

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Магистрант группы 50330023 Богданова Е.А.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Гулай А.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

1. Теоретические основы анализа акустических шумов

Анализ акустических шумов, производимых различным оборудованием является перспективным методом неинвазивного контроля состояния исследуемого объекта.

Спектрограмма — это графическое представление спектра сигнала, изменяющегося во времени. Она используется для анализа частотного содержания сигнала, например, в аудио, видео или радиочастотах.

Акустическая диагностика — это метод неразрушающего контроля, который используется для обнаружения дефектов в различных механических системах. Разработка спектрального метода акустической диагностики включает следующие этапы:

1 Сбор данных. Звук, издаваемый исследуемым оборудованием, записывается с помощью микрофона и сохраняется в виде цифрового сигнала. Правильный метод сбора сигнала является предпосылкой и сутью эффективного использования точной диагностики неисправностей.

2 Обработка сигнала. Цифровой сигнал обрабатывается с помощью преобразования Фурье для получения частотного спектра сигнала.

3 Спектральный анализ. Частотный спектр анализируется для определения доминирующих частотных компонентов, присутствующих в звуке, генерируемом машиной.

4 Сравнение. Преобладающие частотные составляющие сравниваются с ожидаемыми частотными составляющими исправного зубодолбежного станка.

5 Диагностика. На основе сравнения определяется исправность зубодолбежного станка.

Основные понятия

1. Спектр сигнала:

- Спектр показывает, какие частоты присутствуют в сигнале и с какой амплитудой.

- Для его получения применяются преобразования, такие как дискретное преобразование Фурье (DFT).

2. Спектрограмма:

- Представляет собой визуализацию частотного спектра сигнала во времени. На графике обычно:

- Горизонтальная ось — время.
- Вертикальная ось — частоты.
- Цветовая шкала или интенсивность — амплитуда (сила) частот.

Методы спектрального анализа

1. Преобразование Фурье (FFT):

- Быстрое преобразование Фурье позволяет преобразовать временной сигнал в частотную область.
- Используется для построения спектра мощности шума: показывает, насколько интенсивен шум на каждой частоте.

2. Автокорреляционный анализ:

- Исследует, как шум изменяется во времени, что помогает выявить скрытые периодичности.

3. Среднеквадратичный анализ (RMS):

- Часто используется для оценки общей мощности шума.

4. Мощность спектра (PSD):

- Функция плотности спектра мощности оценивает, сколько энергии содержится в шуме на каждой частоте.

Данное направление является весьма перспективным, поскольку позволяет контролировать состояние оборудования без прерывания производственного цикла.

Осложнением для проведения подобного контроля является необходимость очистки исследуемых сигналов от сопутствующих случайных шумов а также звуков, не относящихся к работе исследуемого оборудования.

Практическая часть исследования

На данный момент исследования проводились на основе аудиофайлов формата Wav из открытой библиотеки «MIMI Dataset: Sound Dataset for Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection». Этот набор данных представляет собой звуковой набор данных для неисправного исследования и проверки промышленных машин (набор данных MIMI). Он содержит звуки, генерируемые четырьмя типами промышленных машин, то есть клапанов, насосов, вентиляторов и слайд-рейсеров. Каждый тип машины включает в себя семь отдельных моделей продукта, а данные для каждой модели содержат обычные звуки (от 5000 секунд до 1000 секунд) и аномальные звуки (около 1000 секунд). Чтобы напоминать реальный сценарий, были записаны различные аномальные звуки (например, загрязнение, утечка, вращающийся дисбаланс и повреждение рельса). Кроме того, фоновый шум, записанный на нескольких реальных фабриках, был смешан со звуками машины. Звуки были записаны восьмиканальным микрофонным массивом с частотой дискретизации 16 кГц и 16 бит на образец. Набор данных MIMI помогает в тесте для диагностики неисправностей на основе звука. Пользователи могут проверить производительность для определенных функций, например, неконтролируемого обнаружения аномалий, обучения переносу, надежности шума и т. д.

Этот набор данных доступен компанией Hitachi, Ltd. в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) [1].

Для анализа данные загружаются из двух разных папок. Одна папка содержит эталонные значения. Другая – файлы с аномальными звуками. Аномальные файлы

для анализа выбираются по и x порядковому номеру в папке. Эталонные анализируются все. Это замедляет работу программы, однако увеличивает точность определения соответствия.

Для нормально анализа сигналов их требуется заранее обработать. Для этого используется функция `preprocess_audio`. Она выполняет несколько этапов обработки:

1. **Чтение аудиофайла:**

- Считывается аудиофайл с помощью функции `wavfile.read`.

Возвращаются частота дискретизации (`sample_rate`) и сам сигнал (`signal`).

- Если аудиосигнал является многоканальным (например, стерео), берется только первый канал.

2. **Фильтрация низких частот:**

- Применяется низкочастотный фильтр через функцию `apply_lowpass_filter`. Это позволяет убрать высокочастотные шумы и сохранить полезную низкочастотную информацию.

3. **Нормализация длины сигнала:**

- Сигнал ограничивается до заданной длины `sequence_length`. Если длина сигнала меньше, то недостающие значения заполняются с использованием метода «крайних значений» (`np.pad` с параметром `'edge'`).

4. **Нормализация амплитуды:**

- Амплитуда сигнала нормализуется так, чтобы её значения находились в диапазоне от -1 до 1. Это помогает уравнивать разницу в громкости между файлами.

5. **Получение спектра:**

- Применяется быстрое преобразование Фурье (`fft`) для получения спектрального представления сигнала. Выбираются только первые `sequence_length` частотных компонент.

- Спектр сглаживается с использованием фильтра Савицкого-Голея (`savgol_filter`).

6. **Возврат спектра:**

- После обработки возвращается спектр, который является удобным форматом для дальнейшего анализа (например, сравнение или визуализация).

7. **Обработка исключений:**

- Если во время обработки файла возникает ошибка (например, файл поврежден или имеет неправильный формат), информация об ошибке выводится в консоль, а функция возвращает None.

Далее происходит поиск наиболее схожего спектра в наборе данных. Для этого используется функция `find_closest_spectrum`. Вот подробное описание её функционала:

1. **Входные параметры:**

- `signal_spectrum`: спектр целевого сигнала, который необходимо сравнить с эталонными.
- `all_data`: список спектров эталонных сигналов.
- `file_names`: список имён файлов, соответствующих спектрам из `all_data`.

2. **Преобразование целевого спектра:**

- Целевой спектр (`signal_spectrum`) преобразуется в двумерный массив (размерность $1 \times n$) с помощью `reshape(1, -1)`. Это необходимо, чтобы корректно использовать функцию `cosine_similarity`.

3. **Инициализация переменных:**

- `closest_match`: будет хранить спектр, который максимально похож на целевой.
- `closest_score`: значение метрики схожести (в данном случае косинусного сходства) для наиболее схожего спектра. Изначально установлено в -1.
- `closest_file`: имя файла, соответствующего наиболее схожему спектру.

4. **Цикл сравнения:**

- Перебираются все эталонные спектры (`data`) и соответствующие им имена файлов (`file_name`) с помощью `zip(all_data, file_names)`.

- Для каждого эталонного спектра вычисляется косинусное сходство между целевым и текущим эталоном с помощью `cosine_similarity`. Результат — это значение от -1 до 1 , где 1 означает полное совпадение.

5. Поиск лучшего совпадения:

- Если текущий результат сходства (`similarity`) больше, чем текущее максимальное значение (`closest_score`), то:

- `closest_score` обновляется на новое значение сходства.
- `closest_match` обновляется на текущий спектр.
- `closest_file` сохраняет имя текущего файла.

6. Возврат результата:

- Функция возвращает:

- `closest_file`: имя файла, содержащего наиболее схожий спектр.
- `closest_score`: значение метрики сходства для этого файла.

Основное назначение:

Эта функция помогает найти в наборе эталонных спектров тот, который наиболее похож на целевой (например, при анализе аудиосигналов). Сравнение выполняется с использованием метрики **косинусного сходства**, которая показывает, насколько "угол" между спектрами близок к 0° , где полное совпадение соответствует значению 1 .

В дополнение к основному функционалу программы было принято решение о выводе спектрограмм для выбранного сигнала, ближайшего к нему эталона, а также демонстрация коэффициента соответствия и предупреждения, если данный коэффициент меньше указанного значения, что позволяет отслеживать появление серьёзных отклонений в работе. Для реализации данных функций использовалась библиотека работы с графикой.

Результат работы созданной программы показан на рисунке 1.

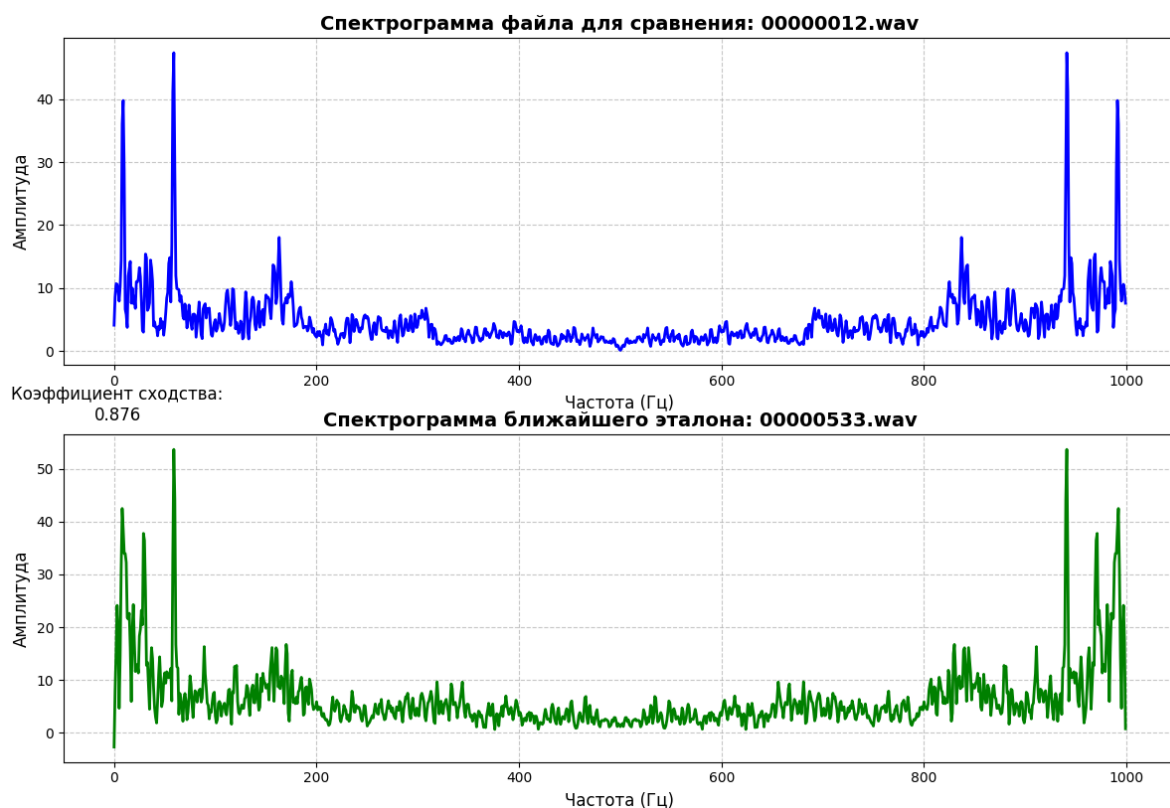


Рисунок 1. Сравнение спектрограмм

Использование данной программы позволяет сделать выводы о проценте совпадения исследуемого сигнала с имеющимися эталонами. Так же, данное исследование показало, что значительные отклонения можно наблюдать при значениях коэффициента сходства ниже 0,85 (при данных характеристиках исследуемого сигнала). В связи с этим, в подобной ситуации необходимо вывести на экран сообщение о неполадке в исследуемом устройстве и необходимости более тщательной диагностики оборудования.

Литература

1. Harsh Purohit, Ryo Tanabe, Kenji Ichige, Takashi Endo, Yuki Nikaido, Kaori Suefusa, and Yohei Kawaguchi, "MIMII Dataset: Sound Dataset for Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection," arXiv preprint arXiv:1909.09347, 2019.