

Аналогичным образом дополнительно к шлейфам, установленным в выходной ступени сумматора, были подключены генераторный и балластный шлейфы к предпоследнему ответвителю. При этом мощность на выходе передатчика составила 1,04 кВт. Включение шлейфов не отразилось на качественных показателях аппаратуры.

**Заключение.** Предлагаемые способы трансформации цепочечных сумматоров 4×1 в 3×1 и 2×1 без потери мощности позволяют:

- не только практически исключить тепловыделения в балластных нагрузках при отказе отдельных оконечных усилителей (усилителя) в аппаратуре, но и увеличить мощность на выходе передатчика при аварийной ситуации;

- в том случае, когда качественное вещание может быть реализовано при меньшем количестве блоков усиления, иметь их резерв;

- в условиях цифрового сетевого одночастотного ТВ-вещания корректировать мощность передающих устройств сети без снижения их энергетических параметров и качественных показателей. Здесь речь может идти о повышении энергетической эффективности всей системы одночастот-

ного вещания при соответствующем ее построении, т.е. при использовании сумматоров, допускающих описанные выше изменения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клименко М.И. Повышение эффективности сложения мощностей в моноблочных цепочечных сумматорах при их частичном использовании // Электросвязь.— 2012.— № 9.
2. www/martspb.ru ОАО «МАРТ». Мощная аппаратура радио и телевидения. ТВ-передатчики.— 2013.
3. Радиопередающие устройства / Под ред. Г.А. Зейтленка.— М.: Связь, 1969.
4. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / Под ред. З.И. Моделя.— М.: Сов. радио, 1980.
5. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны.— М.: Сов. радио, 1956.
6. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами.— М.: Высшая школа, 1980.

Получено 14.01.14

УДК 621.397.3

## ФРАКТАЛЬНО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД СЖАТИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АУДИОСИГНАЛОВ

**Х.Х. Носиров**, ассистент Ташкентского университета информационных технологий (ТУИТ); n.khabibullo1990@gmail.com

**И.А. Гаврилов**, ТУИТ, доцент, к.т.н.; gavrilov-1960@mail.ru

**Т.Г. Рахимов**, ТУИТ, доцент, к.т.н.

Анализируются распространенные и перспективные методы сжатия звуковых сигналов. Для повышения эффективности сжатия предлагается использовать фрактальный и фрактально-спектральный методы преобразования звуковых сигналов. Приводятся табличные и графические сравнительные результаты проведенных экспериментов.

**Ключевые слова:** цифровое телевидение, сжатие аудиосигналов, аудиокадр, фрактал, вейвлет, спектральное преобразование, коэффициент сжатия, эффективность сжатия.

По мере развития цифрового телевидения возникает необходимость увеличения количества программ для предоставления дополнительных сервисных услуг, а также для организации интерактивного телевидения, требующего большого количества свободных каналов. Однако в условиях ограниченного частотного ресурса увеличить число передаваемых программ можно, только совершенствуя методы сжатия аудиовидеоинформации.

Сегодня существует множество методов и стандартов сжатия аудиосигналов: MPEG-1 Audio Layer 3 (MP-3), Windows Media Audio (WMA), MPEG-2 Advanced Audio Coding (AAC), MPEG-4 ISO/IEC 14496-3, а в стандарте ATSC (Advanced Television System Committee) — Dolby AC-3 (A/52), Ogg Vorbis. При этом одни обеспечивают хорошее качество звука, но малую степень сжатия, другие — хорошую степень сжатия, но сложную реализацию алгоритма, что, в свою очередь, влияет на скорость компрессии и декомпрессии [1].

Несмотря на большое разнообразие форматов сжатия, все они, как правило, базируются на быстром преобразо-

вании Фурье или на модифицированном дискретно-косинусном преобразовании (МДКП). Причем из-за относительно слабой корреляционной связи соседних отсчетов аудиосигнала непосредственное сжатие звука малоэффективно и обычно не превышает двух-трех раз. Поэтому для обеспечения больших коэффициентов сжатия применяют довольно сложные психоакустические модели восприятия звука человеком, удаляющие из звукового сигнала те компоненты, которые на слух не воспринимаются [2]. Таким образом, чем точнее психоакустическая модель кодека описывает наше слуховое восприятие, тем большие значения коэффициентов сжатия можно получить без ухудшения качества звучания. При этом все кодеки звуковых сигналов условно делятся на три категории: на основе преобразования сигналов, параметрического кодирования и комбинированные (преобразование сигналов и параметрическое кодирование).

Кодеки первой категории обычно используют для сжатия высококачественных вещательных аудиосигналов.

Кодеки второй группы работают с узкополосными речевыми сигналами в вокодерах, обеспечивая сжатие более чем в десять раз. При этом в кодере определяются частота, время и уровень основного тона, частота, время и уровень огибающей и т.д., передающиеся по каналу связи. Затем на основе этих параметров происходит синтез звукового сигнала в декодере. Таким образом, чем точнее удастся описать сигнал, тем более качественно можно его синтезировать. Однако при сжатии широкополосных вещательных

сигналов методы параметрического кодирования в полной мере пока применить не удается.

Кодеки третьей группы определяют характер звукового сигнала (речь, музыка и т.д.) и подключают соответствующий алгоритм кодирования [3].

Для оценки эффективности работы наиболее распространенных кодеков стандартов MP-3, OGG, AAC было исследовано сжатие четырех музыкальных фонограмм различных жанров при разных параметрах качества работы кодеков. Табл. 1 показывает зависимость коэффициента сжатия и среднеквадратического отклонения (СКО) восстановленных фонограмм от оригинала при разных битрейтах кодеками MP-3, OGG и AAC (рис. 1 и 2).

Как видно из рис. 2, высокое качество звучания всех исследуемых кодеков обеспечивается при битрейтах более 256 кбит/с, а при меньших значениях битрейтов возникают ошибки квантования, воспринимаемые на слух как шумы, трески и потеря высоких частот. При этом худшие показатели имеет кодек OGG.

На рис. 3 показано, что в приведенном аудиосигнале можно выделить похожие повторяющиеся области 1–6 и 1'–6' (аудиокадры). Если в потоке существуют одинаковые аудиокадры, они не передаются, а передается только указатель на опорный кадр данного типа. При неполном соответствии аудиокадров 5–5' передается только значение межаудиокадровой разности, которая по величине меньше значений отсчетов самого кадра, а для передачи данного кадра требуется меньше бит кода. При этом, чем больше подобных кадров будет найдено, тем большее сжатие аудиопотока можно получить. Качество звучания восстановленного сигнала сохраняется.

Для уменьшения искажения звукового сигнала при битрейтах меньше 128 кбит/с был разработан алгоритм сжатия путем устранения временной избыточности, основанный на поиске относительно подобных фрагментов сигнала (аудиокадр), а при обнаружении таких фрагментов в потоке — заменой их на ссылку опорного кадра (ОК).

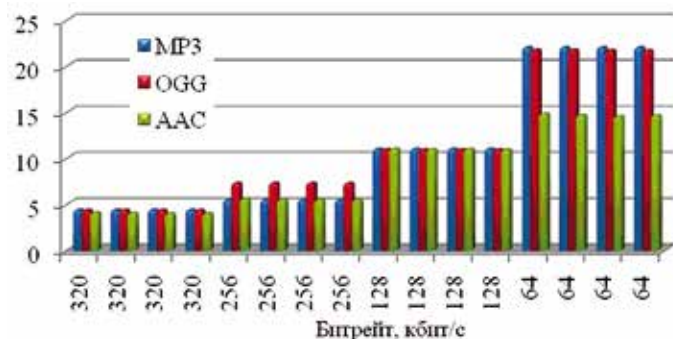


Рис. 1. Сравнительная гистограмма коэффициентов сжатия MP3, OGG и AAC

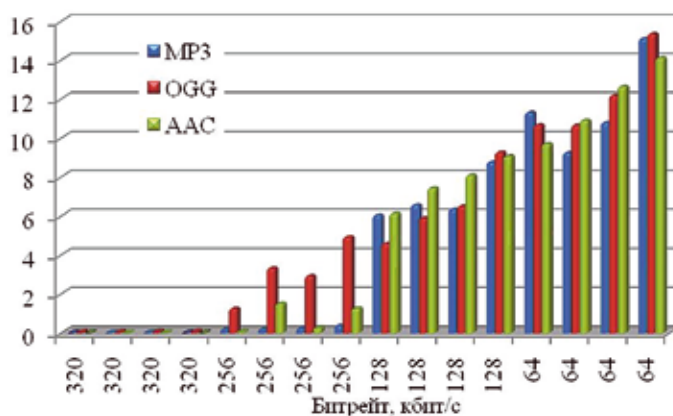


Рис. 2. Сравнительная гистограмма СКО восстановленных фонограмм

Чем больше похожих аудиокадров, тем больше выигрыш при сжатии. Такой метод похож на метод фрактального сжатия изображений.

Таблица 1. Результаты сжатия фонограмм

| Жанр    | Исходный размер (WAV), байт | Битрейт, кбит/с | Коэффициент сжатия |       |       | СКО, % |       |       |
|---------|-----------------------------|-----------------|--------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
|         |                             |                 | MP-3               | OGG   | AAC   | MP-3   | OGG   | AAC   |
| Classic | 60549644                    | 320             | 4,41               | 4,39  | 4,09  | 0,01   | 0,05  | 0,01  |
| Pop     | 45545932                    | 320             | 4,41               | 4,39  | 4,04  | 0,02   | 0,06  | 0,02  |
| Rock    | 54683228                    | 320             | 4,41               | 4,39  | 4,00  | 0,03   | 0,09  | 0,03  |
| Rap     | 39858220                    | 320             | 4,41               | 4,38  | 4,00  | 0,01   | 0,1   | 0,01  |
| Classic | 60549644                    | 256             | 5,51               | 7,32  | 5,60  | 0,21   | 1,24  | 0,09  |
| Pop     | 45545932                    | 256             | 5,51               | 7,32  | 5,48  | 0,21   | 3,32  | 1,5   |
| Rock    | 54683228                    | 256             | 5,51               | 7,31  | 5,49  | 0,25   | 2,92  | 0,28  |
| Rap     | 39858220                    | 256             | 5,51               | 7,29  | 5,51  | 0,39   | 4,92  | 1,26  |
| Classic | 60549644                    | 128             | 11,02              | 10,95 | 11,02 | 6,04   | 4,58  | 6,13  |
| Pop     | 45545932                    | 128             | 11,02              | 10,95 | 10,95 | 6,55   | 5,91  | 7,42  |
| Rock    | 54683228                    | 128             | 11,02              | 10,94 | 10,99 | 6,34   | 6,49  | 8,08  |
| Rap     | 39858220                    | 128             | 11,02              | 10,94 | 10,91 | 8,76   | 9,27  | 9,07  |
| Classic | 60549644                    | 64              | 22,04              | 21,77 | 14,82 | 11,31  | 10,67 | 9,7   |
| Pop     | 45545932                    | 64              | 22,04              | 21,78 | 14,68 | 9,24   | 10,66 | 10,91 |
| Rock    | 54683228                    | 64              | 22,04              | 21,70 | 14,56 | 10,79  | 12,17 | 12,63 |
| Rap     | 39858220                    | 64              | 22,04              | 21,69 | 14,64 | 15,1   | 15,34 | 14,11 |

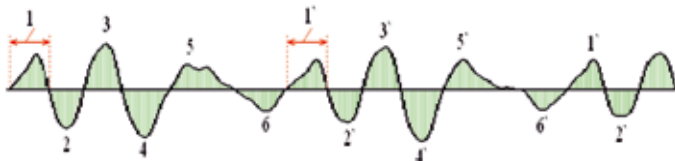


Рис. 3. Временное представление аудиосигнала

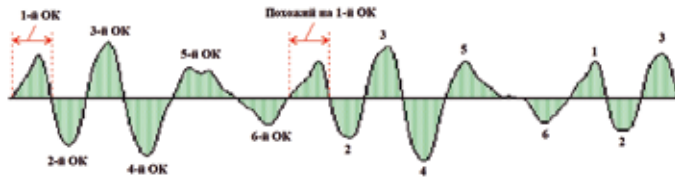


Рис. 4. Деление сигнала на аудиокадры

На рис. 4 представлено разбиение исходного аудиосигнала на аудиокадры по признаку перехода сигнала через 0.

На рис. 5 приведена обобщенная блок-схема алгоритма фрактального сжатия аудиофайлов. После установки параметров кодек начинает загружать в буферную память исходный звуковой файл в формате WAV. Особенность данного метода сжатия аудиосигналов в том, что для больших коэффициентов сжатия анализ аудиокадров проводится по всему массиву аудиоданных. В блоке 3 по признаку прохождения сигнала через 0 производится разделение данных на аудиокадры, а затем в блоке 4 — поиск одинаковых кадров с заданной погрешностью.

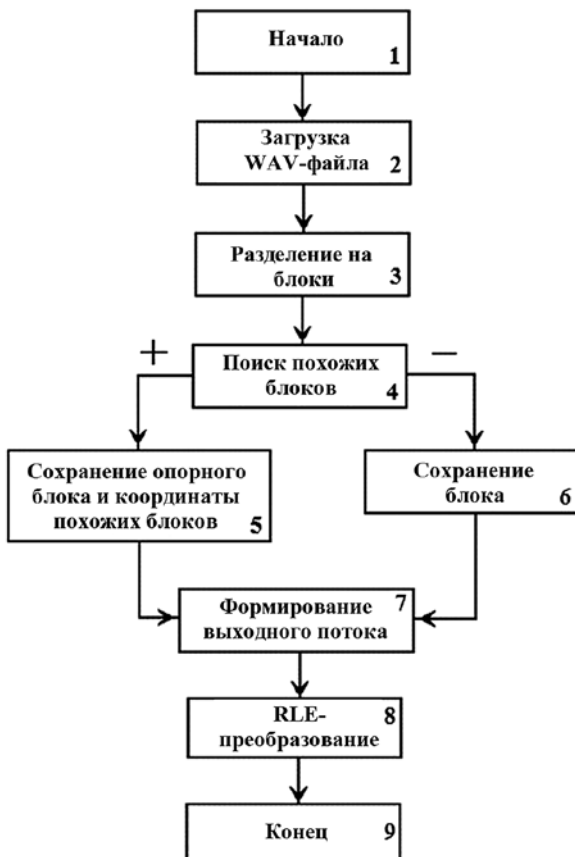


Рис. 5. Алгоритм сжатия звукового сигнала на основе фрактальной обработки

На рис. 6 показаны отсчеты первого и второго аудиокадра, где 1.1, 1.2, ... и 2.1, 2.2, ... — отсчеты первого и второго аудиокадров соответственно. Сравнение проводится поотсчетно, т.е. сравнивается первый отсчет первого аудиокадра с первым отсчетом второго и т.д. Если все отсчеты равны, эти кадры рассматриваются как эквивалентные и первый кадр будет считаться опорным, а второй — похожим на него. Для повышения эффективности сжатия в программе предусмотрена допустимая ошибка идентификации кадров (1–10%) .

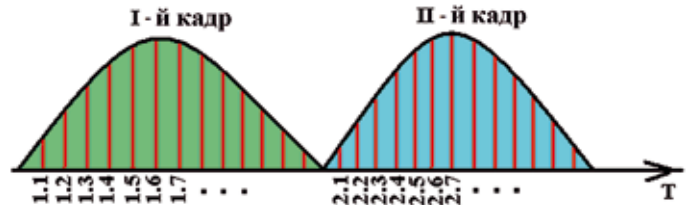


Рис. 6. Временное представление отсчетов смежных аудиокадров

Если похожие кадры найдены, в выходном буфере сохраняются ОК (первый найденный) и указатель его положения в массиве для следующих подобных кадров (блок 5). Если подобный кадр не найден, то он сохраняется целиком (блок 6), затем данные сжимаются RLE-компрессором и алгоритмом Хаффмана. Полученные данные можно сохранить на различных носителях информации или передать по каналу связи.

Для оценки эффективности предложенного метода сжатия аудиосигналов на основе устранения временной избыточности аудиокадров было проведено экспериментальное исследование сжатия аудиофайлов различных жанров при разных погрешностях идентификации аудиокадров (табл. 2). Наибольший коэффициент сжатия получен при

Таблица 2. Результаты исследования сжатия аудиофайлов

| Исполнитель.<br>Название песни  | Исходный размер<br>(WAV),<br>байт | Коэффициент сжатия<br>при ошибке $O_n$ , % |      |      |
|---|-----------------------------------|--|------|------|
|   |                                   | 1  | 5    | 10   |
| К.Отаниёзов.<br>Феруз   | 43 186 206                        | 2,3  | 4,5  | 6,3  |
| Ласт. Что такое<br>женщина  | 34 993 248                        | 1,8  | 3,4  | 4,5  |
| Окарина   | 36 965 458                        | 1,9  | 2,8  | 4,2  |
| Ричард<br>Клайдейман.<br>Индийская жара   | 37 647 466                        | 1,7  | 2,7  | 5,4  |
| Романс о любви  | 30 873 714                        | 1,8  | 3    | 6    |
| О.Назарбеков.<br>Кутаман  | 23 040 030                        | 2  | 4,5  | 8,2  |
| Френсис Лей.<br>Женщине   | 44 550 236                        | 1,6  | 3,2  | 5,1  |
| Three 6 mafia.<br>Side To Side<br>(instrumental)                                  | 76 763 180                        | 6,5  | 9,2  | 16,8 |
| Three 6 mafia.<br>Side To Side<br>(instrumental) де-<br>монстрационный<br>вариант | 24 957 468                        | 12,7                                       | 25,1 | 37,8 |

обработке ритмической мелодии Three 6 mafia — Side To Side, в которой присутствует много повторяющихся музыкальных фрагментов, обеспечивающих высокое сжатие потока. Более высокие показатели имеет демонстрационный вариант той же мелодии, состоящий из повторяющихся аудиофрагментов длительностью 9 с, сформированных с помощью аудиомонтажа (скорость потока 12 кбит/с — без заметного на слух снижения качества звучания). Однако в других композициях коэффициент сжатия относительно невелик и при 10% погрешности идентификации составляет в среднем 4–6 раз [4].

Для оценки эффективности сжатия аудиоданных в соответствии с табл. 2 построена гистограмма (рис. 7).

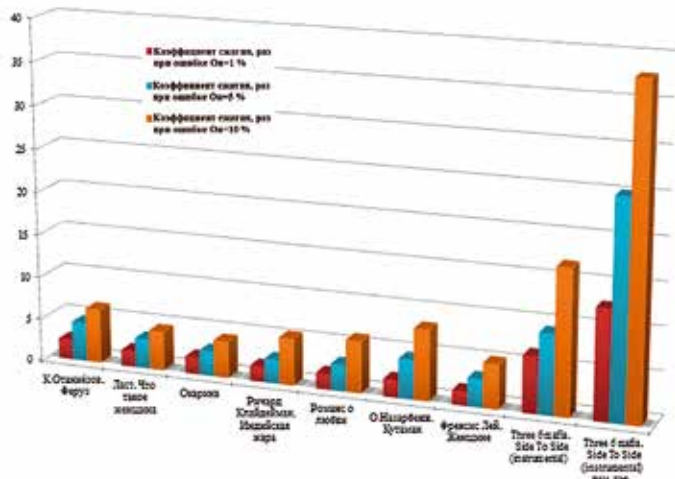


Рис.7. Сравнительная гистограмма коэффициентов сжатия аудиокадров при различных погрешностях идентификации

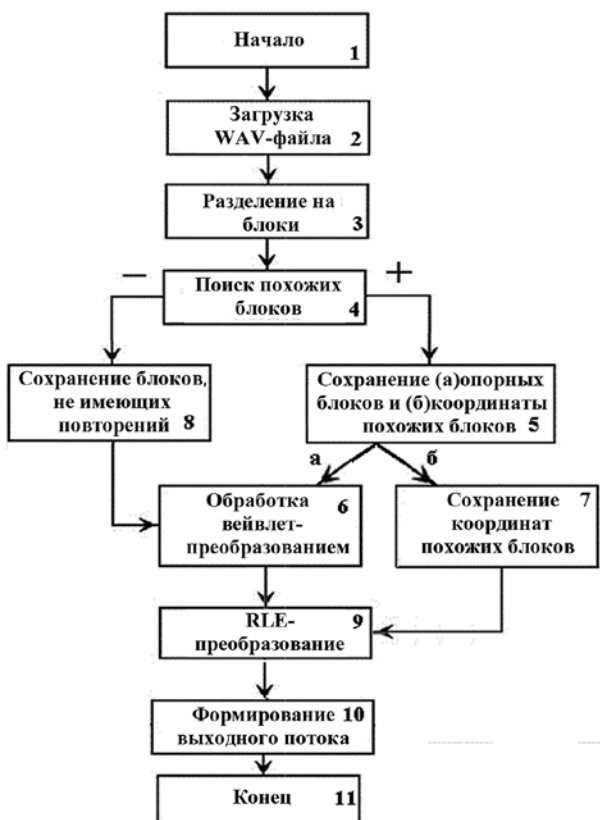


Рис. 8. Алгоритм сжатия звукового сигнала на основе фрактально-спектральной обработки

Для повышения эффективности предложенного метода опорные аудиокадры и аудиокадры, не имеющие повторений, обрабатываются вейвлет-преобразованием. Обобщенная структурная схема с вейвлет-обработкой представлена на рис. 8.

В этом случае после сохранения блоков, не имеющих повторений опорных аудиокадров и координат похожих блоков (5 и 8), производится вейвлет-преобразование опор-

Таблица 3. Результаты гибридного кодирования

| Исполнитель.<br>Название песни   | Исходный размер (WAV), байт | Коэффициент сжатия при ошибке $O_{it}$ , % |      |      |
|--|-----------------------------|--|------|------|
|  |                             | 1  | 5    | 10   |
| К.Отаниёзов.<br>Феруз  | 43 186 206                  | 2,7  | 5,7  | 7,2  |
| Ласт. Чтo такое женщина  | 34 993 248                  | 2,1  | 4,3  | 6,1  |
| Окарина  | 36 965 458                  | 2,1  | 3,2  | 4,9  |
| Ричард Клайдеман.<br>Индийская жара                                    | 37 647 466                  | 2,1  | 3,9  | 6,3  |
| Романс о любви   | 30 873 714                  | 2,1  | 3,5  | 6,9  |
| О.Назарбеков.<br>Кутаман   | 23 040 030                  | 2,7  | 5,3  | 9,1  |
| Френсис Лей.<br>Женщине  | 44 550 236                  | 2,1  | 4,2  | 6,0  |
| Three 6 mafia.<br>Side To Side (instrumental)                          | 76 763 180                  | 7,5  | 10,4 | 19,3 |
| Three 6 mafia.<br>Side To Side (instrumental) демонстрационный вариант | 24 957 468                  | 14,5                                       | 28,1 | 42,4 |

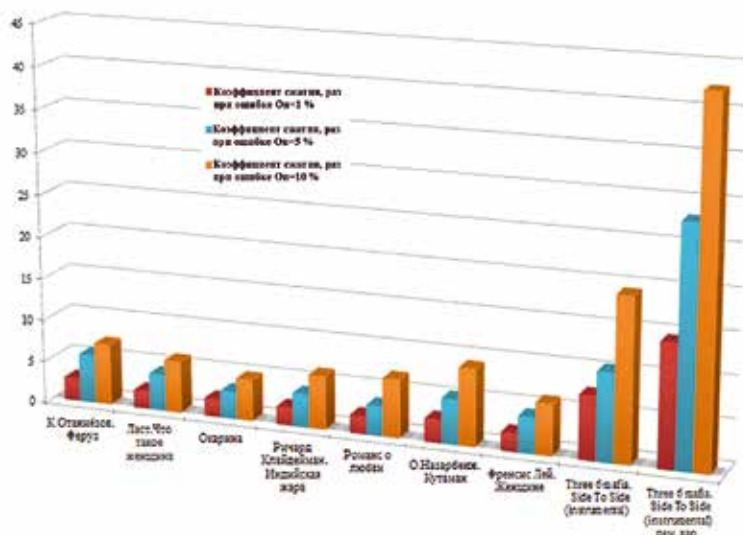


Рис.9. Гистограмма результатов фрактально-спектрального сжатия

Таблица 4. Результаты сравнения композиций

| Исполнитель. Название песни   | Исходный размер (WAV), байт | Фрактальный метод       |                                | Фрактально-спектральный метод |                                |
|---|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|   |                             | Коэффициент сжатия, раз | Среднеквадратическая ошибка, % | Коэффициент сжатия, раз       | Среднеквадратическая ошибка, % |
| Френсис Лей. Женщине  | 44550236                    | 5,1                     | 2,1                            | 6,0                           | 3,7                            |
| Three 6 mafia. Side To Side (instrumental)                          | 76763180                    | 16,8                    | 4,3                            | 19,3                          | 5,6                            |
| Three 6 mafia. Side To Side (instrumental) демонстрационный вариант | 24957468                    | 37,8                    | 5,3                            | 42,4                          | 6,0                            |

ных аудиокадров и блоков, не имеющих повторений, далее полученные результаты и координаты похожих аудиокадров сжимаются статистическими компрессорами RLE и Хаффмана, затем формируется выходной поток.

Применение гибридного кодирования (табл. 3 и рис. 9) дает выигрыш по сравнению с фрактальным сжатием 10–15% (управление битрейтом на основе квантования вейвлет-коэффициентов не использовалось).

Для удобства сравнительного анализа в табл. 4 приведены экспериментальные данные результатов сравнения трех последних музыкальных композиций, обработанных фрактальным и фрактально-спектральным кодированием.

Для объективной оценки ошибки восстановления аудиоданных произведен расчет среднеквадратического отклонения данных исходного и восстановленного аудиофайлов. На рис.10 представлена гистограмма результатов сравнения фрактального и фрактально-спектрального методов сжатия аудиоданных.

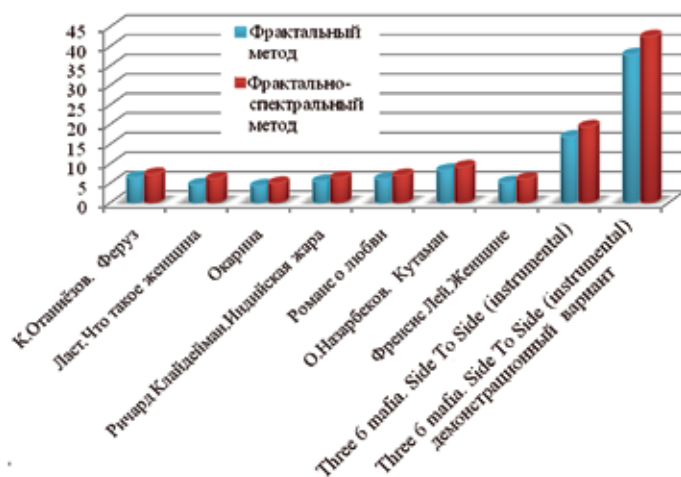


Рис.10. Гистограмма результатов сравнения фрактального и фрактально-спектрального методов сжатия

**Заключение.** Исследования различных кодеков сжатия аудиоданных вещательных сигналов показали, что все они

обеспечивают высокое качество звуковоспроизведения на битрейтах 256 кбит/с и более, а на меньших битрейтах возникают шумы, трески, искажения.

Для увеличения коэффициента сжатия аудиопотока предложен метод фрактально-спектрального сжатия аудиофайлов, учитывающий временную избыточность аудиосигналов и обеспечивающий высокие коэффициенты сжатия ритмических фонограмм (без существенных потерь качества звучания). Следует отметить, что в данном методе не использовалась ни психоакустическая обработка звуковых сигналов, ни управление битрейтом на основе квантования коэффициентов вейвлет-преобразований. Поэтому использование психоакустики и квантователя должно существенно увеличить коэффициент сжатия аудиопотока.

Существенный недостаток данного метода обработки аудиосигналов — необходимость предварительно целиком загружать аудиофайл, что не позволяет производить кодирование фонограмм в реальном масштабе времени. Однако данный недостаток может быть преодолен адаптивным заполнением базы ОК, что позволит проводить однократное кодирование фонограмм. Таким образом, данный подход к сжатию аудиоданных позволяет управлять битрейтом и может быть достаточно эффективным, поэтому исследования в данном направлении будут продолжены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О современных форматах кодирования аудио <http://websound.ru/articles/technologies/formats.htm>
2. Артюшенко В. М., Шелухин О. И., Афонин М. Ю. Цифровое сжатие видеoinформации и звука. — М.: «Дашков и К», 2003. — 426 с.
3. Метрики для сравнения звуковых сигналов с учетом особенностей человеческого слуха <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/73>
4. Nosirov Kh.Kh, Gavrilov I. A., Abduazizov A. A. The fractal method of compression of broadband audiosignals / Proc. 4-th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. — (AICT 2010). — Tashkent, 12–14 October 2010. С. 247–250

Получено после доработки 22.09.14