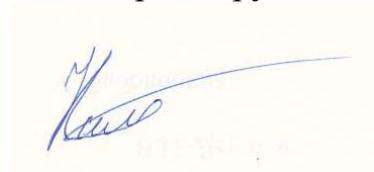


На правах рукописи



Каменский Андрей Викторович

Рекурсивно-сепарабельные методы и алгоритмы повышения
качества изображений в телевизионных измерительных системах

Специальность 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Курячий Михаил Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск.

Официальные оппоненты: **Сай Сергей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительной техники ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск;

Мотыко Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и видеотехники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск.

Защита состоится 23 декабря 2019 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/c05xfegd>

Автореферат разослан «___» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из реальностей современной жизни человека является широкое распространение телевизионных систем видеонаблюдения в различных сферах жизнедеятельности человека, также неотъемлемой частью роста их количества является и увеличение разрешения формируемых изображений, в том числе, и в телевизионных измерительных системах видения в сложных условиях окружающей среды (туман, дымка, пыль, снегопад и т.д.).

При получении видеоданных в телевизионных измерительных системах не всегда удается добиться требуемого качества выходного изображения, поскольку на него могут оказывать влияние различные факторы, возникающие в процессе получения, передачи и хранения видеоданных. Их можно условно разделить на три следующие группы:

- факторы окружающей среды;
- использование реального оборудования;
- шумы и помехи, возникающие в процессе передачи информации.

Все эти факторы вносят свой вклад в неоднородность получаемого изображения и ухудшают его качество, что ведет к потере разрешения и уменьшению отношения сигнал/шум. Окружающая среда может влиять различными погодными факторами на получаемые изображения (снег, туман, дождь яркое слепящее солнце и т.д.), реальное оборудование может приводить к различным типам аберраций в сформированном изображении и, соответственно, шумы и искажения возникающие на изображении в процессе передачи данных снижают его качество.

Шумы представляют собой важную проблему в современной науке и технике, поскольку они определяют нижние пределы точности измерений, так и величины сигналов, которые могут быть достоверно обработаны. Зашумленное изображение от видеокамеры становится еще менее качественным при уменьшении освещенности объекта, а также при использовании регулировки усиления видеосигнала.

Цифровые изображения подвержены воздействию различных искажений, которые могут появиться в зависимости от способа получения изображений или способа передачи информации, а также и методов оцифровки видеоданных. Соответственно, в цифровой обработке изображений решаются задачи обработки изображений с целью обеспечения их хранения, передачи, визуализации в электронном виде и последующего анализа заложенной в них информации.

Более важными факторами при использовании цифровой обработки изображений являются быстродействие и эффективность при обработке и анализе видеоданных. Цифровая обработка изображений считается стремительно прогрессирующей и развивающейся областью науки и техники. Исследование и разработка методов и алгоритмов обработки и анализа видеoinформации, представленной в виде цифровых изображений, является актуальной задачей в современной науке.

В мире многими учеными проводятся исследования в области не только

обработки изображений, но и уменьшения вычислительных затрат на нее. При этом широкое распространение получают видеосистемы, которые работают в режиме реального времени, что делает необходимым уменьшение вычислительных затрат при сохранении эффективности алгоритмов фильтрации изображений.

Исследования процессов обработки изображений с уменьшением вычислительных затрат проводят многие отечественные и зарубежные ученые, такие как Н.И. Красильников, В.С. Титов, А.К. Цыцулин, И.Л. Балусов, В.В. Мясников, Д.А. Никитин, В.А. Филимонов, В.В. Сергеев, В.А. Величкин, О.И. Захожай, М Чобану, R.C. Gonsales, R.E. Woods, Л. Рабинер, В. Honaravir, R.M. Palenichka, S. Ehsan, R.A. Almahdi, S. Maheswaran, B.D. Anderson, T.S. Huang, K. Sugimoto, G. Chaurasia, A. Attanasi.

Однако некоторые задачи в обозначенном выше направлении остаются нерешенными. Во многих работах используется только свойство рекурсивности при реализации обработки изображений. Также, по большей части, обработка изображений производится в целом без учета распределения разрешения по полю изображения.

Цель диссертационного исследования – повышение эффективности и быстродействия двумерной обработки изображений за счет использования адаптивной внутрикадровой фильтрации с применением рекурсивно-сепарабельных алгоритмов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести разработку и реализацию быстродействующих рекурсивно-сепарабельных алгоритмов повышения разрешения телевизионных изображений.
2. Провести экспериментальные исследования по оценке эффективности разработанных алгоритмов.
3. Исследовать процесс распределения разрешения по полю изображения для построения адаптивных внутрикадровых алгоритмов.
4. Разработать метод фильтрации по зонам на изображении с учетом распределения разрешению по его полю.
5. Определить оптимальные коэффициенты фильтрации в различных зонах обработки изображения, по критерию предельного разрешения формирователя изображения.
6. Разработать программные модули внутрикадровой адаптивной фильтрации изображения по заданным областям с измерением характеристик их разрешения.

Научная новизна

1. Впервые разработаны быстродействующие рекурсивно-сепарабельные алгоритмы повышения качества изображений (лапласиан “усеченная пирамида” и лапласиан “двойная пирамида”), позволяющие увеличить их четкость.
2. Впервые для разработанных фильтров предложен метод определения оптимальных коэффициентов обработки изображений, которые повышают эффективность их использования в телевизионных измерительных системах.
3. Разработан метод адаптивной внутрикадровой позонной обработки

изображений с применением оптимальных коэффициентов фильтрации, отличающийся повышенной эффективностью обработки изображений по полю их разрешения.

Теоретическая значимость

1. Предложен метод вычисления распределения разрешения по полю изображения.

2. Разработаны варианты рекурсивно-сепарабельной реализации алгоритмов фильтрации изображений.

3. Определены оптимальные коэффициенты для адаптивной внутрикадровой позонной фильтрации изображений.

Практическая значимость

1. Полученные результаты в реализации рекурсивно-сепарабельных методов и алгоритмов повышения качества изображений позволяют получить выигрыш от 5 до 7 раз в быстродействии при их программно-аппаратной реализации, то есть существенно уменьшить вычислительные затраты на выполнение заданного процесса обработки.

2. Результаты работы позволяют разработать эффективные программно-аппаратные устройства для повышения качества изображений, в том числе за счет определенных оптимальных коэффициентов фильтрации.

3. Разработан метод описания процесса распределения разрешения по полю изображения и на основании его представлены примеры позонной обработки изображений, а также получены для них оптимальные коэффициенты фильтрации.

4. Представлен способ оценки распределения разрешения по полю изображения, который позволил выполнять более эффективный процесс их фильтрации.

5. Разработаны программные модули для обработки и анализа изображений («MIR: Множественное измерение разрешения», «SFI: Построчная фильтрация изображений»), которые позволяют выполнять эффективную высокопроизводительную адаптивную внутрикадровую обработку изображений.

6. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении НИР (госзадания, грант РФФИ, хоздоговор) и учебном процессе университета.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе используются методы цифровой обработки изображений, математической статистики, методы рекурсивной и сепарабельной реализации алгоритмов фильтрации. Использованы методы исследования, заключающиеся в получении оптимальных параметров обработки изображений и характеристик использованных фильтров.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанные рекурсивно-сепарабельные алгоритмы с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры (в частности, лапласианы “усеченная пирамида” и “двойная пирамида”) для повышения качества телевизионных изображений большой размерности, позволяют сократить количество вычислительных операций от 5 до 7 раз в зависимости от

используемого алгоритма, что позволяет получить выигрыш в быстродействии при сохранении эффективности обработки изображения.

2. Полученные оптимальные значения коэффициентов двумерной апертурной коррекции для фильтров (лапласианы “усеченная пирамида” и “двойная пирамида”), позволяют повысить эффективность обработки изображений в 2,5-3,5 раза, за счет приближения к предельному разрешению системы формирования изображений по контрастно-частотным характеристикам.

3. Предложенный метод множественного измерения разрешения по полю изображения с их последующей адаптивной внутрикадровой фильтрацией, позволяет повысить эффективность обработки по полю за счет применения различных коэффициентов фильтрации, сокращая разницу в разрешении между различными зонами в 4 раза.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов высока, так как основана на использовании сертифицированного программного обеспечения, согласованности результатов аналитической оценки и экспериментальных исследований, высокой повторяемости результатов.

Использование результатов исследования

1. «Повышение качества изображений в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах при сложных условиях контроля и наблюдения» (проект № 7.1241.2011), в рамках Госзадания «Наука 2012-2014 гг.».

2. «Исследование и разработка методов и средств повышения качества изображений в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах видения в сложных метеоусловиях и малопрозрачных средах» (код проекта 3643), в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России 2014/225.

3. «Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения комплексной безопасности объектов», грант РФФИ по научному проекту 16-47-700939.

4. «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (шифр проекта 8.9562.2017/БЧ).

5. «Цифровой управляемый видеодатчик и телекоммуникационная система передачи видеоданных для автоматизированного анализа параметров производственного процесса», научно-исследовательская работа по теме «Распознавание объектов на поверхности расплава на основе данных видеопотока», по договору №18/18 с АО «Монокристалл», г. Ставрополь.

6. Дисциплина «Измерительное телевидение», предусмотренная учебным планом подготовки бакалавров по направлению 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Аудиовизуальная техника») и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Цифровое телерадиовещание»).

Апробация результатов исследования

Результаты исследования доложены и обсуждены на следующих 11 международных научных конференциях.

1. Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», Томск, ТУСУР, 2019.

2. XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР, 2018.

3. XIV Международная научно-техническая конференция «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание 2018», Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018.

4. Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018», Томск, ТУСУР, 2018.

5. XIII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР, 2017.

6. XXII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия – ТУСУР», посвящённая 55-летию вуза, Томск, ТУСУР, 2017.

7. X Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)) проводится под эгидой Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Омск, 2016.

8. XVII Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM-2016, Эрлагол (Алтайский край), НГТУ, 2016.

9. XI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР, 2015 .

10. XII Международная научно-техническая конференция «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание 2015», Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015.

11. XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2015), Омский государственный технический университет Омск, 2015.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 27 работ (7 работ без соавторов): 4 статьи в журнале из перечня ВАК, 19 докладов в трудах международных конференций, 2 доклада в трудах всероссийских, конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Результаты диссертационной работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии. Автору принадлежит основная роль в получении результатах работ. Личный вклад автора в публикациях, выполненных в соавторстве: разработка рекурсивно-сепарабельных алгоритмов, проведение экспериментальных исследований, выявление оптимальных коэффициентов фильтрации, анализ и обобщение

полученных результатов [1, 12, 14]; проведение экспериментальной оценки характеристик изображений, а также анализ и обобщение полученных результатов [2, 8, 9, 17, 24, 25]; разработка и исследование методов обработки изображений для повышения их качества, проведение эксперимента, анализе и интерпретация полученных результатов [4, 5–7, 10, 11, 15, 16, 18]; формулировка задач, описание методик, обсуждение результатов и разработках лабораторных практикумов по дисциплинам [19–23].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 161 страницу, включая 63 рисунка и 30 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика диссертационной работы.

В разделе 1 проведен аналитический обзор литературы, описаны принципы формирования изображения в оптической системе и факторы влияющие на разрешение сформированного изображения. Приведено описание работы различных алгоритмов обработки изображений. Определены основные задачи, решаемые такими алгоритмами, их преимущества, недостатки и потенциальные возможности. В работе осуществлялся анализ эффективности обработки по оценке разрешения обработанного изображения по формуле:

$$ТВЛ = (CPR/0.5) \times \text{"Предельное разрешение в ТВЛ"} \quad (1)$$

здесь CPR - число "циклов на пиксель", "Предельное разрешение в телевизионных линиях (ТВЛ)" - разрешение, при котором одна линия приходится на один пиксель (вернее, число линий равно числу пикселей, 0,5 циклов/пиксель). Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В разделе 2 проведена разработка рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений, описанию структурных схем, определения системных функций и разностных уравнений разработанных фильтров. Разработаны двумерные фильтры лапласиан "усеченная пирамида" (ЛУП) и лапласиан "двойная пирамида" (ЛДП).

Для построения рекурсивно-сепарабельных алгоритмов требуются образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы). На рисунке 1 представлены образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы), рисунок 1,а по n_1 -строке (строчный рециркулятор – СР) и рисунок 1,б по n_2 -кадру (кадровый рециркулятор – КР), реализующие соответствующие ортогональные направления обработки "скользящее среднее".

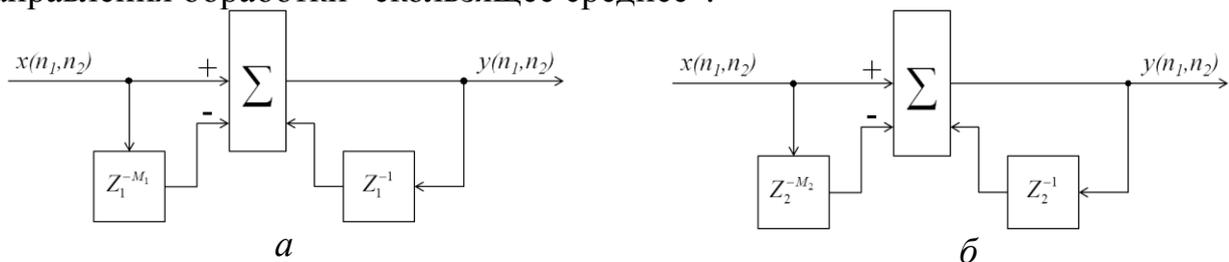


Рисунок 1 – Рециркуляторы: а – по n_1 – строке, б – n_2 – кадру

Разностное уравнение для строчного рециркулятора имеет вид:

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x(n_1 - M_1, n_2) + y(n_1 - 1, n_2), \quad (2)$$

а для кадрового рециркулятора:

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x(n_1, n_2 - M_2) + y(n_1, n_2 - 1). \quad (3)$$

При реализации двумерного цифрового фильтра лапласиан “усеченная пирамида” (ЛУП) получим системную функцию $H_1(z_1, z_2)$, для случая его рекурсивно-сепарабельной реализации в апертуре 7×7 элементов. Так же для данного фильтра приведем структурную схему, представленную на рисунке 2.

$$H_1(z_1, z_2) = -\frac{(1 - z_1^{-5})(1 - z_1^{-3})(1 - z_2^{-5})(1 - z_2^{-3})}{(1 - z_1^{-1})(1 - z_1^{-1})(1 - z_2^{-1})(1 - z_2^{-1})} + 25z_1^{-2}z_2^{-2}\frac{(1 - z_1^{-3})(1 - z_2^{-3})}{(1 - z_1^{-1})(1 - z_2^{-1})}, \quad (4)$$

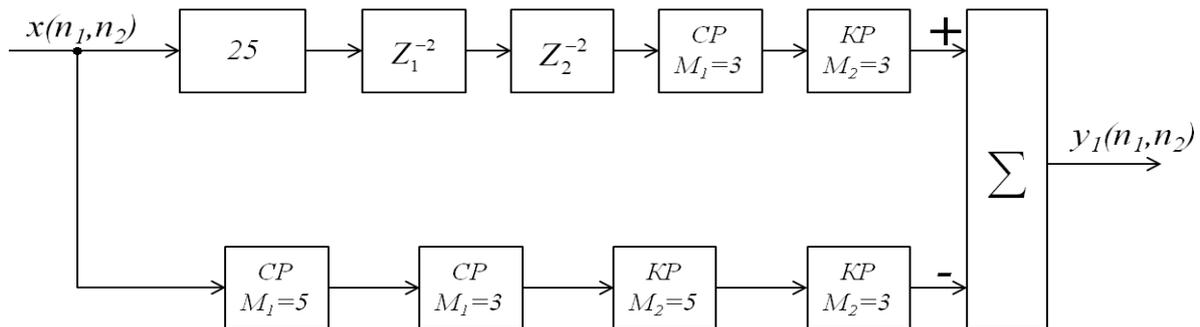
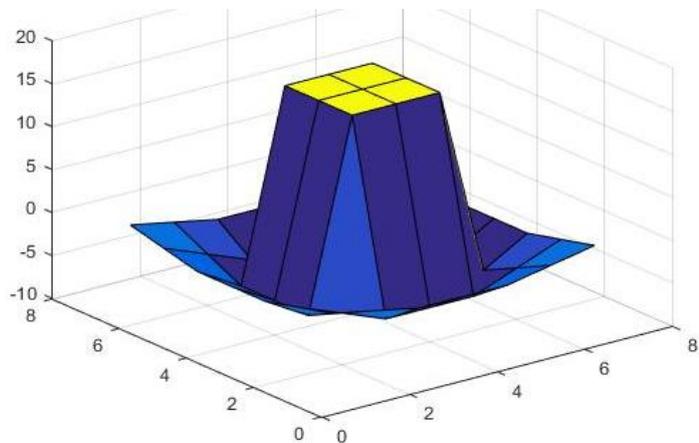


Рисунок 2 – Структурная схема двумерного фильтра ЛУП

Маска для фильтра лапласиан “усеченная пирамида” представлена на рисунке 3,а, а также на рисунке 3,б представлен трехмерный вид апертury фильтра ЛУП.

-1	-2	-3	-3	-3	-2	-1
-2	-4	-6	-6	-6	-4	-2
-3	-6	16	16	16	-6	-3
-3	-6	16	16	16	-6	-3
-3	-6	16	16	16	-6	-3
-2	-4	-6	-6	-6	-4	-2
-1	-2	-3	-3	-3	-2	-1

а



б

Рисунок 3 – Маска ЛУП 7×7 элементов и ее трехмерный вид

Для апертury 7×7 элементов в общем случае требуется 49 операций умножения и 48 операций сложения/вычитания при нерекурсивном варианте построения фильтра, а при рекурсивно-сепарабельном варианте построения фильтра ЛУП требуется 13 операций сложения/вычитания и одна операция умножения, что сокращает количество вычислительных операций почти в 7 раз.

Реализации двумерного цифрового фильтра лапласиан “двойная пирамида” (ЛДП) в апертуре 7×7 элементов, её центральная часть “заменяется” на пирамидальную апертuru 3×3 элемента с соответствующими значениями коэффициентов $a_{i_1 i_2}$, которая реализуется рекурсивно-сепарабельно. При этом

системная функция данного фильтра будет иметь вид:

$$H_2(z_1, z_2) = -\frac{(1-z_1^{-5})(1-z_1^{-3})(1-z_2^{-5})(1-z_2^{-3})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} +$$

$$+14z_1^{-2}z_2^{-2}\frac{(1-z_1^{-2})(1-z_1^{-2})(1-z_2^{-2})(1-z_2^{-2})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} + z_1^{-3}z_2^{-3} \quad (5)$$

Приведем структурную схему для рекурсивно-сепарабельного двумерного фильтра лапласиан “двойная пирамида”, представленную на рисунке 4.

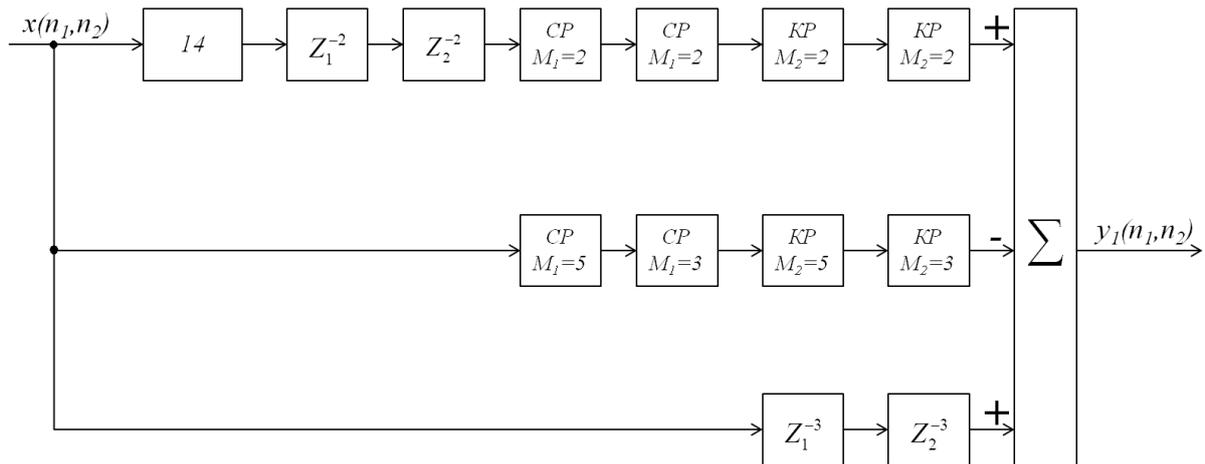
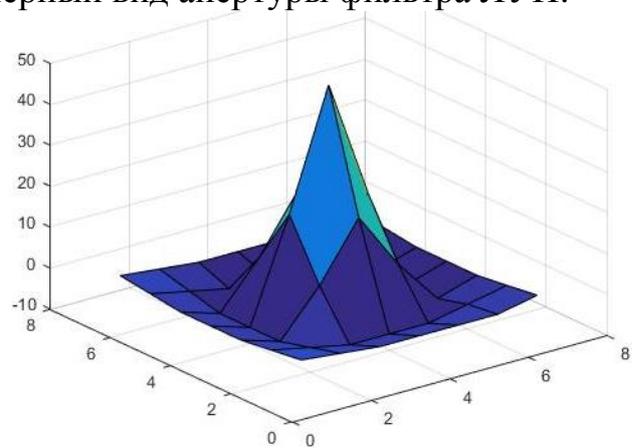


Рисунок 4 – Структурная схема двумерного фильтра ЛДП

На рисунке 5,а приведена маска фильтра лапласиан “двойная пирамида”, а также на рисунке 5,б представлен трехмерный вид апертуры фильтра ЛУП.

-1	-2	-3	-3	-3	-2	-1
-2	-4	-6	-6	-6	-4	-2
-3	-6	5	19	5	-6	-3
-3	-6	19	48	19	-6	-3
-3	-6	5	19	5	-6	-3
-2	-4	-6	-6	-6	-4	-2
-1	-2	-3	-3	-3	-2	-1

а



б

Рисунок 5 – Маска ЛДП 7x7 элементов и ее трехмерный вид

При рекурсивно-сепарабельной реализации фильтра ЛДП требуется 18 операций сложения/вычитания и одна операция умножения, тогда как для апертуры 7x7 элементов в общем случае требуется 49 операций умножения и 48 операций сложения/вычитания при нерекурсивном варианте построения фильтра, при данном варианте построения количество математических операций сократится в 5 раз.

В таблице 1 показаны результаты исследования по определению оптимальных коэффициентов фильтрации для разработанных алгоритмов обработки по критерию предельного разрешения формирователя изображений. На рисунке 6 представлены фрагменты изображения после фильтрации с

применением фильтров с оптимальными коэффициентами.

Таблица 1 – Результаты обработки фильтром ЛУП и ЛДП

ЛУП				ЛДП			
Подъем апертуры 3x3 элемента		Подъем центра маски		Подъем апертуры 3x3 элемента		Подъем центра маски	
Коэф. A_1	ТВЛ	Коэф. A_2	ТВЛ	Коэф. A_3	ТВЛ	Коэф. A_4	ТВЛ
исх.	201,6	исх.	201,6	исх.	201,6	исх.	201,6
1	1051,2	13	763,2	1	1209,6	15	1195,2
2	518,4	14	633,6	2	590,4	16	691,2
3	403,2	15	590,4	3	489,6	17	648
4	360	16	561,6	4	403,2	18	619,2

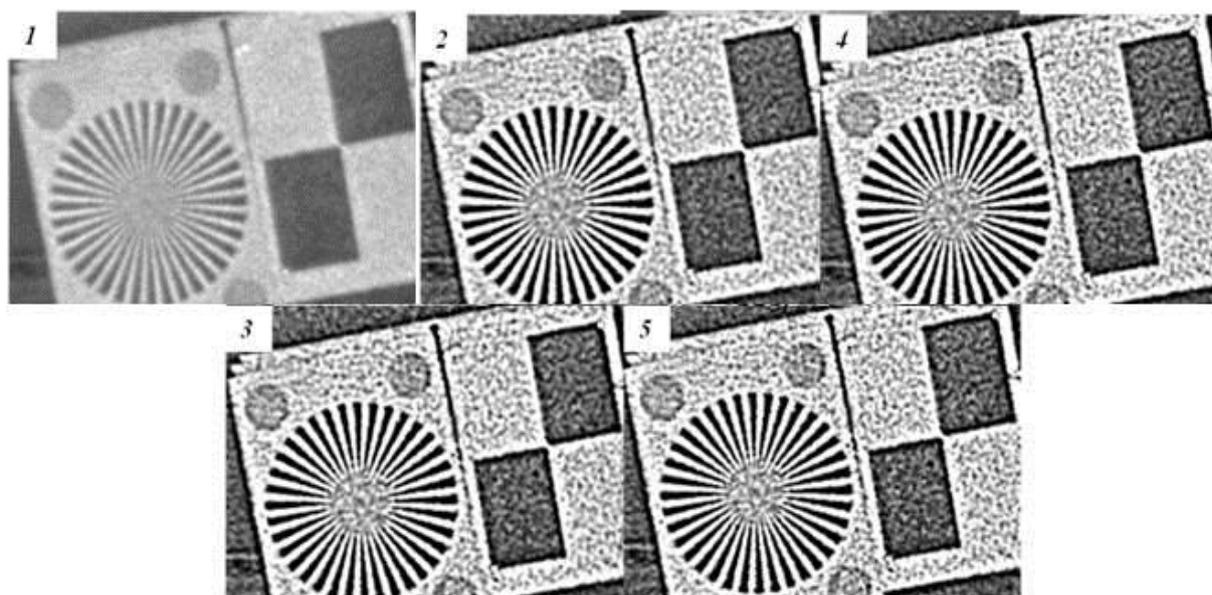


Рисунок 6 – Фрагменты тестового изображения. 1 – исходное изображение; 2 – ЛУП – подъем апертуры 3x3; 3 – ЛУП – подъем центрального элемента; 4 – ЛДП – подъем апертуры 3x3; 5 – ЛДП – подъем центрального элемента

На рисунке 7 представлены графики контрастно-частотных характеристик (КЧХ) изображений после обработки рекурсивно-сепарабельными фильтрами.

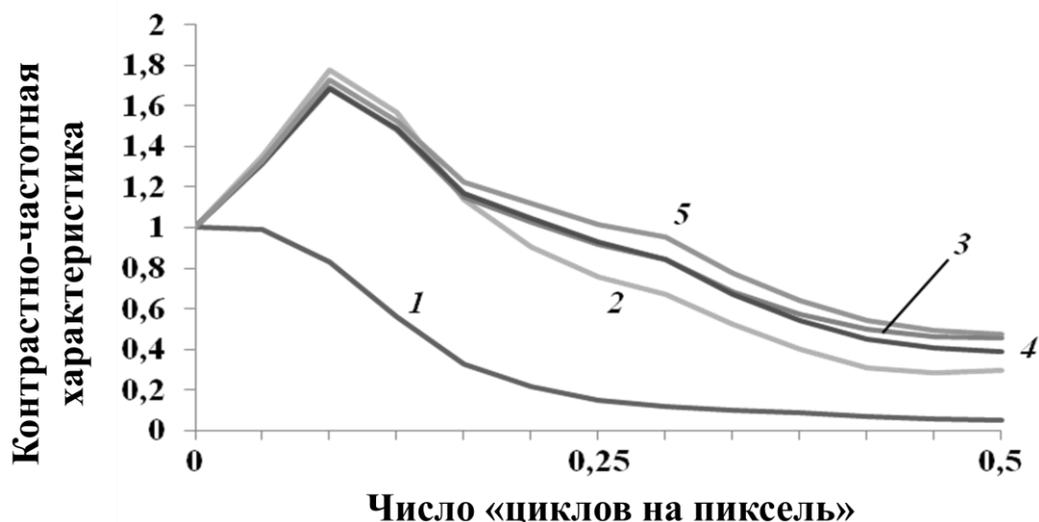


Рисунок 7 – Графики КЧХ: 1 – исходное изображение; 2 – ЛУП подъем апертуры 3x3, $A_1=2$; 3 – ЛУП подъем центрального элемента, $A_2=14$; 4 – ЛДП подъем апертуры 3x3, $A_3=2$; 5 – ЛДП подъем центрального элемента, $A_4=16$

Таким образом при варианте с увеличением центральной апертуры 3×3 элемента коэффициенты оказались равны $A_1=A_3=2$, но при этом фильтр ЛДП оказался эффективнее ЛУП на 36% или порядка 70 ТВЛ. В случае подъема центрального элемента для ЛУП значение коэффициента составило $A_2=14$ и получена четкость изображения в 633 ТВЛ, что на 430 ТВЛ выше исходного разрешения, при использовании ЛДП коэффициент составил $A_4=16$ и разрешение в 691 ТВЛ, что выше исходного разрешения на 490 ТВЛ.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы изображения различной размерности, а именно 640×480 , 1280×720 , 1280×1024 , 1920×1080 , 3000×2000 , 5472×3078 , 5616×3744 . В ходе эксперимента проводилось сравнение между реализацией классической двумерной свертки и разработанных алгоритмов двумерных фильтров, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты обработки фильтром ЛУП и ЛДП

№	Размер изображения	Время обработки, с.				
		Функция в MATLAB				
		КДС	ЛУП	Выигрыш, разы	ЛДП	Выигрыш, разы
1	640x480	3,024	0,338	8,93	0,422	7,16
2	1280x720	8,932	1,109	8,05	1,448	6,16
3	1280x1024	12,712	2,312	5,50	3,032	4,19
4	1920x1080	20,123	2,560	7,86	3,354	6
5	3000x2000	57,880	7,501	7,72	9,896	5,85
5	5472x3078	162,360	21,068	7,71	27,81	5,84
7	5616x3744	202,948	29,789	6,81	38,904	5,22

Проводя анализ полученных результатов можно сделать вывод, что при сравнении двух реализаций классической и рекурсивно-сепарабельной реализацией двумерных фильтров, выигрыш по временным затратам варьируется в зависимости от размерности исходного изображения, но в среднем сохраняется на рассчитанном уровне в 7 раз для фильтра ЛУП и в 5 раз для фильтра ЛДП при размере сканирующей многоэлементной апертуры 7×7 элементов.

В разделе 3 приводится описание процесса распределения разрешения по полю изображения, и далее проводятся довольно полные экспериментальные исследования по подтверждению выдвинутых утверждений. Произведя обработку зон изображения в отдельности, были определены оптимальные коэффициенты фильтрации для двух вариантов использования позонной внутрикадровой обработки: принципу близости полученного разрешения к предельному разрешению формируемому системой, либо выравнивание поля изображения к максимальному значению разрешения. Результат определения оптимальных коэффициентов и значения разрешения при их использовании представлены в таблице 3. Исходное изображение приведено на рисунке 8,а. На рисунке 8,б продемонстрировано изображение после позонной обработки с увеличением разрешения до предельного разрешения системы формирования изображения, а рисунок 8,в демонстрирует изображение после выравнивания уровня разрешения по полю изображения.

Таблица 3 – Результаты обработки фильтром ЛУП и ЛДП

Исходное изображение							
Зона обработки	1	2	3	4	5	6	7
ТВЛ	160	202	256	345	387	376	200
Изображение после обработки фильтром ЛДП с увеличением до предельного разрешения							
ТВЛ	347	471	888	1270	1234	1132	524
Коэффициент «А»	12	18	14	18	23	25	15
Изображение после обработки фильтром ЛУП с выравниванием разрешения							
ТВЛ	347	387	388	345	387	376	387
Коэффициент «А»	12	25	50	-	-	-	23

Анализируя результаты из таблицы 3 можно увидеть, что при выравнивании разница разрешения составила не более 50 ТВЛ, тогда как ранее составляла до 227 ТВЛ между 5 и 1 зоной обработки.

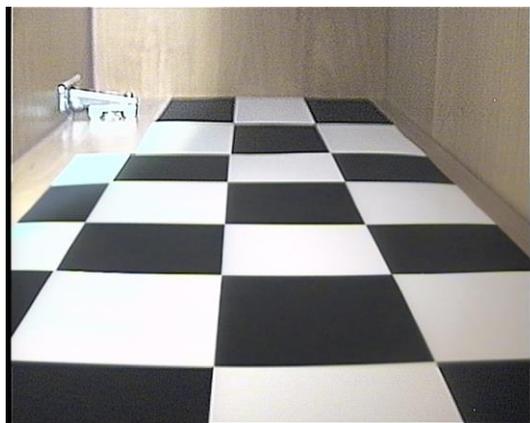
*a**б**в*

Рисунок 8 – Тестовое изображение (*a*) исходное, (*б*) после позонной внутрикадровой обработки с увеличением разрешения до предельного и (*в*) после выравнивания разрешения по полю изображения

На рисунке 9 продемонстрирован график контрастно-частотной характеристики после процесса выравнивания разрешения по полю изображения.

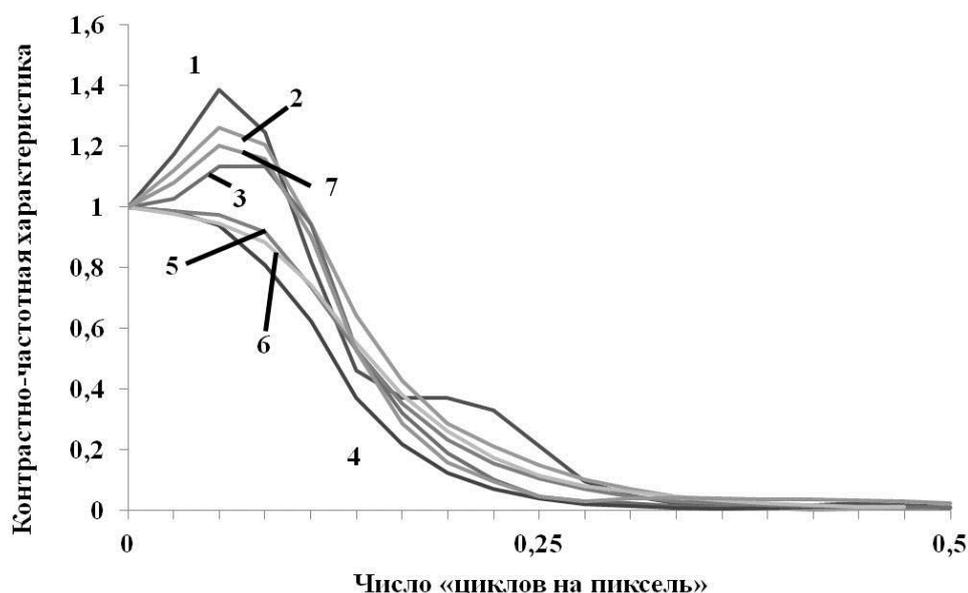


Рисунок 9 – Графики КЧХ изображений после позонной внутрикадровой обработки: 1 – первая зона обработки; 2 – вторая зона обработки; 3 – третья зона обработки; 4 – четвертая зона обработки; 5 – пятая зона обработки; 6 – шестая зона обработки; 7 – седьмая зона обработки

Таким образом показано, что позонная обработка изображений в данном случае минимум в 4 раза уменьшает разницу в разрешении между различными зонами разрешения исходного изображения, следовательно она эффективна и показывает высокие результаты при своем использовании.

В разделе 4 приводится описание программных модулей, разработанных и при выполнении диссертационного исследования, для решения задач поставленных в работе. Данные программные модули использовались при выполнении экспериментальных исследований в главах 2 и 3. Приведены диаграммы описывающие варианты использования разработанных программных модулей.

В разделе 5 приводится описание использования результатов в научно-исследовательской работе и учебном процессе ТУСУРа.

1. В рамках государственного задания «Наука 2012-2014гг.» №7.1241.2011, проведено экспериментальное исследование итерационных алгоритмов повышения качества изображений в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах.

2. В государственном задании №2014/225, выполнена оптимизация параметров двумерных фильтров повышения четкости телевизионных изображений по контрастно-частотным характеристикам. Произведена оценка разрешающей способности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем по характерным фрагментам формируемых изображений.

3. В проекте РФФИ номер 16-47-700939, проведено исследование методов и алгоритмов измерения и коррекции координатных искажений в телевизионных изображениях.

4. В государственном задании № 8.9562.2017/БЧ, разработаны рекурсивно-сепарабельные алгоритмы обработки изображений на примере фильтров

лапласиан “усеченная пирамида” и лапласиан “двойная пирамида”. Выполнена экспериментальная оценка эффективности разработанных рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений.

5. В рамках научно-исследовательской работы по договору № 18/18, проведено исследование распределения разрешения по полю изображения при различных положениях тестового изображения, относительно оптической оси системы видеорегистрации. Исследовано распределение разрешения по полю изображения на стенде имитации процесса выращивания кристаллов. Произведена оценка координатных искажений при различных углах наблюдения.

6. В учебном процессе ТУСУРа. По результатам, полученным диссертантом во время исследований были разработаны лабораторные работы по дисциплинам “Измерительное телевидение”, “Видеоинформационные технологии”, “Системы технического зрения” и “Зрение роботов”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы, подтверждающие достижение поставленной цели по повышению эффективности фильтрации изображений в телевизионных измерительных системах за счет адаптивной построчной фильтрации с применением быстродействующих рекурсивно-сепарабельных алгоритмов.

1. В работе разработаны и реализованы два алгоритма построения рекурсивно-сепарабельных фильтров лапласиан “усеченная пирамида” (ЛУП) и лапласиан “двойная пирамида” (ЛДП), также удалось получить выигрыш в быстродействии для них от 5 до 7 раз.

2. Экспериментально подтверждена эффективность предложенных алгоритмов фильтрации, с оценкой четкости обработанных изображений по контрастно-частотным характеристикам.

3. Представлено описание процесса распределения разрешения по полю изображения, а также экспериментально подтверждены полученные выводы о распределении разрешения по полю изображения.

4. Предложен метод адаптивной внутрикадровой позонной фильтрации изображений, с использованием различных коэффициентов в каждой зоне, что позволяет повысить уровень разрешения изображения более равномерно, сокращая разницу в разрешении между различными зонами в 4 раза.

5. Предложен метод определения оптимальных коэффициентов фильтрации изображений в зависимости от зоны обработки, позволяющий повысить уровень разрешения в 2,5-3,5 раза.

6. Разработаны программные модули для адаптивной внутрикадровой обработки изображений и оценки их характеристик: “MIR: Множественное измерение разрешения” и “SFI: Построчная фильтрация изображений”.

По результатам опубликованы 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 2 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus, 19 докладов в трудах отечественных и международных конференций, а также 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертационной работы

использованы в ряде НИР и учебном процессе, подтвердило их практическую значимость.

Таким образом, в диссертационной работе в соответствии с сформулированной целью приводится решение задач по повышению быстродействия алгоритмов обработки и улучшения качества получаемых изображений после процесса фильтрации с применением оптимальных коэффициентов, имеющих существенное значение для радиотехнической отрасли знаний.

Рекомендации по использованию результатов исследования:

1. Для сокращения вычислительных затрат при обработке изображений рекомендуется использовать рекурсивно-сепарабельные алгоритмы.

2. В задачах повышения уровня разрешения на изображении, рекомендуется использовать фильтры с оптимальными коэффициентами фильтрации по критерию предельного разрешения формирователя разрешения изображений по контрастно-частотным характеристикам.

3. При обработке изображений с учетом зон распределения разрешения, рекомендуется использовать адаптивную внутрикадровую позонную обработку с выравниванием уровня разрешения по полю изображения.

Дальнейшим развитием исследований в данном направлении является создание адаптивных двумерных рекурсивно-сепарабельных фильтров и его использования в телевизионных измерительных системах реального времени.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Рекурсивно-сепарабельные двумерные цифровые фильтры обработки телевизионных изображений / А.В. Каменский, М.И. Курячий // ИЗВЕСТИЯ Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение: г. Курск: 2018. Т.-8, №. 4(29). – С. 25 – 33.

2. Измерение и коррекция координатных искажений в телевизионных изображениях программными средствами / К. В. Шипунова, А. В. Каменский, М. И. Курячий // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 36–39.

3. Методы повышения четкости телевизионных изображений высокого качества линейными алгоритмами / А.В. Каменский // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 46–49.

4. Оценка качества изображений высокого разрешения при внутрикадровом сжатии в стандартах JPEG и JPEG2000 / В.В. Капустин, А.В. Каменский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. - № 3, том 19. – С. 27 - 31.

Публикации в трудах конференций

5. Оценка разрешающей способности видеокамер по характерным фрагментам формируемых изображений / А.В. Каменский, М.Ю. Маланин, М.И. Курячий // X международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин»: г. Омск: 2016. – №. 4. – С.78–83.

6. Optimization of parameters of two-dimensional filters of increase of clearness of television images on contrastly to frequency characteristics / M.Yu. Malanin, A.V. Kamenski, M.I. Kuryachiy // Control and Communications (SIBCON), IEEE 2015 International Siberian Conference on. – 2015. – P. 1–4.

7. Studying the influence of the environment on the active pulse television-computing system operation / А.В. Каменский // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018»: Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 3. – С.239–242.

8. Оценка вертикальной и горизонтальной четкости телевизионных изображений по контрастно-частотным характеристикам / А.В. Каменский, М.Ю. Маланин // Материалы 53-й международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Радиотехника, электроника, связь. Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015. – С.29.

9. Измерение разрешающей способности и четкости телевизионных изображений / А.В. Каменский, М.Ю. Маланин, М.И. Курячий// Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание - 2015: сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: В.С. Титов (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. - Курск, 2015. – С.235–237.

10. Методы повышения четкости телевизионных изображений линейными алгоритмами / А.В. Каменский // Материалы Одиннадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С.302–305.

11. Повышение четкости изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем с использованием алгоритмов двумерной апертурной коррекции / А.В. Каменский, В.В. Капустин // Материалы тринадцатой международной научно-практической конференции « XIII Международная научно-практическая конференция, посвященная 55-летию ТУСУРа». Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 2. – С.125–128.

12. Изучение рекурсивных алгоритмов обработки изображений и их свойств / Д.Е. Головина, А.В. Каменский // Научная сессия ТУСУР–2018: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 5 частях. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С.135–137.

13. Двумерный рекурсивно-сепарабельный фильтр повышения четкости телевизионных изображений / А.В. Каменский // сб. материалов XIV междунар. науч.-тех. конф. /ред. кол.: С.Г. Емельянов [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. – С.136–138.

14. Высокопроизводительные рекурсивно-сепарабельные алгоритмы повышения качества изображений / А.В. Каменский, Д.Е. Головина, М.И. Курячий // материалы XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 2. - С.162–165.

15. Повышение качества изображений методами частотной фильтрации / О.О. Монгуш, А.В. Каменский // Научная сессия ТУСУР–2019: материалы

Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 частях. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С.82–85.

16. Эквализация гистограмм изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем / О.О. Монгуш, А.В. Каменский // Научная сессия ТУСУР–2019: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 частях. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С.85–88.

17. Estimation of intra-frame compressed image quality for JPEG and JPEG2000 standards / V.V. Kapustin, A.V. Kamenskiy // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2016. – P.308–312.

18. Сравнительный анализ маски лапласиана и разреженной маски лапласиана / А.В. Каменский // Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017 – Ч. 1. – С.173–175.

19. Учебно-научные практикумы лаборатории “Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение” / А.В. Каменский, М.Ю. Маланин, М.И. Курячий, В.В. Капустин // Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов: материалы междунар. науч.-метод., 28-29 января 2016г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – С.153–154.

20. Методические указания к лабораторной работе “Использование Вейвлет-преобразований при обработке изображений в среде MATLAB” / А.М. Айткалиева, А.В. Каменский // Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования: материалы междунар. науч.-метод., 1-2 февраля 2018г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – С.61–62.

21. Морфологическая обработка в среде MATLAB / Д.Е. Головина, А.В. Каменский // Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования: материалы междунар. науч.-метод., 1-2 февраля 2018г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – С.63–64.

22. Интерактивный лабораторный практикум “ Восстановление изображений при помощи инверсной фильтрации в среде MATLAB” / Д.А. Салыкова, А.Н. Утемисов, А.В. Каменский // Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования: материалы междунар. науч.-метод., 1-2 февраля 2018г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – С.65–66.

23. Инновационные образовательные технологии: технология INTEL REALSENSE / А.Е. Максимов, А.А. Акифьев, А.В. Каменский // Современное

образование: качество образования и актуальные проблемы современной высшей школы: материалы междунар. науч.-метод., 31 января - 1 февраля 2019г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2019. – С.68–69.

Доклады в трудах всероссийских конференций

24. Измерение разрешающей способности в телевизионных изображениях с использованием программных средств / А.В. Каменский, М.Ю. Маланин // Научная сессия ТУСУР–2014: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–16 мая 2014 г. – Томск: В-Спектр, 2014: В 5 частях. – Ч. 1. – 280 с., С. 79-81.

25. Измерение разрешающей способности в телевизионных изображениях с использованием программных средств / А.В. Каменский, М.Ю. Маланин // Научная сессия ТУСУР–2015: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13–15 мая 2015 г. – Томск: В-Спектр, 2015: в 5 частях. – Ч. 1. – 328 с., СЧ. 120-123.

Доклады в трудах всероссийских конференций

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660074. MIR: Множественное измерение разрешения. Автор: А.В. Каменский. Заявка № 2019618804. Дата поступления 17 июля 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30.07.2019 г.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660075. SFI: Построчная фильтрация изображений. Автор: А.В. Каменский. Заявка № 2019618808. Дата поступления 17 июля 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30.07.2019 г.