

На правах рукописи

Манонина Ирина Владимировна

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНИЙ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА
К РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2016 г.

Работа выполнена на кафедре метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях МТУСИ **Сенявский Александр Леонидович**

Официальные оппоненты: **Седельников Юрий Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ), профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы»;

Бакланов Игорь Геннадьевич, кандидат технических наук, Генеральный директор компании ООО «ПР Групп Технологии»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»)

Защита диссертации состоится «8» декабря 2016 года в 13:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная д.8а, ауд. А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики».

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук

Терешонок Максим Валерьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Линии связи являются основой построения любых телекоммуникационных сетей. Для обеспечения работоспособности линий связи необходим постоянный контроль за их функционированием с оперативным обнаружением и последующим устранением различных неоднородностей и повреждений. Существуют различные методы контроля, отличающиеся измерениями различных параметров линий связи. Одними из традиционных и распространенных измерений на линиях связи являются рефлектометрические измерения, основанные на импульсном методе и реализованные в измерительных приборах – рефлектометрах, позволяющих дистанционно отслеживать и обнаруживать неисправности линий связи.

Для металлических (медных) линий связи используют импульсный рефлектометр, основанный на передаче электрического зондирующего импульса вдоль линии и измерении мощности и времени запаздывания возвратившихся обратно в рефлектометр импульсов.

В волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) обнаружить наличие и месторасположение неоднородностей или повреждений волокна (разъёмных и сварных соединений, трещин, изогнутых участков, торцов и разрывов волокна) позволяет оптический рефлектометр.

Принципы действия оптического и импульсного рефлектометров одинаковы, отличие заключается только в физическом представлении зондирующего импульса: оптический или электрический импульс. Современные рефлектометры позволяют локализовать и определить тип повреждения или неоднородности с определенной степенью погрешности. Эти погрешности возникают из-за не идеальной формы зондирующего импульса, его возможных искажениях в линии связи, а также воздействия на неё внешних помех. Это приводит к появлению на рефлектограмме шумов и «ложных» импульсов – эхо-импульсов, являющихся шумовой составляющей рефлектограммы. Такой уровень точности далеко не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к измерениям на линиях связи, поскольку даёт не вполне достоверную информацию о существующих в линии повреждениях и неоднородностях.

Одним из перспективных подходов к обработке рефлектограмм является применение вейвлет-анализа. Совместное использование вейвлет-анализа и рефлектометрических измерений для контроля линий связи позволит повысить точность измерений. При этом для реализации такого метода не требуется приобретения нового дорогостоящего измерительного оборудования – могут использоваться уже имеющиеся рефлектометры и вычислительная техника (персональный или планшетный компьютер) для обработки результатов.

Степень разработанности темы. Среди российских ученых метрологов-связистов наибольший вклад в исследование и развитие методов измерения проводных кабельных ли-

ний внесли: Верник С.М., Гроднев И.И., Грязнов М.И., Коптев И.В., Кулешов В.Н., Кульбацкий К.Е., Шварцман В.О. и др. Фундаментальные основы теории оптических волноводов и волоконно-оптических линий передачи изложены в работах: Андрушко Л.М., Боголюбова А.Н., Взятышева В.Ф., Гроднева И.И., Лав Дж., Окамото К., Семенова Н.А., Унгера Х.Г., Шевченко В.В. и др. Значительный вклад в развитие теории измерений параметров ВОЛС внесли отечественные ученые: Андреев В.А., Бурдин В.А., Кочановский Л.Н., Попов В.Б., Портнов Э.Л. и др. Основу теории вейвлет-анализа и её теоретическое применение заложили такие математики, как: Хаар А., Мандельштам Л.И., Левий П., Габор Д., Гроссман А., Морле Ж., Мейер И., Добеши И., Малла С., Койфман Р., Коэн А. и др.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка эффективной методики обработки данных измерений параметров линий связи с применением вейвлет-анализа к рефлектометрическим измерениям.

Задачи диссертационной работы, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Проанализировать существующие методы измерений параметров линий связи.
2. Исследовать существующие методы математической обработки данных и выбрать наилучший метод для обработки данных рефлектометрических измерений.
3. Разработать математическую модель рефлектограммы с шумом, присутствующим в линии связи. Выявить показатели качества для оценки эффективности методики обработки рефлектограммы.
4. Разработать метод удаления шумов из рефлектограммы с помощью пороговой обработки коэффициентов вейвлет-преобразования, и сравнить результаты расчёта оценки риска (среднеквадратической погрешности) пороговой обработки с теоретическими значениями.
5. Разработать метод определения сингулярности рефлектограмм на основе анализа детализирующих вейвлет-коэффициентов.
6. Определить оптимальные параметры для вейвлет-обработки рефлектограмм с оценкой полученных результатов.

Методология и методы исследования. В работе используются аппарат теории электродинамики, теории передачи сигналов, методы математического и функционального анализа, теории вероятностей и математической статистики, моделирования и программирование в среде *MATLAB*, методы анализа Фурье и вейвлет-анализа.

Научная новизна.

1. Предложена методика использования вейвлет-анализа для обработки данных рефлектометрических измерений на линиях связи для повышения точности локализации повреждений и неоднородностей.

2. Разработан метод обработки рефлектограмм с применением прямого дискретного вейвлет-преобразования для анализа рефлектограммы и обратного дискретного вейвлет-преобразования для восстановления рефлектограммы.

3. Создан алгоритм выявления и устранения шумов и ложных эхо-импульсов в рефлектограмме на основе разработанной математической модели рефлектограммы.

4. Определены показатели качества восстановленной рефлектограммы. В качестве основного показателя выбрана оценка риска (среднеквадратическая погрешность) пороговой обработки, как наиболее информативная и дающая наиболее точные результаты.

5. Разработан метод определения сингулярности рефлектограммы (точной локализации повреждения или неоднородности) на основе анализа детализирующих вейвлет-коэффициентов, полученных в результате вейвлет-преобразования рефлектограммы.

6. Получены результаты для определения оптимальных параметров вейвлет-обработки рефлектограмм. Выбраны и обоснованы следующие параметры: базисный вейвлет для прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования для удаления шума из рефлектограммы – койфлет 1-го порядка, симлет 2-го и 5-го порядка; жёсткий тип пороговой обработки вейвлет-коэффициентов; метод расчёта оценки дисперсии шума на основе медианного абсолютного отклонения; базисный вейвлет для определения сингулярности рефлектограммы – вейвлет Добеши 2-го порядка.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость диссертации заключается в исследовании методов рефлектометрических измерений линий связи и оценки их погрешностей, а также в определении параметров для вейвлет-обработки рефлектограмм и оценки точности восстановленной рефлектограммы с помощью выбранных вейвлетов.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что результаты исследования могут использоваться в работе компаний, занимающихся обслуживанием линий связи, а также проектными и исследовательскими организациями при оценке качества существующих линий связи.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение методики комплексного использования вейвлет-анализа для обработки данных рефлектометрических измерений линий связи позволит повысить точность локализации повреждений и неоднородностей, а также выявлять вероятный характер повреждений.

2. При обработке рефлектограмм для их анализа и реконструкции применен метод, основанный на использовании прямого дискретного вейвлет-преобразования к рефлектограмме с пороговой обработкой полученных вейвлет-коэффициентов, а для восстановления рефлектограмм – обратное дискретное вейвлет-преобразование.

3. Для устранения шума и ложных эхо-импульсов из рефлектограммы рекомендован к использованию предложенный алгоритм на основе разработанной математической модели.

4. Для оценки качества восстановленной рефлектограммы использованы предложенные показатели качества. Основным показателем следует считать оценку риска (среднеквадратическую погрешность) пороговой обработки, являющуюся наиболее информативной и дающей наиболее точные результаты.

5. Для локализации повреждений и неоднородностей применен метод, основанный на определении сингулярности рефлектограммы по детализирующим вейвлет-коэффициентам.

6. Для повышения точности локализации повреждений и выявления неоднородностей линий связи рекомендуется использовать предложенные в диссертационной работе параметры вейвлет-обработки рефлектограмм: базисный вейвлет для прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования для удаления шума из рефлектограммы – койфлет 1-го порядка, симлет 2-го или 5-го порядка; жёсткий тип пороговой обработки вейвлет-коэффициентов; метод расчёта оценки дисперсии шума на основе медианного абсолютного отклонения; базисный вейвлет для определения сингулярности рефлектограммы – вейвлет Добеши 2-го порядка.

Степень достоверности и апробация результатов.

Результаты работы докладывались и обсуждались на: Отраслевой международной конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (2012 г.); Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (2012, 2013, 2014, 2016 гг.). Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, причём 5 в рецензируемых периодических научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов; в кратком виде изложено содержание глав диссертации.

В первой главе проанализировано современное состояние исследуемой проблемы. В ходе анализа задач измерений на линиях связи выявлено, что измерительная техника служит для контроля качества работы сети и соответствия ее стандартам, а также для изучения процессов, протекающих при приёмодаточных испытаниях и ремонтно-восстановительных работах. Показано, что повышение точности, качества и оперативности проведения измерений является ключевой задачей для обеспечения высоких технических и экономических показателей эксплуатируемых объектов – линий связи.

В качестве передающей среды в телекоммуникационных сетях используют как оптоволоконные, так и металлические (медные) линии связи. Контроль металлических линий связи осуществляют с помощью импульсных рефлектометров, принцип работы которых основан на передаче и обработке зондирующих импульсов, требования к которым зависят от типа используемого кабеля и выявляемых неоднородностей. Обработка производится с помощью визуальных и измерительных методов. При этом осуществляется измерение мощности и времени запаздывания возвращающихся обратно в рефлектометр импульсов.

Для диагностики и обслуживания волоконно-оптических линий связи используются оптические рефлектометры. Оптические рефлектометры имеют значительно более широкий спектр измерительных задач, чем импульсные. В импульсном рефлектометре обратно возвращаются импульсы, отраженные только от сильных неоднородностей (мест деформации кабеля). В оптическом рефлектометре обратно возвращаются импульсы, отраженные как от больших неоднородностей, так и из-за наличия рэлеевского рассеяния в оптической линии, возникающего за счёт изменения показателя преломления оптического волокна (потери в строительных длинах, в сварных и разъёмных соединениях волокна).

При измерениях линий связи «классическими» импульсными и оптическими рефлектометрами результаты, получаемые в виде рефлектограмм, содержат определённые погрешности. Данные ошибки могут быть связаны как с не идеальной формой зондирующего импульса (в связи с его искажением в результате прохождения по линии связи), так и с методами получения рефлектограммы на экране и дальнейшего её исследования. Цифровой вейвлет-рефлектометр позволяет уменьшить погрешности измерений за счёт более совершенной (по сравнению с импульсным прибором) системы регистрации отражённого импульса. Однако его цена намного выше, чем у обычного рефлектометра, так что замена рефлектометров, широко используемых в эксплуатации, на вейвлет-рефлектометры экономически далеко не всегда оправдана. Кроме того, в вейвлет-рефлектометре взамен зондирующего оптического импульса прямоугольной (импульсной, синус-квадратной) формы используется оптический вейвлет-импульс (рисунок 1), например вейвлет «мексиканская шляпа», что хотя и позволяет несколько повысить чувствительность при локализации повреждений, но без определенной математической обработки результатов не позволяет существенно повысить эффективность устройства.

Проведенный в диссертации анализ современных методов измерения линий связи показал, что известные методики и основанные на них приборы позволяют выявлять неоднородности и повреждения линий связи с определенными погрешностями. Поэтому необходимо совершенствовать методы измерений линий связи с использованием современных методик обра-

ботки данных рефлектометров, позволяющих существенно уменьшить погрешности локализации повреждений.

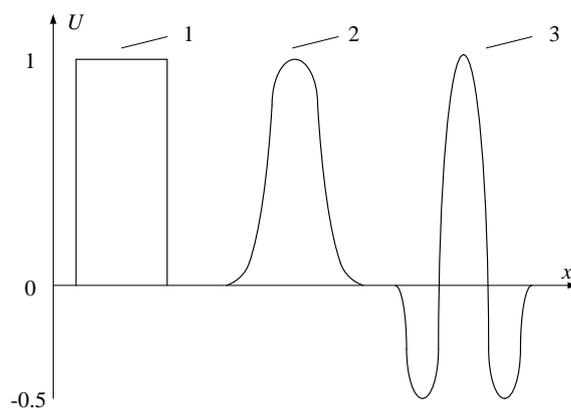


Рисунок 1 – Зондирующие импульсы: (1) – импульсной формы; (2) – синус-квадратной формы; (3) – вейвлет-импульс (вейвлет «мексиканская шляпа»)

Во второй главе рассматриваются методы обработки данных с целью выбора математического аппарата для анализа рефлектограмм.

Распространенным математическим аппаратом для анализа и обработки данных является Фурье-анализ. Данный метод основывается на теории функционального анализа и разложения сигнала по ортогональным функциям. Преобразование Фурье позволяет получить информацию о частотном спектре всего анализируемого сигнала, но информация, в какой момент времени в сигнале присутствовали колебания на той или иной частоте, при этом не доступна. Таким образом, существует проблема анализа и обработки сигналов, характеризующаяся высокочастотной компонентой в течение короткого промежутка времени и низкочастотными колебаниями на больших временных интервалах. Указанный недостаток частично может быть устранён путём введения в преобразование «оконной» функции, имеющей компактный носитель (т.е. вне указанного окна функция равна нулю). Оконная функция позволяет представить результат анализа в виде функции частоты и времени положения окна. В результате «оконное преобразование Фурье» позволяет разбить весь временной интервал на небольшие равные интервалы, каждый из которых анализируется преобразованием Фурье отдельно. Это позволяет проанализировать либо высокие частоты на коротком промежутке времени, либо низкочастотную компоненту сигнала, но не оба колебания одновременно. Такая частотно-временная зависимость показана на рисунке 2(а).

При обработке и анализе рефлектограмм с использованием как простого, так и оконного преобразований Фурье, указанные недостатки повлияют на качество результатов, что приведет к существенным погрешностям измерения: неточное определение места повреждения (десятки или даже сотни метров), возможное появление ложных эхо-импульсов, а при

малых значениях амплитуды отражённого импульса возможно появление ошибки второго рода, т.е. не выявление неоднородности в линии связи.

Кроме Фурье-анализа, получила развитие теория вейвлет-анализа, широко применяемая при обработке различных сигналов и изображений, а также для их сжатия и очистки от шума, в том числе, и в системах дистанционного зондирования Земли. Вейвлет-анализ позволяет осуществлять одновременный анализ высокочастотных и низкочастотных компонент сигнала, т.е. для различных диапазонов частот используются временные окна различной длительности (рисунок 2(б)). В отличие от Фурье-анализа, такой подход позволяет получать и временную, и частотную информацию о сигнале, сужая окно для выделения коротких высокочастотных участков или расширяя его для анализа длительных низкочастотных колебаний. Это повышает точность проведения анализа при обработке рефлектограмм, при этом уменьшается и шумовая составляющая.

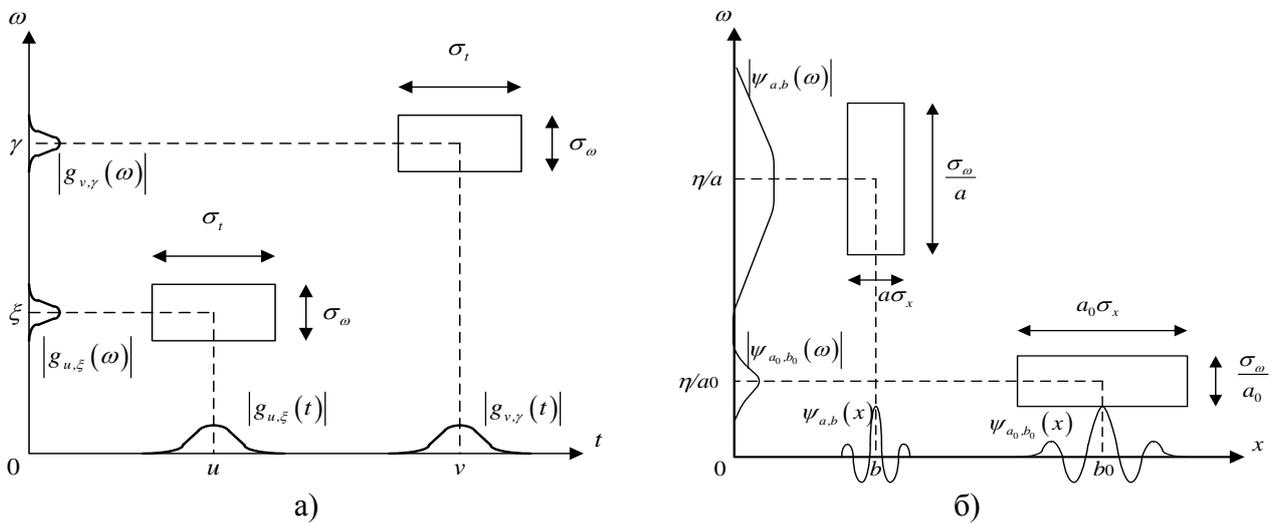


Рисунок 2 – Частотно-временные прямоугольники: (а) – Фурье-анализ; (б) – вейвлет-анализ

Применение вейвлет-преобразования для обработки рефлектограмм позволяет после удаления шума из рефлектограммы производить её реконструкцию с очень высокой точностью, что делает возможным определять места повреждений с погрешностью, измеряемой несколькими сантиметрами на дальностях до нескольких сотен километров.

Вейвлет-преобразование позволяет разложить рефлектограмму на полезную и шумовую составляющие. При этом шумовая составляющая проявляется в детализирующих коэффициентах. В качестве исследуемого сигнала (рефлектограммы) рассматривается следующая модель с некоррелированным гауссовским шумом ε с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , для которой требуется построить оценку функции f по наблюдениям Y_i :

$$Y_i = f_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.1)$$

К наблюдаемым данным применяется дискретное вейвлет-преобразование: $X_i = a_i + \varepsilon_i^W$, $i = 1, \dots, N$, где ε_i^W – некоррелированный гауссовский шум с нулевым математическим

ожиданием и дисперсией σ^2 , а a_i – соответствующие непрерывные детализирующие вейвлет-коэффициенты, умноженные на $N^{1/2}$.

Для обработки детализирующих вейвлет-коэффициентов, полученных после дискретного вейвлет-преобразования рефлектограммы, следует использовать пороговую обработку. Это позволит получить меньший порядок среднеквадратичной ошибки, чем при оценивании классическими линейными методами. При этом под пороговой обработкой детализирующих коэффициентов понимается удаление достаточно маленьких коэффициентов, которые характерны для шумов. Характер пороговой обработки определяется пороговой функцией и значениями порога. Существуют жёсткая и мягкая пороговая обработка. Функция жёсткой пороговой обработки хотя и имеет разрыв, но позволяет восстановить и усилить особенности рефлектограммы. Функция мягкой пороговой обработки имеет непрерывную пороговую функцию и приводит к небольшому сглаживанию существенных деталей рефлектограммы.

Пороговые функции при жёсткой и мягкой пороговой обработке следующие:

$$p_T(x) = \begin{cases} x & \text{при } |x| > T, \\ 0 & \text{при } |x| \leq T. \end{cases} \text{ – функция жёсткой пороговой обработки;}$$

$$p_T(x) = \begin{cases} x - T & \text{при } x > T, \\ x + T & \text{при } x < -T, \\ 0 & \text{при } |x| \leq T. \end{cases} \text{ – функция мягкой пороговой обработки.}$$

При жёсткой пороговой обработке вейвлет-коэффициенты, меньшие порогового значения, обнуляются. Остальные коэффициенты остаются равны своему значению и используются при обратном вейвлет-преобразовании для восстановления рефлектограммы. При мягкой пороговой обработке вейвлет-коэффициенты, которые по модулю меньше порога T , обнуляются, а абсолютные величины остальных коэффициентов уменьшаются на величину порога. Для каждого вейвлет-коэффициента возможно задавать свой уровень порога.

Риск (или среднеквадратическая погрешность) пороговой обработки определяется следующим образом: $R_N(f, \sigma, T) = \sum_{i=1}^N E(a_i - p_T(X_i))^2$. В качестве пороговой функции используется «универсальный» порог $T_U = \sigma\sqrt{2\ln N}$, зависящий только от дисперсии шума. При использовании порога T_U из сигнала убирается почти весь шум. Кроме того, при выборе универсального порога риск оказывается асимптотически близким к минимальному.

Повышение локализации повреждений и неоднородностей является наиболее важной задачей рефлектометрических измерений. Место повреждения на рефлектограмме повреждение можно рассматривать как сингулярность. Вейвлет-преобразование может быть использовано для поиска точек разрыва или смены регулярности функции. Зачастую самая

значимая информация о сигнале заключена в резких скачках, т.е. будет отражаться в регулярностях структуры (появление сингулярности сигнала). Вейвлет-анализ раскладывает сигнал на коэффициенты, локализованные и в пространстве и во времени, и, таким образом, позволяют локально характеризовать регулярности сигнала. Математически регулярность и, соответственно, сингулярности сигнала характеризуются показателем Липшица. Вблизи сингулярности сигнала будет наблюдаться резкий рост амплитуды вейвлет-коэффициентов. А участки равномерной регулярности будут давать коэффициенты, убывающие к нулю с уменьшением масштаба a .

Таким образом, для обработки данных рефлектограмм в диссертации предлагается применять современную методику на основе вейвлет-анализа, которая позволит повысить точность определения неоднородностей.

В третьей главе определены критерии анализа рефлектограмм, позволяющие сделать выводы о состоянии тестируемого участка линии связи. Произведен анализ существующего программного обеспечения для визуализации и обработки данных рефлектограмм, а также математического аппарата для последующего преобразования и обработки данных с помощью вейвлет-анализа. Построена математическая модель рефлектограммы, на базе которой разработан метод и алгоритм предварительного удаления шума и ложных эхо-импульсов на основе доверительных интервалов, существенно повышающий точность результатов измерения и, соответственно, снижающий погрешность при диагностике различных повреждений.

Разработан метод подавления шума, основывающийся на применении прямого дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и обратного дискретного вейвлет-преобразования (ОДВП) к рефлектограмме с корректировкой вейвлет-коэффициентов на основе пороговой обработки с универсальным порогом. Предложена оценка результатов работы данного метода по специальным показателям качества, определенным в процессе исследования. Оценка основывается как на субъективных (визуальное оценивание совпадения рефлектограмм на всем диапазоне и на интервале с повреждением), так и на объективных характеристиках (среднеквадратическая погрешность, среднеквадратическая погрешность на интервале с повреждением, процентное отклонение оценки риска пороговой обработки и относительная оценка риска) восстановленной рефлектограммы.

За основной показатель качества была принята оценка риска пороговой обработки. К вспомогательным показателям относятся среднеквадратическая погрешность и визуальное оценивание исходной и восстановленной рефлектограмм. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений оценки риска пороговой обработки. Показано, что при использовании предложенного метода для удаления шума и последующей рекон-

струкции рефлектограммы восстановленная рефлектограмма с высокой точность соответствует исходной.

Разработан метод определения сингулярности рефлектограмм, основанный на анализе детализирующих вейвлет-коэффициентов, и позволяющий существенно повысить локализацию повреждений и неоднородностей.

Для визуализации, обработки и анализа результатов выявления неоднородностей линий связи существует специализированное программное обеспечение, такое как: *ANDO AQ7932 Emulation Software*, *JDSU Fiber Trace Unicode Viewer*, *Wavetek Wintrace Viewer v4.20*, *WorkPlace 3.8*, *Trace.Net OTDR Test Management Software v.1.0.7*. Такого рода программы позволяют не только реализовать функцию анализа рефлектограммы (загрузка, редактирование файлов одной/нескольких рефлектограмм, проверка/редактирование положения неоднородностей, просмотр и анализ разности двух трасс), но также и функцию создания отчёта (в виде общей таблицы или распечатки рефлектограмм). Для анализа рефлектограмм выбрана программа *ANDO AQ7932 Emulation Software*, как обладающая наиболее функциональной анализирующей частью и отчётной формой.

Последующая математическая обработка данных рефлектограммы осуществлялась с помощью программно-математического аппарата *MATLAB*, обладающего наиболее мощной вычислительной и визуализирующей базой и позволяющего представлять данные для последующего их преобразования и обработки с помощью вейвлет-анализа.

Для оценки исходной и восстановленной рефлектограмм служат качественные и количественные характеристики рефлектограммы, позволяющие сделать выводы о состоянии тестируемого участка линии связи. К качественным характеристикам относится оцениваемая форма восстановленной рефлектограммы. При этом возникает задача удаления шума из рефлектограммы, эффективно решаемая при помощи вейвлет-разложения и пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. К количественным характеристикам рефлектограммы относится оцениваемый спектр рефлектограммы. При этом возникает задача выявления и устранения ложных эхо-импульсов и шума.

Для спектрального анализа рефлектограмм построены математические модели шума и рефлектограммы. При достаточно большом количестве отсчётов N модель шума следующая:

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2), N(0, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt, \sigma^2 = N_0/2, \text{ где } N_0 - \text{спектральная плотность}$$

мощности шума.

Математическая модель рефлектограммы представляет собой сумму неслучайной функции, зависящей от времени, и случайного шума с относительно небольшой дисперсией.

В качестве неслучайной функции предложено использовать сумму прямой линии и импульсного сигнала. Т.е. рефлектограмма записывается следующим образом:

$$REF(t) = (at + b) + A\chi(t) + \varepsilon(t) \quad (3.1)$$

где: a – угловой коэффициент прямой; b – некоторое действительное число прямой; A – амплитуда импульсной функции; $\chi(t)$ – импульсная функция, описывающая возможное повреждение линии связи; $\varepsilon(t) \sim N(0, \sigma^2)$ – шум. Время изменяется дискретно $t \in \{t_1, t_2, \dots, t_n \mid 0 = t_1 < t_2 < \dots < t_n\}$. При этом отсчёты времени соответствуют диапазону расстояний, установленному при измерениях.

В рефлектограммах возможно присутствие ложного эхо-импульса, вызванного многочисленными отражениями сигнала и появляющимся на рефлектограмме на расстояниях, равных удвоенному (утроенному и т. д.) расстоянию до вызвавшего его события. Как правило, от реального события отражения ложного эхо-импульса можно отличить по отсутствию признаков потери сигнала вокруг него. Однако сильное отражение может вызвать обратное рассеяние, эхо-импульс от которого окажется значительно больше порога шума и будет заметно на рефлектограмме. Следовательно, при анализе рефлектограммы такие импульсы могут быть восприняты как неоднородности, а не шумовая составляющая, хотя в линии связи физически будут отсутствовать. При спектральном анализе эти импульсы рассматриваются как помехи и могут оказывать существенное влияние на спектр рефлектограммы, поэтому до начала анализа их необходимо выявить и удалить, как и шум.

Для математической модели рефлектограммы (3.1) предлагается метод удаления ложных эхо-импульсов и шума на основе доверительных интервалов для разностей рефлектограммы:

1. Получить оценки относительной мощности и расширения длительности импульсов рефлектограммы для выборки значений.
2. Для всей выборки значений найти выбросы по мощности и расширение импульса по длительности, соответствующие неоднородностям и повреждениям линии.
3. Оценить дисперсию σ^2 полученных выбросов.
4. Построить доверительный интервал для разностей рефлектограмм $REF(t_i) - REF(t_{i-k})$, $i = 1, 2, \dots, N$, $1 \leq k \leq i$ с уровнем доверия не ниже P .
5. Убрать импульсы, не попадающие в доверительные интервалы для разностей рефлектограммы $REF(t)$.

Для разностей полезной части рефлектограммы (без шумовой составляющей) $REF_S(t) \equiv (at + b) + A\chi(t)$ будет выполнено следующее:

$$|REF_S(t_i) - REF_S(t_{i-k})| = |(at_i + b) + A\chi(t_i) - (at_{i-k} + b) - A\chi(t_{i-k})| \leq$$

$$\leq (a|t_i - t_{i-k}| + b) + A|\chi(t_i) - \chi(t_{i-k})| \equiv h_i^k. \quad (3.2)$$

Доверительный интервал для разностей рефлектограмм $REF(t)$ будет равен:

$$\left(-h_i^k + \sqrt{2}\sigma F^{-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right), h_i^k + \sqrt{2}\sigma F^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \right). \quad (3.3)$$

Фильтрация эхо-импульсов и шума производится со значением уровня доверия равным $P=0,95$ для доверительного интервала (3.3). Разработанный алгоритм устранения ложных эхо-импульсов и шума представлен на рисунке 3.

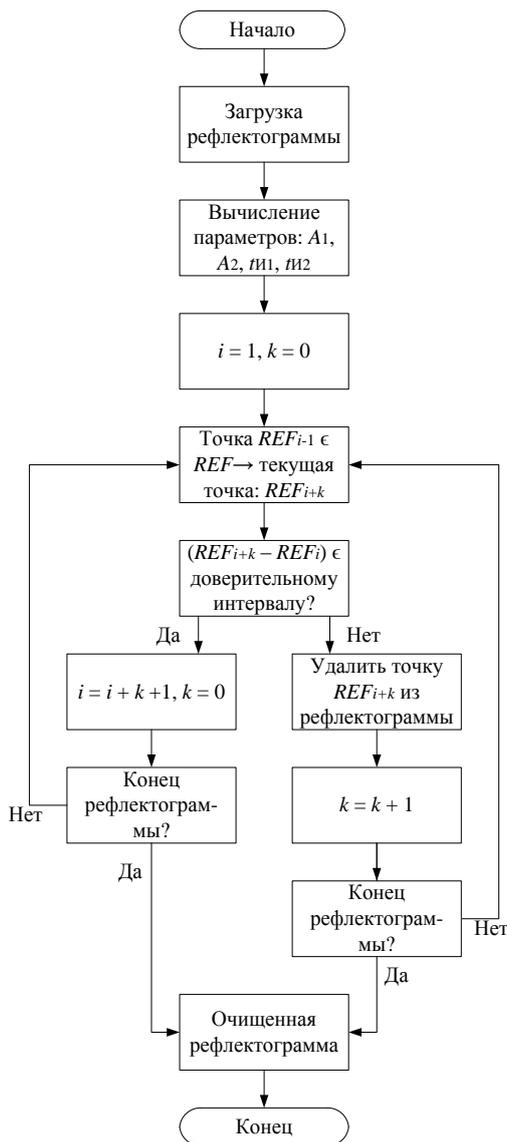


Рисунок 3 – Схема алгоритма устранения ложных эхо-импульсов и шума

Первая точка рефлектограммы должна относиться к полезному сигналу – это необходимое условие работы алгоритма. Если разность $REF(t_{i+k}) - REF(t_{i-1})$ попадает в доверительный интервал, построенный по формуле (3.3), то точка $REF(t_{i+k})$ соответствует модели (3.1), она объявляется полезной, обновляются значения i и k : $i = i + k + 1, k = 0$. Выполняется переход к моменту времени t_i (i – обновленное). Если разность в интервал не попала, то точка

$REF(t_{i+k})$ удаляется из рефлектограммы как эхо-импульс. Далее k увеличивается на единицу и рассматривается момент t_{i+k} (k – обновленное). Число k является счётчиком идущих подряд эхо-импульсов. Предложенный алгоритм позволяет удалить ложные эхо-импульсы из рефлектограммы, оказывающие влияние на спектральную составляющую результатов, что существенно позволяет увеличить точность результатов измерения и, тем самым, снизить погрешность при диагностике различных повреждений линии связи.

Для последующего анализа с помощью вейвлет-преобразования необходимо, чтобы рефлектограмма соответствовала условиям модели (2.1). При этом задача вейвлет-обработки рефлектограмм сводится к подавлению шума и последующего определения сингулярности рефлектограммы. Обобщенная схема алгоритма подавления шума представлена на рисунке 4 и сводится к следующему: к исходной рефлектограмме применяется ДВП – функция анализа, в результате которого рефлектограмма представляется в виде вейвлет-коэффициентов, которые подвергаются корректировке – применяется пороговая обработка с определенной функцией порога и значением порога для каждого коэффициента. Затем вычисляется ОДВП – функция восстановления. Выбор вейвлета для преобразований, типа пороговой обработки и значений порога определяется посредством решения оптимизационной задачи.

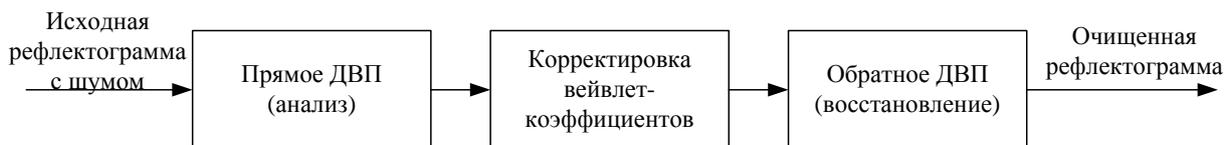


Рисунок 4 – Общая схема удаления шума на основе вейвлет-преобразования

Для оценки восстановленной рефлектограммы в процессе исследования определены показатели качества, представленные на рисунке 5, которые основываются либо на субъективных, либо на объективных характеристиках восстановленной рефлектограммы.

В качестве объективных критериев используются следующие показатели качества: процентное отклонение оценки риска и относительная оценка риска пороговой обработки, а также среднеквадратическая погрешность на всем диапазоне и на интервале с повреждением. Для субъективной оценки целесообразно принять пятибалльную шкалу со следующими коэффициентами: $C_1 = 5$ – отличное качество рефлектограммы после удаления шума, $C_2 = 4$ – хорошее качество, $C_3 = 3$ – удовлетворительное качество, $C_4 = 2$ – плохое качество, $C_5 = 1$ – очень плохое качество. Наилучшее качество восстановленной рефлектограммы после подавления шума будет, когда: оценка риска пороговой обработки $R_N \rightarrow R_N$ (процентное отклонение); среднеквадратическая погрешность $S_X \rightarrow 0$; субъективный показатель $C \rightarrow 5$. При этом за основной показатель качества принята оценка риска пороговой обработки.



Рисунок 5 – Показатели качества восстановленной рефлектограммы

Повреждение на рефлектограмме может иметь следующие характерные представления: резкий скачок после плавного уменьшения уровня обратного рассеяния (рисунок 6(а)); после плавного уменьшения уровня обратного рассеяния сначала в виде плавного увеличения уровня обратного рассеяния, а затем как резкий скачок (рисунок 6(б)). Для данных случаев точное значение места повреждения определено в точках 809 и 804 соответственно.

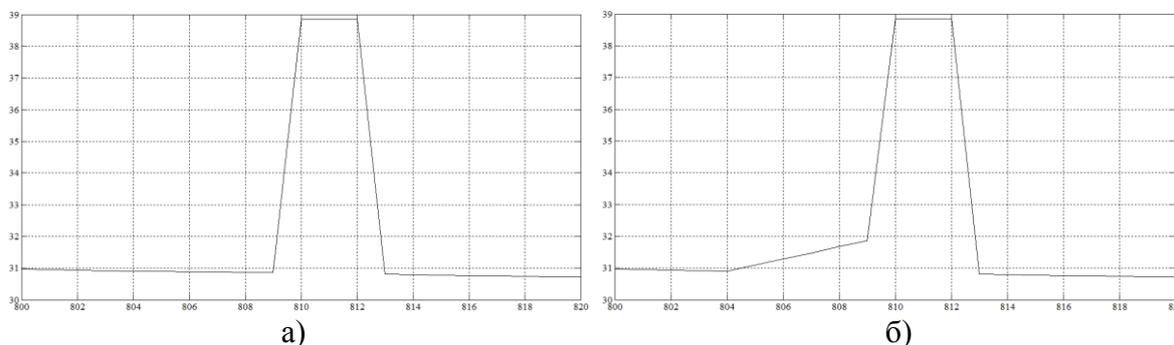


Рисунок 6 – Смоделированная рефлектограмма с повреждением в виде скачка (а); повреждением в виде плавного нарастания, а затем скачка (б)

Для уменьшения погрешности измерения необходимо определить сингулярность рефлектограммы, для чего предлагается использовать следующую схему обработки рефлектограммы: исследуемую рефлектограмму необходимо разложить на аппроксимирующие и детализирующие вейвлет-коэффициенты с помощью многоуровневого ДВП. На первом уровне разложения коэффициенты получаются в результате свёртки исследуемой рефлектограммы с фильтром нижних частот (ФНЧ) для коэффициентов аппроксимации и фильтром верхних частот (ФВЧ) для коэффициентов детализации и последующей двоичной децимацией. Коэффициенты на втором уровне получаются в результате свёртки полученных на первом этапе

разложения коэффициентов аппроксимации также с ФНЧ и ФВЧ. Сингулярность рефлектограммы проявляется на самом низком уровне разложения в детализирующих коэффициентах. При этом необходимое условие для поиска сингулярности – наличие отклонения в предполагаемой области с сингулярностью второго детализирующего коэффициента. При наличии шумовой составляющей в рефлектограмме сингулярности могут более чётко проявляться в детализирующих коэффициентах второго или третьего уровня.

Определение сингулярности рефлектограммы проводилось с использованием вейвлета Хаара, вейвлетов Добеши 2-го – 9-го порядков, симлетов 2-го – 8-го порядков. Для указанных вейвлетов ширина области обработки равна $(2n-1)$, где n – порядок вейвлета. Из-за отсутствия шума в рефлектограмме разложение производилось до второго уровня.

Для повреждения, представленного на рисунке 6(а), вейвлеты Добеши и симлеты низких порядков (до 4-го) позволяют определить сингулярность в точке 809 с вероятностью близкой к 1. Определение сингулярности указанными вейвлетами более высокого порядка (с 4-го) нецелесообразно, за счёт широкой области обработки рефлектограммы (захват большого числа обрабатываемых точек), что вызывает наличие грубых погрешностей в определении точки начала повреждения. На рисунке 7 представлены коэффициенты детализации при разложении рефлектограммы с использованием вейвлета Хаара, вейвлета Добеши 3-го и 9-го порядков, симлета 2-го порядка. Сплошной линией обозначен первый коэффициент, пунктирной линией – второй коэффициент детализации.

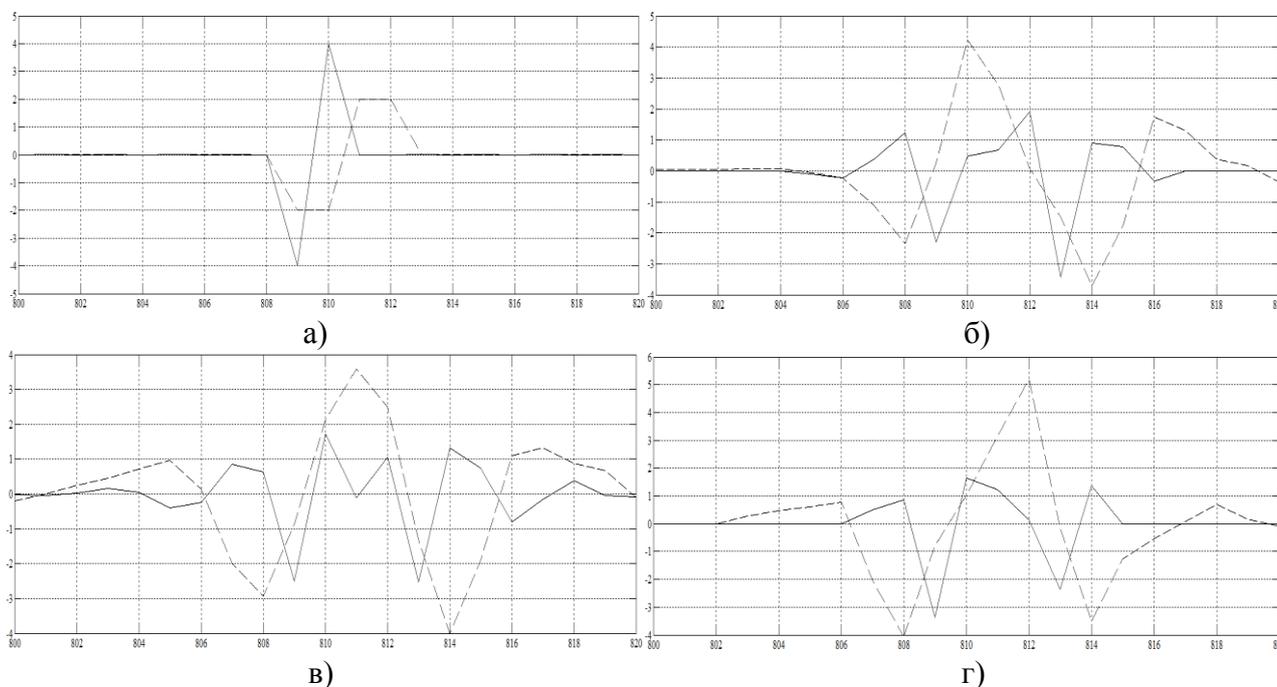


Рисунок 7 – Коэффициенты детализации при разложении рефлектограммы вейвлетами: (а) Хаара, (б) Добеши 3-го порядка, (в) Добеши 9-го порядка, (г) симлета 2-го порядка

Из рисунка 7 видно, что повреждение лучше всего определяет вейвлет Хаара, что обуславливается его функцией материнского вейвлета. Остальные вейвлеты, имеющие несколько сглаженные функции материнского вейвлета и большую ширину области обработки, и, соответственно, обрабатывается как точка повреждения, так и последующие точки выброса, хотя и позволяют определить указанное повреждение, но с меньшей точностью и наличием погрешностей (определение ложных выбросов до начала повреждения, например, на рисунке 7(в) область [804-806]).

Для повреждения, представленного на рисунке 6(б), наиболее точные значения получены с использованием вейвлетов Добеши 3-го – 5-го порядков. Что обуславливается количеством отсчетов от начала подъёма уровня обратного рассеяния до точки с резким скачком. При этом при разложении с использованием вейвлета Хаара также можно определить сингулярность в районе точки 805. На рисунке 8 представлены коэффициенты детализации при разложении рефлектограммы с использованием вейвлетов: Хаара, Добеши 4-го и 7-го порядка, симплета 2-го порядка. Сплошной линией обозначен первый коэффициент, пунктирной – второй коэффициент детализации.

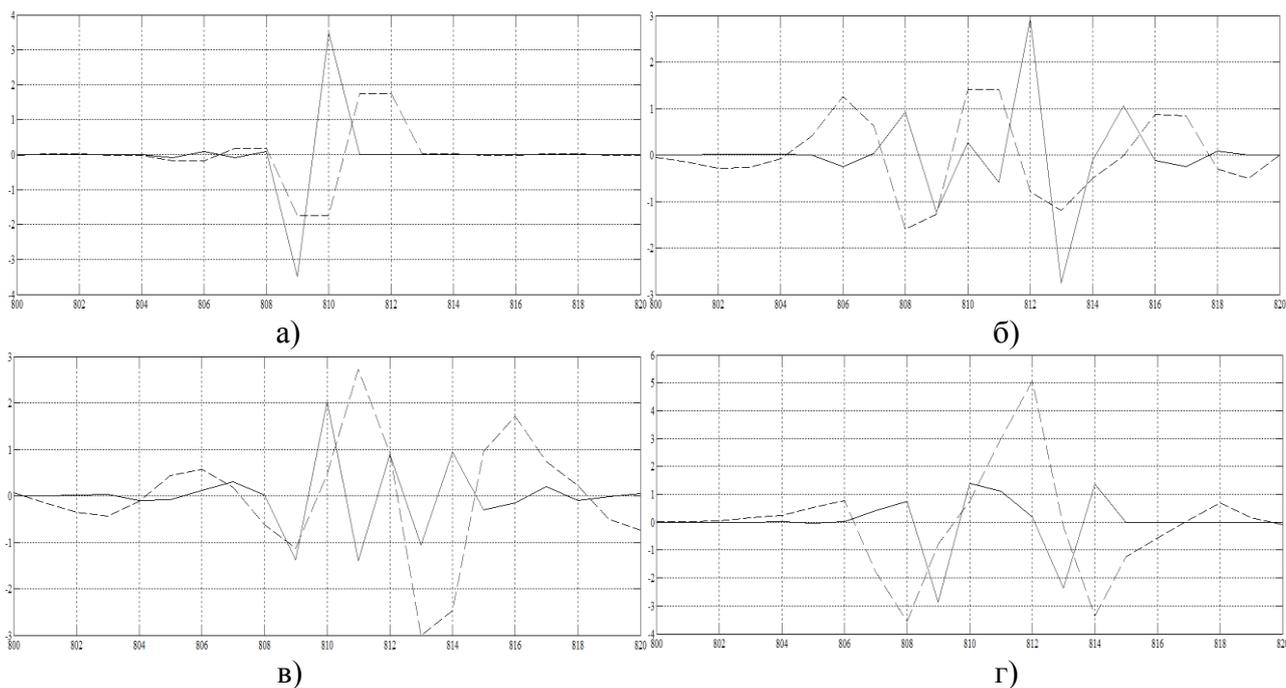


Рисунок 8 – Коэффициенты детализации при разложении рефлектограммы вейвлетами: (а) Хаара, (б) Добеши 4-го порядка, (в) Добеши 7-го порядка, (г) симплета 2-го порядка

На протяжении всей рефлектограммы коэффициенты детализации первого уровня разложения имеют значения порядка $10^{-3} - 10^{-5}$. Резкое изменение коэффициента фиксируется в точке 809, что соответствует резкому скачку на рефлектограмме и имеет значение при разложении вейвлетом Добеши 4-го порядка 10^0 . Следовательно, предыдущее значение соответствует сингулярности рефлектограммы и имеет значение коэффициента $-0,26$ в точке 806.

Т.е. отклонения в районе точки 806 бóльшие значения 10^{-1} считаются искомыми. И сингулярность рефлектограммы определена в диапазоне значений [805,37-806,53]. При этом абсолютная погрешность находится в диапазоне [1,37-2,53]. При этом рефлектометр определит повреждение значением 809. Соответственно, локализация повреждения (неоднородности) с помощью вейвлет-анализа позволяет уменьшить погрешность от 2-х до 4-х раз в рассмотренном случае, в зависимости от разрешающей способности.

Изложенные в третьей главе диссертации результаты исследований показали, что применение предложенных методов определения и уменьшения влияния ложных эхо-импульсов, а также удаления шума с помощью пороговой обработки вейвлет-коэффициентов даёт возможность восстановить рефлектограмму, соответствующую исследуемой рефлектограмме без шума с высокой точностью. Кроме того, предложенный метод определения сингулярности рефлектограммы позволит точнее локализовать повреждения и неоднородности на линиях связи, по сравнению с применяемыми методами в существующих рефлектометрах.

Четвёртая глава диссертации посвящена исследованию и определению оптимальных качественных показателей для вейвлет-обработки рефлектограмм с целью повышения точности результатов измерений. К таким показателям относятся: базисный вейвлет для ДВП и ОДВП для удаления шума из рефлектограммы; тип пороговой обработки; метод расчёта оценки дисперсии; базисный вейвлет для определения сингулярности рефлектограммы. Для исследования смоделирована рефлектограмма, к которой добавлен возможный шум с дисперсией $\sigma^2 = 0,16^2$. На рисунке 9 представлена исследуемая рефлектограмма без шума.

Для определения оптимального базисного вейвлета для ДВП и ОДВП взяты: вейвлет Хаара; вейвлет Добеши 5-го, 6-го и 9-го порядка; симлет 2-го, 5-го и 8-го порядка; койфлет 1-го, 4-го и 5-го порядка. Выбор данных вейвлетов для исследования обоснован тем, что они обладают симметричностью, что облегчает анализ рефлектограмм; ортогональностью, что позволяет полностью восстанавливать рефлектограммы с высокой точностью. Для выбора способа пороговой обработки сравниваются результаты, полученные с использованием мягкой и жёсткой пороговой обработки. Определение оптимальной оценки дисперсии шума основывается на расчёте значений с использованием среднеквадратического отклонения (СКО) и медианного абсолютного отклонения (МАО).

Сравнение восстановленной рефлектограммы с исследуемой проводится по нескольким параметрам. Используется критерий согласия Пирсона для проверки гипотезы о соответствии эмпирического распределения определенному теоретическому распределению вероятностей. Т.е. по методу наименьших квадратов рассчитывается относительная разница между исследуемой и восстановленной рефлектограммами и сравнивается полученное значение с

критическим значение квантиля хи-квадрат. При этом проверяется нулевая гипотеза: восстановленная рефлектограмма при определенной вероятности P совпадает с исследуемой. Если выполняется условие $\chi^2 \leq \chi^2_{кр}$, то нулевая гипотеза принимается. В противном случае принимают альтернативную гипотезу, и говорить о совпадении двух рефлектограмм нельзя.

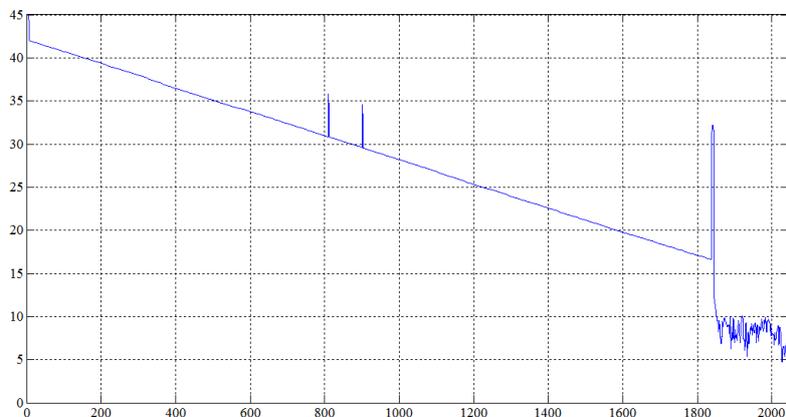


Рисунок 9 – Исследуемая смоделированная рефлектограмма

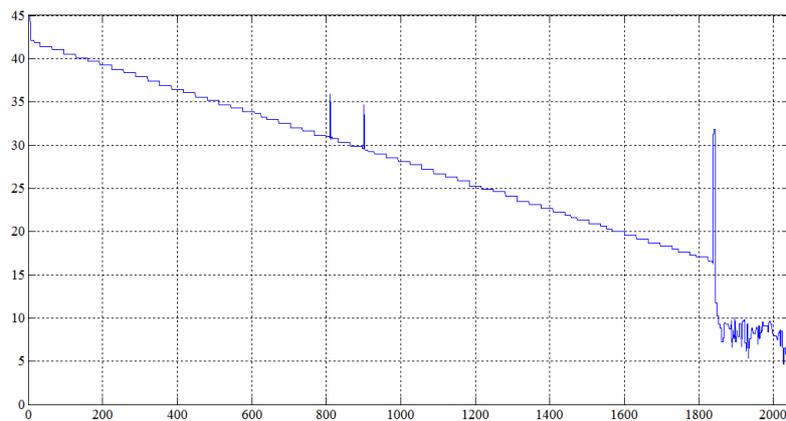
Критическое значение квантиля является табличным значением интегральной функции распределения Пирсона и равно $\chi^2_{кр} = 7,815$ при вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы $k=(5-1-1)=3$, где число 5 – взято из соображений того, что весь участок рефлектограммы разбит на 5 частей – до первого повреждения, повреждение, от первого повреждения до второго повреждения, повреждение, после второго повреждения.

Для детальной оценки погрешности восстановления рефлектограммы следующим параметром, по которому необходимо произвести сравнение результатов – среднеквадратическая погрешность на выбранном интервале в районе повреждения. Наилучшие результаты достигаются при стремлении среднеквадратической погрешности к нулю. Кроме того, необходимо произвести субъективную оценку на выбранном интервале, используя визуализацию поврежденного участка.

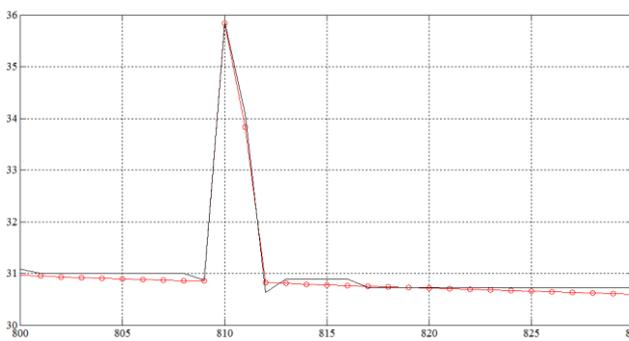
Основным параметром, по которому необходимо произвести сравнение результатов – процентное отклонение оценки риска и относительная оценка риска пороговой обработки. Оптимальные результаты достигаются при минимальных значениях этих двух параметров.

На рисунке 10 представлены результаты обработки рефлектограммы с помощью вейвлета Хаара, жёсткой пороговой обработки и оценки дисперсии шума на основе МАО, дающие наиболее лучшие результаты. С применением жёсткой пороговой обработки значения относительного отклонения χ^2 меньше критического значения $\chi^2_{кр}$, соответственно удовлетворяет принятию нулевой гипотезы о схожести рефлектограмм при вероятности $P = 0,95$. С применением мягкой пороговой обработки полученные значения превышают критическое, что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу. При расчёте среднеквадратической по-

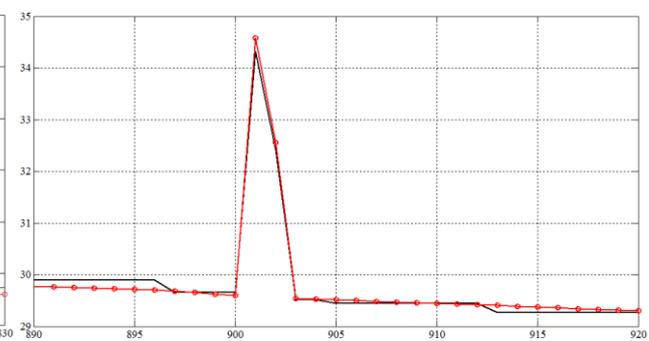
грешности на выбранном интервале в районе повреждений результаты с применением жёсткого порога имеют меньшие значения, чем с применением мягкого порога. И, соответственно, восстановленная рефлектограмма будет с большей точностью реконструирована. Результаты расчёта основного параметра – оценки риска пороговой обработки имеют несколько большие отклонения, чем характерные для предельного распределения. Хотя повреждения восстановлены с высокой точностью (рисунок 10(б) и 10(в)), но форма всей рефлектограммы не является гладкой (рисунок 10(а)), что приведет к грубым погрешностям, и это обстоятельство не допускает применение вейвлета Хаара в решении задач по рефлектометрии для удаления шума и последующей реконструкции рефлектограмм.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 10 – Результаты очистки рефлектограммы и восстановления рефлектограммы с применением (а) вейвлета Хаара, (б) – первое повреждение, (в) – второе повреждение

Сравнительный анализ остальных вейвлетов показал, что при сравнении процентного отклонения оценки риска восстановленной рефлектограммы и исследуемой рефлектограммы, а также отношения оценок риска наиболее оптимальные результаты получены для койфлета 1-го порядка и симплета 2-го и 5-го порядка. Дополнительные расчетные параметры – среднеквадратическая погрешность и визуальная оценка формы восстановленной рефлектограммы также дают высокие показатели для указанных вейвлетов. Кроме того, для всех ука-

занных выше вейвлетов принимается нулевая гипотеза о схожести исходной и восстановленной рефлектограмм.

Таким образом, оптимальными базисными вейвлетами для ДВП и ОДВП при реконструкции рефлектограммы являются: койфлет 1-го порядка, симлет 2-го порядка, симлет 5-го порядка. Результаты обработки с помощью койфлета 1-го порядка представлены на рисунке 11. При этом на рисунках 11(б) и 11(в) представлены фрагменты в районе первого и второго повреждений, где сплошной линией показан восстановленный сигнал, сплошной линией с окружностями – исходный сигнал.

При выборе типа пороговой обработки результаты, полученные с использованием жёсткой пороговой обработки, имеют намного лучшие показатели, чем с применением мягкой пороговой обработки. Т.е. лучшим способом пороговой обработкой вейвлет-коэффициентов при обработке рефлектограммы является жёсткая пороговая обработка.

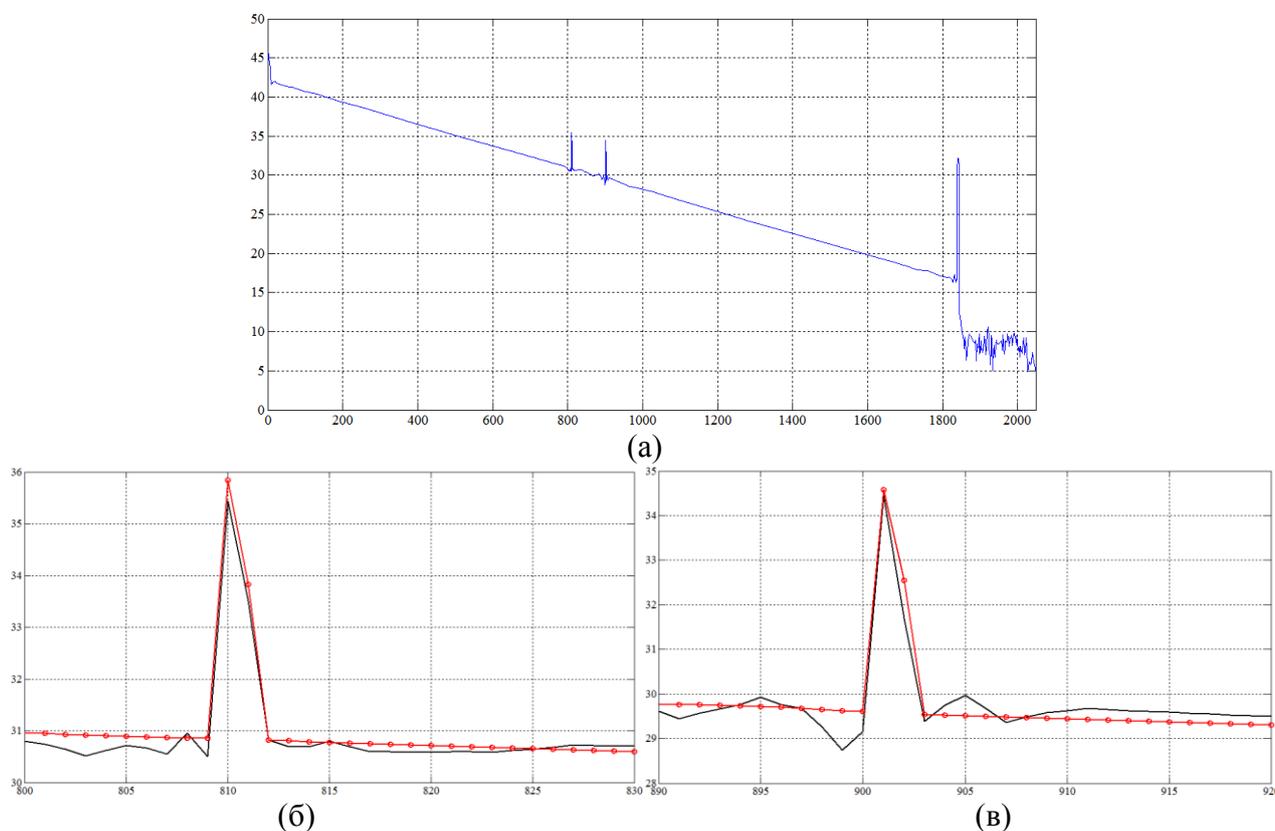


Рисунок 11 – Результаты очистки и восстановления рефлектограммы с применением (а) койфлета 1-го порядка, (б) – первое повреждение, (в) – второе повреждение

Анализ метода расчёта оценки дисперсии шума в рефлектограмме показал, что при использовании оценки на основе МАО достигаются лучшие результаты, чем на основе СКО.

Дальше по восстановленной (очищенной от шума) рефлектограмме определяется точное значение места повреждения. Для этого необходимо определить сингулярности рефлектограммы. Т.е. восстановленная рефлектограмма раскладывается на детализирующие

вейвлет-коэффициенты, по которым локализуются повреждения. В качестве вейвлетов для разложения использовались вейвлет Хаара и Добеши 2-го, 3-го и 4-го порядков. Использование вейвлетов больших порядков нецелесообразно, т.к. увеличивает погрешность определения сингулярности для первого повреждения. Сравнение производится по полученной погрешности определения первого и второго повреждения. Для всех вейвлетов первое повреждение было найдено с нулевой погрешностью. Для второго повреждения наилучшие результаты получены при применении вейвлета Добеши 2-го порядка. Также удовлетворительные результаты получены для вейвлета Добеши 3-го порядка.

Таким образом, наиболее оптимальными параметрами для вейвлет-обработки рефлектограмм являются: базисный вейвлет для удаления шума из рефлектограммы – койфлет 1-го порядка, симлет 2-го порядка или симлет 5-го порядка; тип пороговой обработки – жёсткий; оценка дисперсии шума – на основе медианного абсолютного отклонения; базисный вейвлет для определения сингулярности – Добеши 2-го порядка.

Определенные оптимальные параметры для вейвлет-обработки рефлектограмм были применены к рефлектограмме, полученной в результате измерений затухания регенерационного участка волоконно-оптической линии передачи (Москва-11 ПОН – 2-й Южнопортовый проезд 23, корп.2) рефлектометром *EXFO FTB 7200D*, изображенной на рисунке 12. При этом дисперсия шума, определенная по рефлектограмме, равна $\sigma^2 = 0,076^2$. Значение повреждения, определенное рефлектометром соответствует отсчёту 8971,2. При этом реальное место повреждения соответствует отсчёту 8969,6. Разрешение рефлектометра – 0,16 м.

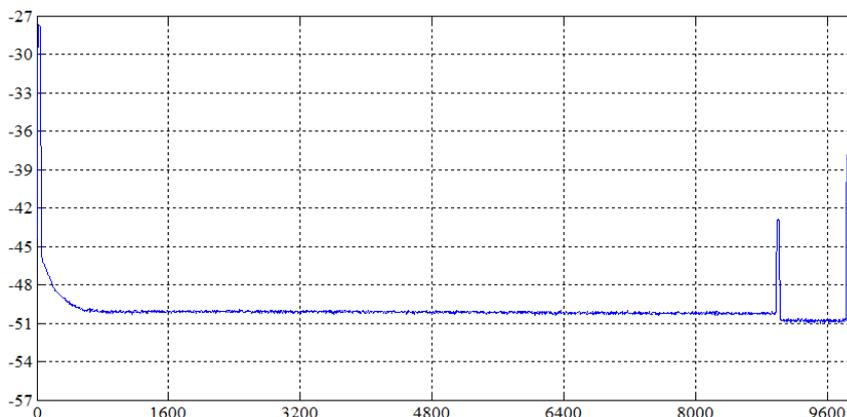


Рисунок 12 – Исследуемая рефлектограмма

Восстановленная с применением койфлета 1-го порядка, жёсткой пороговой обработки и оценкой дисперсии шума на основе МАО рефлектограмма представлена на рисунке 13.

По восстановленной рефлектограмме определено точное значение места повреждения, находящееся в диапазоне 8970,56-8971,20. Таким образом, разница между определенным по рефлектометру и по предложенному методу значениями составляет до 0,1024 м. При

этом погрешность определения повреждения относительно реального места составляет: для определенного с помощью рефлектометра – 0,256 м, для койфлета 1-го порядка – от 0,153 м.

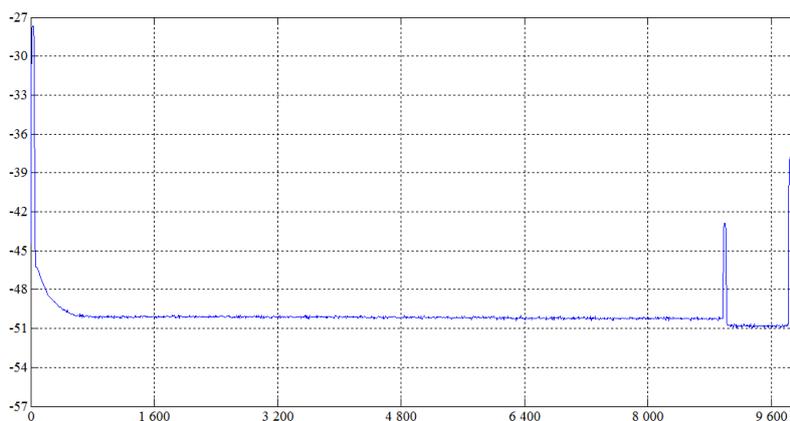


Рисунок 13 – Результаты очистки рефлектограммы с применением койфлета 1-го порядка

Таким образом, предложенный метод позволяет уменьшить погрешность определения повреждения или неоднородности в 1,5 – 2 раза, по сравнению с определяемым значением по рефлектометру, что может значительно повысить точность измерений для рефлектометров с различной разрешающей способностью.

Использование определенных экспериментальным образом оптимальных параметров для вейвлет-анализа рефлектограмм позволяет на основе разработанной в третьей главе диссертации методики добиться высокой точности при определении места повреждения или неоднородности, снизив до минимума погрешность измерения по сравнению с известными современными методами.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований. **В Приложении** приведены акты об использовании результатов диссертации.

Заключение

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

1. Проанализированы существующие методы измерения параметров линий связи и выявлены существенные недостатки при определении неоднородностей и повреждений с их помощью. Разработана методика обработки данных измерений параметров линий связи с применением вейвлет-анализа к рефлектометрическим измерениям, позволяющая уменьшить влияние выявленных недостатков.

2. Выбран метод математической обработки данных рефлектометрических измерений, учитывающий как особенности рефлектограммы, так и влияние шума на результаты измерений.

3. Выявлены показатели качества для оценки эффективности методики обработки рефлектограммы, позволяющие сделать выводы о состоянии тестируемого участка линии связи. Разработана математическая модель рефлектограммы с шумом, присутствующим в линии

связи. На основе математической модели разработан алгоритм для устранения ложных эхо-импульсов и шума.

4. Разработан метод удаления шумов из рефлектограммы с помощью пороговой обработки коэффициентов вейвлет-преобразования.

5. Определены основной и дополнительные показатели качества восстановленной рефлектограммы. Основным показателем следует считать оценку риска пороговой обработки, являющейся наиболее информативной и дающей наиболее точные результаты. Дополнительные показатели: среднеквадратическая погрешность на всем диапазоне измерений и на интервале повреждения; визуальное субъективное оценивание на выбранном интервале; проверка нулевой гипотезы о схожести исходной и восстановленной рефлектограмм.

6. Разработан метод определения сингулярности рефлектограмм на основе анализа детализирующих вейвлет-коэффициентов.

7. Экспериментально определены оптимальные параметры для вейвлет-анализа рефлектограмм: базисный вейвлет для ДВП и ОДВП – койфлет 1-го порядка, симлет 2-го и 5-го порядка; жёсткий тип пороговой обработки вейвлет-коэффициентов; метод расчёта оценки дисперсии шума на основе медианного абсолютного отклонения; базисный вейвлет для определения сингулярности рефлектограммы – вейвлет Добеши 2-го порядка.

8. Полученные результаты использованы в ПАО «МТС» в виде методики для локализации повреждений и неоднородностей линий связи, а также используются в курсе лекций «Направляющие среды электросвязи» кафедры Направляющих телекоммуникационных сред и в лабораторном практикуме «Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах» кафедры Метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях МТУСИ. Реализация результатов диссертации подтверждается соответствующими актами. Для практического применения результаты исследования рекомендуется использовать операторам связи, проектным и исследовательским организациям при оценке качества линий связи, а также при ремонтно-профилактических работах.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Манонина И.В. Применение программы LabVIEW для изучения вопросов поверки измерительных приборов // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 8. – С. 50-52.

2. Манонина И.В. Вейвлет-анализ рефлектограмм с использованием математического пакета Matlab // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 10. – С. 61-66.

3. Манонина И.В. Использование вейвлет-анализа для оценки качества рефлектограмм // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 9. – С. 54-59.

4. Манонина И.В. Определение оптимальных параметров для вейвлет-обработки рефлектограмм // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – № 5.

5. Манонина И.В. Обработка детализирующих вейвлет-коэффициентов для повышения точности рефлектометрических измерений // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2016. – № 227.

Другие статьи и материалы конференций

1. Манонина И.В. Применение вейвлет-анализа для получения более точной информации из рефлектограмм // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». – М.: Информпресс-94, 2012. – С. 94.

2. Манонина И.В. Вейвлет-декомпозиция сигнала для задач локализации повреждений на линиях связи // Сборник трудов конференции «Технологии информационного общества». – <http://www.media-publisher.ru/pdf/proceedings-2016-pechat.pdf> (дата обращения: 06.09.2016), 2016. – С. 44.