

На правах рукописи

ФАХМИ ШАКИБ СУБХИЕВИЧ

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСТРОЙСТВАХ
СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ**

Специальность: 05.13.05 – элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Цыцулин Александр Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Адамов Юрий Федорович

доктор технических наук, профессор
Гуров Игорь Петрович

доктор технических наук, профессор
Кокаев Олег Григорьевич

Ведущая организация: ФГУП Научно-исследовательский
институт микрорелектронной
аппаратуры «Прогресс» г. Москва

Защита состоится « ____ » _____ 2011 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, ученому секретарю совета Д 212.238.02.

Ученый секретарь совета
кандидат технических наук, доцент

Сафьянников Н. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Объединение вычислительной техники, телевидения и техники связи стало не только возможным, но и востребованным, благодаря теоретическому и технологическому единству изделий этих отраслей техники. Возрастание сложности электронных компонентов привело к возникновению принципиально новых элементов и устройств микроэлектроники для обработки изображений – систем на кристалле и видеосистем на кристалле, включающих в свой состав фотоприёмник и устройство цифровой обработки.

Проектирование устройств кодирования непрерывных источников сигналов разбивается на два основных этапа. На начальном этапе определяются основные параметры кодера на основе теории информации, а на завершающем осуществляется непосредственное проектирование требуемого устройства, в основе которого лежит методология создания цифровых СБИС. Первый этап должен осуществляться на основе математической теории связи К. Шеннона, которая обосновывает возможность достижения равенства скорости формирования информации (энтропии или эpsilon-энтропии) и пропускной способности канала ее передачи. Существенный вклад в развитие теории кодирования непрерывных источников сигналов, в том числе изображений, внесли: А. Н. Колмогоров, Р. Л. Добрушин, Б. С. Цыбаков, Л. И. Хромов, Р. Галлагер, А. Витерби, Дж. Омура, Р. Гонсалес, Я. Ричардсон, Р. Вествэтер, И. И. Цуккерман, В. А. Сойфер, В. В. Александров, А. А. Потапов, и др.

Оптимальные методы кодирования изображений формализованы в основном для стационарных сигналов, и их разработка была нацелена, в первую очередь, на повышение эффективности использования канала связи. Вместе с тем, для создания автономных малогабаритных систем формирования и передачи изображений (например, беспилотных летательных аппаратов) актуальна другая цель – обеспечение эффективности использования кодера источника, сложность которого постоянно возрастает. Для корректной оценки работы кодера непрерывного нестационарного источника важно учесть не только ошибку передачи и скорость передачи полезной информации, но и затраты на сложность кодера, которая в конечном счёте влияет на массу аппаратуры.

Первый шаг в этом направлении сделан в области разработки «быстрых» алгоритмов – Дж. Кули и Дж. Тьюки, Л. Томас, Ч. Редер, Р. Блейхут, Г. Нуссбаумер и др. Реализация таких «быстрых» алгоритмов наиболее полно обеспечивается использованием методов разработки СБИС класса систем на кристалле. В развитие методологии завершающего этапа проектирования специализированных систем и смешанных систем на кристалле обработки сигналов существенный вклад внесли Т. Кайлат, М. Китинг, Р. Брикауд, Г. Мартин, В. К. Шмидт, А. С. Сигов, В. Г. Немудров, Ю. Ф. Адамов, Ю. И. Тишин, Т. Т. Палташев и др.

Существующие кодеры источников непрерывных изображений на основе «быстрых» алгоритмов с использованием технологии систем на кристалле и видеосистем на кристалле оптимизируются на основе принципа декомпозиции. Однако имеется потребность в обосновании оптимальности сложной системы кодирования видеоинформации, а не оптимальности подсистем, её составляющих.

Потребность повышения эффективности кодирования видеоинформации отражается в ряде Федеральных целевых программ, включающих создание:

- автономных аппаратов наблюдения, обеспечивающих передачу видеоинформации с использованием цифровых каналов связи;
- современной отечественной электронной компонентной базы элементов и устройств вычислительной техники для систем кодирования и декодирования изображений.

Таким образом, в научном плане работа посвящена решению **проблемы разработки теоретических основ и прикладных методов проектирования устройств телекоммуникации и вычислительной техники в базе элементов функциональной микроэлектроники, предназначенных для кодирования изображений в прикладных системах**, имеющих важное хозяйственное значение при создании автономных аппаратов наблюдения и современной отечественной электронной компонентной базы.

Теоретический аспект сформированной проблемы заключается:

- в развитии методов разработки устройств кодирования, обеспечивающих обобщённую эффективность кодера, при которой

одновременно оптимизируется скорость передачи, минимизируются ошибки передачи и сложность кодирования информации;

- в разработке эффективных методов и алгоритмов кодирования нестационарных сигналов изображений;
- в развитии методов смешанного проектирования кодирующих устройств в виде сложных функциональных блоков (СФ-блоков или *IP*-блоков) систем на кристалле.

Практический аспект проблемы состоит в повышении обобщённой эффективности цифровых кодеров непрерывных сигналов изображений для малогабаритных бортовых видеоинформационных систем. Эти системы могут быть оптимизированы, спроектированы и реализованы на основе адекватной теории, эффективных алгоритмов и технологии СБИС класса «система на кристалле» и перспективной разновидности – видеосистем на кристалле. В результате решения проблемы конечный пользователь автономной видеоинформационной системы сможет получить существенное увеличение количества и качества информации в единицу времени на единицу массы аппарата.

Цель работы – совершенствование теоретической и технической базы средств вычислительной техники в части разработки методов, алгоритмов и структур устройств сжатия изображений, учитывающих свойства источника (пространственно-временную нестационарность) и существенное ограничение сложности реализации, что характерно для сложно-функциональных блоков БИС/СБИС класса систем на кристалле.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются задачи разработки:

- 1) методики начального этапа проектирования устройств кодирования изображений в системах на кристалле, опирающейся на показатель качества, учитывающий сложность кодера;
- 2) методики определения степени распараллеливания ввода изображений и оптимального распределения площади кристалла между фотоприёмником и вычислителем в рамках начального этапа проектирования устройств кодирования изображений в видеосистемах на кристалле;
- 3) моделей, методов и алгоритмов кодирования, опирающихся как на модели спектрального преобразования сигналов, так и на

модели без перехода в спектральную область, а также определение их оптимальных параметров и областей применения;

4) методов обеспечения совместимости синтезируемых оптимальных кодеров со стандартными протоколами обмена видеoinформацией;

5) методики, обеспечивающей оценку качества кодирования нестационарных сигналов изображений.

Объект исследования: разработка научных основ создания методов, алгоритмов и телекоммуникационных устройств преобразования информации с целью сжатия изображений, реализуемых в виде принципиально новых элементов и устройств – СФ- блоков систем на кристалле, синтезируемых на основе формализованной априорной информации, обоснованного выбора критерия качества и ограничения вычислительной сложности кодера.

Предмет исследования: модели, методы и алгоритмы кодирования изображений в устройствах, реализуемых в виде СФ-блоков систем на кристалле и видеосистем на кристалле.

Методы исследования: базируются на использовании математического аппарата теории вероятностей; теории информации, включая теорию кодирования зашумлённых непрерывных сигналов; теории вычислительных систем; имитационного моделирования.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика начального этапа проектирования кодирующих устройств в системах на кристалле, опирающаяся на введённую триаду:

- предложенный критерий эффективности кодера, включающий взвешенную сумму (на основе вектора концепции системы) потери полезной информации, скорости передачи и сложности кодера,
- введённое понятие об эpsilon-энтропии с ограничением сложности как минимума скорости кода при заданной сложности,
- формализацию взаимообмена скорости передачи и сложности кодера.

2. Предложена и экспериментально подтверждена гипотеза о возможности выражения эpsilon-энтропии непрерывного источника в виде среднего гармонического отношения сложности кодера и эpsilon-энтропии при ограничении сложности.

3. Обоснован метод кодирования с переходом в спектральную область (трёхмерное дискретное косинусное преобразование) с адаптацией размеров кодируемых многомерных видеофрагментов.

4. Обоснован полигонально-пространственный метод кодирования изображений по опорным точкам, обеспечивающий максимальное распараллеливание вычислений для модели кодирующих устройств, которая основана на рекурсивном выделении опорных точек.

5. Систематизированы алгоритмы кодирования на основе дискретного полигонального преобразования по опорным точкам.

6. Обосновано применение метода трихотомии при разработке структур устройств кодирования сигналов изображений.

7. Обоснована методика распределения площади кристалла между фотоприёмной и вычислительной подсистемами видеосистемы на кристалле.

8. Разработана классификация сюжетов на основе предложенной меры нестационарности сигналов изображений.

Практическая ценность.

1. Разработаны адаптивные алгоритмы на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП) и оптимальные для сжатия изображений с малой нестационарностью, позволяющие увеличить количество и качество видеоинформации на единицу массы кодера, т. е. при заданной ошибке передачи и заданной сложности увеличить коэффициент сжатия в 1,5 раза.

2. Разработаны алгоритмы на основе дискретного полигонального преобразования (ДПП) по опорным точкам, которые оптимальны с точки зрения сжатия изображений большой нестационарности. Они позволяют при заданной ошибке увеличить коэффициент сжатия в 1,5...2 раза.

3. Программно реализованы два СФ-блока кодирования и декодирования изображений на основе адаптивного трёхмерного дискретного косинусного преобразования.

4. Реализована специализированная СБИС в виде СФ-блока преобразования видеоданных, обеспечивающего совместимость предложенного ДКП кодера со стандартными протоколами обмена видеоинформацией. Блок позволяет снизить трафик почти в два раза для телевидения стандартного разрешения и примерно в 1,4 раза для телевидения высокой четкости, при задержке преобразования меньше соответствующей совокупной задержки в 2...3 раза.

5. Разработана классификация изображений на основе меры нестационарности и меры широкополосности источника сигналов, позволяющая определить область применения каждого из разработанных методов.

6. Разработанный лабораторный стенд и методическое обеспечение для изучения технологии проектирования устройств класса «система на кристалле» обеспечивают подготовку высококвалифицированных кадров.

Реализация результатов работы.

Основная часть результатов получена при проведении **НИОКР** во ФГУП «НИИ Телевидения» и СПбГЭТУ «ЛЭТИ», и изложена в отчетах по ОКР «Цифра-СФ» «Разработка ряда высокопроизводительных сложных функциональных блоков для специальных систем цифровой передачи данных» и ОКР «Цифра-3D-ЛЭТИ» «Моделирование алгоритмов кодирования и декодирования видеоинформации для реализации высокопроизводительных сложных функциональных блоков специальных систем цифровой передачи данных», о чем имеются акты о внедрении. Методика совместного проектирования аппаратного и программного обеспечения, позволяющая значительно сократить время цикла разработки СФ-блоков систем и видеосистем на кристалле, использована при разработке лабораторного стенда на базе технологии «реконфигурируемая система на кристалле», который используется в учебном процессе в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и Тихоокеанском государственном университете.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Начальный этап проектирования кодирующих устройств в системах на кристалле должен опираться на введённую триаду: предложенный критерий эффективности кодера, введённое понятие эpsilon-энтропии с ограничением сложности и функционал, связывающий скорость передачи и сложность.

2. Для формализации взаимосвязи скорости передачи и сложности кодера целесообразно использовать функционал, восходящий к их среднему гармоническому отношению.

3. Оптимальное сжатие (оптимальная потеря информации или оптимальная ошибка передачи) определяется соотношением компонентов вектора концепции системы.

4. При кодировании изображений с малой нестационарностью следует применять адаптивный спектральный метод сжатия, для которого с позиций введённого критерия наиболее эффективен метод дискретного косинусного преобразования с адаптацией размеров трёхмерных видеофрагментов.

5. При кодировании изображений с большой нестационарностью целесообразно применять кодирование без перехода в спектральную область. При этом эффективен адаптивный алгоритм кодирования по опорным точкам с использованием трихотомии кодируемого изображения.

6. Методика оценки эффективности кодирующих устройств должна использовать компактную представительную выборку изображений.

7. Оптимальное распределение площади кристалла между фотоприёмной и вычислительной подсистемами находится с учётом формализованной взаимосвязи скорости передачи и сложности кодера.

8. Структура видеосистем на кристалле должна использовать множественные потоки данных между фотоприёмной и вычислительной подсистемами.

Апробация работы. Результаты, полученные в работе на различных стадиях ее выполнения, докладывались и обсуждались на 6 международных конференциях: 1) A versatile real time video codec based on Three-Dimensional Discrete Cosine Transform. IBC 2008, RAI International Congress and Exhibition Centre; 2) IX Международной конференции. Распознавание 2010. Новые архитектурные решения в видеосистемах на кристалле// 18-20 мая 2010. Курск 2010; 3) 7-ой Международной конференции “Телевидение: передача и обработка изображений” Проектирование видеосистем на системном уровне в среде САПР NCLaunch 29-30 июня 2009/ СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009; 4) XV Международной конференции “Современное образование: содержание, технологии, качество” Пирамидально-рекурсивная триангуляционная обработка видеoinформации по опорным точкам/ СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009; 5) 64-ой научно-технической конференции. Универсальный видеокodeк реального времени на основе ДКП-3D//Сборник трудов СПбНТОРЭС им. А. С. Попова. Апрель 2009 СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009; 6) Междунар. конф. «Приборостроение в

экологии и безопасности человека. Обработка и вывод информации для решения задач экологии на ЖК-дисплей с применением технологии «система на кристалле»/ СПб 31.01–02 февраля 2007г., а также на конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2005–2010 г. и получили положительную оценку.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 92 работах, в том числе двух монографиях, 27 статьях, 10 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Оригинальность технических решений защищена тремя патентами и 20 программами для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, содержащего 201 наименование, содержит 290 страниц основного текста, включая 74 рисунка и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и практической значимости рассматриваемой проблемы, определены трудности, возникающие на пути решения поставленной проблемы, сформулированы цели и задачи исследований, сформулированы полученные в работе новые научные положения, выносимые на защиту, приведены краткие сведения об апробации работы.

В первой главе *проведен анализ проблемы синтеза устройств (СФ-блоков) систем на кристалле (СнК) и видеосистем на кристалле (ВСнК) для кодирования и декодирования изображений в прикладных системах, сделаны выводы и поставлены задачи, подлежащие решению в данной работе.*

На начальном этапе проектирования сделан акцент на постановке задачи поиска отмеченного (оптимального) эталона кодирования непрерывных сигналов при ограничении сложности кодера. Показано, что решить проблему разработки теоретических основ и прикладных методов проектирования устройств телекоммуникации и вычислительной техники можно только формализовав начальный этап проектирования систем на кристалле для кодирования изображений. Такая формализация должна включать адекватные модели сигналов (в частности, учитывающие входной шум изображений, их классификацию по детальности и

нестационарности) и корректный учёт главного ограничения при проектировании кодеров непрерывных источников – их сложности. При этом, в силу постоянного улучшения норм точности изготовления СБИС, актуальностью отличается не столько учёт конкретного значения ограничения сложности функциональных устройств, сколько формализация взаимосвязи скорости передачи и сложности кодера.

В заключение первой главы делается вывод, что на завершающем этапе системного проектирования кодирующих устройств типа систем на кристалле важен выбор класса кодера на основе априорной информации о кодируемых изображениях, выбор метода кодирования с учетом сложности кодера, меры нестационарности изображения и обеспечение средств модификации маршрута проектирования видеосистем на кристалле. При этом отмечается, наличие трёх особенностей проектирования: учет сложности кодера, распределение площади кристалла СБИС между фотоприёмником и вычислителем и определение степени параллелизма передачи сигналов от массива фотоприёмных элементов к кодеру-вычислителю.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию оптимальных параметров кодера источника непрерывных сигналов изображений, определяемых на основе опорной триады: априорной информации о сигнале, критерия качества передачи сигналов и принятых ограничений на реализацию.

Формализованный учёт сложности кодирующих устройств, стимулированный созданием и развитием СБИС и систем на кристалле, требует пересмотра понятия «эффективное» кодирование. В круг учитываемых величин, связанных с кодированием источника (показателей качества системы), должны войти не только точность передачи (ошибка) и скорость передачи, но и сложность. Известно, что эти величины взаимосвязаны, и оптимизацию кодера надо делать (минимум) по трём параметрам: по битовой скорости, по искажению и по вычислительной сложности. В развитие этой идеи в работе предложен критерий эффективности кодирования, учитывающий не только меру приближения к энтропии источника, но и то, какими информационными средствами достигнуто данное приближение, в первую очередь, – какой сложностью кодера. Следуя методике векторного синтеза системы связи, в работе был предложен

обобщённый показатель эффективности P , включающий взвешенную сумму $\{P_i\}$ совокупности частных информационных показателей качества кодера источника, которые связаны с ошибкой передачи ε : а) потери полезной информации ΔI , б) скорости передачи R , в) сложности W_k кодера. Вектор весовых коэффициентов $\{c_i\}$ при них называют «вектором концепции системы». Для обеспечения общего информационного подхода к решению задачи оптимизации системы связи все частные информационные показатели качества $P_i(\varepsilon)$ приведены к виду, имеющему единую размерность информации (например, бит):

$$P = \sum c_i P_i(\varepsilon) = c_0 \Delta I(\varepsilon) + c_1 R(\varepsilon) + c_2 W_k(\varepsilon) + c_3 W_d(\varepsilon) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Для выявления основных свойств критерия качества рассмотрим его частный случай при $c_3 = 0$, характерный для бортовых систем прикладного телевидения, акцентирующих внимание на сложности кодера, опуская индекс при обозначении сложности кодера:

$$P = \sum c_i P_i(\varepsilon) = c_0 \Delta I(\varepsilon) + c_1 R(\varepsilon) + c_2 W(\varepsilon) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Введённый критерий позволяет объективно сравнивать произвольные кодеры, отличающиеся по всем параметрам – ошибке передачи, скорости передачи и сложности, если зафиксировать выборку испытательных сигналов.

Формула эpsilon-энтропии, связывающая нижнюю границу скорости передачи сигнала H_ε с его известным спектром амплитуд $\{\lambda_k\}$ и с задаваемой ошибкой ε , вычисляется как конечная сумма n логарифмов спектрального отношения дисперсий λ_k к порогу θ :

$$H_\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \log \frac{\lambda_k}{\theta}, \quad \text{при } \varepsilon = \theta n + \sum_{k=n+1}^{\infty} \lambda_k. \quad (3)$$

Известно, что для широкого класса задач требуемая сложность W_ε вычислений (эpsilon-сложность, т.е. минимальное количество операций, необходимое для кодирования изображений с точностью ε) логарифмически связана с задаваемой ошибкой: $W_\varepsilon \sim \log(1/\varepsilon)$. С точностью до констант, учитывающих возможные затраты на энтропийное кодирование и восстановление сигналов в ходе итерационного кодирования, так же как и эpsilon-энтропия, эpsilon-сложность представлена суммой логарифмов спектрального отношения сигнал/ошибка:

$$\hat{W}_\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \log \frac{\lambda_k}{\theta}. \quad (4)$$

Исходя из одинакового влияния на ошибку передачи скорости передачи R и сложности W кодера (аналогично передаче от дискретного источника по дискретному каналу), в анализ кодеров введено понятие о нижней границе для скорости передачи при ограничении сложности H_ε^w . При этом энтальпия H_ε является пределом энтальпии с ограничением сложности

$$H_\varepsilon^w \text{ и энтальпии } W_\varepsilon: \lim_{W \rightarrow \infty} H_\varepsilon^w = \lim_{H_\varepsilon^w \rightarrow \infty} W = H_\varepsilon.$$

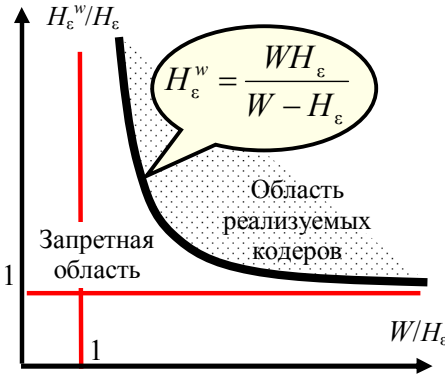


Рисунок 1– Взаимобмен скорости и сложности кодера

Для формализации взаимообмена скорости передачи и сложности кодера предложен функционал взаимосвязи энтальпии с ограничением сложности H_ε^w и сложности W кодирования,

отличающийся от гармонического среднего

отсутствием множителя числа слагаемых (рис. 1):

$$H_\varepsilon^w = \frac{WH_\varepsilon}{W - H_\varepsilon}. \quad (5)$$

Начальный этап проектирования кодера источника на основе вышеизложенного иллюстрируется на рис. 2, показывающем взаимосвязь трёх важнейших величин: ошибки передачи, скорости передачи и сложности.

Из рисунка видно, что при одной и той же ошибке передачи ε_1 переход от способа кодирования Z_1 к способу кодирования Z_2 определяется ценой перехода от сложности W_1 к большей сложности W_2 и обеспечивает лучшее приближение к энтальпии: $R_2 < R_1$.

Уменьшение назначаемой ошибки в соответствии с формулами (3) и (5) ведет к увеличению энтальпии и сдвигу границы реализуемых кодов на рис. 1 вправо и вверх, на рис. 2 влево и вверх.

Учёт взаимобмена скорости передачи информации и сложности кодера, формализуемый формулой (5), позволил найти минимум в обобщенном критерии (2), который приводится к виду:

$$P = c_0 \Delta I + (\sqrt{c_1} + \sqrt{c_2})^2 H_\varepsilon. \quad (6)$$

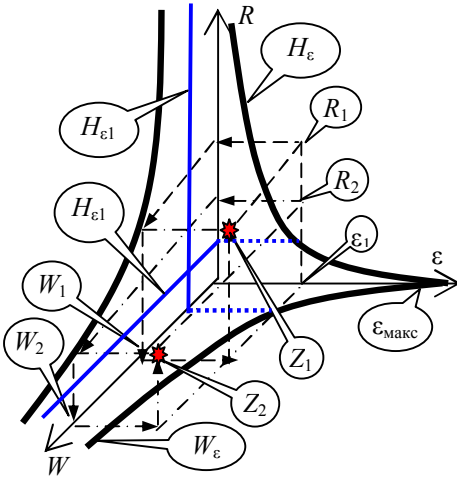
Потеря полезной информации составляющая

$$\Delta I = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \log \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{\min k}}, \quad (7)$$

и кодовая энтропия зависят от минимальной ошибки ε_{\min} :

$$H_\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \log \frac{\lambda_k}{\varepsilon_k - \varepsilon_{\min k}}. \quad (8)$$

Рисунок 2 – Зависимость триады: точность, скорость и сложность кодера



Из обобщенного критерия эффективности кодера (6) с учётом формул (7) и (8) получено оптимальное значение ошибки передачи:

$$\varepsilon_{\text{опт}} = \frac{\varepsilon_{\min} c_0}{c_0 - [\sqrt{c_1} + \sqrt{c_2}]^2}. \quad (9)$$

Данное выражение показывает, что, не смотря на монотонный характер возрастания ошибки из-за сжатия непрерывного сигнала, существует конкретное значение оптимального сжатия (оптимальной скорости передачи) и оптимальной деградации качества сигнала, полностью определяемых вектором концепции системы.

Таким образом, разработанное в этой главе теоретическое обоснование проектирования кодеров непрерывных источников опирается на предложенный критерий эффективности кодера (3), введённое понятие об энтропии с ограничением сложности и формализацию взаимобмена скорости передачи и сложности кодера (5). Оно даёт искомый эталон эффективности кодера, служащий опорой на следующем этапе проектирования – определения структуры и параметров кодеров непрерывных источников по заданной априорной информации и численным значениям ограничения сложности.

Третья глава посвящена разработке моделей, методов и алгоритмов кодирования и декодирования изображений с переходом в спектральную область сигнала (на примере дискретного косинусного преобразования (ДКП)) и без перехода в спектральную область (на примере дискретного полигонального преобразования (ДПП) по опорным точкам).

Спектральный метод. В контексте необходимости декорреляции, видеосигнал как многомерная функция имеет оптимальное разложение по всем своим аргументам. Поэтому для устранения временной корреляции нет существенных формальных оснований использовать средства, отличающиеся от применяемых для пространственной декорреляции.

В соответствии с этим разработан новый метод адаптивного трехмерного дискретного косинусного преобразования (ДКП-3D) для кодирования и декодирования видеоинформации, так как для большинства практически значимых классов кусочно-стационарных изображений по критерию минимума, требуемого для передачи количества информации при заданном уровне качества изображения, этот метод является оптимальным (асимптотически оптимальным).

С точки зрения вычислительной сложности алгоритм кодирования и декодирования на основе ДКП-3D характеризуется примерно в 10 раз меньшими временными затратами в сравнении с известными стандартами (MPEG). Это достигается в основном за счет временной межкадровой корреляции и отсутствия механизмов компенсации движений.

Кроме того, предложены алгоритмы кодирования изображений, адаптированные к различным динамическим сюжетам – без движения и с движением (рис. 3). При этом для групп кадров видеопотока с движением осуществляется разбиение потока на видеокубы различного размера (при интенсивном движении размер видеокуба делается меньше).

Для групп видеопотока с движением на этапе кодирования (рис. 3а), вычисляется среднеквадратическое отклонение (σ) между первым сегментом видеокуба и последним, далее в зависимости от заданных порогов (σ_1 и σ_2) формируются кубы: без движения (при $\sigma \leq \sigma_1$ – КБД), с низкой (при $\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_2$ – КНД) и высокой скоростью движения (при $\sigma > \sigma_2$ – КВД). А на этапе декодирования (рис. 3б) восстановление видеопотока выполняется в обратном порядке.

Предварительный анализ движения в пределах одной группы и задание соответствующих значений порогов ($\sigma_1=4$ и $\sigma_2=24$) позволили, при сохранении качества видеoinформации, существенно уменьшить скорости передачи по сравнению с известными кодерами (при размерах куба 8 и 16 в 1,5...2 раза, а при размерах 4–16 в 2...3 раза).

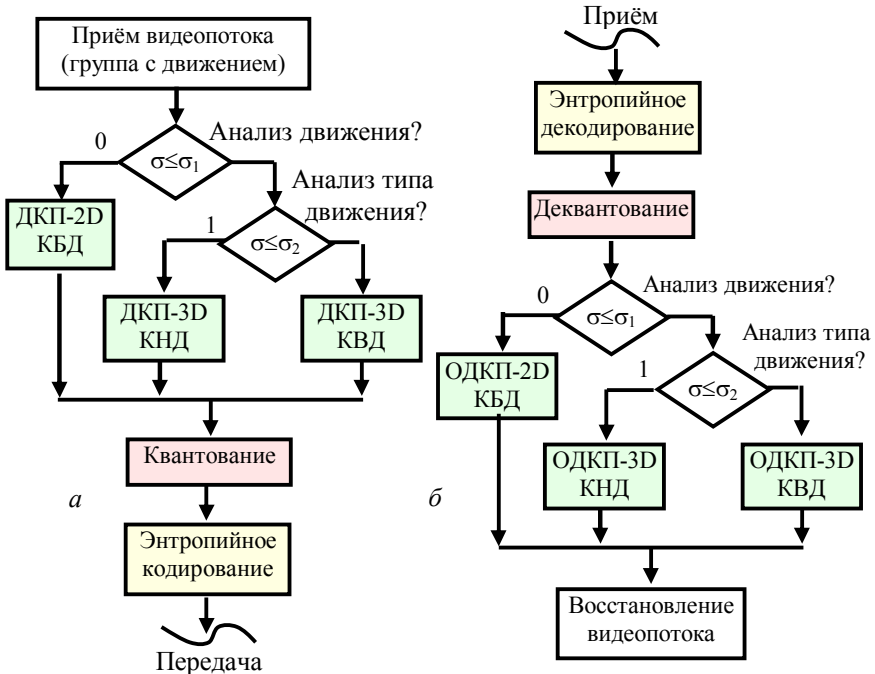


Рисунок 3 – Упрощенные адаптивные алгоритмы формирования видеокубов: а) кодирования и б) декодирования видеoinформации

На основе разработанного метода и алгоритмов ДКП-3D предложен вариант СФ-блока высокоскоростного преобразования элементарного ДКП-3D-видеопотока в элементарный поток MPEG-2 без трудоемких многомерных преобразований отсчетов, позволяющего: а) снизить трафик в глобальных сетях распределения данных; б) перераспределять трафик между двумя видами сетей передачи видеоданных, в которых требуется экономия трафика (глобальные сети Интернет, видео по требованию, спутниковое телевидение, IP-телевидение), и в которых этого ограничения не требуется; в) повышать качество

видео за счет модифицированного обратного ДКП по времени трансформант и формирования из них *Intra*-кадров (с наименьшими потерями) в соответствии со стандартом MPEG-2.

Пространственный метод. Одним из перспективных направлений кодирования изображений является применение триангуляционных методов. Однако, возможности их применения для проектирования высокопроизводительных видеосистем в настоящее время ограничены, во-первых, ввиду отсутствия эффективных алгоритмов поиска опорных точек (ОТ) и, во-вторых, из-за нерегулярности процесса соединения ОТ в треугольники (рис. 4).

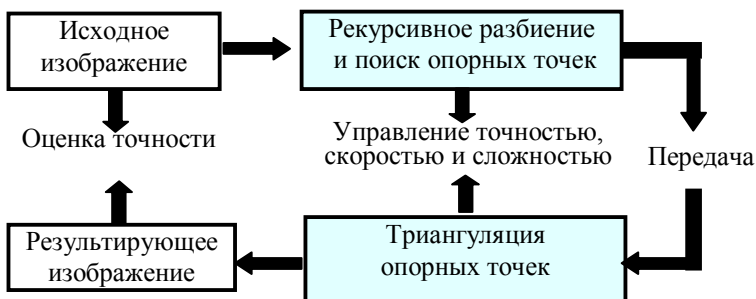


Рисунок 4 – Модель кодирования и декодирования по опорным точкам

Исходя из вышесказанного, в работе решена задача развития триангуляционных методов с использованием пирамидально-рекурсивного подхода в организации процесса поиска ОТ (рис. 5а) и их соединения в треугольники (рис. 5б). Поиск опорных точек осуществляется рекурсивным разбиением изображения на определенное число полигонов. Далее оценивается точность аппроксимации полигонами при условии, что плоскость полигона определяется линейной интерполяцией яркостей в пределах полигона (анализ точности выполняется управлением числа ОТ). Те полигоны, точность аппроксимации которых не удовлетворительна, подлежат дальнейшему разбиению и анализу до тех пор, пока все изображение не окажется покрытым неравномерной полигональной сеткой. Данный метод существенно упрощает построение триангуляции, так как ОТ жестко связаны определенной структурой.

Введение регулярности явилось базой для создания параллельных алгоритмов кодирования и декодирования изображений по ОТ. Обращено внимание на возможность деления

изображения на полигоны различной формы (треугольники, квадраты и прямоугольники). При этом получены сравнительные оценки эффективности их использования.

Осуществлена систематизация алгоритмов кодирования и декодирования по опорным точкам, основанная на признаках: форма полигона, число полигонов после разбиения, расположения ОТ в пределах полигона. Предложено описание совокупности ОТ, ориентированное на решение задачи поиска ближайших соседей ОТ.

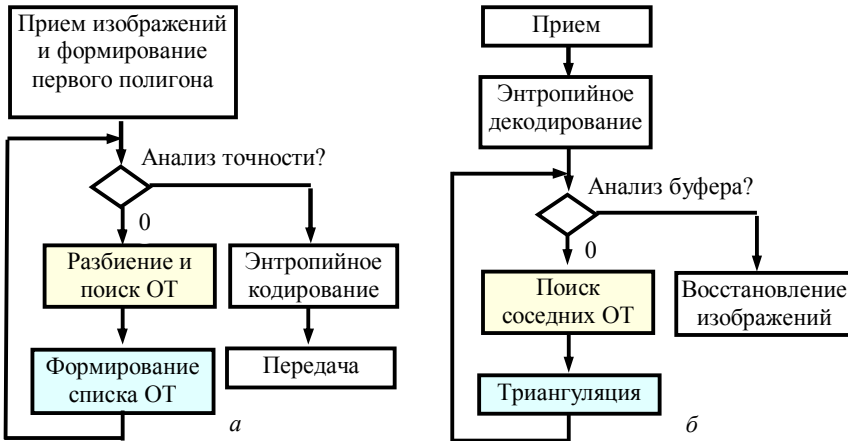


Рисунок 5 – Упрощенные алгоритмы: а) – кодирования, б) – декодирования по опорным точкам

Алгоритмы с произвольным расположением ОТ в пределах полигона обладают более высоким коэффициентом сжатия при меньшем количестве разбиений, однако выявлено, что в процессе восстановления по ОТ возникают те же трудности, что при решении задачи триангуляции из-за нерегулярности связей. Но предложенная регулярная триангуляция характеризуется в 2...3 раза меньшей вычислительной сложностью, чем классический вариант триангуляции.

В работе разработана математическая модель для оптимизации параметров системы кодирования по опорным точкам, позволяющая определить: необходимое число ОТ, количество полигонов после разбиения (трихотомии кодируемого изображения), среднее число операций на точку, объем рабочей памяти, количество пустых полигонов (однородные полигоны, не подлежащие разбиению и не имеющие опорную точку) и т. д.

Применение в работе рекурсивного разбиения изображения на три полигона и последующее восстановление с использованием триангуляции объясняется следующими основными причинами:

- аналитически и экспериментально доказана эффективность трихотомии при кодировании и декодировании сигналов изображений;
- треугольник является простейшим полигоном, вершины которого однозначно задают грани, аппроксимирующие изображение;
- вычислительная сложность $O(n' \log n')$ зависит от n' – числа опорных точек.

В четвертой главе рассмотрены наиболее существенные особенности проектирования смешанных систем на кристалле и, в частности, видеосистем на кристалле при учёте специфики совместного функционирования фотоприёмника и вычислителя с использованием современных САПР на основе технологии «система на кристалле». Разработаны структуры S_nK и VS_nK кодирования и декодирования изображений на основе ДКП-3D и ДПП по опорным точкам.

Распределение площади видеосистемы на кристалле между фотоприемником и вычислителем осуществляется на основе взаимобмена количества получаемой информации и её качества, понимаемого как соотношение скорости создания видеоинформации и количества информации, переданной по каналу. Оптимизация осуществляется исходя из достижения максимума функционала, включающего взвешенную сумму полезной информации и взятой с обратным знаком переданной информации. Принципиальным отличием проектирования видеосистемы на кристалле по сравнению с проектированием операционных устройств кодирования изображений на основе методологии вектора концепции является учёт ряда дополнительных требований и не варьируемых ограничений:

- общей площади кристалла S , распределяемой между площадью S_{ϕ} фотоприёмной секции и площадью S_w вычислительной секции;
- площади s_T вентиля вычислительной подсистемы, определяемой нормой точности изготовления СБИС;
- требуемого (назначаемого) динамического диапазона изменения сигнала пиксела, равного отношению максимального числа электронов Q в пикселе к минимально различимому числу

электронов q . Динамический диапазон обычно определяют не только как отношение этих чисел, но и как двоичный логарифм этого отношения, имеющий смысл числа разрядов АЦП: $m = \log_2 Q/q$.

Таким образом, вектор концепции видеосистемы на кристалле включает совокупность констант $\{c_0, c_1, S, s_r, m\}$. Коэффициент сжатия информации в видеосистеме на кристалле делается управляемым, обеспечивающим изменение скорости передачи и, соответственно, назначаемой ошибки ε . Так как в готовой видеосистеме на кристалле сложность кодера и количество пикселей фотоприёмной секции фиксированы, то при проектировании следует исходить из необходимости обеспечения требуемого качества изображения при минимальном сжатии. При заданной норме точности изготовления СБИС площадь s_r вентиля вычислительной подсистемы равна элементарной площади фотодиода накопления фотоэлектронов, необходимой для накопления минимально различимого числа электронов q . Диапазон изменения интенсивности сигнала Q/q является целой степенью числа 2: $Q/q=2^m$. Тогда скорость создания информации H на выходе фотоприёмной секции (до сжатия изображения в кодере источника) определяется числом элементов в фотоприёмной секции видеосистемы $S_\Phi/s_r 2^m$, и динамическим диапазоном сигнала m , измеряемом в битах на пиксел:

$$H = S_\Phi m / s_r 2^m. \quad (10)$$

Сложность W вычислительной подсистемы видеосистемы на кристалле с учётом ограничения полной площади $S = S_\Phi + S_w$ составит:

$$W = S_w / s_r = (S - S_\Phi) / s_r. \quad (11)$$

Максимизируемый функционал, являющийся критерием информационного качества видеосистемы, запишем в виде

$$P = c_0 H - c_1 R. \quad (12)$$

Для нахождения максимума критерия качества (12) используем величину H_w эпсилон-энтропии с ограничением сложности качества и при скорости передачи R достаточно близкой к H_w^ε . Тогда, формула для взаимобмена сложности кодирования и скорости передачи (5) преобразует функционал (12) к виду:

$$P = c_0 \cdot H - c_1 W \cdot H / (W - H). \quad (13)$$

С учётом выражений (10) и (11) функционал (13) можно преобразовать к виду, содержащему кроме совокупности весовых коэффициентов $\{c_0, c_1\}$ искомую величину S_Φ/S и константу $2^m/m$.

Эта величина имеет смысл отношения площади накопительной ячейки пиксела к площади вычислительной ячейки, обеспечивающей выполнение одной m -разрядной операции над сигналом пиксела:

$$P' = 2^m S / m s_T = c_0 S_{\Phi} / S - c_1 ((S_{\Phi} / S (1 - S_{\Phi} / S)) / (1 - (1 + m / 2^m) S_{\Phi} / S)). \quad (14)$$

Взяв производную $dP'/d(S_{\Phi}/S)$ и приравняв её нулю, получим значение оптимальной площади фотоприёмной секции:

$$S_{\Phi} = \frac{S}{1 + \frac{m}{2^m}} \left(1 - \sqrt{\frac{m}{2^m} \frac{1}{\left(1 + \frac{m}{2^m}\right) \frac{c_0}{c_1} - 1}} \right). \quad (15)$$

Полученная зависимость оптимального соотношения площадей фотоприёмной и вычислительной подсистем в рамках одной видеосистемы на кристалле показывает, что распределение площади целиком определяется вектором концепции видеосистемы на кристалле. При этом требуемая разрядность АЦП влияет на распределение площади значительно слабее, чем отношение весовых коэффициентов c_0 и c_1 при одинаковом количестве и качестве переданной видеоинформации.

Следует отметить, что системный подход требует отказа от старой концепции единственного потока данных между фотоприёмником и вычислителем и перехода к новой концепции распараллеливания потоков видеоинформации не только внутри вычислителя, но и на его входе.

Множественные потоки данных широко применяются в вычислительной технике и используются при построении моделей, структурных схем и алгоритмов кодирования изображений, изложенных ниже.

Подход к задаче распараллеливания ввода видеоинформации в вычислительную подсистему ВСнК должен основываться на максимизации количества и качества видеоинформации. Концептуально он аналогичен рассмотренному ранее распределению площади ВСнК между фотоприёмником и вычислителем. Отличие этих задач состоит в том, что оптимизация структуры ВСнК нацелена на увеличение быстродействия (учитываемое в рамках функционала (13)) и должна осуществляться с учётом согласования структуры вычислителя с варьируемым числом каналов связи фотоприёмного массива с вычислителем. Например, если организован множественный поток данных из фотоприёмного массива с параллельным считыванием n

соседних пикселей (типичное значение n равно 8 для формирования фрагментов при дискретном косинусном преобразовании изображений), то структура вычислителя содержит один процессор без буферного ЗУ. Вычислитель с множественным потоком данных должен работать при той же скорости, что и вычислитель при единственном потоке видеоинформации. Если множественный поток данных будет организован путём параллельного считывания N разнесённых пикселей, то структура вычислителя содержит N процессоров, снабжённых буферными ЗУ, но работающими со скоростью, в m раз меньшей.

В работе разработаны новые архитектурные решения, использующие множественные потоки данных в видеосистемах на кристалле, где стабилизация изображений и высокая чувствительность к смещению изображения и широкий диапазон компенсируемых смещений и ускорений смещения достигается благодаря прямому методу измерения смещения без использования вспомогательных датчиков ускорения (рис. 6).

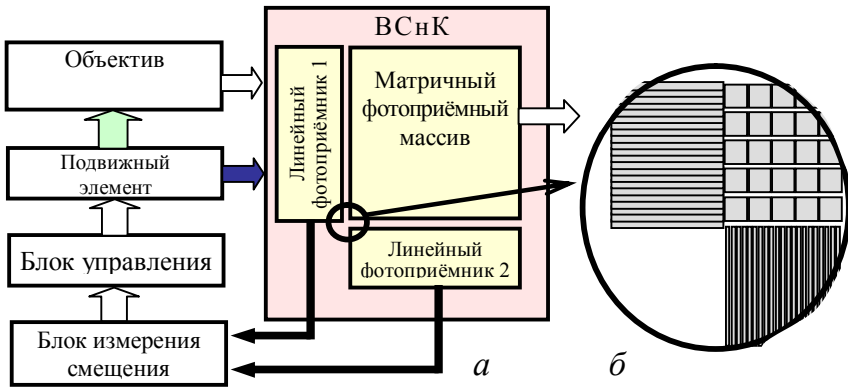


Рисунок 6 – Функциональная схема виброустойчивой системы формирования изображений с использованием СБИС ВСнК с разделением фрагментов формирования основного изображения и а) формирования оценок смещения изображений и б) структура пикселей основного и вспомогательных фрагментов

Предложенный способ распараллеливания ввода видеоинформации из фотоприёмных массивов видеосистем на кристалле в вычислительную подсистему является эффективным средством повышения быстродействия и точности ВСнК, органически дополняющим распараллеливание вычислений. Так как скорость передачи видеоинформации из фотоприёмных

массивов ВСнК является критическим параметром, определяющим быстродействие системы в целом, то использование множественных потоков данных на входе вычислительной подсистемы оказывается принципиально необходимым атрибутом видеосистем на кристалле и их функциональных устройств – СФ-блоков.

В главе разработаны архитектуры видеосистем на кристалле на основе ДКП-3Д с различными степенями адаптации к сюжетам и сложности реализации (рис. 7) и на основе дискретного полигонального преобразования (ДПП) по опорным точкам (рис. 8), характеризующиеся наличием устройства управления точностью, скоростью и сложностью. Разработаны структуры и синтезированы основные элементы и устройства в виде СФ-блоков упомянутых видеосистем и верифицированы с помощью разработанного макета на базе технологии «реконфигурируемая система на кристалле» со встроенным 32-х разрядным процессором.

По сравнению со стандартными алгоритмами кодирования видеoinформации с компенсацией движения, разработанные структуры ДКП-3Д имеют три главных преимущества:

- оценка движения требует существенно меньшего числа операций на пиксел;
- декодер является симметричным кодеру с почти идентичной структурой и меньшей сложностью, что позволяет их объединить в одну СнК;
- простота аппаратной реализации, что является ключевым фактором при реализации мобильных систем сжатия видеосигнала.

Последовательное применение принципа адекватности физической структуры видеосистем пространственно-временной структуре процессов вычислений, реализующее заданный набор операций, дает основание считать, что разработанные архитектуры видеосистем на кристалле являются оптимальными для выполнения сжатия и восстановления изображений как на основе ДКП, так и на основе ДПП по опорным точкам.

Таким образом, в этой главе получены следующие основные результаты:

- разработаны функциональные схемы многопроцессорной системы с учетом максимальной возможности распараллеливания алгоритмов кодирования и декодирования по опорным точкам;

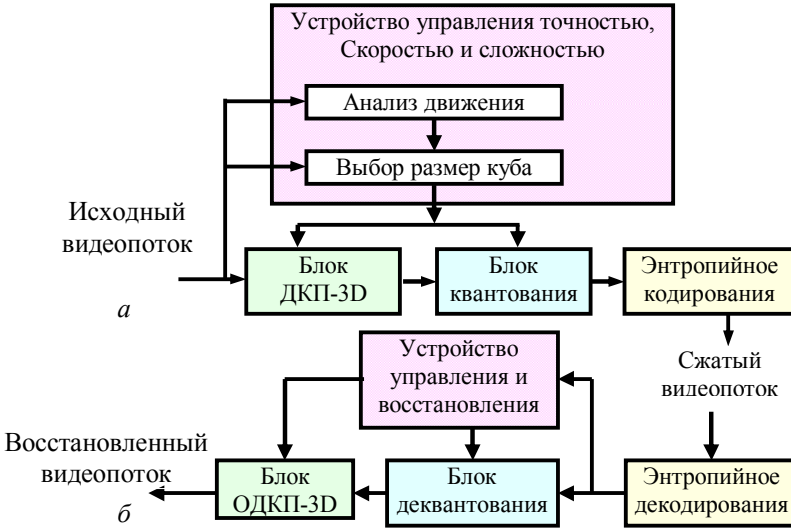


Рисунок 7 – Структурная схема SnK кодирования а) и Декодирования б) на основе ДКП-3D

Информационные параметры видеосистемы на кристалле

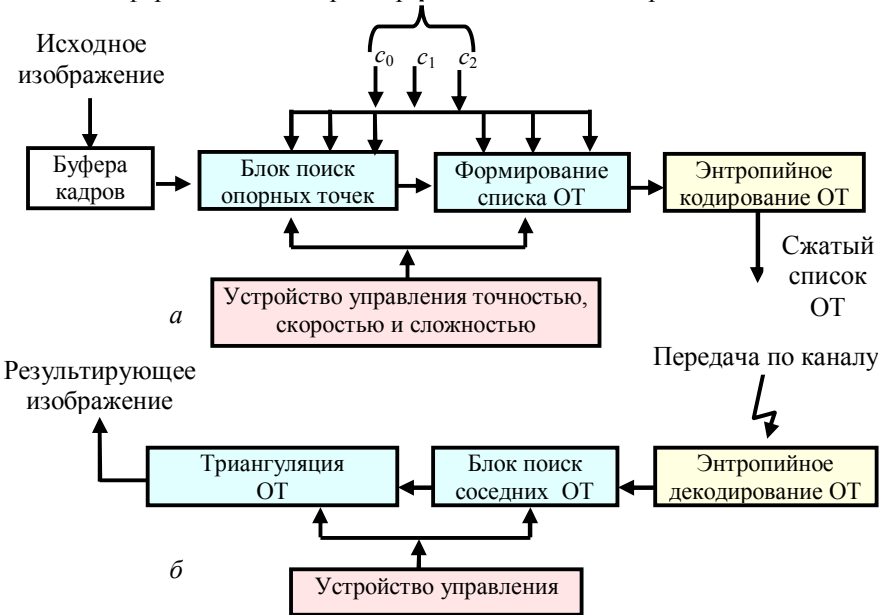


Рисунок 8 – Структурная схема SnK а) кодирования и б) декодирования изображений на основе ДПТ по ОТ

- разработана методика проектирования видеосистем на кристалле, включающая оптимальное распределение площади кристалла между фотоприёмной и вычислительной подсистемами, и определяемая вектором концепции ВСнК;
- разработан лабораторный стенд на базе технологии «реконфигурируемая система на кристалле», позволяющая аппаратно-программную отладку и прототипирование проектов СФ-блоков СнК и ВСнК;
- осуществлен расчет производительности видеосистем реального времени для разработанных методов кодирования.

Материал пятой главы посвящён подтверждению корректности принятых при разработке теории моделей и гипотез, для чего разработана методика оценки алгоритмов кодирования и декодирования, проведены экспериментальные исследования разработанных методов и оценена их эффективность по предложенному критерию (2) на компактной представительной выборке изображений, сформированной с учётом их нестационарности и широкополосности.

Наглядное представление взаимоотношения скорости и сложности, соответствующего формуле (5), может быть дано номограммой (рис. 9).

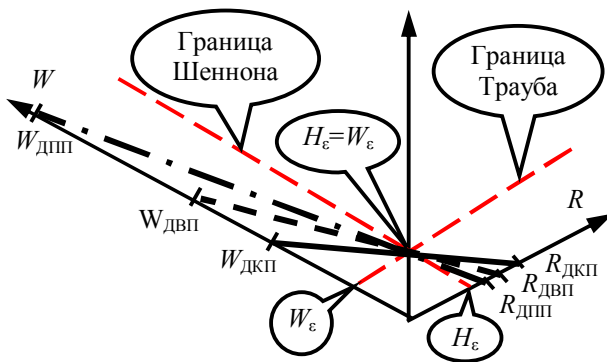


Рисунок 9 – Номограмма сложности W и скорости передачи R изображений для различных методов кодирования источника

Анализ номограммы показывает, что численные значения скорости передачи и сложности кодирования в эксперименте хорошо совпадают с предложенным функционалом (5): линии, соединяющие сложность и скорость передачи для каждого из

методов кодирования пересеклись в одной точке на вертикальной оси номограммы, которая соответствует эpsilon-энтропии кодера источника.

Выбор того или иного способа кодирования непрерывного источника означает выбор конкретного вектора концепции системы, то есть соотношения коэффициентов c_1 и c_2 в критерии (3), а выбор назначаемой ошибки означает выбор отношения коэффициента c_0 при потере полезной информации к коэффициентам c_1 и c_2 . Взаимообмен скорости передачи и сложности при фиксированной ошибке передачи представлен в таблице, в которой каждому из рассмотренных способов кодирования непрерывного источника (ДВП- дискретное вейвлет преобразование, ТрК- триангуляционное кодирование, ПКЛ-преобразование Карунена–Лоэва) сопоставлено соответствующее значение соотношения весовых коэффициентов c_1 и c_2 в критерии (3).

Таблица – Скорость передачи и сложность кодера при различных методах кодирования

Метод	Относительная скорость передачи	Относительная сложность	c_1/c_2
ДКП	1,62	1	2,6
ДВП	1,5	1,5	4
ДПП	1,25	3,5	16
ТрК	1,1	10	100
ПКЛ	1	∞	∞

Ранжирование всех изображений по нестационарности и широкополосности позволило выбрать девять изображений, которые составили компактную представительную выборку сюжетов. При практической реализации алгоритмов кодирования и декодирования изображений на основе предложенных спектрального и полигонального методов была исследована взаимосвязь трех величин: ошибки передачи, скорости передачи и сложности кодера.

В соответствии с теоретическим трёхмерным графиком (рис. 2) эксперименты на представительной выборке сюжетов показали (рис. 10), что уменьшение назначаемой ошибки при любом методе ведёт и к увеличению скорости передачи при фиксированной сложности устройства кодирования, и к увеличению сложности кодера при фиксированной скорости передачи.

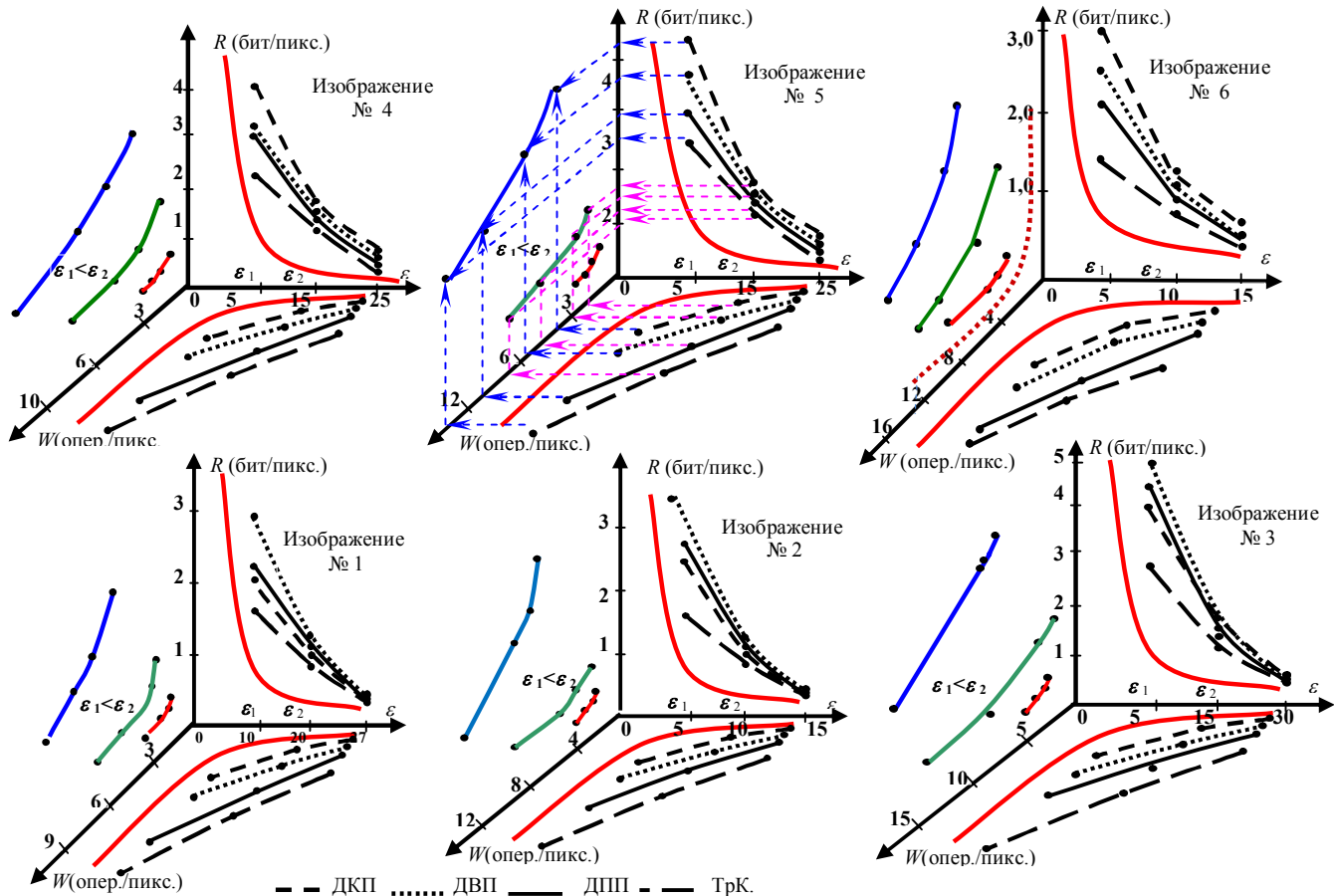


Рисунок 10 – Результаты экспериментов и области применения кодеров: изображения 1-3 с малой степенью нестационарности; изображения 4-6 с большой степенью нестационарности

Таким образом, стремление к передаче информации максимального качества при сжатии непрерывного зашумлённого сигнала в соответствии с формулой (9) ведёт, во-первых, к необходимости учёта потенциального количества информации в передаваемом непрерывном зашумлённом сигнале, и, во-вторых, к тому, что вектор концепции в критерии (3) не должен назначаться произвольно, а учитывать требование $c_0 > (\sqrt{c_1} + \sqrt{c_2})^2$.

Экспериментальные исследования показали, что дискретно-полигональное преобразование не только ценой почти трехкратного усложнения кодера позволяет снизить скорость передачи на 30% по сравнению с вейвлет-кодированием (ДВП), но и обеспечивает в среднем скорость передачи на 25% большую, чем энтальпия кодирования изображения.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили допустимость принятых при разработке теории, моделей и гипотез.

В заключении поясняется общность решенных задач, обеспечивающая внутреннее единство диссертации, и опирающаяся на введение нового понятия информационной эффективности устройств кодирования непрерывных источников изображений, учитывающей не только эффективность сжатия сигналов, но и затраченную для этого сложность устройства. Показана значимость опоры на учёт сложности устройств кодирования непрерывных источников изображений для реализации СФ-блоков систем на кристалле и видеосистем на кристалле. Отмечаются результаты, полученные самостоятельно и в соавторстве.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно-технической проблемы разработки теоретических основ и прикладных методов системного проектирования устройств кодирования видеоинформации в прикладных системах, получены следующие основные результаты:

1. Обосновано проведение системного проектирования устройств кодирования на основе триады: предложенного критерия эффективности кодера, включающего взвешенную сумму потери полезной информации, скорости передачи и сложности; введённого

понятия эpsilon-энтропии с ограничением сложности и предложенного функционала взаимнообмена скорости передачи и сложности.

2. Обосновано существование оптимальной потери информации и ошибки передачи зашумленных непрерывных сигналов, определяемых соотношением компонентов вектора концепции системы.

3. Обосновано распределение площади кристалла между фотоприёмной и вычислительной подсистемами с учётом формализованного взаимнообмена скорости передачи непрерывного сигнала и сложности кодера.

4. Показано, что ценой увеличения вычислительной сложности кодера в 2,8 раза метод дискретного пространственного преобразования позволяет на 15% лучше для большинства изображений представительной выборки, чем дискретное косинусное преобразование приблизиться к эpsilon-энтропии источника.

5. Показано, что применение метода кодирования источника на основе ДПП по опорным точкам (без перехода в спектральную область) позволяет достичь лучшей эффективности кодирования для класса изображений с большой мерой нестационарности изображений по сравнению с ДКП (до 1,4 раза), и по сравнению с вейвлет кодированием (до 1,2 раза).

6. Показано, что применение метода трихотомии в ДПП позволяет на 20% сократить вычислительные затраты по сравнению с известными алгоритмами на основе дихотомии и тетрахотомии.

7. Разработан способ адаптации с переменными размерами пространственных и временных интервалов вычисления ДКП-3D (в диапазонах от 4 до 32 пикселей видеокуба и от 4 до 128 кадров), позволяющий уменьшить вычислительную сложность на 4 порядка меньше, чем у кодеров и на 2...3 порядка меньше, чем у декодеров, реализованных по стандартам MPEG.

8. Получена аналитическая модель для определения оптимальных параметров систем кодирования нестационарных изображений по опорным точкам.

9. Показано, что использование адаптивного метода кодирования нестационарных изображений на основе ДПП по опорным точкам с однородной компактной структурой данных позволяет в 2...3 раза увеличить скорость построения

триангуляции на этапе декодирования и восстановления сжатых видеоданных.

10. Разработана специализированная СБИС в виде СФ-блока преобразования видеоконтента, который обеспечивает совместимость предложенного адаптивного ДКП кодера со стандартными протоколами обмена видеoinформацией. Этот блок позволяет снизить трафик почти в два раза для видео стандартного разрешения и, примерно, в 1,4 раза для видео высокой четкости.

Разработанная методика концептуального проектирования устройств кодирования непрерывных источников изображений на основе введённого обобщённого показателя эффективности кодера (3) и взаимнообмена скорости передачи и сложности кодера (5) позволяет формализовать начальный этап проектирования, особенно актуальный при реализации кодеров в виде СБИС и СФ-блоков систем и видеосистем на кристалле.

Совокупность проведенных теоретических и экспериментальных исследований и полученных новых научных и практических результатов показывает, что поставленная в диссертационной работе актуальная проблема разработки теоретических основ и прикладных методов проектирования устройств телекоммуникации и вычислительной техники в базисе элементов функциональной микроэлектроники, предназначенных для кодирования сигналов изображений решена.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Монографии

1. Твердотельная революция в телевидении [Текст]: монография / Ш. С. Фахми [и др.]; под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина - М.: Радио и связь, 2006. – 310 с.

2. Фахми, Ш. С. Проектирование устройств обработки сигналов на основе технологии «система на кристалле» [Текст]: монография / Ш. С. Фахми, В. В. Березин. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – 144 с.

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ

3. Фахми, Ш. С. Адаптивный алгоритм кодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного

преобразования [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 1.- С. 49–54.

4. Фахми, Ш. С. Аппаратно-программное проектирование сложных функциональных блоков с использованием систем на кристалле [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин, С. С. Шагаров // Науч. тех. вестник СПбГУ ИТМО. – 2010.- № 2(66).- С. 90-98.

5. Фахми, Ш. С. Сопряженное проектирование на базе реконфигурируемых систем на кристалле [Текст] / Ш. С. Фахми, Е. В. Костикова // Информационно-управляющие системы.- 2010.- № 3.- С. 38-43.

6. Фахми, Ш. С. Классификация нестационарных изображений и разработка методики оценки алгоритмов кодирования источника [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин // Науч. тех. вестник СПбГУ ИТМО.- 2010.- № 2(66).- С. 54- 59.

7. Фахми, Ш. С. Адаптивные алгоритмы кодирования видеoinформации [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин, С. С. Шагаров // Приборы.- 2010.- № 4.- С. 28–31.

8. Фахми, Ш. С. Аналитическая модель оценки степени приближения к энтальпии на основе пирамидально-рекурсивного метода кодирования изображений [Текст] / Ш. С. Фахми // Вестник ТОГУ.- 2010.- № 1 (16).- С. 32-44.

9. Фахми, Ш. С. Отладка аппаратно-программного обеспечения реконфигурируемых систем на кристалле [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Березин, Р. Н. Золотуха // Компоненты и технологии.- 2003.- № 7.- С. 118-122.

10. Фахми, Ш. С. Специализированная СБИС преобразования видеоданных [Текст]/ Ш. С. Фахми, А. А. Умбиталиев, Н. Н. Шпилов, С. М. Ибатуллин // Науч. тех. вестник СПбГУ ИТМО.- 2010.- № 4(68).- С. 84-88.

11. Фахми, Ш. С. Развитие триангуляционного подхода для кодирования и декодирования нестационарных изображений [Текст] / Ш. С. Фахми // Вестник ТОГУ.- 2010.- № 3 (18).- С. 81–90.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

12. Патент РФ № 2384987. Способ стабилизации изображений [Текст]/ Фахми Ш. С., Цыцулин А. К., Переспелов А. В. // Оpub. 20.03. 2010 Б.И. № 8.

13. Патент РФ № 2375838. Способ кодирования и декодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования [Текст]/ Фахми Ш. С., Ибатуллин С. М., Ибатулин В. Ф., Иванов К. В., Шипилов Н. Н., Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К.//Опуб. 10.12. 2009, Б. И. № 34.

14. Заявка РФ на изобретение № 2009143443. Способ распространения и транскодирования видеоконтента [Текст]/Фахм и Ш.С., Умбиталиев А. А., Шипилов Н. Н, Ибатуллин С. Н. // приоритет 24.11.2009. Решение о выдаче патента на изобретение от 08.09.2010.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007613644 Пирамидальное кодирование изображений по опорным точкам / Ш. С. Фахми - зарег. в Реестре программ для ЭВМ 27.08.2007.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615181 Трехмерная генерация изображений по опорным точкам 3D TV CODER v. 1.0 / Ш. С. Фахми - зарег. в Реестре программ для ЭВМ 28.10.2008.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009615442. Кодер изображений на основе триангуляции CTV-RI / Ш. С. Фахми - зарег. в Реестре программ для ЭВМ 01.10.2009.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613202. Рекурсивный триангуляционный кодек НИТ RT. / Ш. С. Фахми - зарег. в Реестре программ для ЭВМ 14.05.2010.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614956. Классификатор нестационарных изображений НИТ ИК / Ш. С. Фахми –зарег. в Реестре программ для ЭВМ 29.07.2010.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614957. Адаптивный пространственный кодер изображений НИП ДПП-3 / Ш. С. Фахми - зарег. в Реестре программ для ЭВМ 29.07.2010.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615390. Кодек изображений на основе адаптивного двумерного дискретного косинусного преобразования НИП А 2DCT / Ш. С Фахми - зарег. в Реестре программ для ЭВМ 20.08.2010.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615985. Аппаратно-программное обеспечение системы на кристалле для быстродействующей передачи изображений/ В. В. Березин, В. В. Бородулин, А. В. Зенкевич, А. Г. Шоберг, Ш. С. Фахми. - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2010.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007614093. Подсистема автоматизации триангуляционного кодирования и декодирования видео информации/ Ю. Т. Лячек, А. И. Ларистов, Ш. С. Фахми - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.07.2009.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610552. Полигональное кодирование видеоинформации / В. В. Березин, Ш. С. Фахми. - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30.01.2008.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20086615872. Высокопроизводительный кодек на основе дискретного косинусного преобразования/ Ш. С. Фахми, С. М. Ибатуллин, В. Ф. Ибатулин, Н. Н. Шипилов, А. А. Умбитлиев - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2010.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009612326. Программное обеспечение видеосистемы на кристалле в составе беспроводной камеры / В. В. Березин, В. В. Бородулин, Ш. С. Фахми. - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.03.2009.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614479. Дискретное косинусное преобразование видеосигнала НИТ VCS 3D-DCT / Н. Н. Шипилов, Ш. С. Фахми. - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17.09.08.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007613740. Пирамидально-рекурсивное кодирование видеоинформации Video Coder RT v 1.0 / А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин, Ш. С. Фахми. - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.09.07.

Статьи в трудах зарубежных конференций

29. Sh. S. Fahmi, S. M. Ibatullin, V. F. Ibatulin, K. V. Ivanov, A. A. Umbitaliev, N. N. Shipilov, A. K. Tsytulin. A versatlie real time video codec based on three-dimensional discrete cosine transform. IBC

2008, RAI International Congress and Exhibition Centre Amsterdam. The Netherlands. Conference 11-15 September 2008. PP. 386–391.

Прочие статьи и материалы конференций

30. Фахми, Ш. С. Пирамидально-рекурсивная обработка изображений [Текст] / Ш. С. Фахми, А. И. Ларистов // Изв. ЛЭТИ. – 2006. – Вып. 5. – С 3-9 с.

31. Фахми, Ш. С. Физическое прототипирование цифровых устройств обработки сигналов на системном уровне [Текст] / Ш. С. Фахми // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2009. – Вып. 2. – С. 118-129.

32. Фахми, Ш. С. Проектирование цифровых устройств обработки сигналов на базе технологии «система на кристалле» [Текст] / Ш. С. Фахми // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Инф., упр. и комп. технол. – 2009. – Вып. 5. – С. 23-32.

33. Фахми, Ш. С. Обзор методов кодирования и декодирования изображений [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2008. – Вып. 1. – С. 13-41.

34. Фахми, Ш. С. Алгоритм сжатия и восстановления изображений методом деления на треугольники [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Шах, В. К. Шмидт // Изв. СПбГЭТУ. – 1993. – Вып. 448. – С. 5-15.

35. Фахми, Ш. С. Полигональная рекурсивная обработка видеоинформации [Текст] / Ш. С. Фахми // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2008. – Вып. 1. – С. 42-51.

36. Фахми, Ш. С. Кодирование и декодирование видеоинформации [Текст] / Ш. С. Фахми // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2007. – Вып. 2. – С. 43-51.

37. Фахми, Ш. С. Оценка степени приближения к энтропии на основе пирамидально-рекурсивного метода кодирования изображений [Текст] / Ш. С. Фахми // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – Вып. 4. – С. 8-17.

38. Фахми, Ш. С. Кодирование видеосигналов [Текст] / Ш. С. Фахми // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Инф., упр. и комп. технол. – 2007. – Вып. 3. – С.34-40.

39. Фахми, Ш. С. Решения уравнения связи [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин, А. К. Цыцулин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2008. – Вып. 2. – С. 3-22.

40. Фахми, Ш. С. Алгоритм сжатия изображений с предсказанием по ОТ [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Шах, В. К. Шмидт; ЛЭТИ. -Л., 1991. - 30 с. - Деп. в ВИНТИ 04.02.91, № 523-B91.

41. Шакиб Ф. Оценка степени сжатия изображений с использованием рекурсивного метода разбиения [Текст] / Ф . Шакиб, В. В. Шах, В. К. Шмидт // Изв. СПбГЭТУ. – 1993. - Вып. 462. - С. 54-65.

42. Фахми, Ш. С. Алгоритм сжатия и восстановления изображений с пирамидально-рекурсивной структурой данных [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Шах, В. К. Шмидт; СПбГЭТУ. - СПб., 1993. - 10 с. - Деп. в ВИНТИ 11.02.93, № 350-B93.

43. Фахми, Ш. С. Аналитическая модель оценки эффективности кодирования по опорным точкам [Текст] / Ш. С. Фахми // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2006. – Вып. 5 – С. 10-15.

44. Фахми, Ш.С. Начальный этап проектирования кодера источника непрерывного сигнала [Текст] / Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин, А. К. Цыцулин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2010 - Вып. 2. - С. 17-32.

45. Фахми, Ш.С. Сложно-функциональный блок транскодирования видеоконтента [Текст] / Ш.С. Фахми, А. А. Умбиталиев, Н. Н. Шипилов, С. М. Ибатуллин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2010 - Вып. 2. - С. 75-82.

46. Фахми, Ш. С. Использование возможностей контроллера динамической памяти как составной части “системы на кристалле” [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Березин // Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий: межвуз. сб. науч. работ СЗТУ СПб.: Изд-во СЗТУ, 2004.- Вып. 9. - С. 213–225.

47. Фахми, Ш.С. Методическое сопровождение процесса проектирования цифровых устройств обработки сигналов [Текст] / Ш.С. Фахми, В.В. Березин // Современные технологии обучения: матер. X Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во СПбГЭТУ ”ЛЭТИ”, 2004. С. 125–127.

48. Фахми, Ш.С. Внедрение в учебный процесс дисциплин кафедры САПР основ проектирования для устройств класса «система на кристалле» [Текст] / Ш.С. Фахми, В.В. Березин // Современные технологии обучения: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во СПбГЭТУ ”ЛЭТИ”, 2005. С. 29–31.

49. Фахми, Ш. С. Перспективы отечественных видеосистем на кристалле [Текст] / Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин // Телевидение: передача и обработка изображений: матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2008. С. 11–13.

50. Фахми, Ш. С. Отладка аппаратно-программного обеспечения реконфигурируемых видео систем на кристалле [Текст] / Ш. С. Фахми // Современное образование: содержание, технологии, качество: матер. XIV Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. С. 128.

51. Фахми, Ш. С. Влияние шага квантования косинусного преобразования на качество восстановленных видеоданных [Текст] / Ш. С. Фахми, Ю. Т. Лячек // Марийский гос. тех. ун-т.: сб. матер. всероссийской науч.-практич. конф. с междунар. участием. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского гос. тех. ун-та, 2009. Том 1. С. 42–46.

52. Фахми, Ш. С. Анализ архитектур устройств класса «видеосистем на кристалле» [Текст] / Ш. С. Фахми, Д. А. Заверженец, А. К. Цыцулин, И. А. Зубакин. // Современное образование: содержание, технологии, качество: матер. XV Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. С. 143–145.

53. Фахми, Ш. С. Новые архитектурные решения в видеосистемах на кристалле [Текст] / Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин // Распознавание 2010: сб. матер. IX Междунар. конф. Курск: Изд-во КГТУ, 2010. С. 112–114стр.

54. Фахми, Ш. С. Пирамидально-рекурсивный метод в задачах кодирования и декодирования нестационарных сигналов изображений [Текст] / Ш. С. Фахми // Распознавание 2010: сб. матер. IX Междунар. науч.-техн. конф. Курск: Изд-во КГТУ, 2010. С. 175–177.

Соискатель

Ш. С. Фахми