

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности «6D070300 – Информационные системы»

Урынбасаровой Алтын Жумаситовны

«Построение гибридных преобразований для решения задач обработки сигналов в системах»

Тема диссертационного исследования — построение гибридных преобразований на основе классических преобразований для решения задач обработки сигналов в системах. В основе всех преобразований лежит преобразование Фурье (FT). FT встречается во всех областях инженерии, поэтому важно развивать и понимать его различные аспекты. FT используется для описания стационарных сигналов. Естественные сигналы (аудио, видео, биомедицинские, линейно-частотно-модулированные (LFM) и т. д.) не являются стационарными, и для описания таких сигналов недостаточно FT. Линейное каноническое преобразование (LCT) и его общий вид, смещенное линейное каноническое преобразование (OLCT) предложены для изучения нестационарных сигналов. OLCT имеет пять свободных параметров, а LCT — три свободных параметра. Это делает их более гибкими по сравнению с дробным преобразованием Фурье (FrFT) с одним свободным параметром и FT без свободного параметра. LCT имеет различное применение в различных отраслях науки и инженерии. Например, в оптике с помощью LCT можно моделировать широкий класс оптических систем. Кроме того, LCT полезен во многих приложениях обработки сигналов. Например, в частотно-временном анализе, проектировании фильтров, синтезе сигналов, фазовой реконструкции, шифровании, радиолокационных, гидролокационных системах и т. д. Фактически свойства и приложения OLCT аналогичны LCT, но они более широки, чем LCT. Например, LCT может моделировать оптические системы, но не может анализировать с помощью призм или движущихся линз, тогда как OLCT может как моделировать оптические системы, так и анализировать с помощью призм или движущихся линз.

Доказано, что распределение Вигнера-Вилля (WVD) представляет собой особый тип квазивероятностного распределения. WVD играет важную роль в частотно-временном анализе и обработке сигналов. Среди многих известных частотно-временных анализов WVD является важным и ценным методом, который может обеспечить высокую точность обнаружения и оценки параметров LFM сигнала. Сигнал LFM используется в системах связи, радиолокаторах и гидролокаторах. Следовательно, обнаружение и оценка LFM сигнала, несомненно, является одной из наиболее важных тем в инженерии. Преобразования WVD и LCT/OLCT используются при обработке сигналов LFM, но имеют следующие недостатки:

- WVD не может полностью использовать фазовые возможности сигнала LFM;
- LCT/OLCT не могут собирать энергию сигнала, как WVD.

Эти недостатки приводят к плохой производительности при низком отношении сигнал-шум при обнаружении и оценке сигнала. Решение этой проблемы составляет обширную часть исследования диссертационной работы.

Известно, что сигналы, встречающиеся в жизни, нестационарны или изменяются во времени, то есть нестабильны. Помимо WVD, для исследования

таких сигналов были определены LCT, OLCT, кратковременное преобразование Фурье (STFT), вейвлет-преобразование (WT). По сравнению с STFT, WT лучше описывает сигнал. Однако WT не лишен недостатков. В области высоких частот частотное разрешение WT оставляет желать лучшего. Устранение подобных недостатков составляет вторую часть диссертационного исследования.

Целью диссертационного исследования является построение новых гибридных преобразований называемых как распределение Вигнера-Вилля в области смещенного линейного канонического преобразования (WOL) и квадратно-фазового вейвлет-пакетного преобразования (QP-WPT) для решения задач обработки сигналов в системах и подробное доказательство некоторых из их основных свойств. И показать, что WOL можно использовать для обнаружения сигналов и что любой сигнал можно реконструировать с помощью WOL и QP-WPT. Общая цель диссертации — объединить классические инструменты обработки сигналов, используемые в системах, не теряя преимущества обоих преобразований, разработать новые гибридные преобразования, которые дают лучшие результаты в приложениях и менее сложны в вычислительном отношении. Более того расширить кватернионное преобразование Фурье, связав кватернионную теорию с теорией вероятности, чтобы открыть пути для передовых приложений в обработке сигналов, коммуникациях, информационных системах и прикладной математике.

Задачи исследования. Существует некоторая сложность в теории и применении WVD-OLCT. Например: формула WVD-OLCT сравнительно объемная, поэтому ее неудобно и долго вводить в компьютер. Чтобы преодолеть эти сложности, мы вводим новую формулировку WVD, основанную на OLCT – WOL. WOL более простой инструмент частотно-временного анализа, чем WVD-OLCT. Одной из задач исследования является описание ряда основных свойств, включая маргинальные свойства, формулу Мюллера, принцип неопределенности и др. Кроме того, предлагаем новый метод расчета мгновенной частоты. Затем, покажем применение предложенного преобразования для реконструкции и обнаружения сигнала. В целом, одной из основных задач данной исследовательской работы является определение гибридного инструмента для обработки сигналов, обладающего низкими вычислительными затратами и простой формулировкой, но не уступающего классическому WVD, WVD-OLCT по свойствам и приложений. Еще одной задачей данной работы является разностороннее изучение теории QP-WPT, который построен на основе WPT и QPFT. Установление связи QP-WPT с другими преобразованиями и доказательство основных свойств и теорем. Кроме того, как применение QP-WPT мы покажем реконструкцию сигнала с помощью QP-WPT.

Методы исследования. В этой диссертации, на основе теории классических преобразований, гибридные преобразования были построены с использованием теоретических и математических методов. Затем методом анализа были описаны частные случаи гибридных преобразований, доказаны различные свойства, показано несколько применений, а также приведены связи с другими преобразованиями.

Основные положения (доказанные научные гипотезы и другие выводы, являющиеся новыми знаниями) выносимые на защиту. Ниже представлены новые результаты этой работы:

- Построение нового типа WVD-OLCT под названием WOL;
- Построение нового инструмента обработки сигналов под названием QP-WPT;

- Введение кватернионного дробного преобразования Фурье (1DQFRFT);
- Доказать основные и важные свойства WOL и QP-WPT;
- Установление связи между FT и WFT с QP-WPT;
- Показать несколько типов неравенств неопределенности, связанных с QP-WPT;
- Показать использование WOL;
- Реконструкция сигнала с использованием QP-WPT
- Изучение уникальных приложений 1DQFRFT в теории вероятности, в частности для моделирования и анализа стохастических процессов.

Разработка гибридных преобразований является инновационной и нуждается в глубоком исследовании. Изучение методов обработки сигналов помогает лучше понять применение преобразований и перенести полученные знания из одного предмета в другой.

Описание основных результатов исследования. В этой диссертации исследуются гибридные преобразования и в основном рассматривается WOL, который полностью сочетает в себе преимущества OLCT и свойства WVD. Это более простой инструмент обработки сигналов, чем WVD-OLCT и WVD. В этой работе мы обсудили некоторые основные свойства WOL, включая предельные свойства, свойства смещения, формулу Мoyalа и принцип неопределенности. Кроме того, был описан новый метод расчета мгновенной частоты. Также подробно описаны некоторые варианты применения WOL.

Основываясь на теории QPFT и классической WPT, в этой диссертации мы предложили новый инструмент обработки сигналов под названием QP-WPT, который исправляет ограничения (недостатки) WPT и QPFT. В целом он не только сочетает в себе преимущества QPFT и WPT, но также сохраняет свойства своего традиционного аналога и имеет лучшие математические свойства. Помимо изучения некоторых важных фундаментальных свойств, включая формулу Мoyalа и свойства репродуктивного ядра, мы сформулировали несколько классов неравенств неопределенности. В конце, мы показали восстановление сигнала с помощью QP-WPT.

Обоснование новизны и важности полученных результатов. Определения, свойства, приложения, выводы и рекомендации, полученные в диссертации, развивают и дополняют ряд аспектов теории обработки сигналов. И это способствует формированию идей по реализации различных новых приложений. Основные результаты и выводы, содержащиеся в диссертационной работе, могут быть использованы в различных приложениях обработки сигналов, обнаружения изображений, а также при решении ряда задач математики, оптики и инженерии.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам. Некоторые исследования описанные в диссертации проводились в рамках проекта «Построение и исследование кватернионных преобразований Фурье и их применение в создании информационных систем для задач геофизики и геохимии» победивший в конкурсе на грантовое финансирование фундаментальных и прикладных научных исследований для научных и научно-технических проектов. на 2022-2024 годы, направленные на реализацию программных документов Республики Казахстан. Название конкурса: Конкурс Министерства образования и науки Республики Казахстан на грантовое финансирование научных и (или) научно-технических проектов на 2022-2024 годы;

Идентификатор проекта № AP14871252. Проект входит в приоритетное направление развития науки Республики Казахстан, а именно «Информационные, коммуникационные и космические технологии». Автор занимал должность «Научного сотрудника» в исследовательской группе упомянутого проекта. Проект успешно реализован в Национальной инженерной академии Республики Казахстан.

Описание вклада докторанта в подготовку каждой публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ общим объемом 11,75 печатных страниц.

Результаты исследований, связанных с WT, были успешно рецензированы и опубликованы в известном и пользующийся доверием немецком научном журнале «Optik» издательства Elsevier:

1) *Quadratic-phase wave packet transform*, Optik, 261: 2022. (22 раз Цитировано) WoS: Q2; Scopus: Engineering Q2, Rank 189/738, Percentile 77%.

Вклад автора при написании статьи CRedit (Contributor Roles Taxonomy): концептуализация (идея статьи принадлежит автору; автор построил новое преобразование на основе WT, т.е. определил QP-WPT и сформулировал его свойства и приложения), формальный анализ (с помощью математических методов анализа автор доказал основные свойства QP-WPT), написание — написание оригинальной статьи (автор подготовил черновой вариант публикуемой работы в LaTeX), написание — рецензирование и редактирование (автор участвовал в написании ответов на комментарии анонимных рецензентов, назначенными редакторами журнала, и доработал рукопись перед публикацией).

Некоторые результаты исследований по WVD и OLCT были успешно опубликованы на рецензируемой международной конференции проводившейся в Таиланде, и были включены в серию «Достижения в области исследований интеллектуальных систем» издательства Atlantis Press, подразделение Springer Nature:

2) *The Wigner-Ville distribution based on the offset linear canonical transform domain*, Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2017), 139–142, 2017 (Цитировано 11 раз).

Вклад автора при написании статьи: концептуализация (идея статьи принадлежит автору; объектом исследования является построение компактной гибридной преобразования путем ассоциации WVD с OLCT, и целью исследования является демонстрация ее основных свойств и приложений), методология (автор разработал и спроектировал структуру статьи), формальный анализ (для анализа исследования автор использовал математические методы), написание — написание оригинальной статьи (автор написал и подготовил первоначальную версию публикуемой работы), написание — рецензирование и редактирование (автор участвовал в написании ответов на комментарии анонимных рецензентов, назначенными редакторами журнала), финансирование (автор оплатил взнос за участие в конференции).

Кроме того, в 2023 году, часть результатов исследований по WVD и OLCT представлены в труде:

3) Глава: *Hybrid Transforms*. В книге: Time Frequency Analysis of Some Generalized Fourier Transforms. IntechOpen; 2023. 10.5772/intechopen.108186.

Вклад автора при написании одной главы из шести глав под редакционным руководством зарубежного научного консультанта: концептуализация (идея главы принадлежит автору; автор сформулировал объект исследования и цели),

методология (автор разработал структуру главы), формальный анализ (для анализа исследования автор использовал математические методы решения интегральных уравнений), исследование (автор показал свойства гибридных преобразований), написание — написание оригинальной главы (автор разработал и написал оригинальный и окончательный вариант публикуемой работы в соответствии с требованиями), написание — рецензирование и редактирование (автор написал ответы на комментарии анонимных рецензентов и внес исправления по комментариям), финансирование (профинансирован в рамках проекта «Построение и исследование кватернионных преобразований Фурье и их использование при создании информационной системы для решения задач геофизики и геохимии» Комитетом Науки МОН РК, №AP14871252).

Результаты по объединению обработки сигналов и теории вероятностей успешно прошли рецензирование и опубликованы в журнале «Математика»:

4) *Quaternion fractional Fourier transform: bridging signal processing and probability theory*, Mathematics, 13(2), 195, 2025. WoS: Q1, Rank 21/490, Percentile 97,45%; Scopus: Computer Science (miscellaneous) Q2, Rank 48/133, Percentile 64%.

Вклад автора CRediT в написание статьи 4): написание — рецензирование и редактирование (автор участвовал в написании полного ответа к критическим отзывам трех анонимных рецензентов, назначенных журналом, а также в доработке и редактировании рукописи перед публикацией, подготовил ответы на рецензии, связанные с применением методов обработки кватернионных сигналов при решении задач теории вероятностей, и внес соответствующие исправления и дополнения в рукопись), финансирование (профинансирован в рамках проекта «Построение и исследование кватернионных преобразований Фурье и их использование при создании информационной системы для решения задач геофизики и геохимии» Комитетом Науки МОН РК, №AP14871252).

Результаты по гибридным и кватернионным преобразованиям были успешно опубликованы в виде монографии:

5) *Кватернионные преобразования Фурье и их применение в задачах геофизики и геохимии*, Монография, Алматы: Everest, 2024. – 140 страниц. ISBN 978-601-04-6809-2.

Вклад автора в монографии, написанной под редакционным руководством руководителя проекта: концептуализация (часть идеи монографии принадлежит автору; автор принимал участие в обработке сигналов, изображений и задач геофизического моделирования с использованием кватернионных преобразований Фурье), методология (автор разработал и спроектировал структуру монографии), формальный анализ (автор использовал исследования в области обработки сигналов, геоинформационных систем и прикладной математики), исследование (автор объединил преимущества различных методов и повысил точность обработки данных), написание — написание оригинальной монографии (автор принимал участие в разработке и написании текста оригинальной монографии в соответствии с требованиями), написание — рецензирование и редактирование (автор внес исправления в соответствии с замечаниями рецензентов), финансирование (профинансирован в рамках проекта «Построение и исследование кватернионных преобразований Фурье и их использование при создании информационной системы для решения задач геофизики и геохимии» Комитетом Науки МОН РК, №AP14871252).