

УДК 004.934

DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-1-250-260

## Построение спектрограмм звуковых сигналов на основе субполосных представлений

<sup>1</sup>Болдышев А.В., <sup>2</sup>Медведева А.А., <sup>2</sup>Прохоренко Е.И., <sup>2</sup>Гайворонская Д.И.

<sup>1</sup>ПАО «Ростелеком» Белгородский филиал, Россия, 308002, г. Белгород, пр-кт. Б. Хмельницкого, д. 81

<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015,  
г. Белгород, ул. Победы, д. 85  
E-mail: boldyshev@bsu.edu.ru

**Аннотация.** В работе описывается одно из направлений исследования звуковых сигналов – анализ звуков с использованием спектрограмм как средства визуализации динамического изменения интенсивности частотных составляющих сигнала. Ввиду того, что звук и, в частности, речевые сообщения, остается наиболее естественной формой обмена информацией, данное направление востребовано в различных технологиях, связанных с обработкой звуковых данных. Спектрограммы применяют студии звукозаписи для очистки от шумов музыкальных произведений, записанных на старые аналоговые носители. В технологиях распознавания речи человека спектрограммы являются перспективным источником данных для анализа формантного состава звуков речи с помощью нейронных сетей, ориентированных на анализ изображений. Поэтому получение изображения высокой четкости и контрастности, позволяющее устойчиво выделять форманты и в музыке, и в речи, представляется актуальной задачей. Известные алгоритмы построения спектрограмм основаны на применении дискретного преобразования Фурье, что обусловлено наличием алгоритма быстрого преобразования (БПФ), существенно сокращающего затраты на вычисления. В работе отмечаются недостатки алгоритма БПФ, которые могут возникать при исследовании свойств речевых сигналов, и представлен новый метод построения спектрограмм на основе субполосных представлений. В основе метода лежит использование субполосных матриц. В работе продемонстрирована эффективность предлагаемого подхода, которая заключается в более четком отображении областей сосредоточения энергии анализируемого звукового сигнала, по сравнению с известными методами.

**Ключевые слова:** спектрограмма, доля энергии, обработка звука, речевые сигналы, субполосные представления, субполосная матрица

**Для цитирования:** Болдышев А.В., Медведева А.А., Прохоренко Е.И., Гайворонская Д.И. 2024. Построение спектрограмм звуковых сигналов на основе субполосных представлений. Экономика. Информатика, 51(1): 250–260. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-1-250-260

---

## Algorithm for Constructing and Analyzing Spectrograms of Audio Signals

<sup>1</sup>Aleksei V. Boldyshev, <sup>2</sup>Aleksandra A. Medvedeva, <sup>2</sup>Ekaterina I. Prokhorenko,  
<sup>2</sup>Diana I. Gaivoronskaya

<sup>1</sup>PJSC Rostelecom Belgorod branch, 81 B. Khmel'nitsky ave., Belgorod 308002, Russia

<sup>2</sup>Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: boldyshev@bsu.edu.ru

**Abstract.** The paper describes one of the areas of sound signals research sound analysis using spectrograms as a means of visualizing dynamic changes in the intensity of the frequency components of the signal. Due to the fact that sound and, in particular, speech messages remain the most natural form of information exchange, this area is in demand in various technologies related to the processing of audio data. Spectrograms are used by recording studios to remove noise from musical works recorded on old analog media. In human speech recognition technologies, spectrograms are a promising source of data for analyzing the

formant composition of speech sounds using neural networks focused on image analysis. Therefore, obtaining an image of high clarity and contrast, allowing stable identification of formants, both in music and in speech, seems to be an urgent task. Known algorithms for constructing spectrograms are based on the use of a discrete Fourier transform, which is due to the presence of a fast transformation algorithm (FFT), which significantly reduces computational costs. The paper points out the shortcomings of the FFT algorithm that may arise when studying the properties of speech signals and presents a new method for constructing spectrograms based on subband representations. The method is based on the use of subband matrices. The work demonstrates the effectiveness of the proposed approach, which consists in a clearer display of areas where the energy of the analyzed sound signal is concentrated, compared to known methods.

**Keywords:** spectrogram, energy share, sound processing, speech signals, subband representations, subband matrix

**For citation:** Boldyshev A.V., Medvedeva A.A., Prokhorenko E.I., Gaivoronskaya D.I. 2024. Algorithm for Constructing and Analyzing Spectrograms of Audio Signals. Economics. Information technologies, 51(1): 250–260. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-1-250-260

## Введение

Обмен информацией посредством звуковых и, в частности, речевых сообщений остается наиболее естественным, а потому удобным для человека способом, поэтому цифровая обработка звуковых сигналов является одним из популярных направлений исследований. Анализ звука по различным параметрам применяется в самых разных областях науки и техники, например, в звукорежиссуре при коррекции или реставрации аудиозаписей, в интернет-технологиях для распознавания и синтеза речи, в телекоммуникациях для анализа качества воспроизведения речи, в рекламном бизнесе для анализа по издаваемым звукам эмоциональной вовлеченности клиента и т. д.

Важным инструментом для анализа и манипулирования звуковыми сигналами является спектрограмма – представление звуковых сигналов, которое визуализирует в виде изображения изменение интенсивности сигнала на всем спектре частот с течением времени. Преимуществом спектрограммы, как инструмента анализа, является возможность осуществлять обработку определенных частот, не затрагивая весь спектр звукового сигнала. Спектрограммы широко используются, например, студиями звукозаписи для очистки от шумов музыкальных произведений, записанных на старые аналоговые носители. В технологиях распознавания речи человека спектрограммы являются перспективным источником данных для анализа формантного состава звуков речи с помощью нейронных сетей, ориентированных на анализ изображений. Поэтому получение изображения высокой четкости и контрастности, позволяющее устойчиво выделять форманты, и в музыке, и в речи, представляется актуальной задачей.

## Методы исследования

Речевой сигнал является функцией времени, таким образом, он может быть описан с помощью различных математических моделей. Наиболее распространёнными математическими моделями речевых сигналов являются модели, которые позволяют представить изменение энергии сигнала в частотной области, такое как, например, дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [Жиляков, 2015]:

$$X_d(k) = \sum_{i=1}^N x_i e^{-j \frac{2\pi}{N} (i-1)(k-1)}, \quad (1)$$

где  $x_i = x(i\Delta t)$ ;  $k = 1, N$ ,  $N$  – длительность окна анализа сигнала;  
 $2\pi / N$  – интервал дискретизации частотной оси.

ДПФ широко применяем ввиду наличия алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), которое позволяет значительно повысить скорость вычислений.

Среди всех характеристик, которые используются при исследовании свойств речевых сигналов, как значимую, можно выделить долю энергии, сосредоточенную в определенном интервале частот.

Стоит отметить, что применение БПФ дает большие погрешности при оценке долей энергии, особенно если анализ проводится в интервале малой ширины [Жиляков, Трубицына, Прохоренко, Болдышев, 2019].

В статье предлагается алгоритм построения спектрограмм звуковых сигналов с использованием субполосных матриц, которые позволяют получить более точные результаты в отличие от алгоритмов на базе преобразования Фурье.

В качестве исходных звуковых данных в работе используются записи речевых сообщений различных дикторов. Имеется речевой сигнал

$$\vec{f} = (f_1, \dots, f_L) \quad (2)$$

длительностью  $L$  отсчетов, который обрабатывается отрезками по  $N$  отсчетов:

$$\vec{x}_i = (f_{(i-1)N+1}, \dots, f_{iN})^T, \quad i=1, \dots, M, \quad (3)$$

где  $N$  – длительность окна анализа,

$M=L/N$  – количество отрезков,

$T$  – операция транспонирования.

Частотный диапазон  $[0, \pi]$  разбит на  $R$  частотных интервалов:

$$W_r = [-\Omega_{r+1}, -\Omega_r) \cup [\Omega_r, \Omega_{r+1}), \Omega_0 = 0, \quad (4)$$

где  $\Omega_r$  – нормированная круговая частота;  $\Omega_{r+1} - \Omega_r = const$ .

В публикации Жилякова Е.Г. приведено описание возможности осуществить вычисление точных долей энергий анализируемых отрезков с использованием субполосных матриц вида [Жиляков, 2015]:

$$A_r = \{a_{ik}^r\} = \int_{\omega \in W_r} e^{-j\omega(i-k)} d\omega = \frac{\sin[\Omega_{r+1}(i-k)] - \sin[\Omega_r(i-k)]}{\pi(i-k)}. \quad (5)$$

Чтобы вычислить доли энергии отрезка (3), которые будут находиться в выбранных частотных интервалах, справедливо соотношение вида:

$$C_r = \vec{x}^T A_r \vec{x} / \|\vec{x}\|^2 = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N x_i a_{ik}^r x_k \right) / \|\vec{x}\|^2, \quad (6)$$

где  $\|\vec{x}\|^2$  – энергия исходного сигнала.

Матрицы (5) симметричные и неотрицательно определённые, поэтому для них справедливо представление в виде набора собственных векторов и чисел [Жиляков, Трубицына, Прохоренко, Болдышев, 2019]:

$$A_r = Q_r L_r Q_r^T = \sum_{i=1}^N \lambda_{ir} \vec{q}_{ir} \vec{q}_{ir}^T, \quad (7)$$

$$A_r \vec{q}_{ir} = \lambda_{ir} \vec{q}_{ir}, \quad (8)$$

$$0 \leq \lambda_{kr} \leq 1, k = 1, \dots, N,$$

где  $Q_r = \{\vec{q}_1^r, \vec{q}_2^r, \dots, \vec{q}_N^r\}$  – матрица собственных векторов;

$L_r = \text{diag}(\lambda_1^r, \dots, \lambda_N^r)$  – диагональная матрица собственных чисел.

При этом:

$$\begin{cases} \|\bar{q}_{kr}\|^2 = 1 \\ (\bar{q}_{ir}, \bar{q}_{kr}) = 0, i \neq k \end{cases} . \quad (9)$$

Подставив (7) в (6), получим:

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_{ir} \alpha_{ir}^2}{\|\bar{x}\|^2}, \quad (10)$$

$$\alpha_{ir} = (\bar{q}_{ir}, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N q_{ir} x_i, \quad (11)$$

где  $\alpha_{ir}$  – скалярные произведения отрезка сигнала на собственные векторы.

Собственные числа количественно характеризуют сосредоточенность в выбранных частотных интервалах долей энергий соответствующих собственных векторов. Другими словами, собственное число, равное единице, показывает сосредоточенность всей энергии соответствующего собственного вектора в выбранном частотном интервале. Вне границ этого интервала энергия вектора не просачивается.

Исследования в [Жилияков, Белов, Олейник, Трубицына, 2019] показали достаточность использования только

$$J = 2 \left[ \frac{N(\Omega_{r+1} - \Omega_r)}{2\pi} \right] + 4, \quad (12)$$

собственных чисел отличных от нуля, поэтому выражение (10) представимо как:

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^J \lambda_{ir} \alpha_{ir}^2}{\|\bar{x}\|^2}. \quad (13)$$

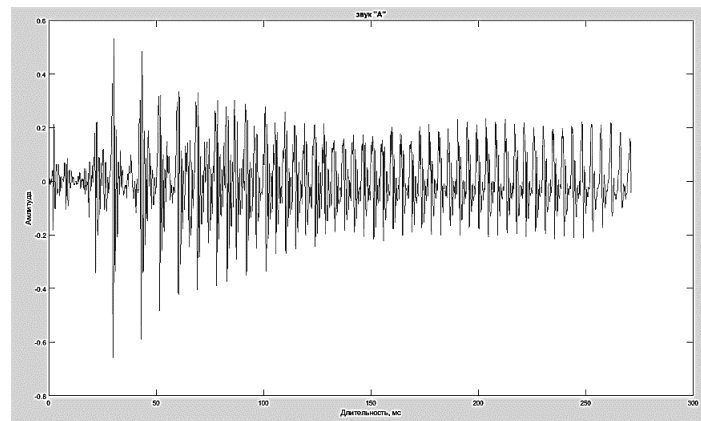
При таком подходе снижаются вычислительные затраты, так как достаточно всего один раз выполнить предварительный расчет собственных векторов и чисел матрицы  $A_r$ .

### Результаты и их обсуждение

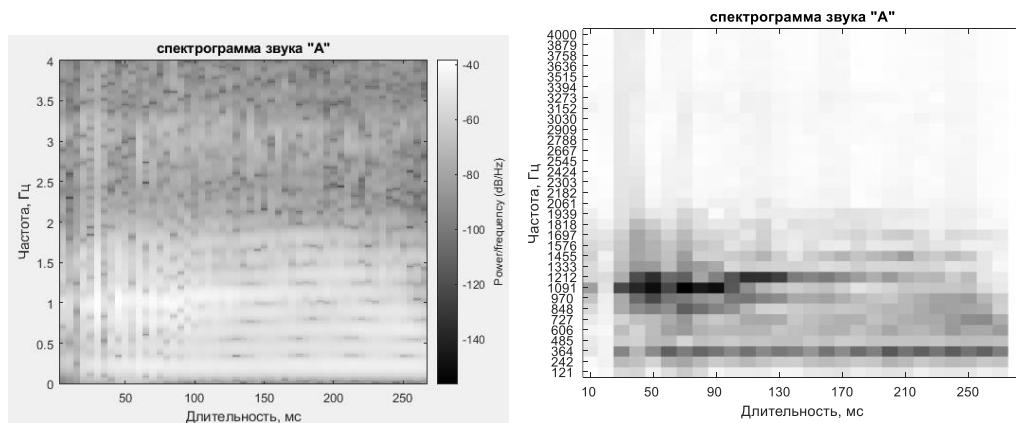
Чтобы с помощью выражения (13) построить спектрограмму речевого сигнала, сперва потребуется вычислить распределение энергий по частотным интервалам в анализируемом отрезке (3), затем осуществить сдвиг окна анализа и выполнить вычисления снова.

Оценивание эффективности предлагаемого алгоритма было проведено путем визуального сравнения со спектрограммами, построенными с использованием БПФ. Для апробации алгоритма использовались звукозаписи речевых сообщений, записанные несколькими дикторами с частотой дискретизации 8000 Гц. В записях ручным способом были найдены фрагменты, соответствующие различным звукам русской речи. Отрезок речевого сигнала, который соответствует звуку «А», и спектрограммы, которые были построены с помощью алгоритма БПФ и предлагаемого подхода (13), приведены ниже на рисунке 1.

На спектрограммах, полученных с применением ДПФ, видно максимальное сосредоточение энергии в области 250–1500 Гц. Точные частотные диапазоны, в которых наблюдается наибольшая концентрация энергии, определить трудно. Субполосный метод, обеспечивает возможность получить значительно лучший результат. Видно, что максимальное значение энергии будет находиться в диапазоне 350–450 Гц и область 850–1250 Гц.



а)

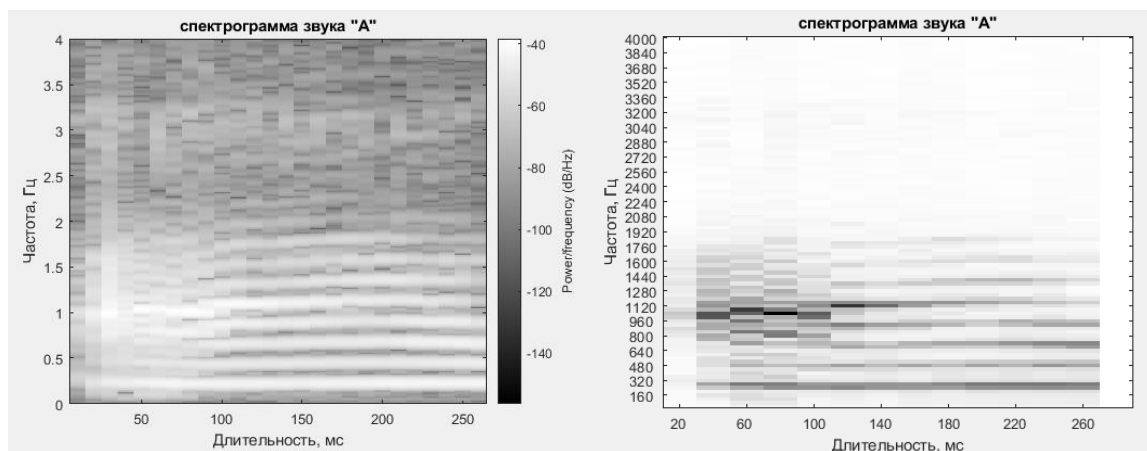


б)

в)

Рис. 1. а) Исходный отрезок речевого сигнала (звук «А»), б) Спектрограмма с использованием алгоритма БПФ (количество точек Фурье – 512), в) Спектрограмма с использованием (13)  
 Fig. 1. a) Initial segment of the speech signal (sound «А»), b) Spectrogram using the FFT algorithm (number of Fourier points – 512), c) Spectrogram using (13)

Чтобы получался более точный результат, следует изменить параметры построения спектрограмм: размер окна ДПФ повысить до 1024, а для субполосного метода повысить количество частотных интервалов R, например, до 100. Результаты построения спектрограмм приведены ниже.



а)

б)

Рис. 2. а) Спектрограмма (звук «А») с использованием алгоритма БПФ (количество точек Фурье – 1024), б) Спектрограмма с использованием (13)  
 Fig. 2. a) Spectrogram (sound «А») using the FFT algorithm (number of Fourier points – 1024), b) Spectrogram using (13)

После увеличения количества точек Фурье стало возможным идентифицировать 8 участков концентрации энергии, которые расположены в диапазоне 250–1500 Гц. Интенсивность цвета (белого) позволяет предположить, что в полученных диапазонах энергия или равная или близкая по величине.

В субполосном методе (13) повышение количества частотных интервалов дало возможность увидеть 6 областей, на которые приходится наибольшая концентрация энергии (черный цвет). Кроме того, отчетливо видно, что максимальная концентрация находится именно в области 250–350 Гц.

Результаты исследования для звуков «И» и «Ш» приведены на рисунках 3 и 4 (количество точек Фурье – 1024,  $R=100$ ).

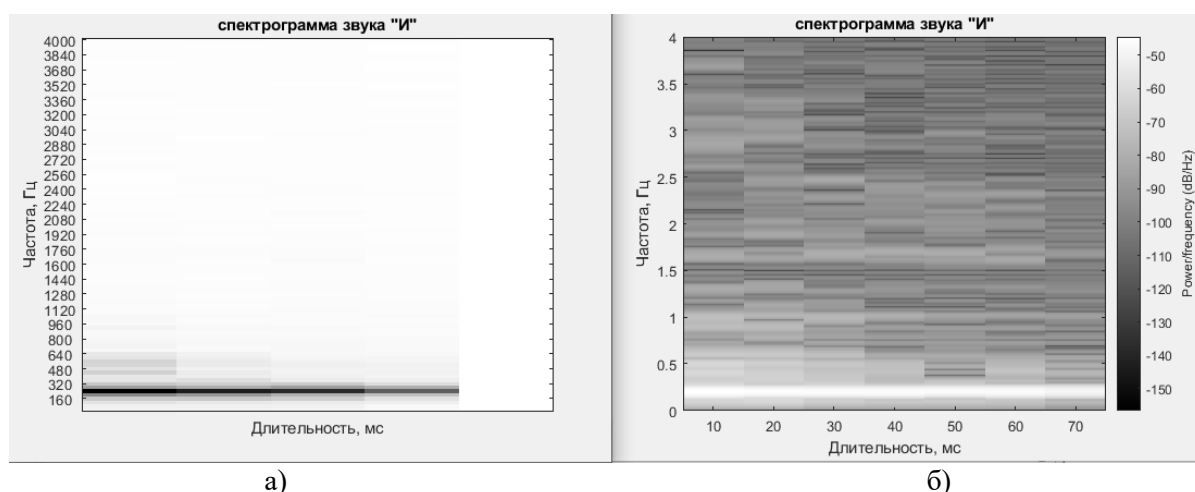


Рис. 3. а) Спектрограмма (звук «И») с использованием алгоритма БПФ (количество точек Фурье – 1024), б) Спектрограмма с использованием (13)

Fig. 3. a) Spectrogram (sound «И») using the FFT algorithm (number of Fourier points – 1024), b) Spectrogram using (13)

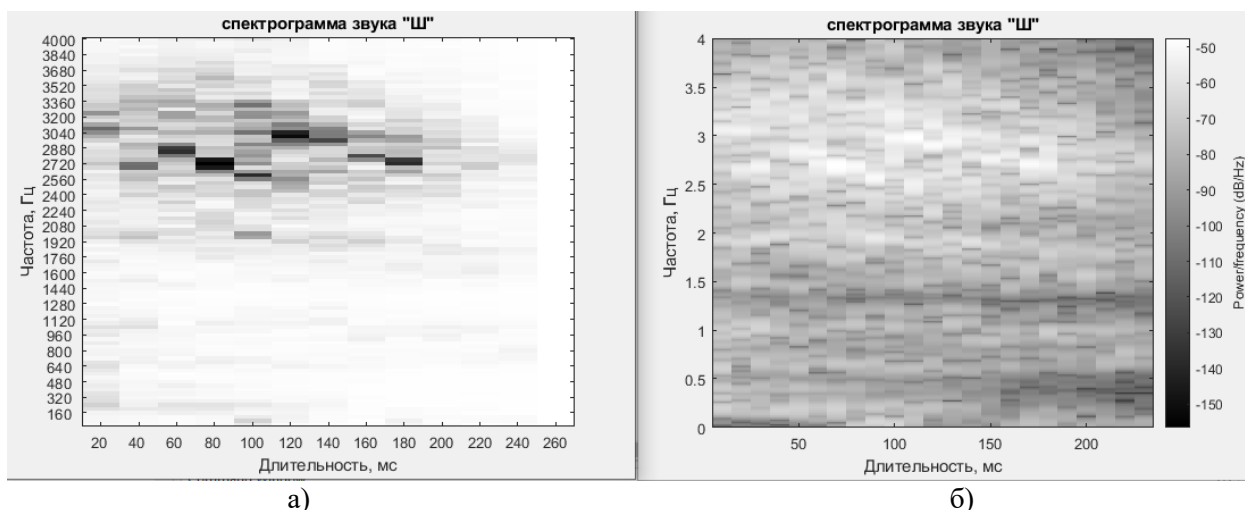


Рис. 4. а) Спектрограмма (звук «Ш») с использованием алгоритма БПФ (количество точек Фурье – 1024), б) Спектрограмма с использованием (13)

Fig. 4. a) Spectrogram (sound «Ш») using the FFT algorithm (number of Fourier points – 1024), b) Spectrogram using (13)

На спектрограммах, которые построены с использованием субполосного метода, более четко видны области максимального сосредоточения энергии звука, нежели на спектрограммах, построенных с применением БПФ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный метод построения спектрограмм целесообразно применять в задачах анализа речевых сигналов.

В рамках исследования проводилась оценка результатов работы двух методов получения спектрограмм при обработке звуковых сигналов с большей длительностью. На рисунке 5 продемонстрированы результаты работы методов при анализе речевого сигнала, соответствующего слову «Побежал» (количество точек Фурье 1024,  $R=100$ ).

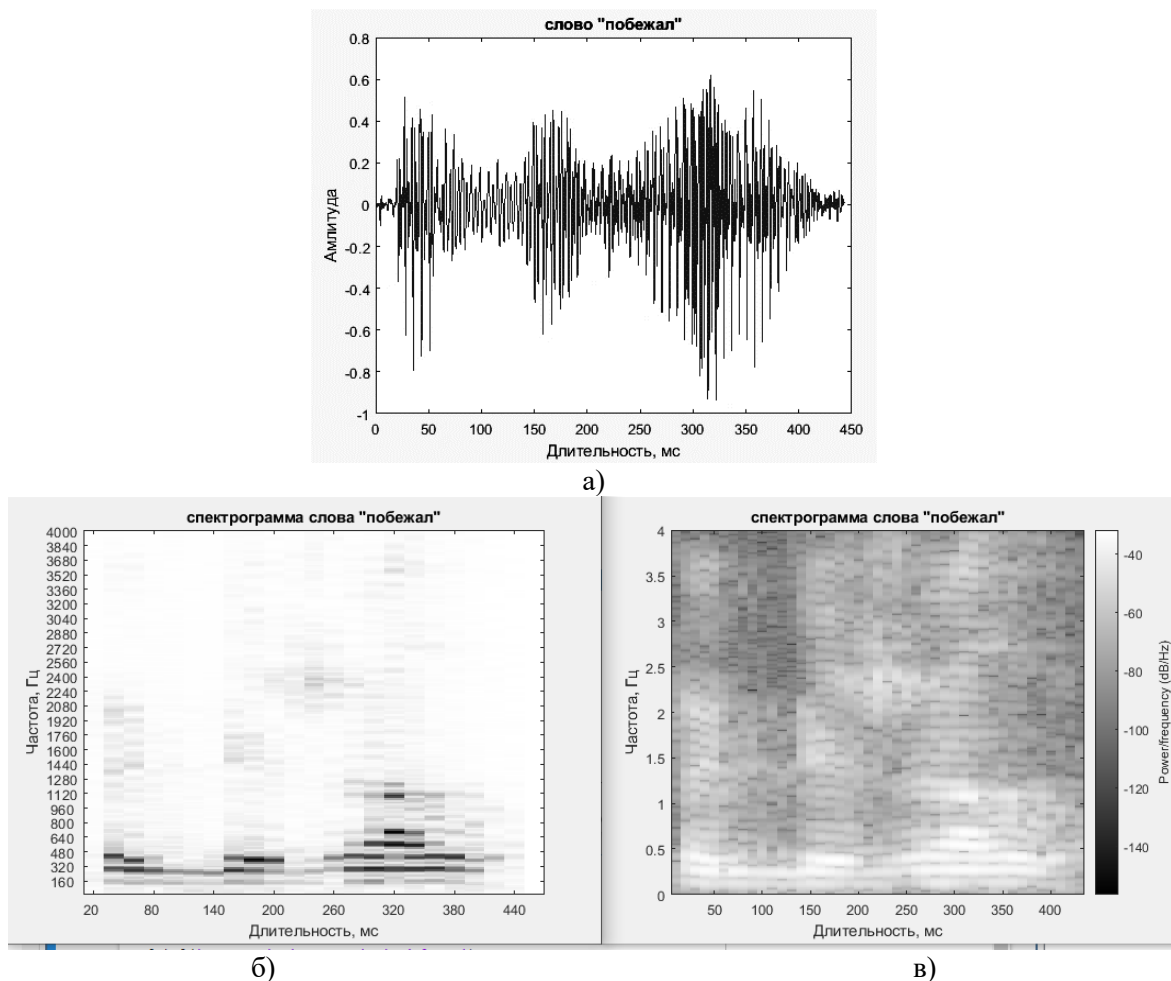


Рис. 5. а) Исходный отрезок речевого сигнала (слово «Побежал»), б) Спектрограмма с использованием алгоритма БПФ, в) Спектрограмма с использованием (13)  
Fig. 5. a) Initial segment of the speech signal (the word «Run»), b) Spectrogram using the FFT algorithm, c) Spectrogram using (13)

Далее на рисунке 6 приведен график формы сигнала (слово «Заслужил») и построенные спектрограммы (количество точек Фурье 1024,  $R=100$ ).

На приведенных выше спектрограммах нетрудно идентифицировать участки, которые соответствуют отдельным фонемам вокализованных звуков, кроме того, четко видны фрагменты, соответствующие согласным звукам, таким как звуки «Ж», «З», «Ч». Применение субполосного метода позволяет получить более точную картину участков частотной области, в которых сосредоточена основная доля энергии.

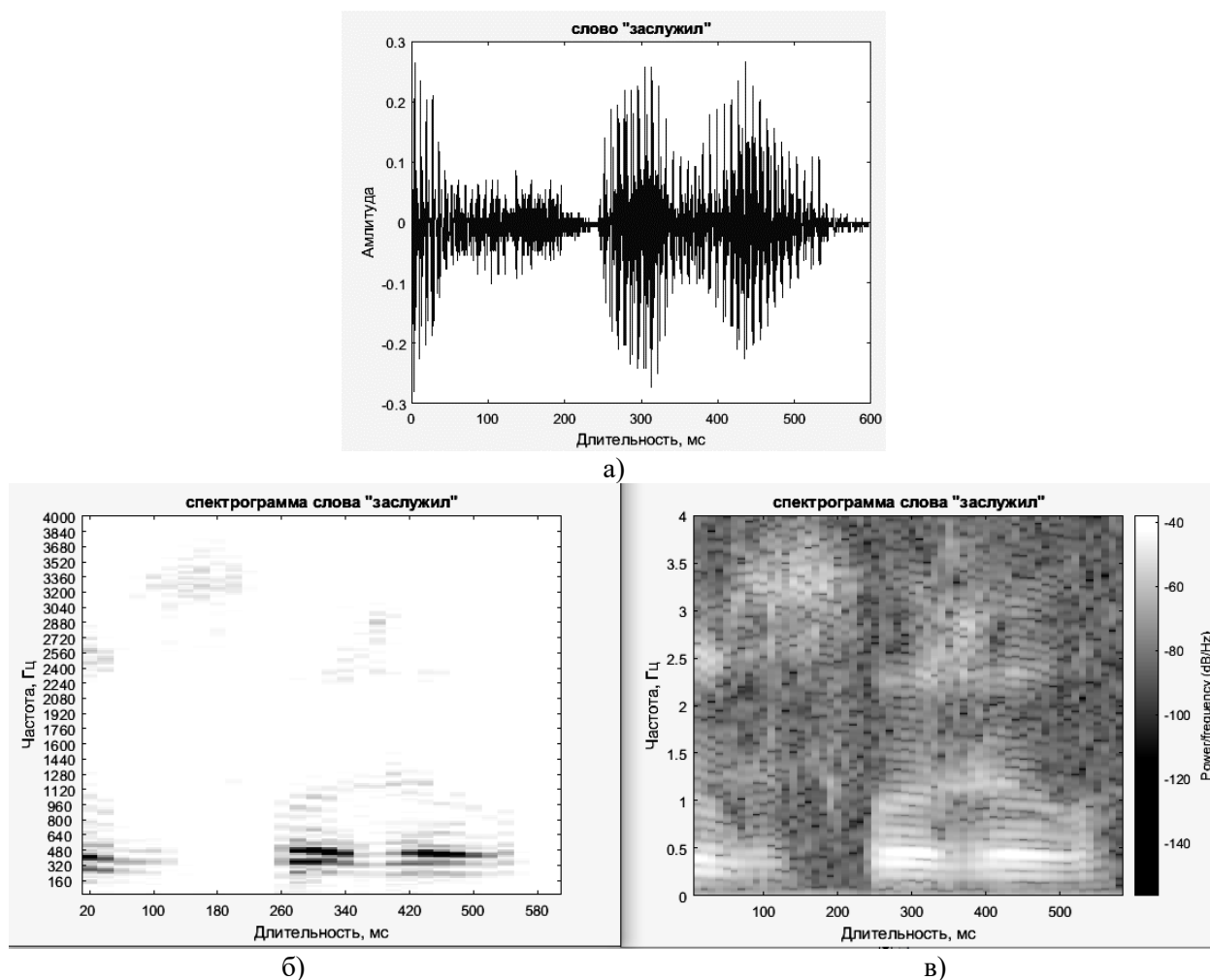


Рис. 6. а) Исходный отрезок речевого сигнала (слово «Заслужил»), б) Спектрограмма с использованием алгоритма БПФ, в) Спектрограмма с использованием (13)  
Fig. 6. a) The original segment of the speech signal (the word «Deserved»), b) Spectrogram using the FFT algorithm, c) Spectrogram using (13)

### Заключение

В работе была продемонстрирована работоспособность и эффективность метода построения спектрограмм с использованием субполосных матриц. Показана возможность предварительного расчета субполосных матриц, что позволяет сократить вычислительные затраты при проведении исследований.

Проведенные вычислительные эксперименты демонстрируют преимущество предлагаемого подхода построения спектрограмм звуковых сигналов на основе субполосных представлений перед методом на основе преобразования Фурье. На получаемых спектрограммах более точно видны диапазоны частот, в которых имеется наибольшая концентрация энергии. Так на примере звукового сигнала, который соответствует звуку «А», удалось увидеть, что основная энергия концентрируется в 6 областях и наибольшая доля находится в области 250–350 Гц. В то время как применение ДПФ показывает 8 областей и визуально определить область с наибольшей энергией достаточно сложно.

Более эффективно показал себя предлагаемый подход и при построении спектрограмм для фрагментов речевых сигналов большей длительности. На спектрограммах достаточно четко определяются фрагменты, соответствующие как отдельным фонемам вокализованных звуков, так соответствующие согласным звукам, например «Ж», «З», «Ч».



Важным преимуществом при работе с субполосными матрицами является то, что они могут быть заранее рассчитаны по любым параметрам анализа и храниться в базе. Это исключает необходимость постоянного их расчета в алгоритмах, что существенно сокращает вычислительные затраты при проведении исследований.

В целом описанные выше результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности применения предлагаемого подхода построения спектрограмм для анализа речевых сигналов.

### Список литературы

- Балабанова Т.Н., Трубицына Д.И., Болдышев А.В., Прохоренко Е.И., Гайворонский В.А. 2022. Обработка речевых данных в ИТС: Практикум лабораторный. Белгород: Изд-во НИУ «БелГУ», 62 с.
- Белов С.П., Белов А.С., Прохоренко Е.И., Балабанова Т.Н. 2022. Субполосная идентификация словных фрагментов речевых сигналов по заданному образцу. Экономика. Информатика. 49(3): 589–596. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-3-589-596.
- Белов С.П., Жилияков Е.Г., Коськин А.В., Трубицына Д.И. 2019. Субполосный анализ и синтез сигналов в рамках косинусного преобразования. Информационные системы и технологии. 4(114): 13–22.
- Болдышев А.В., Медведева А.А., Прохоренко Е.И. 2017. Параметрическое описание звуков речи в задаче распознавания. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 23(272): 159–168.
- Гантмахер Ф.Р. 2010. Теория матриц. 5-е изд., М.: ФИЗМАТЛИТ, 560 с.
- Жилияков Е.Г. 2015. Оптимальные субполосные методы анализа и синтеза сигналов конечной длительности. Автоматика и телемеханика. 4: 51–66.
- Жилияков Е.Г., Белов С.П., Олейник И.И., Трубицына Д.И. 2019. Обобщенный субполосный анализ и синтез сигналов. Инфокоммуникационные технологии. 17(2): 139–145. DOI: 10.18469/ikt.2019.17.2.01.
- Жилияков Е.Г., Белов С.П., Прохоренко Е.И. 2007. Методы обработки речевых данных в информационно-телекоммуникационных системах на основе частотных представлений. Белгород: Изд-во БелГУ. 136 с.
- Жилияков Е.Г., Трубицына Д.И., Прохоренко Е.И., Болдышев А.В. 2019. Об использовании субполосного анализа и синтеза сигналов в области определения косинус-преобразования при решении задач сжатия речевых сигналов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 46(4): 700–709. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-4-700-709.
- Жилияков Е.Г., Туяков С.В. 2011. О вычислении собственных функций субполосного ядра. Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника (ЭВТ). 1: 25–34.
- Михайлов В.Г., Златоустова Л.В. 1987. Изменение параметров речи. Под. ред. М.А. Сапожникова. М.: Радио и связь, 168 с.: ил.
- Сорокин В.Н. 1985. Теория речеобразования. М.: Радио и связь, 312 с.: ил.
- Сергиенко А. 2011. Цифровая обработка сигналов 3-е изд. Санкт-Петербург.: БХВ-Петербург, 768 с. ISBN: 978-5-9775-0606-9.
- Zhilyakov E.G., Belov S.P., Chernomoretz A.A., Trubitsyna D.I., Balabanova T.N. 2019. Subband analysis and synthesis of signals. Compusoft. 8(6): 3206–3211.
- Zhilyakov E.G., Belov S.P., Oleinik I.I., Babarinov S.L., Trubitsyna D.I. 2020. Generalized sub band analysis and signal synthesis. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 9(3): 964–972. DOI: 10.11591/eei.v9i3.1709.

### References

- Balabanova T.N., Trubitsyna D.I., Boldyshev A.V., Prohorenko E.I., Gajvoronskij V.A. 2022. Obrabotka rechevyh dannyh v ITS: Praktikum laboratornyj [Speech Data Processing in ITS: Laboratory Workshop]. Belgorod, Izd-vo NIU «BelGU», 62 p.
- Belov S.P., Belov A.S., Prokhorenko E.I., Balabanova T.N. 2022. Subband Identification of Word Fragments of Speech Signal Word Segments Precedent. Economics. Information technologies. 49(3): 589–596. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-3-589-596.

- Belov S.P., Zhilyakov E.G., Koskin A.V., Trubitsyna D.I. Subpolous analysis and synthesis of signals within the framework of cosinus conversion. *Information Systems and Technologies*, 2019, 4(114), pp. 13–22.
- Boldyshev A.V., Medvedeva A.A., 2017. Parametric description of speech sounds in the recognition problem. *Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies*. 23(272): 159–168.
- Gantmaher F.R. 2010. *Teoriya matric [Matrix Theory]*. Moscow, FIZMATLIT Publ, 560 p.
- Zhilyakov E.G. 2015. Optimal sub-band methods for analysis and synthesis of finite-duration signals. *Automation and Remote Control*, 4: 51–66.
- Zhilyakov E.G., Belov S.P., Oleinik I.I., Trubitsyna D.I. 2019. Generalized subband analysis and signal synthesis. *Information Technologies*. 17(2): 139–145. DOI: 10.18469/ikt.2019.17.2.01.
- Zhilyakov E.G., Belov S.P., Prokhorenko E.I. 2007. *Metody obrabotki rechevyh dannyh v informacionno-telekommunikacionnyh sistemah na osnove chastotnyh predstavlenij [Methods of Speech data Processing in Information and Telecommunication Systems Based on Frequency Representations]*. Belgorod, Izdatelstvo BelGU Publ., 136 p.
- Zhilyakov E.G., Trubitsyna D.I., Prokhorenko E.I., Boldyshev A.V. 2019. On the use of subband analysis and signal synthesis in the field of determining the cosine transform in solving problems of speech signal compression. *Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies*. 46(4): 700–709. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-4-700-709.
- Zhilyakov E.G., Tuyakov S.V. 2011. O vychislenii sobstvennyh funktsij subpolosnogo yadra [On Calculation of Eigenfunctions of Subband Kernel]. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Elektronnaya vychislitel'naya tekhnika (EVT)*. 1: 25–34.
- Mikhailov V.G., Zlatoustova L.V. 1987. *Izmenenie parametrov rechi [Changing speech parameters]*. Ed.by M.A. Sapozhnikova. Moscow, Radio i svyaz Publ., 168 p.
- Sergienko A. *Cifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]*. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2011, 768 p. ISBN: 978-5-9775-0606-9.
- Sorokin V.N. *Teoriya recheobrazovaniya [Theory of Speech Formation]*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985, 312 p.
- Zhilyakov E.G., Belov S.P., Chernomorets A.A., Trubitsyna D.I., Balabanova T.N. 2019. Subband analysis and synthesis of signals. *Compusoft*. 8(6): 3206–3211.
- Zhilyakov E.G., Belov S.P., Oleinik I.I., Babarinov S.L., Trubitsyna D.I. 2020. Generalized sub band analysis and signal synthesis. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 9(3): 964–972. DOI: 10.11591/eei.v9i3.1709.

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 03.02.2024

Received February 03, 2024

Поступила после рецензирования 01.03.2024

Revised March 01, 2024

Принята к публикации 04.03.2024

Accepted March 04, 2024

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Болдышев Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер Центра эксплуатации Белгородского филиала ПАО Ростелеком, Белгород, Россия

**Aleksei V. Boldyshev**, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Operation Center of the Belgorod Branch of PJSC Rostelecom, Belgorod, Russia

**Медведева Александра Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия,

**Aleksandra A. Medvedeva**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Institute of Engineering and Digital Technologies of Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

**Прохоренко Екатерина Ивановна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

**Ekaterina I. Prokhorenko**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Institute of Engineering and Digital Technologies of Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

**Гайворонская Диана Игоревна**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

**Diana I. Gaivoronskaya**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Institute of Engineering and Digital Technologies of Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia