АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

САРМАНБЕТОВ САНЖАР АЙТҚАЛИҰЛЫ

Аппаратная реализация информационно-энтропийного анализа сигналов

В настоящее время стремительное развитие информационных технологий и телекоммуникационных систем выдвигает новые требования к обработке и анализу сигналов. Рост пропускной способности каналов связи, усложнение структуры данных и повышение требований к их качеству обуславливают необходимость совершенствования методов обработки информации. Эффективные системы анализа и классификации сигналов не только повышают качество передачи данных, но и обеспечивают надежность, устойчивость и помехоустойчивость коммуникационных систем.

В традиционных подходах сигнал характеризуется параметрами амплитуды, частоты или фазы. Однако такие методы часто не позволяют в полной мере выявить скрытые закономерности в структуре сигнала. Поэтому в последние годы особое внимание уделяется методам, основанным на информационной энтропии.

Информационная энтропия представляет собой основной математический показатель, характеризующий степень неопределенности и упорядоченности структуры сигнала. Понятие энтропии, введённое К. Шенноном, стало фундаментом теории информации и позволило количественно оценивать сложность и информационное содержание различных процессов. Благодаря этому энтропийные методы анализа находят широкое применение при решении задач распознавания, фильтрации и классификации сигналов.

Основная идея данной работы заключается в аппаратной реализации методов информационно-энтропийного анализа сигналов, то есть в создании аппаратной системы, которая вычисляет энтропийные признаки сигнала и обрабатывает их в режиме реального времени.

Актуальность исследования

Главное направление развития информационных систем - повышение скорости и надежности обработки данных. Современные телекоммуникационные, радиолокационные и охранные комплексы работают с большими объёмами информации. В таких условиях программная обработка часто оказывается недостаточно эффективной из-за высоких вычислительных затрат и больших временных задержек.

Оптимальным решением является реализация энтропийных методов на аппаратных платформах - таких как FPGA**,** DSP или SoC. Эти устройства

обеспечивают параллельную обработку данных с высокой скоростью и низким энергопотреблением. Преимущества энтропийного анализа:

- Способность описывать структурные особенности сигнала;
- Устойчивость к шуму и многолучевому распространению;
- Возможность различать хаотические и упорядоченные процессы;
- Количественная оценка статистических свойств сигнала.

Благодаря этим качествам методы энтропийного анализа находят применение в телекоммуникациях, радиомониторинге, системах контроля качества связи, устройствах IoT и в кибербезопасности. Исследование обладает не только научной, но и высокой практической значимостью, поскольку направлено на создание автономной интеллектуальной системы анализа сигналов в реальном времени. Подобные решения могут быть использованы в центрах радиомониторинга, военных и промышленных коммуникационных комплексах.

Цель и задачи исследования

Цель работы - разработка метода анализа сигналов на основе информационно-энтропийных подходов и создание его аппаратного прототипа. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Разработать алгоритмы и численные методы для устойчивой классификации PSK-сигналов на основе информационно-энтропийного анализа.
2. Реализовать схемотехническую модель информационно-энтропийного анализа на базе ПЛИС, обеспечивающую высокую производительность и энергоэффективность.
3. Построить теоретическую модель информационно-энтропийного анализа для нейронных сетей, учитывая динамику сигнала и его энтропийные характеристики.
4. Провести экспериментальное исследование и тестирование разработанной системы на реальных данных, включая задачи классификации цифровых модуляционных сигналов.

Научная основа и содержание работы

Научная новизна работы заключается в адаптации метода информационной энтропии для аппаратной реализации, способной функционировать в реальном времени. Энтропийный анализ основан на вероятностном распределении сигналов и позволяет выделять их упорядоченные и случайные компоненты.

В аппаратной системе на основе FPGA модуль вычисления энтропии состоит из нескольких функциональных блоков:

- Предварительная фильтрация;
- Дискретизация и нормализация;
- Вычисление энтропии;
- Классификация и визуализация данных.

При обработке используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое даёт возможность оценить характеристики сигнала в частотной области.

Параллельная архитектура FPGA позволяет одновременно выполнять множество операций, что значительно снижает время обработки и повышает производительность системы.

Основные положения

1. Результаты вычислительного эксперимента подтвердили, что при классификации PSK-модуляций с использованием базы HisarMod2019.1 энтропия Шеннона является наиболее информативным признаком, обеспечивающим повышение точности распознавания по сравнению с энтропиями Реньи, Цаллиса и экспоненциальной.
2. Оптимизированная аппаратная реализация радиомодуля на Xilinx Zynq-7000, использующая 18,2 % DSP и 25,7 % BRAM, обеспечивает 4096-точечное FFT с задержкой 128 мкс, подтверждая высокую эффективность обработки сигналов в реальном времени.
3. Свёрточная нейронная сеть (CNN) классифицирует данные PSK-модуляции, полученные с NI PXIe-1065, с точностью 99,9 %, за исключением QPSK-модуляции, для которой при SNR = 6 дБ точность снижается до 94,9 %
4. Автоматическая классификация PSK-модуляции на основе методов машинного обучения, использующих созвездные диаграммы, функции распределения, кумулянты высоких порядков (HOCs) и новую технику фильтрации и регенерации, достигает точности 95 % при SNR = 9 дБ.

Научная новизна

1. Доказано, что энтропия Шеннона является наиболее информативным признаком для классификации PSK-модуляций по сравнению с энтропиями Реньи, Цаллиса и экспоненциальной, что подтверждено экспериментами на базе HisarMod2019.1.
2. Разработан новый энергетически эффективный радиомодуль, основанный на FPGA Xilinx Zynq-7000, использующий 4096-точечное БПФ и работающий с задержкой 128 мкс при низком использовании ресурсов (18–19% DSP, 25–26% BRAM), что обеспечивает ускорение обработки по сравнению с программными реализациями.
3. Впервые разработана архитектура и экспериментально обоснована глубинная свёрточная нейронная сеть (CNN), оптимизированная для классификации PSK-сигналов на основе энтропийных признаков. Предложенная архитектура обеспечивает точность до 99,9% при обработке данных, полученных с NI PXIe-1065, и сохраняет высокую устойчивость даже при SNR = 6 дБ
4. Предложена и обоснована гибридная архитектура классификации цифровых модуляций, объединяющая статистические функции распределения, кумулянты высоких порядков и модели машинного обучения, обеспечивающая точность распознавания до 95% при SNR = 9 дБ и выше.

Практическая значимость

Разработанная система имеет широкие практические возможности и может быть использована в следующих областях:

1. Системы радиомониторинга - контроль спектра частот, обнаружение несанкционированных передатчиков, анализ радиочастотной среды;
2. Военные и оборонные коммуникации - оперативный анализ сигналов в условиях активных помех и классификация вражеских излучений;
3. SDR-системы (Software Defined Radio) - автоматическая адаптация режима приёмника и оптимизация энергопотребления;
4. Сети IoT и 5G - реализация автономных модулей анализа в устройствах с ограниченной мощностью;

Главные преимущества аппаратной системы - её адаптивность и надёжность.

Заключение

Проведённые исследования информационно-энтропийной обработки сигналов показали, что использование энтропийных признаков существенно повышает эффективность анализа цифровых модуляций. Анализ базы данных HisarMod2019.1 продемонстрировал, что среди рассмотренных показателей — энтропий Реньи, Цаллиса и экспоненциальной — именно энтропия Шеннона обладает наибольшей информативностью при классификации PSK-сигналов, обеспечивая более устойчивые и различимые признаки даже в условиях низкого отношения сигнал/шум.

Разработанный оптимизированный аппаратный радиомодуль на платформе Xilinx Zynq-7000 подтвердил эффективность аппаратной реализации энтропийного анализа. Модуль выполняет 4096-точечное FFT с задержкой порядка 128 мкс при минимальном использовании ресурсов FPGA (18,2% DSP и 25,7% BRAM), что демонстрирует возможность обработки сигналов в реальном времени и пригодность системы для встроенных и автономных телекоммуникационных комплексов.

Дополнительные исследования, основанные на инструментах сбора данных NI PXIe-1065, показали, что разработанная свёрточная нейронная сеть (CNN) обеспечивает точность классификации PSK-сигналов до 99,9%, что подтверждает высокую пригодность архитектуры для анализа сложных сигналов. При этом для QPSK-модуляции при SNR = 6 дБ точность составляет 94,9%, что указывает на чувствительность метода к переходным процессам и особенностям фазовых переходов.

Кроме того, предложенный метод автоматической классификации цифровых модуляций, объединяющий энтропийные признаки и оптимизированные алгоритмы обработки, демонстрирует высокую устойчивость к шуму и эффективность на низких уровнях SNR. Метод достигает 95% точности при SNR = 9 дБ, потребляя меньше вычислительных ресурсов, чем классические подходы. Это делает его универсальным и применимым к различным типам модуляций, включая PSK, QAM и другие.

Апробация диссертационной работы

Результаты диссертационной работы были опубликованы в следующих источниках:

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в международные научные базы данных Thomson Reuters и Scopus:

1. Ibraimov M.K., Kozhagulov E.T., Zheksebai D.M., Sarmanbetov S.A. Implementation of functional block radio unit based on system-on-chip // Eurasian Physical Technical Journal. – 2023. – Vol. 20, № 4(46). – С. 74–80. – DOI: 10.31489/2023No4/74-80. Quartile Q3.
2. **Sarmanbetov S.,** Nurgaliyev M., Zholamanov B., Kopbay K., Saymbetov A., Bolatbek A., Kuttybay N., Orynbassar S., Yershov E. Novel filtering and regeneration technique with statistical feature extraction and machine learning for automatic modulation classification // Digital Signal Processing. – 2024. – Vol. 155. – P. 104744. – DOI: 10.1016/j.dsp.2024.104744. Quartile Q2.

Научные статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МНВО :

1. Кожагулов Е.Т., Жексебай Д.М., **Сарманбетов С.А.**, Максутова А.А. Классификатор изображений микросхем при помощи сверточной нейронной сети // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series. – 2021. – Vol. 6, № 340. – С. 59–65. – ISSN 1991-346X. – DOI: 10.32014/2020.2518-1726.102.
2. Kozhagulov Y.T., Zhexebay D.M., **Sarmanbetov S.A.**, Sagatbayeva A.A., Zholdas D. Comparative analysis of object detection processing speed on the basis of neuroprocessors and neuroaccelerators // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series. – 2020. – Vol. 4, № 332. – pp. 61–67. – ISSN 1991-346X. – DOI: 10.32014/2020.2518-1726.66.
3. **Сарманбетов С.А.**, Сагидолда Е., Кожагулов Е.Т., Жексебай Д.М. Классификация модулированных радиосигналов на основе сверточных нейронных сетей // Engineering Journal of Satbayev University. – 2021. – Vol. 143, № 2. – С. 98–105. – DOI: 10.51301/vest.su.2021.i2.13.
4. Kozhagulov Y.T., Zhexebay D.M., **Sarmanbetov S.A.**, Ussipov N.M., Kopbay K.T. Identification of digital modulation based on informational entropy // Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. – 2024. – № 2. – pp. 73–83. – DOI: 10.32014/2024.2518-1483.279.
5. Кожагулов Е.Т., Жексебай Д.М., Намазбаев А.Т., **Сарманбетов С.А.** Эффективная классификация цифровой модуляции с использованием сверточных нейронных сетей // Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical Sciences. – 2024. – № 2 (86). – С. 201–210. – DOI: 10.51889/2959-5894.2024.86.2.019

Авторское право

Жанабаев З. Ж., Кожагулов Е. Т., Жексебай Д. М., Сарманбетов С. А.. Определение аналитического аналога отношения сигнал-шум IER на основе информационно-энтропийного анализа. Республика Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», свидетельство об авторском праве № 3008. 2019