ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К СЖАТИЮ ДАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМОЙ РАЗРЯДНОСТИ И ПИРАМИДАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

А. Ю. Бабкин[1,а], **А. И. Солдатов**[2,б]

[1] *Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*

[2] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация*

[а] *ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7480-6529,* ✍ *404not_foundd@mail.ru*

[б] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1892-1644, asoldatof@mail.ru*

Аннотация: в статье рассматривается проблема избыточности и объемности данных, формируемых многоканальной ультразвуковой решеткой при диагностических исследованиях. Обоснована необходимость создания гибридного метода сжатия, сочетающего в себе элементы структурной компрессии (пирамидальные методы) и алгоритмического кодирования (включая подходы, заимствованные из MP4). В работе описаны особенности формата данных типа A-скан, рассмотрены параметры, влияющие на объем, и предложен концептуальный подход к построению математической модели сжатия с динамически адаптируемой разрядностью. Статья имеет постановочный характер и ориентирована на исследование потенциальных направлений разработки эффективных алгоритмов сжатия без описания конкретных экспериментов.

Ключевые слова: ультразвуковая решетка, A-скан, сжатие данных, пирамидальный метод, адаптивная разрядность, телемедицина.

Для цитирования: Бабкин А. Ю., Солдатов А. И. Гибридный подход к сжатию данных ультразвуковой многоканальной решетки на основе динамически изменяемой разрядности и пирамидальных методов. *Успехи кибернетики.* 2026;7(3):45–49.

Поступила в редакцию: 29.05.2026. *В окончательном варианте: 25.09.2026.*

HYBRID APPROACH TO COMPRESSION OF MULTICHANNEL ULTRASONIC ARRAY DATA USING DYNAMICALLY ADJUSTABLE BIT DEPTH AND MULTIRESOLUTION METHODS

A. Yu. Babkin[1,a], **A. I. Soldatov**[2,b]

[1] *Surgut State University, Surgut, Russian Federation*

[2] *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation*

[a] *ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7480-6529,* ✍ *404not_foundd@mail.ru*

[b] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1892-1644, asoldatof@mail.ru*

Abstract: we studied redundancy and excessive data volume generated by multichannel ultrasonic arrays in diagnostic applications. We justified the need for a hybrid compression method that combines structural compression based on multiresolution methods with algorithmic encoding approaches, including techniques derived from MP4. We described the characteristics of the A-scan data format and outlined the parameters that affect data volume. We proposed a conceptual approach to a compression model that uses dynamically adjustable bit depth. The study is theoretical and focuses on potential directions for developing efficient compression algorithms without presenting experimental results.

Keywords: ultrasonic array, A-scan, data compression, multiresolution method, adaptive bit depth, telemedicine.

Cite this article: Babkin A. Yu., Soldatov A. I. Hybrid Approach to Compression of Multichannel Ultrasonic Array Data Using Dynamically Adjustable Bit Depth and Multiresolution Methods. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(3):45–49.

Original article submitted: 29.05.2026. *Revision submitted: 25.09.2026.*

Введение

История развития ультразвуковых систем диагностики начинается с середины XX века и тесно связана с развитием радиотехники, акустики и цифровой обработки сигналов [1]. Первые одноканальные устройства сбора данных обеспечивали просто визуализацию сигналов, полученных с ультразвуковых систем. С 80-90-х годов XX века системы диагностики не только выполняют визуализацию сигналов, но и являются неотъемлемой частью телемедицинских сетей передачи, где данные передаются в режиме реального времени или архивируются для дальнейшего анализа [2].

Современные системы ультразвуковой диагностики, в особенности при использовании многоканальных вариаций, создают очень большие объемы данных, это является критичным в задачах удаленной телемедицины, где каналы связи имеют ограниченную пропускную способность, а системы хранения данных — не безграничный объем. В современном мире сетевая инфраструктура развивается медленнее, чем технологии для получения данных, связанных с диагностикой, что, соответственно, требует разработки адаптивных методов сжатия и передачи информации.

Эволюция методов сжатия данных шла от универсальных алгоритмов (таких как ZIP, JPEG и аналогичных) к специализированным решениям, оптимизированным под конкретные типы сигналов, например, изображения, аудио- или видеоконтент. Однако данные, получаемые в ходе ультразвуковой диагностики, имеют особую природу: они одновременно демонстрируют характеристики одномерных сигналов, двумерных изображений и динамических временных структур. Ультразвуковые диагностические устройства, особенно в многоканальной конфигурации, должны соответствовать строгим требованиям к скорости передачи данных, энергоэффективности и масштабируемости. В связи с этим возникает необходимость перехода от универсальных подходов к контекстно-адаптивным методам сжатия, которые учитывают уникальные особенности ультразвуковых сканирований.

Принцип работы ультразвуковой решетки

Ультразвуковая решетка состоит из группы синхронизированных датчиков, генерирующих одномерные сигналы — так называемые A-сканы. Каждый датчик и, соответственно, канал выполняет двойную функцию: он испускает акустический импульс и принимает отраженный сигнал от исследуемой среды. Принимаемый сигнал отражает амплитуду реакций окружающей среды на глубине и определяет положение границ объекта и неоднородности в нем [3].

Серия сканирований, полученных в результате работы датчиков по разным каналам, может быть использована для создания изображений или 3D-моделей. Однако на первичном этапе эти сигналы сохраняются с высокой разрядностью в среднем 12–16 бит и высокой частотой дискретизации, что обеспечивает нагрузку на каналы передачи, а также системы хранения.

Современные промышленные и медицинские системы используют от 32 до 128 каналов дискретизации частотой до 50 МГц. Один A-сканер может содержать до нескольких тысяч показаний, в результате чего формируется поток данных в десятки мегабайт в секунду. Такие объемы данных очень трудно эффективно передавать по радиоканалам или сохранять в несжимаемой энергонезависимой памяти.

Исходные параметры модели

Основные параметры, влияющие на объем данных:

- количество каналов (M);
- длина одного A-скана (N);
- разрядность сигнала (R);
- частота дискретизации;
- соотношение сигнал/шум;
- корреляция между каналами (p_{ij});
- динамический диапазон амплитуды сигнала (A_{min}, A_{max}).

Рассмотрим пример: в диагностическом устройстве 64 канала, каждый A-скан содержит 1024 отсчета, а каждый отсчет представлен с разрядностью 16 бит. Частота сбора данных равняется 20 выборкам в секунду. Полный поток данных рассчитывается как:

$$V = M \times N \times R \times f_d = 64 \times 1024 \times 16 \times 20 = 20971520 \text{ бит/с} \approx 2{,}5 \text{ Мбит/с [4].} \quad (1)$$

Это означает, что даже в простом устройстве объем данных достигает нескольких мегабайт в секунду, что задает высокую нагрузку на каналы связи и устройства хранения информации. Увеличение числа каналов, длины А-сканов или частоты дискретизации увеличивает поток пропорционально.

Влияние разрядности тоже критично: переход с 16 бит на 12 бит уменьшает поток на 25%, а переход с 16 бит на 8 бит — на 50%, это означает, что качество восстановления слабых сигналов ухудшится. Поэтому важно дифференцировать разрядность данных в зависимости от значения амплитуды.

Сильная корреляция между каналами, в особенности при использовании линейных или секторных решеток, открывает возможность снижать их избыточность при помощи кодирования разности между сигналами. Это может быть реализовано как в форме предсказания, так и при помощи вейвлет-преобразования с многоканальным входом [5].

Постановка проблемы и оценка подходов

Существующие методы сжатия, такие как ZIP, JPEG, MP4, SPIHT и др., не учитывают специфики данных, полученных с ультразвуковой решетки, а именно: структуры, разреженности и значимости отдельных участков сигнала.

Критично важные аспекты, которые требуется учитывать, — это:

- большая доля шумов и слабо информативных участков;
- наличие выраженных амплитудных пиков;
- межканальная корреляция.

Универсальные алгоритмы, такие как ZIP, плохо сжимают данные в реальном времени, также они малоэффективны на слабо структурированных сигналах. Такие алгоритмы, как JPEG и MP4, предполагают двумерную или временную структуру, это делает их применимыми только после преобразования данных в другой формат данных, например, B-сканы или видеопотоки. SPIHT и JPEG2000 требуют значительных вычислительных ресурсов и часто не предназначены для аппаратной реализации в компактных встраиваемых системах [6].

Для наглядности ниже приведена таблица, отражающая основные особенности популярных методов сжатия применительно к задаче обработки А-сканов.

Таблица

Особенности различных методов сжатия применительно к задаче обработки А-сканов

Метод	**Тип сжатия**	**Преимущества**	**Ограничения**
ZIP	Без потерь	Простота, поддержка стандартами	Неэффективен для сигнальных данных, высокая избыточность
JPEG	С потерями	Хорош для изображений	Требуется 2D-структура, нет адаптации по разрядности
MP4 / H.264	С потерями	Высокое сжатие видеопотоков	Требует временной / кадровой структуры, неприменим к А-скану
JPEG2000	Пирамидальное	Высокое качество, масштабируемость	Вычислительно сложен, неоптимален для 1D-сигналов
SPIHT	Пирамидальное	Эффективен для изображений	Высокая сложность реализации, плохо подходит для онлайн-сигналов
Huffman + RLE	Комбинированное	Простота, аппаратная реализация	Требует предварительной оптимизации структуры данных

Таким образом, требуется метод, учитывающий особенности А-скана: одноканальность (или многоканальность с корреляцией), структуру сигнала с пиками и паузами, переменную значимость информации, а также адаптивность к ресурсам и скорости передачи. Этим требованиям отвечает гибридная модель, описанная в следующем разделе.

Предлагаемый концептуальный подход: гибридная модель «Уровень + Масштаб»

Метод включает следующие ключевые этапы:

1. Предобработка.

На этом этапе осуществляется подавление шумов и нормализация сигнала. Сигнал $A[n]$ преобразуется к диапазону [0;1] посредством деления на максимальное значение:

$$\widetilde{\mathrm{A}}\,[\mathrm{n}] = \frac{\mathrm{A}\,[\mathrm{n}]}{\mathrm{A}_{\max}} \tag{2}$$

Также может применяться медианная фильтрация [2] для локального выравнивания амплитуд и повышения устойчивости к одиночным выбросам.

2. Адаптивное квантование.

Для уменьшения объема представления сигналов используется динамическая разрядность, при которой разрядность изменяется в зависимости от амплитуды:

$$\mathrm{R}\,(\mathrm{x}) = \begin{cases} \mathrm{R}_{\mathrm{high}}, |\mathrm{x}| > \mathrm{T}_{\mathrm{high}}, \\ \mathrm{R}_{\mathrm{low}},\ |\mathrm{x}| \leq \mathrm{T}_{\mathrm{low}}, \\ \mathrm{R}_{\mathrm{mid}},\ \mathrm{T}_{\mathrm{low}} < |\mathrm{x}| \leq \mathrm{T}_{\mathrm{high}}. \end{cases} \tag{3}$$

$$\mathrm{T} = \mathrm{k} \cdot \sigma_{\mathrm{noise}}, \tag{4}$$

где порог T позволяет уменьшить битовую глубину для малозначимых участков и повысить ее для областей с резкими изменениями амплитуды.

3. Пирамидальная декомпозиция.

Используется многоуровневая структура для разложения сигнала на базовые и уточняющие компоненты. Это аналогично вейвлет-преобразованию [3, 8] и позволяет передавать данные в зависимости от степени детализации.

4. Пороговое обнуление и RLE.

Значения ниже порога $\mathrm{T}_{\mathrm{zero}}$ обнуляются. Такая обработка позволяет эффективно применять RLE (Run-Length Encoding) кодирование, которое компактно представляет последовательности одинаковых значений [7].

5. Энтропийное кодирование.

Остаточные данные кодируются методом Хаффмана, для того чтобы уменьшить общую энтропию представления [7]. Частотный анализ проводится по сформированным квантованным символам.

6. Адаптация под канал связи.

Алгоритм может переключаться между режимами сжатия в зависимости от пропускной способности: отправка только базового уровня пирамиды, снижение разрядности, пропуск незначимых каналов. Подход актуален для беспроводных интерфейсов (BLE, LoRa, Wi-Fi) [6].

7. Межканальное предсказание (при необходимости).

При высокой корреляции между каналами используется линейное предсказание вторичных каналов из опорных, что снижает объем повторяющейся информации [8].

Ожидаемые эффекты и перспективы

Ожидается, что такой подход обеспечит:

- снижение объема передаваемой информации до 5–10 раз;
- сохранение значимой информации (минимальный MSE и высокая PSNR);
- возможность масштабирования под устройства с ограниченными ресурсами;
- потенциальную интеграцию в телемедицинские и промышленные системы.

Алгоритм хорошо масштабируется и может быть реализован как на микроконтроллерах с DSP-блоками (например, STM32, Texas Instruments), так и на ПЛИС (FPGA), что делает его применимым в реальных устройствах диагностики. В перспективе возможна адаптация под сигналы B-сканов с использованием двумерного вейвлет-преобразования и внедрение элементов машинного обучения для предсказания параметров разрядности.

Заключение

Представлен концептуальный подход к сжатию данных многоканальной ультразвуковой решетки, учитывающий особенности сигнала и ограничения канала передачи. Модель основывается на комбинировании структурной и амплитудной компрессии с возможностью адаптации под условия. Предполагается, что такой гибридный подход позволит достичь высокой эффективности при сохранении точности реконструкции и диагностической значимости данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений.* М.: Техносфера; 2005. 1072 с.
2. *Применение ультразвука в медицине: Физические основы* / Пер. с англ., под ред. К. Хилла. М.: Мир; 1989. 568 с.
3. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. *Теория и практика вейвлет-преобразования.* СПб.: ВУС; 1999. 204 с.
4. Сергиенко А. Б. *Цифровая обработка сигналов.* 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург; 2011. 768 с.
5. Сэломон Д. *Сжатие данных, изображений и звука.* М.: Техносфера; 2004. 365 с.
6. Ломовицкий В. С., Михайлов А. И., Шестак В. П., Щекотихин В. М. *Основы построения систем и сетей передачи информации.* М.: Горячая линия — Телеком; 2005. 382 с.
7. Huffman D. A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proc. of the IRE.* 1952;40(9):1098–1101. DOI: 10.1109/JRPROC.1952.273898.
8. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way.* 3rd ed. Amsterdam: Academic Press; 2008. 832 p.