные нарушения). Обнаружение попытки съема и реакция контроллера защиты на нарушение должны происходить на стадии вывода за время не более длительности вывода оптического излучения. При быстром внесении дополнительных прямых потерь величиной  $A_d$  метод интегральной рефлектометрии не обеспечивает необходимого времени реакции контроллера на нарушение, реализуемое методом прямого детектирования. Поэтому обнаружение быстрых нарушений производится с помощью метода прямого детектирования.

На основе вышеизложенного была разработана структурная схема комплексного устройства контроля методами интегральной рефлектометрии и прямого детектирования (рис. 5). Микроконтроллер (МК) формирует периодические зондирующие сигналы длительностью, равной удвоенному времени распространения света в исследуемом волокне, которые поступают на оптический передатчик ОПДК, где преобразуются в оптические сигналы. После этого контрольные оптические сигналы через оптический циркулятор (ОЦ) передаются на вход WDM мультиплексора MUX, где складываются с информационными оптическими сигналами. Информационные  $\lambda_{\text{и}}$  и контрольные  $\lambda_{\text{к}}$  оптические сигналы передаются на различных рабочих длинах волн.

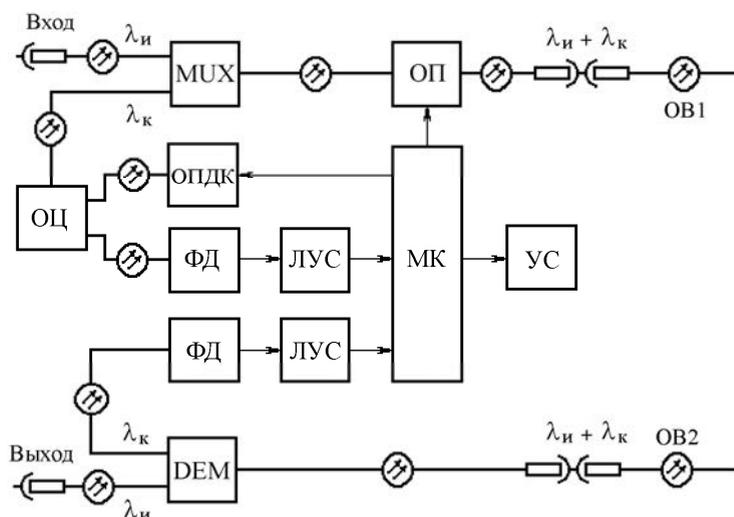


Рис. 5. Структурная схема устройства контроля

Суммарный оптический сигнал через ОП поступает в ОВ1. Отраженное и обратнорассеянное излучение с ВОЛП, через ОП, MUX, ОЦ направляется на фотодиод (ФД). После преобразования в фототок, усиления и логарифмирования сигнал поступает на вход МК, где преобразуется в цифровую форму и обрабатывается по специальной программе (формируется рефлектограмма). Кроме того, излучение, которое распространяется по ВОЛП по обратному каналу через ОВ2, попадает на демультиплексор (ДЕМ), который выделяет излучение с контрольной длиной волны  $\lambda_k$ . Сигнал принимается ФД, усиливается логарифмическим усилителем (ЛУС) и поступает на вход МК, где преобразуется в цифровую форму и обрабатывается по специальной программе. В случае появления на рефлектограмме, сформированной МК, локального дефекта с потерями большими установленного порога, или обнаружения нарушения по обратному каналу, МК формирует сигнал отключения ОП и включает устройство сигнализации (УС).

В методе интегральной рефлектометрии за счет использования зондирующего импульса с длительностью, полностью заполняющей ВОЛП, удастся увеличить коэффициент рэлеевского рассеяния, что, в свою очередь, приводит к увеличению мощности обратнорассеянного излучения до величины, обеспечивающей приемлемое отношение сигнал/шум, при меньшем времени на обработку, чем при традиционной рефлектометрии во временной области.

За счет использования логарифмического усилителя сокращается динамический диапазон входных сигналов МК. Кроме того, величина изменения сигнала от дополнительных потерь постоянна во всем динамическом диапазоне входных сигналов. В устройстве контролируется изменение наклона обратнорассеянного сигнала, который не зависит от изменений мощности оптического передатчика от внутренних и внешних воздействий. Поэтому можно устанавливать более низкий порог обнаружения, а также увеличивать длительность времени наблюдения. На рис. 6 приведен пример рефлектограммы обнаружения локального дефекта методом интегральной рефлектометрии.

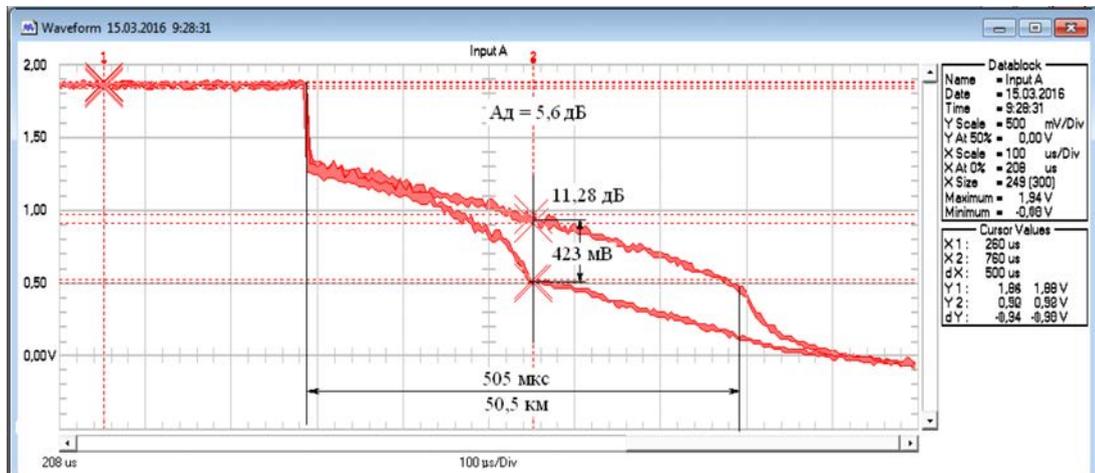


Рис. 6. Рефлектограмма обнаружения локального дефекта

## Заключение

Метод рефлектометрии во временной области имеет преимущества перед методом прямого детектирования: прямое измерение потерь на локальном дефекте, отсутствие обратного канала, более высокая точность и время наблюдения. Недостаток OTDR – инерционность, которая устраняется увеличением длительности зондирующего импульса до полного заполнения длины волокна (интегральная рефлектометрия).

Предложен комплексный метод контроля, при котором быстрые нарушения обнаруживаются методом прямого детектирования, медленные – методом интегральной рефлектометрии.

Ближайшим зарубежным аналогом может служить устройство комплексного контроля [12], в котором предлагается вести обнаружение нарушения путем сравнения отношения мощностей на двух различных длинах волн с порогом 0,3–0,6 дБ. Предлагаемое в статье устройство способно контролировать величину дополнительных прямых потерь с порогом 0,01–0,03 дБ (без учета спектрального разделения сигналов), что значительно превосходит зарубежный аналог.

## Список литературы

1. Securing Fiber Optic Communications against Optical Tapping Methods // [www.oysteroptics.com](http://www.oysteroptics.com).
2. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Советское радио, 1967.
3. Нарышкина О. Н., Овечкин С. И., Шубин В. В. Алгоритм и программа обнаружения нарушений при передаче информации по оптическому волокну // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 4. С. 65–72.

4. Свинцов А. Г. Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС // Фотон-экспресс. 2006. № 6. С. 39–55.
5. Пат. № 44389, РФ, МПК G01N. Оптический интегрирующий рефлектометр / С. Ф. Глаголев, В. Б. Архангельский, А. В. Семин, К. В. Марченко // Бюл. № 7. 2004.
6. Архангельский В. Б., Глаголев С. Ф., Марченко К. В. Интегрирующий рефлектометр // Фотон-экспресс. 2005. № 3. С. 31–33.
7. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2001.
8. Anderson D. R., Johnson L., Bell F.G. Troubleshooting Optical-Fiber Networks. Understanding and Using Your Optical Time-Domain Reflectometer. San-Diego-London: Elsevier Academic Press, 2004.
9. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005.
10. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.
11. Беспрозванных В. Г., Первадчук В. П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике. Пермь: ПНИПУ, 2011.
12. EP1564913A2, H04B 10/08. Active fiber loss monitor and method / Alan Frank // Bulletin 2005/33. 2005.

## **Control of Fiber-Optic Link Damages in Distributed Information-Computer Networks Using the Integral Reflectometry and Direct Detection Methods**

**K. I. Balashov, V. V. Shubin**

*Results of the development of the way of controlling damages in a fiber-optic link of distributed information-computer network using the integral reflectometry and direct detection methods are presented. It is shown that the optical reflectometry method limitation, in time domain, consists in a weak waveform of backward scattering can be removed by using the integral reflectometry method. To improve reliability and increase the speed of operations, it is suggested to use the integral reflectometry method in combination with the direct detection method within one controlling device. The calculation of parameters and structural diagram of the device are presented.*