

УДК 004.42+004.383.3
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-1-58-68>

Поступила в редакцию | Received 16.02.2026
Подписана в печать | Accepted 06.03.2026
Опубликована | Published 31.03.2026

Метод повышения пространственного разрешения амбисонического звука на основе разреженного МДКП-представления

Д. С. Лихачёв[✉], Н. А. Петровский, И. С. Азаров
[✉]E-mail: likhachov@bsuir.by

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация

Цели. Решается задача разработки метода повышения пространственного разрешения амбисонического звука на основе разреженного МДКП-представления (МДКП – модифицированное дискретное косинусное преобразование), позволяющего улучшить эффективность существующих подходов представления пространственного звука в цифровом виде.

Методы. Предлагаемый подход основан на временно-частотной декомпозиции аудиосигнала с последующим извлечением направленной плоской волны из каждой частотной составляющей. Данный подход развивает основные идеи методов разложения на плоские волны с высоким разрешением (HARPEX) и аудиокодирования с учетом направления прихода звука, используя преимущества вещественной разреженной декомпозиции.

Результаты. Метод повышения пространственного разрешения амбисонического звука предполагает использование вещественных частотных компонентов, что, в отличие от комплексных, обеспечивает более простую и устойчивую оценку направления прихода звука. Разреженная декомпозиция позволяет реализовать точный и унифицированный подход к описанию звуков различной природы – от транзиентных до тоновых.

Заключение. Практические результаты подтверждают применимость предложенного метода для обработки аудио с повышением разрешения вплоть до амбисоники седьмого порядка. Основным недостатком метода является его сравнительно с другими методами высокая вычислительная сложность, что, однако, некритично для приложений, которые не требуют обработки в реальном времени.

Ключевые слова: пространственный звук, амбисоника, апмиксинг, пространственное разрешение, разреженное представление, быстрое преобразование Фурье, модифицированное дискретное косинусное преобразование

Для цитирования. Лихачёв, Д. С. Метод повышения пространственного разрешения амбисонического звука на основе разреженного МДКП-представления / Д. С. Лихачёв, Н. А. Петровский, И. С. Азаров // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 1. – С. 58–68. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-1-58-68>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Method for spatial resolution enhancement of ambisonic audio based on sparse MDCT representation

Denis S. Likhachov[✉], Nick A. Petrovsky, Elias S. Azarov

[✉]E-mail: likhachov@bsuir.by

*Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus*

Abstract

Objectives. The problem of developing a method for spatial resolution enhancement of ambisonic audio which improves the efficiency of existing approaches to digital spatial sound representation is being solved.

Methods. The proposed approach is based on time-frequency decomposition of the audio signal with subsequent extraction of a directional plane wave from each frequency component. The approach develops the core ideas of high-resolution plane wave expansion (HARPEX) and directional audio coding (DirAC) methods, utilizing the advantages of real-valued sparse decomposition.

Results. Application of the proposed ambisonic spatial resolution enhancement method involves the use of real-valued frequency components, which, unlike complex ones, provide a simpler and more robust estimation of sound arrival direction. Sparse decomposition enables an accurate and unified approach to describing sounds of various nature – from transient to tonal.

Conclusion. Practical results confirm the method's applicability for audio processing with resolution enhancement up to seventh-order ambisonics. The disadvantage of the method is its high computational complexity; however, it is suitable for applications that do not require real-time processing.

Keywords: spatial audio, ambisonics, upmixing, spatial resolution, sparse representation, fast Fourier transform, modified discrete cosine transform

For citation. Likhachov D. S., Petrovsky N. A., Azarov E. S. *Method for spatial resolution enhancement of ambisonic audio based on sparse MDCT representation*. *Informatika [Informatics]*, 2026, vol. 23, no. 1, pp. 58–68 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-1-58-68>.

Conflict of interests. The authors declare of no conflict of interest.

Введение

В настоящее время амбисоника первого порядка является популярным и доступным способом записи пространственного звука. Существует множество удобных портативных устройств, обеспечивающих четырехканальную запись в формате амбисоники, которая может воспроизводиться в приложениях виртуальной реальности как через колонки, так и через наушники. Качество воспроизведения сильно зависит от пространственного разрешения, которое для амбисоники первого порядка относительно низкое. Существуют параметрические методы, позволяющие улучшить пространственный образ и хорошо зарекомендовавшие себя на практике [1, 2]. Общая идея параметрического подхода заключается в выполнении временно-частотной декомпозиции аудиосигнала и обработке каждой частотной составляющей отдельно, представляя ее в виде комбинации направленных плоских волн и (или) ненаправленных компонентов. Оценка направления прихода звука формирует четкий пространственный образ, который может быть закодирован в формате амбисоники более высокого порядка (рис. 1).

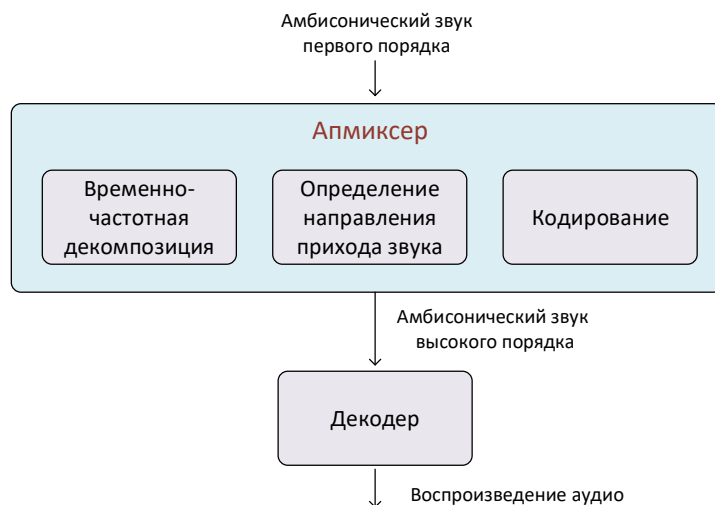


Рис. 1. Схема воспроизведения амбисонического аудио с повышенным пространственным разрешением

Fig. 1. Ambisonic audio playback scheme with improved spatial resolution

Традиционно в задачах подавления шума, уменьшения реверберации и обработки многоканального аудио для частотного представления сигнала используется быстрое преобразование Фурье (БПФ) [3–6]. Преобразование Фурье обеспечивает комплексное представление сигнала, что не всегда удобно применять на практике при обработке аудиосигналов.

В настоящей работе предполагается, что вещественные частотные представления более эффективны для задачи определения направления прихода звука. Так, например, вещественное МДКП не только обеспечивает более интуитивную интерпретацию направленной волны, но и делает решение более устойчивым. Применение МДКП исключает неопределенные состояния, характерные для метода HARPEX [2], который работает с комплексными экспонентами.

Помимо перехода из комплексной частотной области в вещественную предлагается использовать избыточные базисы различной длины для представления частотных составляющих. Основная мотивация заключается в возможности точной обработки как транзитных компонентов, т. е. очень коротких импульсов, так и тоновых компонентов, т. е. длительных периодических сигналов. При использовании линейных преобразований с базисными функциями одинаковой длины невозможно достичь одинаковой точности представления всех компонентов. Как правило, на практике делается компромиссный выбор в пользу тоновых сигналов, что приводит к размытию транзитных составляющих и значительному снижению пространственного разрешения. В данной работе для выполнения более точной временно-частотной декомпозиции применяется оптимизационная процедура, минимизирующая $L1$ -норму и обеспечивающая разреженное представление в пространстве избыточных МДКП базисов различной длины. Субъективные тесты подтверждают высокий потенциал предложенного решения, несмотря на его высокую вычислительную сложность.

Метод повышения пространственного разрешения амбисонического звука HARPEX

HARPEX раскладывает четырехканальное амбисоническое аудио, т. е. амбисонику первого порядка, на перекрывающиеся фреймы, которые преобразуются в частотную область с помощью БПФ [2]. Это позволяет получать комплексные спектральные отсчеты вида $w_r + iw_i$, $x_r + ix_i$, $y_r + iy_i$ и $z_r + iz_i$ для соответствующих каналов, обозначенных как W, X, Y, Z соответственно. Для простоты в данном случае далее рассматривается только одна частота, предполагая, что обработка всех частот выполняется одинаково. Четыре комплексных значения одной частоты декомпозируются в два представляющие направление прихода звука вещественных вектора $[x_1, y_1, z_1]$ и $[x_2, y_2, z_2]$ и комплексные амплитуды a_1, a_2 двух звуковых волн, соответствующих этим направлениям. Таким образом, каждая частота представляется в виде суммы двух плоских волн, каждая из которых имеет свое направление прихода. Декомпозиция описывается матричным уравнением

$$\begin{bmatrix} w_r + iw_i \\ x_r + ix_i \\ y_r + iy_i \\ z_r + iz_i \end{bmatrix} = a_1 \begin{bmatrix} 2^{-\frac{1}{2}} \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + a_2 \begin{bmatrix} 2^{-\frac{1}{2}} \\ x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Решение данной системы может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & s_1 \\ c_2 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$c_{1,2} = \sqrt{\frac{2r^2 - pq + p^2 \pm 2r\sqrt{r^2 - pq}}{(q - p)^2 + 4r^2}}, \quad (3)$$

$$s_{1,2} = \frac{(q - p)c_{1,2} + p/c_{1,2}}{2r}, \quad (4)$$

$$r = -2w_r w_i + x_r x_i + y_r y_i + z_r z_i, \quad (5)$$

$$p = -2w_r^2 + x_r^2 + y_r^2 + z_r^2, \quad (6)$$

$$q = -2w_i^2 + x_i^2 + y_i^2 + z_i^2. \quad (7)$$

Некоторые частотные отсчеты попадают в область неопределенности при условии $r^2 - pq < 0$, однако количество таких отсчетов достаточно мало.

Метод повышения пространственного разрешения амбисонического звука на основе разреженной МДКП-декомпозиции с объединением различных временно-частотных разрешений

В отличие от HARPEX предлагается использовать МДКП вместо БПФ. МДКП предоставляет вещественные коэффициенты w_r, x_r, y_r, z_r для каждого соответствующего канала, что заметно упрощает систему. Эти значения декомпозируются в вещественный вектор $[x_1, y_1, z_1]$, представляющий направление прихода, и ненаправленную компоненту с вещественными амплитудами a_1, a_2 соответственно:

$$\begin{bmatrix} w_r \\ x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = a_1 \begin{bmatrix} 2^{-\frac{1}{2}} \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + a_2 \begin{bmatrix} 2^{-\frac{1}{2}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$a_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2},$$

$$a_2 = \sqrt{2}w_r - a_1.$$

Данное решение неполно, поскольку теряется знак направления при отрицательном значении w_r . Для устранения этой проблемы вместо вектора $[x_1, y_1, z_1]$ можно использовать вектор $[\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1]$, который учитывает знак w_r , и соответствующие знакочувствительные амплитуды \bar{a}_1 и \bar{a}_2 :

$$[\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1] = \text{sgn}(w_r)[x_r, y_r, z_r],$$

$$\bar{a}_1 = \text{sgn}(w_r)a_1,$$

$$\bar{a}_2 = \sqrt{2}w_r - \bar{a}_1.$$

Таким образом, для МДКП решение становится значительно более простым по сравнению с БПФ: в методе HARPEX для каждой частотной составляющей извлекаются две плоские волны, тогда как в предлагаемом решении используется только одна плоская волна и ненаправленная составляющая.

Линейные временно-частотные преобразования (БПФ, МДКП и др.) с фиксированной длиной окна не могут обеспечить точную декомпозицию тоновых и транзиентных компонентов звука одновременно. Эти два крайних случая всегда приводят к размытию в частотном представлении. Выполнение разреженной декомпозиции аудио с использованием комбинации базисов МДКП различной длины позволяет решить данную проблему и добиться хорошей временной и частотной локализации как тонов, так и импульсов (рис. 2).

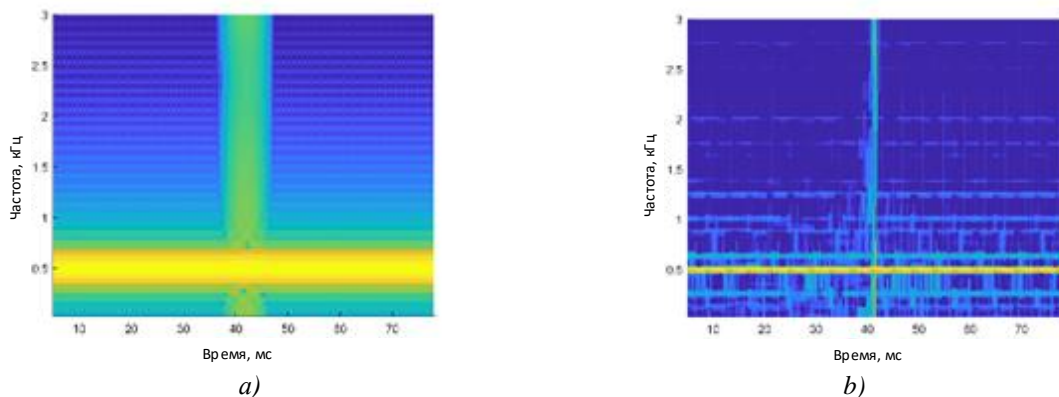


Рис. 2. Временно-частотная декомпозиция: а) БПФ (HARPEX); б) разреженная МДКП-декомпозиция
Fig. 2. Time-frequency decomposition: a) FFT (HARPEX); b) sparse MDCT decomposition

Для представления сигнала в вещественной частотной области используется объединение МДКП-базисов B , каждый из которых имеет различную длину:

$$B = \begin{bmatrix} \text{МДКП}_{32} \\ \text{МДКП}_{64} \\ \dots \\ \text{МДКП}_{2048} \end{bmatrix},$$

где МДКП_N обозначает множество базисных функций МДКП длиной N .

Таким образом, исходный сигнал можно декомпозировать на отдельные слои, обладающие различными временно-частотными характеристиками. Декомпозиция аудиосигнала сводится к следующей задаче оптимизации. Сигнал x восстанавливается при условии минимизации L1-нормы представления X :

$$\arg \min \{ \|X\|_1 \mid x = XB \},$$

где L1-норма $\|X\|_1 = \sum_i |X_i|$ представляет собой сумму абсолютных значений.

Существует множество известных подходов к решению данной задачи с минимизацией L1-нормы, включая метод согласованного преследования (matching pursuit), градиентные методы, жадные алгоритмы и линейное программирование.

Наиболее подходящим с точки зрения практического применения в рассматриваемом случае является метод градиентного спуска. Причина выбора этого метода заключается в следующем. С одной стороны, размерность задачи очень велика и не позволяет использовать сложные вычислительные методы, основанные на вторых производных или обращении матриц. С другой стороны, критически важной частью предлагаемого подхода является способность подавлять искажения, вызванные алиасингом в процессе декомпозиции. Метод градиентного спуска дает возможность добавлять в функцию потерь штрафные члены для контроля алиасинга. Его недостаток – не очень высокая общая производительность, обусловленная медленной сходимостью к решению. Данный недостаток не является критическим, поскольку в этом случае акцент ставится на лучшее качество обработки, а не на производительность технического решения.

Решатель на основе градиентного спуска для проведения экспериментов создан по аналогии с обучением нейронных сетей. Он работает итеративно, приближаясь к решению, делая шаги в направлении убывания функции потерь. Функция потерь состоит из трех компонентов: потерь реконструкции, потерь L1-нормы и потерь от наложения (алиасинга) (рис. 3).

Разреженность представления достигается за счет потерь L1-нормы, которые должны быть достаточно большими, чтобы ускорить процесс оптимизации. Однако одновременно невозможно достичь идеальной реконструкции при ненулевой потере L1-нормы. Чтобы преодолеть это, вклад каждой составляющей параметризуется с помощью параметра α , который начинается с большого значения и постепенно уменьшается на каждой итерации, в конечном итоге приближаясь к нулю.

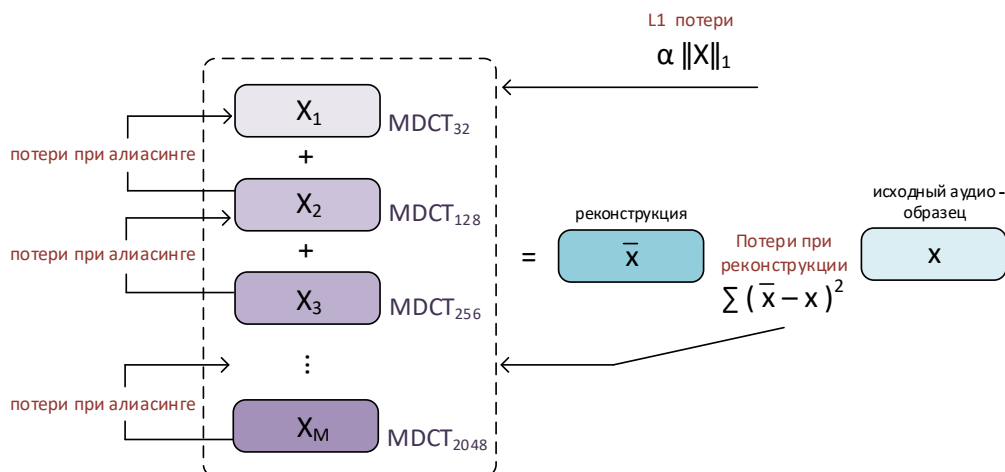


Рис. 3. Разработанный метод получения разреженного представления на основе градиентного спуска

Fig. 3. Developed method for obtaining sparse representation based on gradient descent

Механизм назначения штрафа для борьбы с алиасингом основан на выявлении искажений, возникающих в слоях с более длинными базисными функциями. Используется следующий принцип: слои с более короткими базисными функциями не должны увеличивать энергию выборок слоев с более длинными базисными функциями.

Экспериментальная оценка эффективности предложенного подхода

Оценка эффективности предложенного подхода производилась на основе субъективных оценок качества аудиообразцов, полученных при преобразовании аудио в формате амбисоники первого порядка в аудио в формате амбисоники седьмого порядка с использованием различных схем кодирования.

Обработка аудио включала следующие этапы:

- разреженную декомпозицию каждого канала в базисах МДКП;
- определение направления прихода звука;
- кодирование результата в формат амбисоники седьмого порядка.

Полученное аудио высокого порядка декодировалось в бинауральное аудио с помощью бинаурального декодера SPARTA [7].

Для разреженной декомпозиции использовались пять слоев декомпозиции с размерами МДКП 32, 128, 256, 1024 и 2048 с синусоидальным окном. Для ускорения оптимизационной процедуры в каждом слое не применялась передискретизация с повышенной частотой, хотя это могло бы дополнительно повысить качество декомпозиции. Решатель выполнял 2000 итераций, сформировав пять слоев декомпозиции, охватывающих диапазон от коротких переходных компонентов до длительных тоновых компонентов (рис. 4).

Для детального анализа и субъективных тестов использовались четыре аудиообразца, записанных с помощью устройств амбисоники первого порядка с частотой дискретизации 48 кГц:

- 1) береговая зона¹;
- 2) тяжелые грузовики²;

¹RØDE Ambisonic sound library. – URL: <https://library.soundfield.com> (date of access: 20.11.2025).

²URL: <https://library.soundfield.com>

- 3) лифт³;
- 4) оркестровое произведение⁴.

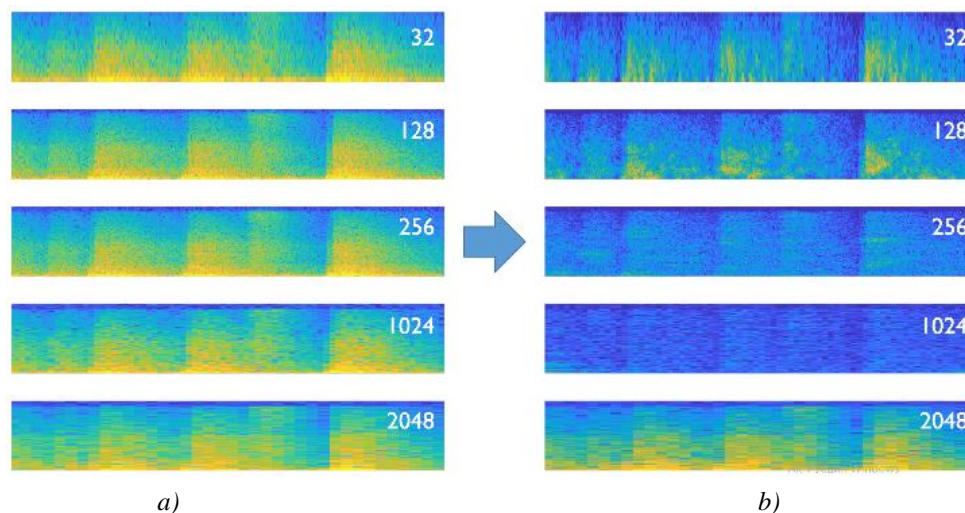


Рис. 4. Разреженная МДКП-декомпозиция после 2000 итераций:
 а) слои МДКП до разреженной оптимизации; б) слои МДКП после разреженной оптимизации
 Fig. 4. Sparse MDCT decomposition after 2000 iterations: a) MDCT layers before sparse optimization;
 b) MDCT layers after sparse optimization

Образцы 1–3 были записаны с помощью микрофона Rode NT-SF1, а образец 4 – с помощью микрофона Calrec Soundfield MkIV.

Закодированное аудио в формате амбисоники седьмого порядка визуально сравнивалось с оригиналом при помощи плагина для визуализации пространственного звука EnergyVisualizer из IEM Plug-in Suite⁵. Согласно визуализациям звукового поля аудио после обработки явно обладает значительно более высоким пространственным разрешением (рис. 5). Визуальная пространственная локализация обработанного звука устойчива в тестах и реагирует даже на тонкие изменения положения источников звука.

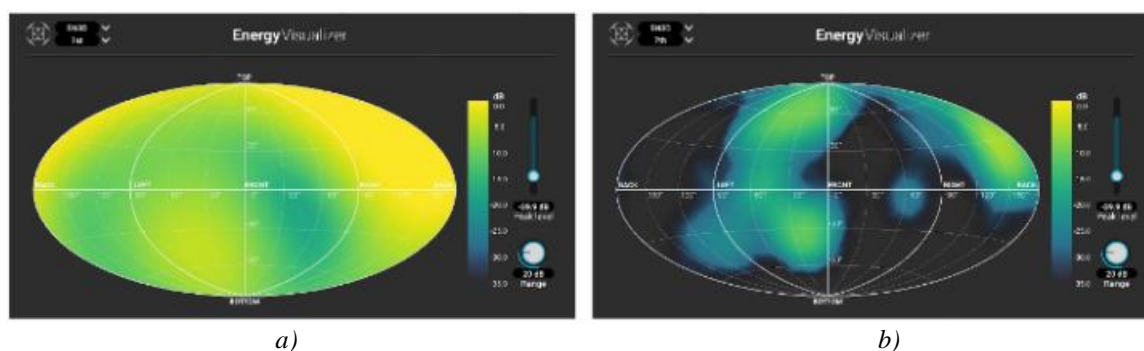


Рис. 5. Визуализация звукового поля исходного и обработанного амбисонического аудио:
 а) исходное аудио (амбисоника первого порядка); б) обработанное аудио (амбисоника седьмого порядка)
 Fig. 5. Visualization of the sound field of the original and processed ambisonic audio:
 a) original audio (first-order ambisonic); b) processed audio (seventh-order ambisonic)

³URL: <https://library.soundfield.com>

⁴Ambisonia. – URL: <http://www.ambisonia.com> (date of access: 20.11.2025).

⁵IEM Plug-in Suite. – URL: <https://plugins.iem.at> (date of access: 20.11.2025).

Результаты субъективной оценки пространственного разрешения декодированных аудиообразцов представлены в табл. 1, шкала субъективной оценки – в табл. 2. Оценка проводилась путем их прослушивания через наушники.

Таблица 1
Субъективная оценка пространственного разрешения

Table 1
Subjective assessment of spatial resolution

Схема декодирования <i>Decoding circuit</i>	Номер образца <i>Sample number</i>			
	1	2	3	4
Амбисоника первого порядка (без обработки)	3,9	4,0	3,8	3,9
Обработанный звук, амбисоника седьмого порядка, линейное МДКП-2048	4,2	4,2	4,0	4,3
Обработанный звук, амбисоника седьмого порядка, разреженное МДКП, без функции штрафа за алиасинг	4,5	4,4	4,3	3,5
Обработанный звук, амбисоника седьмого порядка, разреженное МДКП, с функцией штрафа за алиасинг	4,6	4,4	4,7	4,6

Таблица 2
Шкала субъективной оценки пространственного разрешения

Table 2
Subjective assessment scale for spatial resolution

Описание пространственного восприятия <i>Description of spatial perception</i>	Качественная характеристика <i>Qualitative characteristics</i>	Оценка в баллах <i>Score in points</i>
Четкая и устойчивая локализация всех источников звука, высокая детализация пространственной структуры, отсутствие артефактов	Отлично	5
Уверенная локализация источников, незначительное размывание пространственного образа, не мешающее восприятию	Хорошо	4
Среднее пространственное разрешение, допустимое размывание источников, общая пространственная картина сохранена	Удовлетворительно	3
Значительное размывание и неустойчивая локализация источников, затрудненное определение направлений	Плохо	2
Отсутствие четкого пространственного образа, полная диффузность звукового поля	Очень плохо	1

Для выявления вклада каждой составляющей предложенного метода приведены оценки для следующих схем декодирования:

- амбисоника первого порядка без обработки;
- амбисоника седьмого порядка, полученная декодированием с помощью обычного линейного МДКП с длиной окна 2048 отсчетов;
- амбисоника седьмого порядка, полученная декодированием с помощью разреженного МДКП с пятью слоями декомпозиции и без функции штрафа за наложение (алиасинг);

– амбисоника седьмого порядка, полученная декодированием с помощью разреженного МДКП с пятью слоями декомпозиции и с функцией штрафа за наложение (алиасинг).

Из табл. 1 видно, что полученные в ходе эксперимента результаты демонстрируют явное улучшение субъективного пространственного разрешения звуковых образов при использовании предложенного подхода.

Между тем следует акцентировать внимание на следующих особенностях и ограничениях проведенного эксперимента. Во-первых, использовалось небольшое количество аудиообразцов и малое разнообразие оборудования для прослушивания. Во-вторых, применение для прослушивания аудиообразцов только наушников может приводить к неточным оценкам, поскольку используемые в декодере встроенные передаточные функции для перевода сферической волны в бинауральный формат могут плохо восприниматься конкретным слушателем.

Несмотря на перечисленные выше ограничения, с высокой степенью уверенности можно утверждать, что по отношению к слышимым артефактам тест является надежным, а реализованный решатель временно-частотной декомпозиции обеспечивает разреженное представление с приемлемо высоким качеством. Функция штрафа за алиасинг вносит существенный вклад в восприятие отдельных звуков, что наглядно проявляется при сравнении образца 4 (оркестровое произведение), обработанного с применением и без применения функции штрафа.

Заметное улучшение пространственного разрешения достигается благодаря разреженному представлению (см. табл. 1). Вероятно, это достигается главным образом за счет отдельной пространственной локализации четких переходных звуков, которые достаточно отчетливо воспринимаются в декодированном звуковом образе.

==== Заключение

В статье рассмотрен метод повышения пространственного разрешения аудио, записанного в формате амбисоники первого порядка. Метод использует вещественную разреженную временно-частотную декомпозицию и обеспечивает более четкий пространственный образ. Практические результаты подтверждают применимость метода для обработки аудио с повышением разрешения вплоть до амбисоника седьмого порядка. Вычислительная сложность предложенного решения более чем на порядок выше, чем у HARPEX, по причине итеративного способа вычислений, что является его основным ограничением. Однако данный подход обеспечивает более точную временно-частотную интерпретацию сигнала и вполне применим для приложений, не требующих обработки в реальном масштабе времени.

Вклад авторов. *Д. С. Лихачёв* исследовал идею повышения пространственного разрешения амбисонического звука с использованием разреженного МДКП и оценил ее эффективность. *Н. А. Петровский* принимал участие в программной реализации системы, предназначенной для постановки экспериментов, и исследовал возможность эффективной аппаратной реализации оптимизационных задач. *И. С. Азаров* определил цели и задачи исследования, принимал участие в обсуждении полученных результатов. Все авторы принимали участие в подготовке текста статьи и интерпретации результатов экспериментов.

References

1. Pulkki V. Spatial sound reproduction with directional audio coding. *Journal of the Audio Engineering Society*, 2007, vol. 55, no. 6, pp. 503–516.
2. Berge S., Barrett N. High angular resolution planewave expansion. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics, Paris, France, 6–7 May 2010*. Available at: <https://www.harpex.net/harpex.pdf> (accessed 20.11.2025).
3. Herzog A., Habets E. A. P. Direction and reverberation preserving noise reduction of ambisonics signals. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2020, vol. 28, pp. 2461–2475. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2020.3013979>.
4. Rafaely B. *Fundamentals of Spherical Array Process*. Springer, 2015, 204 p. (Springer Topics in Signal Processing).
5. Schwartz O., Gannot S., Habets E. Multi-microphone speech dereverberation and noise reduction using relative early transfer functions. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 240–251.
6. Meyer J., Elko G. W. Spherical microphone arrays for 3D sound recordings. *Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems*. In Y. Huang, J. Benesty (eds). Norwell, MA, USA, Kluwer Academic, 2004, pp. 67–89.
7. McCormack L., Politis A. SPARTA & COMPASS: Real-time implementations of linear and parametric spatial audio reproduction and processing methods. *2019 AES International Conference on Immersive and Interactive Audio, York, UK, 27–29 March 2019*. Available at: https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/34325781/ELEC_McCormick_Sparta_AES.pdf (accessed 20.11.2025).

Информация об авторах

Лихачёв Денис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: likhachov@bsuir.by

Петровский Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: nick.petrovsky@bsuir.by

Азаров Илья Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: azarov@bsuir.by

Information about the authors

Denis S. Likhachov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of Computer Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: likhachov@bsuir.by

Nick A. Petrovsky, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of Computer Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: nick.petrovsky@bsuir.by

Elias S. Azarov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Computer Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: azarov@bsuir.by