

УДК 621.391: 004(082)

ВЕКТОРНАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МУЗЫКАЛЬНОЙ АКУСТИКЕ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

*Смирнова Н.В., к.т.н., доцент Севастопольского государственного университета, e-mail: yolkanv@gmail.com;
Пономарева О.В., д.т.н., профессор Ижевского государственного университета имени М.Т. Калашникова,
e-mail: ponva@mail.ru.*

VECTOR AND SPECTRAL DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN MUSICAL ACOUSTICS USING PARAMETRIC DISCRETE FOURIER TRANSFORM

Smirnova N.V., Ponomareva O.V.

We consider one of the relevant scientific areas of digital signal processing (DSP) – digital vector and spectral processing of musical signals playing an important role in digital information music technologies. System analysis of the vector and spectral processing of musical signals used in musical acoustics has shown a wide use of classical methods based on the discrete Fourier transform (DFT). It is shown that the unwanted effects of the DFT significantly affect the efficiency of vector and spectral processing of musical signals. It is proposed to increase the efficiency of classical methods in musical acoustics by using parametric Fourier transform (DFT-P). The use of DFT-P to determine the pitch and timbre of musical signals is investigated.

Key words: spectral processing of musical signals, digital signal processing (DSP), parametric Fourier transform.

Ключевые слова: музыкальная акустика, музыкальный сигнал, дискретное преобразование Фурье, параметрическое дискретное преобразование Фурье, цифровые информационные музыкальные технологии, локализация спектральных пиков, высота тона, тембр.

Введение

Одним из главных научных направлений цифровой обработки сигналов – (ЦОС) является цифровая векторная и спектральная обработка сигналов¹, которая играет важнейшую роль в цифровых информационных музыкальных технологиях, научные и прикладные аспекты которых рассматриваются в музыкальной акустике.

В настоящее время многие крупные научные коллективы, как в России, так и за рубежом, ведут интенсивные исследования в области музыкальной акустики по созданию, передаче, обработке, воспроизведению и восприятию эстетических музыкальных звуков², музыки в целом.

Основными задачами векторной и спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике, являются определение высоты тона и тембра эстетических му-

Рассматривается одно из актуальных научных направлений цифровой обработки сигналов (ЦОС) – цифровая векторная и спектральная обработка музыкальных сигналов, которые играют важную роль в цифровых информационных музыкальных технологиях. Системный анализ применяемых в музыкальной акустике методов векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов, показал широкое использование классических методов, основанных на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ). Показано, что нежелательные эффекты ДПФ существенно влияют на эффективность и результативность методов векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов. Предложено повышение эффективности и результативности методов в музыкальной акустике за счет применения метода параметрического преобразования Фурье (ДПФ-П). Исследованы вопросы применения ДПФ-П для определения основного тона и тембра музыкальных сигналов.

зыкальных звуков, поскольку именно эти характеристики музыкальных сигналов позволяют судить о мелодии, гармонии, звучащем голосе и инструменте.

Системный анализ применяемых в музыкальной акустике методов векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов показал широкое использование классических методов, основанных на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) и алгоритмах быстрого его вычисления – алгоритмах быстрого преобразования Фурье (БПФ). Это объясняется адекватностью математического аппарата ДПФ структуре музыкальных сигналов, возможностью наглядной физической интерпретации и толкования полученных результатов.

В тоже время известно, что ДПФ помимо достоинств обладает и существенными недостатками, которые проявляются в виде нежелательных эффектов наложения, частотола, утечки и гребешкового эффекта. При обработке музыкальных сигналов особенно нежелателен эффект частотола, затрудняющий обработку сигналов

¹ **Векторный анализ** – множество методов частотного анализа дискретных сигналов, в результате которых обеспечивается получение информации о частотах, амплитудах и фазах составляющих сигналов и/или их изменений во времени. **Спектральный анализ** множество методов частотного анализа дискретных сигналов, в результате которых обеспечивается получение информации о частотах и амплитудах составляющих сигналов и/или их изменений во времени.

² **Эстетические музыкальные звуки** – музыкальные звуки пригодные для музыки (звуки внутримелодические, приятные и ровные, не раздражающие наш слух).



из-за несовпадения частот музыкальных звуков и их обертонов с частотами, получаемыми в результате применения ДПФ. В работе [1] предложено и исследовано обобщение дискретного преобразования Фурье в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П). Данное преобразование позволяет устранить или существенно снизить влияние нежелательных эффектов ДПФ при векторной и спектральной обработке сигналов. В работах [2-6] рассмотрены приложения ДПФ-П и множества его базисных систем для разного рода сигналов в различных предметных областях, доказана их эффективность.

Специфика музыкальных сигналов вытекает, во-первых, из их математической модели в виде трех сумм:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^{N_1} X_i(t) + \sum_{j=1}^{N_2} Y_j(t) + \sum_{k=1}^{N_3} \xi_k(t);$$

где $Z(t)$ – сложный ангармонический сигнал³; $X_i(t)$ – i ангармонический сигнал, являющийся моделью i инструмента или вокала; $Y_j(t)$ – сигнал, являющийся моделью j шумового музыкального инструмента; $\xi_k(t)$ – сигнал, являющийся моделью k помехи, во-вторых, из структуры стадий становления сигналов музыкальных инструментов: начальная фаза (атака, процесс установления); средняя фаза (основная, стационарная часть); конечная фаза (глушение, процесс спада)⁴.

Учитывая аналитические и статистические свойства базисов ДПФ-П, представляется важным, актуальным и своевременным шагом применение ДПФ-П в музыкальной акустике для векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов.

Задача данной работы – повышение эффективности и результативности векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов в музыкальной акустике за счет применения метода параметрического преобразования Фурье.

Система цифровой обработки музыкальных сигналов на основе ДПФ-П

Параметрическое дискретное преобразование Фурье представляет собой разложение дискретного музыкального сигнала (ДМС) по базису параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П):

$$\begin{aligned} def_p(k, n, \theta) &= W_N^{(k+\theta)n} = \\ &= \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k+\theta)n\right], \quad 0 \leq \theta < 1; \end{aligned} \quad (1)$$

и определяется в матричной форме следующим соотношением:

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N; \quad 0 \leq \theta < 1,$$

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad (2)$$

где $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – представление дискретного музыкального сигнала $x(n)$, $n = \overline{0, N-1}$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования; θ – параметр ДПФ-П; $S_{N,\theta} = [s(0, \theta), s(1, \theta), \dots, s((N-1), \theta)]^T$ – вектор коэффициентов разложения X_N по системе ДЭФ-П, задаваемой матрицей $F_{N,\theta}$, которые задают амплитудно-частотный и фазово-частотный спектры ДМС.

Существует и алгебраическая форма ДПФ-П, которая имеет следующий вид:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n}, \quad k = \overline{0, N-1}; \quad 0 \leq \theta < 1; \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что при значении параметра $\theta = 0$ ДПФ-П переходит в ДПФ. Важным свойством ДПФ-П является то, что за счет варьирования параметра θ в ДПФ-П у исследователя имеется возможность анализа амплитудно-частотного и фазово-частотного спектра ДМС между частотами стандартного ДПФ, т.е. возможность существенного ослабления влияния эффекта частотного.

Обработка дискретного музыкального сигнала $x(n)$, заданного на конечном интервале, может проводиться в двух равноправных и взаимосвязанных областях: во временной области (временной и корреляционный анализ ДМС, фильтрация, гомоморфная фильтрация ДМС) и в частотной области (векторный и спектральный анализ ДМС, кепстральный анализ).

В основе теории векторной и спектральной обработки дискретных сигналов (в том числе и музыкальных) на конечных интервалах, как во временной, так и частотной областях лежат три базовых постулата, которым удовлетворяет ДПФ-П [7]:

- определение дискретного сигнала на конечном интервале в той или иной форме (например, наличие или отсутствие операции квантования по уровню);
- определение сдвига дискретного сигнала в рамках конечного интервала, что позволяет периодически продолжить (периодизировать) сигнал;
- определение системы базисных функций разложения дискретного сигнала на конечном интервале во временной и частотной областях.

В теории векторной и спектральной обработки дискретных сигналов на конечных интервалах доказаны следующие положения:

- взвешивание дискретного сигнала прямоугольным окном (определение дискретного сигнала на конечном интервале) в одной из областей (временной или частотной) приводит к свертке в другой области с функцией вида; $\sin(N \cdot x/2)/(N \sin(x/2))$;

³ Сложный ангармонический сигнал – это сигнал, который может быть представлен в виде суммы ангармонических колебаний.

⁴ Продолжительность каждой фазы у различных музыкальных инструментов, как правило, различна.

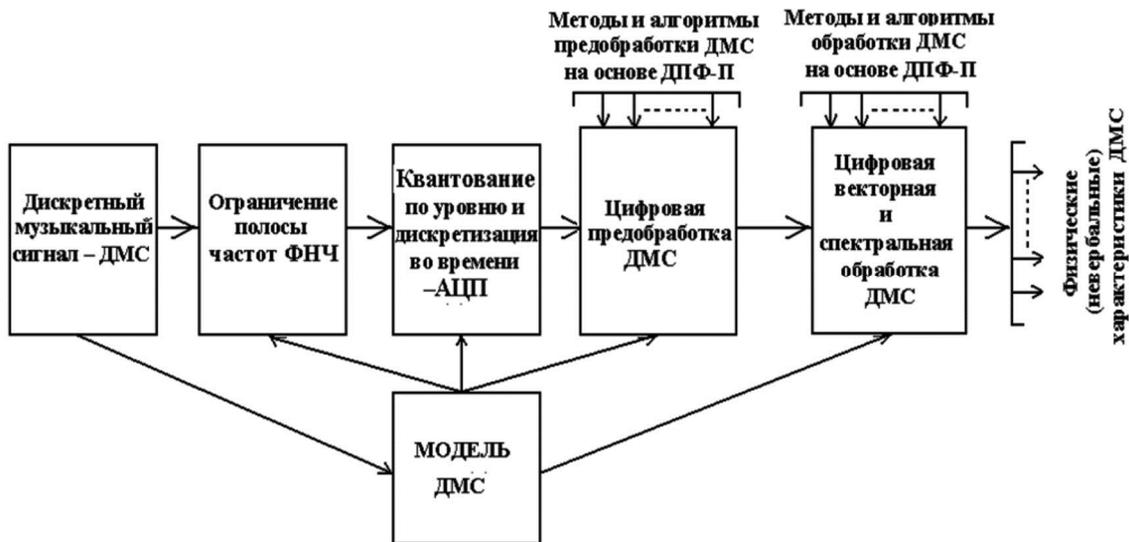


Рис. 1. Система цифровой векторной и спектральной обработки МДС методом ДПФ-П

– дискретизации сигнала в одной области приводит к операции периодизации в другой области.

На рис. 1 приведена обобщенная система цифровой векторной и спектральной обработки МДС методом ДПФ-П.

Рассмотрим решение, так называемой задачи локализации спектральных пиков применительно к определению частоты основного тона музыкального сигнала в музыкальной акустике.

Задача локализации спектральных пиков в музыкальной акустике

Одним из актуальных вопросов векторной и спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике является решение задачи определения частот спектральных максимумов – задачи локализации спектральных пиков. Обычно задача определения частот спектральных максимумов решается с помощью ДПФ, применение которого осложнено в связи с проявлением эффектов частотола и утечки. Для ДМС проявление этих эффектов особенно нежелательно, поскольку (в силу принятых в настоящее время музыкальных шкал, определяющих частоты нот) частоты коэффициентов ДПФ не совпадают с соответствующими частотами конкретных нот, и спектральная картина ДМС оказывается «смазанной».

Введем в рассмотрение *дискретно-временное преобразование Фурье* (ДВПФ). Данное преобразование ставит в соответствие некоторой последовательности $y(n)$, $n = -\infty, +\infty$, непрерывное преобразование Фурье согласно выражению:

$$S_y(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n) \cdot \exp(-j2\pi \cdot f \cdot n); \quad -\infty \leq f \leq \infty. \quad (4)$$

Из выражения (4) непосредственно следует, что ДВПФ это Z-преобразование $y(n)$, $n = -\infty, +\infty$, вычисленное на единичной окружности.

Сформируем последовательность $x_1(n)$, $n = -\infty, +\infty$, дополнив последовательность $x(n)$, $n = 0, (N-1)$, ну-

левыми отсчетами от $-\infty, +\infty$. ДВПФ которой обозначим как $S_{x_1}(f)$. Таким образом, последовательность $x_1(n)$, $n = -\infty, +\infty$, на интервале $n = 0, (N-1)$ в точности равна $x(n)$, которую ($x(n)$) можно интерпретировать как взвешивание $x_1(n)$ прямоугольным окном $\omega(n) = 1$, $n = 0, (N-1)$.

Известно, что ДПФ последовательности $x(n)$, $n = 0, (N-1)$, представляет собой (при соответствующей нормировке) отсчеты $S_{x_1}(f)$ на фиксированном множестве точек $2\pi \cdot k / N$, $k = 0, (N-1)$. Можно показать, что ДПФ-П последовательности $x(n)$, $n = 0, (N-1)$, представляет собой (при соответствующей нормировке) отсчеты $S_{x_1}(f)$ на множестве точек, мощность которого регулируется параметром θ ; $\{2\pi \cdot (k + \theta) / N\}$, $k = 0, (N-1)$, $0 \leq \theta < 1$.

Задачу локализации спектральных пиков можно сформулировать и как задачу измерения частоты гармонического сигнала, которая, как правило, находится между частотами бинов ДПФ. В результате, вследствие дискретности измерения спектра, частота гармонического сигнала измеряется с погрешностью, равной половине частотного интервала Δf между бинами ДПФ ($\Delta f = f_d / N$ – частотный интервал между бинами ДПФ; f_d – частота дискретизации сигнала, N – размерность ДПФ)⁵.

Находить значения $S_{x_1}(f)$ на большем числе точек, чем позволяет ДПФ можно путем дополнения исходной

⁵ В том случае, если частота гармонической компоненты совпадает с центральной частотой одного из бинов ДПФ, проблемы, связанные с проявлением эффекта утечки, отсутствуют, и частота синусоидального сигнала измеряется с погрешностью, стремящейся к нулю.

последовательности $x(n)$ нулевыми отсчетами. Данная операция носит название операции дополнения нулями во временной области – ОДНВ. Отметим, что поскольку для выполнения ДПФ обычно применяют алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) по основанию 2, то длительность последовательности дополненной нулями $x_d(n)$ должна удовлетворять соотношению: $N = 2^p$; $p = 3, 4, \dots$

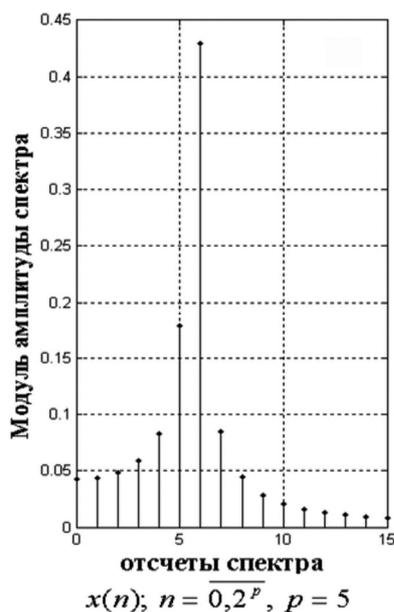
Известный метод измерения частоты сигнала, основанный на ОДНВ исходного сигнала $x(n)$, $n = \overline{0, (N-1)}$, число которых определяется соотношением $N \cdot (2^m - 1)$; $m = 1, 2, 3, \dots$, позволяет за счет уменьшения частотного интервала $\Delta f_{\text{ОДНВ}}$ между бинами ДПФ сигнала $x_d(n)$; $n = \overline{0, (2^m - 1)}$: $\Delta f_{\text{ОДНВ}} = \Delta f / 2^m$, уменьшить погрешность измерения частоты исходного гармонического сигнала.

Метод, основанный на ОДНВ, имеет следующие существенные недостатки:

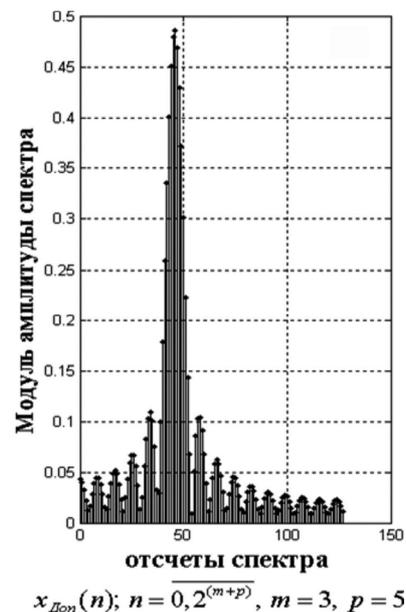
- необходимость существенного расширения оперативной памяти для хранения нулевых значений сигнала;
- проведение непроизводительных операций с нулевыми значениями сигнала;
- фиксированность шага дискретизации по частоте при измерении спектров;
- число операций, определяющее время измерения частоты, возрастает в $\nu = 2^m \cdot (m + p) / p$ раз.

Предлагаемый метод локализации спектральных пиков (измерения частоты гармонических сигналов) основан на параметрическом дискретном преобразовании Фурье и свободен от указанных недостатков.

Пусть задан сигнал $x(n) = \cos(2\pi / 32 \cdot k \cdot n)$; $n = \overline{0, 31}$; $k = 5, 750$; и сигнал $x_d(n)$; $n = \overline{0, 255}$, модули спектров, которых приведены на рис. 2, а и рис. 2, б, соответственно.



а)



б)

Рис. 2. Модули спектров сигналов $x(n)$ и $x_{\text{дон}}(n)$

Математическая формулировка задачи

Задана передаточная характеристика фильтра ДПФ: $F(x) = \sin(N \cdot x / 2) / (N \sin(x / 2))$ и два ее отсчета n_1 и n_2 , между которыми находится $\max F(x)$. Необходимо найти значение R , доставляющее максимум функции $F(x)$ на интервале $[n_1, n_2]$ с заданной точностью, т.е. найти:

$$R = \arg \max F(x), \quad R \in [n_1, n_2]. \quad (5)$$

Алгоритм метода локализации спектральных пиков

В силу структуры функции $F(x)$ из рис. 2, а следует, что $\max F(x)$ находится между пятым и шестым отсчетами, а из рис. 3 – между сороковым и сорок восьмым отсчетами (жирные линии). Поскольку амплитуда шестого бина больше пятого (рис. 2, а), и сорок восьмой отсчет ДПФ больше сорокового (рис. 3), несложно сделать вывод о том, что частота гармонического сигнала находится между $5,5 f_d / 32$ Гц и $6 f_d / 32$ Гц (пунктирная линия на рис. 3), а погрешность измерения частоты гармонического сигнала равна $0,5 f_{\text{кв}} / 32$ Гц. Согласно классическому методу – методу ОДНВ, дополняя 32-точечный сигнал $x(n) = \cos(2\pi / 32 \cdot k \cdot n)$ 224 нулевыми отсчетами, мы уменьшаем погрешность измерения в 4 раза, естественно мирясь с существенными недостатками данного подхода, которые приведены выше.

Разработанный метод для решения задачи поиска спектральных пиков предполагает выполнение нескольких ДПФ-П при разных значениях параметра θ , что позволяет уменьшить анализируемый частотный интервал в $1/\theta$ раз. Используя метод локализации спектральных пиков на основе ДПФ-П, мы получаем тот же результат, что и в методе ОДНВ, выполнив всего два измерения частотного спектра, при $\theta = 0,125$ и $\theta = 0,250$ (рис. 3, тонкие линии), сократив при этом время измерения частоты гармонического сигнала, в сравнении с методом ОДНВ, в $\gamma = 2^{m-1} (p + m) / p$ раз. Отметим, что применив метод однопараметрической безусловной оптимизации

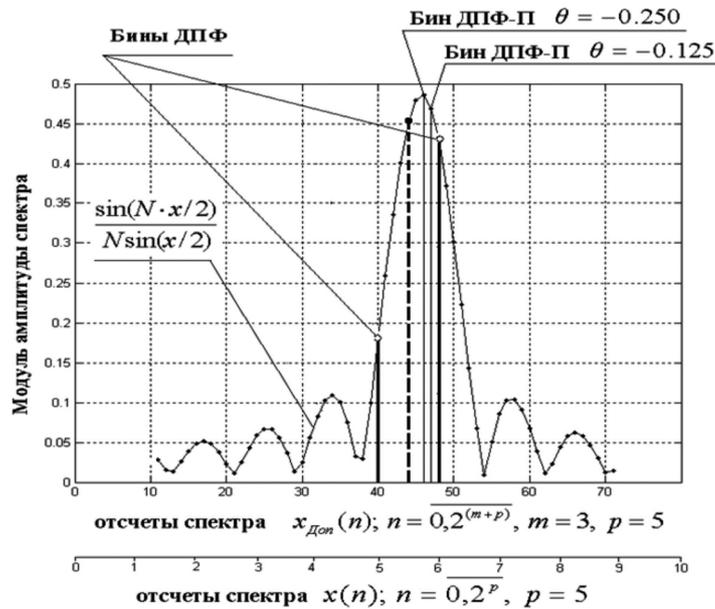


Рис. 3. Иллюстрация работы алгоритма измерения частоты сигналов на базе параметрического дискретного преобразования

на основе методов половинного деления и хорд, можно повысить сходимость предлагаемого алгоритма.

Отметим еще одно важное преимущество предлагаемого метода локализации спектральных пиков на основе ДПФ-П. В том случае, когда операция ОДНВ принципиально не позволяет «настроить» частоты бинов на частоту гармонического сигнала из-за фиксированности шага дискретизации по частоте ДПФ, точно определить частоту гармонического сигнала классическим методом невозможно. В то же время метод локализации спектральных пиков на основе ДПФ-П легко справляется с данной задачей за счет варьирования параметра θ .

Важным и эффективным приложением разработанного метода локализации спектральных пиков на основе ДПФ-П является решение актуальной задачи музыкальной акустики – задачи определения высоты МДС (определения частоты основного тона МДС). Актуальность определения частоты основного тона МДС объясняется тем, что восприятие высоты музыкально-акустических сигналов играет центральную роль в выделении партии отдельного музыкального инструмента и (или) партии вокала слуховой системой человека. Высота музыкального сигнала являются одним из двух основных идентификаторов «вычленения» конкретного музыкального сигнала из общего музыкально-акустического потока [8]. Вторым важным идентификатором для решения указанной задачи является тембр МДС, который будет рассмотрен ниже.

Результаты работ [8-12] подтверждают важнейшую роль основного тона в работе слуховой системы человека:

- слуховая система человека способна различать высоту звука только у периодических сигналов, которые могут быть чисто гармоническими и ангармоническими;

- слуховая система человека «присваивает» музыкальному сигналу высоту его основного тона, исходя из того, что спектр музыкального сигнала состоит из гармоник – обертонов, частоты которых находятся в целочисленных отношениях⁶;

- у музыкального сигнала, для которого условие периодичности не выполняется, слуховая система человека не может определить высоту тона и воспринимает его как шумовой сигнал. Например, музыкально акустические сигналы таких музыкальных инструментов как тарелки, маракасы, щетки, гонги и др. не имеют определенной высоты и воспринимаются как шумовые сигналы;

- слуховая система человека может различить по высоте два звуковых сигнала, отличающихся по частоте всего на 0,2 %. Такая высокая разрешающая способность слуха позволяет выделять примерно 140 градаций высоты тона ниже частоты 500 Гц, а в диапазоне от 500 Гц до 16 кГц – примерно 480 градаций высоты тона (всего 620 градаций)⁷;

- слуховая система человека ощущение высоты чистого тона (сигнала одной частоты) связывает связано не только с частотой сигнала, но и с интенсивностью звука и его длительностью;

- фазовые соотношения в музыкально-акустическом сигнале оказывают существенное влияние на звуковысотные отношения (на мелодию и гармонию).

- высота тона позволяет классифицировать звуки количественно, опираясь на физические измерения физических величин, и служит в музыке основой мелодии, гармонии и интонации.

В заключение данного раздела статьи, подчеркнем, что разработанный метод локализации спектральных пиков кроме векторной и спектральной обработки МДС может найти свои приложения и в таких предметных областях, как анализ речевых сигналов в кибернетике и

⁶ **Примечание авторов статьи:** таким образом, еще раз подтверждается ангармоническая структура модели музыкального сигнала.

⁷ В европейской музыке инструменты с равномерно темперированной шкалой используют около 100 градаций высоты тонов, что создает большие перспективы для развития музыкальных компьютерных технологий [.]

связи, анализ биомедицинских сигналов в компьютерной медицинской диагностике и в целом ряде других областей научных исследований.

Применение параметрического дискретного преобразования Фурье для определения тембра музыкальных сигналов

Решение проблематики определения тембра и установления его функциональной или корреляционной зависимости от физических характеристик ДМС является одной из важных и актуальных задач музыкальной акустики. Тембр, ощущаемый слуховой системой человека как субъективная характеристика музыкального сигнала, является сложнейшим понятием в теории музыки, в определение которого внесли вклад многие всемирно известные ученые. Подчеркивая сложность определения тембра, известный ученый, проф. Алдошина И. А. [8, 9] сравнила сложность определения тембра со сложностью определения понятия жизнь – «все понимают, что это такое, однако над научным определением наука бьется уже несколько столетий».

Приведем основные этапы эволюции понятия «тембр» музыкальных сигналов [8-13]:

– исследуя музыкальные звуки Гельмгольц (1877 г.), пришел к выводу: о том, что «разница в музыкальном качестве тона (тембре) зависит только от присутствия и силы парциальных тонов (обертонов), и не зависит от разности фаз, с которой эти парциальные тоны вступают в композицию»⁸.

– Флетчер (1938 г.), пришел к заключению, что тембр зависит от обертоновой структуры звука, и изменяется при изменении громкости и высоты тона, хотя обертоновая структура может при этом сохраняться;

– Ликлайдер (1951 г.), показал, что тембр является многомерным объектом восприятия и зависит от общей обертоновой структуры звука, которая также может меняться с изменением громкости и высоты тона;

В стандарт США ANSI-60 (1973 г.) к существующему определению тембра⁹: сделано следующее дополнение: «Тембр зависит от спектра сигнала, и он (тембр) также зависит от формы волны, звукового давления расположения частот в спектре и временных характеристик звука».

Пломп (1976 г.), доказал, что восприятие тембра зависит как от амплитудного спектра (в первую очередь, от формы спектральной огибающей), так и от фазового спектра.

Россинг (1990 г.) показал, что тембр зависит от временной огибающей звука и его длительности.

Начиная с 1995 года происходит переход к изучению тембра с системных позиций, который основан на общих принципах гештальт-психологии распознавания слуховых образов¹⁰, на базе временных, спектральных, и векторных описаний музыкального сигнала, а также огибающих в соответствующих областях.

Прежде чем перейти к рассмотрению взаимосвязи тембра с физическими характеристиками музыкального сигнала, полученными в результате физических измерений, определимся с какими измерениями, мы имеем дело, при исследовании тембра. В современной теории измерений [14, 15] различают физические измерения и нефизические измерения. Физические измерения имеют целью установление значений количественных (связанных с естественными эталонами) объективных характеристик исследуемого физического объекта таких, как, например, частота, амплитуда, спектр. Нефизические измерения опираются на субъективные характеристики исследуемого объекта, которые связаны с его вербальными характеристиками, такими, например, как в случае исследования тембра: сухой, сочный, бархатистый, звонкий, мягкий, морозный, яркий, тусклый. Физические и нефизические измерения различаются между собой возможностью формализованного (математического) описания процедур измерения. Если физические измерения допускают исчерпывающую формализацию процедур измерения, то с нефизическими измерениями дело обстоит гораздо сложнее, поскольку последние, включают в себя наряду с формализуемыми процедурами измерений (процедуры могут и отсутствовать) и неформализуемые процедуры, слуховой системой человека.

Строго говоря, определение тембра того или иного музыкального сигнала – это нефизическое измерение, формализация которого, как уже отмечалось, представляет собой весьма не простую задачу. Под формализацией будем понимать результат отыскания для отдельных субъективных (вербальных) характеристик тембра соответствующих объективных характеристик.

На основе системного анализа отечественных и зарубежных информационных источников о результатах выявления физических параметров ДМС, характеризующих тембр того или иного музыкального инструмента, того или иного певческого голоса, а также результатов собственных исследований выделены следующие перспективные научные направления векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов:

Скольльзящий векторный анализ¹¹ ДМС во всех фазах – начальной (атака), средней (стационарная часть) и конечной (спад), с целью выявления фазовых и амплитудных соотношений обертонов между собой во времени;

⁸ Данное положение практически дословно воспроизводится в современных учебниках физики, несмотря на существенные изменения, дополнения и уточнения в результате проводимых исследований тембра музыкальных сигналов (см., например, элементарный учебник физики / под ред. Ландсберга Г.С. – В 3 томах. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика – М.: Физматгиз, 2015. – 662 с.).

⁹ Тембр – атрибут слухового восприятия, который позволяет слушателю судить, что два звука, имеющие одинаковую высоту и громкость, различаются друг от друга.

¹⁰ Гештальт-психология распознавания слуховых образов – основана на следующих общих принципах: сегрегации, подобии, непрерывности и «общей судьбе» – подборка статей с сайта <http://www.625-net.ru>.

¹¹ Скользящий векторный анализ ДМС – группа методов дискретной Фурье – обработки МДС, которая позволяет получать полную информацию об изменениях во времени частот, амплитуд и фаз гармонических составляющих исследуемых сложных МАС.

Спектральный анализ ДМС в начальной фазе (в атаке), с целью выявления порядка проявления обертонов во времени;

Скользящий векторный и спектральный анализ огибающей ДМС во всех фазах – начальной, средней и конечной, с целью выявления изменений формы огибающей во времени.

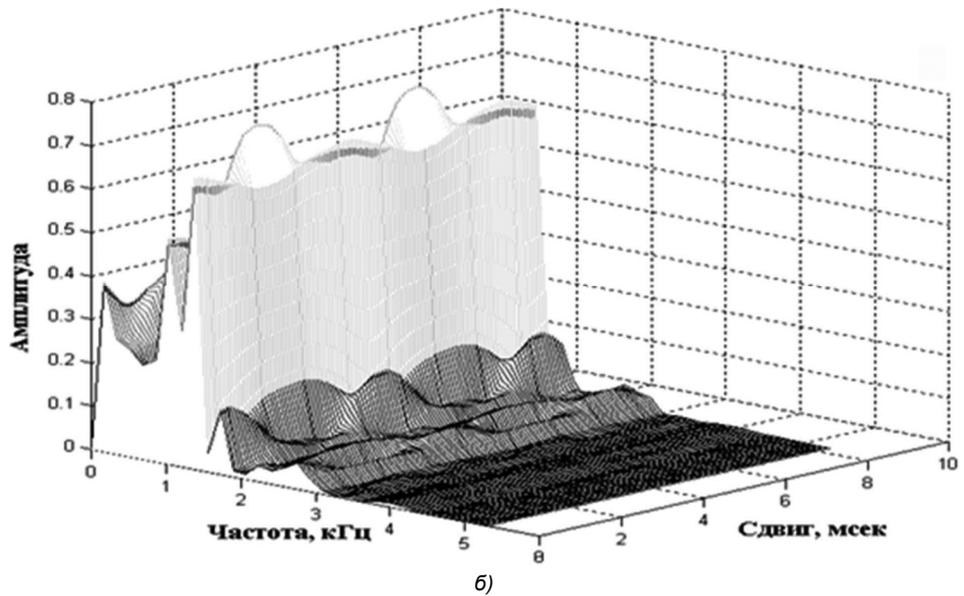
Использование в этих направлениях для исследований ДПФ-П вместо ДПФ позволяет получить более де-

тальную спектральную картину, как в статике, так и в динамике. Дело в том, что, как векторная, так и спектральная картины, полученные с помощью ДПФ, являются лишь «прореженными» вариантами соответствующих картин, полученных на основе ДПФ-П.

Эффективность и результативность векторной и спектральной обработки музыкальных сигналов в музыкальной акустике на основе ДПФ-П иллюстрируется рис. 4 и 5.



Гобой, скользящий спектр ДПФ МАС ноты «до» первой октавы, стационарная часть



Гобой, скользящий спектр ДПФ МАС ноты «до» первой октавы, стационарная часть $\theta = 0, 1/4, 1/2, 3/4$

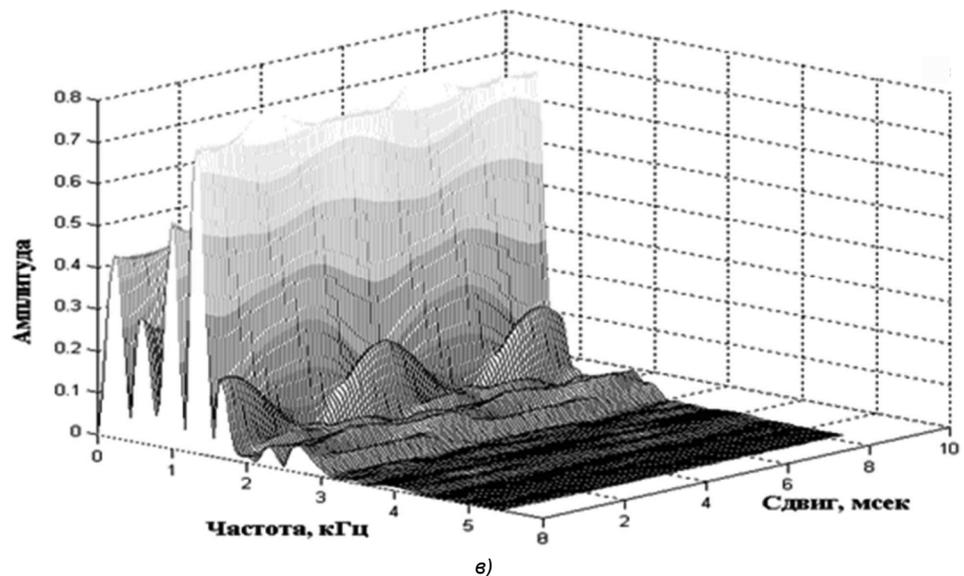
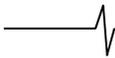


Рис. 4. Спектральная обработка МДС ноты «до» первой октавы, гобой, стационарная часть

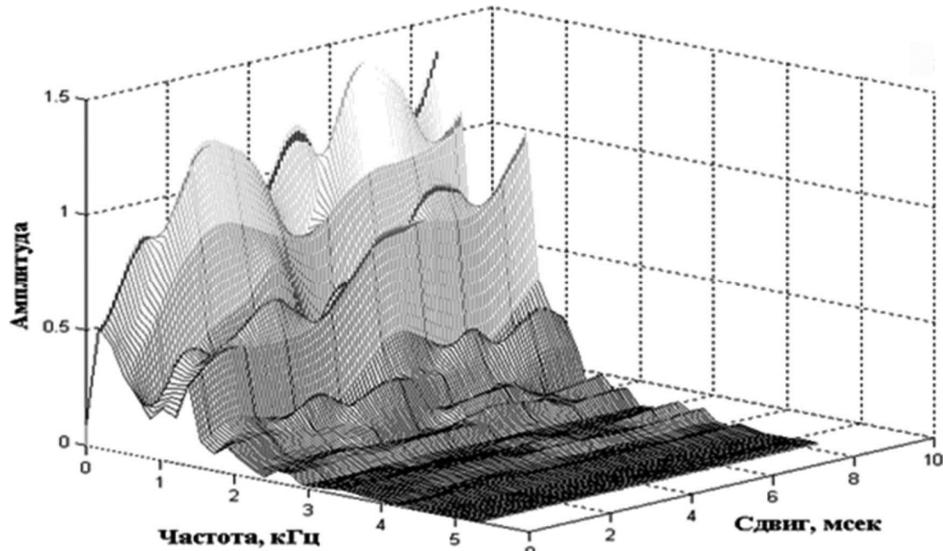


Пианино, МАС ноты «до» первой октавы, атака



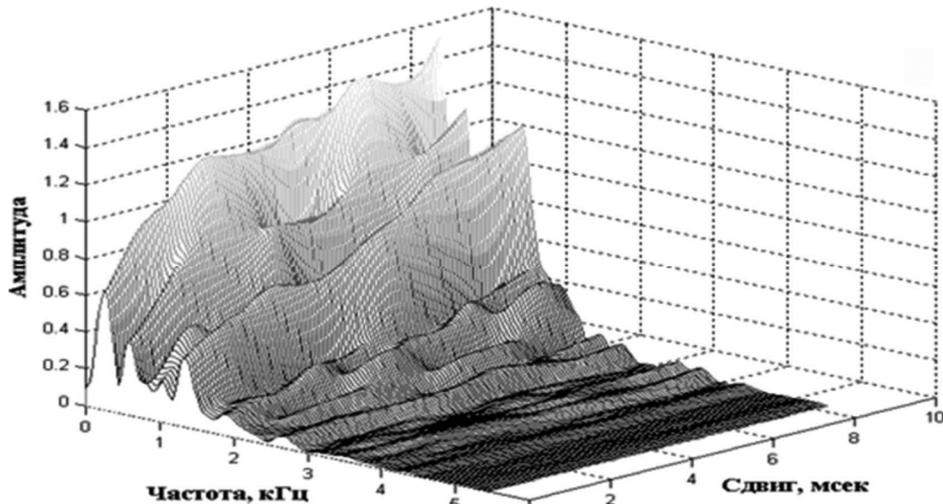
а)

Пианино, скользящий спектр ДПФ МАС ноты «до» первой октавы, атака



б)

Пианино, скользящий спектр ДПФ МАС ноты «до» первой октавы, атака $\theta = 0, 1/4, 1/2, 3/4$



в)

Рис. 5. Спектральная обработка МДС ноты «до» первой октавы, пианино, атака

Получение более детальной картины важно на всех стадиях становления ДМС и отдельно для каждого обертона, особенно на стадии атаки, т.к. обертоны нарастают неодинаково, и анализ их нарастания имеет принципиальное значение при определении тембра.

Отметим, что с увеличением частоты дискретизации музыкального сигнала спектральная картина, получаемая стандартным ДПФ, более детальной не становится, поскольку интервал между соседними анализируемыми частотами зависит только от временной длительности

анализируемого фрагмента сигнала, но не от количества отсчетов, приходящихся на этот фрагмент, и поэтому предложенные методы и алгоритмы останутся актуальными и при дальнейшем развитии технических средств записи и воспроизведения музыкальных звуков.

Заключение

1. Для описания ДМС используются объективные характеристики (частота, амплитуда, временной, частотный спектры), на основе физических измерений и субъ-

ективные (вербальные) характеристиками, основе внефизических измерений, посредством описания слуховых ощущений, испытываемых слуховой системой человека. Выяснение взаимосвязи субъективных и объективных характеристик ДМС является одной из главных проблем музыкальной акустики.

2. Важными и актуальными задачами компьютерной векторной и спектральной обработки ДМС являются следующие задачи:

– задача определения высоты (частоты основного тона), поскольку частота основного тона играет центральную роль в выделении партии отдельного музыкального инструмента и (или) партии вокала слуховой системой человека и служит в музыке основой мелодии, гармонии и интонации;

– задача формализации понятия тембра – задача установления зависимости тембра (функциональной или корреляционной) от физических характеристик МДС, поскольку именно тембром различаются звуки одинаковой высоты и громкости, но исполненные на различных инструментах, разными певческими голосами, или на одном инструменте, но разными способами.

3. ДПФ позволяет определить значения ДВПФ ДМС только в фиксированном множестве точек единичной окружности, что является основной причиной невысокой точности определения основного тона ДМС, методами и алгоритмами, основанными на ДПФ.

4. Применение ДПФ-П для анализа ДМС позволяет на порядок повысить точность определения основного тона ДМС за счет варьирования параметра преобразования.

5. Результаты приложения ДПФ-П для решения задачи формализации понятия «тембр», решения задачи анализа ДМС во временной области на его различных этапах (атака, стационарная часть, спад) показали, что ДПФ-П дает возможность повысить эффективность и результативность обработки ДМС во временной, частотной и частотно-временной областях.

Литература

1. Пономарева О.В. Развитие теории спектрального анализа дискретных сигналов на конечных интервалах в базисе параметрических экспоненциальных функций // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 2. – С. 7-11.
2. Пономарев В.А., Пономарева О.В. Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. – С. 2-6.

3. Ponomarev V.A. Ponomareva O.V., Ponomarev A.V. Method for Effective Measurement of a Sliding Parametric Fourier Spectrum. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, vol. 50, no. 2, pp.1-7. (2014).

4. Пономарева О.В. Основы теории дискретных косвенных измерений параметров сигналов – Ижевск: Издательство ИжГТУ, – 2016. 172 с.

5. Ponomareva O., Ponomarev A., Ponomarev V. Evolution of Forward and Inverse Discrete Fourier Transform // В сборнике: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs 2018). 2018. С. 313-318.

6. Ponomareva O., Ponomarev A., Ponomareva N. Window - presume Parametric Discrete Fourier Transform // В сборнике: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs 2018). 2018. С. 364-368.

7. Пономарева, О.В. Развитие теории и разработка методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье: дис... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Пономарева Ольга Владимировна. – Ижевск, 2016. – 357 с.

8. Алдошина, И.А. Музыкальная акустика: учебник / И.А. Алдошина, Р. Приттс. – СПб: Композитор – Санкт-Петербург, 2006. – 720 с.

9. Алдошина, И.А. Основы психоакустики. Подборка статей с сайта <http://www.625-net.ru>. Ч.1-17. 154 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/141630/>.

10. Пономарева Н.В. Компьютерная спектральная обработка музыкально-акустических сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье // Приборостроение – 2017: материалы 10-й Международной научно-технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 16-18.

11. Пономарева, Н.В. Проблемы компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике / Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16. – № 1. – С. 26-32.

12. Кузнецов, Л.А. Акустика музыкальных инструментов: Справочник. / Л.А. Кузнецов. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 368 с.

13. Петелин, Р.Ю. Звуковая студия в РС./ Р.Ю. Петелин, Ю.В. Петелин. СПб.:БХВ-Санкт-Петербург, 1998. – 256 с.

14. Цветков, Э.И. Основы математической метрологии / Э.И.Цветков.-СПб.: Политехника, 2005.-510 с.

15. Rabiner L., Gold B. Theory and Application of digital signal processing. New Jersey, Prentice-hall, 1975, 772 p.