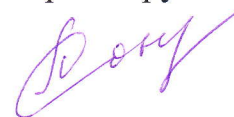


На правах рукописи



ПОНОМАРЕВА Наталья Владимировна

**КОМПЬЮТЕРНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА
СИГНАЛОВ В МУЗЫКАЛЬНОЙ АКУСТИКЕ
НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ**

Специальность: 05.13.01

**Системный анализ, управление и обработка информации
(в науке и технике)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Научный руководитель **Хворенков Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор,
Батищев Виталий Иванович,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры информационных технологий;

доктор технических наук, доцент,
Прозоров Дмитрий Евгеньевич
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», профессор кафедры радиоэлектронных средств;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева»

Защита состоится «21» июня 2018 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, Студенческая, д. 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Сяктерев Виктор Никонович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Компьютерная спектральная обработка сигналов (*Digital Spectral Signal Processing*) является одним из главных направлений компьютерной (цифровой) обработки сигналов - (ЦОС) (*Digital Signal Processing – DSP*) и играет важнейшую роль в информационных (компьютерных) технологиях (ИТ), в том числе в компьютерных музыкальных технологиях (*Music Technology – MT*), научные аспекты которых прорабатываются в музыкальной акустике.

Музыкальная акустика в настоящее время активно развивается, научные коллективы в России и за рубежом (Санкт-Петербургская государственная консерватория им. Римского-Корсакова, Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. Бонч-Бруевича, Стенфордский университет, Гарвардский университет, университет Беркли, ИРКАМ и др.) ведут интенсивные исследования, выходит значительное количество статей и книг по вопросам создания, передачи, обработки, воспроизведения и восприятия музыкальных звуков, в том числе по вопросам компьютерной обработки оцифрованных музыкальных звуков – сигналов в музыкальной акустике. При этом основные задачи обработки сигналов в музыкальной акустике – определение высоты тона и тембра, позволяющие судить о мелодии, гармонии, звучащем голосе и инструменте, – связаны со спектральной обработкой сигналов.

Проведенный анализ методов и алгоритмов, используемых при спектральной обработке сигналов в музыкальной акустике, показал широкое использование классических методов, основанных на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) (*Discrete Fourier Transform – DFT*) и алгоритмах быстрого его вычисления – алгоритмах быстрого преобразования Фурье (БПФ) (*Fast Fourier Transform – FFT*). Что объясняется целым рядом причин, главная из которых – адекватность математического аппарата дискретного преобразования Фурье структуре сигналов в музыкальной акустике, поскольку позволяет получить наглядную физическую интерпретацию и толкование полученных результатов.

Однако практика применения классических методов спектральной обработки помимо существенных достоинств выявила и ряд их принципиальных недостатков, вытекающих из особенностей дискретного преобразования Фурье и проявляющихся в виде известных нежелательных эффектов наложения, частотола, утечки и гребешкового эффекта. При обработке сигналов в музыкальной акустике это, прежде всего, эффект частотола, затрудняющий обработку сигналов из-за несовпадения частот музыкальных звуков и их обертонов с частотами, получаемыми в результате применения дискретного преобразования Фурье.

Для решения задач проблематики классических методов спектральной обработки сигналов в 2016 году было предложено множество полных, ортогональных, параметрических экспоненциальных базисных систем и разработанное на их основе обобщение дискретного преобразования Фурье в виде

параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П)¹. Данное преобразование существенно расширило функциональные возможности классических методов спектральной обработки, сохранив при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкование получаемых результатов.

Предложенные базисные системы и разработанное на их основе параметрическое дискретное преобразование Фурье применимы к сигналам в разных областях, в том числе и к сигналам в музыкальной акустике (музыкально-акустическим сигналам – МАС), но готовых методов и алгоритмов, учитывающих специфику сигналов и задач музыкальной акустики в настоящее время нет.

В связи с изложенным – учитывая большой интерес к музыкальной акустике, особенности ее задач и применяемых методов, а также характеристики предложенного в 2016 году параметрического дискретного преобразования Фурье – решение научной задачи по разработке новых и совершенствованию существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике на основе параметрического дискретного преобразования Фурье является важным, актуальным и своевременным шагом.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в формирование ведущей роли классических спектральных методов обработки сигналов, расширении спектра их приложений в различных областях науки и техники внесли отечественные и зарубежные ученые: *в области аналоговой и цифровой спектральной обработки сигналов* – работы Котельникова В.А., Харкевича А.А., Хинчина А.Я., Пугачева В.С., М.Г., Рытова С.М., Виленкина Н.Я., Трахтмана А.М., Прохорова С.А., Wiener N., Gold B., Cooley D., Tjuki D., Rader C., Rabiner L.; *в области выявления спектральной структуры сигналов* – работы А.Я., Серебренникова, Батищева В.И., Ильина Г.И., Прохорова Ю.Н., Oppenheim A., Shafer R., Marpl L., S., Jenkins G., Watts D., Bendat J., Pirsol A., Randall R. B.; *в области обработки сигналов в музыкальной акустике* – работы Алдошиной И.А., Pritts R. и др.

Для спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике используются классические методы спектральной обработки, практическое применение которых, как известно, сопровождается проявлением ряда нежелательных эффектов, вытекающих из их основы – дискретного преобразования Фурье. Во всех трех указанных выше областях научных исследований данному вопросу уделялось и уделяется пристальное внимание. Однако следует признать, что к настоящему времени эффективность разработанных методов борьбы с влиянием нежелательных эффектов на результаты спектрального анализа сигналов в музыкальной акустике явно недостаточна, и вопросы борьбы с ними, в частности с эффектом частотола, являются важными и актуальными.

¹ 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.

Объект исследования – система компьютерной обработки сигналов в музыкальной акустике.

Предмет исследования – методы и алгоритмы компьютерной спектральной обработки сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье.

Цель диссертационного исследования – разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье, повышающих эффективность и результативность обработки сигналов в музыкальной акустике.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **основные задачи**:

1. Анализ задач компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике с целью определения математических моделей сигналов и их спектральных особенностей.

2. Анализ классических методов и алгоритмов спектрального анализа, используемых при обработке сигналов в музыкальной акустике, с целью выявления их достоинств и недостатков, а также определения возможного их совершенствования за счет использования методов и алгоритмов параметрического дискретного преобразования Фурье.

3. Разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье в соответствии с требованиями обработки сигналов в музыкальной акустике. Разработка быстрых алгоритмов компьютерной спектральной обработки на основе параметрического дискретного преобразования Фурье.

4. Проведение экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов на тестовых МАС и модельных сигналах с целью выработки предложений по эффективному применению методов и алгоритмов в задачах спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами «1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», «4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», «5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управления и обработки информации».

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории цифровой обработки сигналов, теории цифрового векторного и спектрального анализа, теории музыкальных форм, теории музыкальной акустики, теории матриц, теории вероятностей, теории математического моделирования, теории дискретного преобразования Фурье, теории дискретного параметрического преобразования Фурье. При расчетах и

моделировании использовались программная среда проектирования инженерных приложений MATLAB (*Matrix Laboratory*) и программа для профессиональной работы со звуком и звуковыми файлами – *Adobe Audition CS6*.

Научная новизна. Основными результатами диссертационной работы является разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки МАС на основе параметрического дискретного преобразования Фурье, которые обладают расширенными функциональными возможностями, сохраняя при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкования получаемых результатов:

1. **Метод локализации спектральных пиков**, позволяющий анализировать частоты между частотами стандартного ДПФ без алгоритмических ограничений на шаг анализа и с меньшими вычислительными затратами, чем известная операция дополнения нулями.

2. **Метод компьютерной спектральной обработки в заданном диапазоне частот**, позволяющий находить коэффициенты стандартного ДПФ в заданном диапазоне частот путем вычисления нескольких ДПФ-П меньшего размера, с возможностью быстрого нахождения коэффициентов в других диапазонах без повторных вычислений ДПФ-П.

3. **Метод получения прореженных коэффициентов ДПФ** путем обобщения на основе ДПФ-П известного метода *взвешенного наложения-сложения* с целью устранения главного недостатка этого метода – невозможности сдвига по частоте фильтров ДПФ проектируемого анализатора спектра.

4. **Метод расширения функциональных возможностей цифровой фильтрации на основе частотной выборки**, позволяющий анализировать частоты между частотами стандартного ДПФ, а также уменьшать погрешности измерений, возникающие из-за шума округления, за счет варьирования дополнительно введенного параметра.

5. **Быстрый алгоритм вычисления дискретного преобразования Гильберта музыкально-акустических сигналов**, позволяющий в два раза уменьшить объем используемой памяти и сократить вычислительные затраты за счет вычисления двух ДПФ в два раза меньшего размера.

6. **Быстрый алгоритм вычисления скользящего спектра Фурье музыкально-акустических сигналов** на основе ДПФ-П, позволяющий анализировать частоты между коэффициентами стандартного ДПФ и делать это за один такт дискретизации, что невозможно при использовании уже известных методов и алгоритмов на основе ДПФ-П, в том числе при использовании БПФ-П.

7. **Обобщение понятия линейной инверсии дискретного времени для базисов ДПФ-П**, которое позволяет осуществлять в компьютере фильтрацию музыкально-акустических сигналов методом блочной обработки на основе ДПФ-П с нулевым сдвигом фаз.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов и выводов подтверждены строгими математическими доказательствами свойств разработанных методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки МАС и существования быстрых процедур их реализации.

Полученные научные и практические результаты подтверждаются также их представительным обсуждением в научных изданиях и выступлениях на международных и всероссийских научных конференциях.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что предложенные методы и алгоритмы компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике на основе параметрического дискретного преобразования Фурье эффективно, с получением обладающих новизной результатов:

- использовались при выполнении НИР по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Принципы контроля оптических сред в биологии и экологии с использованием методов обработки результатов измерений на основе квантификационных моделей»;
- внедрены в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» на кафедрах: «Радиотехника», «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»:
 - для студентов направления 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»,
 - для студентов направления 12.03.01 «Приборостроение» специальности «Приборы и методы контроля качества и диагностики»,
 - для магистрантов по программам подготовки 12.04.01–1 «Приборы, системы и изделия биомедицинского назначения»;
- входят в ядро систем компьютерной обработки сигналов в музыкальной акустике, а также могут быть применены в системах компьютерной обработки виброакустических, речевых, биомедицинских, гидроакустических и многих других сигналов, имеющих структуру аналогичную сигналам в музыкальной акустике.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы компьютерной спектральной обработки МАС на основе ДПФ-П:

- метод локализации спектральных пиков;
- метод спектральной обработки в заданном диапазоне частот;
- метод получения прореженных коэффициентов ДПФ-П;
- метод расширения функциональных возможностей цифровой фильтрации на основе частотной выборки.

Разработанные методы существенно расширили функциональные возможности классических методов спектральной обработки МАС, дополнили их математический инструментарий, сохранив при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкование получаемых результатов.

2. Быстрые алгоритмы:

- реализации дискретного преобразования Гильберта (ДПГ);
 - скользящего ДПФ-П для спектрально-временной обработки сигналов.
- Разработанные алгоритмы быстрой обработки сигналов позволяют эффективно (с получением обладающих новизной результатов) осуществлять преобразования ДПГ и ДПФ-П.

3. Обобщение понятия линейной инверсии дискретного времени для базисов ДПФ-П. Понятие значимо при рассмотрении теоретических и практических вопросов компьютерной спектральной обработки, при изучении математических основ ДПФ и ДПФ-П, при изложении теоретических основ цифровой фильтрации.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на 11 международных и всероссийских научных конференциях: VIII Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке – 2012» с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова. Ижевск. 2012 г.; 15-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA –2013». Москва. 2013 г.; 7-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2014», Минск, Республика Беларусь, 2014 г.; 5-й международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Могилев, 2014 г.; 16-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA –2014». Москва. 2014 г.; XI международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке – 2015». Ижевск. 2016 г.; 17-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA – 2015». Москва. 2015г.; 8-й международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015». Минск. 2015 г.; 18-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA – 2016». Москва. 2016 г.; 19-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA – 2017». Москва. 2017 г.; 10-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2017», Минск, Республика Беларусь, 2017 г.

Публикация результатов диссертации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 35 печатных работ [1-35], из них 1 статья в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования *Scopus*, 4 статьи в журналах, составляющих ядро коллекции Российского индекса научного цитирования *Science Index* (РИНЦ), которое размещено на платформе *Web of Science* как *Russian Science Citation Index* (RSCI), 5 статей опубликованы в зарубежных научных изданиях; 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 6 научных работ выполнены соискателем лично [6, 22, 24, 27, 10, 35], остальные в соавторстве.

Личный вклад соискателя. Научные и прикладные результаты, изложенные в диссертационном исследовании, получены соискателем лично. В статьях по теме диссертации, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, в международную реферативную базу данных и систему цитирования *Web of Science* и выполненных в соавторстве [1-5, 7-9, 11], соискателю принадлежит: разработка алгоритма скользящего однобинового параметрического дискретного преобразования Фурье [1] и разработка алгоритма и компьютерной программы, реализующей метод

вычисления дискретного преобразования Фурье действительных сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье [3]; формализация построения обобщенного семейства трапецеидальных временных окон, а также разработка метода и алгоритма построения огибающих поверхностей их амплитудно-частотных характеристик [4]; разработка метода линейной инверсии дискретного времени в базисе параметрического дискретного преобразования Фурье [5]; разработка метода и алгоритма измерения частоты сигналов на базе параметрического дискретного преобразования Фурье [7]; алгоритм компьютерной блочной обработки с накоплением [8]; разработка метода повышения точности цифровой обработки сигналов [11]; алгоритм однобинового скользящего ДПФ в виде скользящего однобинового скользящего ДПФ [2]; получение выражения огибающих ангармонических действительных сигналов в аналитической форме [9]. Остальные результаты в статьях, выполненных в соавторстве и опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, принадлежат соавторам.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 141 источника и трех приложений, которые содержат результаты обработки тестовых музыкально-акустических сигналов, результаты исследования обобщенного семейства трапецеидальных окон и копии актов о внедрении результатов диссертационной работы. Общий объем работы 187 страниц, включая 107 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель, область, объект и предмет исследований, а также приведены используемые методы исследований. Рассмотрены вопросы достоверности, обоснованности и научной новизны полученных в диссертации результатов, а также их практической значимости. Приведены сведения об апробации результатов диссертационной работы и их публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ и в зарубежных научных изданиях.

В **первой главе** проанализированы задачи и существующие методы и алгоритмы компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике, дано определение музыкально-акустических сигналов (МАС), предложена обобщенная математическая модель МАС, проведена постановка научной задачи разработки новых и совершенствования существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки МАС на основе параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П). Музыкально-акустические сигналы (МАС) – это сигналы, являющиеся записью звуков, используемых в музыке, с целью их последующей обработки, и представляющие собой подкласс семейства звуковых сигналов, способных вызвать слуховые ощущения. При компьютерной обработке используются оцифрованные МАС, на которые согласно теореме Котельникова накладываются ограничения, связанные с частотой дискретизации. Однако сразу отметим, что вопросы спектральной обработки, рассматриваемые в диссертационном исследовании, с частотой

дискретизации не связаны и за счет ее увеличения не решаются, и, как следствие, разработанные методы и алгоритмы останутся актуальными и при дальнейшем развитии технических средств оцифровки МАС.

Базовыми задачами компьютерной спектральной обработки МАС являются задачи определения *физических характеристик МАС – частоты основного тона и структуры обертонов и характера их развертывания во времени*, – на которых основаны важнейшие *свойства слуховой системы*, позволяющие выделять и классифицировать звуки в окружающем пространстве, в том числе воспринимать интонационную составляющую музыки и отличать музыкальные звуки одной высоты и громкости, сыгранные на разных инструментах или спетые разными людьми – свойства *определять высоту тона и тембр*.

Высота тона зависит не только от частоты основного тона, а тембр не только от структуры обертонов и характера их развертывания во времени, но эти физические характеристики МАС являются ключевыми. У звуков, не имеющих периодической структуры, т.е. частоты, слуховая система не может определить высоту тона и воспринимает их как шумовые. В звуках, в которых искусственно убирают или подменяют на что-то так называемую фазу атаки – фазу, в которой происходит развертывание обертонов – человек не может определить тембр.

С математической точки зрения каждый сыгранный или спетый музыкальный звук – это *ангармонический сигнал* $X_i(t)$, представляющий собой сумму гармонических сигналов кратных частот (гармоник), в составе сложного МАС:

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

где

$Z(t)$ – сложный музыкально-акустический сигнал;

$X_i(t)$ – i ангармонический сигнал, являющийся моделью i звука инструмента или вокала;

$Y_j(t)$ – сигнал, являющийся моделью j шумового музыкального инструмента;

$\xi_k(t)$ – сигнал, являющийся моделью k помехи.

Задача определения частоты тона – это задача определения частоты основной гармоник ангармонического сигнала $X_i(t)$, *задача определения тембра* – это задача определения состава и характера проявления во времени гармоник более высоких частот ангармонического сигнала $X_i(t)$.

Для решения этих задач в настоящее время используются классические методы, основанные на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ), поскольку ДПФ адекватно структуре МАС и позволяет получить наглядную физическую интерпретацию получаемых результатов. При ДПФ сигнал раскладывается по базисной системе комплексных дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ), что в действительной области соответствует разложению по синусоидам кратных частот с разными амплитудами и фазами, т.е. представлению сигнала в *ангармоническом виде*. Стандартное ДПФ имеет фиксированный набор анализируемых частот, и в случае, когда частоты МАС находятся между

частотами ДПФ – а в реальных сигналах это, как правило, так, – спектральная картина оказывается размытой, что затрудняет поиск спектральных пиков, выявление имеющихся в сигнале частот, определение момента их появления и т.п.

В ходе проведения исследования была выдвинута рабочая гипотеза о возможности повышения эффективности и результативности спектральной обработки МАС за счет использования параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П), которое в аналитической форме имеет вид:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n}, \quad k = \overline{0, N-1}; 0 \leq \theta < 1; \quad (2)$$

где

$x(n)$ – дискретизированный во времени МАС (ДМАС), $n = \overline{0, N-1}$;

θ – параметр ДПФ-П, $0 \leq \theta < 1$;

$S_N(k, \theta)$ – коэффициенты ДПФ-П, совокупность которых определяет амплитудно-частотный и фазово-частотный спектры ДМАС;

$W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)n\right]$ – параметрические дискретные экспоненциальные функции (ДЭФ-П),

и за счет параметра θ позволяет анализировать частоты между частотами стандартного ДПФ. На рисунке 1 приведена система компьютерной обработки сигналов в музыкальной акустике на основе ДПФ-П.

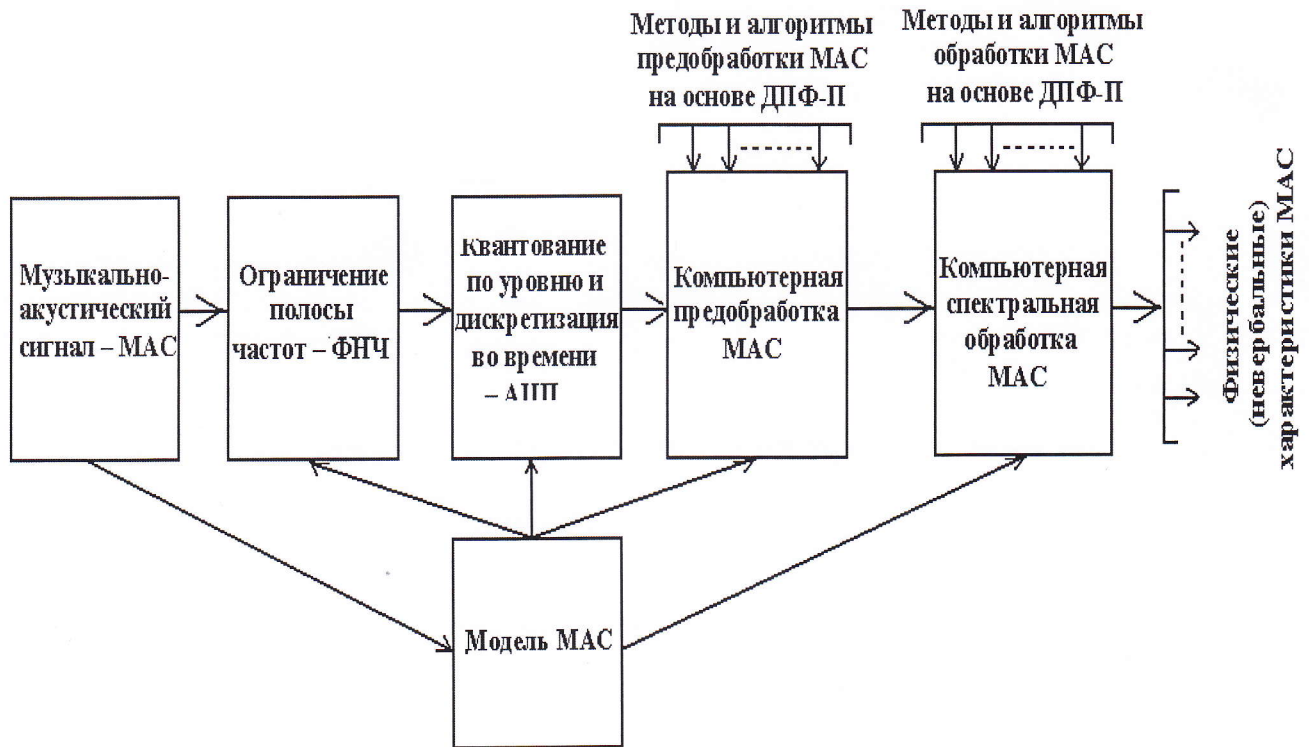


Рисунок 1 – Система компьютерной обработки сигналов в музыкальной акустике на основе ДПФ-П

Вторая глава посвящена разработке методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки МАС на основе ДПФ-П.

Как уже отмечалось, ДПФ-П позволяет анализировать частоты между частотами ДПФ. Поясним это строгим образом с использованием так называемого дискретно-временного преобразования Фурье (ДВПФ), которое ставит в соответствие некоторой последовательности $y(n)$, $n = -\infty, +\infty$ непрерывное преобразование Фурье:

$$S_y(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n) \cdot \exp(-j2\pi \cdot f \cdot n), -\infty \leq f \leq \infty. \quad (3)$$

ДПФ некоторой последовательности $x(n)$, заданной на интервале $n = \overline{0, (N-1)}$, позволяет находить ДВПФ в фиксированном множестве точек $2\pi \cdot k/N$, $k = \overline{0, (N-1)}$, в то время как ДПФ-П дает возможность находить значения ДВПФ последовательности $y(n)$ на множестве точек, регулируемом параметром θ : $\{2\pi \cdot (k + \theta)/N\}$, $k = \overline{0, (N-1)}$, $0 \leq \theta < 1$.

На рисунке 2 проиллюстрированы возможности ДПФ-П в сравнении с ДПФ на примере сигнала одной частоты, находящейся между частотами ДПФ.

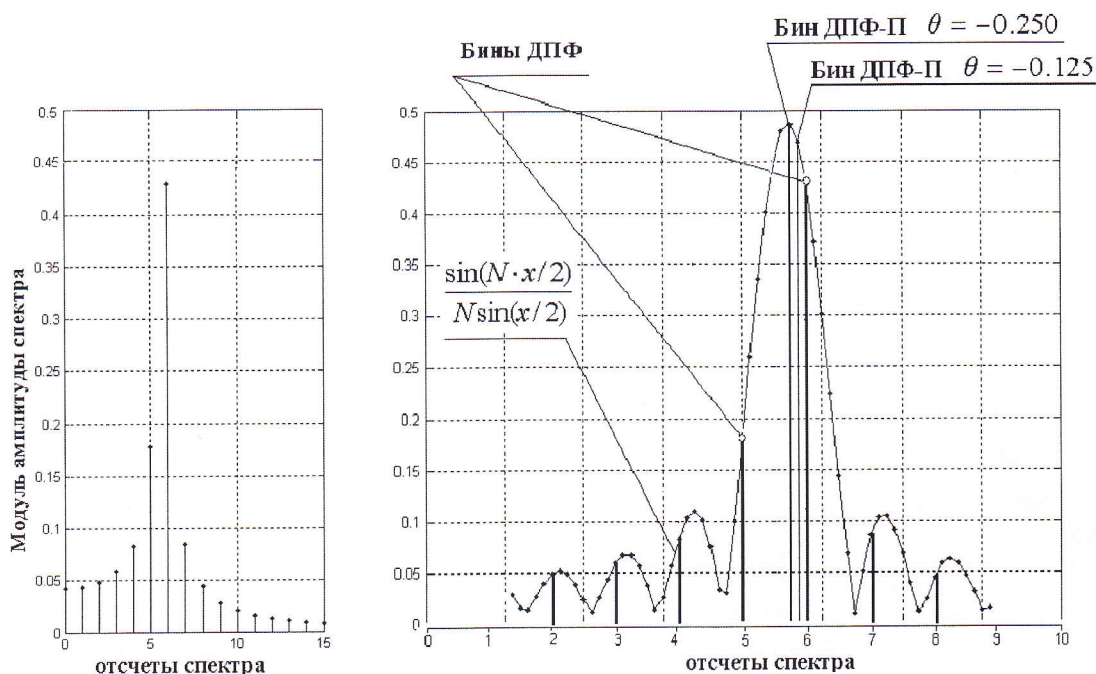


Рисунок 2 – Модули спектров ДПФ и ДПФ-П

Таким образом, под анализом частот между частотами ДПФ в строгом смысле подразумевается нахождение значений ДВПФ между точками стандартного ДПФ, что в действительной области соответствует нахождению коэффициентов на частотах, отличающихся от частот стандартного ДПФ на любую величину, регулируемую параметром θ .

Возможность анализа частот между частотами стандартного ДПФ является ключевой особенностью ДПФ-П, которая позволяет детализировать спектральную картину, создавая тем самым предпосылки для повышения эффективности и результативности спектральной обработки МАС.

Однако для практического применения важно не только само преобразование, но и наличие методов и алгоритмов на его основе, учитывающих особенности различных встречающихся на практике ситуаций.

В работе предложен *метод локализации спектральных пиков* для базовой задачи анализа спектра – задачи поиска спектральных пиков с целью выявления имеющихся в сигнале частот, – предполагающий выполнение нескольких ДПФ-П при разных значениях параметра θ , что позволяет уменьшить частотный интервал в спектре в $1/\theta$ раз и за счет этого определить частоту в $1/\theta$ раз точнее, чем при выполнении стандартного ДПФ такого же размера.

При этом в сравнении с известной *операцией дополнения нулями во временной области* (ОДНВ), позволяющей находить значения ДВПФ в 2^m точках, равномерно распределенных между точками исходного ДПФ, и требующей для этого выполнения ДПФ в 2^m раз большего размера, предложенный метод не имеет алгоритмических ограничений на выбор точек и требует меньше вычислительных затрат в $\gamma = 2^{m-1}(p + m)/p$ раз, т.к. предполагает выполнение ДПФ-П исходного размера.

Для задач оценки динамики конкретных частот, возникающих, например, при определении момента появления той или другой частоты в сигнале, а также характера их становления, в работе предложены *метод расширения функциональных возможностей цифровой фильтрации на основе частотной выборки*, позволяющий анализировать произвольные частоты сигнала за счет согласованного обобщения структур фильтра на основе частотной выборки и стандартного нерекурсивного гребенчатого фильтра, и *быстрый алгоритм скользящего ДПФ-П для спектрально-временной обработки сигналов*, позволяющий анализировать нужные частоты за один такт дискретизации.

Разностное уравнение обобщенного нерекурсивного гребенчатого фильтра имеет вид:

$$y_1(n) = x(n) - e^{-j2\pi\theta} x(n - N), \text{ где } 0 \leq \theta < 1; \quad (4)$$

частотная характеристика и импульсная характеристика которого соответственно равны:

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j(N\omega + 2\pi\theta - \pi)/2} \{2j \sin[(\omega N + 2\pi\theta)/2]\}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} h(n) &= 1, \text{ при } n = 0; h(n) = 0, \text{ при } n = \overline{1, N-1}; \\ h(n) &= -\exp(-j2\pi\theta), \text{ при } h(n) = N. \end{aligned} \quad (6)$$

Структура фильтра однобинового скользящего ДПФ-П на $(m + \theta)$ -й частоте, позволяющего рекуррентно вычислять значения спектра $S_{N,(m+\theta)}(p)$ скользящим окном длиной в N отсчетов на p -ом шаге при сдвиге на один отсчет влево, приведена на рисунке 3.

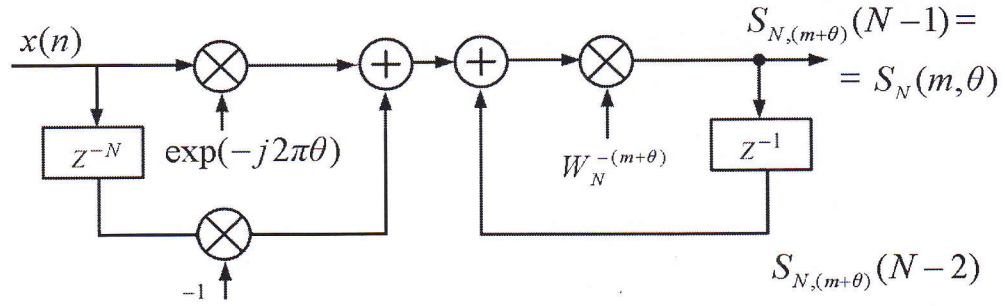


Рисунок 3 – Структура однобинового скользящего ДПФ-П на $(m + \theta)$ -й частоте

Для предварительного анализа спектра в случае наличия близких частот в работе предложен *метод и алгоритм быстрого получения прореженных коэффициентов ДПФ-П*, названный автором «БПФ-П с предварительным суммированием», который является обобщением известного метода «БПФ с предварительным суммированием» и устраняет главный его недостаток – фиксированность центральных частот бинов ДПФ.

Метод основан на представлении матрицы $N \cdot r$ -точечного ДПФ F_{Nr} в блочной форме – в виде взвешенных соответствующими коэффициентами r^2 квадратных матриц ДПФ-П, при значениях параметра $\theta = 0, 1/r, 2/r, \dots, (r-1)$, размерность каждой из которых N , а номера элементов строк являются классами вычетов по модулю r :

$$F_{Nr}^{Bl} = \begin{matrix} & & 0 & & 1 & & 2 & & \dots & & (r-1) \\ & & \frac{2\pi \cdot 0 \cdot 0}{r} \cdot F_N & & \frac{2\pi \cdot 0 \cdot 1}{r} \cdot F_N & & \frac{2\pi \cdot 0 \cdot 2}{r} \cdot F_N & & \dots & & \frac{2\pi \cdot 0 \cdot (r-1)}{r} \cdot F_N \\ 0 & & \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 0}{r} \cdot F_{N/r} & & \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 1}{r} \cdot F_{N/r} & & \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 2}{r} \cdot F_{N/r} & & \dots & & \frac{2\pi \cdot 1 \cdot (r-1)}{r} \cdot F_{N/r} \\ 1 & & \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 0}{r} \cdot F_{N/2r} & & \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 1}{r} \cdot F_{N/2r} & & \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 2}{r} \cdot F_{N/2r} & & \dots & & \frac{2\pi \cdot 2 \cdot (r-1)}{r} \cdot F_{N/2r} \\ 2 & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots \\ \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots \\ (r-1) & & \frac{2\pi \cdot (r-1) \cdot 0}{r} \cdot F_{N/r} & & \frac{2\pi \cdot (r-1) \cdot 1}{r} \cdot F_{N/r} & & \frac{2\pi \cdot (r-1) \cdot 2}{r} \cdot F_{N/r} & & \dots & & \frac{2\pi \cdot (r-1) \cdot (r-1)}{r} \cdot F_{N/r} \end{matrix} \quad (7)$$

где

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & & 0 & & 1 & & \dots & & (N-1) & & n \\ & & 1 & & W_N^\theta & & \dots & & W_N^{\theta(N-1)} & & \\ 0 & & 1 & & W_N^{(1+\theta)} & & \dots & & W_N^{(1+\theta)(N-1)} & & \\ 1 & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \\ \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \\ (N-1) & & 1 & & W_N^{(N-1+\theta)} & & \dots & & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} & & \\ k & & \dots & & \dots & & \dots & & \dots & & \end{matrix}, \quad \begin{matrix} W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k+\theta)n\right], \\ \theta = 0, 1/r, 2/r, \dots, (r-1)/r \end{matrix} \quad (8)$$

Анализ блочной матрицы F_{Nr}^{Bl} (7) позволяет вскрыть сущность метода «БПФ с предварительным суммированием» и обобщить его на случай анализа частот между частотами стандартного ДПФ.

При этом следует отметить, что хотя ДПФ-П является обобщением ДПФ и совпадает с ним при значении параметра θ равном нулю, свойства ДЭФ, на которых основано ДПФ, существенно отличаются от свойств ДЭФ-П, на которых

основано ДПФ-П. Поэтому все важные для теории и практики свойства ДПФ, обеспечивающие возможность наглядной физической интерпретации и толкования полученных результатов, и методы и алгоритмы на основе ДПФ, позволяющие эффективно применять ДПФ в различных ситуациях, не могут быть просто распространены на случай ДПФ-П и требуют отдельного рассмотрения и проработки.

Подтверждением этого служит, например, вопрос об *инверсии дискретного времени*, важный при рассмотрении теоретических и практических вопросов компьютерной спектральной обработки, поскольку выявляет одно из глубоких различий между дискретными и непрерывными сигналами.

В работе показано, что соотношения, описывающие циклическую и линейную инверсию в случае ДПФ, для ДПФ-П при $\theta \neq 0$ использовать нельзя, поскольку сдвиг последовательности при ДПФ-П представляет собой не просто перестановку отсчетов, как в случае ДПФ, а перестановку отсчетов с фазовым поворотом на угол $\varphi = -j2\pi\theta$ при каждом сдвиге последовательности $x(n)$ (рисунок 4)

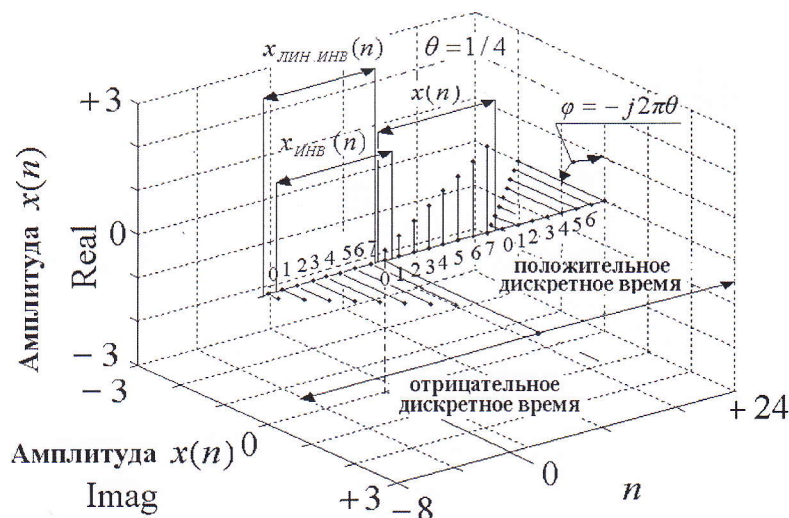


Рисунок 4 – Линейная форма представления временной последовательности в случае применения ДПФ-П

Кроме того, ДПФ-П оказывается применимо не только как спектральное преобразование, но и как инструмент изучения математических основ и оптимизации других спектральных преобразований.

С использованием ДПФ-П как инструмента изучения и оптимизации во второй главе предложен *метод спектральной обработки в заданном диапазоне частот*, позволяющий находить коэффициенты стандартного ДПФ в заданном диапазоне частот путем вычисления нескольких ДПФ-П меньшего размера, и *быстрый алгоритм реализации дискретного преобразования Гильберта (ДПГ)*, позволяющий уменьшить объем используемой памяти и сократить вычислительные затраты за счет вычисления двух ДПФ-П в два раза меньшего размера.

Предложенный метод спектральной обработки в заданном диапазоне частот дает процентное уменьшение числа вычислений при поиске группы из N

коэффициентов исходного $N \cdot r$ -точечного ДПФ на $Q = 100 \cdot [1 - \frac{\log_2(N)}{\log_2(N \cdot r)}]$ %.

Предложенный быстрый алгоритм реализации ДПГ дает возможность распараллеливания вычислений и уменьшения числа операций при вычислении ДПГ в частотной области в $[\log_2(N)/\log_2(M)]$ раз, $M = N \cdot r$.

В третьей главе рассмотрено приложение ДПФ-П и разработанных на его основе методов и алгоритмов к задаче определения основного тона МАС.

Проведенный анализ показал, что множество методов и алгоритмов определения частоты основного тона, в основе которых лежит спектральная обработка, можно разбить на семь групп, каждая из которых основана на некотором базовом подходе: 1) решению задачи выявления скрытых периодичностей; 2) оценке разницы частот между выявленными обертонами; 3) вычислении наибольшего общего делителя частот выявленных обертонов; 4) автокорреляционных методах обработки исходного сигнала; 5) кепстральном анализе; 6) анализе огибающей биений двух соседних обертонов; 7) методе произведения гармоник спектра.

Для методов и алгоритмов групп № 1, 2, 3 и 7 использование ДПФ-П и разработанных на его основе методов и алгоритмов позволяет анализировать теоретические частоты различных музыкальных шкал, а также подстраиваться за счет варьирования параметра θ под реально звучащие частоты, которые могут отличаться от теоретических значений как в силу настройки инструментов, так и в силу особенностей исполнения.

В настоящее время наиболее распространенной является равномерно-темперированная шкала, в которой отношение любых двух соседних частот постоянно и равно $\sqrt[12]{2} \approx 1,0595$, однако при настройке инструментов музыкантами на слух могут быть существенные отклонения, связанные с изначальной «компромиссностью» равномерно-темперированной шкалы, в которой «чисто» звучат только октавы – интервалы с отношением частот 2:1.

В литературе² приводится кривая настройки конкретного фортепиано, показывающая, насколько существенными могут быть отклонения (рисунок 5).

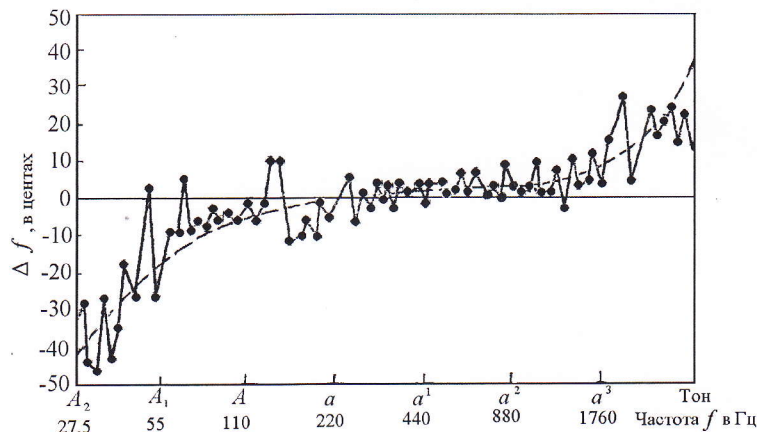


Рисунок 5 – Кривая настройки фортепиано.

² Кузнецов, Л.А. Акустика музыкальных инструментов: Справочник. / Л.А. Кузнецов. – М.: Легпромбытиздат, 1989.– 368 с.

Для методов *групп № 5 и 6* использование двух ДПФ-П при $\theta = 0$ и $\theta = 1/2$ вместо одного ДПФ того же размера позволяет уменьшить в два раза частотный интервал и тем самым устранить существующее наложение в корреляционной области при оценке энергетического спектра с помощью ДПФ.

В случае, когда оценка энергетического спектра проводится, минуя этап построения автокорреляционной функции:

$$G_{x,N}(k,0) = N |S_N(k,0)|^2 = G_N(k) = N |S_N(k)|^2 = N \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \right|^2, \quad (9)$$

$$k = \overline{0, N-1}; \theta = 0.$$

получается оценка не апериодической корреляционной функции, как это происходит при прямом методе, а некой новой функции, получившей название *циклической корреляционной функции*:

$$K_{x,N}^{Cir} = \left(1 - \frac{r}{N}\right) K_{x,N}(r) + \frac{r}{N} K_{x,N}(N-r); r = \overline{0, N-1}. \quad (10)$$

являющейся результатом наложения двух корреляционных функций $\left(1 - \frac{r}{N}\right) K_{x,N}(r)$ и $\frac{r}{N} K_{x,N}(N-r)$, которое, как показано в работе, может быть устранено за счет уменьшения частотного интервала при помощи ДПФ-П.

Для методов *группы № 7* использование ДПФ-П совместно с методом огибающих позволяет надежно определять их основной тон, понизив при этом максимальную погрешность определения основной частоты в $1/\theta$ раз (рисунок 6).

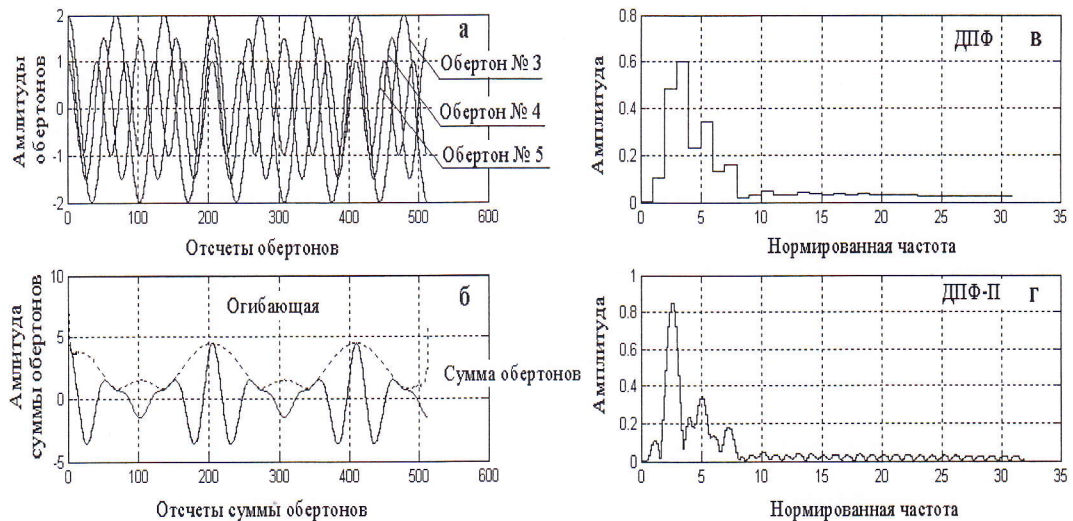


Рисунок 6 – Огибающая суммы обертонов при частоте основного тона равной 2,5 и ее спектры.

В **четвертой** главе рассмотрено приложение разработанных методов и алгоритмов к задаче определения тембра МАС.

В результате проведенного анализа результатов отечественных, зарубежных и собственных исследований, автор выделил следующие научные направления обработки МАС: 1) векторный анализ МАС в разных фазах с целью выявления

фазовых и амплитудных соотношений обертонов во времени; 2) спектральный анализ МАС в начальной фазе с целью выявления порядка проявления обертонов; 3) скользящий спектральный анализ МАС во всех фазах с целью выявления изменений формы огибающей спектра; 4) анализ изменений формы временной огибающей МАС во времени; 5) анализ изменений формы временной огибающей обертонов с целью выявления модуляций.

Использование в этих направлениях ДПФ-П вместо ДПФ, а также разработанных на их основе методов и алгоритмов, в первую очередь скользящего ДПФ-П (СДПФ-П) вместо скользящего ДПФ (СДПФ), позволяет получить более детальную спектральную картину, как в статике, так и в динамике, поскольку спектры, полученные методами, основанными на ДПФ, являются прореженными вариантами спектров, получаемых методами, основанными на ДПФ-П (рисунок 7), что следует непосредственно из свойств ДПФ, СДПФ, ДПФ-П и СДПФ-П.

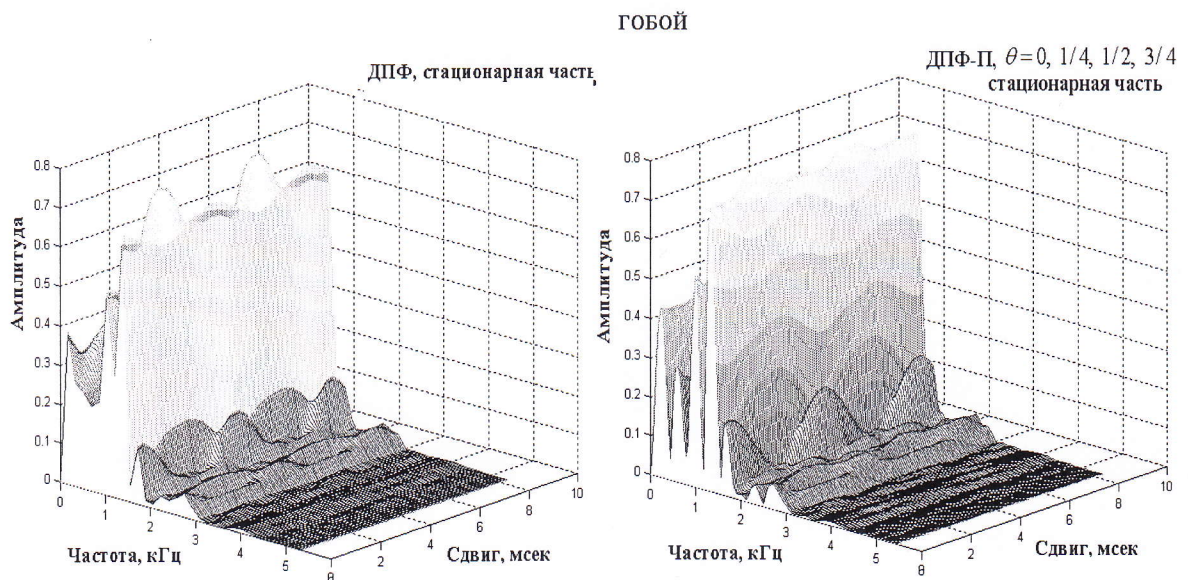


Рисунок 7 – Скользящие спектры ДПФ и ДПФ-П стационарной части МАС ноты «до»

Получение более детальной картины важно на всех стадиях становления МАС и отдельно для каждого обертона, особенно на стадии атаки, т.к. обертоны нарастают неодинаково, и анализ их нарастания имеет принципиальное значение при определении тембра. Известные психоакустические эксперименты показывают, что если убрать стадию атаки или заменить ее на что-то, например, на стадию спада, проигранную в обратном порядке, то тембр звука определить невозможно.

При этом следует отметить, что с увеличением частоты дискретизации МАС спектральная картина, получаемая стандартным ДПФ, более детальной не становится, т.к. 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.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

Основным результатом диссертационной работы является разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки МАС на основе параметрического дискретного преобразования Фурье, которые обладают расширенными функциональными возможностями, сохраняя при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкования получаемых результатов.

В диссертационной работе решены следующие основные задачи:

1. Проведен анализ задач компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике, в результате которого выявлены две ключевых физических характеристики сигналов в музыкальной акустике – частота тона и структура обертонов и характер их развертывания во времени; предложена обобщенная модель музыкально-акустических сигналов на основе ангармонических сигналов; выявлены спектральные и спектрально-временные особенности сигналов в музыкальной акустике, связанные с фиксированностью используемых в музыке частот и психоакустическими свойствами восприятия звуков слуховой системой человека.

2. Проведен анализ классических методов и алгоритмов спектрального анализа, показавший, с одной стороны, широкое использование дискретного преобразования Фурье в задачах компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике, а с другой – заметное влияние известных нежелательных эффектов ДПФ на результаты обработки сигналов в музыкальной акустике, подтверждающее возможность и целесообразность совершенствования методов за счет использования параметрического дискретного преобразования Фурье.

3. Разработаны новые и усовершенствованы существующие методы и алгоритмы компьютерной спектральной обработки сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье в соответствии с требованиями обработки сигналов в музыкальной акустике:

- для базовой задачи анализа спектра – поиска спектральных пиков с целью выявления имеющихся в сигнале частот, – *метод локализации спектральных пиков*, позволяющий анализировать частоты между частотами стандартного ДПФ без алгоритмических ограничений на шаг анализа и с меньшими вычислительными затратами в $\gamma = 2^{m-1}(p + m) / p$ раз, чем известная операция дополнения нулями;
- для задач оценки динамики конкретных частот, возникающих, например, при определении момента появления той или другой частоты в сигнале, а также характера их становления, *метод расширения функциональных возможностей цифровой фильтрации на основе частотной выборки и быстрый алгоритм скользящего ДПФ-II для спектрально-временной обработки сигналов*, позволяющие эффективно анализировать частоты между частотами стандартного ДПФ;
- *метод и алгоритм быстрого получения прореженных коэффициентов ДПФ-II* для предварительного анализа спектра в случае наличия близких частот, *метод*

компьютерной спектральной обработки в заданном диапазоне частот для направленного анализа певческих голосов и диапазонов отдельных инструментов и произведений, и *быстрый алгоритм вычисления дискретного преобразования Гильберта* для обработки сигналов в частотной области, например, для оценки мгновенного значения огибающей, с возможностью распараллеливания и уменьшения числа операций в $\lceil \log_2(N)/\log_2(M) \rceil$ раз;

- обобщено понятие *линейной инверсии дискретного времени* для базисов ДПФ-П, которое позволяет осуществлять в компьютере фильтрацию музыкально-акустических сигналов методом блочной обработки на основе ДПФ-П с нулевым сдвигом фаз.

4. Проведены экспериментальные исследования разработанных методов и алгоритмов на тестовых МАС и модельных сигналах, показавшие, что ДПФ-П и разработанные на его основе методы и алгоритмы эффективны в области музыкальной акустики, поскольку позволяют получать обладающие новизной результаты, в основе которых лежит возможность увидеть тонкую структуру спектрально-временной картины музыкально-акустических сигналов, которая до сих пор исследователям была недоступна. На основе этого выработаны предложения по применению методов и алгоритмов в задачах определения основного тона и тембра, учитывающих специфику и спектральные особенности сигналов в музыкальной акустике, в частности, теоретические значения частот музыкальных шкал и возможные отклонения от них, индивидуальный рисунок обертонов у одной и той же ноты, сыгранной на разных музыкальных инструментах, а также неодинаковый характер нарастания разных обертонов в стадии становления звука.

Предложенные методы и алгоритмы компьютерной параметрической спектральной обработки по степени общности и применимости к задачам музыкальной акустики составляют ядро систем компьютерной обработки музыкально-акустических сигналов и в то же время могут быть использованы в системах цифровой обработки других сигналов, имеющих структуру аналогичную МАС – виброакустических, речевых, биомедицинских, гидроакустических и многих других.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ОСНОВНЫХ РАБОТАХ АВТОРА

В журналах, входящих в Перечень ВАК РФ

1. Пономарева, Н.В. Скользящее параметрическое ДПФ в задачах обнаружения тональных компонент / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 2-7.
2. Пономарева, Н.В. Модификация фильтра на основе частотной выборки для решения задач цифровой обработки случайных процессов со скрытыми периодичностями / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2(20). – С. 122 - 129.

3. Пономарева, Н.В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье действительных последовательностей / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 10-15.
4. Пономарева, Н.В. Применение временных окон в векторном анализе дискретных сигналов / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева, В.Ю. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2 (29). – С. 19-21.
5. Пономарева, Н.В. Инверсия дискретного времени и параметрическое дискретное преобразование Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4 (31). – С. 25-31.
6. Пономарева, Н.В. Предобработка дискретных сигналов при спектральном анализе в системе компьютерной математики – MATLAB / Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4 (31). – С. 32-34.
7. Пономарева, Н.В. Локализация спектральных пиков методом параметрического дискретного преобразования Фурье / Н.В. Пономарева, В.Ю. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2 (29). – С. 15-18.
8. Пономарева, Н.В. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3-11.
9. Пономарева, Н. В. Определение огибающей ангармонического дискретного сигнала на основе преобразования Гильберта в частотной области / Н.В. Пономарева, О.В. Пономарева, В.В Хворенков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16. – № 1. – С. 33-40.
10. 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.

В журналах, входящих в *Web of Science*:

11. Пономарева, Н.В. Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2 (7). – С. 114-119.

В других научных изданиях

12. Пономарева, Н.В. Формализованное описание погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов процессорными средствами / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Современные информационные и электронные технологии. – 2013. – Т. 2. – № 14. – С. 90-93.

13. Пономарева, Н.В. Иерархическое морфологическо-информационное описание систем функционального диагностирования объектов / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Современные информационные и электронные технологии. – 2013. – Т. 2. – № 14. – С. 121-124.
14. Пономарева, Н.В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Гильберта в частотной области / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Современные информационные и электронные технологии. – 2014. – Т. 1. – № 15. – С. 183-184.
15. Пономарева, Н.В. Применение однобинового скользящего параметрического ДПФ в задачах обнаружения и измерения параметров тональных компонент / О.В.Пономарева, Н.В.Пономарева // Приборостроение в XXI веке – 12. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова (Ижевск, 14-16 ноября 2012 года).- Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, 2012.-С. 264-268.
16. Пономарева, Н.В. Параметрическое дискретное преобразование Фурье в задачах цифровой обработки сигналов / О.В.Пономарева, Н.В.Пономарева // Приборостроение в XXI веке – 12. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова (Ижевск, 14-16 ноября 2012 года).- Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, 2012.-С. 371-374.
17. Пономарева, Н.В. Оценивание энергетических спектров случайных процессов методом параметрического ДПФ / О.В.Пономарева, Н.В.Пономарева // Приборостроение в XXI веке – 12. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова (Ижевск, 14-16 ноября 2012 года).- Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, 2012.-С. 374-378.
18. Пономарева, Н.В., Аксиомы измерения спектра дискретных стационарных случайных сигналов на конечных интервалах / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева, А.В. Пономарев // DSPA-2013. Доклады 15-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2013.- Т.1.-С.70-74.
19. Пономарева, Н.В. Метод спектрального разложения дискретных стационарных случайных сигналов на конечных интервалах / О.В.Пономарева, Н.В.Пономарева, А.В. Пономарев // DSPA-2013. Доклады 15-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2013.-Т.1.-С.100-104.
20. Пономарева, Н.В. Обобщение структурной схемы фильтров на основе частотной выборки / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева, А.В. Пономарев //

- DSPA-2013. Доклады 15-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2013.- Т.1.-С.117-121.
21. Пономарева, Н.В. Современные методы дискретных измерений частотных спектров детерминированных сигналов на конечных интервалах в дискретном базисе Фурье / О.В. Пономарева, В.А. Алексеев, Н.В. Пономарева // Приборостроение-2014. Материалы 7-й Международной научно-технической конференции (19-21 ноября 2014 года) Минск, Республика Беларусь. – 2014.- С.124-125.
 22. Пономарева, Н.В. Метод спектрального анализа виброакустических сигналов в заданном диапазоне частот / Н.В. Пономарева // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 5-й международной научно-технической конференции, Могилев, 24–25 сентября 2014 г. Белорусско-Российский университет. – Могилев, 2014.-С.255-257.
 23. Пономарева, Н.В. Метод спектрального выявления скрытых периодичностей на основе дискретного преобразования Фурье и цифровой блочной обработки с накоплением / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // DSPA-2014. Доклады 16-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва 2014.- Т.1.-С.172-176.
 24. Пономарева, Н.В. Метод спектрального анализа узкополосных сигналов с высоким разрешением по частоте / Н.В. Пономарева // DSPA-2014. Доклады 16-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2014.-Т.1.-С.163-167.
 25. Пономарева, Н.В. Метод цифровой блочной обработки с накоплением и его приложения в спектральном анализе сигналов со скрытыми периодичностями / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // DSPA-2014. Доклады 16-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2014.-Т.1.-С.168-172.
 26. Пономарева, Н.В. Модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // DSPA-2015. Доклады 17-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2015.-Т.1.-С.196-200.
 27. Пономарева, Н.В. Быстрое параметрическое преобразование Фурье для спектрального анализа сигналов с высоким разрешением в заданном частотном диапазоне / Н.В. Пономарева // DSPA-2015. Доклады 17-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2015.-Т.1.-С.191-196.
 28. Пономарева, Н.В. О косвенных измерениях спектрально-временных характеристик дискретных сигналов на конечных интервалах / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // DSPA-2015. Доклады 17-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2015.-Т.2.-С.589-593.
 29. Пономарева, Н.В. Классификация дискретных полигармонических сигналов и измерение частот их гармоник на конечных интервалах / О. В. Пономарева, Н. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Приборостроение-2015: материалы 8-й

- международной научно-технической конференции, Минск, 25-27 ноября 2015 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2015. – Т.1. - С. 18-20.
30. Пономарева, Н.В., Дискретные трапецеидальные оконные функции для гармонического анализа сложных сигналов / О.В. Пономарева, Н.В.Пономарева, В.Ю. Пономарева // DSPA-2016. Доклады 18-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2016.-Т.1.-С.275-280.
 31. Пономарева, Н.В. Метод измерения частоты сигналов на базе параметрического дискретного преобразования Фурье/ Н.В. Пономарева, В.Ю. Пономарева // DSPA-2016. Доклады 18-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2016.Т.1-С.409-413.
 32. Пономарева, Н.В. Приборы дискретных косвенных измерений параметров электрических сигналов / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VIII Всероссийской XI Международной научно-технической конференции. 2016. -С. 314-320.
 33. Пономарева, Н.В. Метод быстрого получения прореженных коэффициентов дискретного преобразования Фурье на основе параметрических дискретных экспоненциальных базисов / Н.В. Пономарева, В.В. Пономарев // DSPA-2017. Доклады 19-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2017.-Т.1.-С.166-170.
 34. Пономарева, Н.В. Обобщенные системы базисных функций на основе параметрических дискретных базисов Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // DSPA-2017. Доклады 19-й Международной конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Москва, 2017.-Т.1.-С.85-89.
 35. Пономарева, Н. В. Компьютерная спектральная обработка музыкально-акустических сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье / Н. В. Пономарева // 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.