

*Г. С. Руднев, А. А. Шпилевой  
В. И. Бурмистров, Н. И. Позднякова*

## **О ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫЯВЛЕНИЯ СОБЫТИЙ В РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

72

*Статья посвящена разработке метода, позволяющего автоматически выявлять события неотражающего характера на волоконно-оптическом участке линии связи благодаря дополнительной обработке рефлектограммы с использованием вейвлет-преобразований. Определена оптимальная для данного случая вейвлетообразующая функция. Использование методики позволит повысить информативность отражения событий, наблюдающихся на различных неоднородностях линии связи, в рефлектограммах.*

*In this article, we develop a technique for the automatic detection of non-reflective events in the fiber-optic section of a communication line, using wavelet transforms. We establish what wavelet-generating function is optimal for our case. This technique will contribute to the information value of traces of events observed in various inhomogeneities of a communication line.*

**Ключевые слова:** рефлектометрия оптического волокна, автоматическое выявление событий, рефлектограмма, вейвлет-преобразование, локальные экстремумы, спад уровня сигнала.

**Keywords:** reflectometry of optical fiber, automatic event detection, OTDR trace, wavelet transform, local extremes, signal decline.

Бесперебойность функционирования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) в значительной степени зависит от своевременного выявления и устранения повреждений и неоднородностей оптических волокон. Существующие методы контроля в ряде случаев не позволяют с высокой степенью достоверности идентифицировать события, происходящие на тестируемых участках ВОЛС. Производители оптических измерительных приборов, как правило, ориентированы на увеличение дальности обнаружения отражающих неоднородностей. Большинство рефлектометров имеют ограничения на измерение коротких (менее 500 м) участков. Ограничивающим фактором проведения таких измерений служит мертвая зона в начале тестируемого участка. На ее величину оказывают влияние длительность импульса, устанавливаемая в рефлектометре, полоса частот приемника, уровень отраженного сигнала и т. п. В большинстве случаев использование коротких импульсов приводит к сокращению мертвой зоны, но одновременно с этим и к уменьшению отношения сигнал / шум. Кроме того, процесс контроля ВОЛС не является полностью автоматическим [1; 2], поэтому дополнительная обработка и расшифровка рефлектограмм представляет собой важную эксплуатационную задачу, позволяющую оценить падение мощности, уровень отражения и потерь, расположение границ и другие типы событий на тестируемом участке [3].

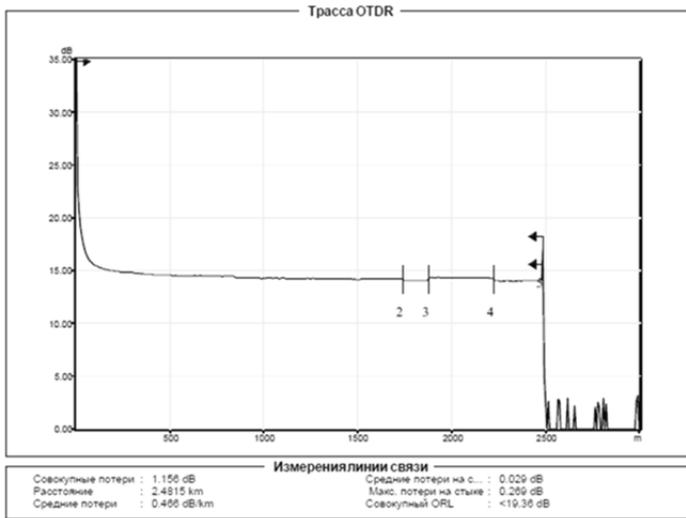


Рис. 1. Характерный пример рефлектограммы участка волоконно-оптической линии связи

На рисунке 1 представлена рефлектограмма волоконно-оптической линии длиной 2482 м, снятая рефлектометром FTB-7200D-023B-EI при  $\lambda = 1550$  нм и длительности импульса 30 нс. Рефлектометр подключен к тестируемому сегменту посредством коннектора, положению которого соответствует нулевая отметка (событие 1 – начало трассы). Далее следуют три оптические муфты (события 2–4) и отражающая неоднородность 5, характеризующая длину тестируемого участка. По таблице событий можно определить количество неотражающих неоднородностей и потери на них. На рефлектограмме также имеют место дополнительные события, не обнаруженные прибором, информация о которых может быть получена только косвенным путем – по расположению муфт и схеме разварки волокон (рис. 2).

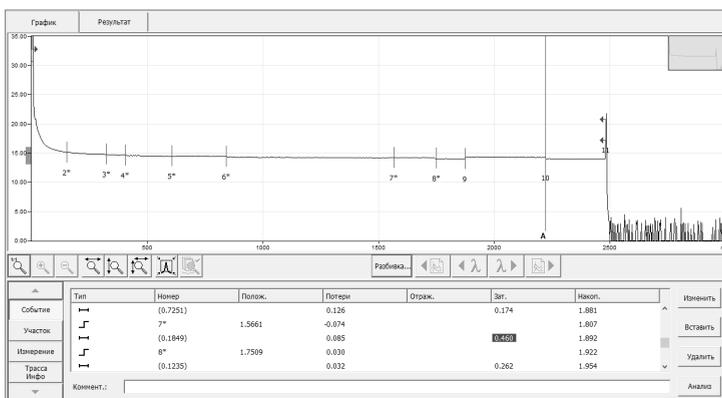


Рис. 2. Результат доработки «вручную» рефлектограммы, представленной на рисунке 1



Как видно из графика, шесть событий, не обнаруженных рефлектометром, удастся восстановить. Однако такой процесс отнимает дополнительное время и не всегда удобен.

Вывод о наличии событий, которые не наблюдаются визуально, позволяет сделать также дополнительная программная обработка рефлектограмм. Одну из таких возможностей в технике оптических сигналов предоставляет использование вейвлет-преобразований [4], что в общем случае обеспечивает:

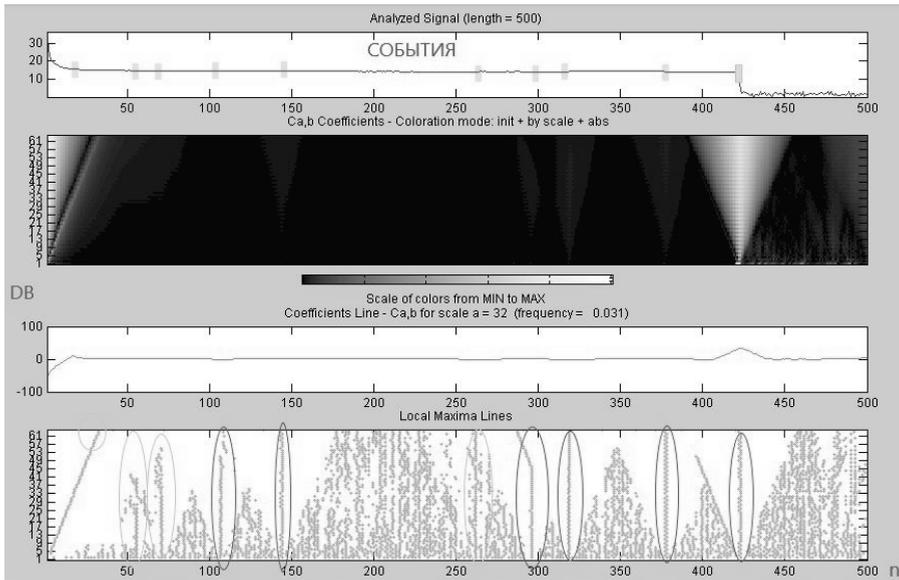
- дополнительную очистку сигнала от шумов;
- выделение трудноразличимых кратковременных особенностей сигнала;
- выявление точек разрыва сигнала;
- определение неоднородностей оптического волокна, не приводящих к переотражению сигнала и т. п.

Вейвлет-анализ предоставляет огромный спектр возможностей за счет разнообразия вейвлет-образов, каждый из которых обладает своими признаками и свойствами [5]. Чтобы осуществить выбор в пользу того или иного вейвлета, следует конкретизировать, какую полезную информацию из сигнала требуется извлечь. Для реализации поставленной задачи будем использовать программный пакет расширения Matlab – Wavelet Toolbox, позволяющий синтезировать основные алгоритмы и решать задачи обработки оптических сигналов, используя обширную библиотеку вейвлет-функций.

В качестве примера рассмотрим рефлектограмму, содержащую обширную зону неоднородностей с заданным месторасположением (рис. 3, верхний график). Пакет Wavelet Toolbox предлагает возможность выбора инструмента, в котором будут производиться исследование рефлектограммы. Для задания необходимой вейвлетообразующей функции используем инструмент вейвлет-менеджера - wavemng. Выбор вейвлетообразующей функции Хаара обеспечивает результат, представленный на рисунке 3 (графики 2–4).

Результат работы вейвлет-преобразования заключается в свертке исходного сигнала с помощью вейвлет-образа Хаара. Углубленную (XZ) и детальную (сечение XZ) картину, отображающую значения вейвлет-коэффициентов в плоскости, иллюстрируют графики 2 и 3. На картине вейвлет-коэффициентов за нарушение гладкости отвечают вертикальные полосы (амплитуды свертки), выходящие из точки расположения локальных особенностей. Всплескам и впадинам на графике соответствуют сгущения светлых и темных областей. График 4 дополняет скелетон-картина, на которой представлены линии локальных экстремумов. Выделенные экстремумы должны соответствовать неоднородностям исходного сигнала. Шесть из них представляют собой линии, максимально перпендикулярные плоскости. Первое событие «потеряно» за счет недостаточного качества рефлектограммы, второе, третье и шестое также представляют собой вертикальные линии, но более размытые.

Результат использования вейвлета Добеши первого порядка (db 1) представлен на рисунке 4.



75

Рис. 3. Результат обработки рефлектограммы с помощью вейвлетообразующей функции Хаара

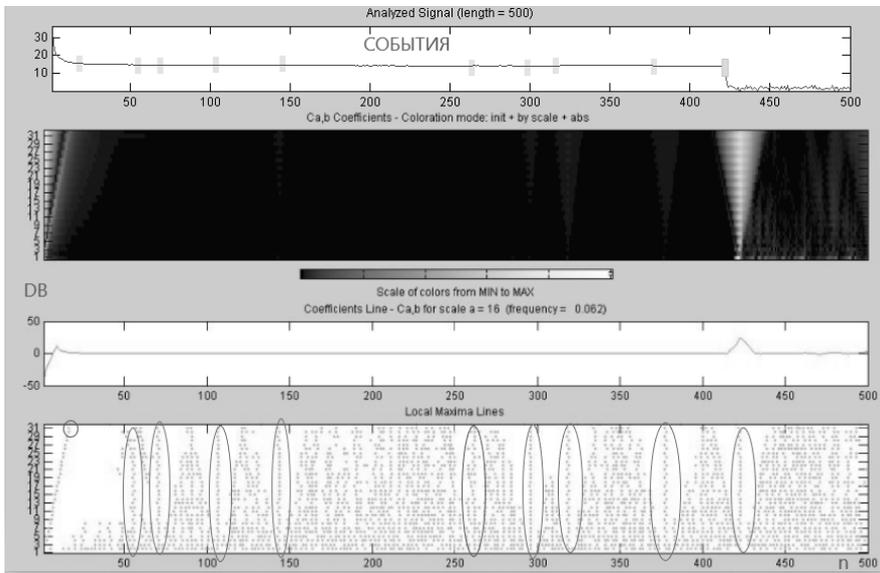


Рис. 4. Результат обработки исходной рефлектограммы вейвлетообразующей функцией db 1

На графике локальных максимумов db 1 восемь событий из десяти отображены вертикальными линиями. Исследование возможности вы-

явления большего числа событий путем повышения порядка вейвлета не дает положительного результата. Например, при использовании db 3 критерий, позволяющий определить расположение событий по точкам локальных экстремумов, не прослеживается. В местах расположения событий образуются «пустоты» (рис. 5).

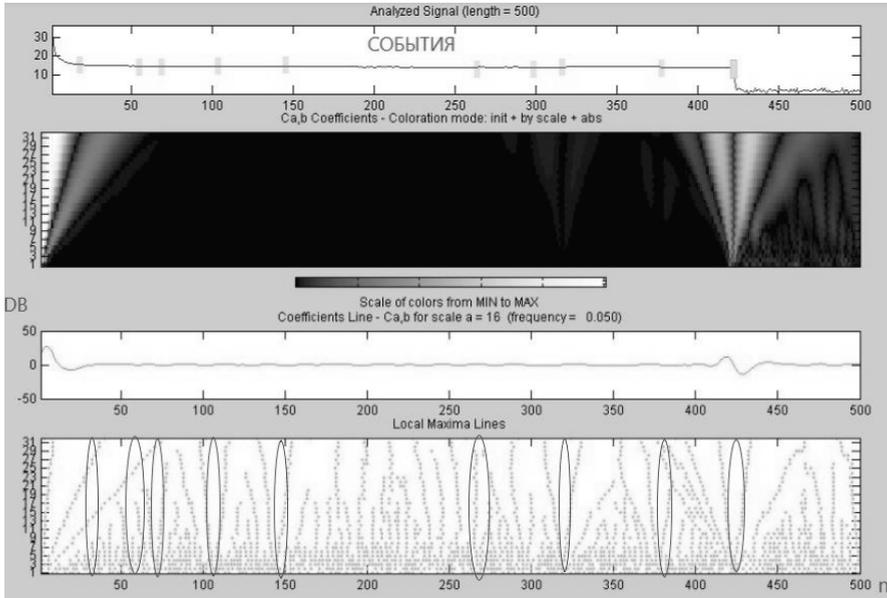


Рис. 5. Результат обработки исходной рефлектограммы вейвлетообразующей функцией db 3

Использование вейвлетов из семейства Добеши более высокого порядка — симплетов и койфлетов [5] — способствует лишь ухудшению ситуации в поиске событий. В этих случаях события на графике локальных экстремумов отображаются вертикальными линиями, однако присутствуют и дополнительные перпендикулярные линии в местах, где событий быть не должно. Отсюда можно заключить, что оптимальными при обработке рефлектограмм являются вейвлетообразующие функции Хаара и Добеши первого порядка.

Библиотека Wavelet Toolbox также содержит биортогональные и обратно биортогональные вейвлетообразующие функции с набором коэффициентов. Рассмотрим поведение сигнала, образованного в результате свертки данных типов вейвлетов и исследуемой функции оптического сигнала. Результат использования биортогонального вейвлета bior 1.1 позволяет определить восемь событий из девяти, причем увеличение порядка биортогонального вейвлета улучшает картину локальных экстремумов (рис. 6). На солитон-картине все события представлены набором максимально вертикальных линий.

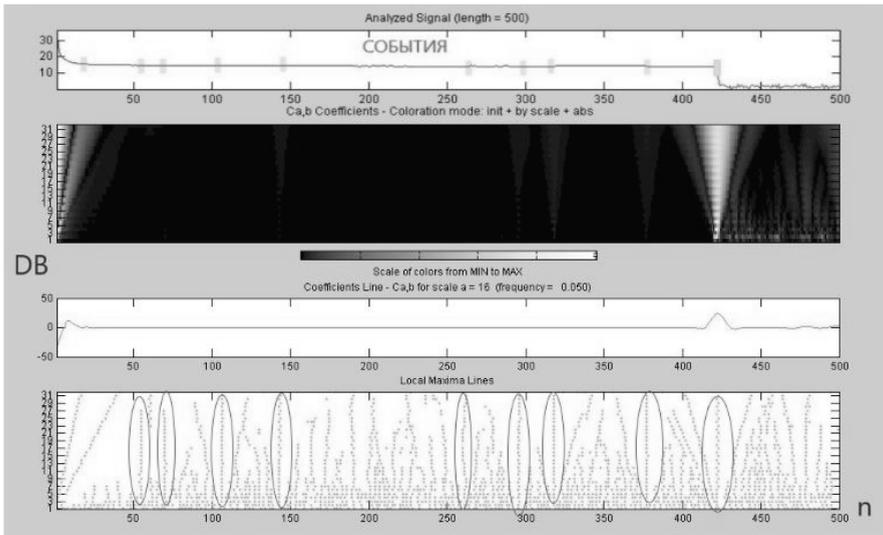


Рис. 6. Результат обработки исходной рефлектограммы вейвлетообразующей функцией bior 1.3

Использование обратно биортогональных вейвлетов приводит к максимально выраженному сгущению светлых областей вейвлет-картин (рис. 7), которые соответствуют неоднородностям волоконно-оптического тракта. Увеличение порядка обратного биортогонального вейвлета, наоборот, способствует потере событий на рефлектограмме.

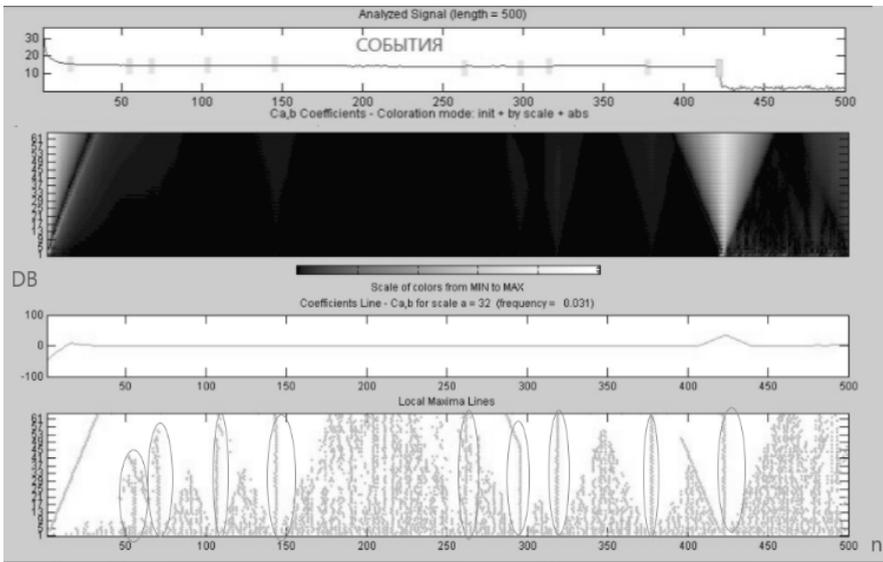


Рис. 7. Результат обработки исходной рефлектограммы вейвлетообразующей функцией rbio 1.1



Апробация различных вейвлетообразующих функций, входящих в программный пакет Wavelet Toolbox, позволяет выбрать оптимальный для анализа случай, при котором события на рефлектограмме определяются в виде вертикальных линий на картине локальных экстремумов. Для автоматизации процесса выявления местоположения событий (например, наличия соединительных муфт в волоконно-оптическом тракте) необходимо провести ряд операций. Программный код (критерий) событий на рефлектограмме написан в командной строке пакета Matlab. Непрерывное вейвлет-преобразование представлено функцией SWT, которая возвращает массив YWAVE спектральных коэффициентов преобразования. Применим операцию LOCALMAX, позволяющую воссоздать скелетон-картину, ранее представленную в Wavelet Toolbox. Переведем массив в двоичный формат. Единица отобразит «возможное» событие, а ноль укажет на его отсутствие. Каждый из отсчетов принимает 32 значения. Чем больше единиц содержится в одном отсчете, тем вероятнее, что он является событием. Таким образом, следующим этапом - это усреднение сигнала (операция MEAN). Матрица складывается вдоль оси масштабирующих коэффициентов. Определим порог, относительно которого будут отсеиваться «псевдособытия». Предположим, что значения масштабирующей функции, расположенные выше порога 0,5, являются событием.

График автоматического выявления событий при помощи вейвлета Хаара представлен на рисунке 8.

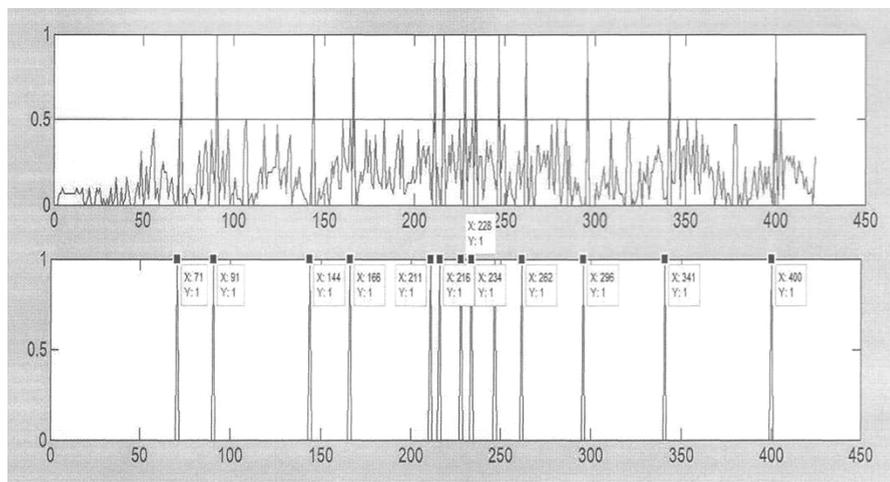


Рис. 8. Результат работы программы по автоматическому выявлению событий при помощи вейвлета Хаара

Как следует из графика, использование вейвлета Хаара привело к увеличению количества событий с девяти до двенадцати, причем три события (1, 3 и 9) определены корректно, согласно таблице, однако потеря большей части ранее наблюдаемых событий свидетельствует о недостаточной эффективности применения данного вейвлет-образа. Использование вейвлетообразующей функции Добеши первого порядка приводит к аналогичному эффекту (определяются три события из девяти) — номера отсчетов двух исследуемых функций совпадают.



Использование биортогонального вейвлета с коэффициентом 1.3, напротив, приводит к корректному определению всех событий с максимальной погрешностью в 5 отсчетов (рис. 9, событие 5). Места расположения событий максимально приближены к результатам, полученным при обработке рефлектограммы вручную. Дальнейшее увеличение порядка вейвлета до 1.5 приводит к потере данных.

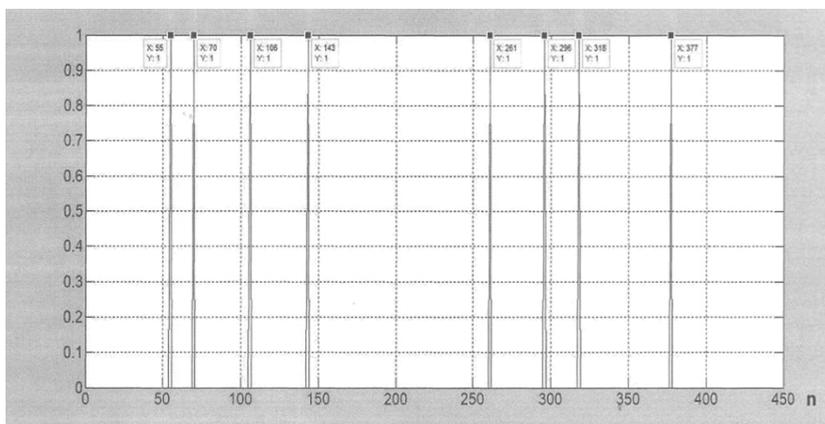


Рис. 9. Результат автоматического выявления событий с помощью биортогонального вейвлета 1.3

Применение обратной биортогональной вейвлет-функции приводит к увеличению количества регистрируемых событий и потере части данных.

Анализ и исследование набора вейвлетообразующих функций позволили выбрать наиболее оптимальный случай, которым является использование биортогонального вейвлета с коэффициентом 1.3 (рис. 10). Применение данного типа вейвлета способствует наиболее достоверному выявлению всех событий на тестируемом участке сети.

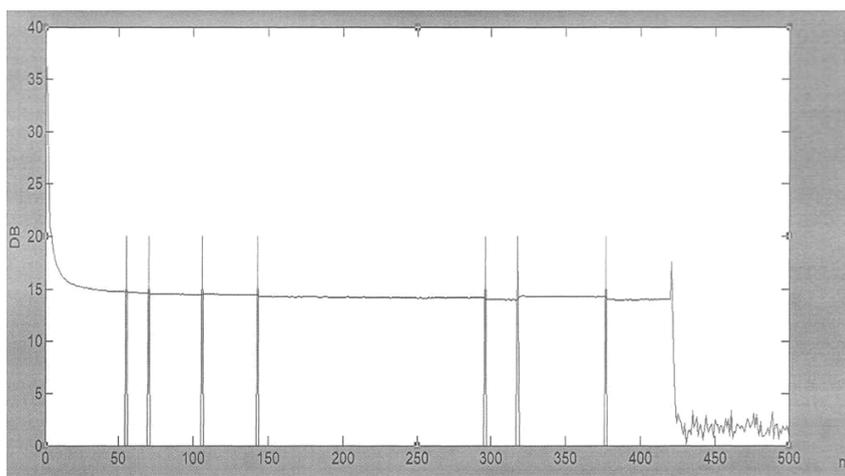


Рис. 10. Наложение автоматически идентифицированных событий на исследуемый сигнал



Корректность выбранного метода подтверждается исследованием рефлектограмм оптоволоконных участков, выполненным авторами для случаев, когда данные о местоположении оптических муфт отсутствуют и известно только их количество.

#### Список литературы

1. Баскаков В. С., Косова А. Л. Метрологическое обеспечение волоконно-оптических линий передачи. Самара, 2004.
2. Воронин В. Г., Наний О. Е., Кулик А. А., Туркин А. Н. Оптический рефлектометр. М., 2007.
3. Андреев В. А., Бурдин В. А., Баскаков В. С., Косова А. Л. Измерения на ВОЛП методом обратного рассеяния. Самара, 2003.
4. Козинев И. А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 27 – 35.
5. Манонина И. В. Обработка детализирующих вейвлет-коэффициентов для повышения точности рефлектометрических измерений // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 19, № 5. С. 173 – 178.

#### Об авторах

Глеб Сергеевич Руднев – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.  
E-mail: GRudnev@kantiana.ru

Андрей Алексеевич Шpileвой – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.  
E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Валерий Иванович Бурмистров – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.  
E-mail: VBurmistrov@kantiana.ru

Наталья Игоревна Позднякова – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.  
E-mail: NPozdnjakova@kantiana.ru

#### The authors

Gleb S. Rudnev, Assistant Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.  
E-mail: GRudnev@kantiana.ru

Dr. Andrey A. Shpilevoy, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.  
E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Valery I. Burmistrov, Assistant Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.  
E-mail: VBurmistrov@kantiana.ru

Natalia I. Pozdnjakova, Master's Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.  
E-mail: NPozdnjakova@kantiana.ru