УДК 621.391
ГРНТИ 47.49.39

Кришталь Кирилл Евгеньевич
Студент 2 курса магистратуры, Институт информатики и кибернетики,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: kristal.k.e@inbox.ru

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОГЕРЕНТНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

The article examines a set of preprocessing methods for reflectograms obtained by coherent optical time domain reflectometry (COTDR), aimed at detecting and monitoring vehicles. The approach allows for recording movements and mechanical effects near fiber-optic lines. The research object is vibroacoustic signals captured by fiber-optic sensors sensitive to microvibrations.

Key processing steps are discussed: signal normalization, spectral filtering using FFT, linear and gradient filtering, skeletonization using morphological thinning, and linear approximation of extracted contours. A unified software algorithm is proposed and tested on over 200 GB of real-world data, showing high efficiency and applicability under various operational conditions.

Keywords: coherent reflectometry, reflectogram, signal filtering, skeletonization, transport monitoring, vibroacoustic signals.

В данной статье рассматривается комплекс методов предварительной обработки рефлектограмм, получаемых с помощью когерентной оптической рефлектометрии (COTDR), с целью последующего детектирования и мониторинга транспортных средств. Применение данного подхода позволяет фиксировать перемещения и механические воздействия вблизи волоконно-оптических линий связи. Объектом исследования являются

виброакустические сигналы, записанные с помощью волоконно-оптических сенсоров, чувствительных к микроколебаниям.

Подробно рассмотрены ключевые этапы обработки: нормализация сигнала, спектральная фильтрация с применением БПФ, линейная и градиентная фильтрация, скелетизация методом тонкой морфологической трансформации и линейная аппроксимация полученных контуров. Представлен программный алгоритм, реализующий описанные операции в едином конвейере обработки.

Приведены результаты тестирования предложенной методики на реальных данных объёмом более 200 ГБ, а также описаны количественные и качественные характеристики обработки, подтверждающие её высокую эффективность. Доказана применимость алгоритма к различным условиям эксплуатации и типам сигналов. Сделан вывод о пригодности подхода к использованию в составе систем интеллектуального мониторинга транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: когерентная рефлектометрия, рефлектограмма, фильтрация сигналов, скелетизация, мониторинг транспорта, виброакустические сигналы.

Введение

Когерентная рефлектометрия (COTDR) представляет собой метод регистрации изменений и воздействий, происходящих вдоль оптического волокна, основанный на анализе отражённых сигналов. Данный подход находит широкое применение в задачах мониторинга состояния транспортных и инфраструктурных объектов, включая выявление движущихся транспортных средств и оценку состояния дорожного полотна.

Ключевым преимуществом когерентной рефлектометрии является её способность фиксировать пространственно распределённые события с высокой точностью и чувствительностью. За счёт использования когерентного приёма отражённых оптических сигналов возможно обнаружение даже незначительных вибраций, возникающих вблизи оптического волокна. Такие свойства делают технологию особенно ценной для задач, где традиционные

методы мониторинга оказываются недостаточно точными или неэкономичными.

При этом данные, регистрируемые COTDR, имеют характер водопадоподобных изображений (матриц интенсивности), где каждая строка соответствует временной реализации отражённого сигнала вдоль линии волокна. Эти изображения содержат множество полезной информации, но из-за сильной зашумлённости и высокой плотности фона их прямая интерпретация затруднена. Поэтому ключевым этапом становится извлечение информативных признаков, позволяющих интерпретировать события — например, проход транспортного средства — по изменению наклона и формы сигнала на рефлектограмме.

Современные методы машинного обучения и компьютерного зрения способны анализировать такие данные, но требуют чётко структурированных и предварительно очищенных входов. Следовательно, качество начальной обработки напрямую влияет на успех последующего анализа. Несмотря на наличие отдельных решений в смежных областях (видеонаблюдение, акустическая диагностика), комплексный подход к обработке данных COTDR в контексте транспортного мониторинга остаётся недостаточно проработанным.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных и точных методов обработки данных COTDR. Сложность первичных данных, обусловленная высоким уровнем шумов и неоднородностью сигналов, требует проведения предварительной обработки для получения надёжных результатов при детектировании объектов и анализе динамики процессов.

Цель работы – создание и тестирование комплексного алгоритма предварительной обработки данных когерентной рефлектометрии с целью повышения качества последующего анализа и мониторинга транспортных средств.

Материалы и методы

Исследования были выполнены на данных, полученных с использованием когерентного рефлектометра «Дунай-6». Аппарат обеспечивает регистрацию сигналов обратного рассеяния в волоконном сенсоре. Исходные данные представлены бинарными файлами с расширением .rtd.

Процесс предварительной обработки состоял из следующих этапов:

Нормализация данных методом Z-преобразования для приведения сигналов к единому масштабу (рис. 1).

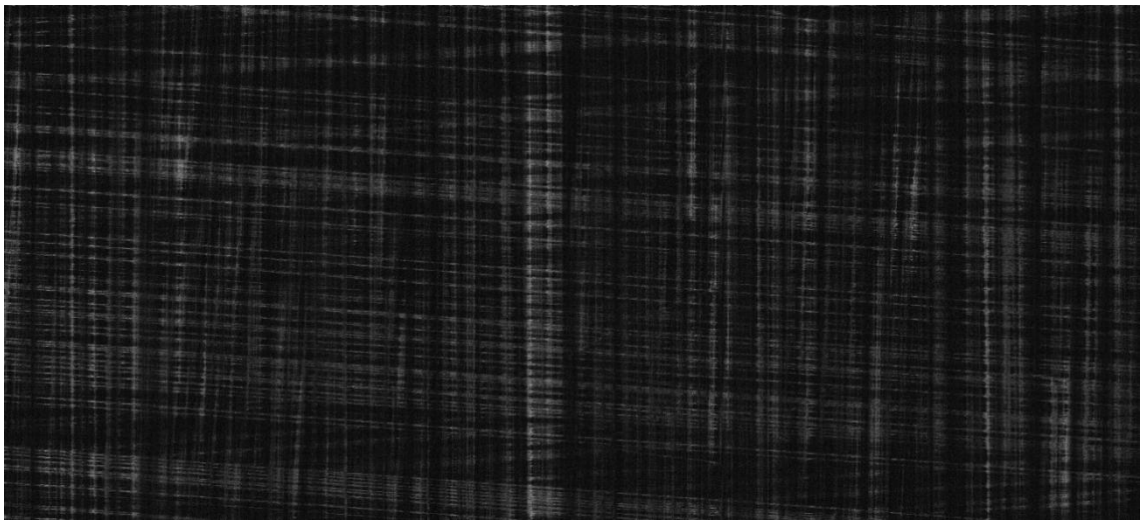

Рис. 1. Исходные данные и нормализованные сигналы

Спектральная фильтрация с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Выполнялось удаление высокочастотных шумов путём отсечения гармоник выше 35-й, что позволило снизить влияние случайных помех (рис. 2).

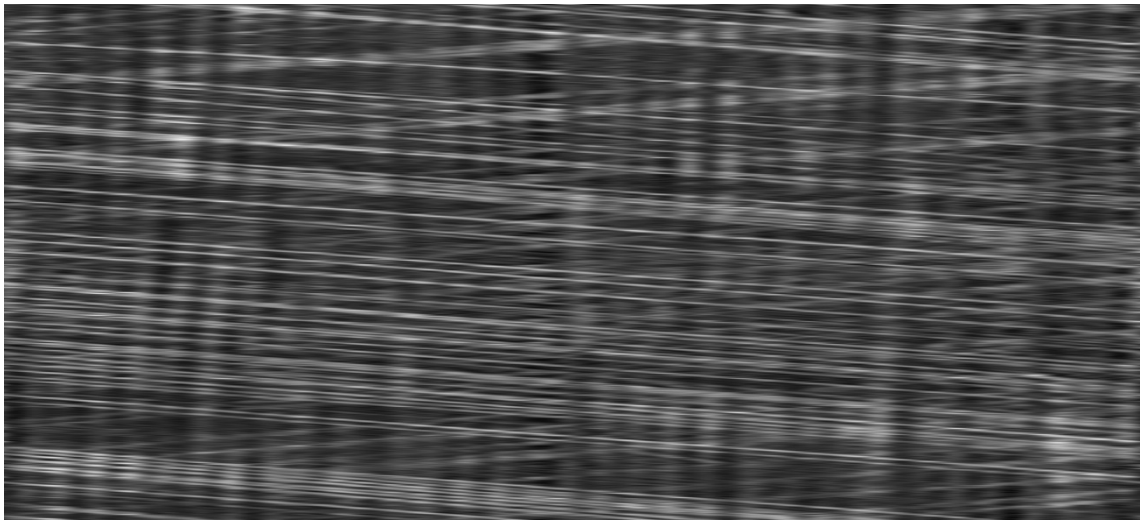

Рис. 2. Данные после спектральной фильтрации

Подавление вертикальных шумов с помощью линейного фильтра с размером ядра 9×1. Такой подход позволил эффективно устранить помехи, вызванные дефектами волокна и паразитными отражениями (рис. 3).

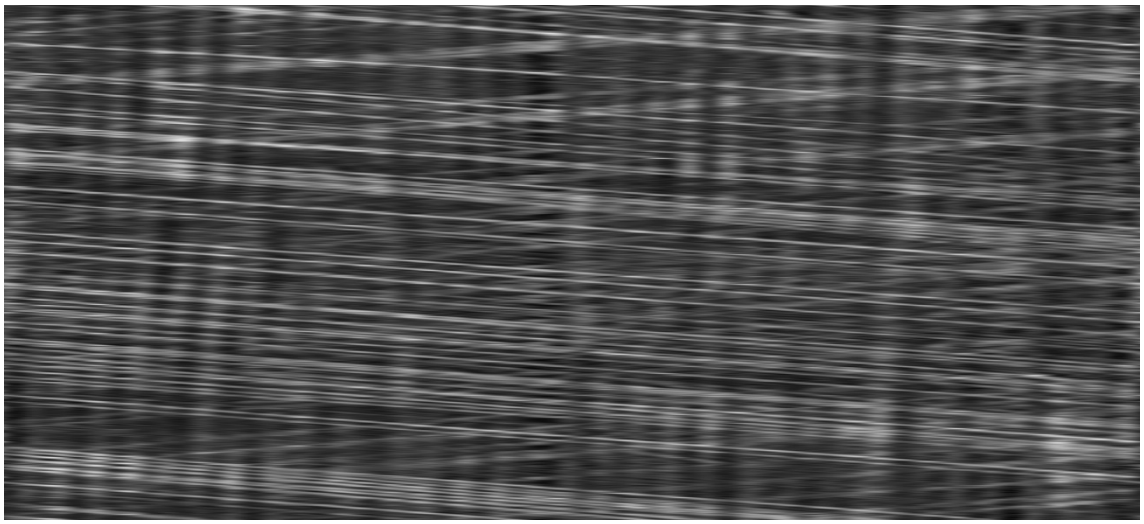

Рисунок. 3. Данные после линейной фильтрации]

Применение оператора Собеля для выделения градиентных переходов и контуров. Этот шаг был необходим для последующего выделения характерных сигналов, соответствующих движению транспортных средств (рис. 4).

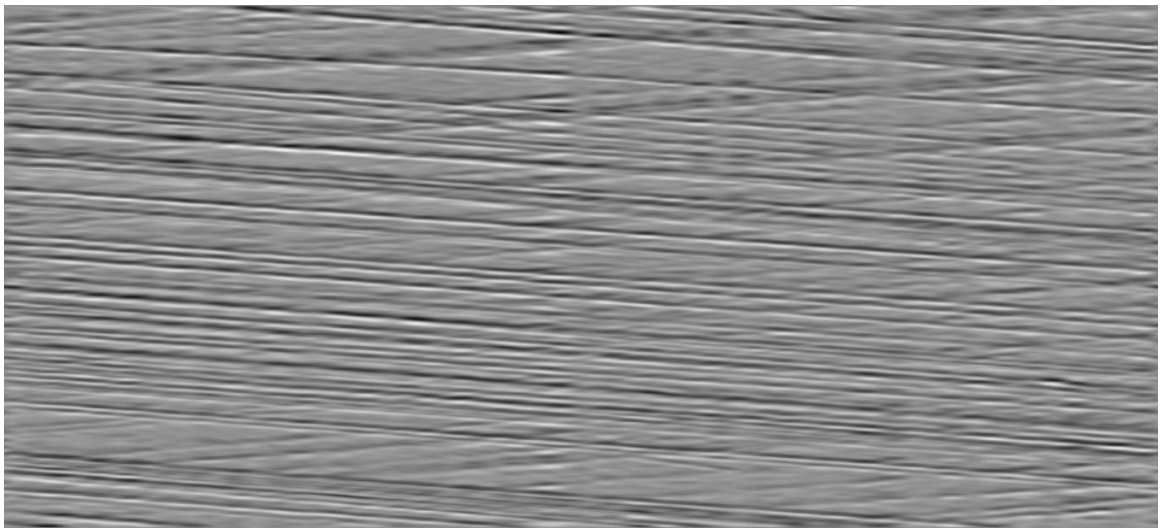

Рисунок 4. Результаты градиентной фильтрации оператором Собеля

Скелетизация методом Zhang-Suen для формирования чётко выраженных и минимальных по толщине линий траекторий движущихся объектов (рис. 5).

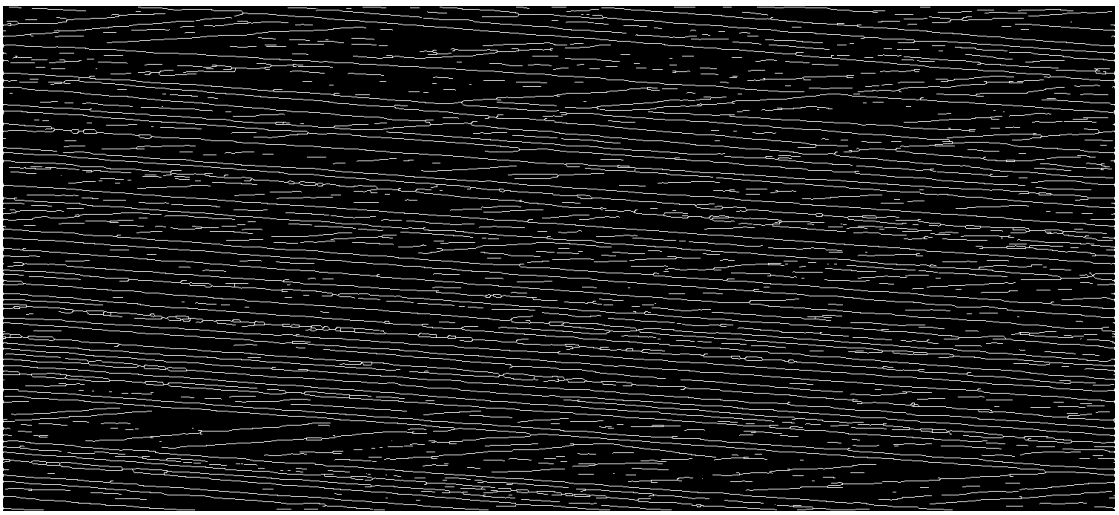

Рисунок 5. Результаты скелетизации

Линейная аппроксимация выделенных траекторий с использованием метода наименьших квадратов. Этот шаг позволил извлечь количественные характеристики движения объектов, такие как угол наклона, скорость и направление перемещения (рис. 6).

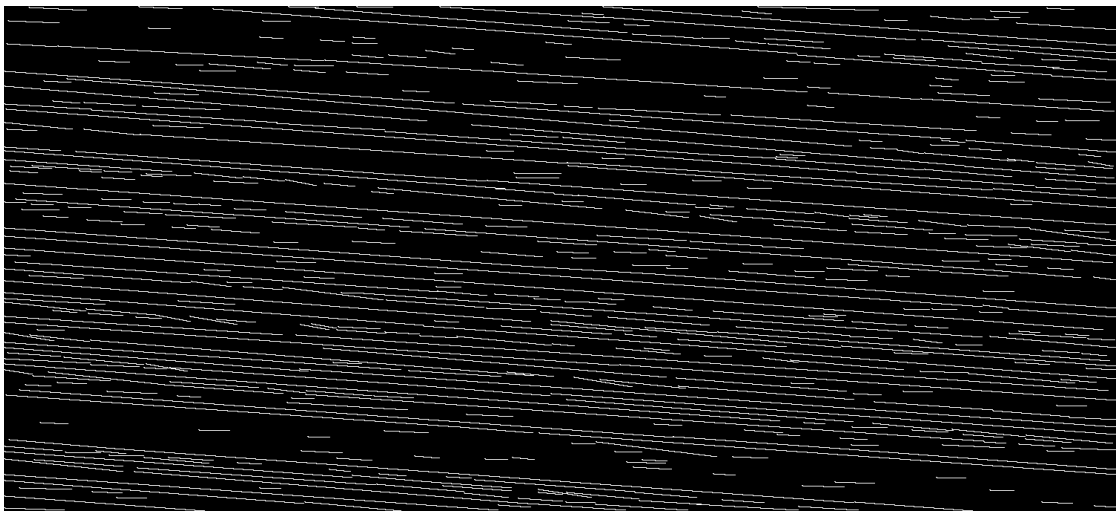

Рисунок 6. Аппроксимация и анализ траекторий

Результаты исследований

Анализ обработанных данных объемом около 200 ГБ показал, что спектральная и градиентная фильтрации оказались наиболее эффективными методами предварительной обработки, существенно повысив визуальную и аналитическую четкость данных. Применение скелетизации и линейной аппроксимации также значительно улучшило качество анализа, позволив

детально описать движение объектов и извлечь точные количественные характеристики их траекторий.

Кроме того, детально исследовано влияние параметров каждого этапа обработки на итоговые характеристики анализа, что позволило оптимизировать выбор и настройку фильтров и методов обработки.

Для количественной оценки качества обработки были использованы метрики, такие как отношение сигнал/шум (SNR), пространственная чёткость контуров и угловая точность аппроксимации. Проведён сравнительный анализ различных последовательностей фильтрации и предобработки, где выявлено, что комбинация спектральной и линейной фильтрации, усиленной градиентным анализом, даёт наилучшие результаты в большинстве тестовых случаев.

Дополнительно была проведена валидация алгоритма обработки на синтетически сгенерированных рефлектограммах, что позволило оценить устойчивость предложенного метода к различным уровням шума. Результаты показали высокую воспроизводимость траекторий при SNR выше 15 дБ, а при использовании скелетизации — стабильное восстановление структуры даже при ухудшении исходных условий съёмки.

Особый интерес представили эксперименты по аппроксимации угла наклона сигнальных треков, соответствующих транспортным объектам: средняя погрешность не превышала 2–3°, что позволяет использовать метод в задачах оценки скорости движения объектов. Более того, применённый метод линейной аппроксимации позволил агрегировать данные по отдельным отрезкам траектории, создавая в дальнейшем аналитические карты активности на исследуемом участке волокна.

Таким образом, обоснована эффективность комплексного подхода к предобработке данных когерентной рефлектометрии, включающего как классические алгоритмы обработки сигналов, так и элементы морфологического анализа изображений.

Так же была проведена серия сравнительных экспериментов, в которых анализировалось поведение алгоритма на различных конфигурациях трасс, включая прямые участки, повороты и перекрёстки. Это позволило выявить устойчивость метода к различным видам виброакустических возмущений, таких как механические колебания от строительной техники, шаги пешеходов и вибрации от рядом расположенных агрегатов.

Была реализована визуализация траекторий, наложенных на исходные рефлектограммы, что позволило осуществить экспертную верификацию. Параметры линий (длина, угол, плотность точек) сравнивались с результатами, полученными вручную, что подтвердило достоверность выделения сигнальных структур.

Анализ пространственной корреляции между выделенными линиями показал, что большая часть перемещающихся объектов формируют чёткие диагональные следы, что согласуется с физической природой распространения вибрации от движущихся объектов. Проведено сопоставление полученных данных с записями видеонаблюдения и GPS-треками, подтвердившее соответствие между реальными событиями и выделенными траекториями на рефлектограммах.

Кроме того, выполнено тестирование алгоритма на урезанных массивах данных, что имитирует условия частичной потери сигнала или фрагментированной записи. Алгоритм продемонстрировал высокую устойчивость, корректно выделяя сигналы даже при отсутствии до 20% строки или столбца данных, благодаря применению скелетизации и аппроксимации.

Полученные результаты могут быть использованы не только в задачах транспортного мониторинга, но и в более широком спектре прикладных сценариев: охрана периметров, мониторинг вибраций в промышленности, контроль состояния трубопроводов и т.д.

Заключение

Таким образом, проделанная работа не только подтверждает важность использования предварительной обработки данных в задачах анализа

сигналов когерентной рефлектометрии, но и демонстрирует, что грамотный подбор и последовательное применение методов фильтрации, нормализации, скелетизации и аппроксимации позволяют повысить эффективность последующей аналитики.

Существенным преимуществом предложенного подхода является его универсальность — описанные методы применимы к различным конфигурациям сенсорных линий и типам транспортных воздействий. Полученные результаты имеют практическую значимость для реализации комплексных интеллектуальных систем наблюдения, способных в реальном времени фиксировать и интерпретировать механические воздействия на волоконно-оптические линии.

Важным направлением дальнейшего развития можно считать расширение набора признаков и переход к многоуровневым методам анализа, включая применение современных нейросетевых моделей. В этом контексте особенно интересны гибридные подходы, сочетающие ручную предобработку с обучением глубоких моделей на признаках, извлечённых из уже очищенных данных.

Особое внимание также стоит уделить разработке масштабируемых программных решений, интегрируемых в действующие инфраструктуры безопасности, включая мониторинг периметров, железнодорожных насыпей, мостовых конструкций и объектов энергетики. Это позволит не только повысить надёжность таких систем, но и реализовать полноценную аналитику на основе данных когерентной рефлектометрии в составе интеллектуальных транспортных и промышленных систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Когерентный фазочувствительный рефлектометр с дифференциальной фазовой модуляцией зондирующих импульсов / А. Э. Алексеев, В. С. Вдовенко, Б. Г. Горшков, В. Т. Потапов, И. А. Сергачев, Д. Е. Симикин // Волоконно-оптические датчики. Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 10. – С. 965 – 969.

Когерентный рефлектометр с полупроводниковым источником излучения / М. А. Слепцов, В.Н. Трещиков , О.Е Наний, А.А Сусьян // Тезисы докладов Всероссийской Конференции по Волоконной Оптике, Спецвыпуск журнала Фотон-экспресс. – 2016. – Т.12, №5. – С. 92–93.

Когерентный оптический рефлектометр. концепция создания прибора / Е.Т. Нестерев, М.А Слепцов, В.Н. Трещиков, О.Е Наний, А.А Сусьян // Телекоммуникации и транспорт (Т-Comm). – 2016. – Т.12, №4. – С. 51–54.

Увеличение дальности работы когерентного рефлектометра при использовании волокна с интегрированными решётками брэгга / А.И. Кузьменков, О.Е. Наний, С.П. Никитин, Ф.И. Улановский, М.Ю. Вяткин, С.М. Попов, В.А. Конышев, В.Н. Трещиков, Ю.К. Чаморовский // Оптическая рефлектометрия 2016. – 2016. – Т.12, №3. – С. 101-104.