

РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 004.93.2:004.932.2

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186307>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PHUZND>

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ
ИЗ СЖАТОГО СТРУКТУРИРОВАННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**

Игорь Сергеевич Сергеев^{1✉}, Николай Евгеньевич Балакирев²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

¹✉ noctisik76@gmail.com

² balakirev1949@yandex.ru

Аннотация. В статье описывается метод восстановления и воспроизведения звуковых сигналов, представленных в сжатом структурированном виде. Основной задачей является реализация универсального механизма восстановления звукового потока в оперативной памяти и его последующего воспроизведения в реальном времени, независимо от применённой схемы оптимизации. Разработанная программная система обеспечивает загрузку сжатых файлов собственных форматов CUWAV, преобразование их содержимого в звуковой поток формата WAV, передачу потока в звуковое устройство и визуализацию сигнала в виде масштабируемой

осциллограммы. Предложенный метод позволяет использовать систему в качестве универсального расширяемого модуля в составе технических комплексов анализа, мониторинга или архивации звуковых данных.

Ключевые слова: звуковой сигнал, структурное сжатие, оптимизация, восстановление, формат CUWAV, информационное содержание звука, сжатие с потерями.

Для цитирования: Сергеев И.С., Балакирев Н.Е. Универсальный метод восстановления звуковых сигналов из сжатого структурированного представления // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186307>

**RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND
COMMUNICATIONS**

Original article

**UNIVERSAL RECONSTRUCTION METHOD FOR AUDIO SIGNALS
FROM COMPRESSED STRUCTURED DATA**

Igor S. Sergeev¹, Nikolai E. Balakirev²

^{1, 2} Moscow Aviation Institute

Moscow, Russian Federation

¹ ✉ noctisik76@gmail.com

² balakirev1949@yandex.ru

Abstract. This paper presents a method for the reconstruction and playback of audio signals represented in a compressed structured format. The primary objective is to implement a universal mechanism for restoring the audio stream in system memory and enabling its real-time playback, regardless of the applied optimization scheme.

The developed software system supports loading compressed CUWAV-format files, converting their contents into a WAV-format audio stream, transmitting the stream to an audio output device, and visualizing the signal as a scalable waveform.

The proposed method allows the system to be used as a universal and extensible module within technical complexes for audio data analysis, monitoring, or archiving.

Keywords: audio signal, structural compression, optimization, reconstruction, CUWAV format, informational content of sound, lossy compression.

For citation: Sergeev I.S., Balakirev N.E. Universal reconstruction method for audio signals from compressed structured data // Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186307>

Введение

Звуковая информация играет ключевую роль в технических системах, отвечающих за регистрацию и анализ событий. Она востребована в телекоммуникациях, промышленности и аудиофиксации, где необходимо точно фиксировать речевые и звуковые сигналы.

Так, в авиации реализована обязательная регистрация аудиособытий с использованием речевых самописцев (Cockpit Voice Recorder, CVR), фиксирующих переговоры экипажа, радиосообщения и фоновый звуковой контекст. Аналогичные

требования предъявляются к системам аудиофиксации в железнодорожной отрасли — в частности, к локомотивным регистраторам переговоров, применяемым на транспорте ОАО «РЖД» [1-4].

Кроме того, в ряде промышленных решений, включая системы IP-телефонии (например, Asterisk), аудиофайлы также записываются в формате WAV без сжатия. Отсутствие встроенных механизмов эффективного сжатия в подобных системах приводит к значительным объёмам хранимых данных и росту требований к вычислительным ресурсам при их обработке и резервном копировании [5].

Во всех перечисленных случаях звуковая информация накапливается в значительных объёмах, особенно при длительном хранении и резервном копировании. Это актуализирует задачу оптимизации объёма акустической информации без потери качества информационного содержания [6]. Применение методов сжатия становится актуальным элементом таких систем — при этом подход к сжатию должен соответствовать типу звукового сигнала и его назначению.

В зависимости от типа системы аудиорегистрации и предъявляемых к ней требований могут применяться различные подходы к сжатию звуковой информации. Так, в случае систем телефонной связи (BATS) или регистрации речи (VCR) основным объектом хранения является речевая информация, которая, как правило, содержит повторяющиеся участки, а также фрагменты с минимальным информационным содержанием (например, паузы в речи или тишина). Для таких сигналов может быть целесообразен метод сжатия с потерями, основанный на фрагментации звукового потока и оптимизации малозначимых фрагментов — с частичным их удалением и последующей амплитудной аппроксимацией при

восстановлении. Это позволяет существенно снизить объём хранения без потери восприятия смысла записи.

В то же время в системах, где требуется высокая достоверность сигнала, например в музыкальном архивировании, акустическом контроле или фиксации событий, применение такого подхода недопустимо. Несмотря на то, что и в этом случае допускается сжатие с потерями, оно должно быть реализовано через оптимизацию структурного представления [7] звукового потока, обеспечивающего максимальную близость восстановленного сигнала к оригиналу.

Таким образом, оба подхода основаны на уплотнении звуковой информации с частичной потерей данных, но различаются по степени допустимого искажения и области применения. Объединяющим требованием для таких задач остаётся структурированное представление звукового потока, позволяющее удалить избыточность при сохранении качественных характеристик. При этом независимо от используемых методов сжатия, в практической эксплуатации требуется универсальный расширяемый программный инструмент, способный:

- корректно интерпретировать формат сжатого файла;
- определить проведенные над акустическими данными алгоритмы сжатия;
- определить алгоритмы восстановления и восстановить звуковой поток в оперативной памяти;
- воспроизвести его в реальном времени с возможностью визуального анализа.

Целью данной работы является разработка и реализация программного метода, обеспечивающего восстановление звукового потока из сжатых структурированных

форматов (в частности, собственного формата .cuwav) и его воспроизведение в режиме реального времени с возможностью визуального анализа сигнала.

Практическая значимость предложенного решения заключается в его универсальности: система не зависит от конкретной схемы кодирования, работает в оперативной памяти, поддерживает расширение за счёт подключения дополнительных алгоритмов восстановления и может быть интегрирована в существующие комплексы аудиорегистрации и хранения акустической информации.

Теоретические основы восстановления звуковой информации

Восстановление звукового сигнала представляет собой процесс воссоздания звуковой волны из сжатого или искажённого представления, пригодного для последующего анализа или прослушивания. Современные форматы звукового сжатия, такие как MP3, AAC, OGG и другие, используют комбинацию психоакустических моделей и преобразований во временно-частотной области (например, преобразование Фурье), с потерей части информации, незаметной для человеческого слуха [8]. Восстановление в таких форматах заключается в обратном преобразовании и интерпретации частотных коэффициентов с последующим преобразованием в временную шкалу.

В отличие от подобных подходов, реализованный метод обработки звукового потока оперирует непосредственно исходными амплитудными значениями без использования частотных преобразований. При этом сохраняются без изменений только структурно значимые значения амплитуды и количество отсчётов между ними, определённые в характерных точках — локальных максимумах и минимумах амплитуды звукового сигнала, отражающих смену направления колебаний [7]. Это

позволяет обеспечить более точную реконструкцию сигнала, особенно в системах, ориентированных на технический или речевой анализ.

При данном подходе к обработке звукового потока можно выделить уровни и этапы оптимизации, которые зависят от целей хранения и типа аудиосигнала.

Визуально схема оптимизации представлена в таблице 1:

Таблица 1. Многоуровневая оптимизация акустической информации

Уровень	Название уровня	Этапы
3.	Методы сжатия без потерь	2. Энтропийное кодирование (алгоритм Хаффмана, арифметическое кодирование)
		1. Словарное кодирование (алгоритм Лемпеля-Зива-Уэлча, LZW)
2.	Оптимизация структурированного представления звукового потока	2. Оптимальное кодирование (дифференциальное кодирование, побитовая упаковка значений амплитуды)
		1. Оптимизация фрагментов по уровню информационного содержания
1.	Структуризация звукового потока	3. Разметка фрагментов звукового потока
		2. Фрагментация (фиксированная и совокупная)
		1. Структуризация
0.	Исходный неоптимизированный звуковой поток	Получение байтовой последовательности исходного звукового потока

В реализованной системе сжатия акустических данных в формат CUWav (Compressed Uniprim [6] WAV) пользователю предоставляется возможность самостоятельно выбирать методы и этапы оптимизации в зависимости от специфики аудиосигнала и задач хранения. Вместе с тем, восстановление звукового потока

выполняется универсально, независимо от применённых ранее методов сжатия, что обеспечивает возможность расширения системы в дальнейшем.

Процесс восстановления сжатого структурированного звукового файла в формат WAV осуществляется путём последовательного применения декодирующих процедур в порядке, обратном этапам сжатия. Если завершающим этапом кодирования выступало энтропийное сжатие, восстановление начинается с соответствующего декодирования (например, по алгоритму Хаффмана или арифметического кодирования). Далее последовательно выполняются процедуры словарного декодирования [11] (например, LZW), распаковки оптимизированного представления и реконструкции амплитудной последовательности, соответствующей формату WAV.

Многоуровневая оптимизация акустической информации

В предлагаемом подходе звуковой поток проходит через последовательные уровни обработки, начиная с этапа структуризации, на котором анализируется временная последовательность амплитудных значений. В ходе анализа выделяются характерные точки — локальные максимумы и минимумы, отражающие смену направления колебаний. Эти точки служат опорой для построения компактных структур, описывающих форму звуковой волны.

Далее выполняется фрагментация сигнала — разбиение на участки фиксированной длины (фиксированная фрагментация), для которых рассчитываются качественные характеристики: диапазон разбросов значений амплитуды, количество отсчётов, частота повторов и др. На основе этих параметров реализуется разметка, позволяющая классифицировать фрагменты по уровню информационного

содержания [9-10] (совокупная фрагментация). По итогу совокупной фрагментации проводится разметка и дополнительный анализ, позволяющие, например, отделить фрагменты минимального информационного содержания от фрагментов насыщенного информационного содержания.

Информационное содержание звукового фрагмента — это мера значимости участка звукового сигнала, определяемая с двух позиций:

- с точки зрения человеческого восприятия — отражает наличие в сигнале осмысленных звуков (речи, событий — таких, как сигнал тревоги, музыки),
- с точки зрения технического анализа — характеризуется амплитудной сложностью сигнала, включая диапазон колебаний, наличие переходов и изменений формы волны.

Фрагменты с минимальным информационным содержанием (МИС) — это участки, не содержащие существенных изменений, таких как тишина или монотонный шум. Эти фрагменты могут быть заменены описателями без значительной потери восприятия [8, 18].

На следующем уровне — оптимизации структурированного представления — пользователь может выбрать подходящий путь обработки: оптимизацию по фрагментам или безфрагментную оптимизацию всех структур, описывающих звуковой поток. Например, для музыкальных данных предпочтительно избегать удаления участков с затухающими амплитудами, сохраняя при этом полную выразительность сигнала, которые могут трактоваться как фрагменты с МИС при анализе.

Дополнительно применяются методы уплотнения, такие как:

- Дифференциальное кодирование — замена абсолютных значений амплитуды на их приращения (дельты). Например, последовательность 128, 130, 129, 131 преобразуется в 128, 2, 1, 2. Это снижает энтропию потока и повышает эффективность последующего кодирования.
- Побитовая упаковка — представление дельт или структурных параметров с минимально достаточной разрядностью.

На завершающем уровне применяются методы сжатия без потерь — в том числе словарное кодирование (LZW) [11] и энтропийные алгоритмы (Хаффмана, арифметическое кодирование). Алгоритм Шеннона–Фано, несмотря на историческую значимость, на практике в аудиокодеках не используется [12-15].

На рисунке 1 представлен интерфейс реализованной системы, в котором пользователь может гибко выбирать сценарий оптимизации и просматривать результаты сжатия.

Результат сжатия сохраняется отдельным файлом в формате CUWAV (сжатый структурированный звуковой файл).

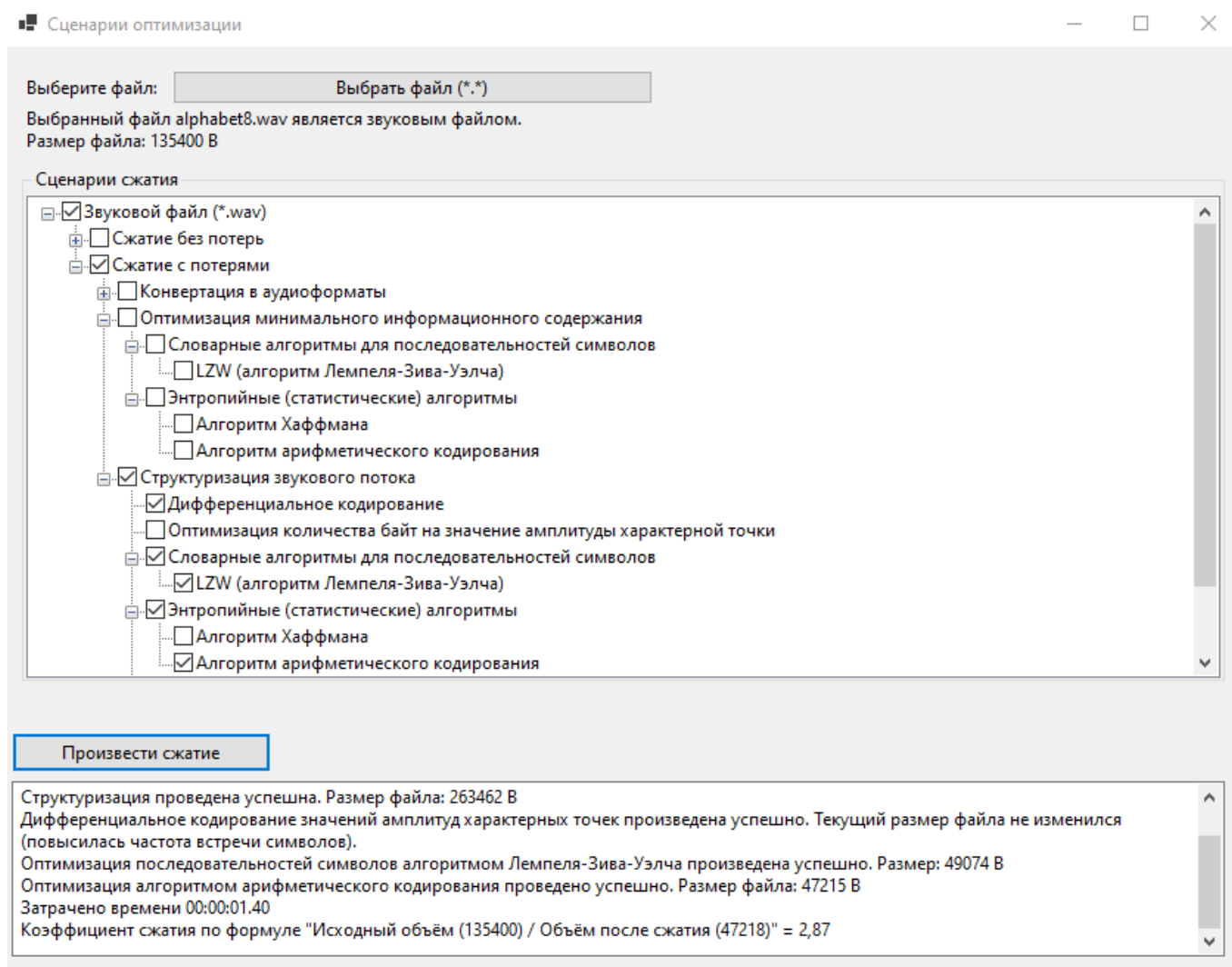


Рисунок 1. Интерфейс выбора сценариев оптимизации с выводом результатов сжатия

Формат сжатого структурированного файла

Полученный в результате сжатия файл формата .siwav представляет собой контейнер, содержащий сжатое структурированное представление звукового сигнала, включающее служебную информацию и упакованные звуковые данные.

Заголовок файла сохраняет основную информацию из оригинального WAV-формата (частоту дискретизации, разрядность сигнала и др.), а также дополнительные служебные параметры, обеспечивающие корректную интерпретацию и восстановление сжатого содержимого:

- **Сценарий сжатия**, закодированный в виде битовой маски [16], в которой каждый бит указывает на использование конкретного алгоритма (дифференциальное кодирование, LZW, энтропийное кодирование и т.п.);
- **Параметр минимального информационного содержания (МИС)** — включается при использовании сценария оптимизации с фрагментацией по диапазону разброса значений амплитуды;
- **Количество совокупных фрагментов** — используется при структурной оптимизации по фрагментам.

Если применяется фрагментная оптимизация, каждый фрагмент звукового потока начинается с компактного описателя, содержащего:

- Параметр информационного содержания;
- Количество амплитудных отсчётов на фрагменте (для аппроксимации значений амплитуды во фрагментах с МИС).

Основное содержимое файла, следующее за заголовком, представляет собой кодированную последовательность амплитудных данных, полученную в результате одного или нескольких этапов оптимизации: дифференциального кодирования, битовой упаковки, словарного или энтропийного сжатия. Структура этой последовательности напрямую зависит от сценария, указанного в служебной информации.

Процесс восстановления сжатых структурированных звуковых файлов

На этапе сжатия каждому используемому алгоритму оптимизации присваивается уникальный номер, который записывается в заголовке файла в виде

битовой маски [16] — совокупной записи, фиксирующей структуру применённого сценария. Дополнительно в служебной информации указывается параметр минимального информационного содержания (МИС), позволяющий при восстановлении отличать малозначимые участки сигнала от фрагментов с полноценной амплитудной нагрузкой.

При запуске процедуры восстановления заголовков файла считывается и интерпретируется. На его основе определяется порядок выполнения обратных преобразований. Так как энтропийное кодирование (алгоритм Хаффмана или арифметическое кодирование) применяется на последнем этапе сжатия, процесс восстановления начинается с соответствующего энтропийного декодирования.

После этого, при наличии в структуре файла словарного кодирования (например, LZW), выполняется процедура восстановления по словарному алгоритму. Далее производится расшифровка структурированного представления: по результатам декодирования извлекаются амплитудные отсчёты, восстановленные значения длительностей фрагментов и другие параметры, в зависимости от сценария.

Если файл содержит фрагменты с минимальным информационным содержанием (сценарий фрагментной оптимизации), производится аппроксимация значений амплитуды на этих фрагментах путём генерации псевдослучайных амплитуд между соседними характерными точками сигнала. При данном выборе сценария фрагменты с информативным содержанием представляются уже в виде исходной последовательности значений амплитуды звукового потока и их восстановление проводить не нужно.

В случае, если весь звуковой поток представлен в виде структур (сценарий структурной оптимизации), то проверяется форма записи значений амплитуды в структурах. При наличии дифференциального кодирования форма записи значений амплитуды в структурах представляет собой следующее:

$$\hat{A} = \{A_1, \Delta A_2, \Delta A_3, \dots, \Delta A_n\}, \quad (1)$$

где $\hat{A}$ – последовательность, полученная после кодирования каждого значений амплитуды по формуле

$$\Delta A_i = |A_i - A_{i-1}|, \text{ при } i = 2, \dots, A_n, \quad (2)$$

а ΔA_i - разность между значением амплитуды текущей характерной точки и предыдущей по модулю в исходной последовательности значений амплитуды вида $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$,

В таком случае для восстановления исходной последовательности используется чередование операций сложения и вычитания:

$$A_i = A_{i-1} + (-1)^{(i+1)} \times \Delta A_i, \text{ при } i = 2, \dots, A_n \quad (3)$$

где A_i - восстановленное значение амплитуды характерной точки, полученное поочерёдными операциями сложения и вычитания текущей амплитуды характерной точки с дельтой значения амплитуды соседней характерной точки.

В случае, если при сжатии значения амплитуды были представлены в формате, не соответствующем их реальному диапазону (например, использовалось 2 байта на значение при исходной разрядности 8 бит), в процессе восстановления производится обратное преобразование — редукция до минимально необходимого числа байт. Это позволяет корректно восстановить формат амплитудной дискретизации,

соответствующий исходному WAV-потoku, и обеспечить совместимость с системой воспроизведения [19-20].

Завершающим этапом является очистка служебной информации, формирование заголовка .wav и сборка итогового звукового потока, пригодного для воспроизведения. Процесс восстановления акустической информации в интерфейсе выбора сценариев представлен на рисунке 2 (алгоритмы сжатия определены автоматически).

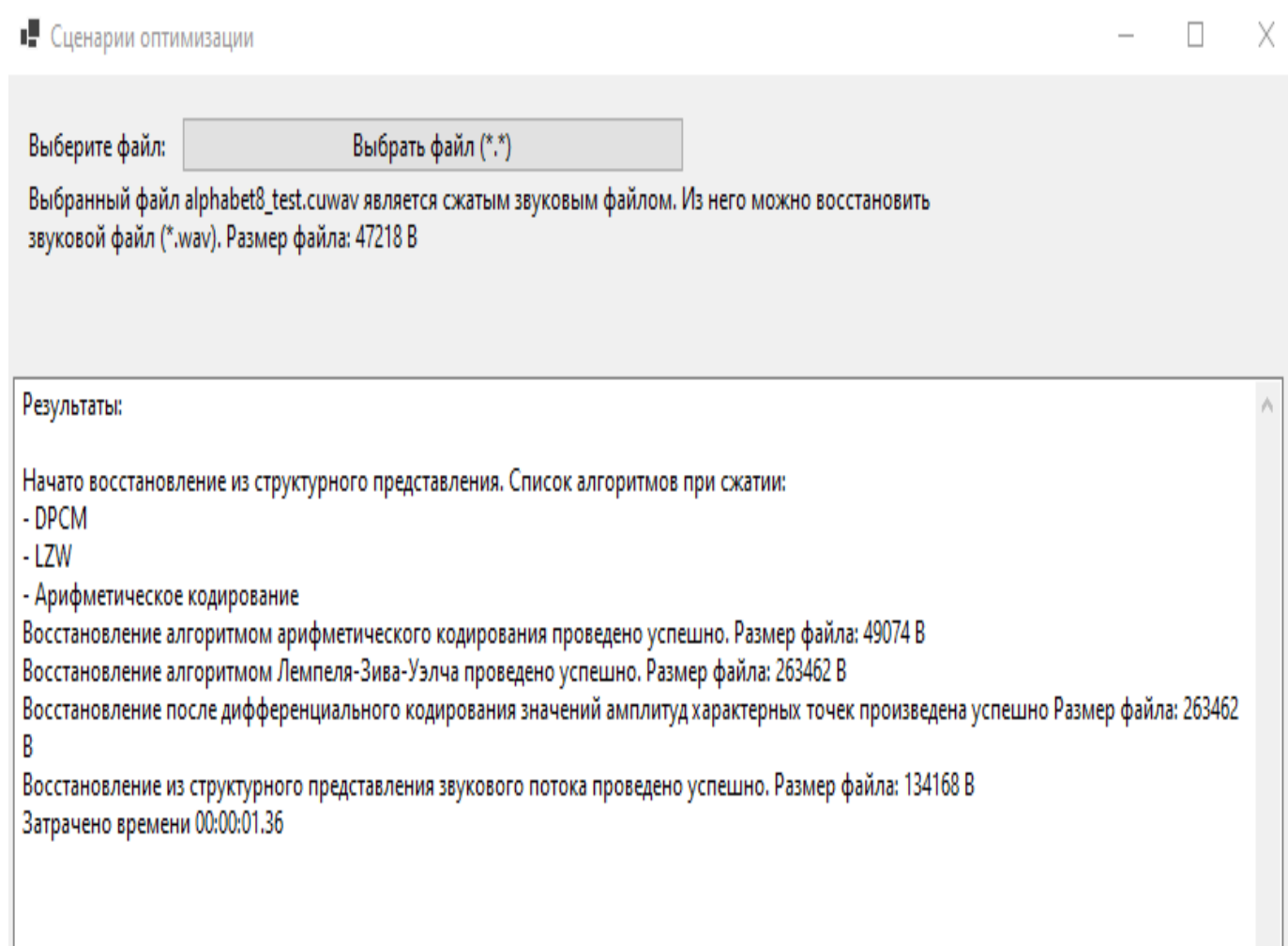


Рисунок 2. Процесс восстановления акустической информации в интерфейсе выбора сценариев

Общая схема процесса восстановления представлена на рисунке 3:



Рисунок 3. Визуальное представление процесса восстановления акустической информации

Программная реализация восстановления и воспроизведения сжатых структурированных файлов «CUWav Decoder»

В рамках настоящей работы разработана и зарегистрирована программная система восстановления звукового потока из сжатых структурированных файлов формата .cuwav — «CUWav Decoder» [17]. Система реализована на языке C# с использованием библиотеки NAudio и предназначена для оперативного восстановления и воспроизведения звука с возможностью визуального анализа в форме осциллограммы.

На рисунке 4 продемонстрирован интерфейс разработанной программы в процессе восстановления звукового сигнала.

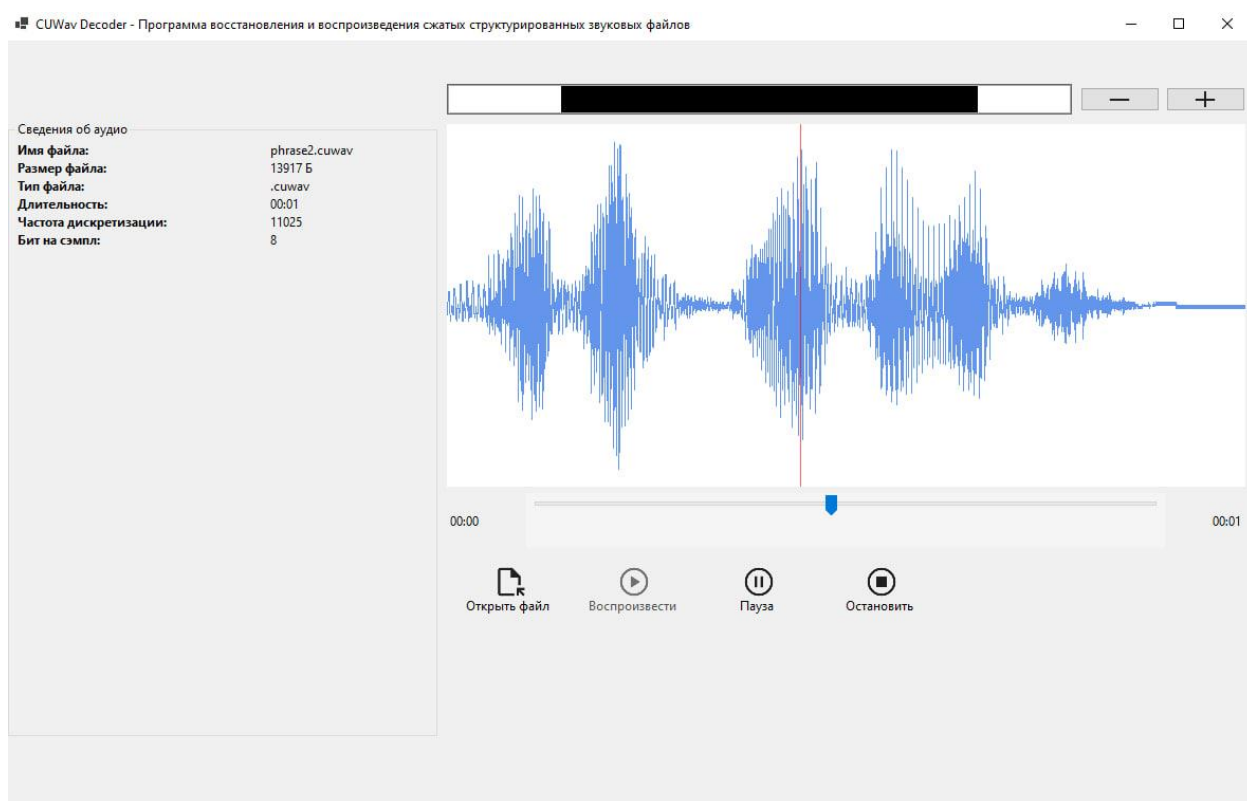


Рисунок 4. Интерфейс CUWav Decoder

Выводы и заключение

Разработанный метод восстановления звуковых сигналов из сжатого структурированного представления позволяет обеспечить универсальный подход к декодированию независимо от применённых схем кодирования. Программная реализация CUWav Decoder успешно выполняет все этапы восстановления звукового потока: интерпретацию служебной информации, декодирование на основе сценария сжатия и воспроизведение в реальном времени с возможностью визуального анализа сигнала.

В отличие от традиционных решений, ориентированных на конкретные форматы (например, MP3 или AAC), предложенный подход сохраняет независимость от типа применённых алгоритмов, что делает систему гибкой и расширяемой. Поддерживается обработка как речевых, так и технических звуковых сигналов, включая сигналы с фрагментами минимального информационного содержания.

В перспективе планируется развитие программной системы:

- интеграция с IP-телефонией (Asterisk) для автоматического восстановления и анализа записей разговоров в реальном времени;
- добавления поддержки потокового декодирования и восстановления звука без предварительной полной загрузки файла.

Предложенное решение может быть использовано как часть программных комплексов мониторинга и аудиофиксации в системах промышленной, транспортной и информационной безопасности.

Список источников

1. Поляков В.Б., Игнатова Н.А., Сенцов А.А., Иванов С.А. Многокритериальный выбор метода сжатия радиолокационных данных // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184071>
2. Балакирев Н.Е., Нгуен Х.З. Особенности распознавания тональности в речевом потоке // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102430>
3. Попов Е.П., Вережкин А.А., Насонов Ф.А. Исследование физических особенностей авиационных систем с применением математического моделирования на примере системы воздушного охлаждения // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161429>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-15
4. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н., Межнов А.С., Питерскова Ю.А., Захарова Е.В., Дементьев Л.А. Развитие методов пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167170>. DOI: 10.34759/trd2022-124-25
5. Склад Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение. — М.: Вильямс, 2003. — 1104 с.;
6. Балакирев Н. Е., Фадеев М. М., Родионов В. С. Качественный подход в раскрытии информационного содержания волновых данных // Труды МАИ. — 2024. — № 136. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/e63/sctyasotfzi3nngx1m3z86vc5gagvi23b/19_Balakirev_Fadeev_Rodionov.683.pdf
7. Балакирев Н. Е., Нгуен Х. З., Малков М. А., Фадеев М. М. Структуризация и качественное рассмотрение звукового потока в системе синтеза и анализа речи //

Программные продукты и системы – 2018. – том 31 № 4. С. 768–776. DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.768-776

8. Чижов И. И., Балабанова Т. Н. Сжатие аудиоданных на основе психоакустических принципов восприятия звука человеком // Современные аспекты информационных технологий. — 2021. — № 2 (30). — С. 106–110. — DOI: [10.17308/sait/1995-5499/2024/3/127-137](https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/3/127-137)

9. Балакирев Н.Е., Евсеева М.В, Нгуен Х.З., Фадеев М.М. Новые подходы в создании инструментария для исследований информационного содержания волн // II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием им. В.В. Губарева «Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства» (Новосибирск, 11–13 декабря 2018): сборник статей. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 22-28.

10. Фадеев М.М., Балакирев Н.Е., Родионов В.С., Сергеев И.С., Умрюхин Е.А. Количественная и качественная фрагментация потока данных // Материалы XXIV Международной конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». (Воронеж, 14-15 февраля 2024). – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2024. С. 807-813.

11. Welch T. A. A Technique for High-Performance Data Compression // IEEE Computer. — 1984. — Vol. 17, No. 6. — P. 8–19.;

12. Сергеев И.С., Балакирев Н. Е. Сравнение алгоритмов сжатия звуковой информации алгоритмом Хаффмана и арифметическим кодированием // Наукосфера. — 2022. — № 8(2). — С. 31–35. DOI: 10.5281/zenodo.6855028

13. Сергеев И.С., Балакирев Н. Е. Сравнение алгоритмов сжатия акустической информации // Научно-образовательный журнал преподавателей и студентов

«StudNet»— 2022. — № 6/2022 С. 1-8 URL: <https://stud.net.ru/sravnenie-algoritmov-szhatiya-akusticheskoy-informacii/>

14. Хаффман Д. Э. Метод минимальной избыточности для кодирования информации // Труды института радиоинженеров. — 1952. — Т. 40, № 9. — С. 1098–1101.

15. Уиттен Дж. Арифметическое кодирование и его практическое применение // Коммуникации ACM. — 1987. — Т. 30, № 6. — С. 520–540.

16. Knuth, D. E. The Art of Computer Programming, Volume 4, Fascicle 1: Bitwise Tricks & Techniques; Binary Decision Diagrams. Addison-Wesley Professional, 2009. ISBN: 978-0321580501

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663512. Российская Федерация. Программа восстановления и воспроизведения сжатых структурированных звуковых файлов: заявл. 20.05.2025; опубл. 28.05.2025 / И.С. Сергеев — Зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. URL: <https://fips.ru/EGD/ad87567c-7908-45ac-a9d6-e275043b791e>

18. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. - М.: Техносфера, 2004. — 368 с.

19. Jayant N. S., Kamiski P., Flanagan J. L. Adaptive quantization in differential PCM coding of speech // Bell System Technical Journal. – 1973. – Vol. 52, No. 7. – P. 1105–1118;

20. О. В. Кузьмин, И.А. Зеленцев. Кодирование звуковой информации с помощью алгоритма перестановки // Информатика, вычислительная техника и управление Т. 55, № 3. 2017 — С. 151-158. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).151-158

References

1. Polyakov V.B., Ignatova N.A., Sentsov A.A., Ivanov S.A. Multi-criteria selection of the radar data compression method // Trudy MAI. 2025. No. 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184071>
2. Balakirev N.E., Nguyen H.Z. Specifics of Tone Recognition in Speech Stream // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102430>
3. Popov E.P., Vereikin A.A., Nasonov F.A. Investigation of the physical features of aviation systems using mathematical modeling using the example of an air cooling system // Trudy MAI. 2021. No. 120. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161429>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-15
4. Dement'ev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N., Mezhnov A.S., Piterskova YU.A., Zakharova E.V., Dement'ev L.A. Development of a method for space-time processing of broadband signals in an adaptive antenna array. Trudy MAI. 2022. No. 124. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167170>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-25
5. Sklyar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. — Moscow: Williams, 2003. — 1104 p.
6. Balakirev N. E., Fadeev M. M., Rodionov V. S. Qualitative approach in extracting the information content of wave data // Trudy MAI, 2024, no. 136. — URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/e63/sctyasotfzi3nxglm3z86vc5gagvi23b/19_Balakirev_Fadeev_Rodionov.683.pdf
7. Balakirev N.E., Nguyen H.Z, Malkov M. A., Fadeev M. M. Structuring and Qualitative Analysis of the Audio Stream in a Speech Synthesis and Analysis System" //

Software Products and Systems // Programmnye produkty i sistemy – 2018. – v 31 № 4. P. 768–776. DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.768-776

8. Chizhov I. I., Balabanova T. N. Compression of Audio Data Based on Psychoacoustic Principles of Human Sound Perception // Modern Aspects of Information Technologies. — 2021. — No. 2 (30). — P. 106–110. — DOI: [10.17308/sait/1995-5499/2024/3/127-137](https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/3/127-137)

9. Balakirev N.E., Evseeva M.V, Nguen Kh.Z., Fadeev M.M. II Vserossiiskaya nauchnoprakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem im. V.V. Gubareva «Intellectual'nyi analiz signalov, dannykh i znanii: metody i sredstva»: sbornik statei. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018, pp. 22-28.

10. Fadeev M.M., Balakirev N.E., Rodionov V.S., Sergeev I.S., Umryukhin E.A. Materialy XXIV Mezhdunarodnoi konferentsii «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii». Voronezh, Izd. dom VGU, 2024, pp. 807-813.

11. Welch T. A. A Technique for High-Performance Data Compression // IEEE Computer. — 1984. — Vol. 17, No. 6. — P. 8–19.;

12. Sergeev I.S., Balakirev N. E. Comparison of audio information compression algorithms by huffman and arithmetic coding // Naukosfera. — 2022. — № 8(2). — P. 31–35. DOI: 10.5281/zenodo.6855028

13. Sergeev I.S., Balakirev N. E. Comparison of acoustic information compression algorithms // Nauchno-obrazovatel'nyj zhurnal prepodavatelej i studentov «StudNet»— 2022. — № 6/2022 P. 1-8 URL: <https://stud.net.ru/sravnenie-algoritmov-szhatiya-akusticheskoy-informacii/>

14. Huffman D. A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes // PROCEEDINGS OF THE I.R.E.— 1952. — V. 40, № 9. — P. 1098–1101.

15. Witten I. H., Neal R. M., Cleary J. G. “Arithmetic coding for data compression.” *Communications of the ACM*, vol. 30, no. 6, June 1987, pp. 520–540.
16. Knuth, D. E. The Art of Computer Programming, Volume 4, Fascicle 1: Bitwise Tricks & Techniques; Binary Decision Diagrams. Addison-Wesley Professional, 2009. ISBN: 978-0321580501
17. Sergeev I.S. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2025663512. 28.05.2025 URL: <https://fips.ru/EGD/ad87567c-7908-45ac-a9d6-e275043b791e>
18. Selomon D. *Szhatie dannykh, izobrazhenii i zvuka* (Compression of data, images and sound). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2004. 368 p.
19. Jayant N. S., Kamiski P., Flanagan J. L. Adaptive quantization in differential PCM coding of speech // *Bell System Technical Journal*. – 1973. – Vol. 52, No. 7. – P. 1105–1118;
20. O. V. Kuz'min, I.A. Zelentsov. Coding sound information with a permutation alghorithm // *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i upravlenie* V. 55, № 3. 2017 — P. 151-158. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).151-158