

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

УДК 004.02

Рыбенков  
Евгений Викторович

Синтез FPGA ориентированных структур ПУБФ в алгебре кватернионов как  
целочисленных преобразователей

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-40 80 01 Элементы и устройства вычислительной техники и  
систем управления

---

Научный руководитель

Петровский Александр Александрович

д.т.н., профессор

---

Минск 2017

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время представляют интерес схемы, работающие по принципу L2L (lossless-to-lossy), осуществляющие сжатие и восстановление изображений как без потерь, так и с контролируемым внесением искажений.

В работе [3] представлен новый класс БФ – параунитарные банки фильтров на основе алгебры кватернионов (Q-ПУБФ), которые обладают полезными свойствами для задач компрессии изображений. Также Q-ПУБФ являются структурами без потерь, даже при выполнении вычислений с конечной точностью. Однако, отсутствие методов прямого вычисления коэффициентов Q-ПУБФ вынуждает использовать численные методы. Реализация Q-ПУБФ в арифметике с фиксированной запятой требует квантования коэффициентов БФ, что в свою очередь предполагает учет следующих особенностей: вырождение параметров БФ; аппроксимация операции умножения сдвигами и сложениями. Последнее напрямую влияет на эффективность аппаратной реализации и вычислительную сложность БФ. Учесть данные ограничения можно только на этапе синтеза коэффициентов.

Благодаря появлению и стремительному развитию программируемых систем на кристалле ПЛИС (FPSoC) и соответствующих специальных инструментальных сред разработки появилась возможность быстрого прототипирования систем передачи и обработки цифровых изображений. Внедрение FPSoC в системы мультимедиа реального времени обуславливает интерес к методам проектирования банков фильтров, характеризующихся малой вычислительной сложностью. Подходы на основе представления коэффициентов суммой степеней двух особенно привлекательны, потому что умножение интерпретируется с помощью только простых операций сдвигов и сложений. Более того, возможно применение распределенной арифметики на сумматорах для реализации компонент банков фильтров, что приводит к сокращению аппаратных затрат, уменьшению потребляемой мощности и увеличению быстродействия схемы по сравнению с распределенной арифметикой на памяти.

В настоящей работе предлагается FPGA ориентированный метод синтеза структур ПУБФ на основе алгебры кватернионов как целочисленных преобразователей. Основу аппаратной реализации системы кодирования и декодирования изображений составляет ПЛИС фирмы Xilinx ZYNQ-7000.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики**

Работы выполнены в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедры “Электронные вычислительные средства” и НИЛЗ.1 “Мультипроцессорные системы реального времени” учреждения образования “Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники” в ходе составной части научно-исследовательской работы (НИР): “Разработка универсального аудиокодера на основе разреженной аппроксимации с оптимизированным словарем частотно-временных функций в качестве встраиваемой системы реального времени” (ГБЦ 16-3137).

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка метода расчета Q-ПУБФ для вычислительных структур с фиксированной запятой и быстрое прототипирование Q-ПУБФ на основе FPSoC.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ и обоснование выбора блочно-лестничной факторизации операции умножения кватернионов на основе параллельной распределенной арифметики на сумматорах.
2. Разработать метод синтеза целочисленных Q-ПУБФ на основе решения задачи поиска условного экстремума с ограничениями типа неравенств для заданных структурных ограничений.
3. Найти архитектурное решение процессора целочисленного Q-ПУБФ с блочно-лестничной факторизацией умножителя кватернионов на основе параллельной распределенной арифметики на сумматорах, которое осуществляет полное восстановление исходного изображения.
4. Реализовать ядро системы компрессии изображений по схеме L2L на основе целочисленного Q-ПУБФ для заданных структурных ограничений на кристалле FPSoC.

## **Личный вклад магистранта**

Результаты, приведенные в магистерской диссертации, получены либо магистрантом лично, либо при его непосредственном участии. Вклад научного руководителя, доктора технических наук, профессора А.А. Петровского, связан с постановкой целей и задач исследования, определением возможных путей решения и обсуждением результатов исследований, проводимых автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в магистерской диссертации результатов.

## **Апробация магистерской диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 научных конференциях: 19-я международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA – 2017” – Москва, 2017; 52-й и 53-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – Минск, 2016, 2017; 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) – Bar, Montenegro, 2017.

## **Опубликованность результатов магистерской диссертации**

По материалам магистерской диссертации опубликованы 7 печатных работ, включая 5 тезисов в сборниках материалов конференции и 2 статьи в рецензируемых научных журналах.

## **Структура и объем магистерской диссертации**

Магистерская диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа представлена на 97 страницах машинописного текста, из них основная часть – на 58 страницах, 59 рисунков, 10 таблиц, библиография из 39 наименований, включая 7 публикаций автора.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана краткая характеристика исследуемых вопросов, определена область, основные направления, цели и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена анализу существующих методов компрессии изображений. Рассмотрены распространённые форматы сжатия изображения, такие как JPEG и JPEG2000. Обоснована актуальность построения систем компрессии изображений, работающих в режимах с потерями и без (L2L). В качестве трансформационного преобразования для таких систем кодирования был выбран параунитарный банк фильтров на основе алгебры кватернионов (Q-ПУБФ).

Приведены методы структурного построения операции умножения кватернионов. Подход на основе распределенной арифметики на сумматорах (DA-ADDER) – актуален, поскольку используют меньше аппаратных ресурсов FPGA и имеют более высокую производительность в сравнении с DA-ROM и CORDIC. Для того, чтобы уменьшить вычислительную сложность преобразования и добиться полного восстановления входного изображения, использовался математический аппарат на основе блочной лестничной параметризации.

**Вторая глава** посвящена разработке FPGA ориентированного метода синтеза Q-ПУБФ. Отсутствие прямых методов вычисления коэффициентов Q-ПУБФ вынуждает использовать численные методы. Основу алгоритма составляет метод множителей Лагранжа. В качестве ограничений на аппаратную реализацию были выбраны: длина слова и число единичных бит в двоичном коде лестничных коэффициентов. В качестве ограничений на параметры Q-ПУБФ были выбраны: степень ослабления в полосе задержки каналов, эффективность кодирования, ошибка восстановления сигнала в результате квантования лестничных коэффициентов. Предложенный метод синтеза Q-ПУБФ с блочной лестничной параметризацией позволяет получать БФ для вычислительных структур с фиксированной запятой с высоким показателем эффективности кодирования.

**Третья глава** посвящена аппаратной реализации Int-Q-ПУБФ. Предложена универсальная структура умножителя кватернионов и поточный процессор Int-Q-ПУБФ. Производительность конвейерная структура системы анализ/синтез составляет  $1.6 \cdot 10^9$  отсчетов в секунду.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными научными результатами диссертационной работы являются разработанные метод синтеза и аппаратная реализация целочисленных параунитарных банков фильтров на основе алгебры кватернионов (Int-Q-ПУБФ) для трансформационного кодирования изображений по схеме L2L [1-А, 2-А, 3-А, 4-А, 5-А, 6-А, 7-А].

1. На основании анализа алгоритмов сжатия изображений JPEG и JPEG2000 было показано, что замена ДКП на ДВП позволило увеличить степень компрессии изображений при сравнимом качестве восстановленных изображений.

2. На основании анализа подходов к реализации умножителя кватернионов было показано, что наиболее эффективными схемами при аппаратной реализации умножителя является класс методов на основе DA-ADDER. Данный подход использует меньше аппаратных ресурсов FPGA и имеет более высокую производительность в сравнении с DA-ROM и CORDIC.

3. Предложен метод синтеза Int-Q-ПУБФ на основе DA-ADDER. Основу алгоритма составляет метод множителей Лагранжа. Число итераций работы алгоритма синтеза Int-Q-ПУБФ не превышает десяти.

4. Синтезированные Int-Q-ПУБФ могут быть использованы для кодирования изображений по схеме L2L и обладают свойствами: полного восстановления, линейности ФЧХ, регулярности первого порядка.

5. Предложена структура умножителя кватернионов с использованием блочной лестничной параметризации и DA-ADDER, особенностью которой является полное восстановление входного сигнала, высокая производительность и малые аппаратные затраты кристалла ПЛИС и унификация архитектуры умножителя кватернионов.

6. Была испытана система анализ/синтез в арифметике с фиксированной запятой на тестовом изображении в среде MATLAB. Полученное восстановленное изображение полностью соответствует оригиналу, что подтверждает свойство перфективной реконструкции решетчатых структур ПУБФ на основе алгебры кватернионов в арифметике с фиксированной точкой.

7. Реализован поточный процессор Int-Q-ПУБФ на ПЛИС. Длина конвейера системы анализ/синтез составляет 52 такта. Производительность системы составляет  $1.6 \cdot 10^9$  отсчетов в секунду.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1–А. Petrovsky, N. Embedded distributed arithmetic based quaternions multiplier of paraunitary filter bank for lossless-to-lossy image coding / N. Petrovsky, E. Rybenkov, A. Petrovsky // *Microprocessors and Microsystems*. – 2017. doi:10.1016/j.micpro.2017.04.020 [онлайн].

2–А. Petrovsky, N. Multiplierless structurally orthogonal block-lifting-based quaternionic paraunitary filter banks with sum of-powers-of-two coefficients / N. Petrovsky, E. Rybenkov, A. Petrovsky // *6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO'2017)*. – Bar, Montenegro. – 2017. – P. 255-258.

3–А. Рыбенков, Е.В. Синтез параунитарных банков фильтров в алгебре кватернионов для вычислительных структур с фиксированной запятой / Е. В. Рыбенков, Н. А. Петровский // *Доклады БГУИР*. – 2016. – № 8 (102). – С. 22 – 28.

4–А. Рыбенков, Е.В. Расчет кватернионных банков фильтров с представлением коэффициентов суммой степеней двух / Е.В. Рыбенков, Н.А. Петровский // *Труды 19-й международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение” (DSPA'2017)*. – Т.1 – 2017. – С. 157–161.

5–А. Рыбенков, Е.В. Применение численных методов для синтеза коэффициентов параунитарного банка фильтров на основе алгебры кватернионов / *Компьютерные системы и сети: материалы 52-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов*. – Минск : БГУИР, 2016. – С. 164 - 165.

6–А. Рыбенков, Е.В. Алгоритм оптимального представления коэффициентов суммой степеней двух банков фильтров на основе алгебры кватернионов / *Компьютерные системы и сети: материалы 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов*. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 241-242.

7–А. Рыбенков, Е.В. FPGA реализация 8-канальных кватернионных банков фильтров на основе распределенной арифметики на сумматорах / *Компьютерные системы и сети: материалы 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов*. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 238-240.