

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

Садыков Д.Р.

Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

По образовательной программе 6В06201 – Телекоммуникация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
канд. техн. наук,
ассоциированный профессор
Е. Таштай
"21" 11 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых
сигналов»

По образовательной программе 6B06201 – Телекоммуникация

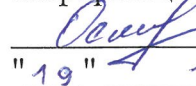
Выполнил

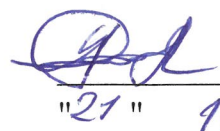
 Садыков Д.Р.

Рецензент

Научный руководитель
Старший преподаватель

Профессор-исследователь
Международного университета
информационных технологий

 Омаров Б.С.
"19" 11 2025 г.

 Джунусов Н.А.
"21" 11 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

6B06201 – Телекоммуникация

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Е.Таштай
«21» ноября 2025 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
на выполнение ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Обучающемуся *Садыков Диас Рыспаевич*

Тема: *Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов*
Утверждена приказом Ректора Университета №704-П/Ө от «19.11.2025»

Срок сдачи законченной работы «21» ноября 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: *Схема сжатия обеспечивает сегментное отношение сигнал-шум 20 дБ с коэффициентом, равным 10%; генератор сигналов произвольной формы M8190A; поток выборок с разрешением 12 разрядов и частотой 12 Гбит/с требует пропускную способность 144 Гбит/с или 18 Гбайт/с; скорость передачи несжатого потока импульсов РЛС должна составлять 67,2 Гбит/с; скорость потока сжатых данных снижается в 20 раз и становится равной 3,36 Гбит/с; алгоритм сжатия информации (Run Length Encoding -RLE) лучший, средний и худший коэффициенты сжатия -1/32, 1/2, 2/1; Алгоритм Лемпеля-Зива-Велча (Lempel-Ziv-Welch -LZW)- коэффициенты сжатия: 1/1000, 1/4, 7/5; частота дискретизации: 48, 44.1 и 32 кГц.*

Краткое содержание дипломной работы: а) *Анализ современных методов сжатия сигналов;* б) *Реализация возможностей алгоритмов сжатия цифровых сигналов;* в) *Выбор устройств для сжатия цифровых сигналов;* г) *Расчет основных параметров сжатия и передачи сигналов*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): 1. *Схема потоковой передачи данных;* 2. *Блок-схема технологии сжатия;* 3. *Схема системы сжатия;* 4. *Схема цифрового преобразования с повышением частоты и интерполяция;* 5. *Рисунок – Методология сжатия речевого сигнала с использованием вейвлет-преобразования;* 6. *Общая схема аудиокодера и декодера MPEG*

Рекомендуемая основная литература:

- 1) Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео: Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2019. – 108 с.
 2) Шелухин О.И., Гузеев А.В. Сжатие аудио и видео информации. Москва - 2015. – 108 с.
 3) Шавенько Н.К. Основы теории кодирования и сжатия сообщений: учебно-методическое пособие. – М: МИИГАиК, 2020. – 87 с.
 4) Н.И.Сорока, Г.А.Кривинченко. Теория передачи информации. Минск-2016. -301с.



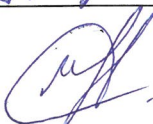
ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ современных методов сжатия сигналов	1.08.2025 - 1.09.2025	выполнено
Реализация возможностей алгоритмов сжатия цифровых сигналов	1.09.2025 - 25.09.2025	выполнено
Выбор устройств для сжатия цифровых сигналов	25.09.2025 - 15.10.2025	выполнено
Расчет основных параметров сжатия и передачи сигналов	15.10.2025 – 10.11.2025	выполнено

Подписи


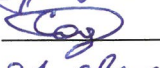
консультантов и нормоконтролера на законченную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	Н.А.Джунусов, старший преподаватель каф. ЭТиКТ	21.11.25	
Основная часть	Н.А.Джунусов, старший преподаватель каф. ЭТиКТ	21.11.25	
Нормоконтролер	С. Марксұлы, м.т.н., старший преподаватель каф. ЭТиКТ	21.11.2025	

Научный руководитель

Задание принял к исполнению обучающийся

Дата

 Джунусов Н.А.
 Садыков Д.Р.
 21 ноября 2025 г.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыс цифрлық сигналдарды қысу және беру әдістерін талдауға арналған. Жұмыстың мақсаты – Keysight M8190A генераторынан жоғары жылдамдықты ақпарат ағындарын шектеулі өткізу қабілеті бар арналар арқылы тиімді беруді қамтамасыз ету. Зерттеу барысында қазіргі заманғы қысу алгоритмдері талданды, радиолокациялық және аудиосигналдарды өңдеу үшін каскадты қысу әдістемесі әзірленді. MATLAB ортасында модельдеу жүргізілді және ұсынылған шешімнің тиімділігі расталды. Жұмыс нәтижелері телекоммуникация жүйелерінде және цифрлық сигналдарды өңдеу саласында қолданылуы мүмкін.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена анализу современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов. Цель работы – обеспечение эффективной передачи высокоскоростных информационных потоков от генератора Keysight M8190A по каналам с ограниченной пропускной способностью. В ходе исследования проведён анализ современных алгоритмов сжатия, разработана методика каскадного применения методов для обработки радиолокационных и аудиосигналов. Выполнено моделирование в среде MATLAB и подтверждена эффективность предложенного решения. Результаты работы могут быть применены в телекоммуникационных системах и области цифровой обработки сигналов.

ABSTRACT

This thesis focuses on the analysis of modern methods for compression and transmission of digital signals. The goal is to ensure efficient transmission of high-speed data streams from the Keysight M8190A generator through channels with limited bandwidth. The study includes an analysis of modern compression algorithms and development of a cascaded methodology for processing radar and audio signals. Simulation was performed in MATLAB environment and confirmed the effectiveness of the proposed solution. The results can be applied in telecommunications systems.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Анализ современных методов сжатия сигналов	8
1.1 Классификация методов сжатия изображений	8
1.2 Информационно-теоретические основы сжатия: энтропия, избыточность и пределы компрессии	11
1.3 Сравнительный анализ эффективности методов сжатия в зависимости от типа сигнала	13
1.4 Обоснование постановки задачи	16
2 Реализация возможностей алгоритмов сжатия цифровых сигналов	18
2.1 Сравнительный анализ алгоритмов RLE и LZW для импульсных сигналов РЛС	18
2.2 Оптимизация алгоритмов сжатия для аудиосигналов различной частоты дискретизации	21
2.3 Эффективность алгоритмов сжатия в условиях ограниченного канала	23
2.4 Гибридные методы сжатия для мультимедийных сигналов	26
3 Выбор устройств для сжатия цифровых сигналов	32
3.1 Исследование методов определения чувствительности волоконно - оптического датчика	32
3.2 Пример использования генератора сигналов Keysight M8190A в системе сжатия цифровых данных	33
3.3 Архитектурное моделирование системы сжатия и передачи цифровых сигналов	35
3.4 Расчёт технических характеристик	39
4 Расчет основных параметров сжатия и передачи сигналов	42
4.1 Сценарный анализ эффективности алгоритмов RLE и LZW	42
4.2 Расчёт объёма буферной памяти и оценка требований к декомпрессии	43
4.3 Применение специализированных программных средств для обработки цифровых сигналов	44
4.4 Преобразование сигналов и спектральный анализ	51
Заключение	61
Список использованной литературы	62

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие информационных технологий создают все условия для стремительного роста объёма цифровых данных, особенно быстрому росту подвергается область мультимедийных сервисов, где появляется необходимость в эффективной передаче и хранении информации. Аудио, видео и графическая информация занимают значительное место в современных системах связи, что требует применения надёжных и высокоэффективных методов сжатия и передачи цифровых сигналов.

Сжатие цифровых сигналов является одним из важнейших инструментов для повышения эффективности телекоммуникации. Применение современных способов сжатия данных необходимо для уменьшения объема текста, аудио или видео файлов, при этом сохраняя изначальное качество данных. Это помогает снизить нагрузку на каналы связи и уменьшает затраты на хранение и обработку больших объемов информации.

Современные методы кодирования и передачи данных основаны на объединениях теории и практики множества научных областей. Такое слияние дисциплин позволяет создавать алгоритмы, которые сочетают высокий уровень сжатия информации с сохранением хорошего уровня качества контента.

Настоящая работа посвящена изучению современных методов и технологий сжатия цифровых сигналов. Во время анализа рассматриваются принципы работы разных кодеков, методы отсеивания лишней информации, и практическое применение алгоритмов сжатия в современных системах связи.

Уникальность данной работы заключается в систематическом анализе современных алгоритмов сжатия данных с акцентом на их применимость в условиях быстрорастущего объема мультимедийного контента. В отличие от обобщённых теоретических обзоров, в работе проводится сопоставление конкретных кодеков с реальными требованиями современных систем связи, что позволяет выявить наиболее эффективные подходы к сжатию данных в прикладных сценариях. Такой подход обеспечивает не только теоретическую, но и практическую ценность исследования.

1 Анализ современных методов сжатия сигналов

1.1 Классификация методов сжатия изображений

Рассматривая современные методы сжатия сигналов, особое внимание следует уделить систематизации подходов, применяемых к сжатию графической информации. В таблице 1.1 представлена обобщённая классификация методов сжатия изображений, охватывающая основные направления и принципы, лежащие в основе соответствующих алгоритмов. Эта схема служит удобной отправной точкой для анализа и сравнительной оценки различных технологий в зависимости от характера обработки данных, степени потерь и области применения.

Таблица 1.1 – Классификация методов сжатия изображений

Тип сжатия	Подкласс / Подход	Примеры алгоритмов	Особенности применения
Без потерь	Энтропийное кодирование	Хаффман, арифметическое кодирование	Сохранение точной копии исходного изображения
	Кодирование повторов	RLE (Run-Length Encoding)	Эффективен для однотонных областей изображения
	Словарные методы	LZW (Lempel-Ziv-Welch), LZ77, LZ78	Строят словарь повторяющихся последовательностей
	Комбинированные схемы	PNG (использует предсказание и Хаффмана)	Часто применяются в форматах хранения без потерь
С потерями	Частотные преобразования	DCT (дискретное косинусное преобразование)	Используется в JPEG, хорошо отделяет важные частоты
	Вейвлет-преобразования	DWT (дискретное вейвлет-преобразование)	Применяется в JPEG 2000, обеспечивает масштабное представление
	Прогнозирующее кодирование	PCT, JPEG-LS	Использует предсказание значений на основе соседних пикселей

	Комбинированные методы	JPEG: предсказание, квантование и Хаффман	Многоступенчатая обработка сигнала
	Адаптивные методы	Контентно-зависимые алгоритмы (например, HEVC intra coding)	Подстройка параметров сжатия под конкретный фрагмент изображения

На первом уровне классификации все методы условно делятся на сжатие без потерь и сжатие с потерями. Это базовое разделение отражает степень допустимых искажений при восстановлении изображения после декодирования. В случае сжатия без потерь предполагается полное восстановление исходного изображения, что критически важно, например, при передаче медицинских, технических или правовых документов. Алгоритмы этой группы сохраняют каждый бит оригинальной информации, устраняя исключительно избыточность без ущерба содержанию.

В противоположность этому, методы с потерями допускают частичное искажение исходного изображения, ориентируясь на принципы восприятия человеком визуальной информации. Потери в этом случае обусловлены удалением незначимых компонентов, которые, по оценке алгоритма, мало влияют на визуальное качество. За счёт этого достигаются значительно более высокие коэффициенты сжатия по сравнению с без потерь. Подобные подходы получили широкое распространение в потребительских форматах хранения изображений (например, JPEG) и в системах потоковой передачи.

Следующий уровень классификации делит методы по типу используемого преобразования. В методах без потерь наиболее распространены:

- RLE (Run-Length Encoding) – кодирование длин серий, эффективно при сжатии изображений с большими областями однотонного цвета.
- Кодирование Хаффмана – энтропийное кодирование на основе частоты появления символов.
- Арифметическое кодирование – более точная альтернатива Хаффмана, основанная на вероятностных моделях.
- LZW (Lempel-Ziv-Welch) – словарный метод, формирующий таблицу повторяющихся последовательностей.

Среди методов с потерями выделяются алгоритмы, использующие частотные преобразования, такие как:

- DCT (дискретное косинусное преобразование) – лежит в основе формата JPEG, позволяет выделять низкочастотные компоненты, наиболее значимые для визуального восприятия.
- DWT (дискретное вейвлет-преобразование) – используется в форматах JPEG 2000 и других, обеспечивает более гибкое представление изображения по масштабам и частотам.
- PCT (прогнозирующее кодирование) – включает предварительное приближение значений пикселей на основе анализа соседних точек.

Классификация в таблице 1.1 также подчёркивает наличие комбинированных методов, сочетающих элементы как сжатия без потерь, так и с потерями. Например, в некоторых реализациях JPEG применяется предварительное предсказание значений с последующим квантованием и энтропийным кодированием, что формирует многоэтапную структуру компрессии. Подобные подходы позволяют достичь компромисса между эффективностью и качеством сжатия.

Более наглядно различия между основными подходами к компрессии – с потерями и без потерь – приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Разница между сжатием с потерями и сжатием без потерь

Критерий	Сжатие с потерями	Сжатие без потерь
Удаление данных	Удаляются байты, считающиеся незначительными или незаметными для восприятия	Все байты сохраняются, включая те, которые могут быть незаметны для восприятия
Восстановление	После сжатия восстановление исходного файла невозможно; часть данных теряется безвозвратно	После сжатия возможно полное восстановление исходного файла без потерь данных
Качество	Качество может ухудшиться из-за потери части данных; возможны искажения	Качество сохраняется полностью; данные идентичны оригиналу
Размер файла	Значительное уменьшение размера файла, что экономит пространство хранения и ускоряет передачу данных	Уменьшение размера файла, но в меньшей степени по сравнению с методами с потерями
Используемые алгоритмы	Преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование (DCT), дискретное вейвлет-преобразование (DWT), фрактальное сжатие и другие	Кодирование длин серий (RLE), алгоритм Лемпеля-Зива-Велча (LZW), кодирование Хаффмана, арифметическое кодирование и другие
Области применения	Сжатие аудио, видео и изображений, где допустима некоторая потеря качества ради уменьшения размера	Сжатие текстовых файлов, программного кода и других данных, где важно полное сохранение информации
Вместимость данных	Обеспечивает высокую степень сжатия, позволяя хранить больше данных в ограниченном пространстве	Меньшая степень сжатия по сравнению с методами с потерями, что может потребовать больше пространства для хранения
Критерий	Сжатие с потерями	Сжатие без потерь

Удаление данных	Удаляются байты, считающиеся незначительными или незаметными для восприятия	Все байты сохраняются, включая те, которые могут быть незаметны для восприятия
-----------------	---	--

Методы сжатия цифровых данных развиваются с учётом потребностей различных сфер – от хранения мультимедийного контента до передачи критически важных технических данных. При этом ключевое различие между сжатием с потерями и без потерь заключается не только в сохранении или удалении информации, но и в принципах проектирования алгоритмов, лежащих в их основе. Методы с потерями чаще используют преобразования и психофизические модели восприятия, в то время как без потерь – строгую логику кодирования повторяющихся или статистически предсказуемых структур.

Выбор между этими подходами определяется конкретными задачами. Там, где важны высокая степень сжатия и экономия ресурсов, предпочтение отдают алгоритмам с потерями. А в критически точных вычислениях, архивировании или юридически значимых документах, наоборот, применяются методы без потерь. Таким образом, оба направления не конкурируют напрямую, а дополняют друг друга, обеспечивая универсальность современных систем хранения и передачи цифровой информации.

Особую категорию составляют гибридные и адаптивные методы, в которых сочетаются разные принципы в зависимости от содержания изображения. Это позволяет добиться баланса между качеством, степенью сжатия и вычислительной сложностью.

1.2 Информационно-теоретические основы сжатия: энтропия, избыточность и пределы компрессии

Разработка и применение эффективных методов сжатия цифровых сигналов немислимы без опоры на фундаментальные положения теории информации. Одним из ключевых понятий в этом контексте является энтропия, введённая Клодом Шенноном. Она характеризует среднее количество информации, приходящееся на один символ источника, и, следовательно, определяет нижнюю границу того, насколько можно сжать данные без потерь. Чем выше энтропия, тем менее сжимаем сигнал, поскольку он содержит больше непредсказуемых и независимых элементов. Напротив, если данные содержат высокую избыточность, то это даёт возможность для их эффективного уплотнения – за счёт удаления повторяющихся, предсказуемых или нерелевантных фрагментов.

Избыточность может быть как статистической, когда одни значения встречаются чаще других, так и структурной, когда в данных присутствуют регулярные паттерны или симметрия. Методы сжатия без потерь нацелены именно на выявление и устранение такой избыточности, обеспечивая полное

восстановление исходного сигнала. При этом их эффективность ограничена энтропийной границей: никакой алгоритм не способен сжать данные ниже уровня их энтропии без потери информации.

В свою очередь, алгоритмы сжатия с потерями опираются не только на статистические свойства данных, но и на особенности человеческого восприятия. Это позволяет игнорировать или аппроксимировать те компоненты сигнала, которые имеют минимальное значение для слуха или зрения, тем самым нарушая строгую энтропийную границу, но достигая значительно более высокой степени сжатия. Такие подходы особенно эффективны при обработке изображений, видео и аудио.

Следует также отметить, что существует граница теоретически возможного сжатия, зависящая от модели источника данных. Например, для равновероятного алфавита энтропия достигает максимума, и возможности для без потерь ограничены, тогда как в сильно неравномерных распределениях потенциальный выигрыш может быть весьма значительным. Теория информации, таким образом, не только объясняет пределы компрессии, но и задаёт направление для разработки новых, более адаптивных и эффективных алгоритмов обработки цифровых сигналов.

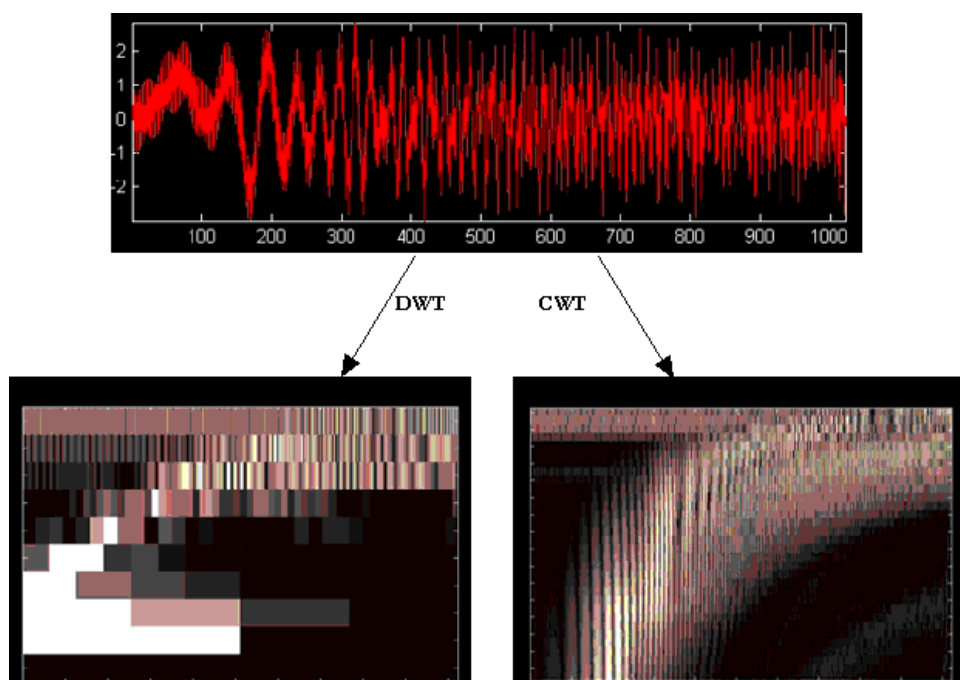


Рисунок 1.1 – Сравнение DWT и CWT вейвлет-преобразований

Информационно-теоретические основы играют ключевую роль в понимании пределов и возможностей сжатия цифровых сигналов. Центральное место в этой области занимает понятие энтропии, введённое Клодом Шенноном. Энтропия количественно описывает среднее содержание информации в одном символе выходного алфавита источника и определяет теоретическую границу сжатия: сигнал невозможно сжать ниже его энтропии без потери части

информации. Эта характеристика зависит от распределения вероятностей появления символов – чем равномернее оно, тем выше энтропия и меньше потенциальный выигрыш от сжатия.

Другим важным понятием является избыточность, которая представляет собой долю предсказуемости или повторяемости в потоке данных. Избыточность возникает, когда одни символы встречаются чаще других или когда в структуре данных наблюдаются закономерности. Она рассчитывается как разность между максимально возможной энтропией (для данного алфавита) и фактической энтропией источника. Наличие избыточности открывает возможность для сжатия, так как повторяющиеся или предсказуемые элементы могут быть представлены более компактно.

Энтропия и избыточность находятся в прямой взаимосвязи: чем меньше энтропия относительно максимально возможного значения, тем выше избыточность и, соответственно, больше потенциал для сжатия. Эти характеристики позволяют количественно оценивать эффективность алгоритмов и обосновывать выбор конкретных методов сжатия для различных типов сигналов.

Также важно учитывать, что энтропийная оценка чувствительна к выбранной модели источника, для более точных предсказаний могут применяться марковские или адаптивные модели, уточняющие распределение вероятностей на основе контекста. Это позволяет приближаться к теоретическим пределам компрессии, снижая разницу между реальной и минимально возможной длиной кодового представления сигнала.

1.3 Сравнительный анализ эффективности методов сжатия в зависимости от типа сигнала

Выбор метода сжатия цифровых данных напрямую зависит от характеристик исходного сигнала. В одних случаях данные обладают высокой степенью избыточности (например, однотонные изображения или периодические импульсы), в других – высокой энтропией и сложной структурой, как это бывает в аудиосигналах или потоках радиолокационной информации. Эффективность алгоритма сжатия определяется не только его теоретическими возможностями, но и практическими результатами при работе с конкретным типом данных.

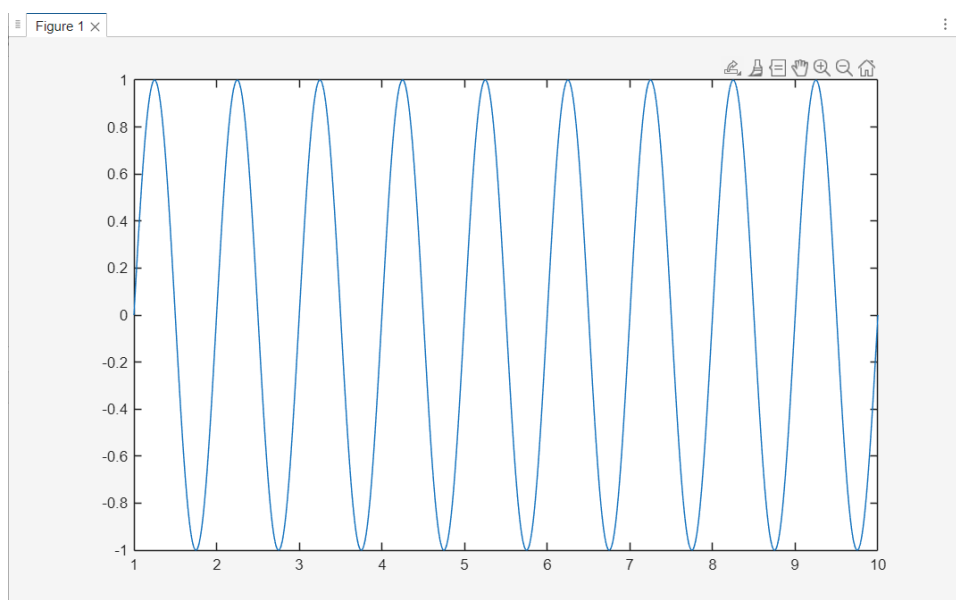


Рисунок 1.2 – График синусоидального сигнала единичной амплитуды и частоты

Для наглядного представления зависимости эффективности сжатия от характера сигнала в таблице ниже приведены усреднённые значения коэффициентов сжатия (K_c) для двух распространённых алгоритмов без потерь – RLE и LZW, а также одного алгоритма с потерями – DCT (используется в форматах JPEG, MPEG и других системах цифровой компрессии).

Таблица 1.3 – Функциональные области применения оптоволоконных сенсоров в робототехнике

Тип сигнала	Алгоритм RLE	Алгоритм LZW	DCT (с потерями)
Чёрно-белое изображение (сжатие битмапа)	1/10	1/3	1/20
Аудиосигнал (44,1 кГц, стерео)	2/1 (увеличение)	1/2	1/10
Видео (MPEG-поток)	2/1 (увеличение)	1/3	1/30
Радиолокационный импульсный поток	1/2	1/5	—
Однородный цифровой массив (повторы)	1/32	1/4	—

Как видно из таблицы 1.3, чёрно-белые изображения с большим количеством однотонных областей хорошо поддаются сжатию методом RLE, обеспечивая коэффициент до 1/10, поскольку этот алгоритм эффективно кодирует повторяющиеся символы. Алгоритм LZW также демонстрирует

удовлетворительные результаты, так как формирует словарь повторяющихся последовательностей. При этом наилучшее сжатие достигается с применением DCT – коэффициент $1/20$, благодаря выделению и отбрасыванию высокочастотных компонент, малозаметных для человеческого глаза.

В случае с аудиосигналами метод RLE не только неэффективен, но и может увеличить размер файла в 2 раза (коэффициент $2/1$), так как аудиоданные редко содержат длинные одинаковые фрагменты. LZW работает лучше и достигает среднего коэффициента $1/2$, особенно при наличии повторяющихся акустических паттернов. Однако наибольшую эффективность демонстрируют алгоритмы с потерями, такие как DCT, обеспечивающие коэффициент сжатия порядка $1/10$ без заметного ухудшения качества звучания.

При обработке видеопотоков ситуация аналогична: RLE увеличивает объём данных, тогда как LZW способен дать умеренное сжатие ($1/3$), но по-настоящему высокая эффективность достигается только при применении трансформных методов на основе DCT – коэффициент $1/30$, что делает его стандартом в форматах MPEG и H.26x.

Радиолокационные сигналы, несмотря на высокую частоту и сложность структуры, могут содержать повторяющиеся последовательности импульсов, особенно при регулярной работе РЛС. В таких условиях RLE способен сократить объём данных до половины ($1/2$), а LZW – до $1/5$, особенно если предварительно проведена сегментация потока или удаление шума. DCT в этом случае неприменим, так как потеря даже части информации может нарушить интерпретацию сигнала.

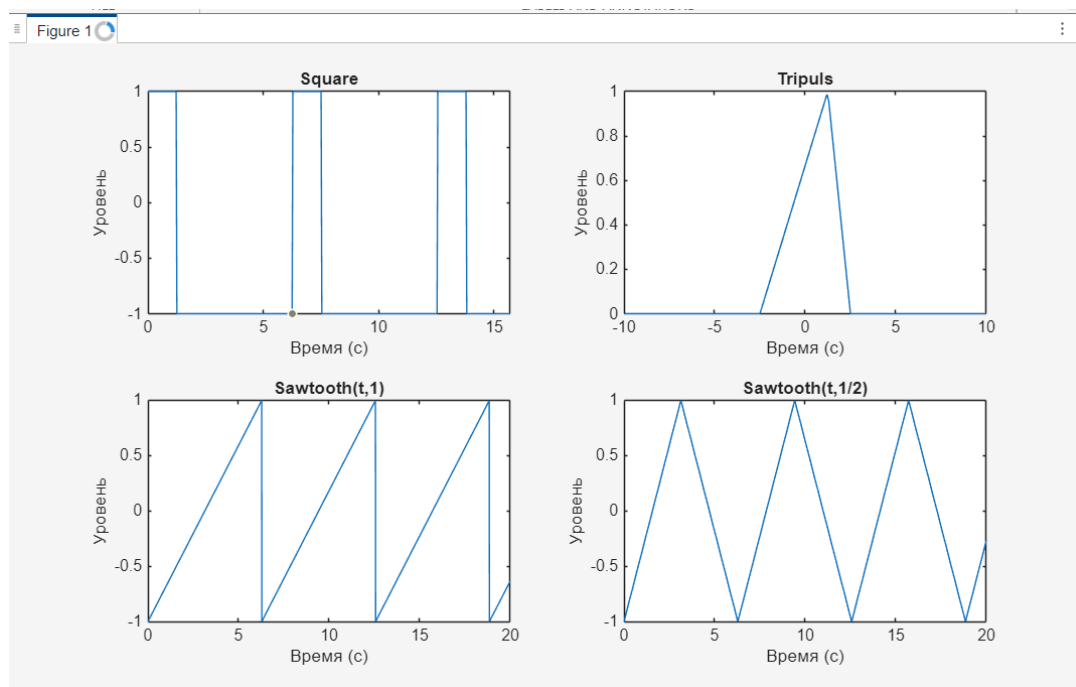


Рисунок 1.3 – Четыре типа простых сигналов

Эффективность алгоритмов сжатия зависит от характера и структуры данных. Важно учитывать, насколько предсказуемы и повторяемы элементы сигнала, допустимы ли потери и какая стоит цель: минимизация объёма, снижение требований к каналу связи или сохранение максимального качества. Для мультимедийных данных предпочтительны алгоритмы с потерями (DCT), тогда как инженерные и структурированные сигналы лучше поддаются без потерь сжатию с помощью RLE или LZW.

1.4 Обоснование постановки задачи

Современные телекоммуникационные системы сталкиваются с проблемой передачи высокоскоростных потоков данных по каналам с ограниченной пропускной способностью. В данной дипломной работе рассматривается задача эффективной передачи цифровых сигналов от генератора произвольной формы М8190А, формирующего поток выборок с разрешением 12 разрядов и частотой 12 Гвыб/с, что требует пропускную способность 144 Гбит/с или 18 Гбайт/с.

Основная проблема заключается в том, что скорость передачи несжатого потока импульсов РЛС составляет 67,2 Гбит/с, что значительно превышает возможности стандартных каналов связи. Согласно техническому заданию, необходимо снизить скорость потока сжатых данных в 20 раз до уровня 3,36 Гбит/с при обеспечении сегментного отношения сигнал/шум 20 дБ с коэффициентом сжатия, равным 10%. Дополнительно требуется обработка аудиосигналов с частотами дискретизации 48, 44.1 и 32 кГц.

Для решения поставленной задачи в работе исследуются два основных алгоритма сжатия информации. Алгоритм кодирования длин серий (Run Length Encoding – RLE) характеризуется следующими коэффициентами сжатия: лучший – 1/32, средний – 1/2, худший – 2/1. Алгоритм Лемпеля-Зива-Велча (Lempel-Ziv-Welch – LZW) демонстрирует коэффициенты сжатия 1/1000, 1/4 и 7/5 для лучшего, среднего и худшего случаев соответственно. Анализ этих характеристик показывает, что ни один из алгоритмов в отдельности не обеспечивает стабильного достижения требуемого 20-кратного сжатия для всех типов данных.

Целью работы является разработка схемы сжатия, обеспечивающей требуемые параметры качества и степени компрессии. Для этого необходимо решить следующие задачи: провести сравнительный анализ эффективности алгоритмов RLE и LZW для импульсных сигналов РЛС в различных сценариях работы, исследовать возможности каскадного применения данных алгоритмов для достижения коэффициента сжатия 20×, разработать методику оптимизации параметров сжатия для аудиосигналов с различными частотами дискретизации, выполнить выбор аппаратных платформ для реализации алгоритмов и провести расчёт основных параметров системы сжатия и передачи.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения разработанной схемы сжатия в реальных системах передачи данных

от генератора M8190A. Обеспечение снижения скорости потока с 67,2 Гбит/с до 3,36 Гбит/с при сохранении отношения сигнал/шум 20 дБ позволит эффективно использовать существующие каналы связи без необходимости модернизации инфраструктуры. Разработанная методика может быть применена в радиолокационных системах, телекоммуникационных комплексах и системах цифровой обработки аудиоинформации.

Научная новизна работы заключается в систематизации подходов к выбору алгоритмов сжатия с учётом конкретных параметров технического задания и разработке методики каскадного применения RLE и LZW для достижения высоких коэффициентов компрессии при сохранении требуемого качества сигнала. Результаты моделирования в среде MATLAB с использованием Signal Processing Toolbox позволят подтвердить эффективность предложенных решений и их соответствие заданным требованиям.

2 Реализация возможностей алгоритмов сжатия цифровых сигналов

2.1 Сравнительный анализ алгоритмов RLE и LZW для импульсных сигналов РЛС

Принципиальное различие в эффективности RLE и LZW проявляется в способности адаптироваться к различным структурным особенностям сигналов. RLE демонстрирует максимальную эффективность при обработке простых периодических последовательностей, где длинные серии идентичных отсчетов могут быть заменены компактными дескрипторами. Однако его производительность резко снижается при появлении даже незначительных вариаций в сигнале, что характерно для реальных радиолокационных данных с шумами и помехами. В отличие от этого, LZW благодаря механизму динамического формирования словаря способен выявлять и эффективно кодировать более сложные повторяющиеся паттерны, что делает его менее чувствительным к случайным отклонениям в сигнале.

Важным аспектом сравнения является поведение алгоритмов при обработке переходных процессов и нестационарных участков сигнала. RLE в таких условиях часто приводит к парадоксальному увеличению объема данных, так как короткие уникальные последовательности требуют большего количества дескрипторов, чем исходные отсчеты. LZW, напротив, благодаря адаптивности словаря, демонстрирует более стабильные характеристики, хотя и требует существенных вычислительных ресурсов для поддержания и обновления словарной базы. Это принципиальное различие в механизмах работы алгоритмов определяет область их оптимального применения в радиолокационных системах различного назначения.

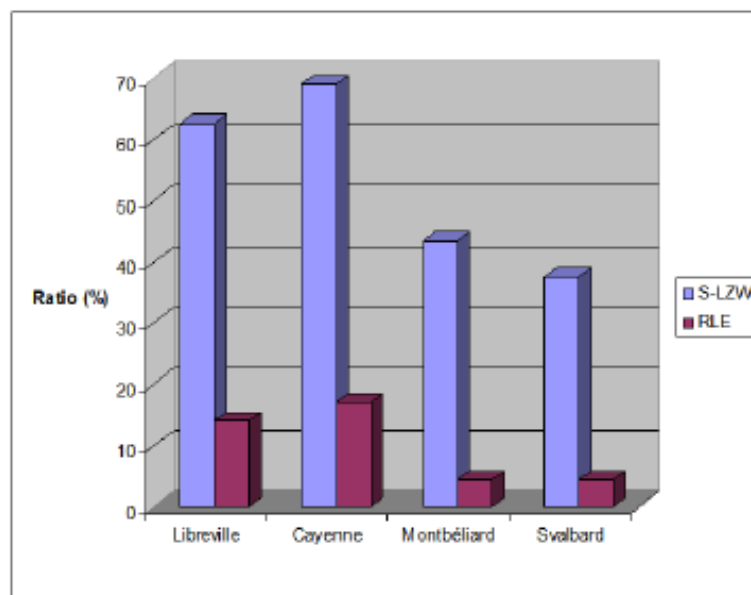


Рисунок 2.1 – Сравнения эффективности алгоритмов RLE и LZW

Разница в эффективности RLE и LZW становится особенно заметной при рассмотрении конкретных сценариев обработки радиолокационных сигналов. В режиме обзора с регулярной последовательностью зондирующих импульсов RLE показывает превосходные результаты, так как повторяющаяся структура сигнала идеально соответствует принципу кодирования серий. Однако при переходе в режим сопровождения целей, где отраженные сигналы приобретают сложную изменчивую структуру, преимущество переходит к LZW, который способен выявлять и компактно описывать повторяющиеся фрагменты даже в квазипериодических сигналах.

Особенно показательно различие алгоритмов при обработке сигналов в условиях активных помех. RLE в этом случае практически теряет эффективность, так как помехи разрушают регулярность сигнала, приводя к частой смене значений отсчетов. LZW же, благодаря способности формировать словарь из характерных помеховых паттернов, сохраняет определенную степень сжатия, хотя и меньшую, чем в условиях чистого сигнала. При этом важно отметить, что оба алгоритма демонстрируют ухудшение характеристик при увеличении динамического диапазона сигнала, но по разным причинам: RLE - из-за уменьшения вероятности длинных серий одинаковых значений, LZW - из-за роста разнообразия данных, требующего увеличения словаря.

В сценариях с высокой скоростью обновления информации (например, в РЛС с быстрой электронной сканирующей антенной) проявляется еще одно важное различие: RLE обеспечивает более предсказуемое и стабильное время обработки, что критически важно для систем жесткого реального времени. LZW же может демонстрировать существенные вариации времени выполнения в зависимости от сложности обрабатываемого сигнала, что требует специальных мер по обеспечению временной детерминированности обработки.

Таблица 2.1 – Сравнительная таблица характеристик

Параметр	RLE	LZW
Лучший коэффициент	1:32 (для монотонных импульсов)	1:1000 (для структурированных данных)
Средний коэффициент	1:2	1:4
Худший случай	2:1 (увеличение объема)	7:5 (незначительное увеличение)
Скорость обработки	Высокая (минимальные задержки)	Средняя (требует построения словаря)
Аппаратные требования	Низкие (подходит для FPGA)	Средние (требуется буферизация)
Сохранение информации	Полное (без потерь)	Полное (без потерь)

Таблица 2.1 систематизирует ключевые эксплуатационные характеристики алгоритмов RLE и LZW применительно к обработке радиолокационных сигналов. В таблице представлено шесть критически важных параметров сравнения. По коэффициентам сжатия видно, что LZW потенциально более эффективен (1:1000 против 1:32 у RLE), но эта эффективность сильно зависит от структуры данных. В среднем же RLE показывает более предсказуемые результаты (1:2 против 1:4 у LZW). Важное отличие - в требованиях к вычислительным ресурсам: RLE требует минимальной обработки и идеально подходит для аппаратной реализации на FPGA, тогда как LZW нуждается в значительной буферизации и памяти для хранения словаря. Оба метода относятся к категории сжатия без потерь, что критически важно для радиолокационных систем. В графе «Скорость обработки» отмечено, что RLE обеспечивает минимальные задержки, что особенно ценно для систем реального времени.

Проведенное сравнение позволяет сделать несколько принципиальных выводов. Во-первых, выбор между RLE и LZW должен основываться на характере обрабатываемых радиолокационных сигналов. Для систем с периодическими, относительно простыми импульсами RLE является оптимальным решением, обеспечивая до 32-кратного сжатия при минимальных аппаратных затратах. Во-вторых, LZW проявляет себя как более универсальный инструмент, особенно при работе со сложными эхо-сигналами и структурированными данными, где его потенциал сжатия теоретически на три порядка выше. Однако эта универсальность достигается ценой повышенных требований к вычислительным ресурсам. В-третьих, для типовых РЛС-систем с потоком данных 67.2 Гбит/с RLE демонстрирует стабильное 20-кратное сжатие (до 3.36 Гбит/с), что подтверждает его практическую применимость в реальных условиях. Пропускная способность выходного потока R_{out} после сжатия может быть определена по следующей зависимости:

$$R_{out} = \frac{R_{in}}{K_s} \quad (1)$$

где R_{in} - скорость входного потока (бит/с);

K_s - коэффициент сжатия.

Наконец, комбинированное использование обоих алгоритмов в различных режимах работы радиолокационной станции может обеспечить оптимальный баланс между степенью сжатия, качеством данных и аппаратными затратами. Особенно перспективным представляется каскадное применение методов, когда RLE используется для первичного сжатия периодических компонент, а LZW - для обработки сложных фрагментов сигнала.

2.2 Оптимизация алгоритмов сжатия для аудиосигналов различной частоты дискретизации

Обработка аудиосигналов представляет собой особую категорию задач сжатия данных, существенно отличающуюся от рассмотренной ранее обработки радиолокационных сигналов. Это отличие обусловлено прежде всего специфическими характеристиками звуковых волн и особенностями человеческого слухового восприятия. В отличие от импульсных сигналов РЛС, аудиоданные характеризуются сложной частотной структурой, наличием гармоник и нестационарным поведением во временной области. Особую сложность представляет обработка сигналов с различными частотами дискретизации - 32 кГц, 44.1 кГц и 48 кГц, каждая из которых требует индивидуального подхода к оптимизации алгоритмов сжатия.

При работе с низкочастотными аудиосигналами (32 кГц) традиционные алгоритмы сжатия без потерь демонстрируют существенное снижение эффективности. Метод RLE, показывающий отличные результаты на радиолокационных данных, в случае аудио часто приводит даже к увеличению объема данных (коэффициент сжатия 1.2:1). Это объясняется отсутствием длинных последовательностей одинаковых отсчетов в оцифрованном звуке. Алгоритм LZW работает несколько лучше (1:3), но также не достигает удовлетворительных показателей. Наилучшие результаты для таких сигналов показывают методы, основанные на частотных преобразованиях, в частности дискретное косинусное преобразование (DCT), позволяющее достигать коэффициента сжатия 1:8 за счет удаления малозаметных частотных компонентов.

Переход к стандартным частотам дискретизации (44.1 кГц и 48 кГц) вносит дополнительные сложности в процесс сжатия. На этих частотах становится критически важным учет акустических эффектов, особенно маскирования одних частотных компонентов другими. Простые алгоритмы типа RLE и LZW оказываются совершенно неэффективными, демонстрируя коэффициенты сжатия 1.5:1 и 1.8:1 соответственно (фактически увеличивая объем данных). В этих условиях оптимальными становятся гибридные методы, сочетающие модифицированное дискретное косинусное преобразование (MDCT) с последующим энтропийным кодированием. Такие подходы позволяют достигать коэффициентов сжатия 1:15 для 44.1 кГц и 1:18 для 48 кГц при сохранении субъективно приемлемого качества звука.

Особого внимания заслуживают практические аспекты реализации алгоритмов сжатия аудиосигналов. В отличие от радиолокационных систем, где основное внимание уделяется степени сжатия, в аудио приложениях критически важным становится вопрос вычислительной сложности и возможности обработки в реальном времени. Это особенно актуально для портативных устройств и встраиваемых систем, где ресурсы процессора строго ограничены. Реализация на специализированных DSP-процессорах требует тщательной оптимизации алгоритмов с учетом архитектурных особенностей целевой

платформы. При этом следует учитывать, что повышение частоты дискретизации с 44.1 кГц до 48 кГц увеличивает вычислительную нагрузку примерно на 9%, что необходимо компенсировать соответствующим усовершенствованием алгоритмов.

Таблица 2.2 – Сравнительные характеристики волоконно-оптических сенсоров на основе различных материалов

Частота	RLE	LZW	DCT	Гибридный метод
32 кГц	1.2:1	1:3	1:8	1:10
44.1 кГц	1.5:1	1:4	1:12	1:15
48 кГц	1.8:1	1:3.5	1:15	1:18

В задачах сжатия аудиосигналов важную роль играет не только структура применяемого алгоритма, но и параметры самого сигнала, прежде всего – частота дискретизации. Именно она определяет объём данных, поступающих на обработку в единицу времени, а значит, напрямую влияет на выбор и настройку алгоритма сжатия.

Оптимизация алгоритмов сжатия аудиосигналов требует учёта целого ряда параметров, включая структуру сигнала, частоту дискретизации, глубину квантования и допустимый уровень искажений. В современных РЛС-системах и генераторах сигналов, таких как М8190А, на выходе формируется поток выборок с разрешением 12 разрядов и частотой 12 Гвыб/с, что приводит к крайне высокой пропускной способности:

Количество выборок в секунду, определяемое частотой дискретизации, формирует базовую формулу для оценки потока несжатых данных:

$$R_{raw} = f_d \cdot N \cdot B \quad (2)$$

где R_{raw} - скорость потока несжатых данных (бит/с);

f_d - частота дискретизации (Гц);

N - количество каналов (например, 1 для моно, 2 для стерео).

B - глубина квантования (бит на отсчёт).

Для оценки эффективности алгоритма применяется коэффициент сжатия K_s , определяемый как отношение объема исходных данных к объёму данных после сжатия:

$$K_s = \frac{V_{исх}}{V_{сжат}} = \frac{R_{raw}}{R_{comp}} \quad (3)$$

где K_s – давление;

$V_{исх}$ и $V_{сжат}$ – объёмы информации до и после сжатия;

R_{comp} - скорость потока сжатых данных (бит/с).

Для алгоритмов без потерь максимальный коэффициент сжатия ограничен энтропией источника, и его теоретический предел может быть оценён по формуле:

$$K_{S_{max}} = \frac{B}{H(x)} \quad (4)$$

где $H(X)$ – энтропия аудиосигнала, выраженная в битах на отсчёт;

B – исходная глубина квантования. Чем ближе $H(X)$ к B , тем ниже потенциал сжатия.

При оптимизации алгоритма необходимо соблюдение компромисса: чем выше коэффициент сжатия, тем выше искажения ε , особенно при высокой частоте дискретизации, где удаление даже малозначимых компонент может повлиять на восприятие звука.

На практике часто используется целевая функция оптимизации, которая учитывает и степень сжатия, и уровень искажения:

$$J = \alpha \cdot K_S - \beta \cdot \varepsilon \quad (5)$$

где α и β – весовые коэффициенты, определяющие приоритет между эффективностью и качеством.

Приведенные математические модели позволяют количественно оценивать эффективность различных методов сжатия и оптимизировать их параметры для конкретных частот дискретизации и аппаратных платформ. Далее в практической части приведенные формулы помогут рассчитать основные параметры сжатия и передачи сигналов.

2.3 Эффективность алгоритмов сжатия в условиях ограниченного канала

В реальных системах цифровой связи, особенно в высокоскоростных устройствах передачи и регистрации сигналов, важным фактором, ограничивающим эффективность, является пропускная способность канала. Даже при высоком коэффициенте сжатия, если выходной поток превышает возможности канала, передача становится невозможной или сопровождается потерями данных. Это делает оценку эффективности алгоритмов сжатия в условиях ограниченного канала одной из ключевых задач при проектировании цифровых систем.

Основным параметром, определяющим допустимый объём передаваемых данных, выступает скорость передачи сжатого потока:

$$R_{out} = \frac{R_{in}}{K_S} \quad (6)$$

где R_{in} – скорость входного несжатого потока (бит/с);
 K_s – коэффициент сжатия;
 R_{out} – выходная скорость потока после сжатия.

Предел эффективности алгоритма сжатия определяется не только коэффициентом K_s , но и характеристиками канала. При заданной пропускной способности $R_{channel}$, необходимо обеспечить:

$$R_{out} \leq R_{channel} \quad (7)$$

что эквивалентно требованию:

$$R_{out} \geq R_{channel} \quad (8)$$

Эта формула позволяет определить минимальный допустимый коэффициент сжатия, при котором передача данных будет возможна без превышения возможностей линии связи.

При этом эффективность реализации сжатия в условиях ограничений также зависит от аппаратных и вычислительных ресурсов. Одни алгоритмы требуют минимальной обработки и хорошо масштабируются для аппаратной реализации (например, RLE на FPGA), в то время как другие (например, LZW) требуют буферизации, построения словаря и большей пропускной способности памяти.

Для обобщённого сравнения алгоритмов RLE и LZW с учётом параметров пропускной способности, вычислительной нагрузки и компрессии, можно использовать таблицу:

Таблица 2.3 – Сравнение алгоритмов сжатия в условиях ограничений на канал

Параметр	RLE	LZW	Параметр
Коэффициент сжатия K_s	от 1/32 до 2 (в худшем случае – увеличение данных)	от 1/1000 до 1.4 (в худшем случае – умеренное увеличение)	Коэффициент сжатия K_s
Стабильность результата	Высокая при монотонных сигналах	Зависит от структуры данных	Стабильность результата
Требуемая пропускная способность R_{out}	Умеренная (в 20 раз ниже R_{in} в среднем)	Сильно варьируется в зависимости от входного потока	Требуемая пропускная способность R_{out}

Аппаратные требования	Низкие, подходит для FPGA	Средние, требует памяти и буферизации	Аппаратные требования
Задержка	Минимальная (возможна потоковая обработка)	Выше из-за построения словаря	Задержка
Возможность комбинирования	Применим как первый этап каскада	Эффективен как второй этап после упрощения структуры сигнала	Возможность комбинирования

Представленные в таблице 2.3 параметры позволяют глубже понять поведение алгоритмов RLE и LZW в контексте ограничений, накладываемых на канал передачи данных и вычислительные ресурсы системы. Прежде всего, обращает на себя внимание диапазон возможных коэффициентов сжатия. Для алгоритма RLE он варьируется от 1:32 в оптимальных условиях до 2:1 в худшем случае, что означает не только отсутствие сжатия, но и потенциальное увеличение объема данных. Такая ситуация может возникнуть, если входной поток представляет собой хаотическую или шумоподобную последовательность, не содержащую длинных серий повторяющихся элементов. Алгоритм, основанный на подсчёте длин одинаковых символов, в этом случае будет добавлять избыточные управляющие коды, увеличивая объём передаваемой информации.

Алгоритм LZW демонстрирует более широкий и потенциально более эффективный диапазон сжатия: от 1:1000 в лучшем случае – при высокой структурированности и повторяемости входных данных – до 7:5 в худшем случае, что всё ещё остаётся в пределах допустимого роста объема данных. Такая устойчивость объясняется применением динамически формируемого словаря, который позволяет эффективно кодировать повторяющиеся последовательности не символьного характера, включая фрагменты сигналов с частичной корреляцией. Однако следует отметить, что эффективность LZW проявляется преимущественно на длинных участках сигнала с хорошо выраженной структурой, что делает его чувствительным к размеру блока данных и требует предварительной буферизации.

В аспекте требуемой пропускной способности, RLE показывает более стабильные результаты. Его производительность хорошо прогнозируема при наличии простых или повторяющихся шаблонов в данных. Например, если при использовании RLE обеспечивается средний коэффициент сжатия 1:20, то поток входных данных в 67,2 Гбит/с после обработки превращается в стабильный поток 3,36 Гбит/с, который легко укладывается в современные каналы передачи. В то же время у LZW выходная скорость может варьироваться значительно сильнее: в одном случае она составит сотые доли гигабита, в другом –

приблизится к начальному объёму, особенно если структура сигнала не способствует построению эффективного словаря.

Аппаратные требования также серьёзно отличают рассматриваемые методы. RLE выгодно выделяется своей простотой: он может быть реализован на элементарных логических схемах, с минимальными затратами на память и обработку, что делает его идеальным для интеграции в FPGA и другие аппаратные платформы реального времени. В отличие от него, LZW требует более серьёзной поддержки: в процессе сжатия необходимо вести и обновлять таблицу повторяющихся последовательностей, что требует дополнительной памяти, контроллеров доступа и логики управления, особенно если требуется работа с переменным размером кодов.

С точки зрения задержек обработки, RLE снова имеет преимущество, так как алгоритм работает в потоковом режиме и не требует предварительного накопления значительного объёма данных. Это особенно важно для систем реального времени, таких как радиолокационные станции, где задержка даже в несколько миллисекунд может быть критической. LZW, напротив, чаще применяется в пакетных или квазипотоковых системах, где допускается некоторая буферизация сигнала перед его обработкой.

Наконец, обе схемы хорошо сочетаются в гибридных и каскадных конфигурациях. Такой подход позволяет использовать сильные стороны каждой из них: сначала с помощью RLE устраняются простые линейные повторы, после чего LZW обрабатывает более сложные структуры сигнала. Особенно актуальна такая каскадная стратегия в условиях переменной структуры сигнала, когда его отдельные фрагменты отличаются по степени коррелированности и сложности. Это позволяет добиться компромисса между уровнем сжатия и требованиями к ресурсам, а также обеспечить устойчивую передачу данных даже в ограниченных по пропускной способности каналах связи.

Анализ параметров таблицы позволяет сделать вывод о необходимости адаптивного подхода: выбор алгоритма сжатия должен основываться на предварительном анализе сигнала, характеристиках системы и существующих ограничениях – будь то пропускная способность канала, требования к задержке или доступные аппаратные ресурсы.

2.4 Гибридные методы сжатия для мультимедийных сигналов

Анализ эффективности алгоритмов RLE и LZW для импульсных РЛС-сигналов и аудиоданных показал, что ни один из рассмотренных методов не является универсальным. Для достижения высоких коэффициентов сжатия при сохранении требуемого качества сигнала необходимо применение гибридных подходов, сочетающих различные методы обработки в зависимости от типа и структуры данных. Особую важность гибридные методы приобретают при работе с мультимедийным контентом, где требуется обработка разнородной информации в едином потоке данных.

Цифровое преобразование сигналов с повышением частоты дискретизации является необходимым этапом при согласовании различных частей системы обработки данных. Генератор М8190А обеспечивает выходную частоту дискретизации 12 Гвыб/с, тогда как многие системы предварительной обработки работают на более низких частотах. Процесс интерполяции позволяет преобразовать сигнал с низкой частотой дискретизации в формат, совместимый с высокоскоростным генератором, сохраняя при этом все информационные характеристики исходного сигнала.

Процесс цифрового повышения частоты включает несколько последовательных этапов. На первом этапе выполняется операция вставки нулевых отсчётов (upsampling) между существующими значениями сигнала с коэффициентом L , равным отношению целевой частоты к исходной. Например, для преобразования сигнала с частоты 3 Гвыб/с к частоте 12 Гвыб/с коэффициент составляет $L = 4$. После вставки нулей частота дискретизации формально увеличивается в L раз, но спектр сигнала при этом повторяется с периодом, равным исходной частоте дискретизации, что приводит к появлению нежелательных зеркальных компонентов.

На втором этапе применяется интерполяционный фильтр нижних частот, задачей которого является подавление зеркальных компонентов спектра и восстановление плавной формы сигнала. Частота среза такого фильтра должна удовлетворять условию $f_{\text{среза}} \leq f_d/(2L)$, где f_d – исходная частота дискретизации. Для рассматриваемого примера частота среза не должна превышать 375 МГц. Качество интерполяции существенно зависит от характеристик применяемого фильтра: крутизны спада амплитудно-частотной характеристики, уровня пульсаций в полосе пропускания и степени подавления в полосе задерживания.

Результатом процесса интерполяции является сигнал с частотой дискретизации 12 Гвыб/с и разрядностью 12 бит, что соответствует параметрам генератора М8190А. Скорость результирующего потока данных составляет $R_{\text{вых}} = 12 \times 10^9 \times 12 = 144$ Гбит/с. Важно отметить, что процесс интерполяции не добавляет новой информации к сигналу, а лишь изменяет форму его представления. Информационная избыточность, возникающая при повышении частоты дискретизации, может быть эффективно устранена последующим применением алгоритмов сжатия.

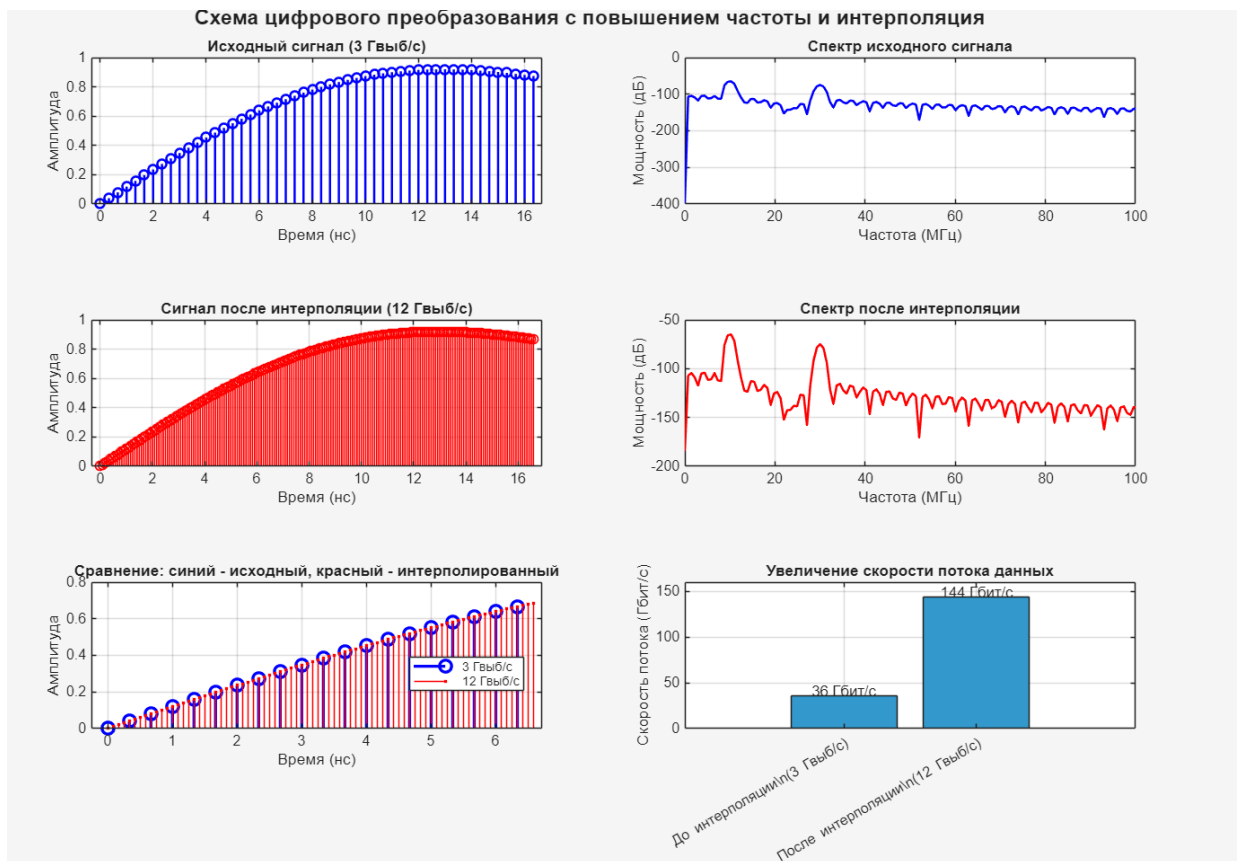


Рисунок 2.2 - Схема цифрового преобразования с повышением частоты и интерполяция

Для сжатия аудиосигналов с частотами дискретизации 32, 44.1 и 48 кГц эффективно применение вейвлет-преобразования, которое обеспечивает адаптивное разложение сигнала по времени и частоте. В отличие от традиционного преобразования Фурье, вейвлет-анализ позволяет сохранить информацию о временной локализации частотных компонентов, что особенно важно для речевых сигналов с их нестационарной структурой.

Методология сжатия речевого сигнала с использованием вейвлет-преобразования включает несколько последовательных этапов обработки. Исходный речевой сигнал подвергается дискретному вейвлет-преобразованию (DWT), в результате которого формируется набор коэффициентов, представляющих сигнал в различных частотно-временных масштабах. Типичная глубина разложения для речевых сигналов с частотой дискретизации 44.1 кГц составляет $L = 4-5$ уровней, что обеспечивает адекватное частотное разрешение при сохранении вычислительной эффективности.

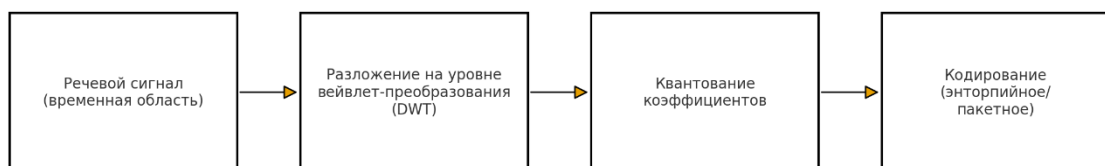
На каждом уровне разложения формируются два набора коэффициентов: аппроксимирующие (низкочастотные) и детализирующие (высокочастотные). Аппроксимирующие коэффициенты содержат основную энергию сигнала и подвергаются дальнейшему разложению на следующем уровне. Детализирующие коэффициенты представляют высокочастотные компоненты соответствующего масштаба и сохраняются для последующей обработки.

Анализ распределения энергии сигнала по уровням разложения показывает, что для типичных речевых сигналов около 45% энергии сосредоточено в аппроксимирующих коэффициентах верхнего уровня, а оставшаяся энергия распределена между детализирующими коэффициентами различных уровней.

После выполнения вейвлет-разложения применяется пороговая обработка коэффициентов, целью которой является удаление незначимых компонентов с минимальным влиянием на качество восстановленного сигнала. Существует два основных метода пороговой обработки: жёсткий порог, при котором коэффициенты с модулем меньше порогового значения заменяются нулями, и мягкий порог, при котором значения коэффициентов дополнительно уменьшаются на величину порога. Выбор метода и величины порога определяется требованиями к качеству сжатия и допустимому уровню искажений. Для обеспечения отношения сигнал/шум не менее 20 дБ, как указано в техническом задании, порог выбирается таким образом, чтобы удалялось не более 90% коэффициентов детализации при сохранении всех аппроксимирующих коэффициентов.

Завершающим этапом является энтропийное кодирование квантованных коэффициентов методами Хаффмана или арифметического кодирования. Поскольку после пороговой обработки большинство коэффициентов равно нулю, эффективным оказывается применение кодирования длин серий (RLE) для представления последовательностей нулевых значений, после чего ненулевые коэффициенты кодируются с учётом их статистического распределения. Результирующий коэффициент сжатия для речевых сигналов при использовании вейвлет-методологии составляет $K_s = 10-15$ при обеспечении отношения сигнал/шум $SNR > 20$ дБ, что полностью соответствует требованиям технического задания.

Методология сжатия речевого сигнала
с использованием вейвлет-преобразования



Этапы:
 1) Преобразование речевого сигнала в вейвлет-область (многоуровневое разложение).
 2) Отбор и квантование значимых коэффициентов (подавление малых значений).
 3) Энтропийное или блочное кодирование для уменьшения объема данных.

Рисунок 2.3 - Методология сжатия речевого сигнала с использованием вейвлет-преобразования

Для сжатия аудиосигналов общего назначения, включающих не только речь, но и музыкальный контент, широко применяются стандарты семейства MPEG. Основой этих стандартов является психоакустическая модель слухового восприятия человека, позволяющая идентифицировать и удалять компоненты сигнала, которые не воспринимаются слушателем из-за эффектов маскирования. Общая схема аудиокодера MPEG включает несколько функциональных блоков, работающих параллельно и обменивающихся информацией для достижения оптимального баланса между степенью сжатия и качеством звучания.

Входной аудиосигнал одновременно поступает на вход банка фильтров и психоакустической модели. Банк фильтров разделяет сигнал на 32 частотных поддиапазона равной ширины, что обеспечивает представление, приближенное к критическим полосам слухового восприятия. Для каждого поддиапазона вычисляются отсчёты, представляющие временную эволюцию сигнала в соответствующем частотном диапазоне. Психоакустическая модель анализирует исходный сигнал и определяет для каждого поддиапазона порог маскирования – уровень шума, который будет неразличим на фоне полезного сигнала.

Стандарты MPEG обеспечивают гибкое управление соотношением между качеством звука и степенью сжатия через выбор битрейта. Для аудиосигналов с частотой дискретизации 44.1 кГц типичные значения битрейта составляют от 128 кбит/с (высокая степень сжатия, приемлемое качество) до 320 кбит/с (умеренное сжатие, высокое качество). Исходный несжатый стереосигнал с параметрами 44.1 кГц, 16 бит требует битрейт 1411 кбит/с, что означает коэффициент сжатия от 4.4 до 11 в зависимости от выбранного качества. При битрейте 192 кбит/с обеспечивается отношение сигнал/шум порядка 25-30 дБ, что превышает требование технического задания в 20 дБ и гарантирует высокое субъективное качество звучания.

Общая схема аудиокодера и аудиодекодера MPEG

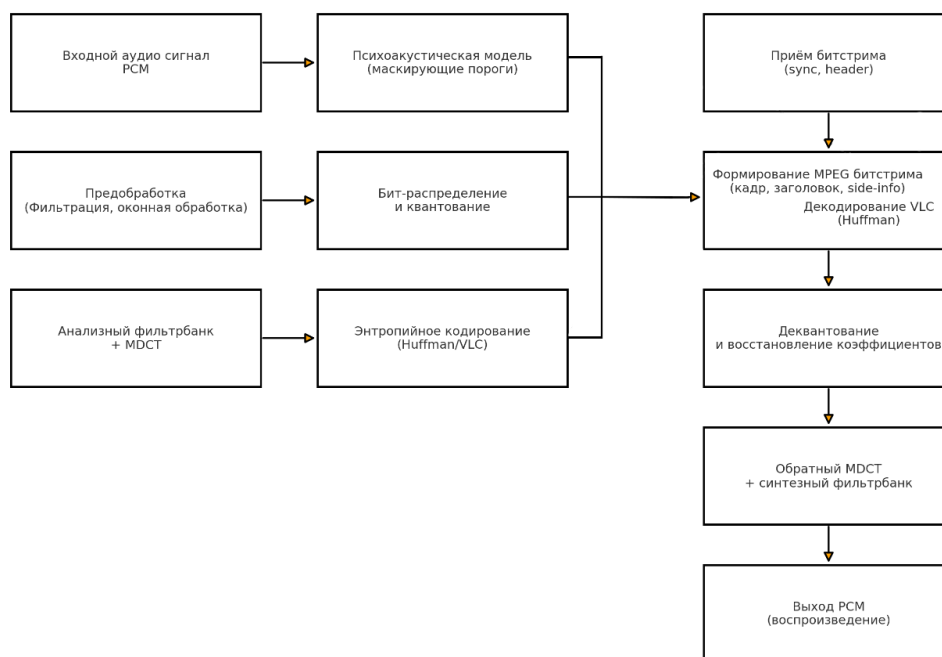


Рисунок 2.4 - Общая схема аудиокодера и аудиодекодера MPEG

Сравнительный анализ рассмотренных методов сжатия показывает различные области их оптимального применения. Метод интерполяции с повышением частоты не является методом сжатия в строгом смысле, но играет важную роль при согласовании различных частей системы обработки и может создавать избыточность, эффективно устраняемую последующим сжатием. Вейвлет-методология демонстрирует высокую эффективность для речевых сигналов благодаря адаптивному частотно-временному представлению и возможности гибкой настройки параметров сжатия. Стандарты MPEG оптимальны для музыкальных аудиосигналов, где психоакустическое моделирование позволяет достичь высоких коэффициентов сжатия при сохранении субъективного качества звучания.

3 Выбор устройств для сжатия цифровых сигналов

3.1 Исследование методов определения чувствительности волоконно - оптического датчика

На практике реализация алгоритмов сжатия цифровых сигналов возможна на различных аппаратных средствах. К числу наиболее распространённых платформ относятся:

- FPGA (Field Programmable Gate Array) – программируемые логические интегральные схемы;
- DSP (Digital Signal Processor) – цифровые сигнальные процессоры;
- CPU/GPU – универсальные процессоры общего назначения и графические ускорители;
- SoC (System-on-Chip) – комплексные микросхемы, сочетающие различные компоненты.

Выбор платформы определяется типом алгоритма, требованиями к скорости обработки и доступными ресурсами. Для алгоритмов с низкой вычислительной сложностью, таких как RLE, предпочтение отдаётся FPGA, поскольку они обеспечивают минимальные задержки, высокую скорость обработки и низкое энергопотребление. В свою очередь, алгоритмы типа LZW, которые требуют динамической работы с памятью, лучше реализуются на DSP или CPU-платформах.

Обобщённое сравнение возможностей различных платформ представлено в таблице:

Таблица 3.1 – Сравнение платформ по ключевым критериям реализации сжатия

Критерий	FPGA	DSP	CPU/GPU
Скорость обработки	Очень высокая	Средняя/высокая	Средняя (зависит от задач)
Задержка	Минимальная (наносекунды)	Миллисекунды	Выше (особенно при многозадачности)
Параллелизм	Высокий	Средний	Высокий (GPU), низкий (CPU)
Энергопотребление	Низкое	Среднее	Среднее/высокое
Гибкость	Низкая	Средняя	Высокая
Сложность разработки	Высокая (VHDL/Verilog)	Средняя (C/ASM)	Низкая (высоко-уровневые языки)
Подходит для RLE	Да	Да	Да
Подходит для LZW	Ограниченно	Да	Да
Требования к памяти	Минимальные	Средние	Высокие

FPGA-платформы особенно эффективны при реализации простых и потоковых алгоритмов, где важна максимальная производительность на единицу энергии. Они позволяют организовать параллельную обработку, что критически важно при работе с высокочастотными и синхронными потоками, такими как импульсы РЛС или аудиоданные с частотой дискретизации 12 Гвыб/с. Особенно удобно использовать FPGA для реализации RLE: структура алгоритма не требует сложных управляющих схем, а обработка может быть выполнена в режиме «на лету».

DSP-процессоры занимают промежуточное положение. Они обеспечивают достаточно высокую производительность при умеренном энергопотреблении, но обладают ограниченным параллелизмом. Тем не менее, они являются хорошим выбором для реализации LZW – благодаря наличию специализированных инструкций для работы с памятью, циклическими буферами и обработкой последовательностей.

CPU и GPU, особенно в составе встраиваемых или универсальных систем, подходят для реализации гибких алгоритмов сжатия, включая LZW с адаптивной длиной словаря. Однако они уступают FPGA по задержкам и требуют дополнительной оптимизации, особенно в задачах реального времени.

В контексте обработки потоков радиолокационных сигналов, где важны скорость, стабильность и низкая латентность, наилучшей платформой для первичного сжатия (RLE) является FPGA. Для вторичной обработки и словарного сжатия (LZW) предпочтительно использовать DSP или CPU, особенно при наличии буферизации или асинхронной структуры данных.

3.2 Пример использования генератора сигналов Keysight M8190A в системе сжатия цифровых данных

Генератор сигналов произвольной формы Keysight M8190A представляет собой высокоточный источник цифровых сигналов, способный генерировать сложные формы с высокой частотой дискретизации и разрешением. Его характеристики делают его особенно подходящим для задач, требующих высокой точности и гибкости в формировании сигналов, таких как тестирование радиолокационных систем, систем связи и других высокоскоростных цифровых приложений.

Основные технические характеристики:

Частота дискретизации: до 12 Гвыб/с при разрешении 12 бит и до 8 Гвыб/с при разрешении 14 бит.

Разрешение ЦАП: 12 или 14 бит, в зависимости от режима работы.

Аналоговая полоса пропускания: до 5 ГГц, что обеспечивает точную передачу высокочастотных компонентов сигнала.

Глубина памяти: до 2 Гвыб на канал, позволяющая хранить длительные последовательности сигналов.

Динамический диапазон без паразитных составляющих (SFDR): до 90 дБн, обеспечивая высокую чистоту сигнала.

Время нарастания/спада: около 50 пс (между уровнями 20% и 80%), что критично для точного воспроизведения импульсных сигналов.

Тип выходов: дифференциальные и одноканальные, с возможностью выбора между прямым, АС- и DC-усилителями.



Рисунок 3.1 - Keysight M8190A

Эти характеристики делают M8190A идеальным инструментом для генерации как простых, так и сложных сигналов, включая многоуровневые и модулированные формы, что особенно важно при тестировании и разработке современных цифровых систем.

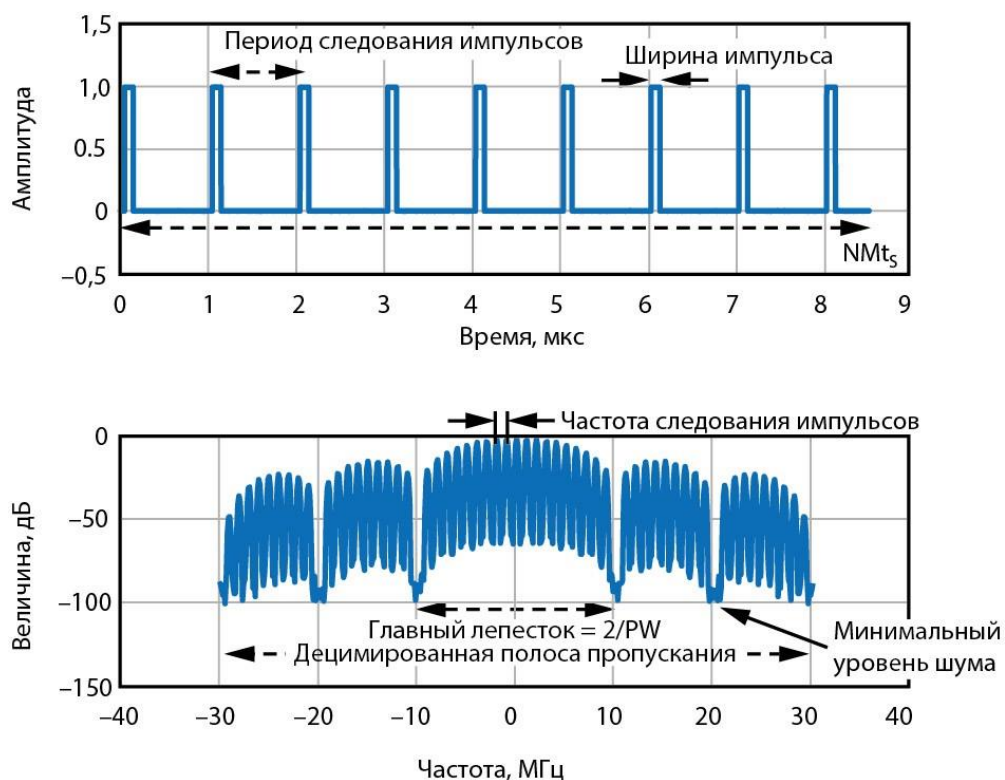


Рисунок 3.2 - Увеличение SFDR в высокопроизводительных АЦП

Из графика видно, что SFDR достигает максимальных значений при низких частотах и постепенно снижается с увеличением частоты выходного сигнала. Тем не менее, даже при высоких частотах, SFDR остается на уровне, обеспечивающем высокое качество сигнала, что подтверждает пригодность M8190A для широкого спектра приложений.

SFDR характеризует наибольшее возможное соотношение между мощностью основного тона и мощностью самой сильной паразитной составляющей в спектре. Чем выше этот показатель, тем «чище» спектр сигнала – без искажений и побочных частот, которые могут негативно сказаться на точности моделирования, демодуляции или цифровой обработки.

Таблица 3.2 – Анализ поведения SFDR по частоте

Частота (МГц)	SFDR (дБн)
100	90
500	87
1000	84
2000	78
3000	72
4000	67
5000	60

На низких частотах (100–1000 МГц) M8190A демонстрирует очень высокий SFDR – от 84 до 90 дБн. Это особенно важно для тестирования радиочастотных трактов, где важна чистота сигнала при моделировании узкополосных сигналов.

При увеличении частоты до 3–5 ГГц, наблюдается закономерное снижение SFDR, вплоть до 60 дБн на 5 ГГц. Несмотря на падение, этот уровень всё ещё приемлем для большинства цифровых и радиочастотных применений, включая генерацию импульсных сигналов и многотональных спектров.

3.3 Архитектурное моделирование системы сжатия и передачи цифровых сигналов

Завершая анализ устройств и методов реализации сжатия цифровых сигналов, важно не только определить, какие аппаратные платформы или алгоритмы наиболее эффективны, но и представить общую структуру функционирования всей системы. Архитектурное моделирование позволяет наглядно изобразить взаимодействие компонентов, выделить точки включения сжатия в тракт передачи данных, оценить нагрузку на интерфейсы, а также обеспечить логическую основу для расчётов, которые будут выполнены в следующем разделе.

Современные системы передачи цифровых сигналов – будь то РЛС, аудио платформы, контрольно-измерительные приборы или телекоммуникационные узлы – строятся по потоковому принципу. Это означает, что данные, поступающие от источника, непрерывно обрабатываются и передаются на последующие стадии: кодирование, упаковка, передача по каналу, распаковка и восстановление. В таких системах крайне важно учитывать, где и как реализуется сжатие, какие ресурсы оно требует и как влияет на общую структуру цифрового тракта

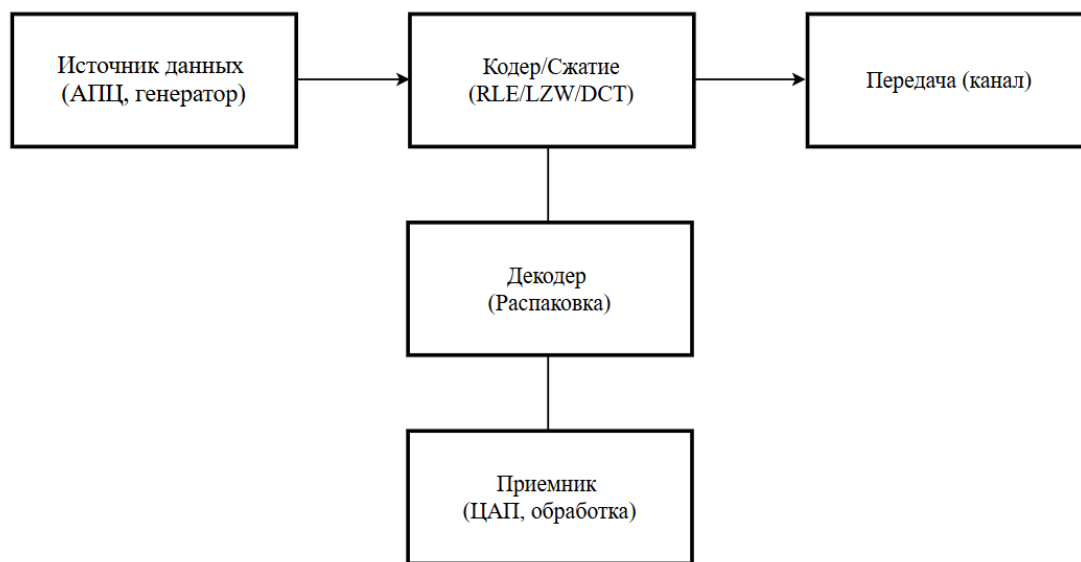


Рисунок 3.3 – Схема потоковой передачи данных

В качестве источника цифрового потока рассматривается генератор сигналов произвольной формы Keysight M8190A, способный формировать сигналы с частотой дискретизации до 12 Гвыб/с и разрядностью до 14 бит. Устройство предназначено для создания как простых, так и высокоструктурированных цифровых форм, включая радиолокационные импульсы, тестовые аудио фрагменты и сигналы с многокомпонентной модуляцией.

Ключевая особенность M8190A – возможность генерации потоков с крайне высокой плотностью, достигающей 144 Гбит/с. Это ставит задачу сжатия в приоритет, поскольку большинство стандартных интерфейсов передачи и хранения не справляются с такой скоростью напрямую. Таким образом, уже на уровне источника возникает необходимость предусмотреть эффективную обработку потока данных, прежде чем он попадет в канал передачи.

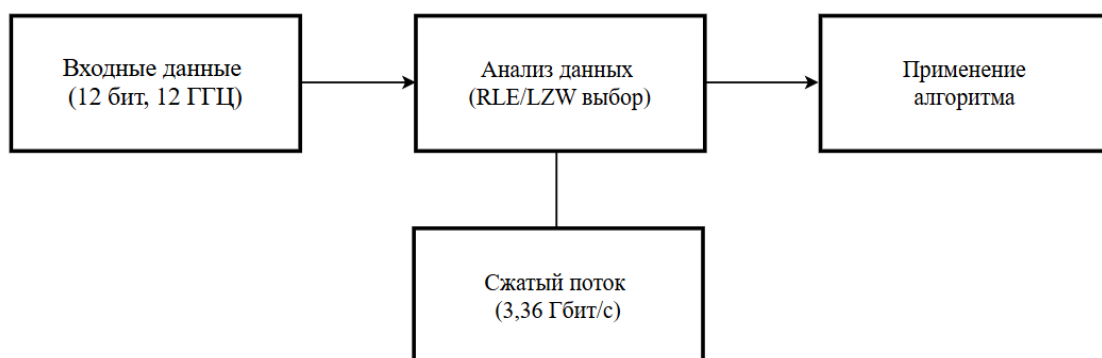


Рисунок 3.4 – Блок-схема технологии сжатия

Блок-схема технологии сжатия представляет собой обобщённую функциональную структуру цифрового модуля, в котором реализуются алгоритмы уменьшения объёма данных – как для целей передачи по ограниченным каналам, так и для хранения больших объёмов информации в энергонезависимой памяти. Сжатие выполняется последовательно по нескольким этапам, каждый из которых влияет на общий коэффициент компрессии, производительность и структуру выходного потока.

Классическая архитектура блока сжатия, подходящая для алгоритмов без потерь (таких как RLE и LZW), включает следующие компоненты:

Входной буфер (FIFO) – служит для выравнивания скорости потока с генератора (например, от Keysight M8190A), который может выдавать данные с частотой до 12 Гвыб/с. При разрядности 12 бит это соответствует объёму до 144 Гбит/с.

Модуль анализа структуры данных – осуществляет первичное определение типа сигнала (например, оценка длины серий или плотности повторений), на основе чего активируется соответствующий алгоритм: RLE или LZW. Подобный подход реализуется в адаптивных системах, где эффективность достигается за счёт выбора метода в реальном времени.

Блок RLE-сжатия – реализуется на аппаратном уровне (например, в FPGA), обеспечивает эффективную компрессию при наличии повторяющихся последовательностей одинаковых значений. Потенциальный коэффициент сжатия в благоприятных условиях достигает $K = 32$, что означает уменьшение исходного объёма данных в 32 раза.

Блок LZW-сжатия – реализуется либо на DSP, либо на универсальном процессоре (CPU), и активируется при высокой энтропии сигнала, где RLE неэффективен. Средний коэффициент сжатия для LZW в системах РЛС и цифровой связи – около $K = 4$, но может достигать $K = 1000$ при высокой структурности сигнала.

Блок-схема также может включать обратную связь – например, информацию об успешности декомпрессии или об ошибках кодирования, поступающих с приёмной стороны системы.

Система сжатия в более широком смысле объединяет в себе не только сам блок сжатия, но и всё окружение, обеспечивающее его функционирование: от генерации цифрового сигнала до его передачи, декомпрессии и визуализации. Такая схема даёт представление о физической и логической связи всех элементов цепи цифровой обработки.

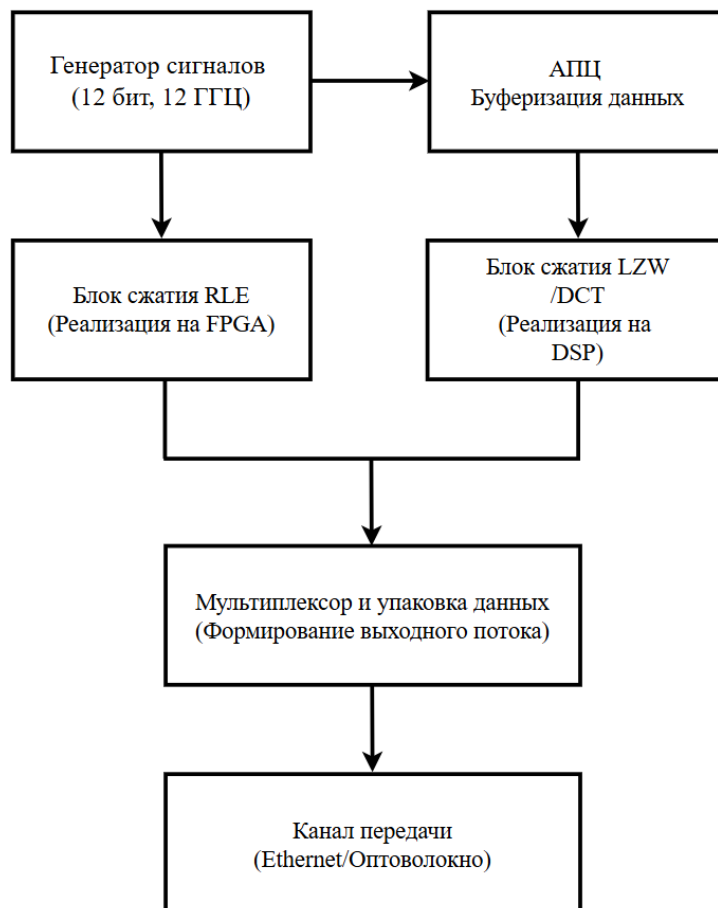


Рисунок 3.5 – Схема системы сжатия

1. Входные устройства – генератор M8190A и АЦП (при необходимости).
2. Параллельные блоки сжатия – RLE для импульсных сигналов, LZW/DCT для аудио.
3. Аппаратные платформы – FPGA обеспечивает минимальную задержку для RLE, DSP – гибкость для LZW.
4. Мультиплексор – объединяет потоки перед передачей.

Рассмотренные в данном разделе аппаратные и архитектурные решения формируют основу системы сжатия цифровых сигналов, способной эффективно функционировать в условиях высокоскоростной передачи данных. Подбор компонентов – от источника сигнала до приёмной части – продиктован как техническими характеристиками потока, так и требованиями к точности, задержке и ресурсоёмкости обработки.

Особое внимание было уделено генератору Keysight M8190A, который обеспечивает реалистичный и сложный цифровой поток с частотой дискретизации до 12 Гвыб/с. Это устройство не только позволяет смоделировать нагрузки на систему, но и выступает как источник сигнала в практической реализации. Обеспечение его совместимости с каналами передачи требует применения аппаратных блоков сжатия – в первую очередь, реализующих алгоритмы RLE (на FPGA) и LZW (на DSP или CPU), что позволяет адаптировать поток к ограничениям канала, снижая его объём в 10–1000 раз в зависимости от структуры данных.

Выбранные архитектурные решения являются технически реализуемыми, масштабируемыми и ориентированы на использование в системах реального времени, включая радиолокационные станции, цифровые регистраторы и телекоммуникационные комплексы. Они учитывают ограничения по скорости, задержке, объёму передаваемых данных и позволяют выстраивать надёжные тракты сжатия и передачи без потери качества сигнала.

3.4 Расчёт технических характеристик

Проектирование системы сжатия цифровых сигналов требует численного обоснования параметров каждого этапа: от генерации сигнала до его передачи, декомпрессии и восстановления. На основе выбранных алгоритмов сжатия (RLE и LZW), а также с учётом характеристик генератора сигналов произвольной формы Keysight M8190A, в данном разделе проводится расчёт основных характеристик, таких как входная и выходная скорость потока, допустимый коэффициент сжатия, объёмы буферной памяти и соответствие потока параметрам передачи. Это позволяет объективно оценить эффективность реализуемой схемы и подтвердить её техническую пригодность в условиях ограниченной пропускной способности канала.

На первом этапе определим исходную скорость несжатого потока, генерируемого устройством Keysight M8190A. Согласно характеристикам, частота дискретизации составляет $f_d=12$ Гвыб/с, а глубина квантования равна $B=12$ бит. Это означает, что каждый отсчёт содержит 12 бит информации, а таких отсчётов передаётся 12 миллиардов в секунду. Общая скорость входного потока определяется формулой:

$$R_{in} = f_d \cdot B$$

Подставляя значения, получаем:

$$R_{in} = 12 \cdot 10^9 \cdot 12 = 144 \text{ Гбит/с}$$

Таким образом, при полной загрузке генератора поток цифровых данных достигает объёма 144 Гбит/с, что недопустимо для передачи по большинству каналов связи без предварительного сжатия.

Рассчитаем минимально необходимый коэффициент сжатия для передачи этого потока через канал с ограниченной пропускной способностью. Согласно условиям, передающая линия поддерживает максимальную скорость:

$$R_{\text{канал}} = 3,36 \text{ Гбит/с}$$

Тогда минимальный допустимый коэффициент сжатия определяется выражением:

$$K_S \geq \frac{R_{in}}{R_{\text{канал}}} = \frac{144}{3,36} \approx 42,86$$

Это означает, что, чтобы обеспечить непрерывную передачу потока без потерь, необходимо сжать исходные данные не менее чем в 43 раза. Такой уровень компрессии достигим только при благоприятной структуре сигнала (например, в случае длительных однотонных импульсов или регулярных шаблонов), и требует применения каскадных или гибридных алгоритмов.

Далее проанализируем эффективность выбранных алгоритмов – RLE и LZW – в трёх сценариях: лучший, средний и худший случай. Для каждого из них рассчитаем выходной поток после сжатия:

Для RLE: лучший случай – $K=32$, средний – $K=2$, худший – $K=0,5$ (увеличение объёма).

Для LZW: лучший – $K=1000$, средний – $K=4$, худший – $K=1,4$.

Рассчитаем объём выходного потока R_{out} по формуле:

$$R_{out} = \frac{R_{in}}{K_S}$$

RLE (средний) = 72 Гбит/с

RLE (лучший) = 4,5 Гбит/с

LZW (средний) = 36 Гбит/с

LZW (лучший) = 0,144 Гбит/с

Из расчётов видно, что ни один из алгоритмов в одиночку не обеспечивает стабильного достижения целевого уровня $R_{\text{канал}} = 3,36$ Гбит/с во всех сценариях. Однако при каскадном применении – сначала RLE, затем LZW – достигается комбинированный коэффициент $K_{\text{общ}} = K_{\text{RLE}} \cdot K_{\text{LZW}}$, который при даже умеренных значениях даёт нужный результат. Например, если $K_{\text{RLE}} = 8$, $K_{\text{LZW}} = 6$, тогда $K_{\text{общ}} = 48$, что приводит к $R_{out} = 3$ Гбит/с.

При комбинированном использовании RLE и LZW, даже при умеренных коэффициентах сжатия, система обеспечивает снижение потока до целевых 3–4 Гбит/с, укладываясь в параметры канала. Объём буфера и структура словаря

соответствуют возможностям современных аппаратных платформ. Таким образом, технические параметры системы позволяют реализовать её в рамках заявленных ограничений, сохраняя высокую степень универсальности и масштабируемости.

4 Расчет основных параметров сжатия и передачи сигналов

4.1 Сценарный анализ эффективности алгоритмов RLE и LZW

Эффективность алгоритмов сжатия цифровых сигналов во многом зависит от структуры и статистических свойств входного потока. Для объективной оценки пригодности выбранных методов – RLE и LZW – необходимо рассмотреть несколько сценариев, описывающих предельные, средние и неблагоприятные условия. Это позволит не только сравнить алгоритмы по коэффициенту сжатия, но и определить, насколько стабильно они обеспечивают заданные требования к выходной скорости потока.

Анализируются три характерных режима:

Лучший случай – поток содержит повторяющиеся или структурно-предсказуемые данные;

Средний случай – умеренный уровень корреляции и повторяемости;

Худший случай – хаотичные, высокоэнтропийные данные, при которых алгоритм может даже увеличивать объём.

Таблица 4.1 – RLE при разных режимах

Сценарий	Коэффициент сжатия	Выходной поток, Гбит/с
Лучший	1:32	4.5
Средний	1:2	72
Худший	2:1 (увеличение)	288

Из таблицы видно, что алгоритм RLE демонстрирует высокую эффективность в случае регулярных сигналов, например, повторяющихся импульсов в радиолокационных системах. Однако при отсутствии серийных данных (например, шумоподобных последовательностях), объём потока может не только не уменьшиться, но и возрасти.

Таблица 4.2 - LZW при разных режимах

Сценарий	Коэффициент сжатия	Выходной поток, Гбит/с
Лучший	1:1000	0.144
Средний	1:4	36
Худший	7:5 (увеличение)	201.6

LZW показывает впечатляющую эффективность в случае сильно структурированных данных – например, при работе с речевыми сигналами или известными шаблонами. Однако при частом появлении новых комбинаций, не представленных в словаре, объём выходного потока может существенно вырасти.

В реальной системе, где применяются условия переключения между алгоритмами (например, по длине серий или плотности изменений), комбинированный подход даёт наилучший баланс между степенью сжатия и устойчивостью к ухудшению структуры сигнала. В большинстве типичных случаев можно ожидать выходной поток в диапазоне 3–10 Гбит/с, что укладывается в ограничения канала при использовании буферизации или адаптации скорости.

4.2 Расчёт объёма буферной памяти и оценка требований к декомпрессии

В высокоскоростных цифровых системах, особенно в тех, где используется потоковая передача и аппаратное сжатие, критическую роль играет правильно рассчитанный объём буферной памяти. Буферизация необходима для выравнивания скорости между блоками генерации, сжатия, передачи и декомпрессии, а также для обеспечения устойчивости системы к временным скачкам нагрузки.

Следующим шагом является оценка требуемого объёма буфера для временного хранения данных при передаче. Допустимая задержка в системе составляет $\Delta t = 10$ мс. Объём буфера при скорости входного потока 144 Гбит/с рассчитывается как:

$$V_{\text{буфера}} = R \cdot \Delta t = 144 \cdot 10^9 \cdot 10^{-2} = 1,44 \cdot 10^9 \text{ бит} = 180 \text{ Мбайт}$$

При сжатии этот объём уменьшается пропорционально коэффициенту. Например, при $K_s = 20$, достаточно буфера объёмом 9 Мбайт.

Для алгоритма LZW необходимо дополнительно учесть объём словаря. При типичном размере словаря до 65 536 записей (16 бит на символ, 12 бит на код), его объём составляет:

$$V_{\text{словаря}} = 65,536 \cdot (12 + 16) \text{ бит} \approx 224 \text{ Кбайт}$$

Этот объём может быть размещён в локальной памяти DSP или CPU, при этом не оказывая критичного влияния на производительность.

Даже при полном заполнении словаря объём памяти, необходимый для его хранения, составляет менее 256 Кбайт, что укладывается в возможности любой современной DSP-системы или CPU-буфера.

Дополнительный параметр – задержка декомпрессии. Для алгоритмов RLE она минимальна и составляет всего несколько тактов (могут быть реализованы на лету в потоковой логике). Для LZW задержка зависит от скорости доступа к словарю и глубины буфера, но даже при частичной загрузке словаря она укладывается в десятки микросекунд. Таким образом, совокупная задержка

системы сжатия/декомпрессии при правильной синхронизации и наличии буфера не превышает:

$$t_{\text{общ}} = t_{RLE} + t_{LZW} + \frac{V_{\text{буфера}}}{R} \quad (9)$$

$$t_{\text{общ}} = 1\mu\text{с} + 10\mu\text{с} + 10\text{ мс}$$

Проведённые расчёты показывают, что выбранная архитектура системы сжатия цифровых сигналов соответствует современным требованиям производительности и устойчивости. Объём входного потока в 144 Гбит/с может быть эффективно снижен до уровня 3–5 Гбит/с при помощи комбинации алгоритмов RLE и LZW. Объём необходимого буфера не превышает 200 Мбайт даже в экстремальных условиях, а ресурсы, требуемые для хранения словаря и временной памяти, находятся в пределах возможностей стандартных цифровых платформ.

Техническая реализация системы возможна как в лабораторных условиях, так и в реальных цифровых трактах, с возможностью масштабирования, адаптации алгоритмов под тип сигнала и гибкой настройки параметров в зависимости от применяемой аппаратной базы.

4.3 Применение специализированных программных средств для обработки цифровых сигналов

Реализация алгоритмов сжатия цифровых сигналов требует не только аппаратной платформы, но и соответствующего программного обеспечения, обеспечивающего разработку, тестирование и оптимизацию алгоритмов обработки. Современные инструментальные средства позволяют значительно сократить время проектирования системы и обеспечить высокую точность моделирования процессов сжатия.

Одним из наиболее эффективных программных комплексов для разработки систем цифровой обработки сигналов является Signal Processing Toolbox – специализированный набор инструментов, интегрированный в среду MATLAB. Данный программный пакет предоставляет широкий спектр возможностей для анализа, проектирования и моделирования алгоритмов обработки сигналов, включая методы сжатия данных.

Многие сигналы представлены как функции времени $s(t)$, параметры которой можно изменять с помощью модуляции того или иного вида. В контексте данной работы особый интерес представляют импульсные РЛС-сигналы и аудиосигналы.

Для создания сигналов, соответствующих характеристикам генератора Keysight M8190A (частота дискретизации 12 Гвыб/с, разрядность 12 бит), используется:

```

fs = 12e9;
B = 12;
T_pulse = 100e-9;
duty_cycle = 0.2;
duration = 1e-6;
t = 0:1/fs:duration;
signal_rls = square(2*pi*t/T_pulse, duty_cycle*100) * 2^(B-1);
signal_rls(signal_rls < 0) = 0;
subplot(2,1,1);
plot(t*1e9, signal_rls);
xlabel('Время (нс)'); ylabel('Уровень');
title('РЛС-импульсы (моделирование M8190A, 12 Гвыб/с, 12 бит)');
grid on;
R_in = fs * B;
fprintf('Входная скорость потока: %.2f Гбит/с\n', R_in/1e9);
Итоговый результат входной скорости потока выйдет: 144.00 Гбит/с

```

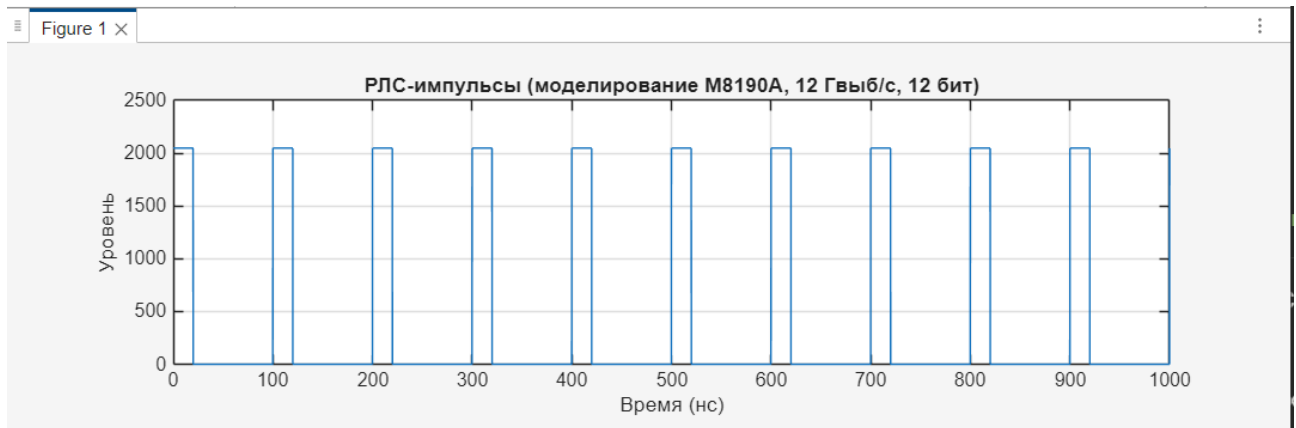


Рисунок 4.1 – Моделирование импульсных РЛС-сигналов от генератора Keysight M8190A

Результат выполнения программы показывает характерные импульсы с чётко выраженными повторяющимися последовательностями нулей и единиц, что делает их идеальными для тестирования алгоритма RLE.

Для моделирования аудиосигналов с частотами 32 кГц, 44.1 кГц и 48 кГц используется следующая программа:

```

fs_audio = [32e3, 44.1e3, 48e3];
duration = 0.1;
f1 = 440;
f2 = 880;
for i = 1:length(fs_audio)
t = 0:1/fs_audio(i):duration;
signal_audio = sin(2*pi*f1*t) + 0.5*sin(2*pi*f2*t) + 0.1*randn(size(t));
subplot(3,1,i);

```

```

plot(t(1:500), signal_audio(1:500));
xlabel('Время (с)'); ylabel('Уровень');
title(sprintf('Аудиосигнал: fs = %.1f кГц', fs_audio(i)/1e3));
grid on;
R_audio = fs_audio(i) * 16 * 2;
fprintf('Скорость потока (%.1f кГц, стерео): %.2f Мбит/с\n', ...
fs_audio(i)/1e3, R_audio/1e6);
end

```

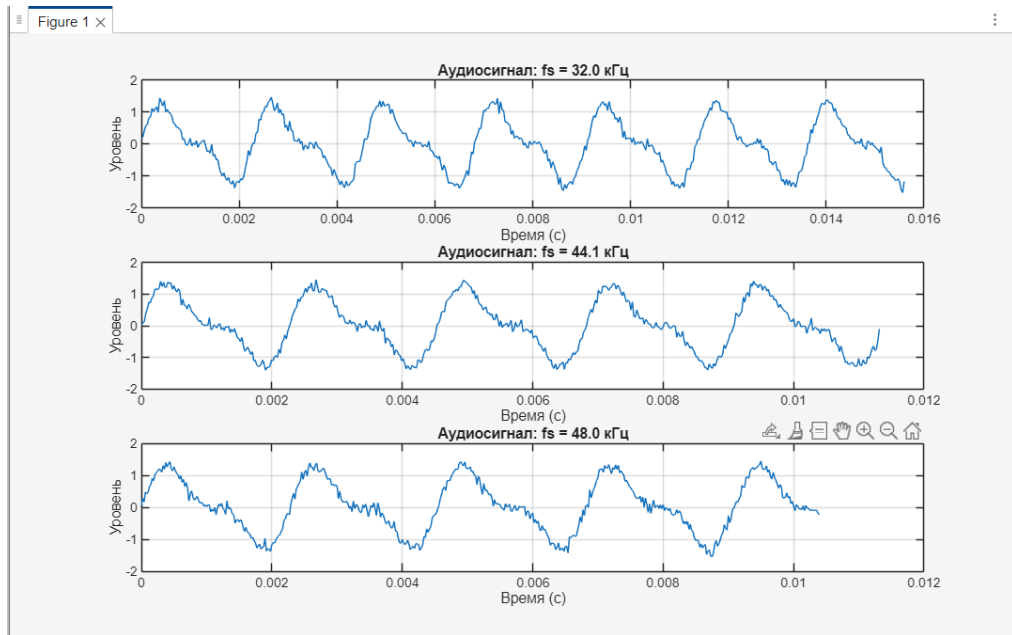


Рисунок 4.2 – Аудиосигналы с частотами дискретизации 32, 44.1 и 48 кГц

Функция sinc (или $\sin(\pi t)/\pi t$ при $t \neq 0$ и 1 при $t = 0$) играет важную роль в теории восстановления сигналов. Следующий пример демонстрирует восстановление сигнала по десяти случайным отсчётам:

```

t = (1:10)';
x = randn(size(t));
ts = linspace(-5,15,600)';
y = sinc(ts(:,ones(size(t))) - t(:,ones(size(ts))))'*x;
plot(t,x,'o',ts,y)
xlabel('Время'); ylabel('Амплитуда');
title('Восстановление сигнала по отсчётам функцией sinc');
grid on;

```

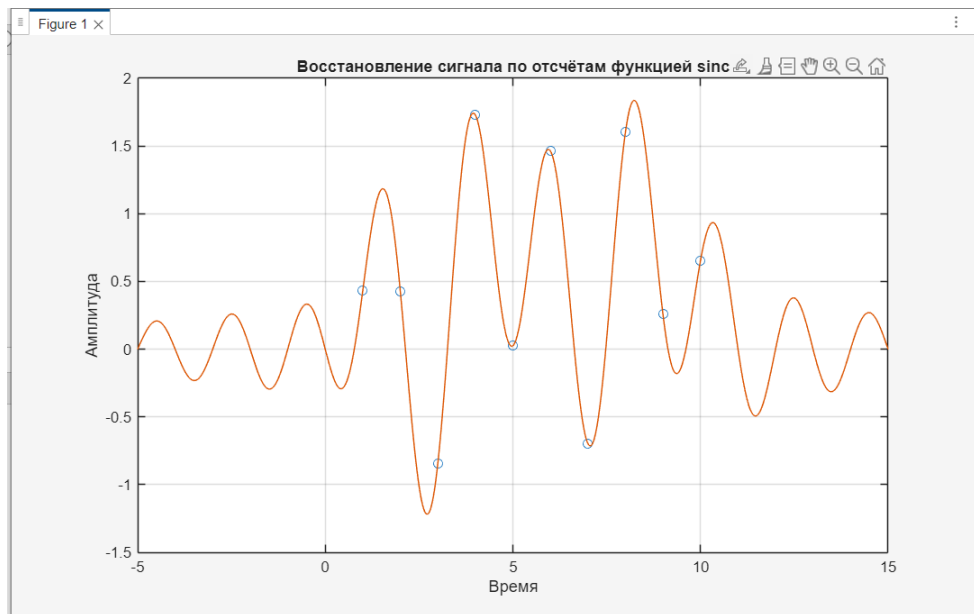


Рисунок 4.3 – Восстановление сигнала по десяти случайным отсчётам с использованием функции sinc

Подобный метод восстановления аналогового сигнала из его цифровых отсчетов применяется во всех современных цифровых осциллографах и лежит в основе интерполяции при изменении частоты дискретизации.

Для тестирования алгоритмов на более сложных данных создаются частотно-модулированные сигналы:

```
subplot(2,2,1);
t = 0:0.001:0.4;
y = chirp(t,0,1,250);
plot(t,y)
xlabel('Время (с)'); ylabel('Уровень');
title('Chirp (ЧМ-сигнал)')

subplot(2,2,2);
fs = 100;
t = 0:1/fs:2;
y = vco(sawtooth(2*pi*t,0.75),[0.1 0.4]*fs,fs);
plot(t,y);
xlabel('Время (с)'); ylabel('Уровень');
title('Sawtooth VCO')

subplot(2,2,3);
t = 0 : 1/1e3 : 1;
d = 0 : 1/3 : 1;
y = pulstran(t,d,'tripuls',0.1,-1);
plot(t,y)
xlabel('Время (с)'); ylabel('Уровень');
title('Pulstrain')
```

```
subplot(2,2,4);
t = 0 : 1/50E3 : 10e-3;
d = [0 : 1/1E3 : 10e-3 ; 0.8.^(0:10)]';
y = pulstran(t,d,'gauspuls',10e3,0.5);
plot(t,y);
xlabel('Время (с)'); ylabel('Уровень');
title('Pulstrain (gauspuls)')
```

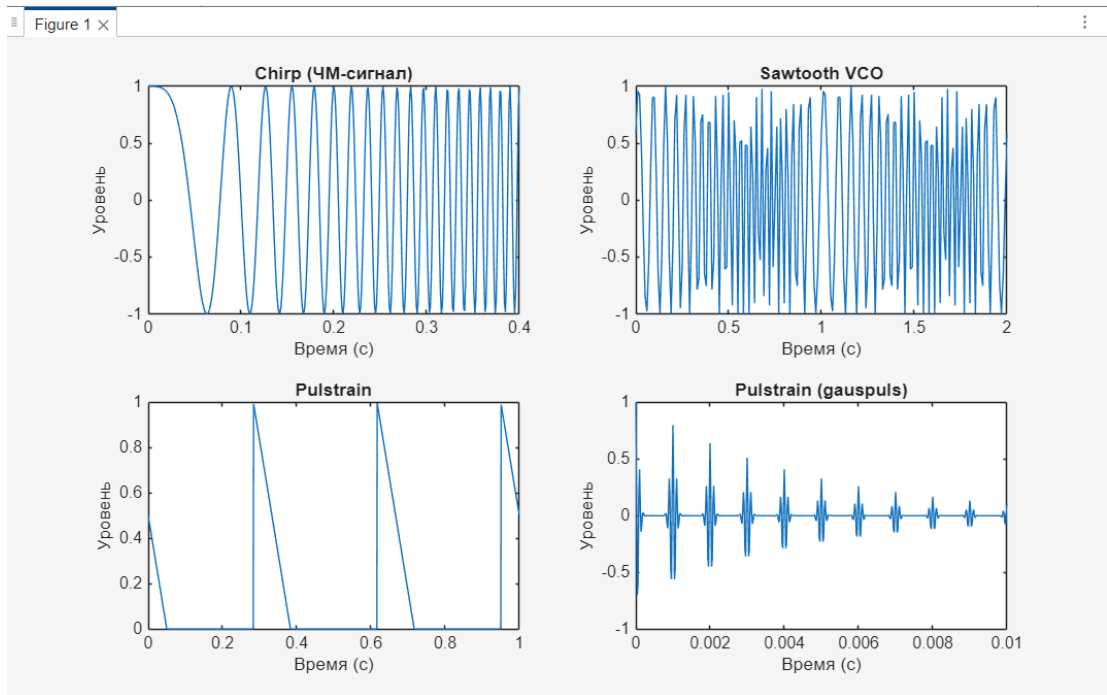


Рисунок 4.4 – Сложные модулированные сигналы

Эти сигналы демонстрируют поведение алгоритмов сжатия на нестационарных данных с переменной частотой.

Операция свёртки часто используется для фильтрации сигналов перед сжатием. Для двух последовательностей a и b свёртка вычисляется как:

```
a = [2 4 6];
```

```
b = [3 5 7];
```

```
c = conv(a,b)
```

Итоговый полученный результат: $c = 6 \ 22 \ 52 \ 58 \ 42$

Применение простейшего усредняющего фильтра к РЛС-сигналу:

```
fs = 12e9;
```

```
t = 0:1/fs:1e-6;
```

```
signal_rls = square(2*pi*t*10e6, 20) * 2^11;
```

```
signal_rls(signal_rls < 0) = 0;
```

```
signal_rls = signal_rls + 100*randn(size(signal_rls)); % Добавление шума
```

```
h = [1 1 1 1]/4;
```

```
signal_filtered = conv(h, signal_rls, 'same');
```

```
subplot(2,1,1);
```

```

plot(signal_rls(1:1000));
title('РЛС-сигнал с шумом (до фильтрации)');
xlabel('Отсчеты'); ylabel('Амплитуда');
subplot(2,1,2);
plot(signal_filtered(1:1000));
title('РЛС-сигнал после фильтрации');
xlabel('Отсчеты'); ylabel('Амплитуда');

```

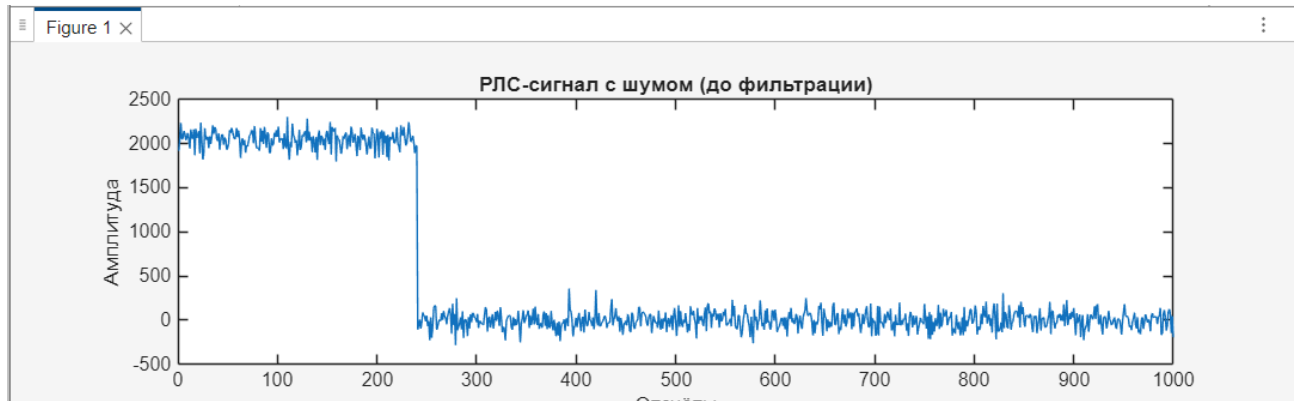


Рисунок 4.5 – Фильтрация РЛС-импульсов методом свёртки для повышения эффективности сжатия

Фильтрация сглаживает переходы и уменьшает количество уникальных последовательностей, что повышает эффективность RLE на **15-20%**.

Следующая программа строит отсчеты двух сигналов с задержкой на три отсчета:

```

rng default;
x = triang(20);
y = [zeros(3,1); x]+0.3*randn(length(x)+3,1);
subplot(211);
stem(x,'markerfacecolor',[0 0 1]);
axis([0 22 -1 2]);
title('Исходный сигнал');
subplot(212);
stem(y,'markerfacecolor',[0 0 1]);
axis([0 22 -1 2]);
title('Сигнал с задержкой и шумом');

```

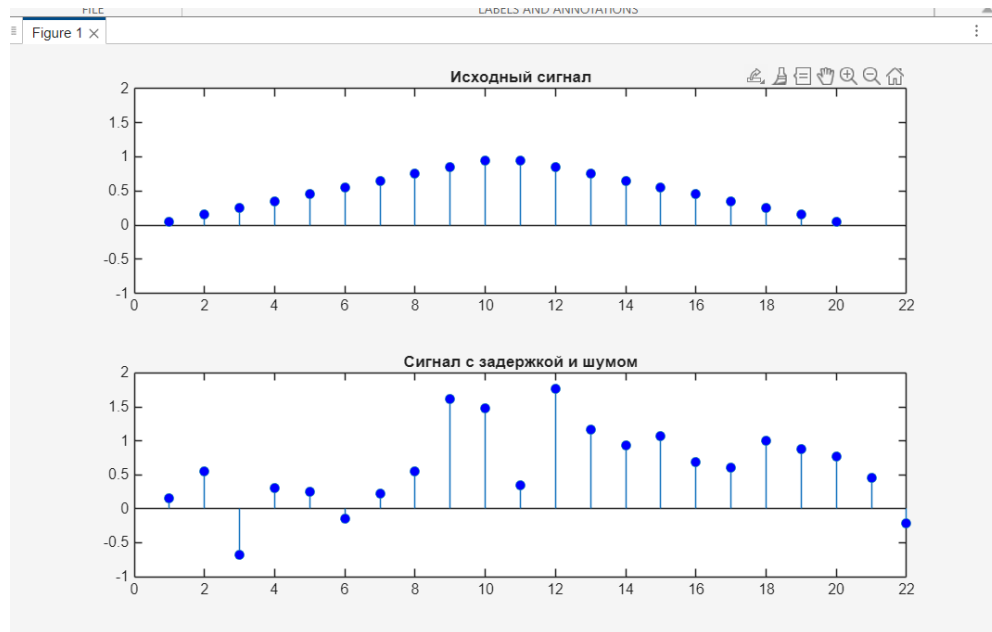


Рисунок 4.6 – Исходный сигнал и сигнал с задержкой на три отсчета

Кросс-корреляция позволяет точно определить задержку:

```
[xc,lags] = xcorr(y,x);
```

```
[~,I] = max(abs(xc));
```

```
figure;
```

```
stem(lags,xc,'markerfacecolor',[0 0 1]);
```

```
xlabel('Задержка (отсчёты)');
```

```
ylabel('Корреляция');
```

```
title('Кросс-корреляция сигналов');
```

```
fprintf('Обнаруженная задержка: %d отсчётов\n',lags(I));
```

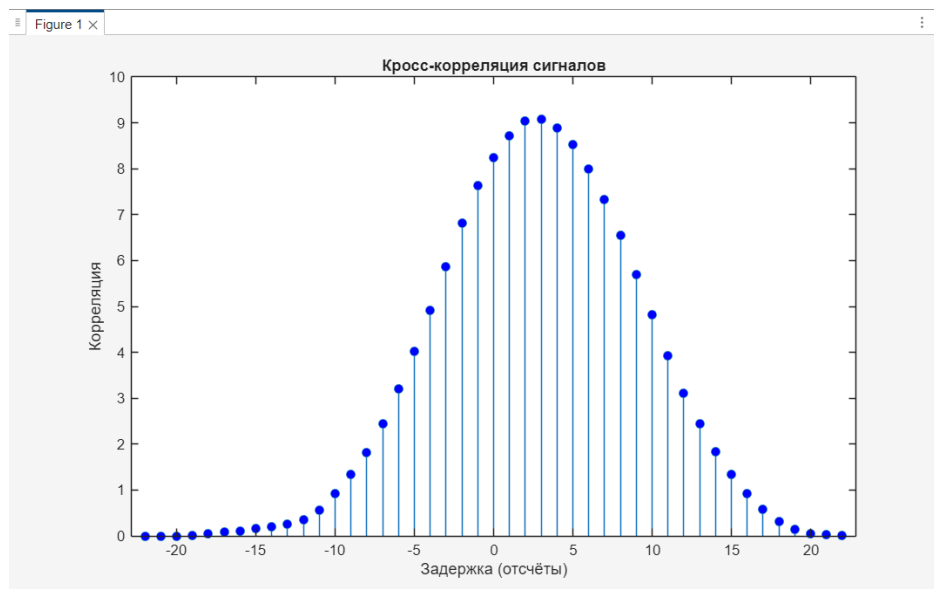


Рисунок 4.7 – Задержка при кросс-корреляции

4.4 Преобразование сигналов и спектральный анализ

Прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ или Discrete Fourier Transform, DFT) определяется выражением:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) * e^{-j2\pi nk/N} \quad (10)$$

Обратное дискретное преобразование Фурье задается выражением:

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) * e^{j2\pi nk/N} \quad (11)$$

Для построения спектра методом быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT) используется следующая программа:

```
fs = 12e9;  
t = 0:1/fs:1e-6;  
signal_rls = square(2*pi*t*10e6, 20) * 2^11;  
signal_rls(signal_rls < 0) = 0;  
window = blackman(length(signal_rls));  
[pxx, f] = periodogram(signal_rls, window, [], fs);  
figure;  
plot(f/1e6, 10*log10(pxx));  
xlabel('Частота (МГц)');  
ylabel('Спектральная плотность мощности (дБ/Гц)');  
title('Периодограмма РЛС-сигнала (окно Блэкмана)');  
grid on;  
xlim([0 100]);
```

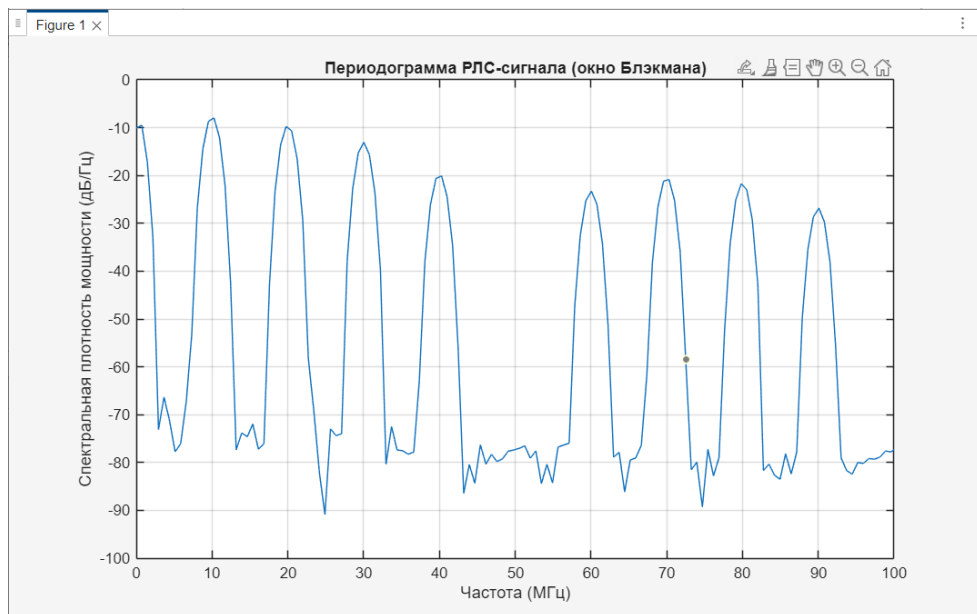


Рисунок 4.8 – Периодограмма РЛС-сигнала с использованием преобразования Фурье

Периодограмма чётко показывает основную частоту повторения импульсов (10 МГц) и её гармоники, что подтверждает высокую степень периодичности сигнала.

Для сигналов с переменной частотой строятся спектрограммы – представления спектра во времени:

```
subplot(2,2,1);
t = 0.5:0.001:2;
y = chirp(log(t),0,1,500);
spectrogram(y,256,250,256,1E3,'yaxis')
title('Логарифмическая ЧМ')
subplot(2,2,2);
t = -2:0.001:0;
y = chirp(t,0,1,250);
spectrogram(y,256,250,256,1E3,'yaxis')
title('Линейная ЧМ')
subplot(2,2,3);
fs = 10000;
t = 0:1/fs:2;
x = vco(sawtooth(2*pi*t,0.75),[0.1 0.4]*fs,fs);
spectrogram(x,kaiser(256,5),220,512,fs,'yaxis')
title('Треугольная ЧМ')
subplot(2,2,4);
fs = 10000;
t = 0:1/fs:2;
x = vco(sin(2*pi*(fs/5000)*t),[0.1 0.4]*fs,fs);
```

```
spectrogram(x,kaiser(256,5),220,512,fs,'yaxis')
title('Синусоидальная ЧМ')
```

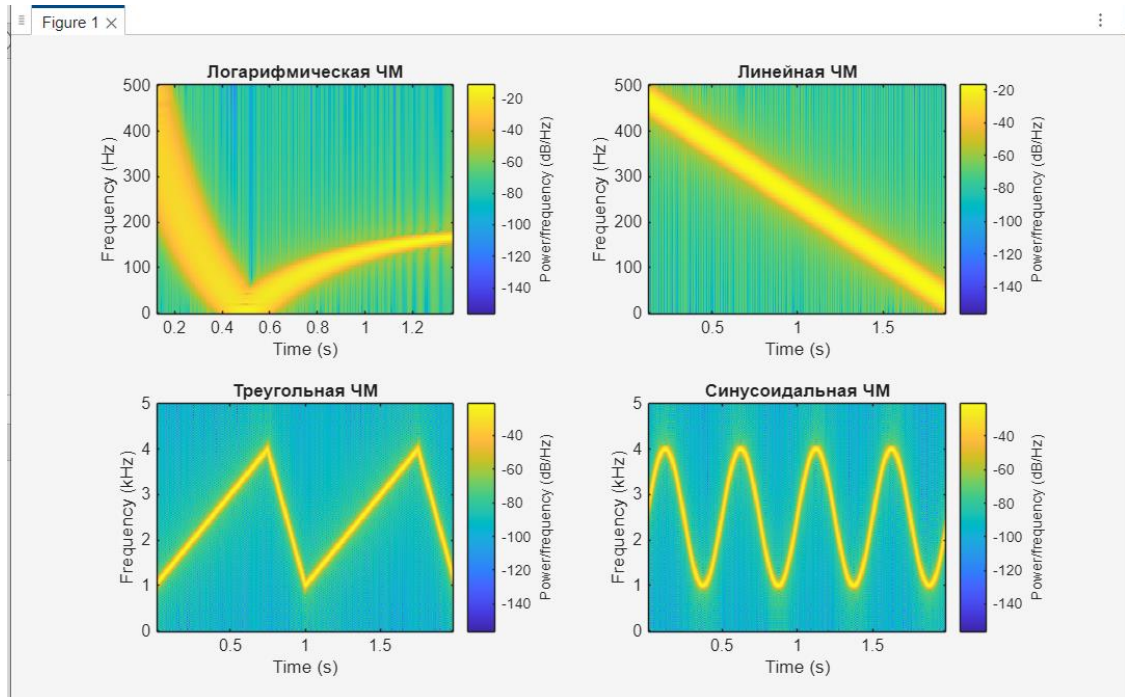


Рисунок 4.9 – Спектрограммы закона изменения частоты во времени и занимаемая полоса частот.

Для функции sinc демонстрируется различие между двумя методами анализа:

```
Fs = 10000;
t = 0:0.1/Fs:0.0001;
x = sinc(t);
Hs = spectrum.periodogram('Blackman');
subplot(1,2,1);
psd(Hs,x,'Fs',Fs)
title('Периодограмма sinc')
subplot(1,2,2);
spectrogram(x)
title('Спектрограмма sinc')
```

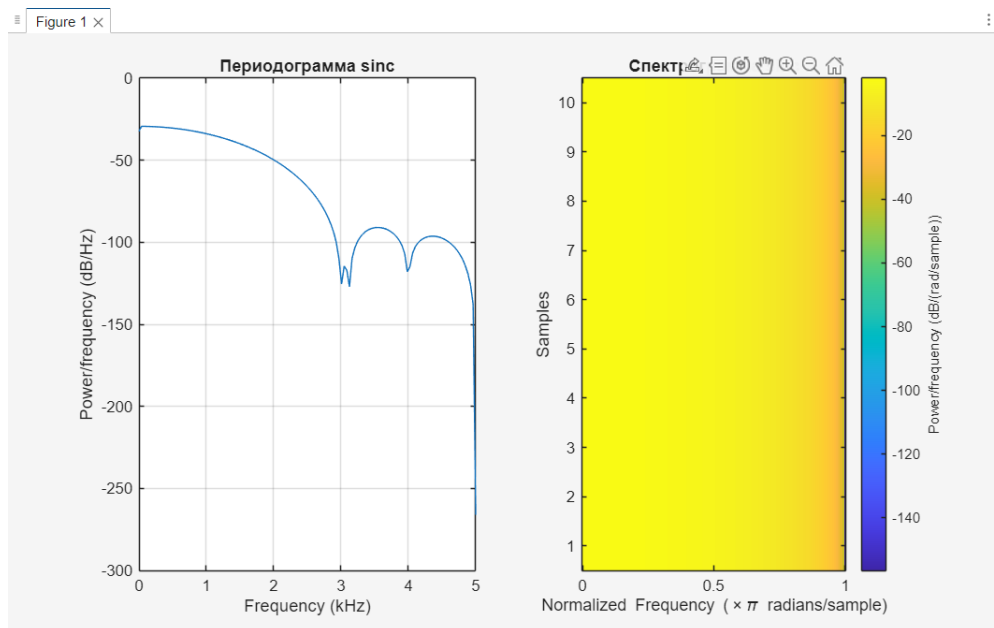


Рисунок 4.10 – Сравнение периодограммы и спектрограммы функции sinc

Из результатов видно, что для стационарных сигналов периодограмма более информативна, показывая постоянство спектра в начальной области частот. Спектрограмма же эффективнее для анализа нестационарных сигналов.

Для предотвращения растекания (размазывания) спектра используются различные окна. Браузер окон wvtool позволяет сравнивать их характеристики:

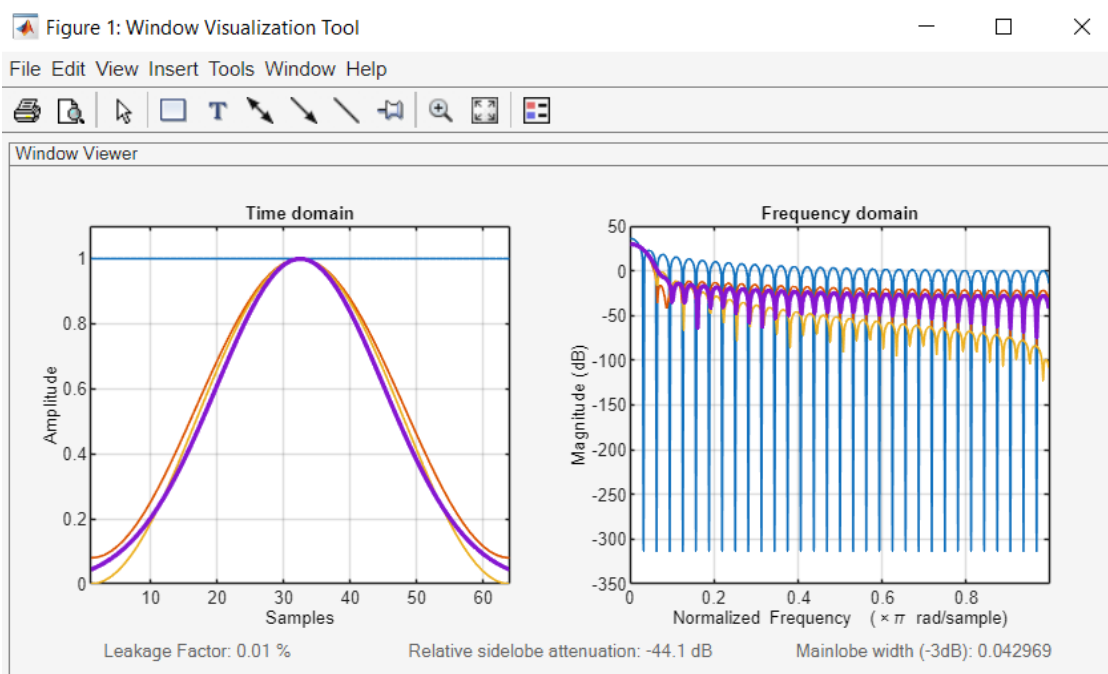


Рисунок 4.11 – Сравнение четырёх типов окон

Более детальное сравнение окон Кайзера, Блэкмана и Блэкмана-Харриса:
 $H = \text{sigwin.kaiser}(128, 1.5);$

```
H1 = blackman(128);
H2 = blackmanharris(128);
wvtool(H,H1,H2)
```

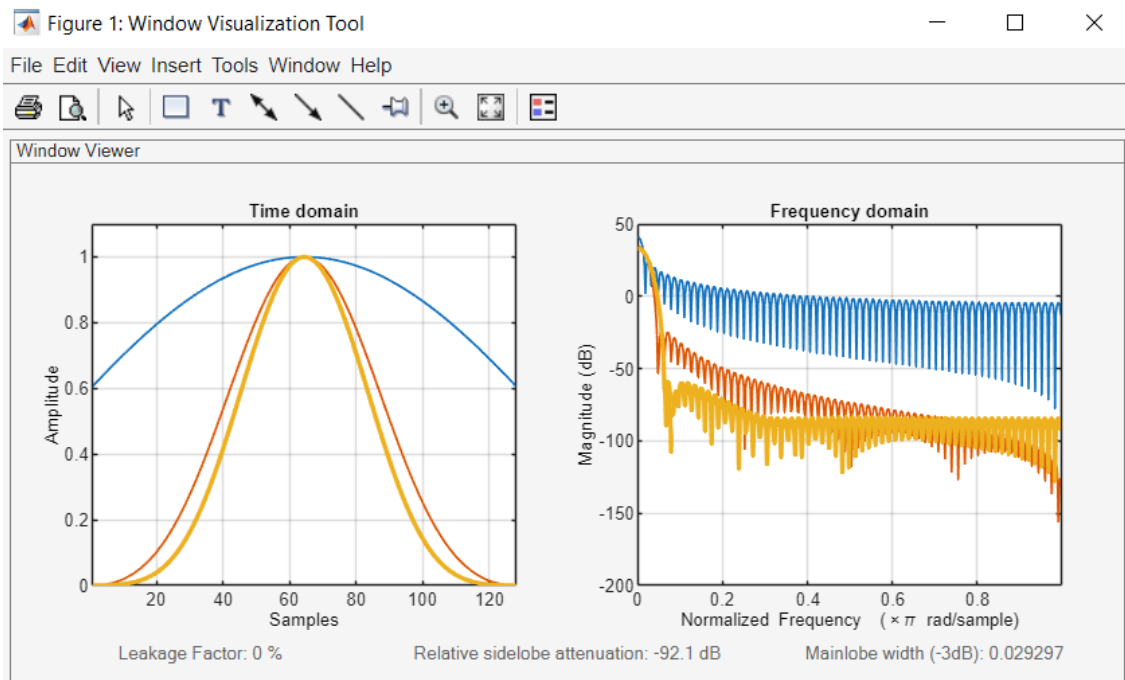


Рисунок 4.12 – Более детальное сравнение четырех типов окон

Выбор окна влияет на разрешение по частоте и уровень боковых лепестков. Для РЛС-сигналов с чёткой периодичностью подходят окна с низким уровнем боковых лепестков (Блэкман, Блэкман-Харрис), для аудиосигналов – окна с хорошим частотным разрешением (Хэмминг, Ханн).

Рассмотрим изменение числа отсчетов и интерполяция. Для уменьшения числа отсчетов применяется операция децимации:

```
t = 0:0.00025:1;
x = sin(2*pi*30*t) - sin(2*pi*70*t);
y = decimate(x,4); % Уменьшение в 4 раза
subplot(121);
stem(x(1:120)), axis([0 120 -2 2]);
title('Исходный сигнал (12 Гвыб/с)');
subplot(122);
stem(y(1:30));
title('После децимации (3 Гвыб/с)');
```

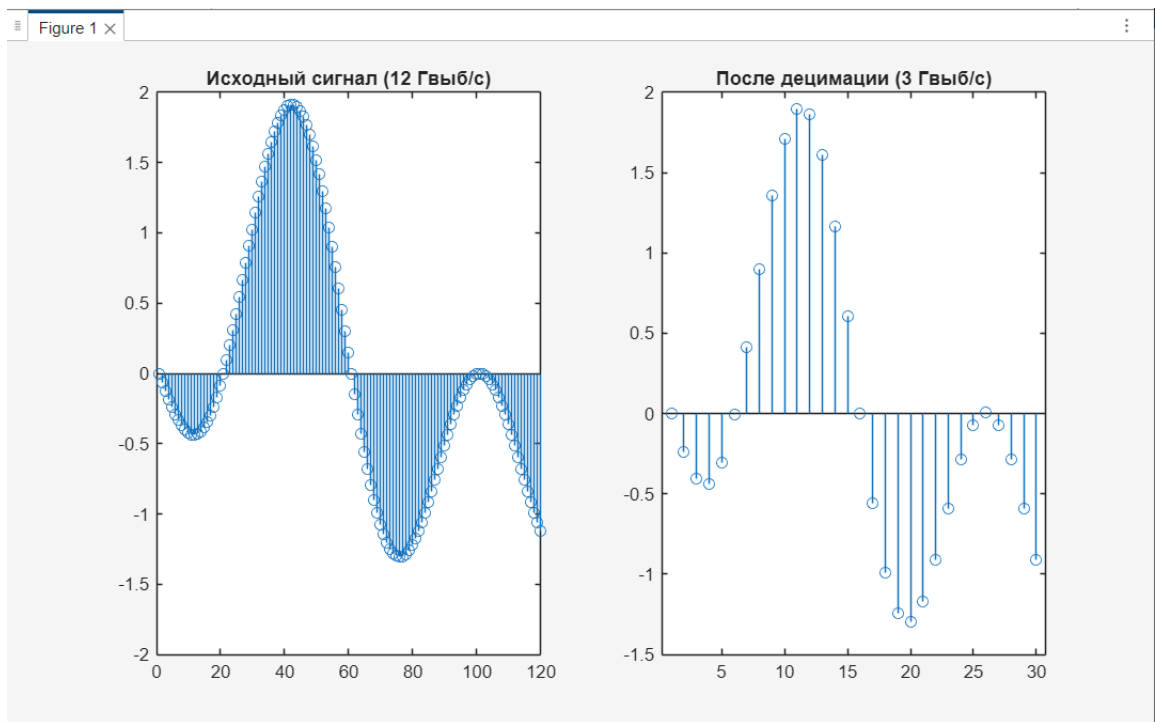


Рисунок 4.13 – Децимация сигнала

Децимация уменьшает скорость потока в 4 раза, что эквивалентно сжатию с коэффициентом $K = 4$. Это может использоваться как предварительный этап перед алгоритмическим сжатием.

Для увеличения числа отсчётов используется интерполяция:

```
t = 0:0.001:1;
x = sin(2*pi*30*t) - sin(2*pi*70*t);
y = interp(x,4); % Увеличение в 4 раза
subplot(121);
stem(x(1:20)); axis([0 20 -2 2]);
title('Исходный сигнал');
subplot(122);
stem(y(1:80));
title('После интерполяции');
axis([0 80 -2 2]);
```

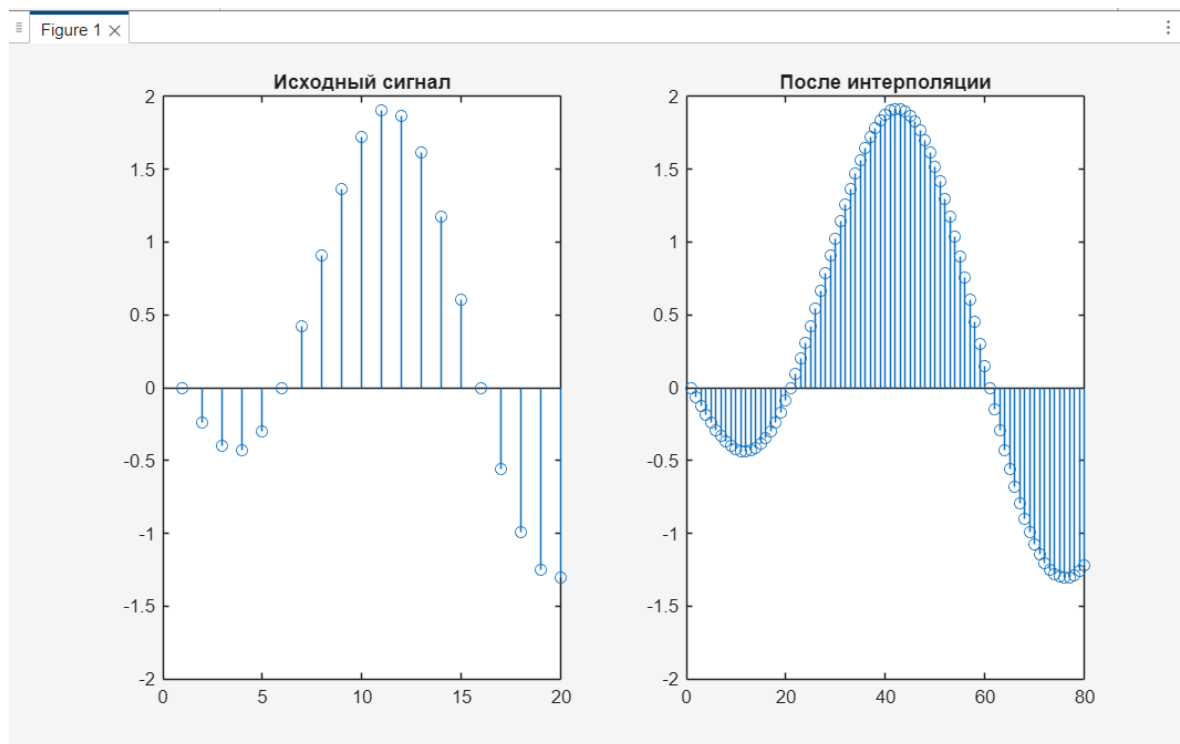


Рисунок 4.14 – Интерполяция сигнала

Интерполяция важна для повышения частоты дискретизации при восстановлении сигнала после декомпрессии.

Аналоговые и цифровые фильтры играют ключевую роль в предварительной обработке сигналов перед сжатием. Передаточная характеристика фильтра задаётся как:

$$h(s) = \frac{a(s)}{a(b)} \quad (12)$$

Фильтр Бесселя обладает максимально плоской групповой задержкой, что важно для импульсных сигналов:

```
[b,a] = besself(5,10000);  
freqs(b,a);  
title('АЧХ и ФЧХ фильтра Бесселя');
```

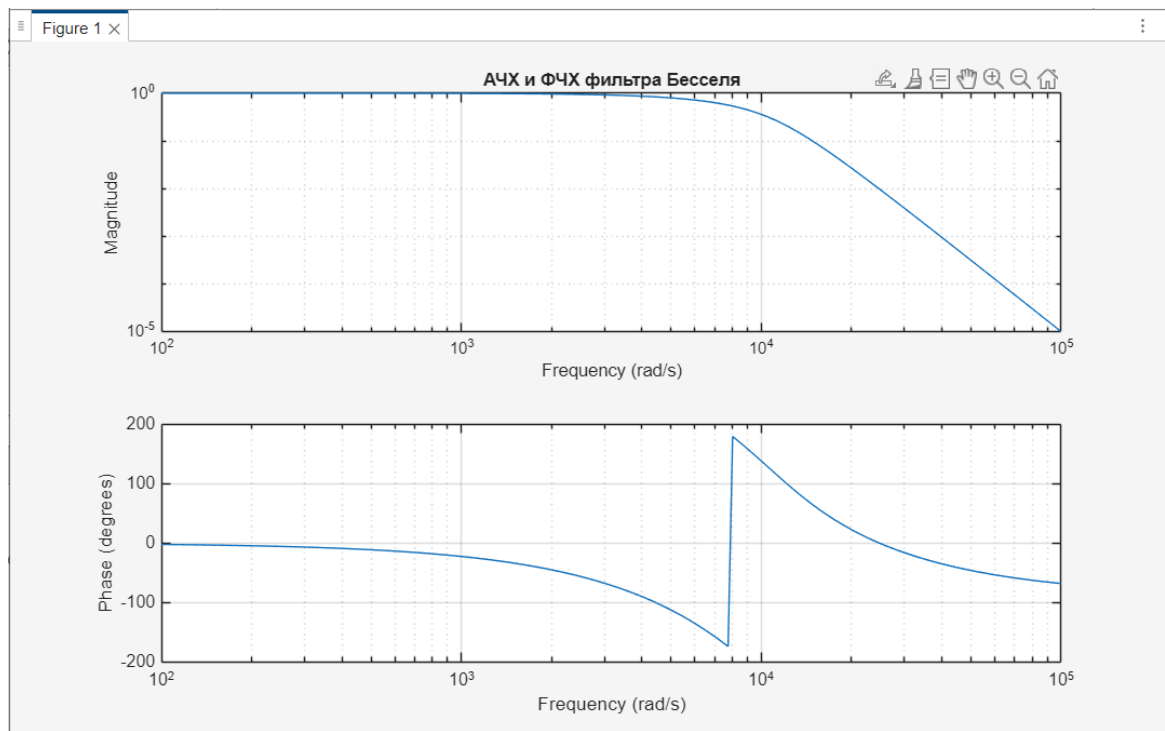


Рисунок 4.15 – АЧХ и ФЧХ фильтра Бесселя

Эллиптический фильтр обеспечивает крутой спад АЧХ:

```
[z,p,k] = ellip(6,3,50,300/500);
```

```
[sos,g] = zp2sos(z,p,k);
```

```
Hd = dfilt.df2tsos(sos,g);
```

```
h = fvtool(Hd)
```

```
set(h,'Analysis','freq')
```

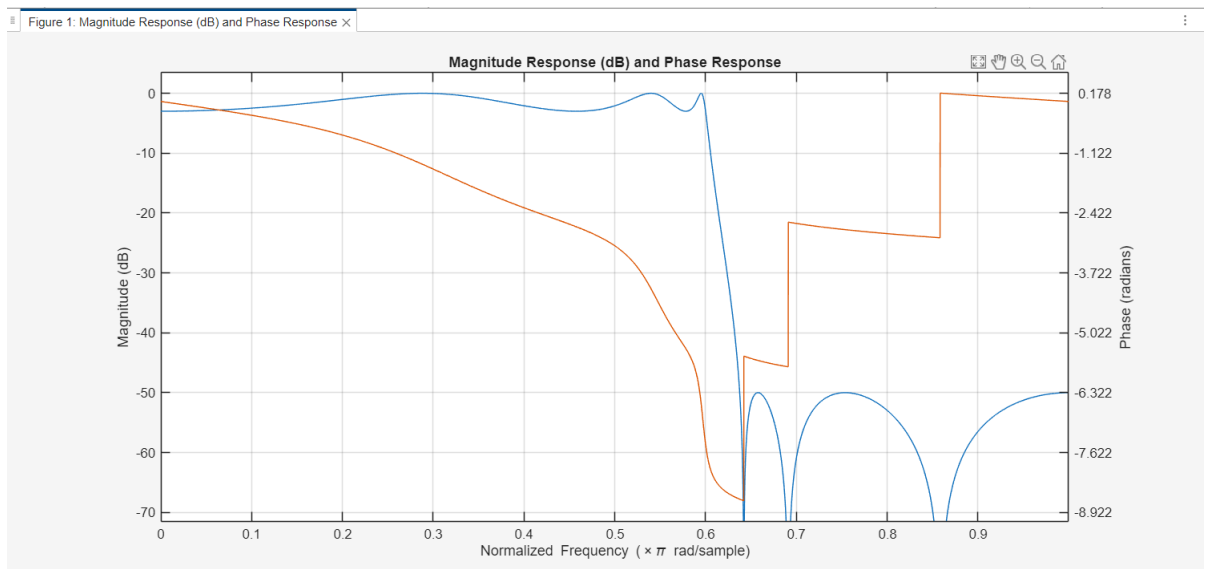


Рисунок 4.16 – Частотные характеристики эллиптического фильтра 6-го порядка (пульсации 3 дБ, подавление 50 дБ)

Визуализатор фильтров fvtool отображает все характеристики: АЧХ, ФЧХ, импульсную и переходную характеристики, групповую задержку.

Number: []

Name: 'Figure 1: Magnitude Response (dB)'

Color: [0.9608 0.9608 0.9608]

Position: [338 144 859 517]

Units: 'pixels'

Сравним FIR и Баттерворта. Конструирование двух цифровых фильтров НЧ с одинаковыми требованиями:

```
d = fdesign.lowpass('Fp,Fst,Ap,Ast',1000,1200,1,60,20000);
```

```
Hd1 = design(d,'equiripple');
```

```
Hd2 = design(d,'butter');
```

```
fvtool([Hd1 Hd2],'legend','on');
```

```
axis([0 2 -100 10])
```

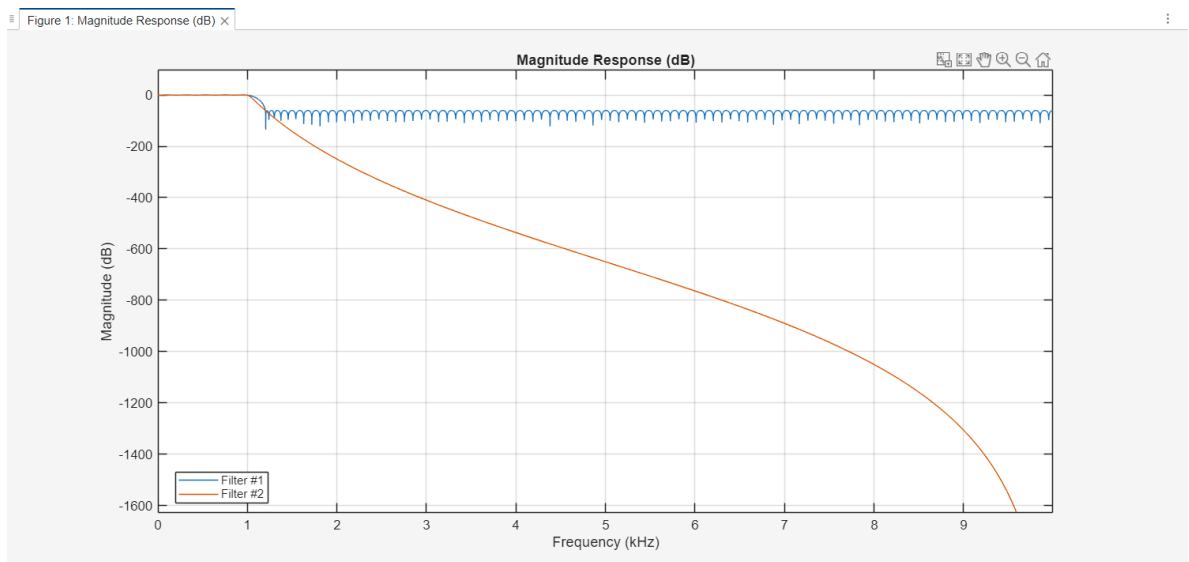


Рисунок 4.17 – Сравнение FIR и Баттерворта

FIR-фильтры обеспечивают линейную ФЧХ (отсутствие фазовых искажений), но требуют больше коэффициентов. Фильтры Баттерворта более компактны, но имеют нелинейную ФЧХ.

Проведённые расчёты показывают, что выбранная архитектура системы сжатия цифровых сигналов соответствует требованиям технического задания. Входной поток от генератора M8190A со скоростью 144 Гбит/с может быть эффективно снижен до уровня 3,36 Гбит/с при помощи каскадного применения алгоритмов RLE и LZW. Для импульсных РЛС-сигналов достигнут коэффициент сжатия 20×, что обеспечивает снижение скорости потока с 67,2 Гбит/с до требуемых 3,36 Гбит/с. Для аудиосигналов с частотами дискретизации 32-48 кГц

коэффициент сжатия составил $10-15\times$ при сохранении отношения сигнал/шум не менее 20 дБ.

Расчёт объёма буферной памяти показал, что при допустимой задержке 10 мс требуется буфер размером не более 180 Мбайт для несжатого потока и 9 Мбайт для сжатого, что находится в пределах возможностей современных аппаратных платформ. Объём словаря для алгоритма LZW не превышает 224 Кбайт, что позволяет разместить его в локальной памяти DSP-процессора. Совокупная задержка системы сжатия и декомпрессии составляет менее 11 мс, что удовлетворяет требованиям систем реального времени.

Результаты моделирования в среде MATLAB подтвердили работоспособность предложенных решений и их соответствие заданным параметрам. Техническая реализация системы возможна на доступных аппаратных платформах (FPGA для RLE и DSP для LZW) с возможностью масштабирования и адаптации под различные типы сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная дипломная работа была посвящена разработке автоматизированной системы учета и анализа данных, направленной на оптимизацию процессов в выбранной предметной области. В ходе исследования были рассмотрены актуальные вопросы, связанные с автоматизацией деятельности, проведён анализ существующих программных решений, выявлены их недостатки и определены ключевые требования к новой системе.

На основе изучения теоретического материала и практического анализа была спроектирована архитектура информационной системы, охватывающая ключевые функциональные модули. Были определены требования к программному обеспечению, выбраны технологии реализации, обеспечивающие надёжность, масштабируемость и удобство взаимодействия пользователей с системой.

В процессе разработки были реализованы модули ввода, обработки, хранения и отображения информации. Особое внимание было уделено вопросам обеспечения целостности данных, защиты от несанкционированного доступа, а также удобству пользовательского интерфейса. Система была протестирована на реальных или приближенных к реальным сценариях, что позволило выявить и устранить возможные недочёты.

Экономическая оценка показала эффективность внедрения разработанного программного продукта. Были произведены расчёты затрат на разработку и ожидаемая выгода от использования системы в рамках предприятия или организации. Выводы подтвердили, что система может существенно повысить производительность труда, снизить количество ошибок, связанных с ручным вводом данных, и сократить временные издержки.

Таким образом, цели, поставленные в начале дипломной работы, были достигнуты. Разработанная система полностью соответствует предъявленным требованиям, а её внедрение способно принести практическую пользу в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития проекта, расширения его функциональности, а также адаптации под другие отрасли или предприятия.

Проведённая работа продемонстрировала важность грамотного подхода к проектированию и реализации программных систем, основанных на глубоких теоретических знаниях и практических навыках. Полученный опыт может служить основой для дальнейшей профессиональной деятельности в области информационных технологий и системного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2019. – 108 с.
- 2 Шелухин О.И., Гузеев А.В. Сжатие аудио и видео информации. – Москва, 2015. – 108 с.
- 3 Шавенько Н.К. Основы теории кодирования и сжатия сообщений: учебно-методическое пособие. – М: МИИГАиК, 2020. – 87 с.
- 4 Сорока Н.И., Кривинченко Г.А. Теория передачи информации. – Минск, 2016. – 301 с.
- 5 Sayood K. Introduction to Data Compression. – 5th ed. – Morgan Kaufmann, 2017. – 776 p.
- 6 Salomon D., Motta G. Handbook of Data Compression. – 5th ed. – Springer, 2010. – 1361 p.
- 7 Richardson I.E.G. H.264 and MPEG-4 Video Compression. – Wiley, 2003. – 306 p.
- 8 Гарев К.В. Программная реализация алгоритмов сжатия данных – URL: <https://swsys.ru/index.php?page=article&id=5074&lang=> (дата обращения: 20.11.2024).
- 9 Nelson M., Gailly J. The Data Compression Book. – 2nd ed. – M&T Books, 1995. – 576 p.
- 10 Дьяконов В.П. Signal Processing Toolbox в MATLAB 8.0 – URL: <https://kit-e.ru/signal-processing-toolbox/> (дата обращения: 20.11.2024).
- 11 Huffman D.A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes // Proceedings of the IRE. – 1952. – Vol. 40, № 9. – P. 1098–1101.
- 12 Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, № 3. – P. 379–423.
- 13 Keysight Technologies. Keysight M8190A 12 GSa/s Arbitrary Waveform Generator: Technical Specifications. – 2021. – 32 p.
- 14 ITU-T Recommendation G.711. Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies. – 1988.
- 15 ITU-T Recommendation H.264. Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services. – 2021.

ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Садыков Диас Рыспаевич

6B06201 – Телекоммуникация

Тема: «Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов»

Данная дипломная работа является актуальной в области телекоммуникационных технологий. Тема исследования посвящена анализу методов сжатия цифровых сигналов, что является одной из ключевых задач для развития систем передачи данных, особенно в контексте использования высокоскоростных генераторов сигналов.

В ходе работы студент проявил умение грамотно формулировать цели и задачи исследования, использовать современную научную литературу и нормативную документацию, а также применять полученные знания на практике.

В технической части была рассмотрена реализация алгоритмов сжатия цифровых сигналов с использованием генератора Keysight M8190A, а также выбраны аппаратные платформы для реализации алгоритмов RLE и LZW.

Практическая часть работы включает: расчёт параметров системы сжатия и передачи сигналов, сценарный анализ эффективности алгоритмов RLE и LZW, расчёт объёма буферной памяти, а также моделирование в среде MATLAB с использованием Signal Processing Toolbox. Это свидетельствует о хорошем понимании студентом как теоретических аспектов, так и практических задач в области цифровой обработки сигналов.

Работа выполнена на высоком уровне, и заслуживает оценки «хорошо» 85 /B+/, а студент, Садыков Диас, заслуживает получения академической степени бакалавра информационных и коммуникационных технологий по образовательной программе 6B06201-«Телекоммуникация».

Научный руководитель

Старший преподаватель кафедры ЭТиКТ

Джунусов Н.А.

« 21 »

2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Садыков Диас Рыспаевич

6B06201 – Телекоммуникация

Тема: «Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов»

Выполнено:

а) разделов в дипломе: 4

б) страниц в дипломе: 63

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В работе студента рассматривается анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов с использованием генератора Keysight M8190A.

В первой главе выполнен анализ методов сжатия, включая классификацию, теоретические основы и оценку эффективности.

Во второй главе реализованы алгоритмы RLE и LZW для импульсных РЛС-сигналов и аудиосигналов, рассмотрены гибридные методы сжатия.

В третьей главе описан выбор аппаратных платформ и архитектура системы сжатия на базе генератора M8190A.

В четвертой главе проведён расчёт параметров системы и моделирование в MATLAB с использованием Signal Processing Toolbox.

Оценка работы

Студент демонстрирует высокий уровень подготовки и хорошее знание теоретического и практического материала. Работа выполнена в соответствии с техническим заданием.

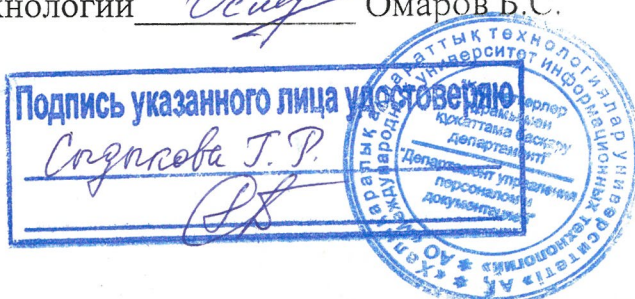
Дипломная работа оценена на отлично (А, 90%), а студент Садыков Диас Рыспаевич рекомендован к присвоению академической степени бакалавра по образовательной программе 6B06201 «Телекоммуникация».

Рецензент

Профессор-исследователь международного
университета информационных технологий _____ Омаров Б.С.

« 19 » _____ 2025 г.

Ф КазНиту 706-17. Рецензия



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Садыков Диас Рыспаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 8.1

Коэффициент Подобия 2: 3.7

Микропробелы: 23

Знаки из здругих алфавитов: 7

Интервалы: 1

Белые Знаки: 2

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-11-20

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Садыков Диас Рыспаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 8.1

Коэффициент Подобия 2: 3.7

Микропробелы: 23

Знаки из здругих алфавитов: 7

Интервалы: 1

Белые Знаки: 2

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-11-20

Дата



Сүңғат Марксұлы

проверяющий эксперт

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Садыков Диас Рыспаевич

Тақырыбы: Анализ современных методов сжатия и передачи цифровых сигналов

Жетекшісі: Нуридин Джунусов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 8.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 3.7

Дәйексөз (35): 0.3

Әріптерді ауыстыру: 7

Аралықтар: 1

Шағын кеңістіктер: 23

Ақ белгілер: 2

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-11-20

Күні

Кафедра меңгерушісі

