

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Курячий Михаил Иванович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Томск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 Телевизионные измерительные системы и формируемые ими изображения | 14 |
| 1.1 Изображение..... | 16 |
| 1.1.1 Качество изображения..... | 17 |
| 1.1.2 Разрешение изображения..... | 18 |
| 1.1.3 Области применения изображений с высоким уровнем разрешения | 19 |
| 1.2 Методы и алгоритмы повышения качества изображений..... | 20 |
| 1.2.1 Линейные алгоритмы обработки изображений..... | 24 |
| 1.2.2 Рекурсивные алгоритмы обработки изображений..... | 33 |
| 1.3 Быстродействующие алгоритмы обработки изображений..... | 44 |
| 1.4 Факторы оказывающие влияние на разрешение получаемых изображений..... | 47 |
| 1.5 Распределение разрешения по полю изображения..... | 51 |
| 1.6 Методы измерения разрешения изображений и оценки их качества..... | 58 |
| 1.7 Основные результаты главы..... | 63 |
| 2. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕКУРСИВНО-СЕПАРАБЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ..... | 64 |
| 2.1 Построение рекурсивно-сепарабельных фильтров повышения четкости изображений..... | 65 |
| 2.1.1 Лапласиан “усеченная пирамида”..... | 66 |
| 2.1.2 Лапласиан “двойная пирамида”..... | 68 |
| 2.2 Программная реализация разработанных алгоритмов..... | 70 |
| 2.2.1 Реализация фильтра лапласиан “усеченная пирамида”..... | 70 |
| 2.2.2 Реализация фильтра лапласиан “двойная пирамида”..... | 74 |
| 2.3 Определение оптимальных коэффициентов для разработанных фильтров..... | 79 |
| 2.4 Оценка быстродействия разработанных алгоритмов..... | 82 |
| 2.5 Основные результаты главы..... | 89 |

| | |
|---|-----|
| 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ПО ПОЛЮ ИЗОБРАЖЕНИЯ..... | 91 |
| 3.1 Описание процессов распределения разрешения по полю изображения | 91 |
| 3.2 Подтверждение выдвинутых утверждений..... | 93 |
| 3.2.1 Измерения при положениях испытательной таблицы 45°, -45°, 60° и -60°..... | 96 |
| 3.2.2 Испытания на стенде имитации системы видеонаблюдения..... | 101 |
| 3.3 Исследование зон распределения по полю изображения при пошаговом изменении наклона системы видеонаблюдения | 110 |
| 3.4 Позонная обработка изображений с использованием оптимальных коэффициентов..... | 118 |
| 3.5 Основные результаты главы | 121 |
| 4. ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ВНУТРИКАДРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ | 124 |
| 4.1 MIR: Множественное измерение разрешения | 125 |
| 4.2 SFI: Построчная фильтрация изображений..... | 127 |
| 4.3 Основные результаты главы | 131 |
| 5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 132 |
| 5.1 Научно-исследовательские работы | 132 |
| 5.1.1 Государственное задание «Наука 2012-2014гг.» №7.1241.2011 | 132 |
| 5.1.2 Государственное задание №2014/225 | 132 |
| 5.1.3 Проект РФФИ номер 16-47-700939 | 132 |
| 5.1.4 Государственное задание № 8.9562.2017/БЧ | 132 |
| 5.1.5 Научно-исследовательская работа по договору № 18/18 | 133 |
| 5.2 Учебный процесс ТУСУРа..... | 133 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 134 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... | 136 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 137 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) КОПИИ ДОКУМЕНТОВ | 151 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одной из реальностей современной жизни человека является широкое распространение телевизионных систем видеонаблюдения в различных сферах жизнедеятельности человека, так же 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. При визуализации на зашумленном изображении проявляется „зернистость” или „снег”, а на цветном изображении могут наблюдаться „цветовые вспышки”. 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 данных. 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.

Для решения задач в области цифровой обработки изображений требуется применять специальные методы и алгоритмы, а также неоднократное тестирование с привлечением широкой базы различных изображений для улучшения их визуального восприятия и повышения информативности для систем технического зрения. Одни алгоритмы направлены на устранение одного из типов искажений в изображении, а другие учитывают положение объектов интереса на изображении.

Более важными факторами при использовании цифровой обработки изображений являются быстроедействие 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 уменьшение 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. Honaravr, 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 и задачи диссертационной работы

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

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач.

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 изображения по полю его 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. Используются методы исследования, заключающиеся в получении оптимальных параметров обработки изображений и характеристик использованных фильтров.

Достоверность результатов

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

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.

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

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.

Структура и объем работы

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

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в участии по постановке цели и задач исследования, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, формулировании выводов, разработке программного обеспечения, подаче заявок на регистрацию программ для ЭВМ. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии. Без соавторов опубликовано: 1 статья в журнале из перечня ВАК, 4 доклада в материалах международных научно-технических конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Краткое содержание работы

Во введении представлена краткая характеристика работы.

В главе 1 выполнен аналитический обзор литературы по направлению диссертационного исследования, описаны факторы оказывающие влияние на разрешение изображения и методы их повышения, сформулированы цель и задачи исследования.

В главе 2 представлены принципы построения рекурсивно-сепарабельных алгоритмов. Приведены конкретные примеры реализации разработанных алгоритмов. Представлены расчеты преимущества данных алгоритмов по числу вычислительных операций.

В главе 3 представлены исследования, направленные на описание принципов распределения разрешения по полю изображения. Приведено описание данных принципов с их экспериментальным подтверждением. Разработан метод адаптивной внутрикадровой позонной обработки изображений.

В главе 4 описаны разработанные программные модули для обработки изображений («SFI: Построчная фильтрация изображений») и оценки характеристик обработанного изображения («MIR: Множественное измерение разрешения»).

В главе 5 приведено описание использования результатов работы, полученных в ходе подготовки диссертации.

Далее приведены заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы. В Приложении А представлены копии документов (свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ и акты использования результатов работы).

1 Телевизионные измерительные системы и формируемые ими изображения

Системы телевидения служат для преобразования получаемого оптического изображения в видеосигнал, передачи его по каналу связи и формирования в месте приема телевизионного изображения (ТВ), в большей или меньшей степени приближенного к входному оптическому изображению. Требования к качественным показателям ТВ-изображения формируются на основе критерия «физиологически точного воспроизведения» учитывая основные психофизиологические свойства зрительного аппарата человека, для которого в конечном итоге и формируется итоговая визуальная информация на выходе ТВ-системы [1,2].

В отличие от вещательного телевидения, в котором изучаются проблемы неискаженной передачи визуальной информации на определенное расстояние, предметом измерительного телевидения является изучение способов обработки видеосигнала с целью извлечения количественной информации об объектах, находящихся в поле зрения телевизионного датчика, и использования полученной информации для задач наблюдения, контроля и управления. Телевизионные измерительные системы, в основном, имеют в своем составе в качестве основных узлов телевизионный датчик и вычислительное устройство и предназначены для дистанционного автоматического контроля за состоянием пространства в угле поля зрения телевизионного датчика, измерения параметров объектов, находящихся в контролируемом пространстве, и при необходимости для управления состоянием и взаимодействием этих объектов [1,3].

Широкое внедрение средств вычислительной техники и обновление элементной базы в телевидении привели к возрастанию числа телевизионных измерительных систем (ТИС) различного назначения. Несмотря на множество задач, решаемых с помощью ТИС, можно выделить обобщенную

функциональную схему ТИС, состоящую из нескольких основных модулей, приведенную на рисунке 1.1.

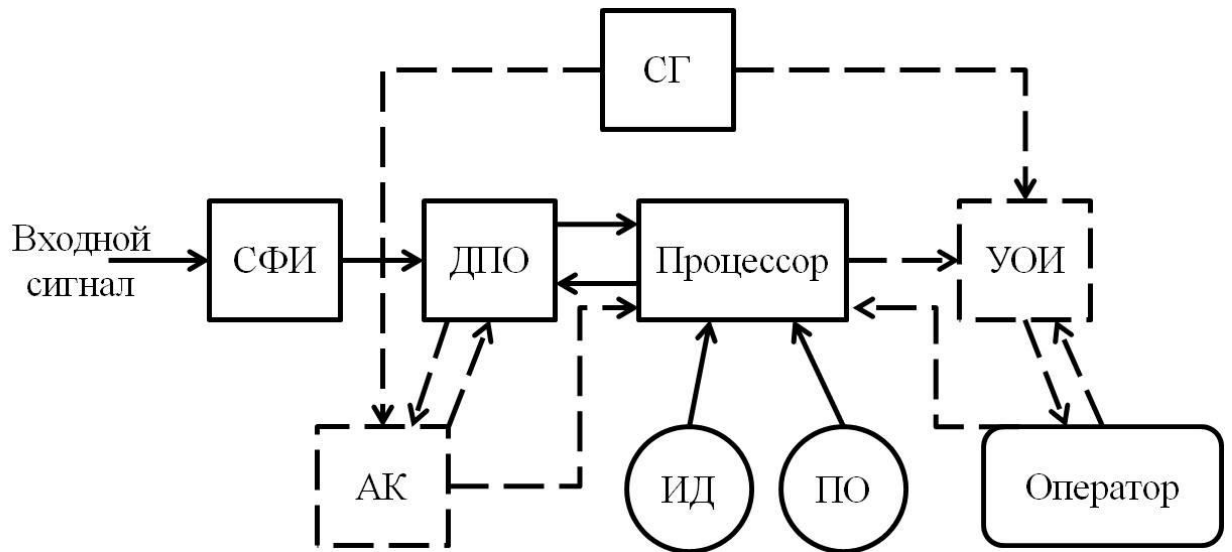


Рисунок 1.1 – Обобщенная структура ТИС: — обязательные модули; - - - дополнительные модули

Часть модулей входящих в схему является обязательной независимо от решаемой задачи. К обязательным модулям относятся:

- система формирования изображения (СФИ), выполняющая операции предварительной обработки и формирования изображений;
- датчик первичных отчетов (ДПО);
- синхрогенератор (СГ);
- процессор в который, помимо первичных отчетов, вносятся исходные данные (ИД), определяющие решаемые задачи и программное обеспечение (ПО).

Дополнительными модулями являются:

- устройство отображения информации (УОИ), которое предоставляет возможность документирования, визуального контроля за процессом преобразования сигнала в ТИС, участия оператора на различных этапах обработки сигнала, в частности для введения целеуказания;

– аппаратура калибровки (АК), используется только в высокоточных ТИС для предварительной оценки функций корректирующих сигналов или параметров отдельных ТИС [3].

В настоящее время для обнаружения, наблюдения и измерения параметров объектов в различных условиях окружающей среды применяются активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС). Системы могут использоваться как в нормальных, так и в сложных условиях наблюдения за объектами интереса: солнечный день, сумерки и ночью, при ограниченной или низкой прозрачности среды распространения излучения, при наличии различных осадков, дымки, тумана, естественных и искусственных световых помех [4].

1.1 Изображение

Самое распространенное и используемое определение этого понятия: изображение – это то, что мы видим. Другое определение: изображение – это информация, которая пригодна для визуального восприятия. В зависимости от происхождения можно их можно подразделить на следующие типы изображений.

1. Оптические – это распределение интенсивности электромагнитного поля, формируемое оптическим прибором в некоторой области пространства например: сетчатке глаза; экране при проецировании; плоскости приемника объектива фотоаппарата.

2. Фотографические – это оптические изображения, зафиксированные на фотоматериале в результате химического процесса.

3. Электронные или цифровые – это оптические изображения, полученные при помощи электронного приемника, к примеру, ПЗС-матрицей, сканером, микрофотометром [5].

Применительно к ТИС наряду с получением изображения на экране производится извлечение из видеосигнала информации об объекте, которая

затем используется для регистрации или управления. Среди параметров, которые могут быть определены по оптическому изображению объекта, принято выделять три группы: геометрические, энергетические, цветовые [1].

1.1.1 Качество изображения

Под термином качество изображения понимают совокупность потребительских свойств изображения, проявляющихся при его восприятии и оценке наблюдателем на основе форм зрительных образов, что предполагает наличие в структуре качества не только объективных (физических), но и субъективных свойств. Данное соотношение между физическими и субъективными характеристиками изображения выглядит следующим образом.

Физические характеристики:

- градиентные (на основе свойств пограничной кривой);
- частотно-контрастные (спектральные и амплитудные);
- интенсивность (яркость);
- стабильность;
- пространственные (физические размеры, линейные и нелинейные искажения, мерность пространства).

Субъективные характеристики:

- фокусировка, резкость, отчетливость;
- контрастность, различимость градаций, яркости, плотность, тоновые оттенки, цвет;
- минимальная и максимальная видимая яркость, четкость, детальность;
- мерцание, дрожание;
- адекватность формы и величины, объемность [6].

1.1.2 Разрешение изображения

Разрешение в телевизионных линиях (ТВЛ) определяет способность устройства передавать максимальное количество деталей на изображении. Для двумерных устройств, таких как ПЗС-матрица, различают разрешающую способность по горизонтали и вертикали.

Вертикальное разрешение изображения определяется количеством вертикальных элементов, которые можно зафиксировать камерой и впоследствии воспроизвести на экране монитора. В системе CCIR — 625 линий, а в системе EIA — 525 линий. Учитывают длительность кадровой (вертикальной) синхронизации и импульсов выравнивания, невидимые строки и т. д., число активных строк снижается в CCIR до 575, а в EIA до 475. При вычислении «реального» вертикального разрешения следует учитывать поправочный коэффициент, равный 0,7. Он известен как коэффициент Келла (или Келл-фактор) и является общепринятым способом аппроксимации реального разрешения. Это означает, что 575 следует скорректировать (умножить) на 0,7, чтобы получить практические границы вертикального разрешения для PAL, которое равняется примерно 400 ТВЛ (строк). Для NTSC, соответственно получается приблизительно 330 ТВЛ (строк) вертикального разрешения [7].

Разрешающая способность по горизонтали определяется числом горизонтальных элементов, которые можно зафиксировать камерой и впоследствии воспроизвести на экране монитора или сколько вертикальных линий можно подсчитать. Поскольку соотношение сторон в телевидении стандартной чёткости составляет 4:3, где ширина изображения больше высоты, для того чтобы сохранить естественные пропорции изображений, считают только вертикальные линии по ширине, эквивалентной высоте, то есть $3/4$ от ширины. Для камеры с 570 ТВЛ вертикального разрешения, максимум соответствует приблизительно в $570 \times 4/3 = 760$ линий по ширине экрана.

Если в документации указана только разрешающая способность, то это надо понимать, как разрешающая способность по горизонтали [8].

1.1.3 Области применения изображений с высоким уровнем разрешения

В тенденциях развития современного общества с каждым годом все больше устанавливается и вводится в эксплуатацию различные ТИС фиксации видеоданных, использующиеся для различных целей: охранные системы видеонаблюдению, дорожные камеры фиксации правонарушений, системы автопилотирования (беспилотные авто, дроны и т.д.), камеры контроля качества на производстве, системы видения в сложных метеоусловиях и т.д. В одной из своих работ автор рассматривает методику оценки разрешения телевизионных камер по характерным фрагментам изображения [9].

Активно-импульсные телевизионно-измерительные системы (АИ ТИС), которые являются подклассом ТИС, позволяют фиксировать визуальные характеристики только нужного объекта интереса благодаря селекции изображения по дальности в пределах узкой глубины просматриваемого пространства. К достоинствам АИ ТИС можно отнести большие (по сравнению с аналогичными системами непрерывного действия) дальности видения, как при нормальных условиях, так и при пониженной прозрачности атмосферы, обеспечивающие наблюдение при воздействии мощных световых помех и измерение с повышенной точностью дальности до объекта интереса [10].

Дальность действия традиционных телевизионных систем наблюдения и вероятность распознавания объектов значительно ограничивается в условиях пониженной прозрачности среды распространения. Основной причиной ограничения дальности обнаружения и идентификации объектов наблюдения в сложных условиях видимости является воздействие помехи обратного рассеивания.

Помеха обратного рассеивания появляется из-за рассеяния фотонов света в толще аэрозолей находящихся в атмосфере в пространстве перед наблюдателем, что приводит к значительному понижению контраста изображения, вследствие чего, к невозможности обнаружения и распознавания объектов интереса [10].

Основными достоинствами АИ ТИС являются устранение помехи обратного рассеивания и значительное ослабление световых помех вносимых естественной и искусственной природой. Принцип их действия основан на импульсном методе подсветки поля зрения системы и стробировании по времени импульсов излучения, отраженных от объектов интереса.

Сущность метода импульсного подсвета сводится к тому, что объект наблюдения освещается световыми импульсами, длительность которых значительно меньше времени распространения света в пространстве до объекта и обратно. В том случае, когда временная задержка между моментом излучения импульса и моментом открывания оптического затвора равна удвоенному времени, необходимому для прохождения светом расстояния в пространстве до объекта и обратно, наблюдатель будет видеть только сам объект и участок пространства окружающий его. Глубина данного пространства будет определяться как временем открытого состояния оптического затвора, так и длительностью импульса подсвета пространства [11].

1.2 Методы и алгоритмы повышения качества изображений

Цифровая обработка изображений – интенсивно развивающаяся научная область, которая находит все более широкое применение в различных информационных технических системах: радиолокационных, связи, телевизионных и т.п.

Обработка изображений – любая форма обработки информации, для которой обрабатываемые данные представляются изображением, например,

фотографиями или видеорядами. Обработка изображений может осуществляться как для получения изображения на выходе (например, подготовка к полиграфическому тиражированию, к телетрансляции и т. д.), так и для получения другой информации (например, распознавание текста, подсчёт числа клеток в поле микроскопа и т. д.). Кроме статичных двухмерных изображений, требуется обрабатывать также изображения, изменяющиеся во времени, например, видеоизображения.

Задача повышения четкости изображений возникает, как правило, при решении различных задач науки и техники.

Главная цель повышения четкости (их разрешения) изображений заключается в том, чтобы подчеркнуть мелкие детали или улучшить те детали, которые оказались расфокусированы вследствие ошибок или несовершенства самого метода получения информации.

Так же отметим, что при решении задачи улучшения визуального качества изображений, как правило, не возникает задача восстановить изображение, то есть не вернуть его к “оригиналу”. При повышении резкости иногда следует провести перекомпенсацию искажений, то есть избыточно поднять уровень высокочастотных составляющих пространственного спектра изображения [12,13].

В нашем мире существует большое количество сигналов, которые по своей природе двумерны и многомерны. Это, прежде всего различные изображения, получаемые при аэрофотосъемках, рентгеновские снимки, телевизионные изображения, радиолокационные изображения, астрофизические и океанографические карты. Обработкой таких сигналов и занимается сравнительно новое направление в науке, называемое цифровой обработкой изображений.

Без преувеличения можно сказать, что обработкой изображений в той или иной мере занимаются специалисты практически всех областей знаний. Трудно назвать такую область науки и техники, где бы ни использовалась обработка изображений. Это связано с технической революцией в области

обработки изображений, связанной с бурным развитием вычислительной техники.

Цифровая обработка изображений (ЦОИ) впервые была использована в связи с восстановлением и улучшением качества фотоснимков обратной стороны Луны и поверхности планеты Марс.

В настоящее время при помощи ЦОИ решены такие сложные математические задачи, как идентификация личности по отпечаткам пальцев, по фотографии, восстановление изображений по проекциям в томографии (используется в медицинской диагностике для получения изображений внутренних органов) и др.

С общей точки зрения, казалось бы, не существует большой разницы между цифровой обработкой одномерных и многомерных сигналов.

В любом случае обработка включает в себя дискретизацию, квантование, выполнение различных ортогональных преобразований и сверток изображения. Однако более глубокий анализ демонстрирует, что переход от одномерного случая к двумерному, является не только количественным, но и качественным. Проблемы, которые возникают при обработке многомерных сигналов, просто не существуют в обработке одномерных сигналов и, соответственно наоборот, многие трудности цифровой обработки сигналов просто не существуют или легко снимаются при переходе от одномерных к многомерным сигналам [14].

Существуют различные разделы цифровой обработки изображений, такие как:

- линейная обработка изображений;
- нелинейная обработка изображений;
- рекурсивная реализация линейных и нелинейных алгоритмов обработки изображений.

В работе Титова В.С., которая посвящена направлениям развития методов, алгоритмов и аппаратных средств повышения качества изображений оптико-электронных систем, рассматриваются подходы к

повышению качества изображений в распознающих системах технического зрения, построенных на новых способах и алгоритмах обработки изображений [15].

Основными направлениями развития оптико-электронных систем и распознающих систем технического зрения являются:

1 – углубленное знание объектов исследований и условий работы систем, создание адекватных моделей данных объектов;

2 – модернизация методов расчета и общей теории и проектирования (прежде всего – теории приема и обработки многомерного сигнала, общих схемотехнических решений, унификации методов расчета основных узлов и характеристик прибора в целом) систем с учетом их специфики;

3 – рост и внедрение методов адаптации алгоритмов, адаптации конструктивных параметров и характеристик систем, учитывающих внешние изменяющиеся условия их работы;

4 – использование современной элементной базы, например, приемников изображений на основе КМОП технологий, выполненных по технологии „активный пиксель“, с применением микроболометрических матриц;

5 – расширение методов обработки оптических сигналов, строящихся на основе вейвлет-преобразований, быстрое преобразование Фурье;

6 – создание новых методов, алгоритмов и аппаратных средств обработки изображений на основе системного подхода и комплексного учета основных факторов, оказывающих влияние на качество работы систем.

1.2.1 Линейные алгоритмы обработки изображений

Одним из самых распространенных методов фильтрации изображений является обработка их линейными алгоритмами. Для понимания процессов в реализации различных фильтров рассмотрим основные понятия линейной фильтрации.

Линейный цифровой фильтр – устройство, в котором выходные отсчеты сигнала представлены в виде линейной комбинации предыдущих отсчетов входного и выходного сигналов и текущего отсчета входного сигнала.

Основное разностное уравнение для ЛЦФ имеет вид:

$$y(nT) = \sum_{i=0}^M a_i \cdot x(nT - iT) + \sum_{j=1}^N b_j \cdot y(nT - jT), \quad n \geq 0, \quad (1.1)$$

Здесь T – период (интервал) дискретизации;

n – текущий номер отсчета сигнала, включая нулевой отсчет ($n = 0, 1, \dots$);

j – начинается с 1, чтобы уравнение было приведенным.

Первая сумма описывает нерекурсивную часть фильтра, вторая – рекурсивную часть фильтра.

Если a_i и $b_j \equiv \text{const}$, то ЛЦФ с постоянными параметрами, иначе ЛЦФ с переменными параметрами.

Большее из чисел M и N – является порядком фильтра.

Если $b_j \equiv 0$, то получаем нерекурсивные фильтры или фильтры с конечной импульсной характеристикой, так называемые КИХ-фильтры.

Фильтры без обратных связей, т.е. $b_j \equiv 0$ называют также однородными, трансверсальными или фильтрами с многоотводной линией задержки [16]. Если $b_j \neq 0$, то получаем класс рекурсивных фильтров, приведенного на рисунке 1.2.

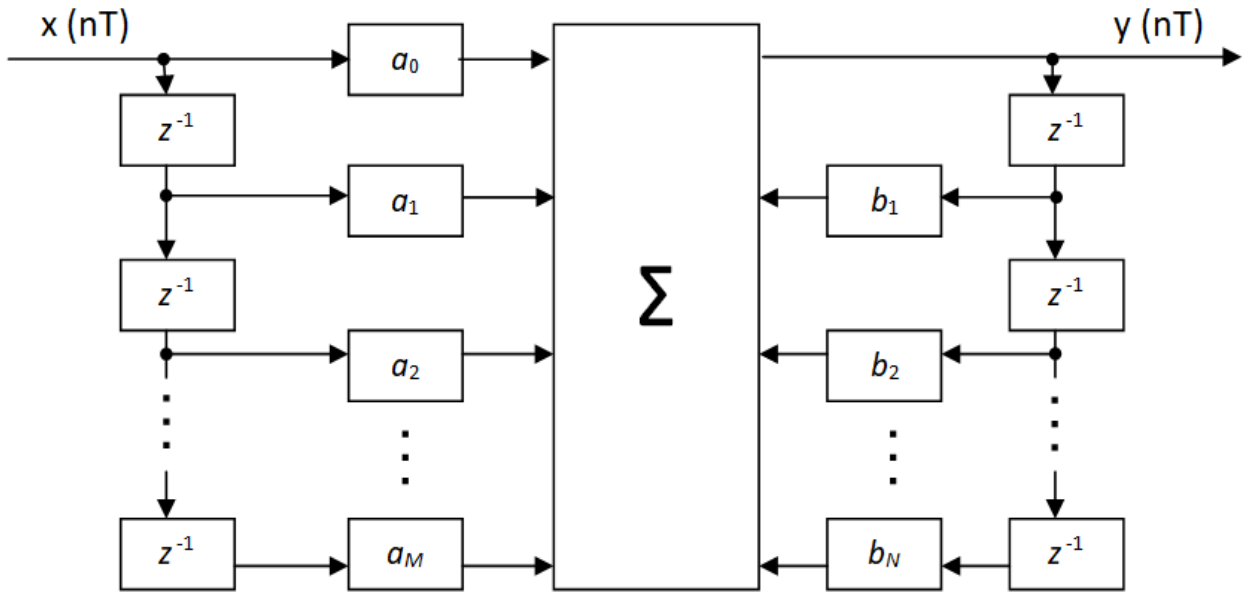


Рисунок 1.2 – Основная (прямая) форма реализации

Схематически алгоритм двумерной линейной фильтрации приведен на рисунке 1.3.

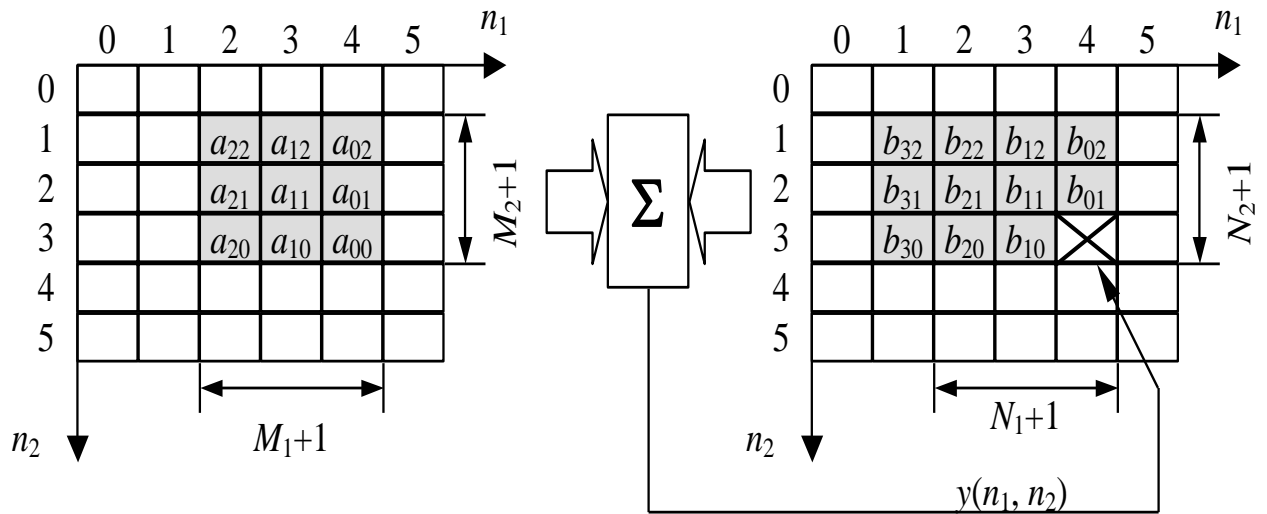


Рисунок 1.3 – Алгоритм двумерной линейной фильтрации

Здесь $(M_1+1)(M_2+1)$ – размер опорной области по входным данным – $x(n_1, n_2)$, а $(N_1+1)(N_2+1)$ – размер опорной области по выходным данным – $y(n_1, n_2)$.

Разностное уравнение:

$$y(n_1, n_2) = \sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} a_{i_1, i_2} x(n_1 - i_1, n_2 - i_2) + \sum_{j_1=0}^{N_1} \sum_{j_2=0}^{N_2} b_{j_1, j_2} y(n_1 - j_1, n_2 - j_2), \quad (1.2)$$

где $n_1 \geq 0, n_2 \geq 0$, $(j_1, j_2) \neq 0$.

Пример сглаживающего фильтра:

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) + k y(n_1 - 1, n_2 - 1), \quad k = b_{1,1}, \quad n_1 \geq 0, \quad n_2 \geq 0, \quad (1.3)$$

Импульсная характеристика:

$$h(n_1, n_2) = y(n_1, n_2) |_{x(n_1, n_2) = \delta(n_1, n_2)} \text{ — при нулевых начальных условиях.}$$

Системная функция:

$$H(z_1, z_2) = \frac{Y(z_1, z_2)}{X(z_1, z_2)} \text{ — системная функция определяется как отношение}$$

z -образов входной и выходной последовательностей; здесь z_1^{-1} — задержка на 1 шаг по строке (координата n_1); z_2^{-1} — задержка на 1 шаг по кадру или столбцу (координата n_2) [14]:

$$F(z_1, z_2) = \sum_{n_1=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} f(n_1, n_2) z_1^{-n_1} z_2^{-n_2} \text{ — двумерное } Z\text{-преобразование.}$$

$$H(z_1, z_2) = \sum_{n_1=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} h(n_1, n_2) z_1^{-n_1} z_2^{-n_2} \text{ — системная функция в } Z\text{-форме.}$$

Если заданы коэффициенты a_{i_1, i_2} и b_{j_1, j_2} в разностном уравнении (РУ),

то системная функция (СФ) примет вид:

$$H(z_1, z_2) = \frac{\sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} a_{i_1, i_2} z_1^{-i_1} z_2^{-i_2}}{1 - \sum_{j_1=0}^{N_1} \sum_{j_2=0}^{N_2} b_{j_1, j_2} z_1^{-j_1} z_2^{-j_2}}; \text{ отсчет } (j_1, j_2) = 0 \text{ исключается.}$$

Рассмотрим типы наиболее часто используемых масок на примере маски размером 3x3, приведенных на рисунке 1.4:

- а) скользящее среднее;
- б) лапласиан;
- в) двойное дифференцирование;
- г) оператор выделения вертикальных линий;
- д) оператор выделения малоразмерных деталей из шумов;
- е) градиентный оператор выделения перепада.

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <i>a</i> | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|----|----|----|----|---|----|----|----|----|
| <i>б</i> | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>8</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table> | -1 | -1 | -1 | -1 | 8 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | | | | | | | | |
| -1 | 8 | -1 | | | | | | | | |
| -1 | -1 | -1 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|----|----|---|----|---|----|---|----|---|
| <i>в</i> | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>-2</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>4</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>1</td></tr></table> | 1 | -2 | 1 | -2 | 4 | -2 | 1 | -2 | 1 |
| 1 | -2 | 1 | | | | | | | | |
| -2 | 4 | -2 | | | | | | | | |
| 1 | -2 | 1 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|----|---|----|----|---|----|----|---|----|
| <i>г</i> | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>-1</td><td>2</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>2</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>2</td><td>-1</td></tr></table> | -1 | 2 | -1 | -1 | 2 | -1 | -1 | 2 | -1 |
| -1 | 2 | -1 | | | | | | | | |
| -1 | 2 | -1 | | | | | | | | |
| -1 | 2 | -1 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <i>д</i> | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table> | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 1 | 2 | 1 | | | | | | | | |
| 2 | 4 | 2 | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 1 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|----|---|----|---|----|----|---|---|----|
| <i>е</i> | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>1</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>-1</td></tr></table> | 1 | 1 | -1 | 1 | -2 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 1 | 1 | -1 | | | | | | | | |
| 1 | -2 | -1 | | | | | | | | |
| 1 | 1 | -1 | | | | | | | | |

Рисунок 1.4 – Типы масок

Широкое использование линейной фильтрации для обработки изображений связано с тем, что она в значительной мере позволяет скорректировать целый ряд искажений, появляющихся при получении, передаче и воспроизведении изображений. К данным искажениям, прежде всего, относятся апертурные искажения, связанные с несовершенством устройств, при помощи которых формируются изображения, а также ошибками, допущенными при съемке (недостаточностью фокусировки объектива, “смазом” изображения вследствие недостаточно короткой экспозиции при съемке движущегося объекта и т.д.) [17].

Линейная фильтрация используется для ослабления заметности растровой структуры на изображениях, полученных в результате сканирования типографских репродукций. Так же линейная фильтрация используется для уменьшения помех, обусловленных наложением побочных спектров, появляющихся при пространственной дискретизации изображений. Кроме того, использование линейной фильтрации позволяет сократить число ошибок интерполяции, то есть заметность растровой структуры при воспроизведении изображения, например, при их печати. Посредством

линейной фильтрации в известных пределах так же удастся сократить заметность флуктационного шума и других дефектов на воспроизводимых изображениях [17]. Линейные фильтры могут быть предназначены не только для уменьшения уровня шума, а для выделения перепадов яркости и контуров. Выделение вертикальных перепадов осуществляется дифференцированием по строкам, горизонтальных – по столбцам. Выделение перепадов по диагонали можно получить, вычисляя разности уровней диагональных пар элементов. Для выделения перепадов используются следующие наборы весовых множителей, реализующих двумерное дифференцирование (рисунок 1.5) [14,18].

| „север” | „северо-восток” | „восток” | „юго-восток” | | | | | | | | |
|---------|-----------------|----------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 1 | -2 | 1 | -1 | -2 | 1 | -1 | -2 | 1 | -1 | -2 | 1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| „юг” | „юго-запад” | „запад” | „северо-запад” | | | | | | | | |
| -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | -2 | 1 | 1 | -2 | -1 | 1 | -2 | -1 | 1 | -2 | -1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |

Рисунок 1.5 – Градиентные операторы выделения перепадов яркости в различных пространственных направлениях

Оператор Лапласа (лапласиан) – это есть вторая пространственная производная. После применения масок на основе лапласиана фон изображения устраняется и становится «серым». Данное изменение изображения можно поделить на два этапа: обработка изображения

сглаживающим фильтром; вычитание из исходного изображения обработанного изображения. Данная операция реализует метод «нерезкого маскирования», при котором величина весового коэффициента подбирается экспериментально, но следует помнить, что выбор слишком большого коэффициента приводит к возникновению на изображении «окантовок», а также к росту уровня шума [17]. Апертуру используемого фильтра можно интерпретировать как сумму разностей центрального элемента с каждым из восьми его ближайших соседей. Таким образом, в равной степени учитываются возможные перепады яркости во всех направлениях [19].

На рисунке 1.6 показан дифференцирующий оператор, реализованный на основе маски (3x3).

| | | |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 8 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |

Рисунок 1.6 – Лапласиан для восьми соседей

Разреженные маски имеют дифференцирование не такое «равномерное». Их используют для выделения малоразмерных объектов, находящихся на гладких фонах. В них размер маски согласован с размером объекта, а именно: размер маски выбирается в 2 раза больше, чем размер объекта. Пример незаполненной маски 3x3 показан на рисунке 1.7.

| | | |
|----|----|----|
| 0 | -1 | 0 |
| -1 | 4 | -1 |
| 0 | -1 | 0 |

Рисунок 1.7 – Незаполненная маска 3x3 (лапласиан для «четырёх соседей»)

Разностное уравнение лапласиана для «четырёх соседей» имеет вид:

$$y(n_1, n_2) = -x(n_1 - 1, n_2) - x(n_1, n_2 - 1) + 4x(n_1 - 1, n_2 - 1) - x(n_1 - 2, n_2 - 1) - x(n_1 - 1, n_2 - 2). \quad (1.4)$$

Лапласианы получаются путем суммирования дифференцирующих масок.

Сложив первые два блока, получаем лапласиан для «четырёх соседей», а просуммировав все четыре маски, получаем лапласиан для восьми соседей (рисунок 1.8).

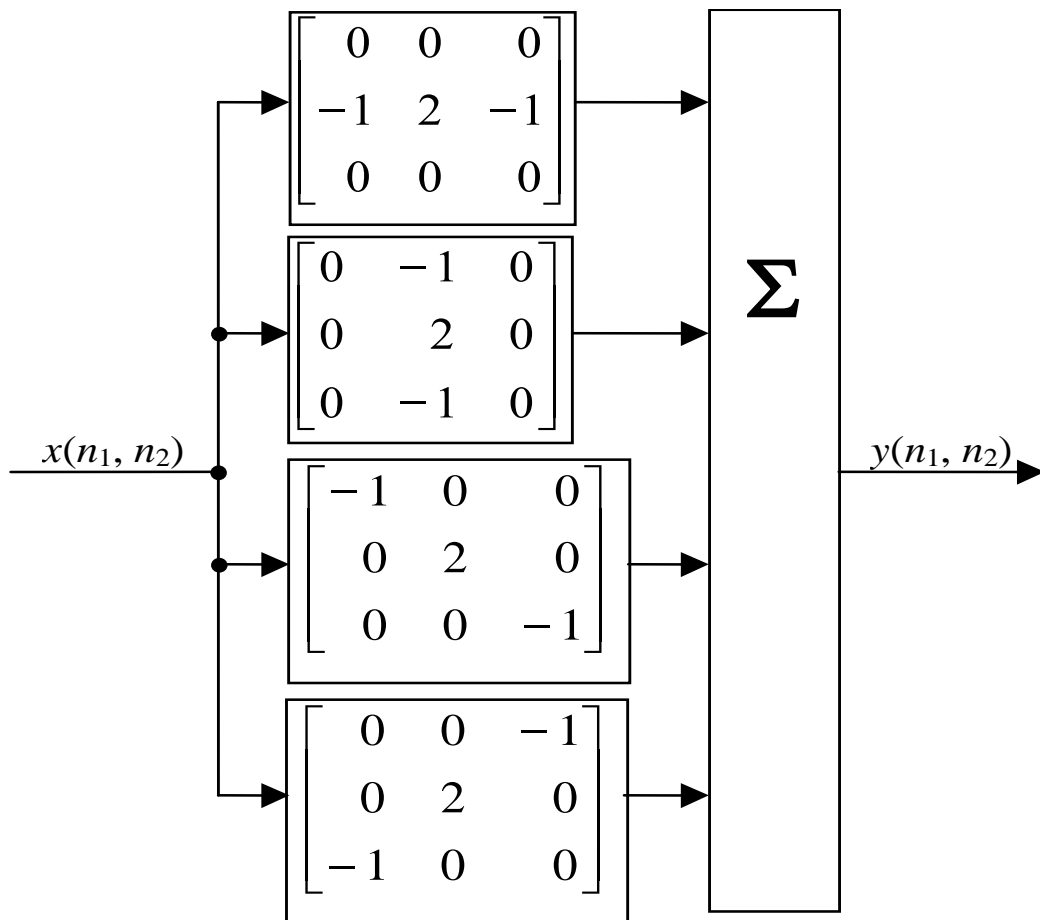


Рисунок 1.8 – Структурная схема получения лапласиана для «восьми соседей»

Прибавив к исходному сигналу выходной сигнал после обработки лапласианом, получаем обработку, аналогичную двумерному апертурному корректору, используемому в телевидении для повышения резкости изображения [14].

Вариант реализации лапласиана для «восьми соседей» (рисунок 1.9).

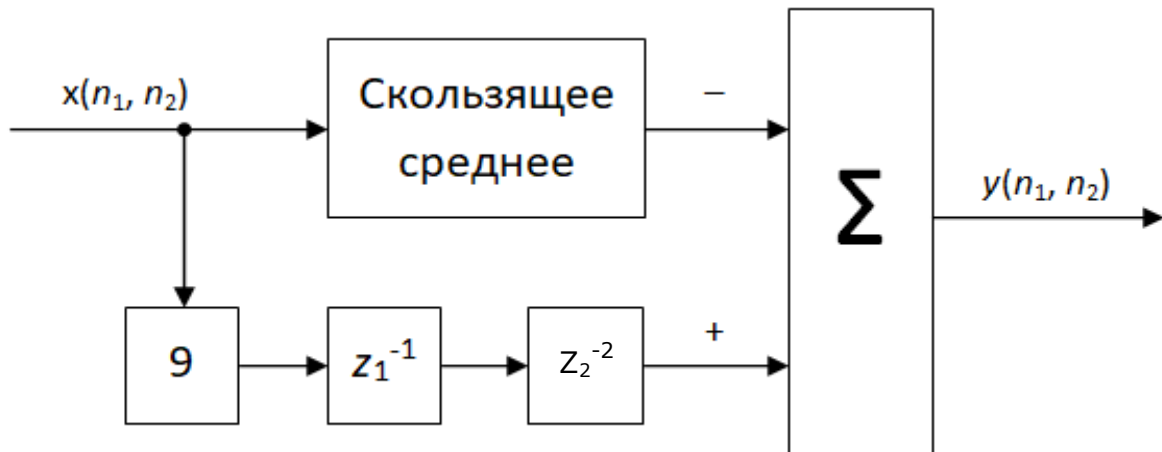


Рисунок 1.9 – Лапласиан для «восьми соседей»

В работе Р. Гонсалеса и Р. Вудса рассматривается принцип работы фильтра лапласиан и приводится выборка значений коэффициентов для данного фильтра, который является типичным примером фильтрации изображений с подъемом верхних частот (рисунок 1.10). Варьированием коэффициента усиления высоких частот обычно удается добиться общего увеличения яркости изображения и получить желаемый результат. Рисунок 1.11 иллюстрирует применение такого метода. Часть рисунка 1.11а есть исходное “темное” изображение. На рисунке 1.11б показано “изображение-лапласиан”, полученное при использовании маски на рисунке 1.10б с $A=0$. Изображение на рисунке 1.11в было получено при той же маске, но с $A=1$. Как и ожидалось, изображение стало более резким, но все еще остается столь же “темным”, что и исходное. Наконец на рисунке 1.11г показан результат с $A=1,7$. Этот результат более информативен, поскольку увеличен средний уровень яркости, а следовательно изображение стало более “светлым” и естественным [12].

| | | |
|----|-------|----|
| 0 | -1 | 0 |
| -1 | $A+4$ | -1 |
| 0 | -1 | 0 |

a

| | | |
|----|-------|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | $A+8$ | -1 |
| -1 | -1 | -1 |

б

Рисунок 1.10 – Метод фильтрации изображения с подъемом верхних частот может быть реализован при использовании любой из этих масок с $A \geq 1$

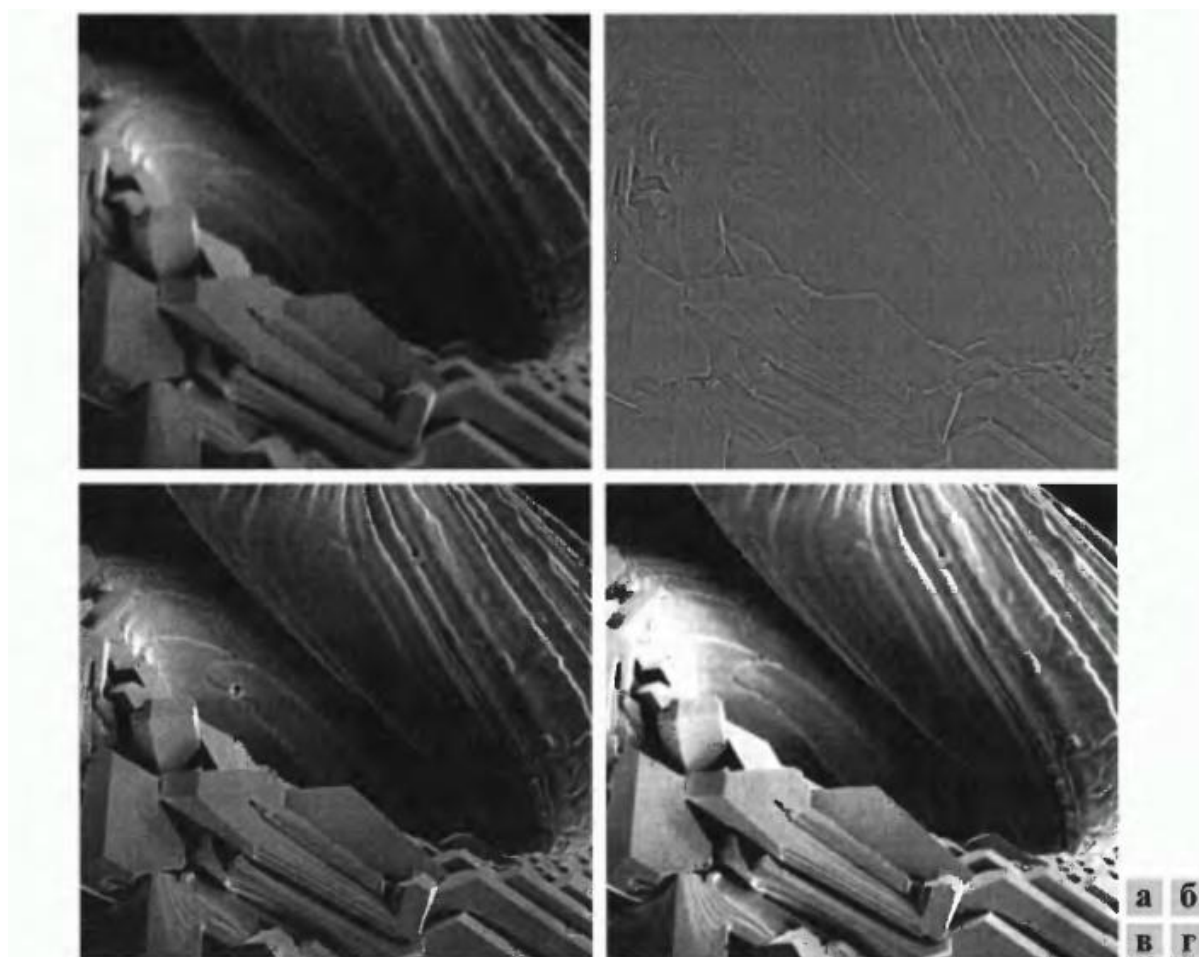


Рисунок 1.11 – *a* - исходное изображение, *б* – лапласиан изображения полученный при использовании маски (рисунок 1.10б) с $A=0$, *в* – изображение, улучшенное наложением лапласиана с маской (рисунок 1.10б) с $A=1$, *г* – То же, что и (*в*) но $A=1,7$

Влияние масок малого размера неизотропное, так как расстояние между центральным элементом маски и вертикальными / горизонтальными элементами условно равно 1, а между центральным элементом маски и диагональными элементами – 1,41. Очевидным решением становится увеличение размера маски для обеспечения изотропности. Когда обработка изображений на компьютерах только осваивалась, и время, расходуемое на обработку, было критично, рост размера маски вел к росту объема вычислений, поэтому часть обрабатываемых элементов было принято заполнять нулями в разреженных масках. Разреженные маски используются для уменьшения количества вычислительных операций в двумерном фильтре. Размеры маски должны быть, по крайней мере, в два раза больше размера выделяемого малоразмерного объекта. Однако эффект размытия в разы сильнее, так как в формировании центрального пикселя нового изображения участвуют более далекие «соседи» [20,21].

В работе автора “Optimization of parameters of two-dimensional filters of increase of clearness of television images on contrastly to frequency characteristics (Оптимизация параметров двумерных фильтров повышения четкости телевизионных изображений по контрастно-частотным характеристикам)”, которая была представлена на конференции International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015) приведено исследование параметров двумерных фильтров повышения качества изображений [22].

1.2.2 Рекурсивные алгоритмы обработки изображений

Переходя ко второму типу фильтрации, следует отметить, что он является самым перспективным и широко используемым в задачах уменьшения вычислительных затрат, при обработке изображений. Данный критерий, а именно затрачиваемое время на обработку изображения (видеопотока) очень важен для систем, работающих в режиме реального

времени. Так же данный тип фильтрации используется в различных модификациях на основе рекурсивных свойств.

Рекурсивные цифровые фильтры (РЦФ) – фильтры в которых количество коэффициентов фильтра может быть уменьшено (по сравнению с нерекурсивными цифровыми фильтрами – НЦФ). Которые называют фильтрами с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры), т. к. "память" по значениям предыдущих отсчетов, которую имеют эти фильтры, в пределе может быть бесконечной. Реакция рекурсивного фильтра на сигнал с учетом "памяти" исключает возможность реализации фильтров с четным импульсным откликом, и частотные характеристики рекурсивных фильтров всегда являются комплексными. Создание рекурсивных частотных фильтров с заданными частотными характеристиками реализуется с использованием z-преобразований [23].

Рекурсивная фильтрация базируется на рекуррентном соотношении между входными и выходными переменными системы. Для одномерных сигналов подобное рекуррентное соотношение имеет следующий вид:

$$r(m) = \sum_{j=1}^J a(j)f(m-j+1) - \sum_{k=2}^K b(k)r(m-k+1), \quad (1.5)$$

где $f(n)$, $n=1,2,\dots,N$ - отсчеты входной последовательности, $r(m)$, $m=1,2,\dots,M$ - отсчеты выходной последовательности, а $b(k)$ и $a(j)$ - весовые множители. Ключевой момент здесь заключается в том, что m -й элемент выходной последовательности зависит не только от последнего и $j-1$ предпоследних элементов входной последовательности, но и от $K-1$ предыдущих элементов выходной последовательности [24].

Существуют различные методы рекурсивной обработки изображений, например:

- интервальное интегрирование;
- интервальное дифференцирование;
- квазиоптимальная фильтрация малоразмерных объектов из шумов;

- трапецеидальная импульсная характеристика;
- двухкаскадный рекурсивно - сепарабельный цифровой фильтр.

В настоящее время существует достаточно большое количество видов рекурсивных фильтров и их модификаций. Наиболее известный из них - фильтр Баттерворта. Он обладает монотонной, гладкой АЧХ во всему частотном диапазоне. При том же порядке многочленов фильтров (равном количестве полюсов) большую крутизну обеспечивают фильтры Чебышева – прямой и инверсный, однако при этом в полосе пропускания (для инверсного – в полосе подавления) у фильтров Чебышева появляются равноволновые пульсации (с одинаковой амплитудой пульсаций). Еще более крутые срезы характеристик (при равноволновых пульсациях как в полосах пропускания, так и в полосе подавления) реализуются с использованием эллиптических функций [25].

Рассмотрим несколько вариантов реализации рекурсивных фильтров. Начнем с таких фильтров как БИХ-фильтры и КИХ-фильтры.

Для обработки двумерных сигналов можно использовать фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры), так и фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). БИХ-фильтры обладают значительным преимуществом относительно КИХ-фильтров, так как для того чтобы достичь тех же частотных свойств, им потребуются меньший объем вычислений. Более того, БИХ-фильтры имеют более узкие переходные полосы от области пропускания до области подавления. Но чем ближе к нулю полином в знаменателе частотной характеристики, тем активней меняется частотная характеристика и с этим связана важная проблема устойчивости БИХ-фильтров [26].

Касательно устойчивости данного типа фильтров можно сказать следующее, что для проверки устойчивости БИХ-фильтров по двумерному z-преобразованию и их импульсных характеристик было предложено несколько методов. Однако на практике их применение часто связано с трудностями и занимает много времени. Одним из таких методов является

применение теоремы Шенкса. Хотя применение данной теоремы в практических ситуациях сопряжено с трудностями. Для проверки устойчивости необходимо единичный круг из плоскости z_1 отобразить на плоскость z_2 , решив неявное уравнение $V(z_1, z_2) = 0$ относительно переменной z_2 . При этом фильтр будет устойчивым тогда и только тогда, когда отображение плоскости d_1 на плоскость z_2 не пересекается с единичным кругом на плоскости z_2 . Подводя итог можно сказать, что использование данного критерия устойчивости требует решения уравнения относительно плоскости z_2 для большого набора значений, что на практике всегда затруднительно (за исключением простейших случаев) [27].

Об устойчивости фильтра с бесконечной импульсной характеристикой судят по его передаточной функции. Для дискретного фильтра достаточно, чтобы все полюса его передаточной функции по модулю были меньше единицы (т.е. лежали внутри единичного круга на z -плоскости). Все критерии устойчивости, применимые в теории линейных стационарных систем, например критерий устойчивости Найквиста или критерий устойчивости Рауса применимы и в случае БИХ-фильтров [28].

КИХ-фильтр – один из видов линейных цифровых фильтров, имеющий характерную особенность как ограничение по времени его импульсной характеристики. Достоинства: не требуют проверки на устойчивость, так как все КИХ-фильтры устойчивы; КИХ-фильтры имеют линейную фазовую характеристику.

Недостаток: имеют больший порядок, чем БИХ-фильтры со схожими характеристиками.

БИХ-фильтр – один из видов линейных фильтров, использующие один или несколько своих выходов в качестве входа, образующих обратную связь.

Достоинство: имеют меньший порядок, чем КИХ фильтры со схожими характеристиками.

Недостатки: требуется проверка на устойчивость.

В статье Мясникова В.В. “О рекурсивном вычислении свертки изображения и двумерного неразделимого КИХ-фильтра” предлагается метод построения алгоритма рекурсивного вычисления свертки изображения и двумерного фильтра с неразделимой конечной импульсной характеристикой (КИХ). Данный метод базируется на представлении конечной импульсной характеристики фильтра путем вертикальных и горизонтальных рекуррентных соотношений. Каждое из рекуррентных соотношений сводит к полурекурсивной операции вычисления свертки изображения и двумерного КИХ-фильтра [29].

Так же исследованиям БИХ- и КИХ-фильтров с различной формой их реализации посвящены работы авторов Никитина Д.А., Сергеева В.В., а также прототипы подобных фильтров в среде программирования Matlab рассматривает Солонина А. И. [30-32].

Решение многих задач в цифровой обработке изображений и распознавания образов основано на использовании простой вычислительной процедуры «скользящим окном», которая может быть реализована двумерным цифровым фильтром, получившим широкое распространение в области обработки изображений. При этом большие размеры «окна» потребуют чрезмерно большое число арифметических операций. Для обработки изображений в режиме «скользящего окна», наиболее удобны алгоритмы параллельно-рекурсивного вычисления свертки, при надлежащей импульсной характеристики КИХ-фильтра [33].

В работе Barmak Honarvar Shakibaei Asli, Raveendran Paramesran и Chern-Loon Lim рассматривается быстрое вычисление момента Чебышева и его обратное преобразование на основе z -преобразования. Авторами выводится упрощенное рекуррентное соотношение для вычисления полиномов Чебышева на основе свойств z -преобразований, что открывает путь для реализации цифрового фильтра второго порядка с ускоренным вычислением полиномов Чебышева [34].

В статье “Цифровой рекурсивный фильтр, согласованный со сложным сигналом” представлены рекурсивные алгоритмы согласованной фильтрации со сложными бинарными фазоманипулированными сигналами по сравнению с нерекурсивной реализацией дают хороший вычислительный выигрыш. Следует отметить что, несмотря на рекурсивную реализацию, данные фильтры остаются КИХ-фильтрами, что дает их потенциальную устойчивость. Число вычислительных операций (за исключением задержки) зависит от структуры сложного сигнала, для которого строится согласованный фильтр [35].

Рекурсивные КИХ-фильтры занимают промежуточное место между нерекурсивными КИХ-фильтрами и рекурсивными БИХ-фильтрами: по способу построения они рекурсивны, т.е. имеют обратные связи, а по длине импульсной характеристики – КИХ-фильтры [36].

В настоящее время цифровая обработка сигналов для подавления случайных помех является необходимым условием для обеспечения высокого качества управления сложными объектами. Для сокращения времени наблюдения за входным сигналом путем сохранения заданного качества подавления помех предлагается использовать совместно рекурсивные и нерекурсивные фильтры. Применение системы из двух фильтров дает возможность уменьшить время наблюдения входного сигнала с сохранением качества подавления помех в выходном сигнале. Более подробно описано в публикациях Губина А.Н. [37,38].

Большинство алгоритмов обработки изображений и сигналов являются локальными, независимо от конкретной физической природы изображений и сигналов. Из-за сильной корреляции операций, необходимых для определения двух соседних элементов, обработка изображений может быть существенно ускорена с помощью быстрых алгоритмов. В работе Palenichka и Lutsyk приведено рассмотрение быстрых алгоритмов, в том числе линейной и медианной фильтрации с использованием рекурсивных вычислений. Поскольку линейная фильтрация и алгоритмы с линейной функцией часто

используются для обработки изображений и сигналов в различных областях. Сделан вывод о том, что общая форма линейной фильтрации может быть определена с использованием кусочно-линейной аппроксимации, которая также обеспечивает независимость числа операций от размера окна, хотя и за счет некоторой потери точности. Допуская некоторую неточность при линейной фильтрации, мы ускоряем обработку, тогда как более высокая точность достигается за счет снижения скорости обработки [39].

Фильтрацию неподвижного изображения не сложно представить в виде случайной функции двух переменных (яркости в прямоугольной системе координат) на фоне шума. В таком варианте задачи изображение, шум и смесь изображения с шумом представляют собой неподвижные случайные поля. Решение данной задачи затрудняется тем, что по причине большого количества связей каждого элемента изображения с другими элементами, изучаемые поля точно рекуррентными моделями с ограниченным количеством связей не описываются, что препятствует применению хорошо развитой в настоящее время марковской теории фильтрации. Поэтому следует вначале вычислить нижнее граничное значение среднего квадрата ошибки для нереализуемого оптимального нерекурсивного фильтра, а далее квазиоптимальные рекурсивные фильтры для рекуррентных моделей. Чтобы осознанно выбрать фильтр с учетом точности фильтрации и сложности реализации, необходимо сравнить характеристики оптимального нерекурсивного и квазиоптимальных рекурсивных фильтров [40].

Операции обработки изображений, такие как размытие, обратная свертка и таблицы зоны суммирования часто эффективно вычисляются как последовательность 1D рекурсивных фильтров. В то же время, много ученых исследовали параллельную рекурсивную фильтрацию, и предыдущие методы не оптимизируются по всем фильтрам последовательности. Группой ученых под руководством Diego Nehab описана эффективная алгоритмическая структура, которая сокращает память в пропускной способности по ряду рекурсивных фильтров. Это метод делит вход на блоки, которые

обрабатываются параллельно современной архитектурой графического процессора, и перекрывает обработку фильтра причинно-следственных связей, «анти-каузалов», «строк и столбцов». Полная очередность проходов фильтра требует прочтения входного изображения только дважды, и записывает данные только один раз. Уменьшенное количество доступов к глобальной памяти приводит к значительному росту производительности цифрового фильтра [41].

Оценка собственного шума структур рекурсивных цифровых фильтров представлен, а в публикации Солониной А.И. [42], где предлагается эквивалентная линейная модель с векторным представлением соотношения вход/выход, на основе, которой созданы универсальные эквивалентные линейные модели структур рекурсивных цифровых фильтров.

Такой тип изображений как интегральное изображение, является представлением промежуточного изображения, нашел обширное использование в многомерных алгоритмах обнаружения локальных функций, таких как ускоренные надежные функции (SURF), позволяющий быстро вычислять прямоугольные элементы с постоянной скоростью, независимо от размера фильтра. Для встроенных систем видения в реальном времени с ограниченными ресурсами вычисления и хранения целостного изображения представляет несколько проблем из-за ограничений по времени и аппаратных ограничений. Хотя расчет интегрального изображения состоит только из простых операции сложения, общее количество операций велико из-за размера данных изображения. Рекурсивные уравнения позволяют существенно уменьшить число операции, но требуют расчета в последовательном порядке. В работе посвященной рекурсивным системам обработки интегральных изображений, предложена модернизация двух аппаратных алгоритмов основанных на разложении Виолы-Джонса. Что позволило уменьшить вычислительным затраты и используемый объем внутренней памяти системы [43].

В серии работ посвященных алгоритмам шумоподавления в видеоданных представлена модернизация алгоритма основанного на нелокальных средствах (non-local means, NLM) при помощи временной рекурсии. Этот тип рекурсивной обработки позволяет использовать временную корреляцию с небольшими дополнительными вычислительными затратами [44,45].

Метод синтеза комплексных рекурсивных цифровых фильтров реализован методом инвариантных переходных характеристик. Комплексные фильтры имеют два квадратурных канала, которые позволяют сравнить изменение частоты настройки фильтра, что делает их весьма производительными при создании адаптивных и когерентных систем обработки информации. В публикации Зиатдинова С.И. и Соколовой Ю.В. приведены конкретные примеры построения комплексных дискретных фильтров [46].

Применение рекурсивных алгоритмов фильтрации в реальном времени описано в работе “A Real Time Image Processing Based System to Scaring the Birds from the Agricultural Field” (Система обработки изображений в реальном времени для отпугивания птиц с сельскохозяйственных полей). Система способна обнаруживать и отслеживать птиц-вредителей из видеокadra в реальном времени, используя фильтр Калмана. Фильтр Калмана – это прогнозирующий фильтр, который зависит от пространственной техники и рекурсивных алгоритмов с использованием инструментов обработки изображений в среде Matlab [47].

В статье [48] обсуждаются некоторые моменты проблемы устойчивости в фильтров при двумерной рекурсивной фильтрации. В основном предлагаемый метод, представляет упрощенную версию теоремы устойчивости Шенкса и показывают, что она эквивалентна некоторым результатам Анселла.

Подавление шумов является главной задачей для улучшения качества видеоизображений и цифровых фотографий. Исследование рекурсивной и

сепарабельной реализаций фильтра нелокального усреднения рассматривается в работе Егоровой М.А. и Литвинова В.Е [49].

Билатеральная фильтрация осуществляет фильтрацию с пространственным ядром в виде одномерного вектора сначала по строкам, а затем по столбцам. Как и с линейными сепарабельными фильтрами, этот фильтр тоже называют сепарабельным, который кратко и четко характеризует похожий способ обработки.

Применение билатерального фильтра рассмотрено при решении задачи распознавания тех или иных объектов на снимках, как правило, затруднено ввиду наличия разного рода искажений. В данной работе рассмотрен метод предобработки изображений с использованием билатерального фильтра и «шок-фильтра» для последующего распознавания образов методом контурного анализа. Приведена оценка качества распознавания при использовании указанных фильтров и без них. Качество распознавания оценивалось при разных параметрах фильтров. В работе показано, что в случае изображения, обработанного указанным способом, вероятность правильного распознавания объектов существенно повышается [50].

Исследованиям билатеральной фильтрации посвящен ряд работ Филиппова М.В. из МГТУ им. Н.Э. Баумана [51-53].

В одной из работ приведен анализ эффективности алгоритмов билатеральной фильтрации со стандартными методами шумоподавления и сделаны следующие выводы [51]:

- билатеральный фильтр сохраняет границы изображения, что упрощает последующую обработку изображения, в отличие от медианного фильтра, часто используемого в настоящее время;
- билатеральная фильтрация по методу билатеральной решетки является наиболее эффективной для практического использования по соотношению критериев быстродействия и качества;

– прямой метод билатеральной фильтрации целесообразно применять в том случае, если требуется максимально точный результат без временных ограничений;

– билатеральную фильтрацию по методам разделяемого ядра и локальных гистограмм целесообразно применять при небольших ядрах, что позволит провести быструю обработку, а ошибки в вычислениях не будут заметны для визуального восприятия.

В одной из работ Филиппова М.В. [52] предложен алгоритм, с помощью которого время реализации билатеральной фильтрации существенно уменьшается по сравнению с непосредственным вычислением по стандартной формуле реализации для данного фильтра. Были обработаны изображения различного размера. Продемонстрировано, что время фильтрации изображения составляет в пределах 1 минуты. Так же в работе показано, что увеличение скорости работы билатерального фильтра не приводит к существенному ухудшению качества фильтрации.

Так же Филипповым М.В. рассмотрено влияние билатеральной фильтрации на специфический тип изображений, такой как аэрофотоснимки. В работе был продемонстрирован быстрый билатеральный фильтр на основе декомпозиции на простые пространственные фильтры с использованием распараллеливания по компонентам (PBFIC). Результаты, полученные в ходе эксперимента продемонстрировали очевидное преимущество метода по быстродействию за счёт дополнительного использования памяти. Несмотря на это, достигнуто время работы билатерального фильтра в реальном времени, что является существенным преимуществом для использования фильтра в качестве предварительной обработки видеок кадров [53].

Работами по использованию и модернизации билатеральной фильтрации занимается Рудникович А.С., в которых приводит доказательства того что сепарабельные аппроксимации билатерального фильтра дают возможность добиться не только увеличения быстродействия, но и лучшего отношения сигнал/шум для большинства

видеопоследовательностей. На отдельных последовательностях пространственно-адаптивный фильтр демонстрирует существенное преимущество, но в основном, он не позволяет добиться существенного улучшения отношения сигнал/шум по сравнению с обычной сепарабельной фильтрацией [54].

1.3 Быстродействующие алгоритмы обработки изображений

Для понимания сути алгоритмов данного типа введем определение быстродействия. Быстродействие – это способность приборов, устройств, механизмов и т.п. выполнять с необходимой скоростью работу, для которой они предназначены [55]. Так же данное свойство алгоритмов обработки можно сформулировать как возможности реализации канонических алгоритмов в ином представлении за счет каких либо преобразований, что ведет к уменьшению вычислительных операций, упрощению алгоритма и по итогу приводит к выигрышу по временным затратам, что очень важно в различных областях жизнедеятельности человека, где востребовано уменьшения вычислительных затрат.

В серии книг Т.С. Хуанга посвященных цифровой обработке изображений рассматриваются три основные области обработки изображений: эффективное кодирование, реставрация и улучшение визуального качества изображений, распознавание образов. Многие методы реставрации и улучшения визуального качества изображений основаны на использовании линейных пространственно-инвариантных фильтрах [56,57]. Для решения подобных задач часто требуются нелинейные методы. Одним из таких методов является медианная фильтрация [58].

В статье Захожая О.И. и Солошенко А.Н. рассматриваются вопросы построения системы высокоскоростной обработки изображений с применением цифровых фильтров и концепции System-On-Chip. Применение цифровых фильтров позволяет реализовать высокоскоростную

предварительную обработку изображения, регулировку экспозиции, что позитивно влияет на репрезентативность признаков на изображении [59].

Рассмотрим методы уменьшения количества вычислительных операций при выполнении цифровой фильтрации изображений, основанных на операции математической двумерной свертки. Используемая при фильтрации двумерная свертка имеет особенности – возможность предварительной обработки коэффициентов фильтра и большую разницу между количеством отчетов во входном сигнале и количеством коэффициентов в фильтре. В статье рассмотрены известные методы разложения двумерной свертки в несколько сверток с меньшим числом элементов применительно к задаче цифровой фильтрации. По итогам работы авторы делают вывод о том, что основанные на разложении быстрые алгоритмы вычисления двумерной свертки имеет смысл использовать, начиная с размера ядра 4×4 элемента (практически применяются ядра нечетных размеров). Уменьшение числа необходимых операций при применении разложения при ядре 5×5 элементов составляет 16 %, 7×7 элементов – 27 %, 9×9 элементов – 31 %. Ввиду сложности алгоритма разложения на свертки меньших размеров при практической реализации следует ожидать сокращение выигрыша в быстродействии, тем не менее, следует сделать вывод, что рассмотренные в статье алгоритмы имеют практическую ценность для вычисления коротких сверток для ядер, начиная с размера 5×5 элементов [60].

Исследованиями в области обработки сигналов и изображений занимается Чобану М., который в частности ведет работу по цифровой обработке многомерных сигналов. В одной из своих работ автор описывает реализованный иерархический алгоритм кодирования многомерных сигналов с помощью неразделимой системы. Разработанный метод может стать прорывным для таких направлений, как трехмерное телевидение, медицинская техника, телекоммуникации и т.п. Предложенные алгоритмы реализуются на массовых и недорогих вычислительных платформах – видеокартах персональных компьютеров. Это доказывает, что современный

уровень достижений в области цифровой обработки многомерных сигналов – теоретических, алгоритмических, программно-аппаратных – позволяет реализовать принципиально новые цифровые телекоммуникационные и мультимедийные системы, в том числе – системы трехмерного телевидения [61].

Эффективный гауссов фильтр с постоянным временем который обеспечивает высокую точность, со свойством сдвига второго порядка DCT-5, которое превосходит существующие алгоритмы в широком диапазоне масштабов с точки зрения точности, его стабильности и вычислительных затрат. Экспериментальные результаты по фильтрации изображений продемонстрировали превосходство использования свойство сдвига второго порядка DCT-5. Предложенное алгоритмическое решение для анализа многомасштабных изображений позволяет преодолеть проблему увеличения «вычислительной» гауссовой свертки. Авторы считают, что результаты их исследований способствуют разнообразию приложений в обработке изображений и компьютерном зрении [62].

В исследовании описанном в работе “ Compiling High Performance Recursive Filters (Компиляция высокопроизводительных рекурсивных фильтров)” авторы показывают, что параллельные и локально-ориентированные реализации IIR фильтрующие конвейеры могут быть получены с помощью программных преобразований, которые механизмируются с помощью доменного компилятора. В работе представлены DSL и компилятор для автоматической оптимизации конвейеров рекурсивных фильтров. Основным вкладом является автоматическое разбиение на фрагменты общих конвейеров, достигаемое с помощью набора простых преобразований кода [63].

На IEEE конференции был представлен новый глобальный и рекурсивный алгоритм отслеживания (GReTA) в трех измерениях, способный восстанавливать непрерывные траектории для большого числа объектов и больших временных интервалов, даже с частыми оптическими

«окклюзиями». Данный рекурсивный алгоритм основывается на идее глобальной оптимизации решения глобального как в пространстве, так и во времени. Применимость глобальной оптимизации ограничена вычислительной сложностью, которая увеличивается экспоненциально быстро с продолжительной последовательностью. Здесь реализуется значительное уменьшение сложности вычислений, используя рекурсивную стратегию «разделяй и властвуй», позволяющую сначала оптимизировать совпадения «глобально» (по более коротким временным интервалам), а затем выполнить итерацию, чтобы охватить всю временную последовательность. Таким образом, вычислительная сложность резко уменьшается при сохранении глобальной области видимости, что позволяет контролировать очень большие наборы данных (большие с точки зрения количества объектов и продолжительности захвата видеоданных). Авторы также предложили несколько модификаций, делающих алгоритм устойчивым к ошибочным или отсутствующим данным [64].

1.4 Факторы оказывающие влияние на разрешение получаемых изображений

Факторы, из-за которых разрешение получаемых изображений может не соответствовать разрешению заявленному в технической документации используемого оборудования могут быть различными.

Для того чтобы обеспечить высокое качество получаемых видеоданных крайне важно выбрать качественное и проверенное техническое оборудование. Но даже при условии выбора такового оборудования не может обеспечить полное устранение помех, и по этой причине очень часто сталкиваются с такой проблемой, как цифровой шум на изображении. Цифровой шум представляет собой совокупность неупорядоченных пикселей любого цвета (цветные, монохромные) и яркости (светлые, темные) по всему полю изображения.

Пример показан на рисунке 1.12.

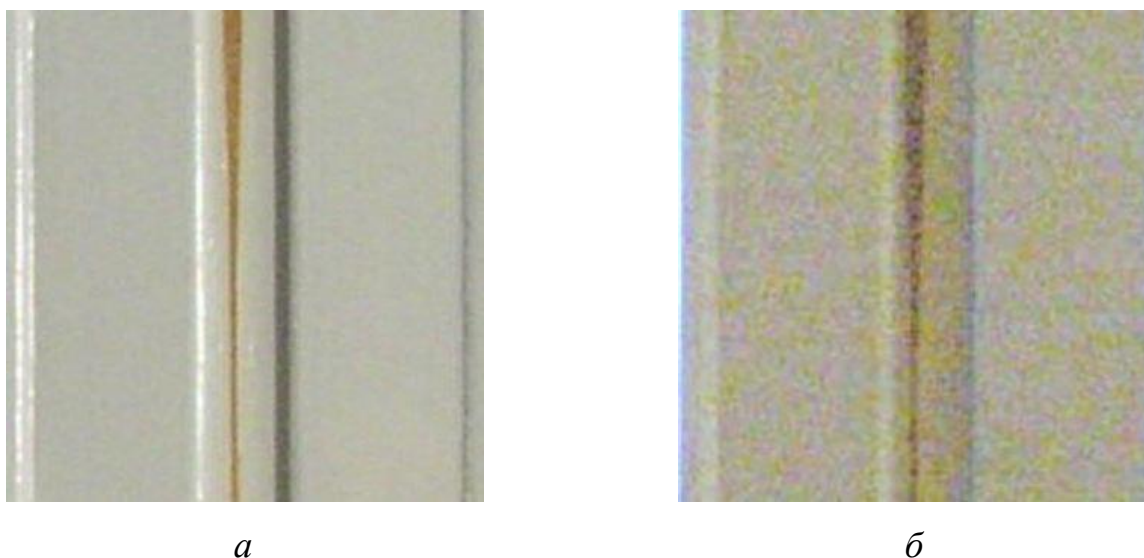


Рисунок 1.12 – Пример изображения (а) при благоприятных условиях и (б) при неблагоприятных условиях

Причиной данного дефекта является матрица цифрового аппарата – электронный светочувствительный элемент. В общем можно выделить, следующие причины возникновения цифрового шума:

- искажения, которые являются результатом взаимодействия света и матрицы (элементы фотонной структуры света взаимодействуют на уровне атомов с фотодиодным материалом матрицы);
- различные дефекты матрицы, а также разного рода примеси в материале, используемого для изготовления матрицы;
- дефекты, возникающие по причине преобразования сигнала, технологий сжатия.

Фотон света движется внутри кристаллической решетки кремния (матрица состоит из кремния), и вполне вероятно, что контакт фотона с атомом кремния приводит к выбиванию электрона из атома кремния, вследствие чего возникает пара “электрон-дырка” [65].

Искажения, появляющиеся по причине примесей в материале матрицы, называются дефектами потенциального барьера. Они создают утечку заряда, сформированного во время экспозиции, что называется «черный дефект», и проявляются на светлом изображении в виде темных

точек. Так же, на матрице могут присутствовать дефектные пиксели. Это нерабочие пиксели, которые возникают на этапе производства сенсоров (их появление может быть связано с несовершенством технологии) и всегда находятся на одном и том же месте. Чтобы удалить нежелательное влияние такого дефекта используются математические методы интерполяции, при этом на место нерабочего пикселя подставляется или элемент соседний, или среднее значение окружающих пикселей, или же значение вычисляется другим, более сложным методом. В итоге, результирующее значение пикселя отличается от настоящего и, как следствие, ухудшает резкость всего изображения.

Дефекты, появляющиеся по причине преобразования сигнала, проанализируем на примере гамма - коррекции. Гамма – коррекция может реализовываться либо в процессоре, либо в электронном тракте (электронный тракт в оптикоэлектронной системе – это электронная система, предназначенная для регистрации, обработки, изменения и испускания оптического сигнала) [66].

Глаз человека устроен таким образом, что его чувствительность к свету можно назвать логарифмической, а фотосенсоры имеют линейную чувствительность, по этой причине слабые сигналы необходимо усиливать в большей степени, чем сильные, чтобы в результате получилось изображение, привычное для человека. Для этих целей используются таблицы перекодировки, которые позволяют определить соответствие сигналов на входе и выходе системы. Величина шума вызываемого дефектом матрицы имеет различную степень появления и зависит от ряда причин, которые связаны с фотосенсором применяемой техники:

- физический размер фотосенсора и его разрешение;
- чувствительность фотосенсора;
- выдержка или время экспозиции кадра.

Чем меньше физический размер (габариты) фотосенсора и больше его разрешение, тем выше уровень шумов для данной матрицы. Данное

утверждение актуально при неизменной технологии изготовления фотосенсоров. Производители поддерживают уровень шума матрицы на одном уровне, а ее разрешение год от года увеличивается.

Фактически чувствительность фотосенсора постоянна, меняется только коэффициент усиления сигнала.

С 1998 года существует стандарт ISO (International Organization for Standardization), устанавливающий зависимость между величиной сигналов матрицы и конкретными экспозиционными индексами (EI) [67].

Уровень цифровых шумов сильно зависит от температуры фотосенсора, чем температура выше, тем выше уровень шума на изображении. При серийной съемке температура матрицы увеличивается, поэтому последний кадр из последовательности будет самым зашумленным. Чем короче выдержка, тем меньше количество цифровых шумов. При длительной выдержке (1 секунда и более) уровень цифровых шумов растет. Здесь нужно понимать, что не во всех случаях можно использовать короткую выдержку. В данном случае придется пойти на компромисс – увеличить ISO и как следствие можно будет уменьшить выдержку и избежать “смазанности изображения” [68].

В процессе приема/передачи видеоданных они подвергаются влиянию внешних помех, шумов, различных искажающих воздействий, также существует большая вероятность того, что искажения передаваемой информации возникнут от различных внутренних процессов.

Существуют системы, которые за счет технических решений предложенных в них позволяют бороться с погодными условиями и получать изображения приемлемого разрешения. Различным условиям окружающей среды могут по разному влиять на работу АИ ТИС, анализ данного влияния на систему представлен в работе автора по изучению влияния окружающей среды на системы данного типа [69].

1.5 Распределение разрешения по полю изображения

Под полем изображения понимается, пространство попадающие в поле зрения оптического прибора (ОП), с помощью которого формируется видеоизображение.

Поле зрения ОП называется та часть пространства предметов, которая видна или изображается с помощью ОП. Поле зрения принято измерять в угловой мере (2ω), если наблюдаются удаленные предметы, и в линейной мере ($2y$), если предметы расположены близко. В последнем случае величина поля дублируется и в угловом мере. Так поле зрения телескопических систем, определяется в угловой мере (градусной). Поле зрения в приборе ограничивается специальной диафрагмой, называемой диафрагмой поля зрения. Ограничение поля делается потому, что на краях понижается качество изображения, сильно падает освещенность изображения, а в некоторых случаях это ограничение накладывает приемник [70].

Для понимания процесса распределения разрешения по полю изображения необходимо определить некоторые термины из оптики, которые помогают понять процессы распределения разрешения изображения по его полю. Начнем с того что введем определение оптической системы.

Оптическая система – это совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, которые ограничиваются диафрагмами. Оптическая система предназначена для формирования изображения путем перераспределения в пространстве электромагнитного поля, исходящего из предмета (преобразования световых пучков).

Оптическая ось в геометрическом смысле - прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, составляющих центрированную оптическую систему (линзу, фотографический объектив). Часто является осью симметрии в оптической системе [71].

Фокусное расстояние – физическая характеристика оптической системы, характеризующая её основные свойства и, главным образом,

увеличение и угловое поле [72]. Для центрированной оптической системы, состоящей из сферических поверхностей, описывает способность собирать лучи в одну точку при условии, что эти лучи идут из бесконечности параллельным пучком параллельно оптической оси.

Для системы линз, как и для простой линзы конечной толщины, фокусное расстояние связано с радиусом кривизны поверхностей, а так же показателей преломления оптических материалов и толщин элементов используемой системы.

Фокусное расстояние – это расстояние от передней главной точки до переднего фокуса (для переднего фокусного расстояния), или расстояние от задней главной точки до заднего фокуса (для заднего фокусного расстояния). При этом под главными точками понимаются точки пересечения передней (задней) главной плоскости с оптической осью.

Фокус оптической системы – это точка, в которой пересекаются («фокусируются») первоначально параллельные лучи после прохождения через собирающую систему (либо где пересекаются их продолжения, если система рассеивающая). Изображение бесконечно удалённой точки находится в фокусе оптической системы [73]. Множество фокусов идеальной оптической системы определяет её фокальную плоскость. Главный фокус системы является точкой пересечения её главной оптической оси и фокальной поверхности [71]. Сейчас вместо термина «главный фокус» (передний или задний) используются термины задний фокус и передний фокус [74]. Термин «фокус» в его современном понимании ввёл Кеплер в 1604 году [75].

Передний фокус — точка на оптической оси в пространстве предметов, сопряжённая с бесконечно удалённой точкой, расположенной на оптической оси в пространстве изображений, а расстояние от передней главной точки до переднего фокуса — переднее фокусное расстояние [76].

Задний фокус — точка на оптической оси в пространстве изображений, сопряжённая с бесконечно удалённой точкой, расположенной на оптической

оси в пространстве предметов. Соответственно, расстояние от задней главной точки до заднего фокуса называют задним фокусным расстоянием [76].

Четкость изображения описывается воспроизведением мелких деталей и определяется разрешающей способностью системы формирования изображения. Разрешающая способность оптической системы численно выражается количеством пар черно-белых линий на 1 мм изображения, которое формируется объективом системы. Если плоскость формируемого изображения находится в фокусе объектива, то пучок лучей, исходящий от точки на объекте, сходится в точку на изображении. При расфокусировке точка воспроизводится на формируемом изображении в виде некоторого пятна (кружка размытия), и две близко расположенные точки на исходном изображении сливаются воедино на наблюдаемом. Величина кружка размытия зависит от фокусного расстояния объектива, а также от расстояний от объектива до объекта и до плоскости формируемого изображения. Дискретное изображение будет четким (сфокусированным), если диаметр кружка размытия не превышает шага дискретизации наблюдаемого изображения. В противном случае линейные искажения становятся заметными [13]. Примеры изображения находящегося в фокусе камеры и изображения, которое не попало в фокус камеры, представлены на рисунке 1.13.

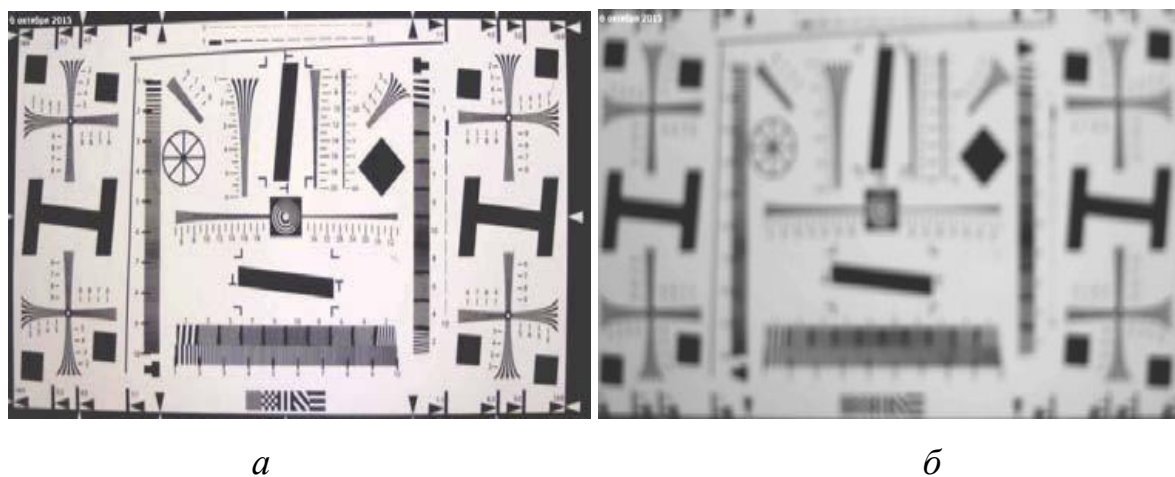


Рисунок 1.13 – Пример сфокусированного (*a*) и расфокусированного (*б*) изображений

Глубина резко изображаемого пространства (глубина резкости) – расстояние вдоль оптической оси объектива между двумя плоскостями в пространстве предметов, в пределах которого объекты отображаются в сопряжённой фокальной плоскости субъективно резко [71]. Непосредственно зависит от важнейших характеристик оптической системы: главного фокусного расстояния и относительного отверстия, а также от дистанции фокусировки. При этом абсолютно резко отображаются только объекты, расположенные в одной плоскости предметного пространства, соответствующей дистанции фокусировки [77].

Аберрация оптической системы – это ошибка или погрешность на изображении в оптической системе, появляющаяся из-за отклонения луча от того направления, по которому он должен был пройти в идеальной оптической системе. Аберрацию характеризуют различного вида нарушения гомоцентричности в структуре пучков лучей, выходящих из оптической системы [73]. Можно выделить несколько видов аберраций оптической системы:

- монохроматические геометрические аберрации;
- сферическая аберрация;
- аберрация кома;
- астигматизм;
- кривизна поля изображения;
- дисторсия;
- хроматические аберрации;
- дифракционная аберрация.

Монохроматические геометрические аберрации появляются из-за несовершенства оптических систем и проявляются в монохроматическом свете. В отличие от случая с идеальной оптической системой, в которой все лучи от какой-либо точки предмета в меридиональной плоскости после прохождения через систему концентрируются в одной точке, в реальной оптической системе пересечение плоскости изображения этими лучами происходит в

разных точках. Координаты данных точек зависят от направления луча, координат точки пересечения с плоскостью входного зрачка и конструктивных элементов оптической системы (радиусы поверхностей, толщина оптических элементов, коэффициенты преломления линз и тд.) [78,79].

Сферическая aberrация возникает из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси, из-за чего нарушается гомоцентричность пучков лучей от точечного источника, хотя симметрия этих пучков сохраняется (рисунок 1.14). Это единственный вид геометрической aberrации, которая имеет место даже тогда, когда исходная точка расположена на главной оптической оси системы. При сферической aberrации цилиндрический пучок лучей после преломления линзой приобретает вид не конуса, а воронкообразной фигуры. Изображение точки имеет дисковую форму с неоднородным уровнем освещенности. Причиной является тот факт, что преломляющие поверхности линз пересекаются с лучами широкого пучка под различными углами, из-за чего удалённые лучи преломляются сильнее и образуют свои точки схода на некотором отдалении от фокальной плоскости [71,78,79].

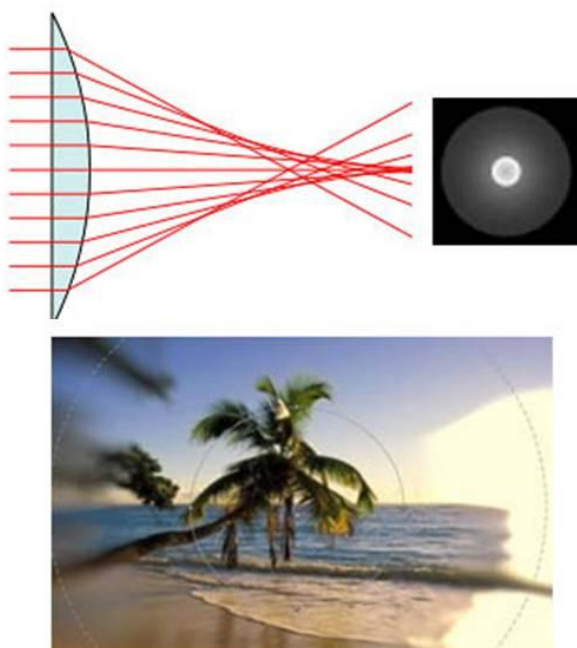


Рисунок 1.14 – Сферическая aberrация

Коматическая aberrация или Кома (от др.-греч. κόμη — волосы) — одна из пяти aberrаций Зейделя оптических систем, приводящая к нарушению гомоцентричности широких световых пучков, входящих в систему под углом к оптической оси [71]. Каждый участок кольцевой зоны оптической системы, удалённый от оси на расстояние R даёт кольцо изображения точки, радиус которого увеличивается с увеличением R . Из-за несовпадения центров колец происходит их наложение, что приводит к тому, что изображение точки, формируемое оптической системой, принимает форму несимметричного пятна рассеяния с максимальной освещённостью у вершины фигуры рассеяния, напоминающего комету. В сложных оптических системах кому корректируют вместе со сферической aberrацией путем подбора линз. Системы без коматической и сферической aberrации называют апланатами [78,79]. Пример возникновения aberrации Кома представлен на рисунке 1.15.

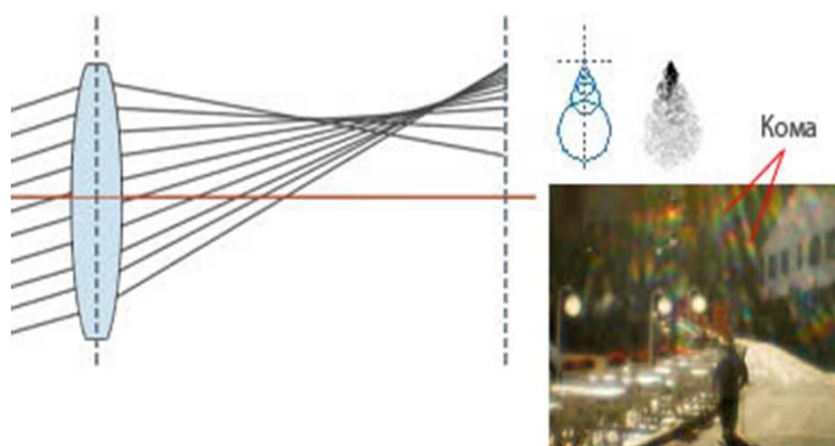


Рисунок 1.15 – Aberrация „Кома”

Кривизна поля изображения показывается в том, что изображение плоского (перпендикулярного к оптической оси) объекта находится на поверхности, вогнутой либо выпуклой по отношению к объективу, что делает резкость неравномерной по полю изображения (рисунок 1.16). При резкой фокусировке центральной части изображения края будут лежать не в фокусе и наоборот. Кривизна поля изображения, как правило, достигает больших значений у простых объективов (до 4 линз). Корректируется подбором кривизны поверхностей и толщины линз, а также расстояний

между ними. Для качественного исправления, с учетом других видов aberrаций, необходимо присутствие в составе не менее двух отрицательных линз. При диафрагмировании отрицательное влияние кривизны поля на качество изображения уменьшается [73,78,79].

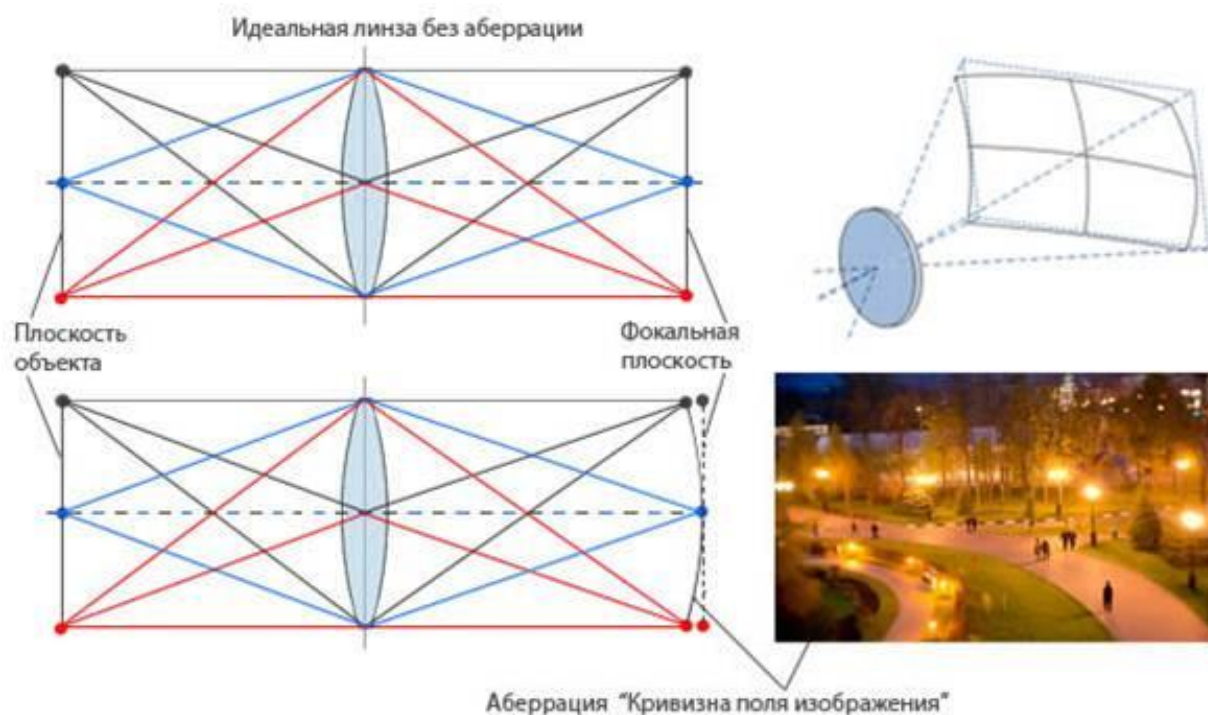


Рисунок 1.16 – Кривизна поля изображения

Дисторсией (искривлением) является изменение линейного увеличения по полю зрения, что приводит к нарушению геометрического подобия между объектом и его изображением. Этот вид aberrации не зависит от координат пересечения луча и плоскости входного зрачка, но зависит от расстояния от источника до оптической оси (рисунок 1.17). Оптическая система без дисторсии называется ортоскопической. В объективах с симметричной конструкцией проявляется незначительно. Для устранения дисторсии применяют подбор линз и других элементов при разработке оптической системы. В цифровой фотографии дисторсия может быть исправлена с помощью компьютерной обработки [71,78,79].

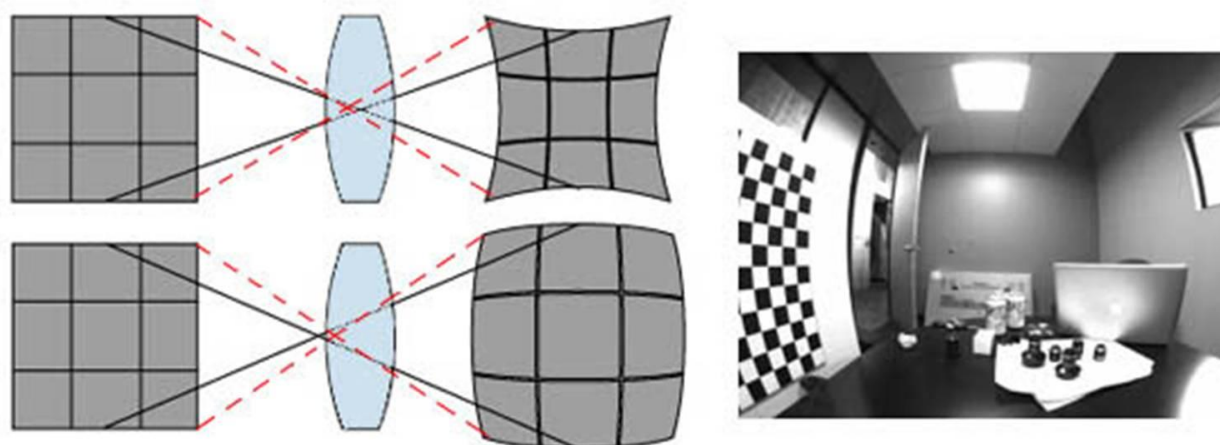


Рисунок 1.17 – Дисторсия

Устранить aberrации полностью в оптических системах невозможно. Важно сводить их к минимально допустимым значениям, которые обусловлены техническими требованиями и стоимостью изготовления оптической системы.

1.6 Методы измерения разрешения изображений и оценки их качества

Качество воспроизведения мелких деталей и резких границ телевизионных изображений оценивается контрастом, точностью цветопередачи и длительностью цветовых переходов. Данные параметры оказывают непосредственное влияние на зрительное восприятие качества изображения по показателям четкости, цветности и резкости [80].

Разрешающая способность (горизонтальная чёткость) в телевидении и видеозаписи – способность устройства передавать мелкие детали изображения. В аналоговом телевидении измеряется в горизонтальных телевизионных линиях [81,82].

Для количественной оценки разрешающую способность изображения, принято считать количество отдельно различимых вертикальных и горизонтальных линий. Поскольку яркостная составляющая имеет более широкий (в 4 раза) спектр, чем цветокодирующая, то различают разрешающую способность в канале яркости и цветное разрешение. Для

визуального измерения разрешения изображения используют специальные настроечные тестовые таблицы, в которых изображаются группы линий переменной толщины – «клинья». Пример тестовой таблицы с «клином» для визуальной оценки разрешения изображения представлен на рисунке 1.18. Если можно различить линии у некоторой отметки, то считают, что разрешающая способность системы позволяет воспроизвести данное значение ТВЛ по выбранному направлению [83,84].

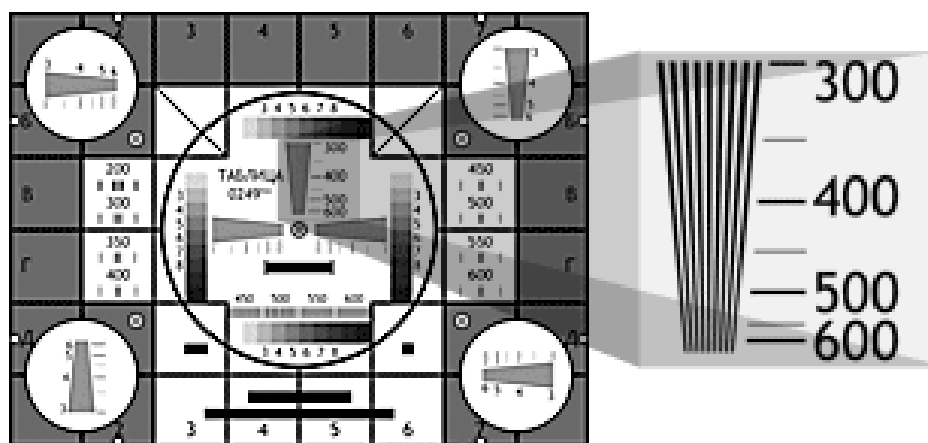


Рисунок 1.18 – Пример тестовой таблицы с «клином»

Исходя из определения разрешения, можем сделать вывод что, если объектив, 8-мегапиксельной камеры прикрыть «мутным стеклом», то количество мелких деталей на снимке явно будет меньше чем даже у 3-мегапиксельной камеры. В практических случаях роль «мутного стекла» играют уже упоминавшиеся aberrации, а также переотражения внутри объектива. Мегапиксельное разрешение всего лишь необходимое, но не достаточное условие. Чтобы разрешить 1000 линий, кадр должен иметь примерно 1500 пикселей в высоту. Этот коэффициент около 1,5 связан с тем, что вероятность точного попадания линии миры на линию пикселей достаточно мала. Линии всегда попадают между пикселями, в большей или меньшей степени. Из статистического усреднения и берётся это эмпирическое правило, что для отображения каждой двух линий нужно три ряда пикселей. Таким образом, зная размер кадра можно рассчитать

максимально возможное разрешение, которое достигалось бы при идеальном объективе [85].

Для того чтобы определить разрешение, требуется знать не число, а функцию – зависимость контраста между черной и белой линиями от числа линий в кадре, именуемую частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), которую позволяет сформировать программа Imatest [86].

Приведем пример графика данных получаемых при помощи ПО Imatest рисунок 1.19.

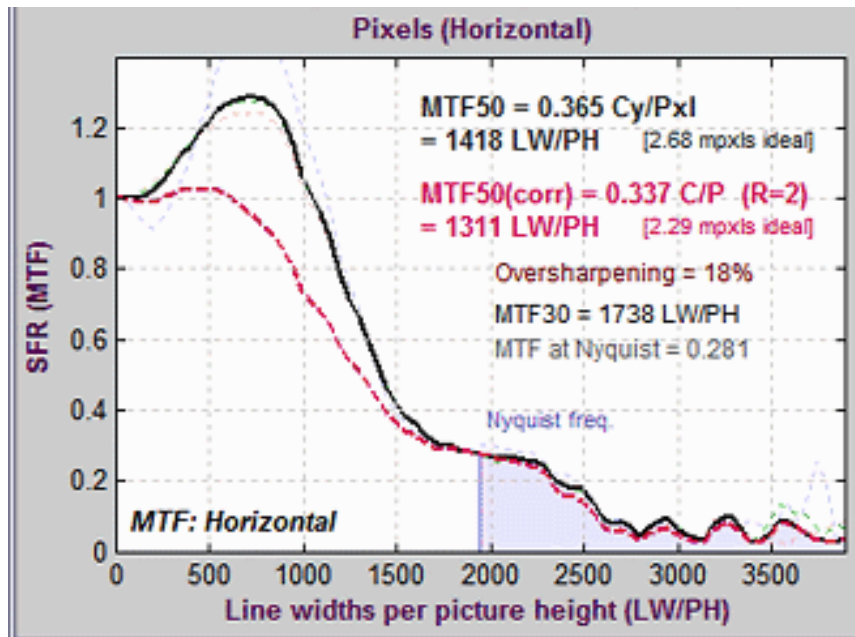


Рисунок 1.19 – График ЧКХ из ПО Imatest

На графике приведенном на рисунке 1.18 показана пространственная частотная характеристика (SFR), которая также называется функцией передачи модуляции (MTF) на графике обозначается черной сплошной линией, в русскоязычной литературе чаще всего используется частотно-контрастная характеристика (ЧКХ). Термин ЧКХ обычно используется для описания работы любых оптических систем, но в данной работе речь будет вестись о ЧКХ телевизионных объективов [87]. Тонкие, легкие, пунктирные кривые являются MTFs для красного, зеленого, синего и яркости каналов. Индикатор первичной производительности MTF50 (пространственная частота, где контрастность изображения падает до 0,5 то есть равна 50%).

Выше, тем лучше, хотя результат выше частоты Найквиста (0.5 циклы / пиксель; высокая пространственная частота, где может быть передана информация) может указывать на проблемы сглаживания (низкочастотные артефакты). "Идеальные мегапиксели" показаны в квадратных скобках ([...]), является количество мегапикселей с идеальным ответом ($MTF_{50} = 0,5$ циклы / пиксель), что бы иметь эквивалентную точность. Практически все цифровые камеры редко достигают этого уровня, поэтому MTF_{50} около 0,33 (Циклов/пиксель) вполне достаточный для получения качественного изображения [86,88].

На графике рисунка 1.18 по оси ординат (оси Y) отложено значение контраста (1 – 100%, 0,5 – 50%, 0,3 – 30%), а по оси абсцисс (оси X) отложена частота следования линий в так называемых «циклах на пиксель». За один цикл принимается пара «черная линия – белая линия». Таким образом, «предельный случай», когда одна линия приходится на один пиксель, соответствует 0,5 цикла на пиксель. Отсюда можно получить выражение для перевода числа «циклов на пиксель» в ТВЛ, представленный формулой 1.5 [88]

$$ТВЛ = (C/P/0.5) \times \text{"Предельное разрешение в ТВЛ"} , \quad (1.6)$$

здесь C/P - число "циклов на пиксель", "Предельное разрешение в ТВЛ" - разрешение, при котором одна линия приходится на один пиксель (вернее, число линий равно числу пикселей, 0,5 циклов/пиксель). К примеру для SD видео это будет 540 ТВЛ (720 x 3/4) [88].

Так же при работе в ПО Imatest следует учитывать тот факт что существует ряд рекомендаций к выбираемой области интереса где будет производится измерение параметров. На рисунке 1.20 приведена область интереса с минимальными размерами фрагмента изображения, которые определены в пикселях (элементах разложения).

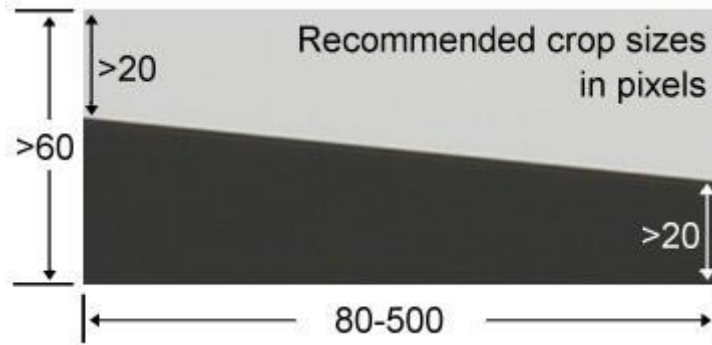


Рисунок 1.20 – Область интереса

Для лучшей точности измерения длина области должна быть в диапазоне от 80 до 500 пикселей, а ширина должна быть не менее половины длины. Если имеется возможность, то высота представленная на рисунке 1.19 должна быть не менее 50 пикселей. Минимальная высота для темной/светлой области не должна составлять менее 10 пикселей, но лучше использовать высоту минимум 20 пикселей для более точного измерения. Если все же не удастся получить требуемые размер области интереса, то будет появляться сообщение системы о том, что при получении результата потребовалась некоторая интерполяция, которая может быть не такой точной или повторяемой как для области большего размера [89].

Однако в практических применениях телевизионные системы не всегда имеется возможность использовать тестовую таблицу для оценки качества получаемого изображения с различных камер наблюдения и регистрации видеоданных. Тут возникает трудность в том, что нецелесообразно и нерентабельно демонтировать камеры с целью их тестирования для оценки качества изображения получаемого при помощи этих камер. Поэтому требуется получить оптимальные коэффициенты для фильтров, с целью их дальнейшей адаптации и применению к реальным формируемым изображениям.

1.7 Основные результаты главы

В данной главе приведено описание факторов влияющих на качество изображения и изложены принципы формирования изображения в оптической системе и факторы, из-за которых возникают искажения на изображении. Также приведено описание основных быстродействующих алгоритмов обработки изображений и их анализ, из которых и сформулирована цель диссертационной работы: Цель диссертационной работы – повышение эффективности и быстродействия двумерной обработки изображений за счет использования адаптивной внутрикадровой фильтрации с применением рекурсивно-сепарабельных алгоритмов.

Для достижения поставленной цели в работе требуется решить ряд задач.

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.

2. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕКУРСИВНО-СЕПАРАБЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Результаты данной главы представлены в следующих работах автора опубликованных индивидуально [90, 93] и в соавторстве [91, 92, 94-97], в которых автором были получены следующие результаты: разработка двумерных быстродействующих рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений; изучение методов и алгоритмов повышения четкости телевизионных изображений; планирование и проведение экспериментальных исследований; анализ и обобщение полученных результатов.

С ростом размерности получаемых изображений при помощи ТИС, связан и рост вычислительных затрат используемых на процесс обработки изображений. Поэтому важно сохранить эффективность обработки изображения, но при этом сократить количество вычислительных операций требуемых для процесса обработки, для чего и предназначены разрабатываемые рекурсивно-сепарабельные алгоритмы обработки. При этом важно учитывать и значения коэффициентов используемых для процесса обработки изображения, поскольку использование неоптимальных коэффициентов может привести к негативным эффектам, возникающим на обработанном изображении.

Шум изменяется независимо от пикселя к пикселю и, при условии, что математическое ожидание значения шума равно нулю, шумы соседних пикселей при суммировании будут складываться векторно (алгебраически). Чем больше окно фильтрации, тем меньше будет усредненная интенсивность шума, однако при этом будет происходить и соответствующее размытие значащих деталей изображения. Выходным изображением “белой точки” на “черном фоне” при фильтрации (реакция на двумерный единичный импульс) будет “серый квадрат” [98]. Реализация рекурсивно-сепарабельных

алгоритмов продемонстрирована на рисунке 2.1, на примере фильтра “скользящего среднего”.

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} ** \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$$

Рисунок 2.1 – Процесс сепарабельной реализации фильтра “скользящего среднего”

Маска интегрирующего типа имеет вид, приведенный на рисунке 2.2, которая может быть реализована сепарабельно. Физический смысл – выделение малоразмерных объектов на фоне «белого» шума.

Вид маски согласован с видом сигнала, т.е. маска есть образ сигнала от изображения “малоразмерного объекта” [98].

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array} ** \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$$

Рисунок 2.2 – Процесс сепарабельной реализации фильтра “маска выделения малоразмерных деталей из шумов”

2.1 Построение рекурсивно-сепарабельных фильтров повышения четкости изображений

Для построения рекурсивно-сепарабельных алгоритмов требуются образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы). На рисунке 2.3 представлены образующие рекурсивные ячейки (рециркуляторы), рисунок 2.3,а по n_1 -строке (строчный рециркулятор – СР) и рисунок 2.3,б по n_2 -кадру

(кадровый рециркулятор – КР), реализующие соответствующие ортогональные направления обработки “скользящее среднее”.

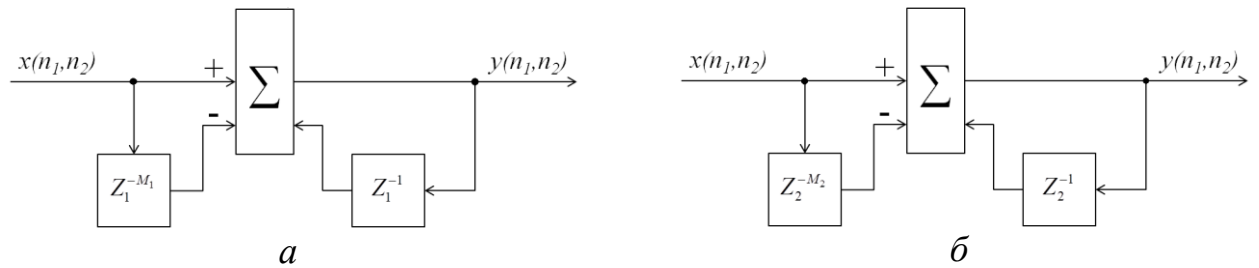


Рисунок 2.3 – Рециркуляторы: *a* – по n_1 – строке, *б* – n_2 – кадру

Разностное уравнение для строчного рециркулятора имеет вид:

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x(n_1 - M_1, n_2) + y(n_1 - 1, n_2), \quad (2.1)$$

а для кадрового рециркулятора:

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x(n_1, n_2 - M_2) + y(n_1, n_2 - 1), \quad (2.2)$$

2.1.1 Лапласиан “усеченная пирамида”

Для 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.

$$H_1(z_1, z_2) = -\frac{(1-z_1^{-5})(1-z_1^{-3})(1-z_2^{-5})(1-z_2^{-3})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} + 25z_1^{-2}z_2^{-2}\frac{(1-z_1^{-3})(1-z_2^{-3})}{(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})}. \quad (2.3)$$

Структурная схема реализации рекурсивно-сепарабельного фильтра лапласиан “усеченная пирамида” для данного случая приведена на рисунке 2.4.

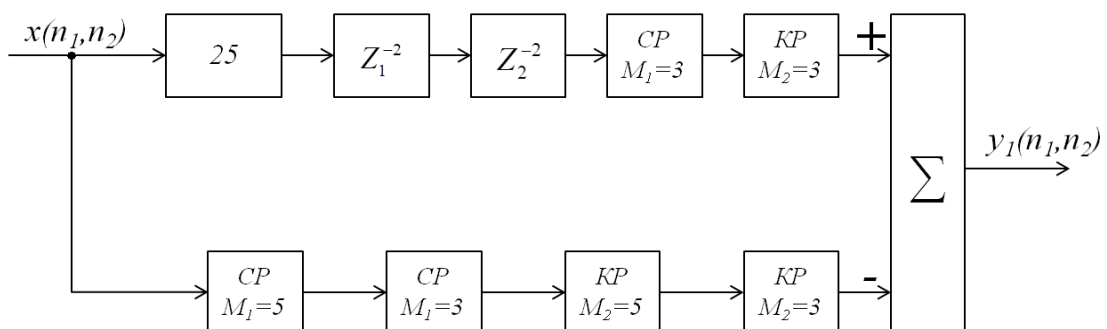


Рисунок 2.4 – Структурная схема двумерного фильтра ЛУП

Маска для фильтра лапласиан “усеченная пирамида” представлена на рисунке 2.5. Ее трехмерный вид приведен на рисунке 2.6.

| | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|
| -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 |

Рисунок 2.5 – Маска ЛУП 7x7 элементов

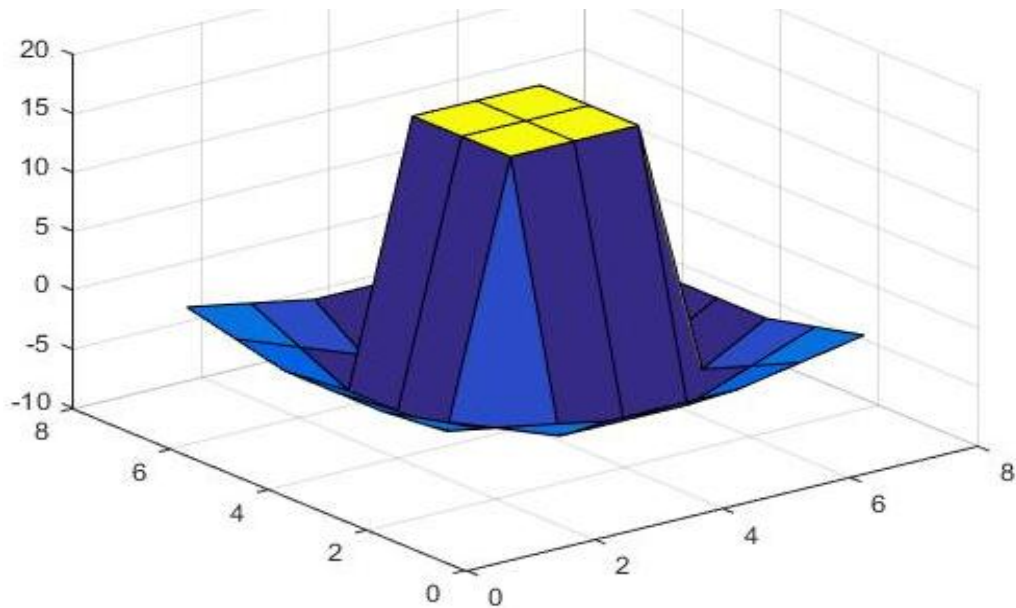


Рисунок 2.6 – Трехмерный вид апертуры фильтра ЛУП

Для апертуры 7x7 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 6,93 раза. При этом следует отметить, что при увеличении размера апертуры обработки выигрыш по вычислительным операциям в рекурсивно-

сепарабельных фильтрах по сравнению с нерекурсивным вариантом построения будет возрастать.

2.1.2 Лапласиан “двойная пирамида”

Реализации двумерного цифрового фильтра лапласиан “двойная пирамида” (ЛДП) в апертуре 7x7 элементов, её центральная часть “заменяется” на пирамидальную аперттуру 3x3 элемента с соответствующими значениями коэффициентов $a_{i_1 i_2}$, которая реализуется рекурсивно-сепарабельно. При этом системная функция данного фильтра будет иметь вид:

$$H_2(z_1, z_2) = -\frac{(1-z_1^{-5})(1-z_1^{-3})(1-z_2^{-5})(1-z_2^{-3})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} + \\ + 14z_1^{-2}z_2^{-2}\frac{(1-z_1^{-2})(1-z_1^{-2})(1-z_2^{-2})(1-z_2^{-2})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} + z_1^{-3}z_2^{-3}. \quad (2.4)$$

Приведем структурную схему для рекурсивно-сепарабельного двумерного фильтра лапласиан “двойная пирамида”, представленную на рисунке 2.7.

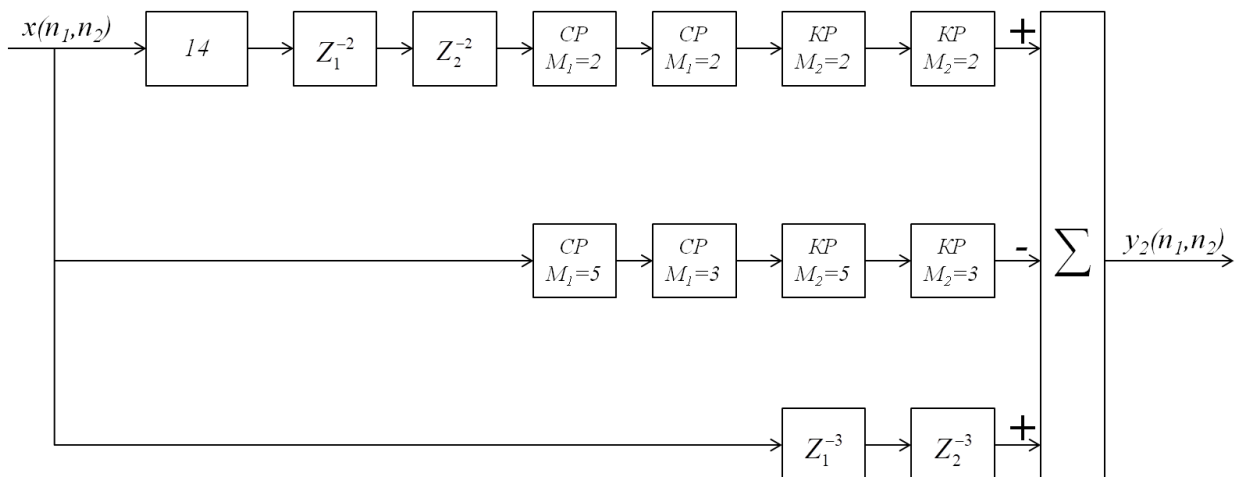


Рисунок 2.7 – Структурная схема двумерного фильтра ЛДП

На рисунке 2.8 приведена маска фильтра лапласиан “двойная пирамида”. Ее трехмерный вид приведен на рисунке 2.9.

| | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|
| -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 |

Рисунок 2.8 – Маска ЛДП 7x7 элементов

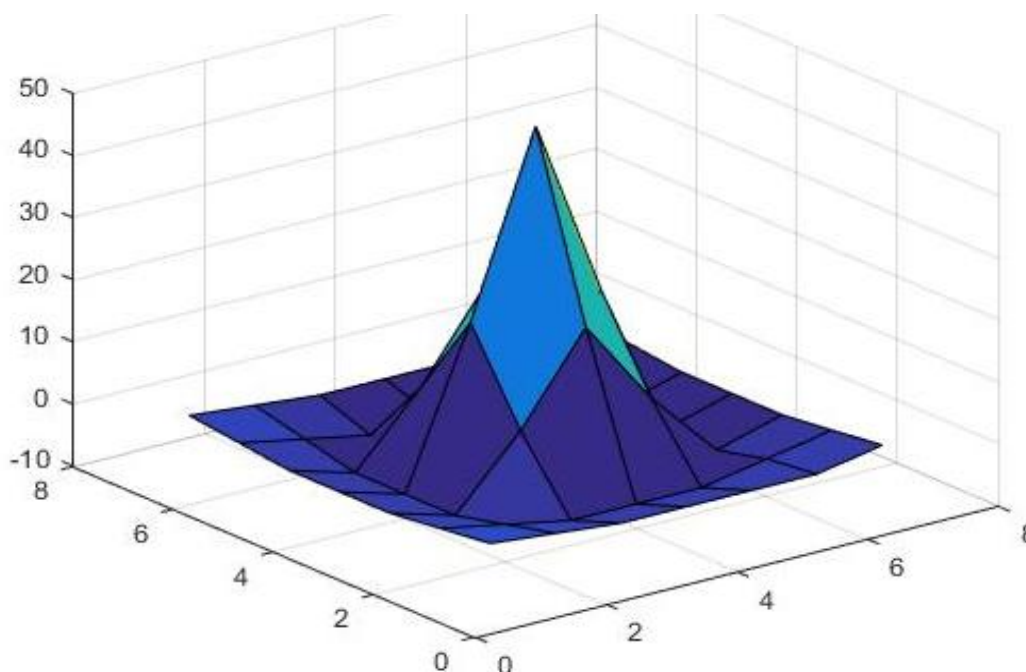


Рисунок 2.9 – Трёхмерный вид апертуры фильтра ЛДП

При рекурсивно-сепарабельной реализации фильтра ЛДП требуется всего 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 вычислительных операций сократится в 5,11 раз.

2.2 Программная реализация разработанных алгоритмов

Для проведения следующего этапа исследования, разработанные алгоритмы следует реализовать в выбранной среде моделирования. Для реализации была определена среда программирования MATLAB, которая после реализации позволяет разработанные алгоритмы адаптировать в C/C++ код.

2.2.1 Реализация фильтра лапласиан “усеченная пирамида”

Для работы данного алгоритма требуется задать ряд входных параметров:

- X – обрабатываемое изображение;
- A_1 – коэффициент для подъема центральной апертуры размером 3×3 элемента;
- A_2 – коэффициент для увеличения центрального элемента матрицы на заданное значение.

На первом шаге происходит определение суммы коэффициентов матрицы, для определения коэффициента, на который будет поделено итоговое изображение для нормализации яркости. Далее идет процесс обработки по первой ветви структурной схемы, представленной на рисунке 2.4. Исходное изображение умножается на 25, а в случае подъема центральной апертуры на коэффициент A_1 к множителю 25 добавляется необходимое значение. После чего изображение обрабатывается строчным рециркулятором с размеров апертуры $M_1=3$ и кадровым рециркулятором с размером апертуры $M_2=3$. Фрагмент реализации данной процедуры приведен ниже:

```
S=9*A1; % Определение суммы коэффициентов при подъеме апертуры 3*3
Y0=[1 1 1]; % Строчный рециркулятор при M=3
```

```

X0=X*(25+A1); % Множитель из структурной схемы к которому добавляется
коэффициент A1
i1=size(X0, 2); % количество столбцов в X0 матрице
j1=size(X0, 1); % количество строк в X0 матрице
i2=size(Y0, 2); % количество столбцов во Y0 матрице
j2=size(Y0, 1); % количество строк во Y0 матрице
X0=[X0,zeros(j1,i2-1)]; %Матрица X0 дополненная нулями с правой стороны
k=j1;1
m=i1+(i2-1);
y0=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1); % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if m==1
            y0(k,m)=X0(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y0(k,m)=X0(k,m)+y0(k,m-1);
        end
        % Общее уравнение рециркулятора по строке
        if m-i2>=1
            y0(k,m)=X0(k,m)-X0(k,m-i2)+y0(k,m-1);
        end
    end
end
y0=y0; % Выходная матрица после строчного рециркулятора

Y1=[1; 1; 1]; % Кадровый рециркулятор при M=3
i1=size(y0, 2); % количество столбцов в y0 матрице
j1=size(y0, 1); % количество строк в y0 матрице
i2=size(Y1, 2); % количество столбцов во Y1 матрице
j2=size(Y1, 1); % количество строк во Y1 матрице
X1=zeros(j1+(j2-1),i1); % матрица нулевая
X1(1:j1,:)=y0; % матрица y0 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y1=zeros(k,m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1 ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if k==1
            y1(k,m)=X1(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y1(k,m)=X1(k,m)+y1(k-1,m);
        end
        % Общее уравнение кадрового рециркулятора
        if k-j2>=1
            y1(k,m)=X1(k,m)-X1(k-j2,m)+y1(k-1,m);
        end
    end
end
y1=y1; % выходная матрица после кадрового рециркулятора

i1=size(y1, 2); % количество столбцов в y1 матрице
j1=size(y1, 1); % количество строк в y1 матрице
Zf=zeros(j1+4,i1+4); % нулевая матрица
Zf(3:3+j1-1,3:3+i1-1)=y1; % итоговое изображение верхний ветви фильтра

```

В конце процедуры фильтрации изображение дополняется “нулями”, поскольку для корректной работы требуется суммирование матриц одной размерности.

Далее процедура обработки происходит по второй ветви структурной схемы. По ней изображение обрабатывается двумя строчными рециркуляторами с размерами апертур $M_1=5$ и $M_1=3$, после чего происходит процесс обработки двумя кадровыми рециркуляторами с размерами апертур $M_2=5$ и $M_2=3$. Фрагмент кода данной процедуры представлен ниже:

```

Y2=[1 1 1 1 1]; % Строчный рециркулятор при M=5
i1=size(X, 2); % количество столбцов в X матрице
j1=size(X, 1); % количество строк в X матрице
i2=size(Y2, 2); % количество столбцов во Y2 матрице
j2=size(Y2, 1); % количество строк во Y2 матрице
X2=[X,zeros(j1,i2-1)]; % Матрица X дополненная нулями с правой стороны
k=j1;
m=i1+(i2-1);
y2=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1) ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if m==1
            y2(k,m)=X2(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y2(k,m)=X2(k,m)+y2(k,m-1);
        end
        % Общее уравнение строчного рециркулятора
        if m-i2>=1
            y2(k,m)=X2(k,m)-X2(k,m-i2)+y2(k,m-1);
        end
    end
end
end
y2=y2; % Матрица после строчного рециркулятора при M=5

Y3=[1 1 1]; % Строчный рециркулятор при M=3
i1=size(y2, 2); % количество столбцов в y2 матрице
j1=size(y2, 1); % количество строк в y2 матрице
i2=size(Y3, 2); % количество столбцов во Y3 матрице
j2=size(Y3, 1); % количество строк во Y3 матрице
X3=[y2,zeros(j1,i2-1)]; % Матрица y2 дополненная нулями с правой стороны
k=j1;
m=i1+(i2-1);
y3=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1) ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if m==1
            y3(k,m)=X3(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y3(k,m)=X3(k,m)+y3(k,m-1);
        end
    end
end

```



```

        % Общее уравнение строчного рециркулятора
        if m-i2>=1
            y3(k,m)=X3(k,m)-X3(k,m-i2)+y3(k,m-1);
        end
    end
end
y3=y3; % Матрица после строчного рециркулятора при M=3

Y4=[1; 1; 1; 1; 1]; % кадровый рециркулятор при M=5
i1=size(y3, 2); % количество столбцов в y3 матрице
j1=size(y3, 1); % количество строк в y3 матрице
i2=size(Y4, 2); % количество столбцов во Y4 матрице
j2=size(Y4, 1); % количество строк во Y4 матрице
X4=zeros(j1+(j2-1),i1); % матрица нулевая
X4(1:j1,:)=y3; % матрица y3 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y4=zeros(k,m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if k==1
            y4(k,m)=X4(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y4(k,m)=X4(k,m)+y4(k-1,m);
        end
        % Общее уравнение рциркулятора
        if k-j2>=1
            y4(k,m)=X4(k,m)-X4(k-j2,m)+y4(k-1,m);
        end
    end
end
y4=y4; % Матрица после кадрового рециркулятора при M=5

Y5=[1; 1; 1;]; % Кадровый рециркулятор при M=3
i1=size(y4, 2); % количество столбцов в y4 матрице
j1=size(y4, 1); % количество строк в y4 матрице
i2=size(Y5, 2); % количество столбцов во Y5 матрице
j2=size(Y5, 1); % количество строк во Y5 матрице
X5=zeros(j1+(j2-1),i1); % матрица нулевая
X5(1:j1,:)=y4; % матрица y4 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y5=zeros(k,m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if k==1
            y5(k,m)=X5(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y5(k,m)=X5(k,m)+y5(k-1,m);
        end
        % Общее уравнение рециркулятора
        if k-j2>=1
            y5(k,m)=X5(k,m)-X5(k-j2,m)+y5(k-1,m);
        end
    end
end
end
end

```

$y5=y5$; % Матрица после кадрового рециркулятора при $M=3$

После выполнения данной обработки, происходит процедура умножения исходного изображения на коэффициент A_2 , если данный коэффициент задан. После чего происходит процедура суммирования промежуточных изображений и формирование итогового изображения после обработки. Фрагмент кода приведен ниже:

```
W=X*A2; % Исходное изображение умноженное на коэффициент A2
i1=size(W, 2); % количество столбцов в W матрице
j1=size(W, 1); % количество строк в W матрице
W0=zeros(j1+6,i1+6); % Нулевая матрица
W0(4:4+j1-1,4:4+i1-1)=W; % матрица W окруженная нулями
rez=(W0+(Zf-y5))/(A2+S); % Суммирование изображения после фильтра и
изображения с коэффициентом A2 и нормирование изображения при использовании
коэффициента A2 и S
```

2.2.2 Реализация фильтра лапласиан “двойная пирамида”

Для работы данного алгоритма требуется задать входное изображение и один из коэффициентов фильтрации:

- X – обрабатываемое изображение;
- A_1 – коэффициент для подъема центральной апертуры размером 3×3 элемента;
- A_2 – коэффициент для увеличения центрального элемента матрицы на заданное значение.

На первом шаге происходит определение суммы коэффициентов матрицы, для определения коэффициента, на который будет поделено итоговое изображение для нормализации уровня “цифровой” яркости. Далее идет процесс обработки по первой ветви структурной схемы, представленной на рисунке 2.7. Исходное изображение умножается на 14, а в случае подъема центральной апертуры на коэффициент A_1 к множителю 14 добавляется необходимое значение. После чего изображение обрабатывается строчным рециркулятором с размеров апертуры $M_1=2$ и два кадровым рециркулятором с

размером апертуры $M_2=2$. Фрагмент реализации данной процедуры приведен

ниже:

```

S=16*A1; % Определение суммы коэффициентов при подъеме апертуры 3*3
Y0=[1 1]; % Строчный рециркулятор при M=2
X0=X*(14+A1); % Множитель из структурной схемы к которому добавляется
коэффициент A1
i1=size(X0, 2); % количество столбцов в X0 матрице
j1=size(X0, 1); % количество строк в X0 матрице
i2=size(Y0, 2); % количество столбцов во Y0 матрице
j2=size(Y0, 1); % количество строк во Y0 матрице
X0=[X0,zeros(j1,i2-1)]; %Матрица X0 дополненная нулями с правой стороны
k=j1;
m=i1+(i2-1);
y0=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1) ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформированно
        if m==1
            y0(k,m)=X0(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y0(k,m)=X0(k,m)+y0(k,m-1);
        end
        % Общее уравнение рециркулятора по строке
        if m-i2>=1
            y0(k,m)=X0(k,m)-X0(k,m-i2)+y0(k,m-1);
        end
    end
end
y0=y0; % Матрица после строчного рециркулятора при M=2

Y1=[1 1]; % Строчный рециркулятор при M=2
i1=size(y0, 2); % количество столбцов в X0 матрице
j1=size(y0, 1); % количество строк в X0 матрице
i2=size(Y1, 2); % количество столбцов во Y0 матрице
j2=size(Y1, 1); % количество строк во Y0 матрице
X1=[y0,zeros(j1,i2-1)]; %Матрица X0 дополненная нулями с правой стороны
k=j1;
m=i1+(i2-1);
y1=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1) ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформированно
        if m==1
            y1(k,m)=X1(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y1(k,m)=X1(k,m)+y1(k,m-1);
        end
        % Общее уравнение рециркулятора по строке
        if m-i2>=1
            y1(k,m)=X1(k,m)-X1(k,m-i2)+y1(k,m-1);
        end
    end
end
y1=y1; % Матрица после строчного рециркулятора при M=2

Y2=[1; 1]; % Кадровый рециркулятор при M=2

```

```

i1=size(y1, 2); % количество столбцов в y0 матрице
j1=size(y1, 1); % количество строк в y0 матрице
i2=size(Y2, 2); % количество столбцов во Y1 матрице
j2=size(Y2, 1); % количество строк во Y1 матрице
X2=zeros(j1+(j2-1), i1); % матрица нулевая
X2(1:j1, :)=y1; % матрица y0 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y2=zeros(k, m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформированно
        if k==1
            y2(k, m)=X2(k, m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y2(k, m)=X2(k, m)+y2(k-1, m);
        end
        % Общее уравнение кадрового рециркулятора
        if k-j2>=1
            y2(k, m)=X2(k, m)-X2(k-j2, m)+y2(k-1, m);
        end
    end
end
y2=y2; % Матрица после кадрового рециркулятора при M=2

Y3=[1; 1]; % Кадровый рециркулятор при M=2
i1=size(y2, 2); % количество столбцов в y0 матрице
j1=size(y2, 1); % количество строк в y0 матрице
i2=size(Y3, 2); % количество столбцов во Y1 матрице
j2=size(Y3, 1); % количество строк во Y1 матрице
X3=zeros(j1+(j2-1), i1); % матрица нулевая
X3(1:j1, :)=y2; % матрица y0 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y3=zeros(k, m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформированно
        if k==1
            y3(k, m)=X3(k, m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y3(k, m)=X3(k, m)+y3(k-1, m);
        end
        % Общее уравнение кадрового рециркулятора
        if k-j2>=1
            y3(k, m)=X3(k, m)-X3(k-j2, m)+y3(k-1, m);
        end
    end
end
y3=y3; % Матрица после кадрового рециркулятора при M=2

i1=size(y3, 2); % количество столбцов в y1 матрице
j1=size(y3, 1); % количество строк в y1 матрице
Zf=zeros(j1+4, i1+4); % нулевая матрица
Zf(3:3+j1-1, 3:3+i1-1)=y3; % итоговое изображение верхний ветви фильтра

```

В конце процедуры фильтрации изображение дополняется “нулями”, поскольку для корректной работы требуется суммирование матриц одной размерности.

Далее процедура обработки происходит по второй ветви структурной схемы. По ней входное изображение обрабатывают двумя строчными рециркуляторами с размерами апертур $M_1=5$ и $M_1=3$, после чего происходит процесс обработки двумя кадровыми рециркуляторами с размерами апертур $M_2=5$ и $M_2=3$. Фрагмент кода данной процедуры представлен ниже:

```

Y4=[1 1 1 1 1]; % Строчный рециркулятор при M=5
i1=size(X, 2); % количество столбцов в X матрице
j1=size(X, 1); % количество строк в X матрице
i2=size(Y4, 2); % количество столбцов во Y2 матрице
j2=size(Y4, 1); % количество строк во Y2 матрице
X4=[X,zeros(j1,i2-1)]; % Матрица X дополненная нулями с правой стороны
k=j1;
m=i1+(i2-1);
y4=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1) ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if m==1
            y4(k,m)=X4(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y4(k,m)=X4(k,m)+y4(k,m-1);
        end
        % Общее уравнение строчного рециркулятора
        if m-i2>=1
            y4(k,m)=X4(k,m)-X4(k,m-i2)+y4(k,m-1);
        end
    end
end
y4=y4; % Матрица после строчного рециркулятора при M=5

Y5=[1 1 1]; % Строчный рециркулятор при M=3
i1=size(y4, 2); % количество столбцов в y2 матрице
j1=size(y4, 1); % количество строк в y2 матрице
i2=size(Y5, 2); % количество столбцов во Y3 матрице
j2=size(Y5, 1); % количество строк во Y3 матрице
X5=[y4,zeros(j1,i2-1)]; % Матрица y2 дополненная нулями с правой стороны
k=j1;
m=i1+(i2-1);
y5=zeros(k,m);
for k=1:j1; % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1) ; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if m==1
            y5(k,m)=X5(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if m>1 && m<i2+1
            y5(k,m)=X5(k,m)+y5(k,m-1);
        end
    end
end

```

```

        % Общее уравнение строчного рециркулятора
        if m-i2>=1
            y5(k,m)=X5(k,m)-X5(k,m-i2)+y5(k,m-1);
        end
    end
end
y5=y5; % Матрица после строчного рециркулятора при M=3

Y6=[1; 1; 1; 1; 1]; % кадровый рециркулятор при M=5
i1=size(y5, 2); % количество столбцов в y3 матрице
j1=size(y5, 1); % количество строк в y3 матрице
i2=size(Y6, 2); % количество столбцов во Y4 матрице
j2=size(Y6, 1); % количество строк во Y4 матрице
X6=zeros(j1+(j2-1),i1); % матрица нулевая
X6(1:j1,:)=y5; % матрица y3 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y6=zeros(k,m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if k==1
            y6(k,m)=X6(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y6(k,m)=X6(k,m)+y6(k-1,m);
        end
        % Общее уравнение рциркулятора
        if k-j2>=1
            y6(k,m)=X6(k,m)-X6(k-j2,m)+y6(k-1,m);
        end
    end
end
y6=y6; % Матрица после кадрового рециркулятора при M=5

Y7=[1; 1; 1;]; % Кадровый рециркулятор при M=3
i1=size(y6, 2); % количество столбцов в y4 матрице
j1=size(y6, 1); % количество строк в y4 матрице
i2=size(Y7, 2); % количество столбцов во Y5 матрице
j2=size(Y7, 1); % количество строк во Y5 матрице
X7=zeros(j1+(j2-1),i1); % матрица нулевая
X7(1:j1,:)=y6; % матрица y4 окруженная нулями
k=j1+(j2-1);
m=i1;
y7=zeros(k,m);
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1; % выбор столбца обработки
        % условие когда выходное изображение еще не сформировано
        if k==1
            y7(k,m)=X7(k,m);
        end
        % задержка равна 0 имеется только входное и выходное значение
        if k>1 && k<j2+1
            y7(k,m)=X7(k,m)+y7(k-1,m);
        end
        % Общее уравнение рециркулятора
        if k-j2>=1
            y7(k,m)=X7(k,m)-X7(k-j2,m)+y7(k-1,m);
        end
    end
end
end
end

```

```
y7=y7; % Матрица после кадрового рециркулятора при M=3
```

После выполнения данной обработки, происходит процедура умножения исходного изображения на коэффициент $(1+A_2)$. После чего происходит процедура суммирования промежуточных изображений и формирование итогового изображения после обработки. Фрагмент кода приведен ниже:

```
i0=size(X, 2); % количество столбцов в y4 матрице
j0=size(X, 1); % количество строк в y4 матрице
Zf0=zeros(j0+6,i0+6); % нулевая матрица
Zf0(4:4+j0-1,4:4+i0-1)=X*(A2+1); % матрица W окруженная нулями
rez=(Zf-y7+Zf0)/(S+A2);
```

2.3 Определение оптимальных коэффициентов для разработанных фильтров

Для проведения экспериментальных исследований по определению оптимальных коэффициентов для разработанных фильтров было взято тестовое изображение, полученное с помощью АИ ТИС представленное на рисунке 2.10.

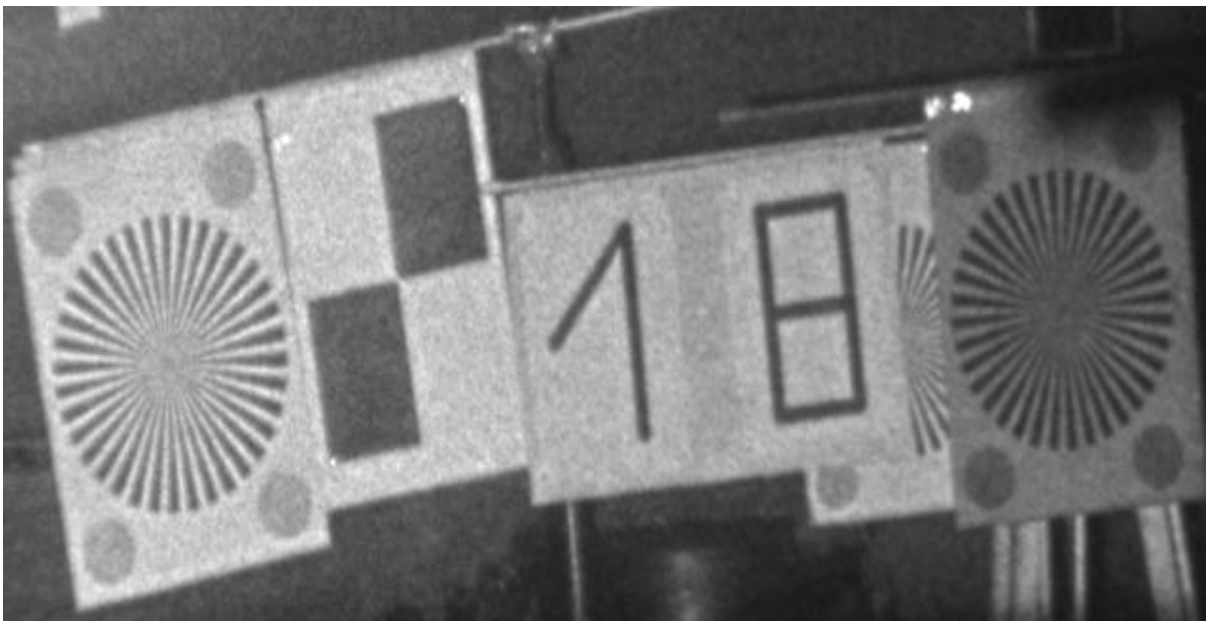


Рисунок 2.10 – Тестовое изображение

В процессе проведения эксперимента в выбранных фильтрах изменялось значение коэффициентов A . В случае изменения центральной апертуры 3×3 элемента использовались коэффициенты A_1 и A_3 , при варианте подъема центрального элемента использовались коэффициенты A_2 и A_4 .

Разрешающая способность обрабатываемых изображений оценивалась в количестве телевизионных линий (ТВЛ), получаемых из формулы 1.5.

Результаты измерения разрешения изображений после обработки фильтром ЛУП приведены в таблице 2.1, для варианта с подъемом центральной апертуры 3×3 элемента коэффициент фильтрации составил $A_1=3$, а для варианта с подъемом центрального элемента коэффициент $A_2=14$.

Таблица 2.1 – Результаты обработки фильтром ЛУП

| Подъем апертуры 3×3 элемента | | Подъем центра маски | |
|--|--------------|------------------------|--------------|
| Коэф. A_1 | ТВЛ | Коэф. A_2 | ТВЛ |
| исходное | 201,6 | исходное | 201,6 |
| 1 | 1051,2 | 13 | 763,2 |
| <u>2</u> | <u>518,4</u> | <u>14</u> | <u>633,6</u> |
| 3 | 403,2 | 15 | 590,4 |
| 4 | 360 | 16 | 561,6 |

Результаты обработки при реализации фильтра ЛДП приведены в таблице 2.2, в случае с подъемом центральной апертуры 3×3 элемента коэффициент $A_3=2$ так же как для фильтра ЛУП, при подъеме центрального элемента коэффициент $A_4=16$.

Таблица 2.2 – Результаты обработки фильтром ЛДП

| Подъем апертуры 3×3 элемента | | Подъем центра маски | |
|--|--------|------------------------|--------|
| Коэф. A_3 | ТВЛ | Коэф. A_4 | ТВЛ |
| исходное | 201,6 | исходное | 201,6 |
| 1 | 1209,6 | 15 | 1195,2 |
| 2 | 590,4 | 16 | 691,2 |
| 3 | 489,6 | 17 | 648 |
| 4 | 403,2 | 18 | 619,2 |

На рисунке 2.11 представлены графики контрастно-частотных характеристик (КЧХ) изображений после обработки рекурсивно-сепарабельными фильтрами. Для визуальной оценки эффективности алгоритмов приведем фрагменты обработанных изображений на рисунке 2.12.

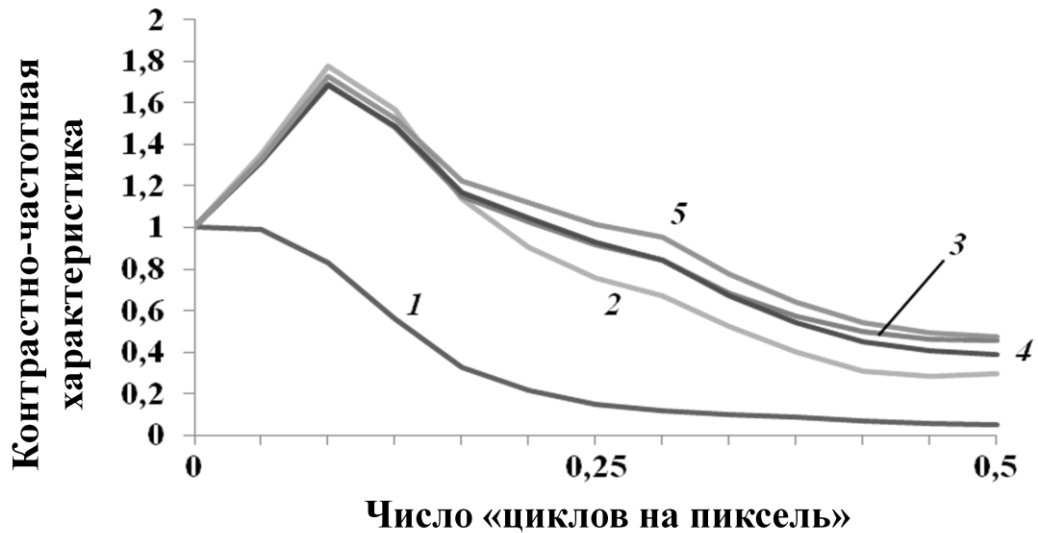


Рисунок 2.11 – Графики КЧХ: 1 – исходное изображение; 2 – ЛУП подъем апертуры 3×3 , $A_1=2$; 3 – ЛУП подъем центрального элемента, $A_2=14$; 4 – ЛДП подъем апертуры 3×3 , $A_3=2$; 5 – ЛДП подъем центрального элемента, $A_4=16$

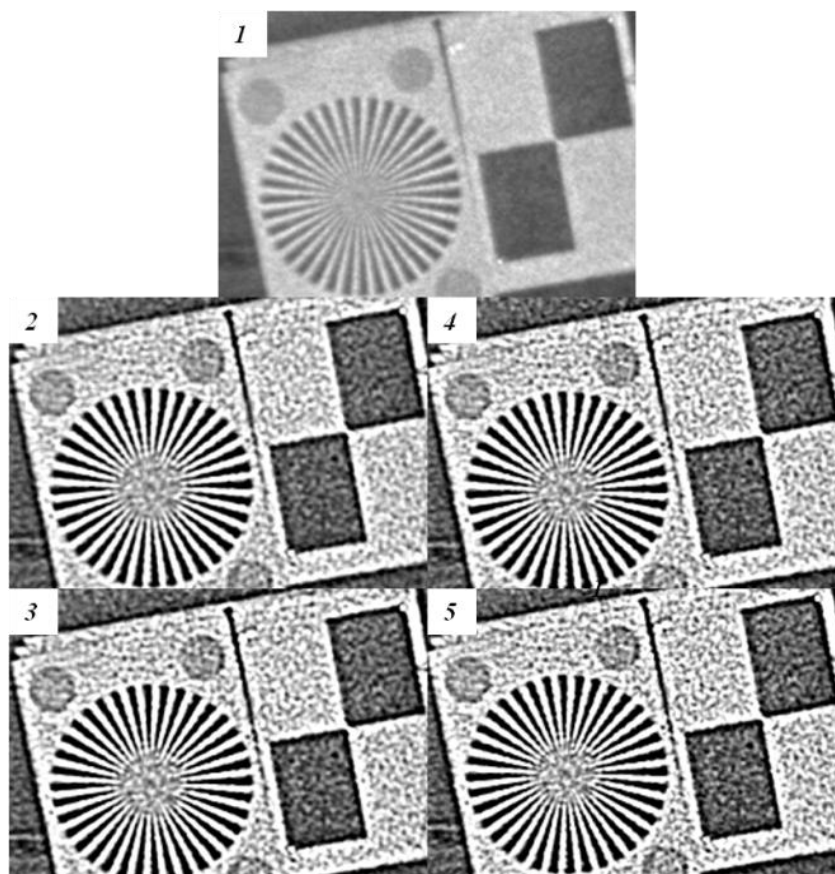


Рисунок 2.12 – Фрагменты тестового изображения. 1 – исходное изображение; 2 – ЛУП – подъем аперттуры 3x3; 3 – ЛУП – подъем центрального элемента; 4 – ЛДП – подъем аперттуры 3x3; 5 – ЛДП – подъем центрального элемента

2.4 Оценка быстродействия разработанных алгоритмов

После получения данных об эффективности разработанных алгоритмов по увеличению четкости изображений, требуется подтвердить их выигрыш по быстродействию в выбранной вычислительной среде. Для проведения данного исследования была использована среда программирования MATLAB, в которой помимо самих разработанных алгоритмов, описанных в предыдущем разделе главы, был реализован алгоритм классической двумерной свертки (КДС). Реализация данного алгоритма представлена кодом ниже:

```
S = sum(sum (Y)); % сумма коэффициентов матрицы фильтра
il=size(X, 2); % количество столбцов в X матрице
jl=size(X, 1); % количество строк в X матрице
```

```

i2=size(Y, 2); % количество столбцов во Y матрице
j2=size(Y, 1); % количество строк во Y матрице
k=j1+(j2-1);
m=i1+(i2-1);
y=zeros(k,m); % переменная для записи результирующего значения
for k=1:j1+(j2-1); % выбор строки обработки
    for m=1:i1+(i2-1); % выбор столбца обработки
        y(k,m)=sum(sum(Z3(k:k+(j2-1),m:m+(i2-1)).*Y)); % собственно само
    перемножение и суммирование
    end
end
y=y;
rez=y/S;

```

Для проведения экспериментальных исследований были использованы изображения различной размерности, а именно 640x480, 1280x720, 1280x1024, 1920x1080, 3000x2000, 5472x3078, 5616x3744. В ходе эксперимента проводилось сравнение между реализацией классической двумерной свертки и разработанных алгоритмов двумерных фильтров. В таблице 2.3 приведены результаты для изображения 640x480 пикселей в формате ТИФ.

Таблица 2.3 – Результаты испытаний для изображения 640x480

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|------|---------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |
| 1 | 2,9763 | 0,3335 | 0,4078 | 1,4576 | 0,3186 | 0,3866 |
| 2 | 3,1284 | 0,3415 | 0,4103 | 1,5368 | 0,3434 | 0,4158 |
| 3 | 2,8980 | 0,3409 | 0,4341 | 1,4498 | 0,3460 | 0,4114 |
| 4 | 2,9135 | 0,3400 | 0,4336 | 1,4574 | 0,3398 | 0,4031 |
| 5 | 3,1218 | 0,3263 | 0,4112 | 1,5430 | 0,3207 | 0,4116 |
| 6 | 2,9331 | 0,3363 | 0,4252 | 1,4454 | 0,3242 | 0,4293 |
| 7 | 3,1134 | 0,3458 | 0,4262 | 1,5360 | 0,3290 | 0,4261 |
| 8 | 2,9509 | 0,3398 | 0,4321 | 1,4940 | 0,3493 | 0,4339 |
| 9 | 3,0765 | 0,3404 | 0,4229 | 1,4419 | 0,3380 | 0,3850 |
| 10 | 3,1313 | 0,3431 | 0,4226 | 1,4982 | 0,3237 | 0,4446 |
| ∑/10 | 3,0243 | 0,3388 | 0,4226 | 1,486 | 0,3333 | 0,4147 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 8,93 раза, а фильтр ЛДП в 7,16 раза относительно стандартного процесса свертки изображения. При использовании скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 4,46 раза, а фильтр ЛДП в 3,58 раза относительно КДС.

На втором этапе эксперимента обрабатывалось изображение размером 1280x720 пикселей в формате BMP, а результаты оценки быстродействия представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты испытаний для изображения 1280x720

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|------|---------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |
| 1 | 8,8017 | 1,0512 | 1,3827 | 4,3918 | 1,0380 | 1,2879 |
| 2 | 9,0167 | 1,0790 | 1,4665 | 4,6004 | 1,0373 | 1,4050 |
| 3 | 9,0490 | 1,0872 | 1,4674 | 4,2956 | 1,0341 | 1,3820 |
| 4 | 9,0299 | 1,0770 | 1,4479 | 4,4419 | 1,0468 | 1,3912 |
| 5 | 8,6302 | 1,1427 | 1,4493 | 4,4260 | 1,0990 | 1,3174 |
| 6 | 9,2393 | 1,1195 | 1,4566 | 4,6346 | 1,0966 | 1,3779 |
| 7 | 8,6713 | 1,1492 | 1,4867 | 4,3330 | 1,1190 | 1,3925 |
| 8 | 8,8479 | 1,1271 | 1,4843 | 4,6276 | 1,1407 | 1,3881 |
| 9 | 8,8951 | 1,1056 | 1,3770 | 4,2984 | 1,0479 | 1,2773 |
| 10 | 9,1414 | 1,1557 | 1,4685 | 4,5983 | 1,0453 | 1,3800 |
| Σ/10 | 8,9323 | 1,1094 | 1,4487 | 4,4648 | 1,0705 | 1,3599 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 8,05 раза, а фильтр ЛДП в 6,16 раза относительно стандартного процесса КДС. При использовании

скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 4,17 раза, а фильтр ЛДП в 3,28 раза относительно КДС.

На третьем этапе эксперимента обрабатывалось изображение размером 1280x1024 пикселей в формате TIF, и результаты оценки быстродействия представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты испытаний для изображения 1280x1024

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|------|---------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |
| 1 | 13,0535 | 2,2556 | 3,0545 | 6,7187 | 2,2875 | 2,9473 |
| 2 | 12,5253 | 2,3112 | 3,0014 | 6,4495 | 2,2777 | 2,8451 |
| 3 | 12,6339 | 2,3169 | 3,0544 | 6,3739 | 2,2917 | 2,9138 |
| 4 | 13,0610 | 2,3473 | 3,0408 | 6,5748 | 2,2943 | 2,9409 |
| 5 | 12,4212 | 2,3107 | 3,0451 | 6,0808 | 2,2190 | 2,9365 |
| 6 | 13,0539 | 2,2863 | 3,0531 | 6,0737 | 2,2598 | 2,8614 |
| 7 | 12,6420 | 2,3213 | 3,0104 | 6,5500 | 2,2869 | 2,8967 |
| 8 | 12,7094 | 2,3137 | 3,0539 | 6,3816 | 2,2099 | 2,9006 |
| 9 | 12,5054 | 2,2990 | 2,9758 | 6,0857 | 2,2996 | 2,9276 |
| 10 | 12,5232 | 2,3659 | 3,0316 | 6,1135 | 2,3056 | 2,9585 |
| Σ/10 | 12,7129 | 2,3128 | 3,0321 | 6,3402 | 2,2732 | 2,9128 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 5,50 раза, а фильтр ЛДП в 4,19 раза относительно стандартного процесса свертки изображения (КДС). При использовании скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 2,79 раза, а фильтр ЛДП в 2,18 раза относительно КДС.

В четвертом эксперименте обработке подверглось изображения размером 1920x1080 пикселей в формате BMP, результаты оценки быстродействия представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты испытаний для изображения 1920x1080

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|------|---------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |
| 1 | 20,0636 | 2,5910 | 3,3868 | 10,2347 | 2,5596 | 3,1815 |
| 2 | 19,5431 | 2,5272 | 3,3630 | 10,3392 | 2,3540 | 2,9872 |
| 3 | 20,6623 | 2,4855 | 3,2446 | 10,4068 | 2,3456 | 3,1671 |
| 4 | 19,8688 | 2,6223 | 3,3809 | 10,2048 | 2,4517 | 3,2149 |
| 5 | 20,6524 | 2,6059 | 3,3308 | 10,3453 | 2,5069 | 2,9510 |
| 6 | 19,7270 | 2,6182 | 3,3626 | 9,8545 | 2,5426 | 3,2622 |
| 7 | 19,3841 | 2,5296 | 3,3210 | 9,8619 | 2,5126 | 3,0728 |
| 8 | 20,4544 | 2,5618 | 3,3707 | 10,3761 | 2,5136 | 3,1903 |
| 9 | 20,2557 | 2,6296 | 3,3982 | 10,1239 | 2,5152 | 3,2116 |
| 10 | 20,6269 | 2,4376 | 3,3878 | 10,4676 | 2,4460 | 3,1732 |
| Σ/10 | 20,1238 | 2,5609 | 3,3546 | 10,2215 | 2,4748 | 3,1412 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 7,86 раза, а фильтр ЛДП в 6 раз относительно стандартного процесса свертки изображения (КДС). При использовании скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 4,13 раза, а фильтр ЛДП в 3,25 раза относительно КДС.

В пятом эксперименте обработки подверглось изображения размером 3000x2000 пикселей в формате JPG, результаты измерений представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты испытаний для изображения 3000x2000

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|------|---------------------|--------|---------|-----------------------------|--------|--------|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |
| 1 | 57,4257 | 7,6080 | 9,9401 | 29,2814 | 6,9583 | 9,0891 |
| 2 | 57,0687 | 7,2609 | 10,0507 | 28,4532 | 7,0832 | 9,1598 |
| 3 | 58,1517 | 7,6518 | 9,9815 | 28,8410 | 7,6847 | 9,4930 |
| 4 | 58,8604 | 7,3207 | 10,0094 | 29,4968 | 7,2387 | 9,4663 |
| 5 | 58,3374 | 7,5059 | 9,8032 | 30,0130 | 7,3034 | 8,504 |
| 6 | 58,1652 | 7,6048 | 9,7607 | 28,7609 | 7,4330 | 9,2243 |
| 7 | 57,4552 | 7,4921 | 9,7831 | 29,1855 | 7,3160 | 9,0218 |
| 8 | 58,9665 | 7,4803 | 9,7285 | 29,6724 | 7,3270 | 9,3552 |
| 9 | 57,1110 | 7,4686 | 9,9751 | 29,0111 | 7,4703 | 9,5098 |
| 10 | 57,2676 | 7,6252 | 9,9318 | 29,8953 | 7,4794 | 9,4294 |
| Σ/10 | 57,8809 | 7,5018 | 9,8964 | 29,2611 | 7,3294 | 9,2253 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 7,72 раза, а фильтр ЛДП в 5,85 раз относительно стандартного процесса свертки изображения (КДС). При использовании скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 3,99 раза, а фильтр ЛДП в 3,17 раза относительно КДС.

В шестом эксперименте обработки подверглось изображения размером 5472x3078 пикселей в формате JPG, результаты измерений представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты испытаний для изображения 5472x3078

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|---|---------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |

Продолжение таблицы 2.8

| | | | | | | |
|-------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 160,8304 | 21,1836 | 27,5091 | 80,4044 | 20,7967 | 26,4848 |
| 2 | 167,2055 | 20,9470 | 28,1730 | 83,7637 | 21,0319 | 27,3557 |
| 3 | 159,8483 | 21,4212 | 27,6421 | 84,3166 | 21,4079 | 27,2692 |
| 4 | 160,3264 | 20,7794 | 27,5637 | 80,1390 | 20,6882 | 26,1413 |
| 5 | 162,2150 | 21,1521 | 28,3405 | 81,6543 | 21,4320 | 27,4314 |
| 6 | 163,6381 | 21,5628 | 27,9274 | 83,5535 | 21,4359 | 26,8273 |
| 7 | 160,5580 | 21,1151 | 27,3746 | 80,1069 | 19,9505 | 26,0560 |
| 8 | 162,0221 | 20,9400 | 27,0660 | 81,4237 | 20,9402 | 27,0363 |
| 9 | 162,3684 | 21,1567 | 28,2759 | 84,0162 | 21,3608 | 26,6387 |
| 10 | 164,5893 | 20,4278 | 28,3244 | 82,7352 | 20,5681 | 27,1798 |
| $\Sigma/10$ | 162,3602 | 21,0686 | 27,8197 | 82,2114 | 20,9612 | 26,8421 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 7,71 раза, а фильтр ЛДП в 5,84 раз относительно стандартного процесса свертки изображения. При использовании скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 3,92 раза, а фильтр ЛДП в 3,06 раза относительно КДС.

В седьмом эксперименте обработки подверглось изображения размером 5616x3744 пикселей в формате JPG, результаты измерений представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты испытаний для изображения 5616x3744

| № | Время обработки, с. | | | | | |
|---|---------------------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|
| | Функция в MATLAB | | | Компилированная MEX функция | | |
| | КДС | ЛУП | ЛДП | КДС | ЛУП | ЛДП |
| 1 | 200,8406 | 30,0880 | 39,2395 | 101,5974 | 28,6394 | 36,6180 |
| 2 | 198,4460 | 29,9074 | 39,2885 | 100,86944 | 26,8055 | 36,3931 |
| 3 | 200,9667 | 29,0851 | 38,1552 | 102,0977 | 27,9490 | 35,4041 |

Продолжение таблицы 2.9

| | | | | | | |
|-------------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 4 | 201,6156 | 29,0606 | 37,9196 | 102,5260 | 27,2999 | 35,5640 |
| 5 | 207,4295 | 29,9186 | 39,8160 | 104,5699 | 28,6299 | 36,0856 |
| 6 | 207,6623 | 29,2552 | 37,9889 | 102,1536 | 27,9669 | 35,5821 |
| 7 | 205,7146 | 30,3672 | 39,4183 | 101,7305 | 28,7586 | 36,3802 |
| 8 | 202,2933 | 30,0239 | 39,4351 | 104,7784 | 28,6355 | 36,4913 |
| 9 | 200,5313 | 30,3891 | 39,2587 | 105,5180 | 28,8479 | 36,1548 |
| 10 | 203,9872 | 29,7963 | 38,5208 | 105,7879 | 28,9808 | 34,5581 |
| $\Sigma/10$ | 202,9487 | 29,7891 | 38,9041 | 103,16288 | 28,2513 | 35,9231 |

Из результатов эксперимента видно, что при использовании алгоритмов как внутренних функций MATLAB фильтр ЛУП показал выигрыш в быстродействии в 6,81 раза, а фильтр ЛДП в 5,22 раз относительно стандартного процесса свертки изображения. При использовании скомпилированных функций в C/C++ коде фильтр ЛУП показал выигрыш в 3,65 раза, а фильтр ЛДП в 2,87 раза относительно КДС.

2.5 Основные результаты главы

В главе 2 диссертационной работы приводится описание разработанных рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений и оценка их быстродействия для различной размерности изображений.

1. Представлено описание фильтра лапласиан “усеченная пирамида”, приведена системная функция, представлена структурная схема для данного фильтра и “маска” фильтра с ее трехмерным представлением. Сделаны выводы по количеству математических операций, требуемых для работы данного фильтра, которые сокращают количество вычислительных операций в 6,93 раза относительно КДС.

2. Представлено описание фильтра лапласиан «двойная пирамида», приведена системная функция, представлена структурная схема для данного фильтра и «маска» фильтра с ее трехмерным представлением. Сделаны выводы по количеству математических операций требуемых для работы данного фильтра, которые сокращают количество вычислительных операций в 5,11 раза относительно КДС.

3. Представлены фрагменты кода, описывающие реализацию разработанных рекурсивно-сепарабельных алгоритмов изображений.

4. Проведена оценка эффективности обработанных изображений для вариантов построения фильтров, когда изменялась центральная апертура 3×3 элемента (A_1 и A_3) и производился подъем центрального элемента фильтра (A_2 и A_4). При варианте с увеличением центральной апертуры 3×3 элемента коэффициенты оказались равны $A_1=A_3=2$, при этом фильтр ЛДП показал выигрыш в телевизионных линиях порядка 70 ТВЛ. В случае подъема центрального элемента для ЛУП значение коэффициента составило $A_2=14$ и получено разрешение в 633 ТВЛ, для ЛДП коэффициент составил $A_4=16$ при разрешении в 691 ТВЛ.

5. Приводятся результаты оценки быстродействия разработанных фильтров лапласиан «усеченная пирамида» и лапласиан «двойная пирамида». Проводя анализ полученных результатов можно сделать вывод, что при сравнении двух реализаций классической и рекурсивно-сепарабельной, выигрыш по временным затратам варьируется в зависимости от размерности исходного изображения, но в среднем сохраняется на рассчитанном в пункте 2.1 выигрыше в 7 раз для фильтра ЛУП и в 5 раз для фильтра ЛДП при размере сканирующей многоэлементной апертуры 7×7 элементов.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ПО ПОЛЮ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Данный раздел диссертационной работы посвящен исследованию распределения разрешения на телевизионных изображениях. В разделе проведен анализ данных разрешения с экспериментально полученных телевизионных изображений, которые имитируют наклон видеокамер наблюдения и после анализа позволяют применить полученные данные для проектирования ТИС. Представлено описание того как происходит изменение поля разрешения телевизионных изображений в зависимости от угла наблюдения за объектами интереса в пространстве наблюдения.

Результаты данной главы представлены в индивидуальной работе [99], а так же в работах, опубликованных в соавторстве [100-102] в которых автором получены результаты: проведение экспериментальных исследований по оценки влияния сжатия на разрешение изображений высокого качества; оценка координатных искажений на телевизионных изображениях; анализ и интерпретация полученных результатов.

3.1 Описание процессов распределения разрешения по полю изображения

Из терминологии, представленной в пункте 1.5 можно описать процесс распределения разрешения по полю изображения. На рисунке 3.1 представлены области распределения разрешения на изображении, которые описываются ниже. Зеленым цветом выделена область расположенная в фокусе системы. Синие области с разрешением ухудшенным за счет aberrаций оптической системы. Красные области расположенные не в фокусе оптической системы и подверженные aberrациями ухудшающими разрешение в них.

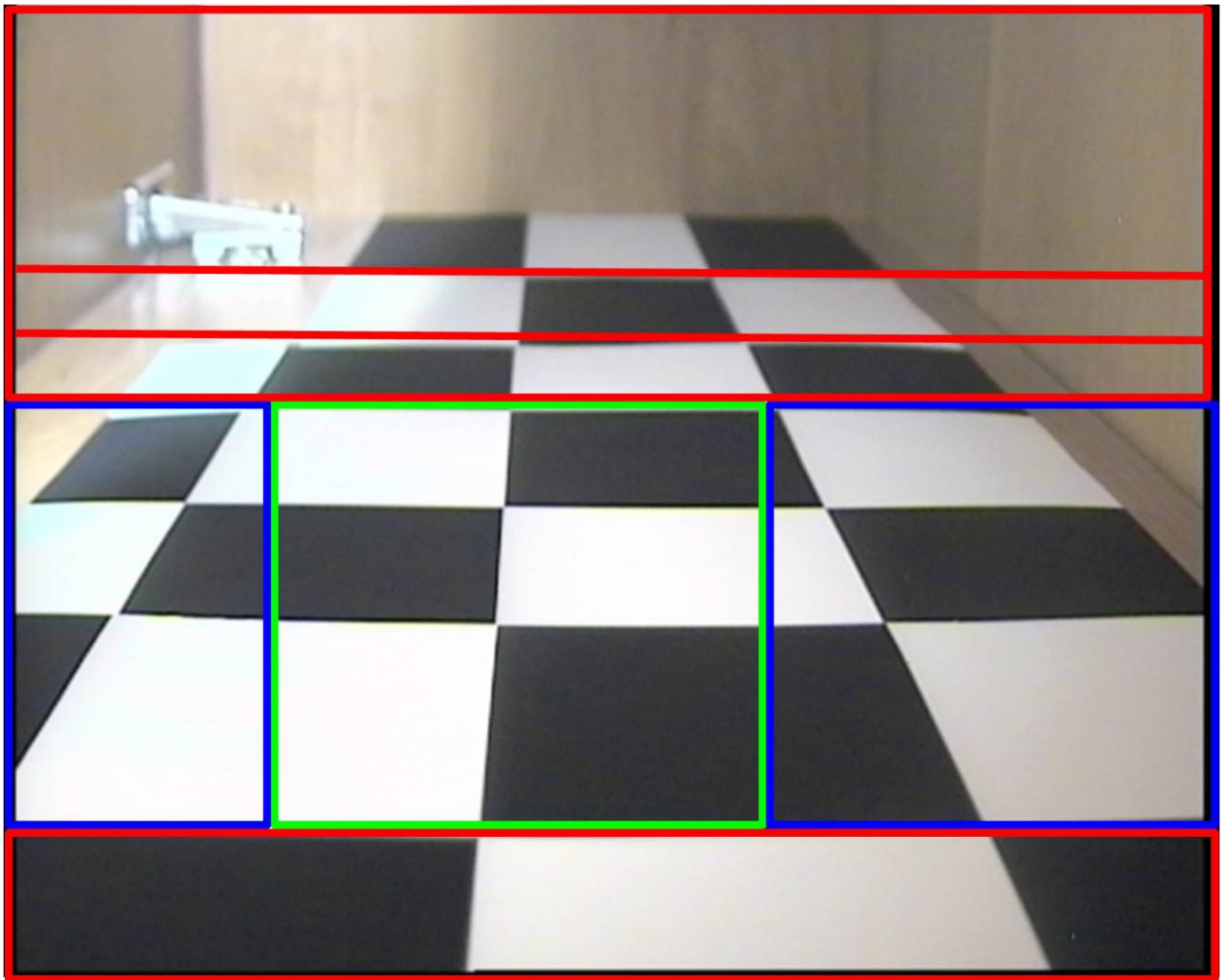


Рисунок 3.1 – Области распределения разрешения в поле изображения

Часть изображения, которая находится прямо на оптической оси в пространстве изображения и попадает в фокус системы, будет областью с самым высоким уровнем разрешения. Поскольку оптические системы подвержены различным видам aberrаций, вызываемых отклонениям луча светового потока от истинного направления, по которому он должен был следовать в идеальной оптической системе. Из-за эффектов оказываемых aberrациями по краям изображения возникают искажения, что приводит к снижению уровня разрешения, и соответственно, возникают еще две зоны с небольшим понижением уровня разрешения от области расположенной в фокусе системы. Можно назвать данные области первой зоной обработки, поскольку ухудшение разрешения в краях изображения не так велико из-за близости к фокусу системы.

Следующей областью изображения можно выделить зону, которая расположена между фокусом системы и объективом. В данной области наблюдается размытие изображения вызванное тем фактом, что она расположена не в фокусе системы, а так же на качество изображения в ней оказывают влияние aberrации вносимые самой оптической системой.

Условно третьей областью можно определить ту зону изображения, которая находится за оптическим фокусом системы. В ней на качество изображения влияет тот факт, что область изображения находится на удалении от оптического фокуса системы и все те же эффекты оказываемые aberrациями. В ней так же наблюдается падение разрешения от края области, расположенной в фокусе к краю изображения.

Так же учитывая тот факт, что фокусировка камеры можно происходить не только в области, представленной на рисунке 3.1, но и смещаться по оптической оси системы, следовательно, будет изменяться положение остальных областей в аналогичном направлении движения фокуса оптической системы.

Теперь необходимо экспериментально подтвердить процессы, описанные в данном разделе, с целью подтверждения выдвинутых утверждений.

3.2 Подтверждение выдвинутых утверждений

С целью подтверждения выдвинутых утверждений по распределению разрешению по полю изображения, была определена следующая методика эксперимента. На первом этапе рассмотрим изменение разрешения на тестовом изображении, расположенном перпендикулярно оптической оси системы, приведенном на рисунке 3.2, и полученном при помощи камеры ACV – 9002SCHA Day Night Digital Color Camera (1/3 SONY ExView HAD, день - 1,0 lux цвет./ночь - 0.01 lux ч/б). Для данной камеры использовался варифокальный объектив Infinity SCV416M, характеристики которого

приведены в таблице 3.1. Так же на данном изображении обозначены зоны, в которых производилось измерение разрешения.

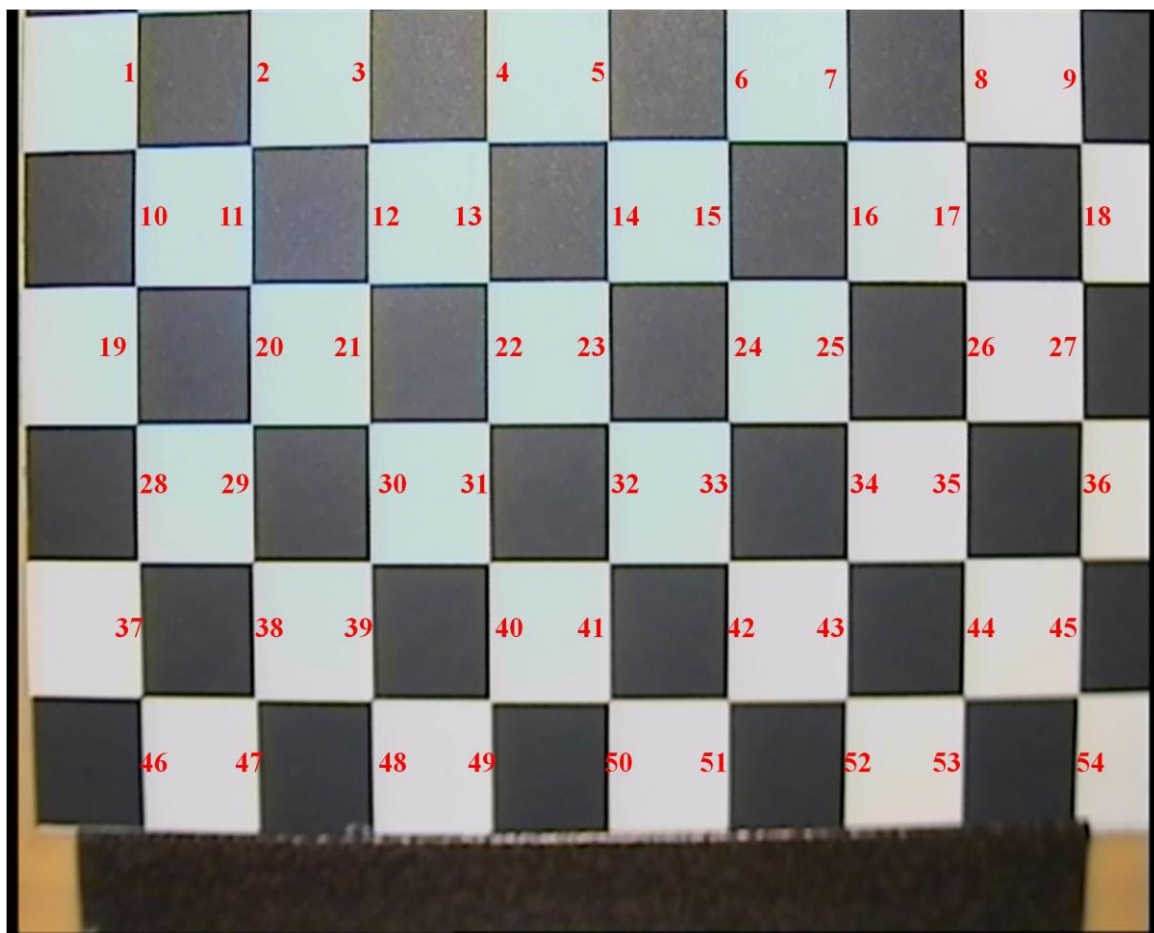


Рисунок 3.2 – Тестовое изображение с обозначенными зонами измерения разрешения

Таблица 3.1 – Технические характеристики варифокального объектива Infinity SCV416M

| | |
|----------------------------|---|
| Тип оборудования | Стандартный |
| Размер матрицы | 1/3" |
| Фокусное расстояние, f, мм | 4-16 |
| Диафрагма | F1.4-3.6 |
| Угол обзора, град | 65.4-15.8 |
| Крепление | CS |
| Описание | 1/3", 4-16 мм, (65.4 - 15.8)°, F1.4-3.6, CS |

Результаты измерения разрешения по полю изображения представлены в таблице 3.2, далее для наглядности изменения разрешения от центра изображения к краям, проведем усреднение результатов путем суммирования результатов измерений по столбцам, например, сумма измерений № (1+10+19+28+37+46) и делением на общее количество измерений в столбце (6 измерений), результаты усреднения приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты измерений разрешения

| № | ТВЛ | № | ТВЛ | № | ТВЛ | № | ТВЛ | № | ТВЛ | № | ТВЛ |
|---|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| 1 | 568 | 10 | 525 | 19 | 548 | 28 | 556 | 37 | 404 | 46 | 325 |
| 2 | 648 | 11 | 598 | 20 | 642 | 29 | 556 | 38 | 544 | 47 | 313 |
| 3 | 585 | 12 | 557 | 21 | 619 | 30 | 530 | 39 | 465 | 48 | 399 |
| 4 | 676 | 13 | 593 | 22 | 591 | 31 | 604 | 40 | 579 | 49 | 306 |
| 5 | 605 | 14 | 768 | 23 | 585 | 32 | 673 | 41 | 353 | 50 | 459 |
| 6 | 679 | 15 | 546 | 24 | 701 | 33 | 481 | 42 | 600 | 51 | 321 |
| 7 | 544 | 16 | 629 | 25 | 481 | 34 | 572 | 43 | 481 | 52 | 354 |
| 8 | 638 | 17 | 585 | 26 | 567 | 35 | 540 | 44 | 484 | 53 | 269 |
| 9 | 579 | 18 | 412 | 27 | 516 | 36 | 349 | 45 | 328 | 54 | 271 |

Таблица 3.3 – Усредненные результаты измерения разрешения

| Столбец | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ТВЛ | 488 | 550 | 526 | 558 | 574 | 555 | 510 | 514 | 409 |

По экспериментальным результатам, полученным после проведения процедуры усреднения получена зависимость разрешения по полю изображения, приведенная на рисунке 3.3. В этом случае из графика видно, что максимальный уровень разрешения наблюдается в центральном (5-ом) столбце изображения «шахматное поле» и снижается к его краям.

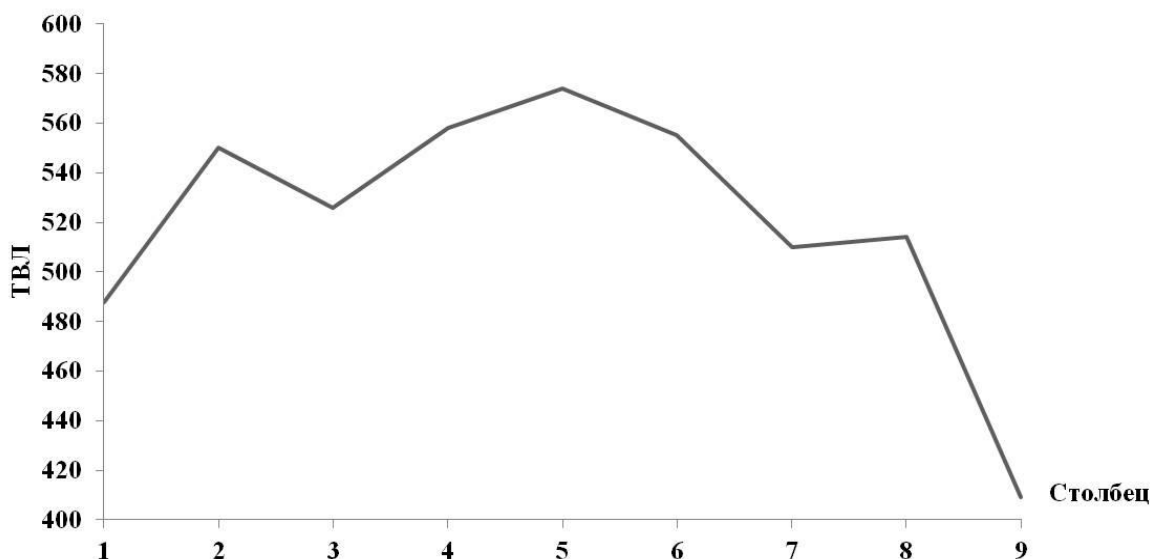


Рисунок 3.3 – Усредненный график изменения разрешения

3.2.1 Измерения при положениях испытательной таблицы 45° , -45° , 60° и -60°

Следующим шагом экспериментального исследования стало измерение разрешения изображения при изменении положения таблицы относительно оптической оси телевизионной камеры, пример поворота изображения и точек измерения в обоих направлениях представлен на рисунке 3.4.

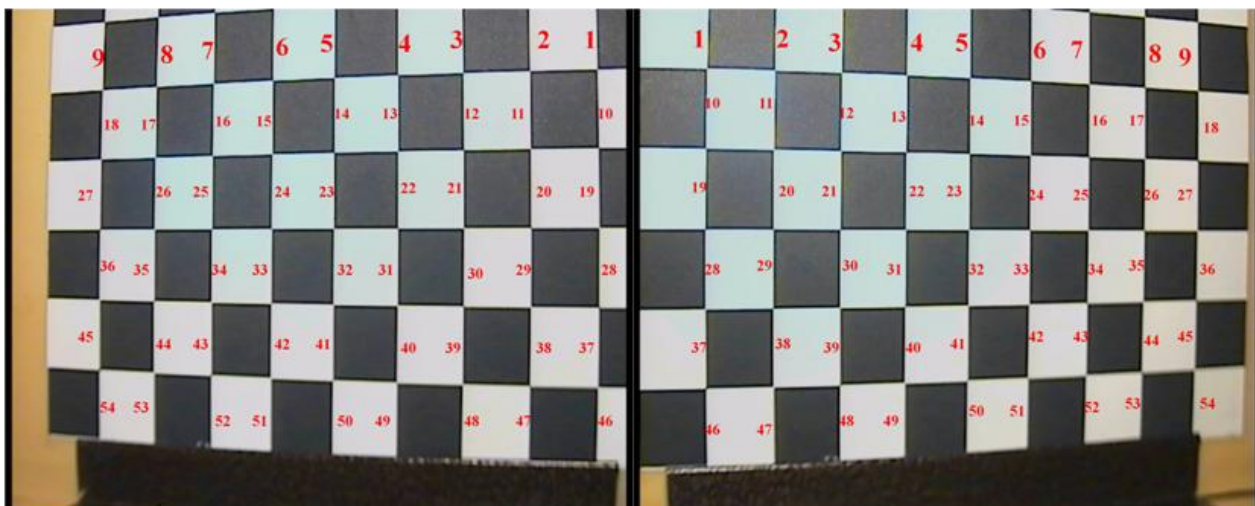


Рисунок 3.4 – «Левое» и «Правое» положение таблицы

Проведя измерения разрешения отснятых изображений при различных положениях приведем результаты измерений в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерения разрешения

| № | +45 | -45 | +60 | -60 |
|----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 630 | 550 | 601 | 566 |
| 2 | 643 | 666 | 658 | 619 |
| 3 | 655 | 512 | 583 | 592 |
| 4 | 610 | 606 | 565 | 553 |
| 5 | 600 | 568 | 574 | 526 |
| 6 | 544 | 635 | 485 | 455 |
| 7 | 627 | 550 | 417 | 489 |
| 8 | 575 | 637 | 402 | 432 |
| 9 | 381 | 419 | 350 | 372 |
| 10 | 620 | 629 | 715 | 612 |
| 11 | 613 | 622 | 621 | 568 |
| 12 | 619 | 515 | 625 | 600 |
| 13 | 610 | 563 | 585 | 518 |
| 14 | 660 | 566 | 626 | 573 |
| 15 | 555 | 505 | 595 | 550 |
| 16 | 574 | 598 | 376 | 526 |
| 17 | 450 | 367 | 356 | 339 |
| 18 | 379 | 545 | 357 | 315 |
| 19 | 619 | 672 | 625 | 620 |
| 20 | 676 | 624 | 668 | 672 |
| 21 | 610 | 596 | 590 | 569 |
| 22 | 599 | 621 | 616 | 528 |
| 23 | 627 | 617 | 495 | 554 |
| 24 | 591 | 518 | 462 | 450 |
| 25 | 506 | 479 | 416 | 359 |
| 26 | 437 | 627 | 351 | 353 |
| 27 | 275 | 310 | 264 | 280 |

Продолжение таблицы 3.4

| | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|
| 28 | 637 | 531 | 641 | 539 |
| 29 | 649 | 627 | 676 | 565 |
| 30 | 581 | 524 | 635 | 558 |
| 31 | 530 | 578 | 472 | 536 |
| 32 | 588 | 625 | 600 | 614 |
| 33 | 501 | 525 | 404 | 425 |
| 34 | 370 | 388 | 313 | 351 |
| 35 | 301 | 367 | 263 | 259 |
| 36 | 259 | 422 | 268 | 270 |
| 37 | 552 | 441 | 532 | 635 |
| 38 | 635 | 611 | 535 | 641 |
| 39 | 563 | 501 | 602 | 464 |
| 40 | 665 | 620 | 598 | 395 |
| 41 | 375 | 363 | 375 | 338 |
| 42 | 414 | 406 | 306 | 325 |
| 43 | 290 | 294 | 245 | 246 |
| 44 | 275 | 328 | 252 | 239 |
| 45 | 210 | 246 | 208 | 205 |
| 46 | 459 | 506 | 620 | 571 |
| 47 | 564 | 527 | 495 | 389 |
| 48 | 497 | 379 | 393 | 493 |
| 49 | 323 | 323 | 325 | 313 |
| 50 | 399 | 337 | 288 | 297 |
| 51 | 249 | 251 | 225 | 244 |
| 52 | 26 | 296 | 248 | 225 |
| 53 | 172 | 208 | 188 | 192 |
| 54 | 219 | 226 | 211 | 189 |

Проводя анализ полученных результатов можно сделать вывод о том, что процесс изменения разрешения по строкам у изображений снятых при повороте на 45° и -45° имеют похожий вид, аналогично и для случая 60° и -60° . Графики подтверждающие данное заключение представлены на рисунке 3.5 (для 45° и -45°) и рисунке 3.6 (для 60° и -60°).

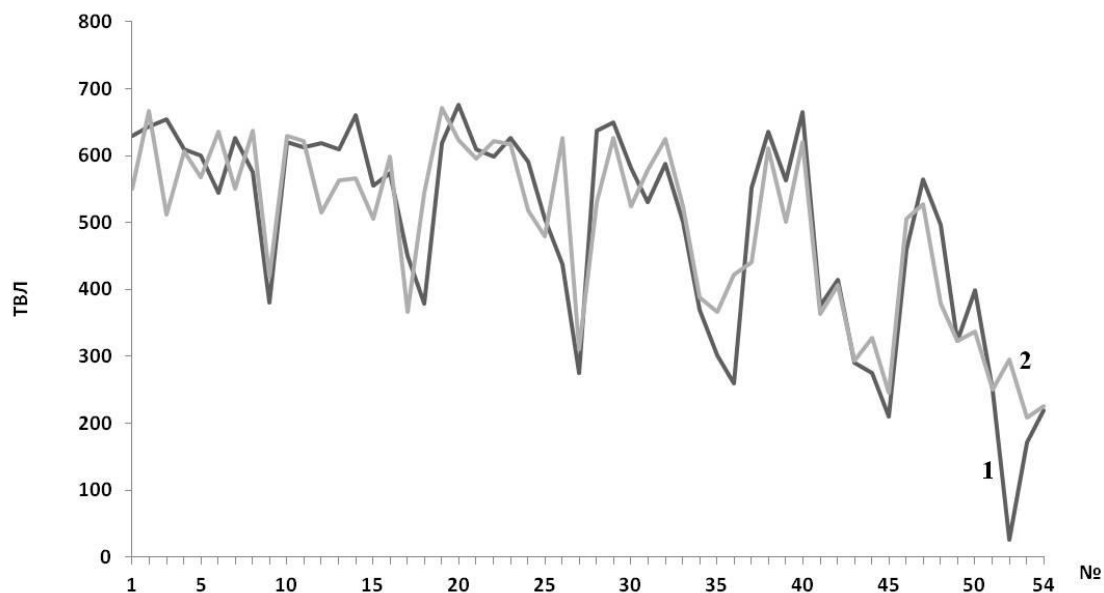


Рисунок 3.5 – График сравнения распределения разрешения по полю изображения: 1 – угол 45° ; 2 – угол -45°

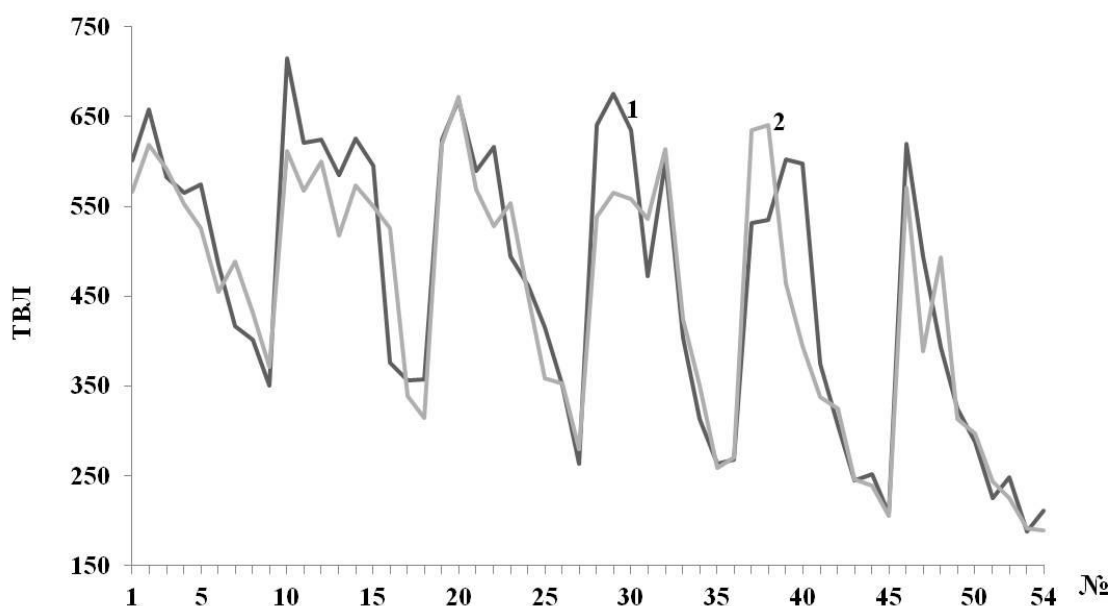


Рисунок 3.6 – График сравнения распределения разрешения по полю изображения: 1 – угол 60° ; 2 – угол -60°

В таблице 3.5 и 3.6 представлены усредненные значения изменения разрешения по полю изображения. На рисунке 3.7 и рисунке 3.8 приведены зависимости изменению разрешения для четырех случаев рассмотренных выше. Графики приведены попарно, аналогично общим графикам распределения разрешения по полю изображения.

Таблица 3.5 – Усредненные результаты измерения разрешения

| Столбец | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 45°, ТВЛ | 587 | 631 | 588 | 557 | 542 | 476 | 399 | 368 | 288 |
| -45°, ТВЛ | 555 | 613 | 505 | 552 | 513 | 474 | 435 | 423 | 361 |

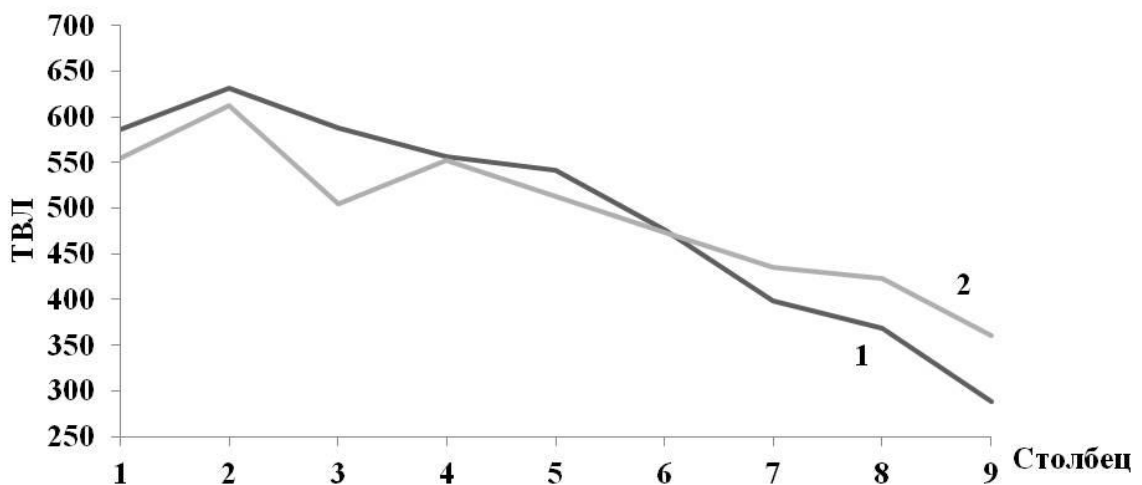


Рисунок 3.7 – Усредненный график распределения разрешения по полю изображения: 1 – угол 45°; 2 – угол -45°

Таблица 3.6 – Усредненные результаты измерения разрешения

| Столбец | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 60°, ТВЛ | 623 | 610 | 572 | 527 | 494 | 413 | 336 | 302 | 277 |
| -60°, ТВЛ | 591 | 576 | 546 | 474 | 484 | 408 | 367 | 303 | 272 |

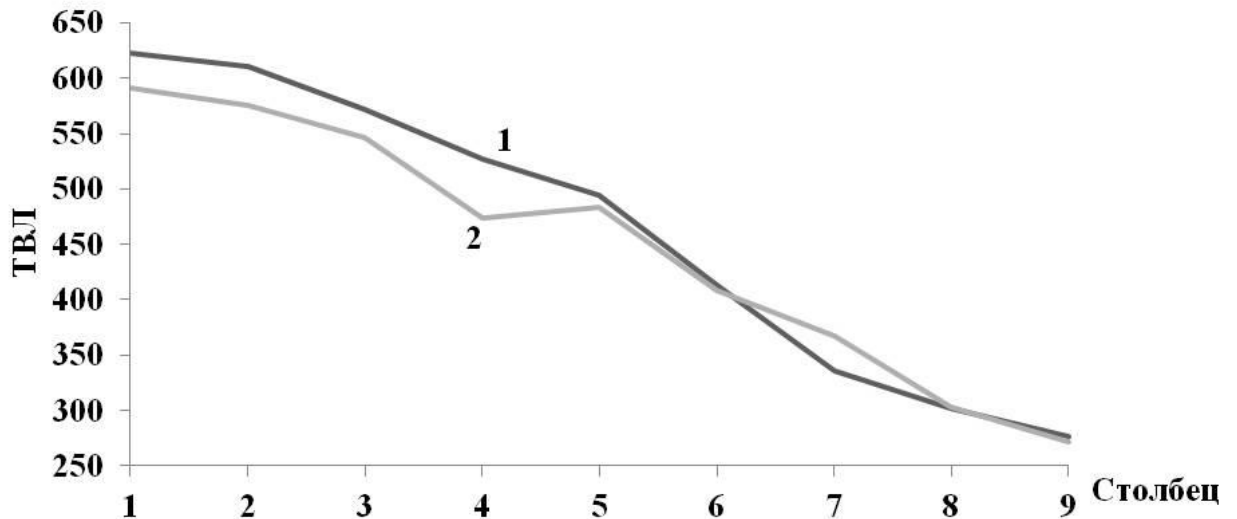


Рисунок 3.8 – Усредненный график распределения разрешения по полю изображения: 1 – угол 60° ; 2 – угол -60°

3.2.2 Испытания на стенде имитации системы видеонаблюдения

Следующим шагом в проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения характера распределения разрешения по полю изображения, было проведение эксперимента на прототипе стенда имитации системы видеонаблюдения. При этом тестовая таблица «шахматное поле» была помещена в стенд имитации, на расстояние 500 мм от плоскости объектива до рассматриваемой зоны. Съемка выполнялась камерой VSC-751-USB при углах наклона 90° , 60° и 45° , для значений диафрагмы объектива $F=2,8, 4, 6, 8$ и 11 . Изменение параметров диафрагмы производилось с целью искусственного ухудшения получаемого изображения, что бы имитировать изменяющиеся условия видеорегистрации. В исследовании использовался объектив «Вега - 7Э». Данное исследование было направлено на изучение и демонстрацию координатных искажений и расфокусировки изображений, которые появляются при изменении угла наблюдения телевизионного датчика относительно «поверхности наблюдения».

На первом этапе экспериментального исследования камера была расположена под углом 90° к положению испытательной таблицы находящейся в прототипе стенда имитации выращивания кристаллов. Была получена серия изображений при различных значениях диафрагменного числа F , снимки представлены на рисунке 3.9.

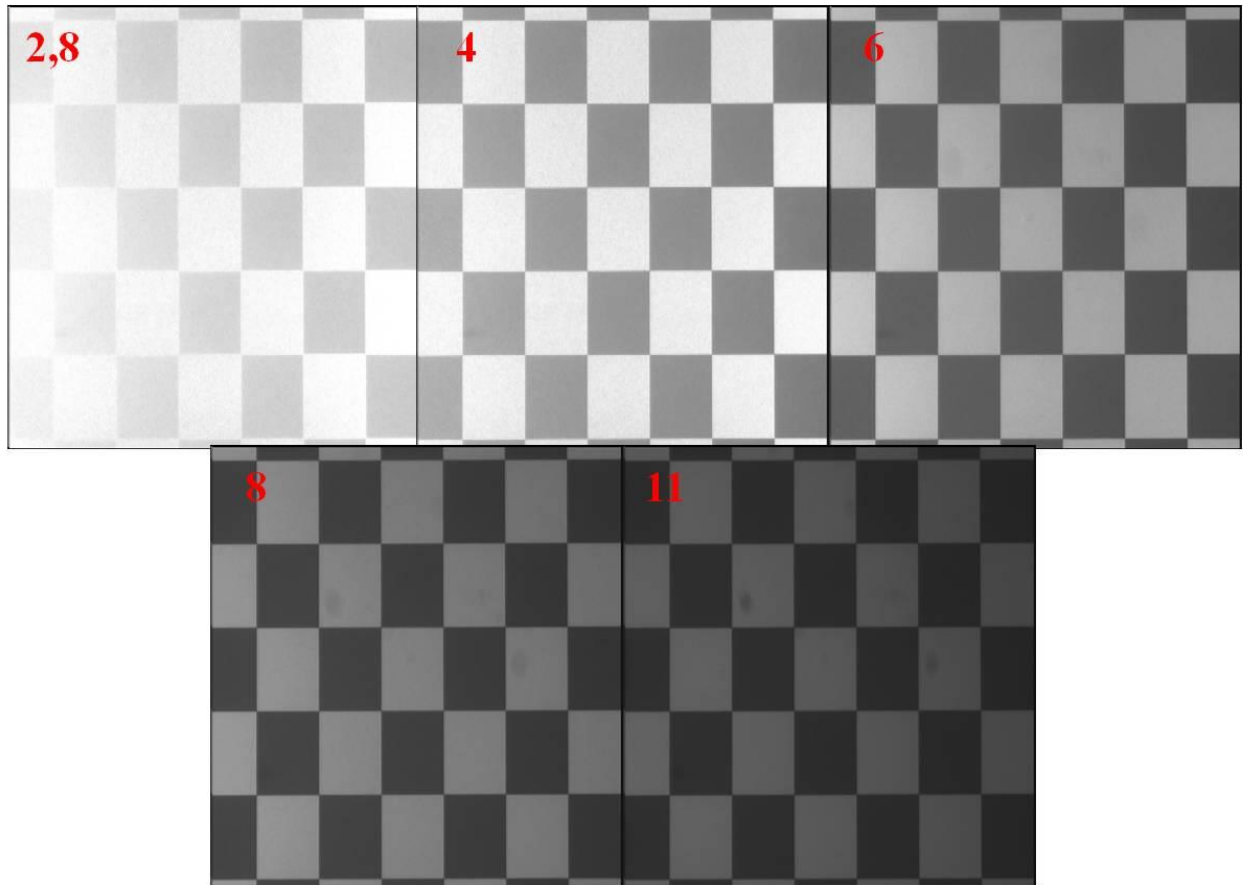


Рисунок 3.9 – Тестовое изображение «Шахматное поле» сформированное под углом 90° с различным значением диафрагменного числа F

Следующим шагом (аналогично пункту 3.2) было проведено измерение разрешения по полю изображения для всех изображений с различными значениями числа F результаты измерений представлены в таблице 3.7. Затем была проведена операция по усреднению значений разрешения по столбцам аналогично алгоритму описанному в пункте 3.2 результаты представлены в таблице 3.8. По данным представленным в таблице 3.8 построен график зависимостей разрешения от столбца измерения параметров и данное семейство зависимостей представлено на рисунке 3.10.

Таблица 3.7 – Результаты измерения разрешения

| № | f диафрагмы | | | | |
|----|-------------|------|-----|-----|-----|
| | 2,8 | 4 | 6 | 8 | 11 |
| 1 | 166 | 350 | 253 | 264 | 251 |
| 2 | 312 | 606 | 527 | 598 | 439 |
| 3 | 332 | 315 | 304 | 283 | 262 |
| 4 | 319 | 703 | 625 | 512 | 865 |
| 5 | 230 | 284 | 272 | 323 | 292 |
| 6 | 407 | 927 | 629 | 512 | 448 |
| 7 | 167 | 674 | 481 | 511 | 420 |
| 8 | 542 | 289 | 258 | 269 | 255 |
| 9 | 236 | 1012 | 445 | 475 | 547 |
| 10 | 216 | 302 | 286 | 301 | 253 |
| 11 | 652 | 819 | 770 | 675 | 494 |
| 12 | 426 | 328 | 322 | 331 | 323 |
| 13 | 167 | 340 | 270 | 277 | 264 |
| 14 | 226 | 556 | 494 | 683 | 473 |
| 15 | 179 | 441 | 277 | 270 | 259 |
| 16 | 295 | 467 | 460 | 554 | 478 |
| 17 | 338 | 345 | 374 | 300 | 297 |
| 18 | 292 | 738 | 819 | 659 | 573 |
| 19 | 200 | 829 | 521 | 515 | 458 |
| 20 | 363 | 352 | 273 | 294 | 262 |
| 21 | 216 | 538 | 680 | 834 | 457 |
| 22 | 285 | 389 | 315 | 283 | 264 |
| 23 | 651 | 595 | 860 | 742 | 469 |
| 24 | 432 | 291 | 305 | 283 | 270 |
| 25 | 92 | 251 | 257 | 271 | 274 |
| 26 | 150 | 1163 | 453 | 548 | 456 |

Продолжение таблицы 3.7

| | | | | | |
|----|-----|-----|------|------|-----|
| 27 | 222 | 291 | 432 | 289 | 273 |
| 28 | 350 | 852 | 1052 | 1034 | 652 |
| 29 | 354 | 347 | 368 | 345 | 295 |
| 30 | 329 | 494 | 1030 | 873 | 526 |

Таблица 3.8 – Усредненные результаты измерения разрешения

| f | Столбец, ТВЛ | | | | | |
|-----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2,8 | 159 | 319 | 238 | 294 | 445 | 378 |
| 4 | 489 | 594 | 577 | 543 | 478 | 556 |
| 6 | 357 | 401 | 428 | 548 | 529 | 621 |
| 8 | 368 | 479 | 431 | 537 | 478 | 532 |
| 11 | 334 | 378 | 360 | 503 | 369 | 428 |

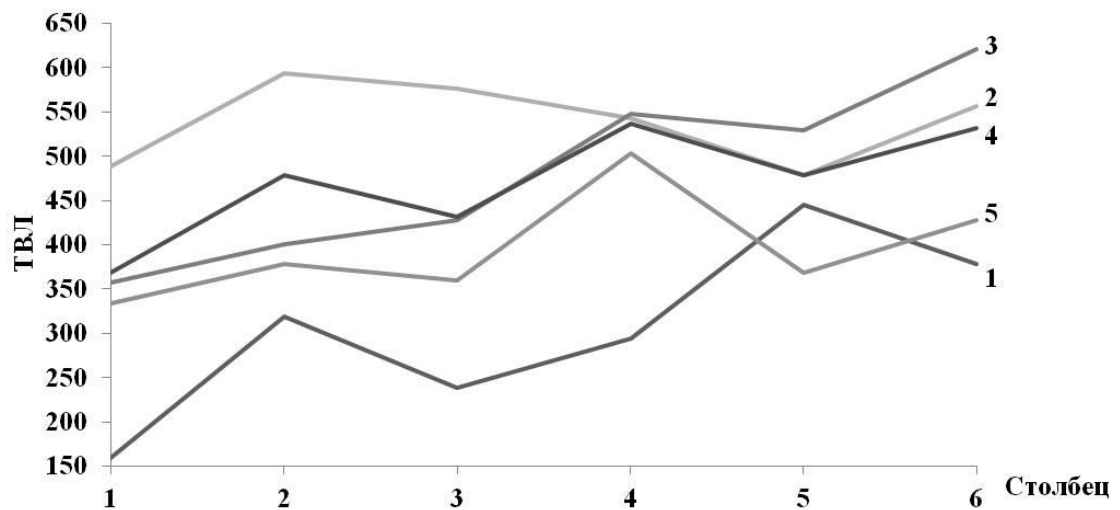


Рисунок 3.10 – Усредненный график распределения разрешения по полю изображения: 1 – f2.8; 2 – f4; 3 – f6; 4 – f8; 5 – f11

На втором этапе видеочамера была переведена в положение, при котором съемка тестового изображения осуществлялась под углом в 60°. Захват изображения осуществлялся при тех же параметра диафрагменного

числа, что и на первом этапе измерений, полученные изображения представлены на рисунке 3.11. В таблице 3.9 представлены результаты измерения разрешения по полю изображения, далее проведя операцию усреднения, получены усредненные параметры разрешения, которые представлены в таблице 3.10. По полученным результатам был построен усредненный график распределения разрешений, приведенный на рисунке 3.12.

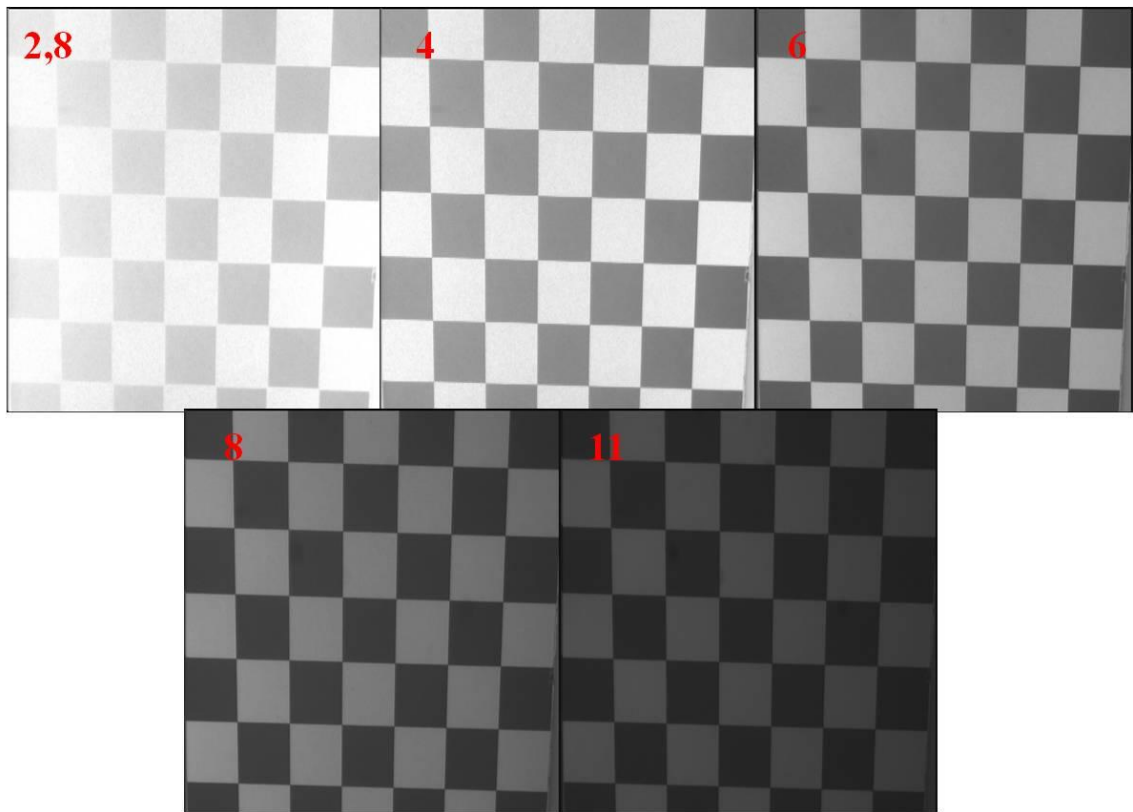


Рисунок 3.11 – Тестовое изображение «Шахматное поле» заснятое под углом 60° с различным значение диафрагменного числа F

Таблица 3.9 – Результаты измерения разрешения

| № | F диафрагмы объектива | | | | |
|---|-------------------------|------|-----|-----|-----|
| | 2,8 | 4 | 6 | 8 | 11 |
| 1 | 157 | 813 | 788 | 809 | 470 |
| 2 | 319 | 639 | 296 | 306 | 264 |
| 3 | 229 | 1002 | 901 | 973 | 473 |
| 4 | 241 | 356 | 352 | 353 | 325 |

Продолжение таблицы 3.9

| | | | | | |
|----|-----|------|-----|-----|-----|
| 5 | 360 | 877 | 879 | 835 | 625 |
| 6 | 322 | 340 | 372 | 356 | 362 |
| 7 | 335 | 595 | 303 | 336 | 269 |
| 8 | 242 | 605 | 577 | 666 | 505 |
| 9 | 276 | 353 | 325 | 277 | 274 |
| 10 | 298 | 1025 | 961 | 861 | 613 |
| 11 | 268 | 358 | 420 | 481 | 441 |
| 12 | 313 | 745 | 870 | 794 | 537 |
| 13 | 318 | 623 | 687 | 785 | 503 |
| 14 | 213 | 416 | 278 | 283 | 280 |
| 15 | 209 | 1048 | 618 | 641 | 443 |
| 16 | 340 | 443 | 460 | 491 | 338 |
| 17 | 238 | 1008 | 956 | 896 | 630 |
| 18 | 483 | 317 | 452 | 457 | 376 |
| 19 | 152 | 482 | 289 | 298 | 292 |
| 20 | 234 | 1054 | 714 | 706 | 423 |
| 21 | 253 | 341 | 319 | 421 | 279 |
| 22 | 328 | 774 | 810 | 835 | 648 |
| 23 | 287 | 333 | 364 | 425 | 330 |
| 24 | 266 | 647 | 746 | 791 | 576 |
| 25 | 175 | 704 | 733 | 819 | 561 |
| 26 | 269 | 335 | 324 | 317 | 268 |
| 27 | 334 | 554 | 573 | 639 | 528 |
| 28 | 312 | 462 | 454 | 485 | 332 |
| 29 | 286 | 577 | 828 | 821 | 620 |
| 30 | 297 | 267 | 373 | 487 | 367 |

Таблица 3.10 – Усредненные результаты измерения разрешения

| f | Столбец, ТВЛ | | | | | |
|-----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2,8 | 228 | 256 | 261 | 305 | 288 | 337 |
| 4 | 644 | 610 | 660 | 612 | 631 | 463 |
| 6 | 561 | 438 | 547 | 607 | 690 | 563 |
| 8 | 610 | 456 | 590 | 605 | 691 | 577 |
| 11 | 419 | 349 | 400 | 452 | 529 | 444 |

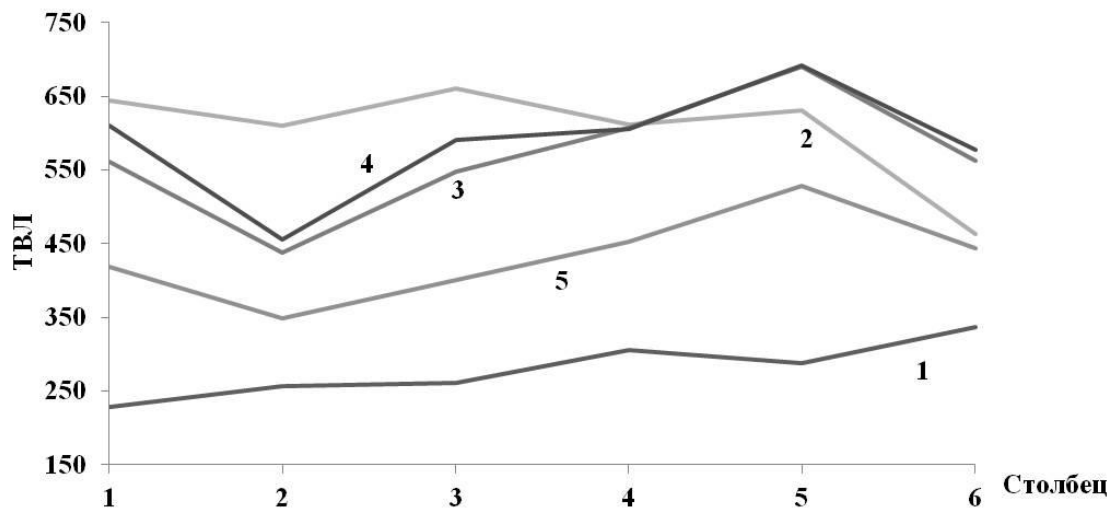


Рисунок 3.12 – Усредненный график распределения разрешения по полю изображения: 1 – f2.8; 2 – f4; 3 – f6; 4 – f8; 5 – f11

Третьим этапом эксперимента было положение видеокамеры к тестовому изображению на угол 45° (рисунок 3.13). В таблице 3.11 представлены изменения значения разрешения по полю изображения, после проведения процедуры усреднения разрешения (таблица 3.12) и на ее основе построили семейство зависимостей распределения разрешения по полю изображения, которое приведено на рисунке 3.14.

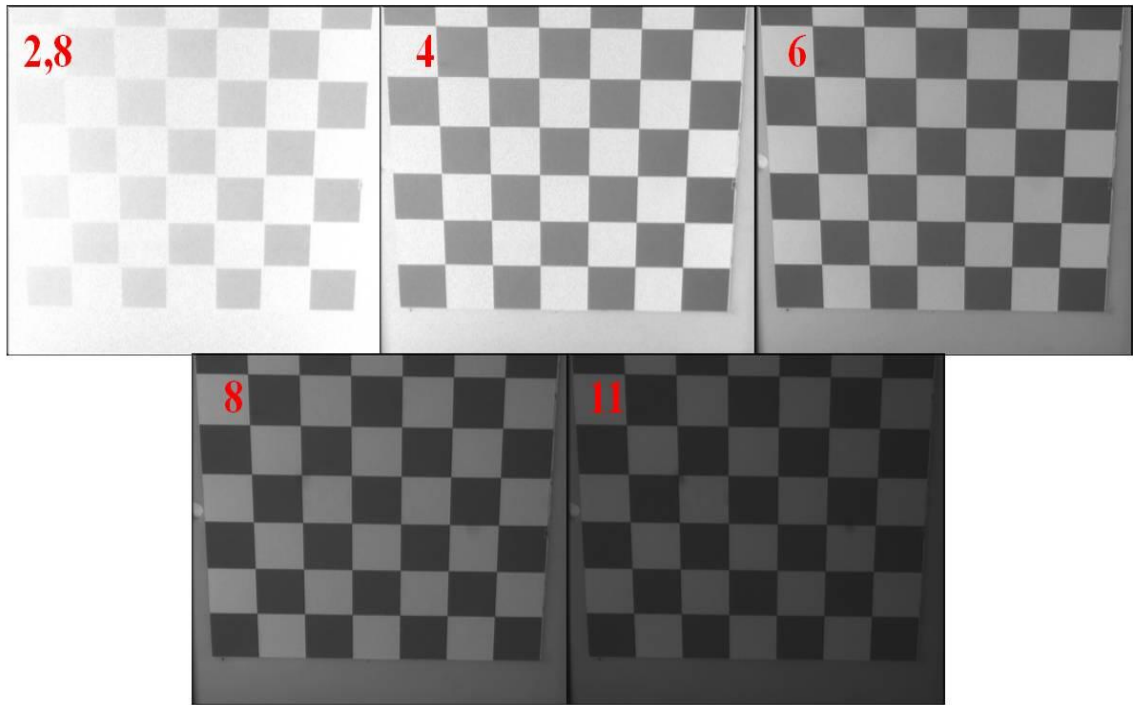


Рисунок 3.13 – Тестовое изображение “Шахматное поле” заснятое под углом 45° с различным значение диафрагменного числа F

Таблица 3.11– Результаты измерения разрешения

| № | f диафрагмы | | | | |
|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | 2,8 | 4 | 6 | 8 | 11 |
| 1 | 122 | 790 | 796 | 833 | 523 |
| 2 | 256 | 525 | 393 | 422 | 325 |
| 3 | 128 | 803 | 770 | 983 | 491 |
| 4 | 211 | 296 | 341 | 400 | 256 |
| 5 | 218 | 721 | 842 | 833 | 613 |
| 6 | 282 | 258 | 339 | 421 | 368 |
| 7 | 523 | 366 | 329 | 332 | 292 |
| 8 | 178 | 990 | 806 | 877 | 602 |
| 9 | 232 | 368 | 412 | 514 | 298 |
| 10 | 168 | 701 | 846 | 918 | 600 |
| 11 | 236 | 314 | 367 | 493 | 372 |
| 12 | 237 | 459 | 857 | 727 | 603 |
| 13 | 157 | 696 | 714 | 795 | 585 |

Продолжение таблицы 3.11

| | | | | | |
|----|-----|-----|-----|------|------|
| 14 | 321 | 572 | 352 | 482 | 390 |
| 15 | 379 | 486 | 780 | 902 | 426 |
| 16 | 292 | 315 | 351 | 449 | 335 |
| 17 | 182 | 741 | 889 | 835 | 650 |
| 18 | 265 | 237 | 297 | 449 | 316 |
| 19 | 344 | 360 | 310 | 380 | 336 |
| 20 | 441 | 504 | 832 | 910 | 1252 |
| 21 | 293 | 294 | 375 | 429 | 316 |
| 22 | 198 | 427 | 811 | 901 | 547 |
| 23 | 178 | 233 | 357 | 465 | 369 |
| 24 | 217 | 347 | 772 | 718 | 503 |
| 25 | 233 | 409 | 768 | 863 | 515 |
| 26 | 174 | 298 | 312 | 331 | 369 |
| 27 | 195 | 367 | 970 | 1001 | 581 |
| 28 | 229 | 261 | 333 | 406 | 322 |
| 29 | 239 | 309 | 765 | 850 | 578 |
| 30 | 224 | 210 | 307 | 419 | 336 |

Таблица 3.12 – Усредненные результаты измерения разрешения

| f | Столбец, ТВЛ | | | | | |
|-----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2,8 | 276 | 275 | 246 | 220 | 211 | 246 |
| 4 | 525 | 578 | 464 | 401 | 464 | 303 |
| 6 | 584 | 540 | 662 | 537 | 645 | 515 |
| 8 | 641 | 605 | 766 | 615 | 696 | 547 |
| 11 | 451 | 588 | 423 | 412 | 516 | 426 |

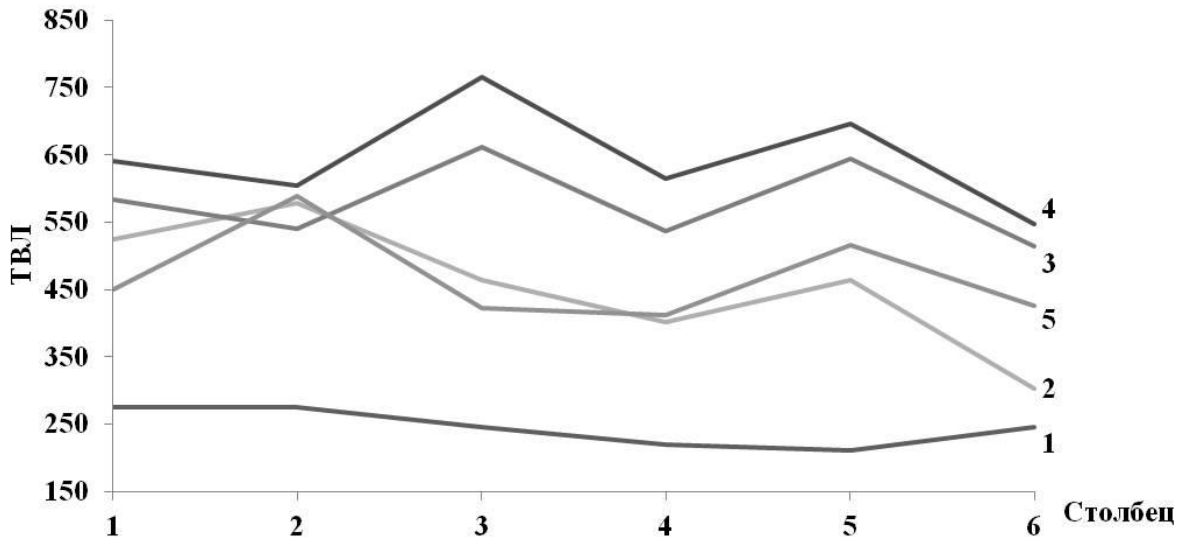


Рисунок 3.14 – Усредненный график распределения разрешения по полю изображения: 1 – $F 2.8$; 2 – $F 4$; 3 – $F 6$; 4 – $F 8$; 5 – $F 11$

3.3 Исследование зон распределения по полю изображения при пошаговом изменении наклона системы видеонаблюдения

В ходе исследования было заснято две серии тестовых изображений: первая серия показывает, как распределяется разрешение при изменении угла наблюдения и изменении фокусировки камеры на центре просматриваемой области наблюдения (далее эксперимент №1); вторая серия иллюстрирует аналогичное изменение угла наблюдения, но при постоянной фокусировке камеры в исходном положении (далее эксперимент №2).

Зоны измерения разрешения на изображениях соответствуют горизонтальным полосам состоящих из чередующихся черных и белых квадратов шахматного поля, измерение проводилось аналогично методике, описанной в пункте 3.2 диссертационной работы.

На рисунке 3.15 представлены изображения, в которых система наблюдения направлена на объект интереса параллельно поверхности Земли

и сфокусирована на центр области интереса. В таблице 3.13 представлены результаты измерения разрешения на изображении.

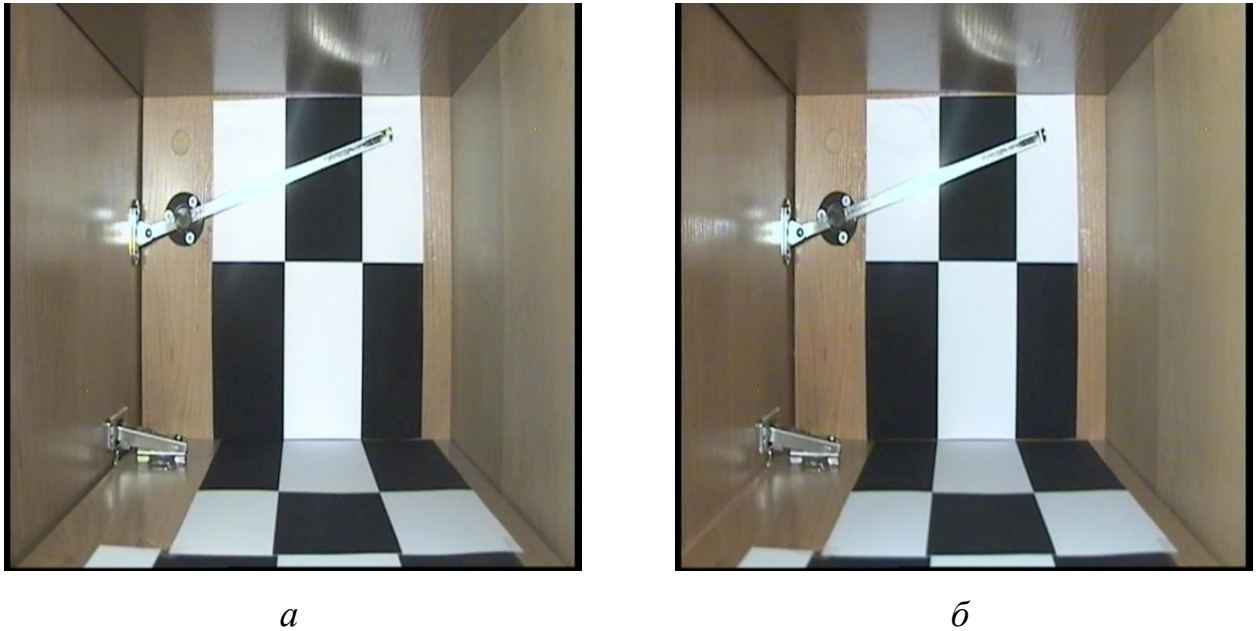


Рисунок 3.15 – Изображение в исходном положении: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

Если оценить данные расчета разрешения в телевизионных линиях, то можно увидеть что различие заключается лишь не в совсем идентичной фокусировке объектива камеры при проведении экспериментов. Но данные различия незначительны, поскольку задачей исследования является оценка распределения разрешения в двух описанных выше случаях.

Таблица 3.13 – Распределение разрешения по полю изображения на начальном этапе исследования

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,173 | 442,88 | 0,1775 | 454,4 |
| 2 | 0,185 | 473,6 | 0,1605 | 410,88 |
| 3 | 0,1545 | 395,52 | 0,133 | 340,48 |
| 4 | 0,1435 | 367,36 | 0,1145 | 293,12 |

На рисунке 3.16 представлены изображения при наклоне системы на 5 градусов вниз, относительно исходного положения системы.



a

б

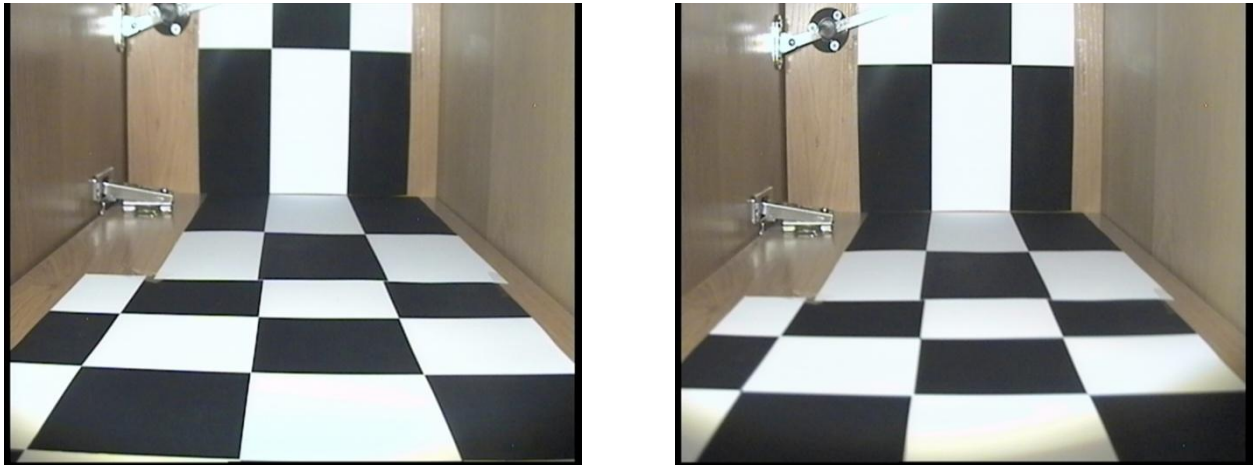
Рисунок 3.16 – Изображение при наклоне в 5°: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

При рассмотрении рисунка 3.16 можно заметить, что нижний край изображения на рисунке 3.16,б обладает больше размытостью перепадов черного и белого цвета. Так же это подтверждается результатами, представленными в таблице 3.14, поскольку наблюдается более резкое падение разрешения изображения относительно результатов первого эксперимента.

Таблица 3.14 – Распределение разрешения по полю изображения при наклоне системы в 5°

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,21 | 537,6 | 0,197 | 504,32 |
| 2 | 0,191 | 487,68 | 0,152 | 389,12 |
| 3 | 0,149 | 380,16 | 0,127 | 325,12 |
| 4 | 0,136 | 348,16 | 0,1105 | 282,88 |
| 5 | 0,112 | 287,57 | 0,087 | 221,87 |
| 6 | 0,089 | 226,99 | 0,081 | 207,36 |

На рисунке 3.17 представлены изображения при наклоне системы на 10 градусов вниз, относительно исходного положения системы.



a

б

Рисунок 3.17 – Изображение при наклоне в 10°: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

Распределение разрешения на данном этапе исследования представленное в таблице 3.15, показывает что в эксперименте №2 наблюдается падение разрешения от первой зоны измерения до седьмой в 3 раза. В то время как в эксперименте №1 можно наблюдать плавное падение разрешения в обе стороны от зоны фокусировки камеры. Данные изменения так же отчетливо видны и на рисунке 3.17.

Таблица 3.15 – Распределение разрешения по полю изображения при наклоне системы в 10°

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,118 | 302,08 | 0,176 | 450,56 |
| 2 | 0,135 | 344,32 | 0,19 | 486,4 |
| 3 | 0,136 | 348,16 | 0,130 | 331,52 |
| 4 | 0,161 | 412,16 | 0,114 | 290,56 |
| 5 | 0,165 | 422,4 | 0,09 | 230,4 |
| 6 | 0,167 | 426,67 | 0,083 | 212,48 |
| 7 | 0,156 | 399,36 | 0,059 | 150,19 |

На рисунке 3.18 представлены изображения при наклоне системы на 15 градусов вниз, относительно исходного положения системы.

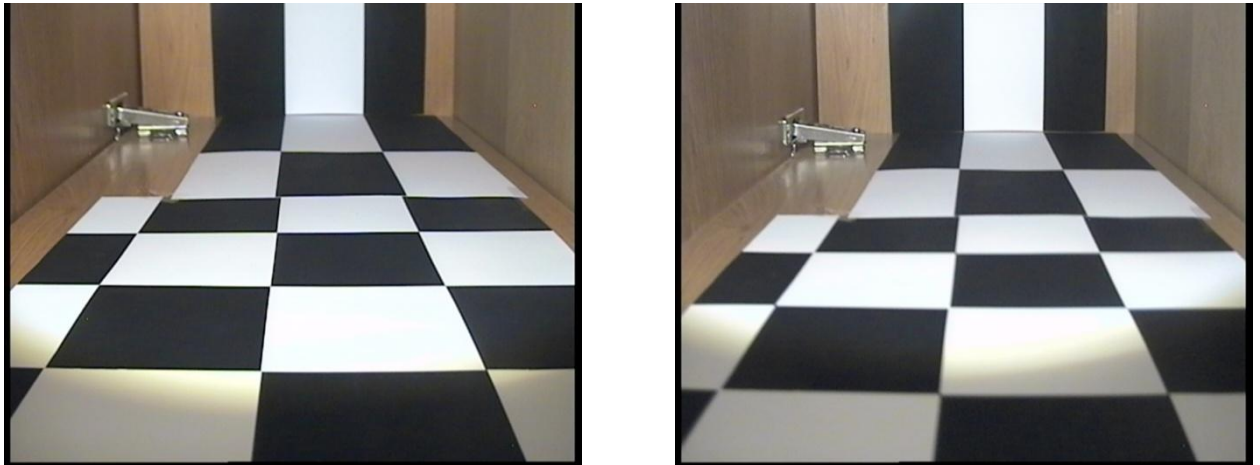
*a**б*

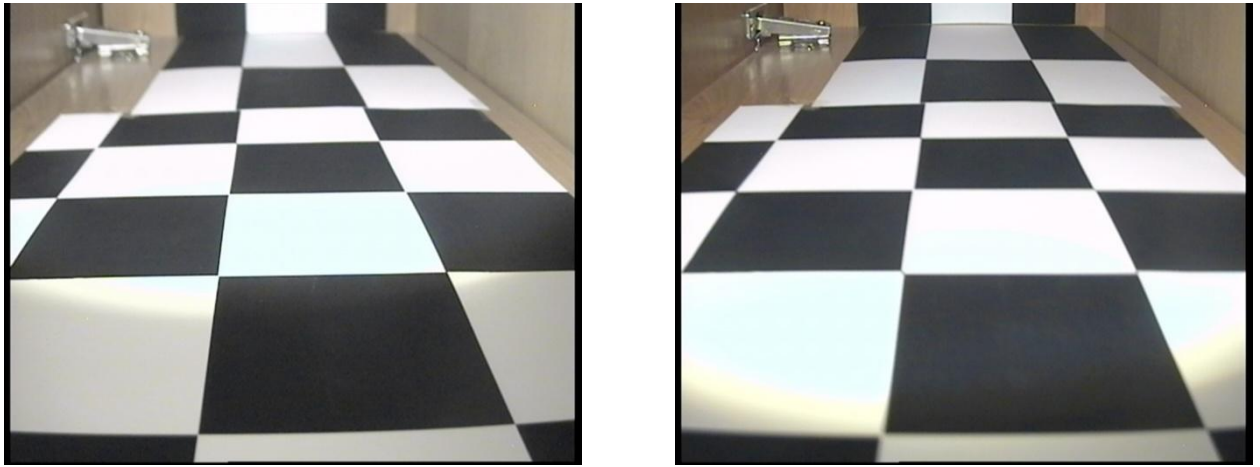
Рисунок 3.18 – Изображение при наклоне в 15°: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

Распределение разрешения на данном этапе исследования представлено в таблице 3.16. Здесь результаты аналогичны принципам распределения описанным для исследования на 10°, но следует отметить что падение разрешения увеличивается поскольку фокус камеры все дальше отклоняется от ближней зоны съемки.

Таблица 3.16 – Распределение разрешения по полю изображения при наклоне системы в 15°

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,112 | 285,44 | 0,177 | 453,12 |
| 2 | 0,126 | 321,28 | 0,138 | 353,28 |
| 3 | 0,157 | 400,64 | 0,120 | 305,92 |
| 4 | 0,165 | 423,25 | 0,094 | 239,79 |
| 5 | 0,176 | 449,71 | 0,083 | 212,48 |
| 6 | 0,172 | 440,32 | 0,057 | 146,77 |
| 7 | 0,115 | 295,25 | 0,050 | 128,85 |

На рисунке 3.19 представлены изображения при наклоне системы на 20 градусов вниз, относительно исходного положения системы.



a

б

Рисунок 3.19 – Изображение при наклоне в 20°: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

Распределение разрешения на данном этапе исследования представлено в таблице 3.17. Из таблицы и визуального осмотра рисунка 3.19,*a* можно заметить, что фокусировка все больше смещалась в ближнюю зону просматриваемой зоны и соответственно дальняя зона все больше теряет свое разрешения из-за непопадания в фокус системы. В эксперименте №2 все так же наблюдается падение разрешения от дальней к ближней зоне, но из-за того что и сама дальняя зона понемногу уходит из фокуса системы, то и она начинает показывать уменьшение разрешения.

Таблица 3.17 – Распределение разрешения по полю изображения при наклоне системы в 20°

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,078 | 198,4 | 0,156 | 399,36 |
| 2 | 0,069 | 176,64 | 0,145 | 369,92 |
| 3 | 0,083 | 211,2 | 0,13 | 332,8 |
| 4 | 0,101 | 259,41 | 0,11 | 281,6 |
| 5 | 0,124 | 317,44 | 0,091 | 232,11 |

Продолжение таблицы 3.17

| | | | | |
|---|-------|--------|-------|--------|
| 6 | 0,169 | 432,64 | 0,089 | 228,96 |
| 7 | 0,139 | 354,56 | 0,081 | 207,36 |

На рисунке 3.20 представлены изображения при наклоне системы на 25 градусов вниз, относительно исходного положения системы.

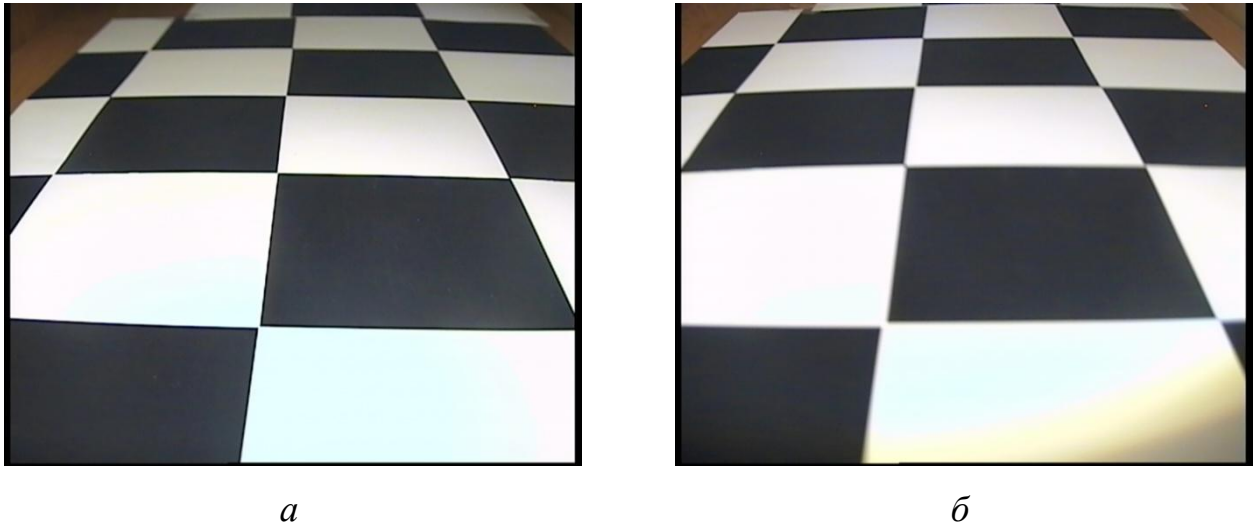


Рисунок 3.20 – Изображение при наклоне в 25°: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

Проводя анализ распределения разрешения на данном этапе исследования представленных в таблице 3.18, можно увидеть что распределение разрешения в экспериментах стало противоположным. Но если провести анализ общего разрешения изображения можно увидеть что во втором эксперименте изображения обладает более низким уровнем разрешения.

Таблица 3.18 – Распределение разрешения по полю изображения при наклоне системы в 25°

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,09 | 230,4 | 0,138 | 352,43 |
| 2 | 0,118 | 302,93 | 0,110 | 282,45 |
| 3 | 0,160 | 408,75 | 0,084 | 214,19 |

Продолжение таблицы 3.18

| | | | | |
|---|-------|--------|-------|--------|
| 4 | 0,173 | 443,73 | 0,064 | 163,84 |
| 5 | 0,161 | 412,16 | 0,056 | 142,08 |

На рисунке 3.21 представлены изображения при наклоне системы на 30 градусов вниз, относительно исходного положения системы.

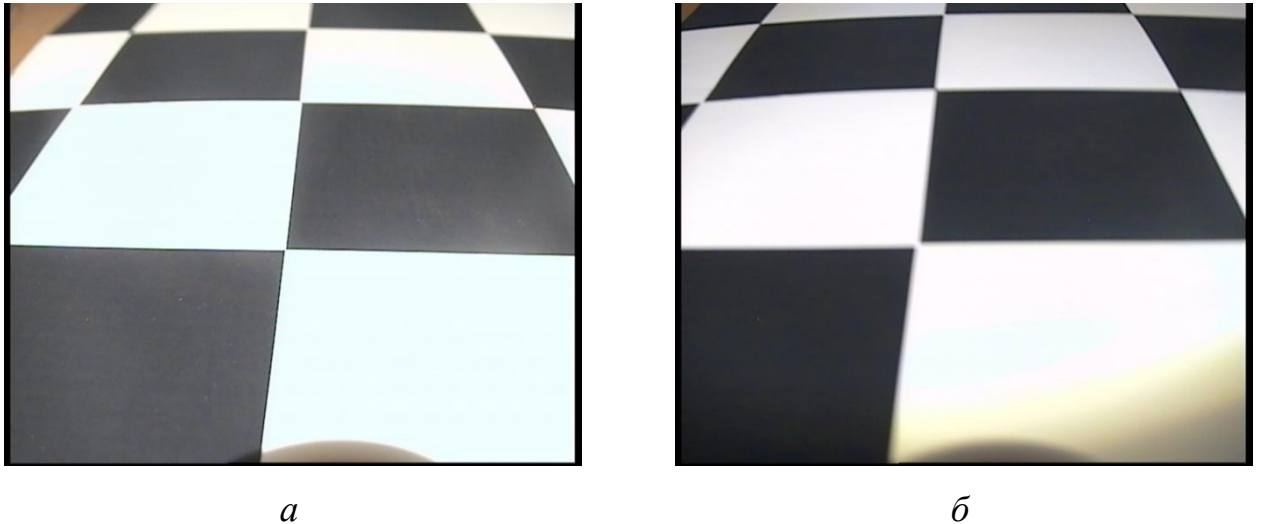


Рисунок 3.21 – Изображение при наклоне в 30°: *a* – эксперимент №1; *б* – эксперимент №2

Распределение разрешения на данном этапе исследования представлено в таблице 3.19. Из анализа полученных результатов можно увидеть полное смещение фокуса системы в ближнюю зону на изображении в первом эксперименте, а во втором наблюдается значительное падение разрешения более чем в 2 раза от дальней к ближней зоне. Так же можно увидеть сильную размытость на большей части изображения на рисунке 3.21.

Таблица 3.19 – Распределение разрешения по полю изображения при наклоне системы в 30°

| Зона на изображении | Эксперимент №1 | | Эксперимент №2 | |
|---------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | MTF50 | ТВЛ | MTF50 | ТВЛ |
| 1 | 0,093 | 238,08 | 0,093 | 238,08 |
| 2 | 0,148 | 378,03 | 0,062 | 159,57 |
| 3 | 0,212 | 542,72 | 0,042 | 107,52 |

3.4 Позонная обработка изображений с использованием оптимальных коэффициентов

Для подтверждения результатов описанных в главе по распределению разрешения по полю изображения проведем эксперимент, в котором произведем обработку тестового изображения (рисунок 3.22) при помощи фильтра ЛУП и ЛДП с подъемом центрального значения апертуры.

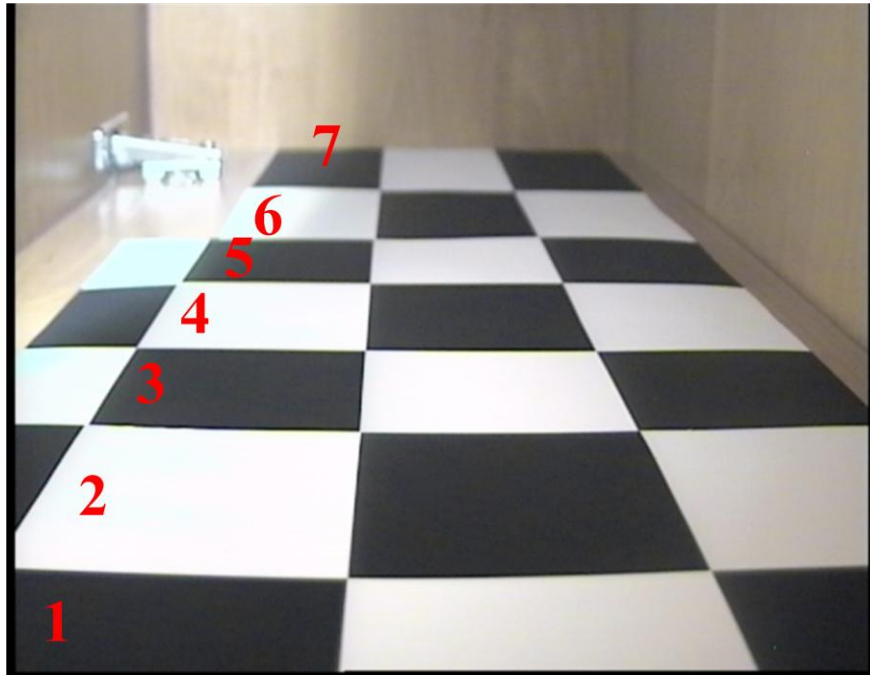


Рисунок 3.22 – Тестовое изображение

В таблице 3.20 представлены результаты измерения разрешения, по полю тестового изображения, представленного на рисунке 2.22. Измерение производилось в зонах пронумерованных на изображении.

Таблица 3.20 – Усредненные результаты измерения разрешения

| Зона обработки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ТВЛ | 160 | 202 | 256 | 345 | 387 | 376 | 200 |

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 выдаваемому системой либо выравнивание поля изображения к максимальному значению разрешения. Результат определения оптимальных коэффициентов и значения разрешения при их использовании представлены в таблице 3.21. Получившиеся изображение после применения метода позонной внутрикадровой обработки представлено на рисунке 3.23.

Таблица 3.21 – Усредненные результаты измерения разрешения

| Зона обработки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|-----|-----|-----|------|------|------|-----|
| Увеличение до предела при помощи фильтра ЛДП | | | | | | | |
| ТВЛ | 347 | 471 | 888 | 1270 | 1234 | 1132 | 524 |
| Коэффициент «А» | 12 | 18 | 14 | 18 | 23 | 25 | 15 |
| Выравнивание при помощи фильтра ЛУП | | | | | | | |
| ТВЛ | 347 | 387 | 381 | 345 | 387 | 376 | 387 |
| Коэффициент «А» | 12 | 25 | 50 | - | - | - | 23 |



Рисунок 3.23 – Тестовое изображение после позонной обработки до предельного разрешения

На рисунке 3.24 представлено выравнивание поля разрешения изображения. Для полученного изображения на рисунке 3.25 представлен сводный график КЧХ для каждой зоны обработки.



Рисунок 3.24 – Тестовое изображение после позонной обработки с выравниванием разрешения

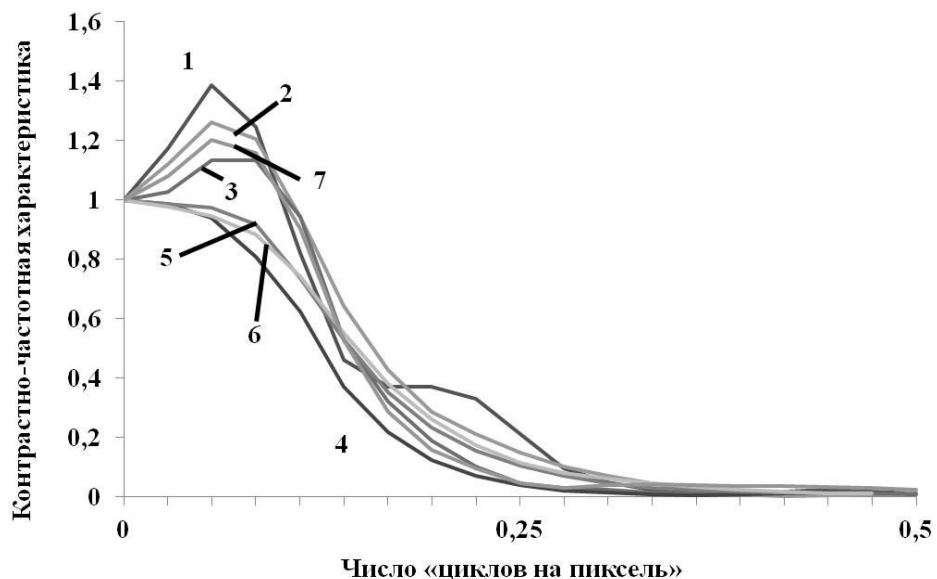


Рисунок 3.25 – Графики КЧХ изображений после позонной внутрикадровой обработки: 1 – зона обработки один; 2 – зона обработки два; 3 – зона обработки три; 4 – зона обработки четыре; 5 – зона обработки пять; 6 – зона обработки шесть; 7 – зона обработки семь

3.5 Основные результаты главы

1. Приведено описание распределения разрешения по полю изображения. Выделены основные зоны на изображении с различным уровнем разрешения.

2. Приведено экспериментальное подтверждение утверждений о распределении разрешения описанных в разделе 3.1. Были проведены экспериментальные исследования оценки распределения разрешения по полю изображения.

3. Проводен анализ результатов изображения отснятого при положении камеры к изображению в 90° («надир»), что является условием того, что уровень расфокусировки по полю изображения минимален и большая его часть четко передается камерой, а уровень координатных искажений вносимых углом съемки минимален, но возникают небольшие искажения вносимые оптической системой камеры. Данные эффекты наглядно продемонстрированы на рисунке 3.7, где видно изменение разрешения от центра к краю изображения. Анализируя данные полученные для изображений отснятых под различными углами -45° , 45° , -60° и 60° , можно сделать вывод о том, что не имеет особого значения в какую сторону «поворачивать» изображение относительно центральной оси, поскольку графики 3.9 и 4.10 подтверждают схожесть распределения разрешения по полю изображения. Для случая -45° и 45° из усредненного графика разрешений видно, что во второй зоне измерений максимальное значение разрешения, поскольку он ближе всего расположен к фокусу и объектива. В остальной области наблюдается ухудшение значений разрешения, связанное с тем фактом, что данные области отдаляются от оптического фокуса объектива. В случае -60° и 60° из графика усредненных значений разрешения видно, что передний край изображения ближе всего находится к оптическому фокусу объектива и от него идет постепенное ухудшение изображения и соответственно уменьшение значений разрешения.

4. Проведен эксперимент на стенде имитации системы видеонаблюдения. В нем исследовалась зависимость изменения разрешения от смены диафрагмального числа F , а так же изменения угла наблюдения камеры для 90° , 60° и 45° . Для обработки экспериментальных данных проводился анализ результатов для каждого значения диафрагмального числа, при всех углах наблюдения:

- для $F = 2,8$ при угле 90° и 60° наблюдается плавный рост разрешения от “левого” края изображения к “правому”, а при угле в 45° возникают все большие координатные искажения и изображение уходит из фокуса оптической системы и распределение разрешения по полю изображения становится более равномерным;

- для $F = 4$ при всех углах обзора наблюдается области с высоким разрешением от которой идет спад к обоим краям изображения, так же можно отметить, что при угле в 60° распределение разрешения является более равномерным по сравнению с углами в 90° и 45° и вследствие чего, отсутствуют явные скачки разрешения;

- для $F = 6$ при угле в 90° наблюдается резкое изменение разрешения от левого края к правому с 357 ТВЛ до 621ТВЛ, связанное с неравномерностью освещения зоны наблюдения. При угле обзора 60° наблюдается ярко выраженная зона максимального разрешения в 690ТВЛ и снижение уровня разрешения в обе стороны от нее (при угле в 45° наблюдается равномерное распределение разрешения без резких “скачков”).

- для $F = 8$ при всех углах обзора можно выделить область с максимальным разрешением и наблюдать его спад в обе стороны изображения.

- для $F = 11$ при всех углах обзора можно выделить область с максимальным разрешением и наблюдать его спад в обе стороны изображения, в зависимости от угла наблюдения меняется лишь область максимального разрешения. Если рассматривать случай 90° , то она

находится в зоне измерений №4, далее при угле в 60° она смещается в менее освещенную область измерений на один столбец измерений, а для 45° резко перемещается в более освещенную зону во 2 зоне измерений.

Полученные серии изображений при различных условиях съемки способствуют формированию базы изображений имитирующих различные ситуации в реальных ТИС, что необходимо для дальнейших исследований в данной области.

5. Приведены результаты по оценке влияния изменений, вносимых отклонением системы видеофиксации от исходного положения, когда по углу наклона к поверхности формируемого изображения. Данные результаты показывают, что оценив изображение сформированное системой можно на основании данных результатов понять, имеется ли отклонение от исходного положения системы.

6. Приведены примеры обработки с применением методики позонной обработки изображений, показывающие ее эффективность при обработке изображений, как при увеличении разрешения до предельного значения, так и при выравнивании разрешения по полю изображения.

7. Определены значения оптимальных коэффициентов фильтрации для обработки изображения по полю распределения его разрешения, что демонстрирует тот факт, что при известных характеристиках изображения, можно повысить качество его обработки за счет использования адаптивной внутрикадровой по зонной обработки.

4. ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ВНУТРИКАДРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Разработанный метод множественного измерения разрешения по полю изображения и последующей его обработкой предполагает разработку двух программных модулей: измеритель разрешения по полю изображения и повышения разрешения с использованием адаптивной внутрикадровой фильтрации. Этап измерения разрешения решает задачу оценки качества исходного изображения и позволяет определить области с низким уровнем разрешения, а также определить оптимальные коэффициенты фильтрации изображения, которые позволяют повысить его качество до заданного уровня. Задачей второго этапа является обработка исходного изображения алгоритмами адаптивной внутрикадровой фильтрации с целью максимально повысить его качество, при этом, не внести артефакты обработки, поскольку часто при использовании неоптимальных коэффициентов фильтров могут возникнуть дополнительные искажения (оконтуриванием, выделение шумов, инверсия и т.д.) которые ухудшают качество обработанных изображений.

Для обеспечения вышеуказанных этапов автором было разработано следующие программные модули, на которые были получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [103,104]:

- “MIR: Множественное измерение разрешения”, позволяет проводить измерение разрешения в нескольких областях сразу (9 областей измерения);
- “SFI: Построчная фильтрация изображений”, при помощи данной программы можно проводить построчную фильтрацию изображений задавая до 10 зон обработки.

Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, представлены в приложении А.

4.1 MIR: Множественное измерение разрешения

Данное программное обеспечение позволяет пользователю производить измерение разрешения по полю изображения. Измерение разрешения производится не в одной области изображения, а сразу в нескольких областях (до 9 областей).

На рисунке 4.1 приведена диаграмма вариантов использования разработанного приложения.

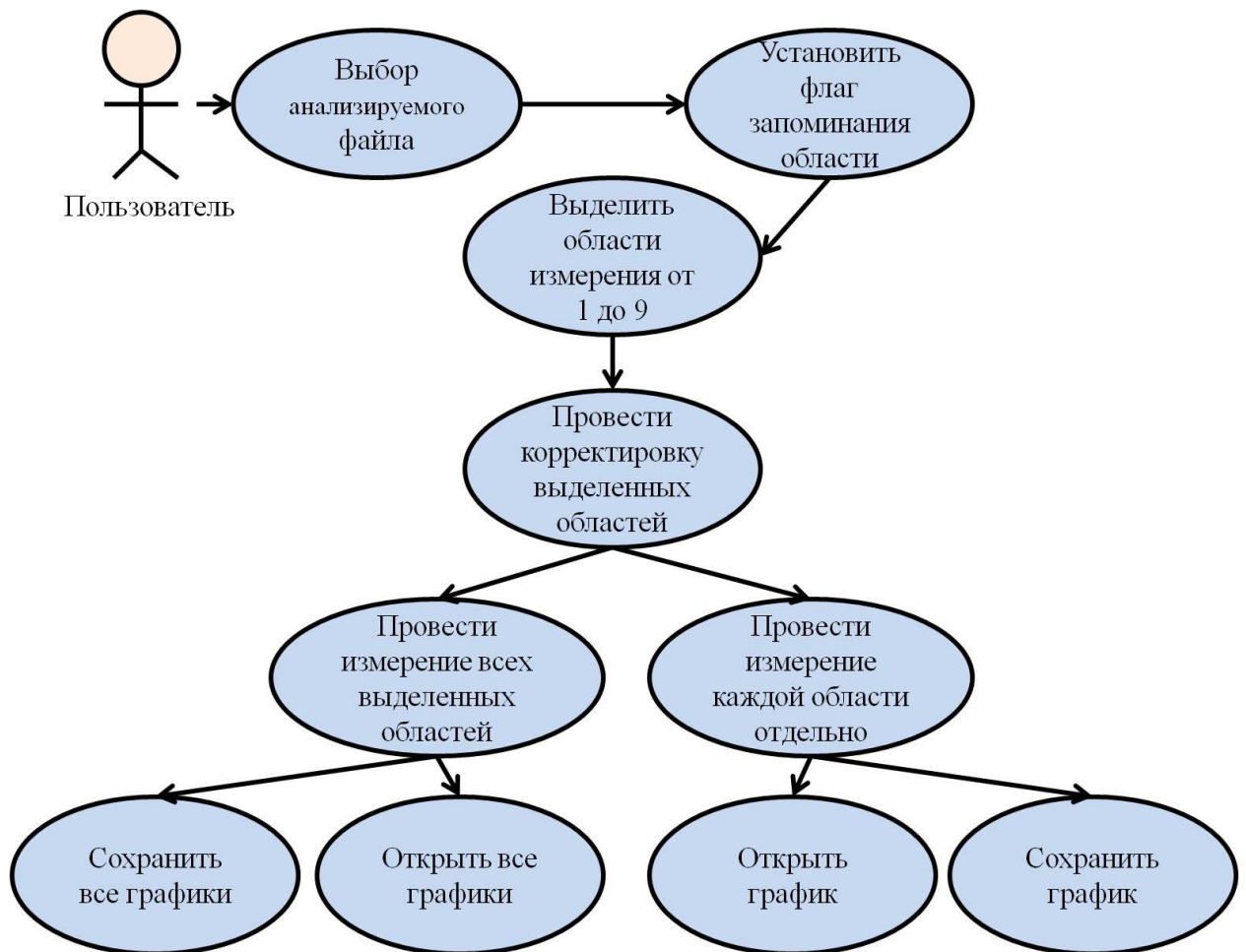


Рисунок 4.1 – Диаграмма вариантов использования программы MIR для измерения разрешения по полю изображения

Рассмотрим интерфейс программного обеспечения, представленный на рисунке 4.2.

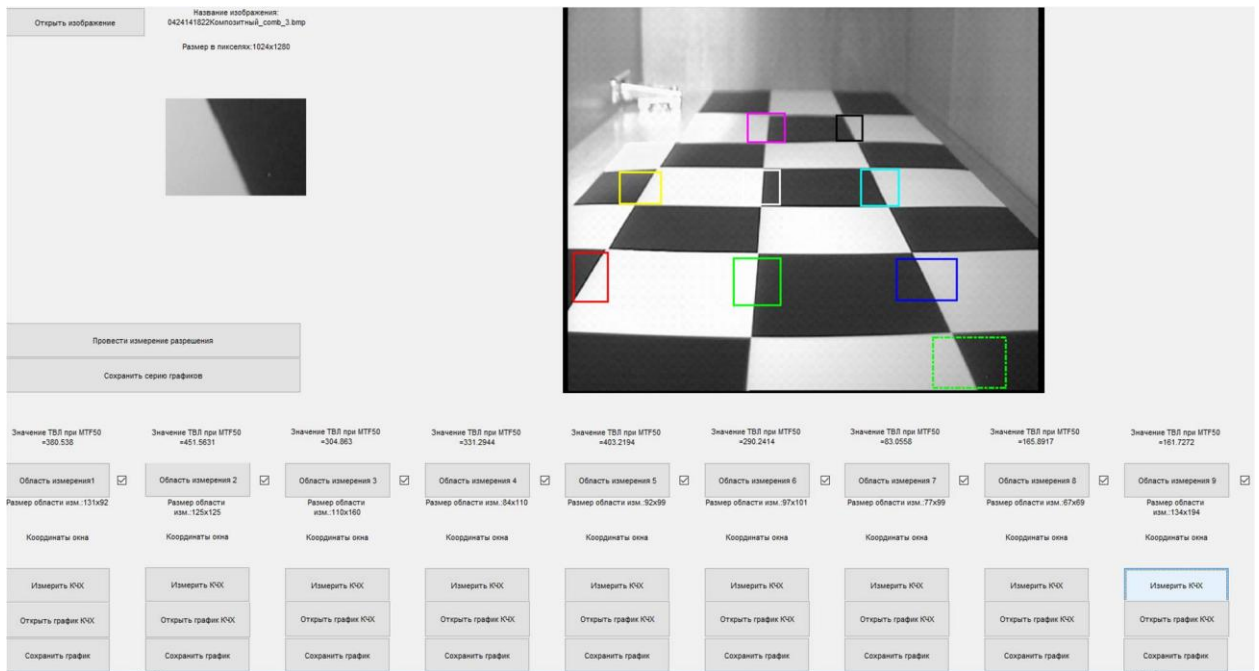


Рисунок 4.2 – Интерфейс программного обеспечения “MIR: Множественное измерение разрешения”

Пользователь открывает исследуемое изображение, которое выводится в окне в правой части рабочей зоны программного обеспечения. Вывод информации об исходном изображении осуществляется в левом верхнем углу, там мы можем увидеть имя исходного файла и его размер в пикселях. Следующим шагом для пользователя является задача, решить потребуется ли данные выделенные зоны измерения для последующего исследования и если, да то необходимо установить “флажок”, который обозначает запоминание параметров зоны измерения. Далее пользователь переходит к очередному заданию областей перепада “темного” и “светлого”, где будет происходить измерение разрешения по полю изображения, при этом осуществляется вывод информации о размере выделенной области. После выделения областей, пользователь получает возможность скорректировать размер выделенных областей, за счет изменения их координат. Определив все зоны измерения, производится непосредственно процедура измерения разрешения по полю изображения двумя способами либо все области сразу, либо по отдельности в каждой области. На конечном этапе измерения осуществляется вывод значения разрешения на уровне МТФ50. В финале работы с

программным обеспечением MIR пользователь может открыть графики (рисунок 4.3) и сохранить полученные результаты.

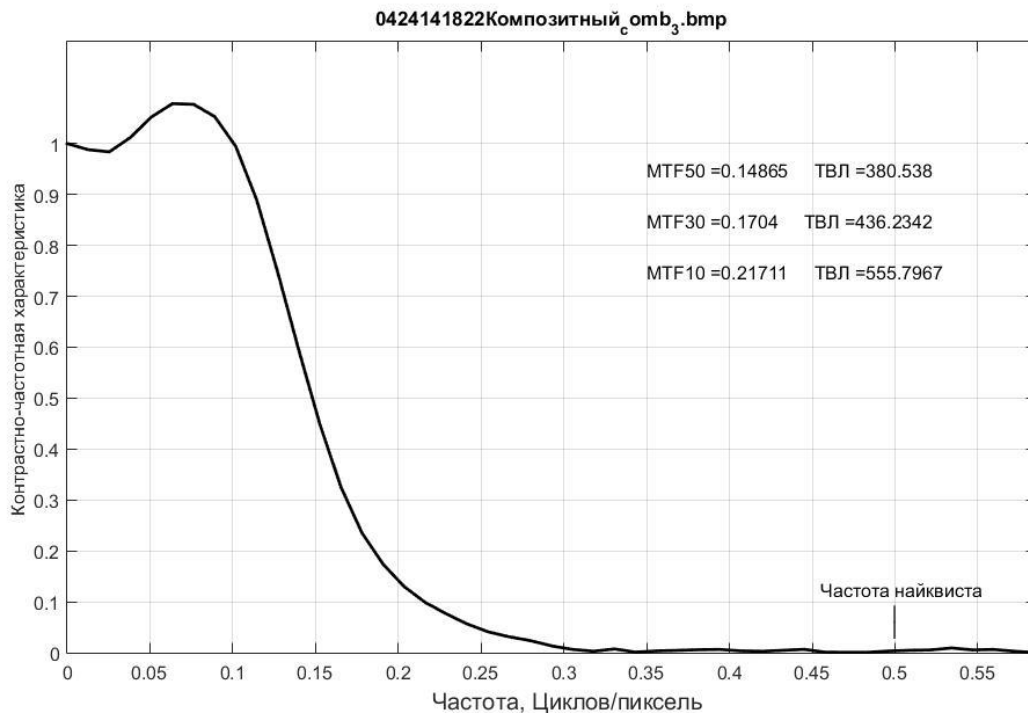


Рисунок 4.3 – Пример графика, получаемого в программном обеспечении MIR

На данном графике отображается зависимости контрастно-частотной характеристики и частоты в циклах на пиксель, так же выводится информация о трех значениях разрешения на уровнях 0,1, 0,3 и 0,5. Одновременно с выводом значения МТФ выводится уже рассчитанное значение разрешения в телевизионных линиях.

4.2 SFI: Построчная фильтрация изображений

Для использования рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений был создан специальный программный модуль “SFI: Построчная фильтрация изображений”, который при помощи данной программы можно проводить построчную фильтрацию изображений задавая до 10 зон обработки.

Варианты использования программного обеспечения представлены на рисунке 4.4.

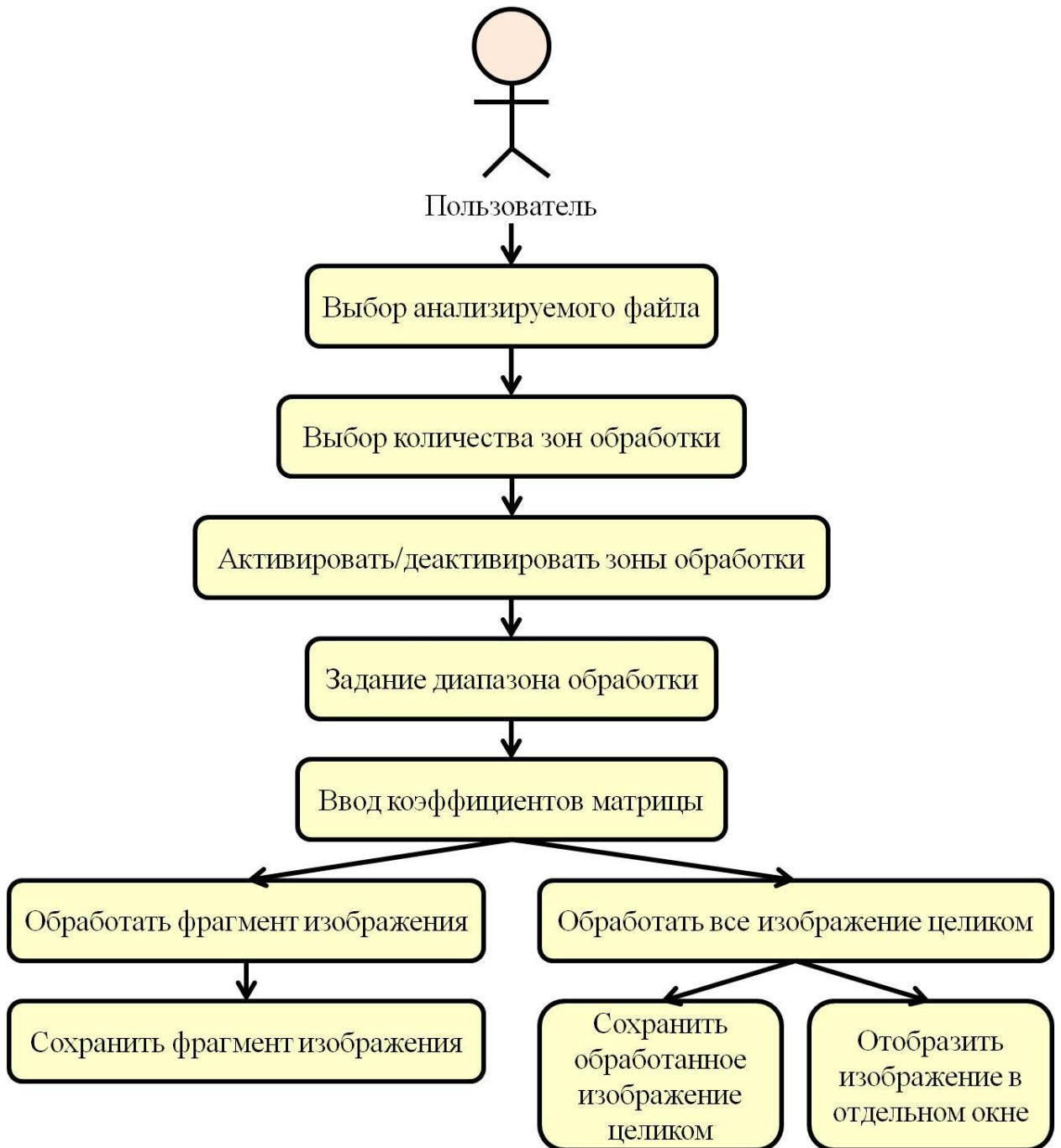


Рисунок 4.4 – Диаграмма вариантов использования программного обеспечения SFI для обработки изображений

Интерфейс разработанного программного обеспечения SFI представлен на рисунке 4.5.

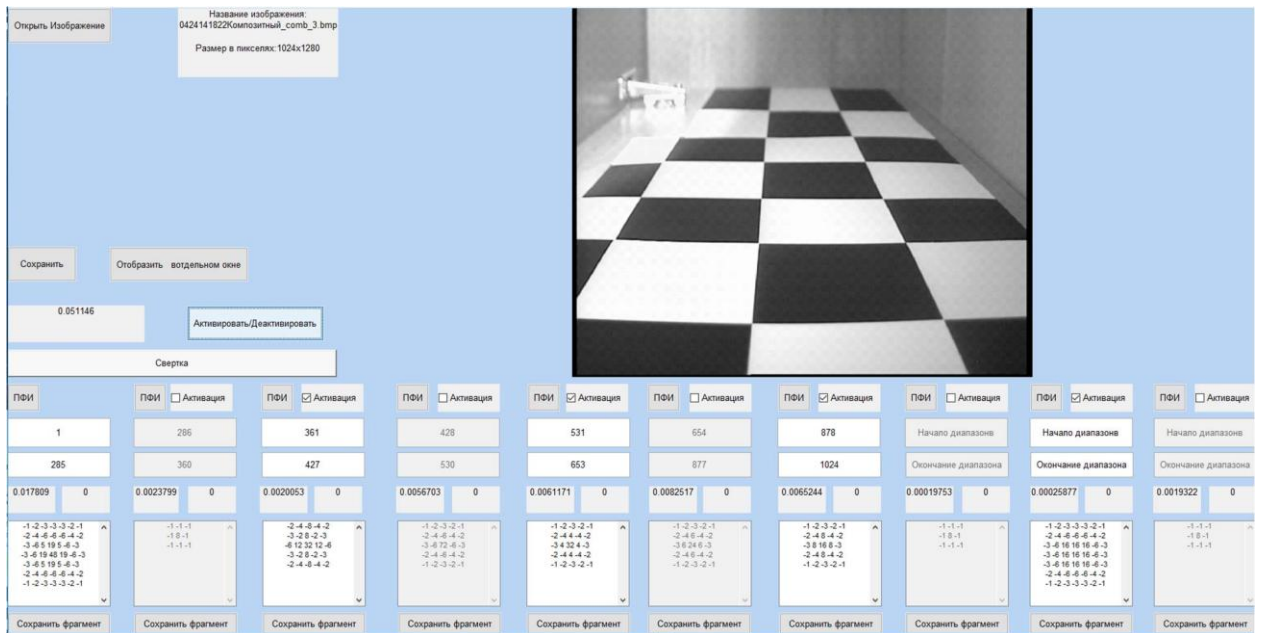


Рисунок 4.5 – Интерфейс программного обеспечения “SFI: Построчная фильтрация изображений”

Запуская данное программное обеспечение, пользователю требуется выбрать файл, который необходимо обработать. Выбранный файл отображается в верхнем правом углу, а информация о выбранном файле отображается в левой верхней части основного окна программного обеспечения. Следующим шагом для пользователя является выбор необходимого числа зон обработки на изображении в диапазоне от 1 до 10 зон, при помощи установки символа активации и нажатия специальной кнопки “Активировать/деактивировать”. После чего требуется задать зоны обработки по горизонтальным линиям, при этом необязательно указывать все линии на изображении, а можно выбрать только необходимый участок на изображении. На следующем этапе необходимо задать маску фильтра, либо можно использовать уже заданные параметры в диалоговом окне программы, так же пользователю выдается информация о сумме коэффициентов “маски”. Далее пользователю необходимо провести обработку всего изображения, либо если того требует задача, то только определенной зоны на изображении. После выполнения процедуры обработки изображения пользователю выдается информация о времени затраченном на обработку каждой зоны

отдельно и общее время, затраченное на фильтрацию. Пользователь может отобразить обработанное изображение в отдельном окне в увеличенном размере для более точной визуальной оценки выполненной работы. В конце работы с программным обеспечением SFI от пользователя требуется сохранить обработанное изображение целиком, либо определенный фрагмент изображения.

На рисунке 4.6 приведен пример изображения полученного с использованием программного обеспечения “SFI: Построчная фильтрация изображений”.

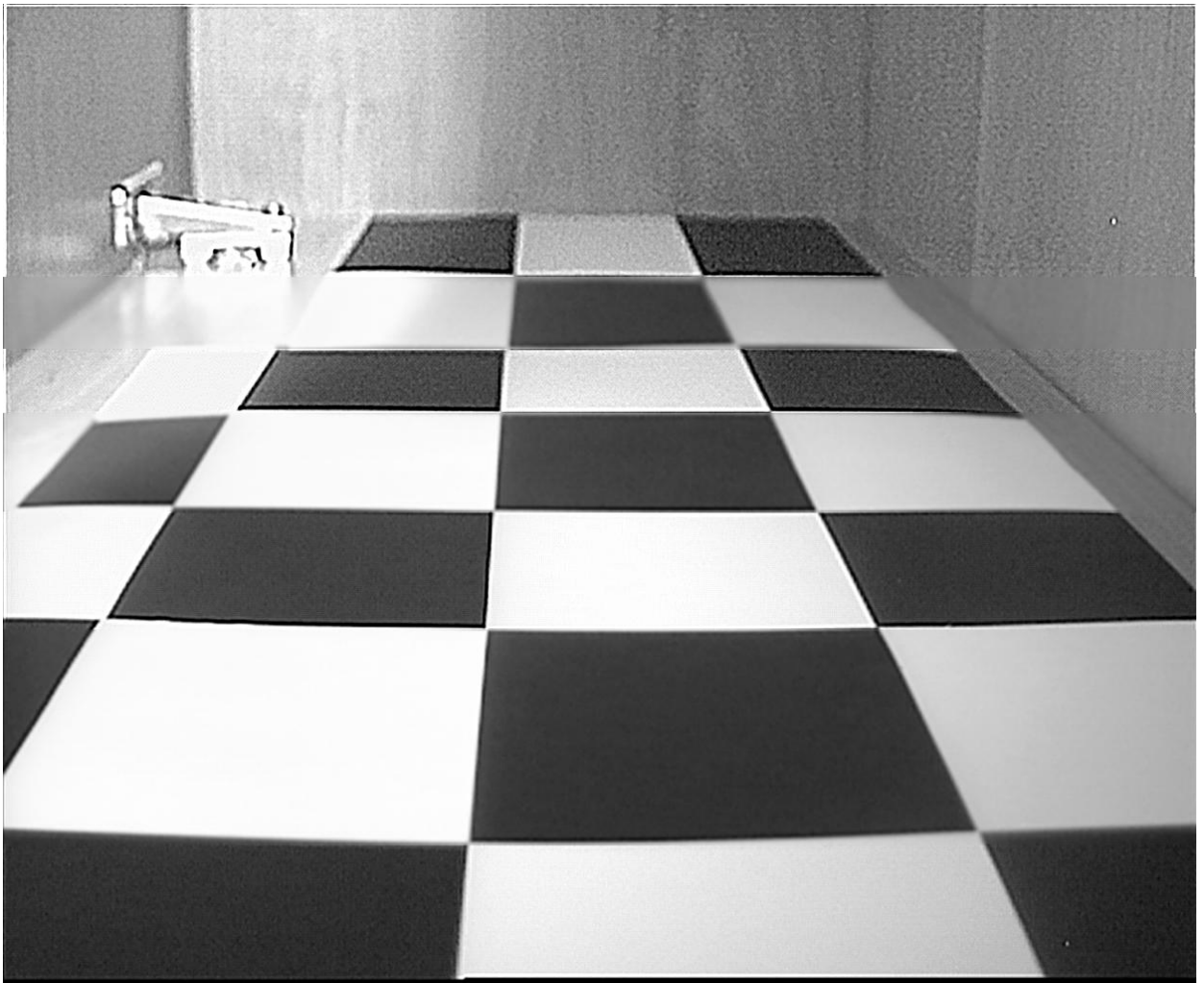


Рисунок 4.6 – Пример изображения полученного в ПО “SFI: Построчная фильтрация изображений”

4.3 Основные результаты главы

В главе 4 приводится описание программных модулей реализующих метод адаптивной внутрикадровой позонной обработки изображений, для решения задач поставленных в ходе работы с целью выполнения экспериментального исследования. Данные программные модули использовались при выполнении экспериментальных исследований в главах 2 и 3. Приведены диаграммы описывающие варианты использования разработанных программных модулей, на которые получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

В разделе 4.1 данной главы приводится описание методики работы с программными модулями “MIR: Множественное измерение разрешения”. Раздел 4.2 посвящен описанию возможностей и функционала использования программного модулей “SFI: Построчная фильтрация изображений”.

5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Научно-исследовательские работы

Данный раздел посвящен краткому описанию использования результатов работы в НИР (акты использования результатов диссертационной работы приведены в приложении А).

5.1.1 Государственное задание «Наука 2012-2014гг.» №7.1241.2011

Проведено экспериментальное исследование итерационных алгоритмов повышения качества изображений в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах.

5.1.2 Государственное задание №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.

5.1.3 Проект РФФИ номер 16-47-700939

Проведено исследование методов и алгоритмов измерения и коррекции координатных искажений в телевизионных изображениях.

5.1.4 Государственное задание № 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.

5.1.5 Научно-исследовательская работа 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.

5.2 Учебный процесс ТУСУРа

По результатам, полученным диссертантом во время исследований были разработаны лабораторные работы по дисциплинам “Измерительное телевидение”, “Видеоинформационные технологии”, “Системы технического зрения” и “Зрение роботов”. Данные лабораторные работы используются для подготовки студентов ТУСУР. Данные результаты были апробированы на международных научно-методических конференциях «Современное образование» [105-109] в которых автором были получены результаты формирования структуры работ и основных пунктов описанных лабораторных практикумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БПФ – быстрое преобразование Фурье.

ТВЛ – телевизионная линия.

ПЗС – прибор с зарядной связью.

ТИС – телевизионно-измерительная система.

АИ ТИС – активно-импульсная телевизионно-измерительная система

ОП – оптический прибор.

ПО – программное обеспечение.

MTF – modulation transfer function (функция передачи модуляции).

КЧХ – контрастно-частотная характеристика.

ЛЦФ – линейный цифровой фильтр.

БИХ – бесконечная импульсная характеристика.

КИХ – конечная импульсная характеристика.

ЛУП – лапласиан двойная пирамида.

ЛДП – лапласиан усеченная пирамида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанцев, Г.Д. Измерительное телевидение: Учеб. пособие для вузов / Г.Д. Казанцев, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский. – К 14 М.: Высш. шк., 1994. – 288 с.
2. Телевидение / Под ред. В.Е. Джакони. – М.: Радио и связь, 1986. – 456с.
3. Горелик, С.Л. Телевизионные измерительные системы / С.Л. Горелик, Б.М. Кац, В.И. Киврин. – М.: Связь, 1980. – 168 с.
4. Мищенко, Н.И. Методы и средства повышения технических характеристик активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем наблюдения / Н.И. Мищенко, И.Н. Пустынский // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 3 (35). – С. 47–52.
5. Фисенко, В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
6. Душков, Б.А. Энциклопедический словарь: Психология труда, управления, инженерная психология и эргономика / Б.А. Душков, А.В. Королев, Б.А. Смирнов. // «Академический проект, Деловая книга», 2005. – 848 с.
7. Дамьяновски, В. CCTV. Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии.// Пер. с англ.-М.: ООО «Ай-Эс-Эс Пресс», 2006, – 480с.
8. Злобин, В.К. Обработка аэрокосмических изображений / В.К. Злобин, В.В. Еремеев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 288 с.
9. Каменский, А.В. 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.

10. Белов, В. В. и др. Активные ТВ-системы видения с селекцией фонов рассеяния // Датчики и системы. – 2012. – №. 3. – С. 25.

11. Гейхман, И.Л. Основы улучшения видимости в сложных условиях / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 286с.

12. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, В. Вудс. – Москва; техносфера, 2005. – 1072с

13. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косык, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168с.

14. Курячий, М.И. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов / М.И. Курячий. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009. – 190 с.

15. Титов, В.С. Направления развития методов, алгоритмов и аппаратных средств повышения качества изображений опико-электронных систем / В.С. Титов, М.И. Труфанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. Санкт-Петербург. 2013 г., Т.–56, №6. С. 7–10.

16. Гольденберг, Л.М. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.

17. Красильников, Н.И., Цифровая обработка 2D- и 3D- изображений: учеб. пособие / Н.И. Красильников. – СПб.: БХВ-Петербург. 2011. – 608с.

18. Кашкина, Л.В. Изучение физических свойств фуллеренов и фуллерено-содержащих саж. Цифровая обработка изображений: Методические указания к специальному практикуму по курсу “Прикладное материаловедение”/ Л.В. Кашкина, В.Б. Кашкин, Т.В. Рублева, О.А. Шikuнова. – Красноярск: Красноярский научно-образовательный центр

высоких технологий. Сибирская аэрокосмическая академия имени академика М.Ф. Решетнева, 1999.

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

20. Конюхов, А.Л. Двумерная апертурная коррекция в разреженных масках для повышения качества изображения / Конюхов А.Л., Костевич А.Г.// Научная сессия ТУСУР–2013: матер. Всерос. техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–16 мая 2013 г.: в 5 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2013. – С. 119–122.

21. Каменский, А.В. 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.

22. Malanin, M.Yu. 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.

23. Рекурсивные цифровые фильтры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.bmstu.wiki/Рекурсивные_цифровые_фильтры, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

24. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. / У. Прэтт. – М.:, 1982. – Кн.1 – 312 с.

25. Давыдов, А.В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции. / А.В. Давыдов. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, ГИН, Фонд электронных документов, 2005 г., – 185с

26. Балусов, И.Л. Исследование двумерных рекурсивных цифровых фильтров второго порядка: дис. канд. тех. наук: 05.12.04 / Балусов Игорь Леонидович. – Ярославль, 2009. – 171 с.

27. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 849 с.

28. Фильтр с бесконечной импульсной характеристикой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/181332#Фильтр%20с%20бесконечной%20импульсной%20характеристикой> (дата обращения: 25.06.19).

29. Мясников, В.В. О рекурсивном вычислении свертки изображения и двумерного неразделимого КИХ-фильтра / В.В. Мясников // Компьютерная оптика, 2005. –С. 117–122.

30. Никитин, Д.А. Рекурсивные цифровые фильтры с импульсной характеристикой, описываемой синусоидальной функцией, и свойства их коэффициентов / Д.А. Никитин // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013 Вып. 2. Ч.1. С. 161–171.

31. Сергеев, В.В. Одномерные параллельно-рекурсивные КИХ-фильтры / В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. 1992, С.186–201.

32. Солонина, А. Моделирование цифровой обработки сигналов ЦОС в Matlab. Часть 3. Описание структур КИХ- и БИХ-фильтров в Matlab / А. Солонина // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. №1. 2009. С. 108–113.

33. Глумов, Н.И. Применение полиномиальных базисов для обработки изображений в скользящем окне / Н.И. Глумов, Мясников В.В., Сергеев В.В.// Компьютерная оптика. Выпуск 14-15, – 1995 год, С. 55–68.

34. Honarvar, B. The fast recursive computation of Tchebichef moment and its inverse transform based on Z-transform / B. Honarvar, R. Paramesran, C. Lim // Digital Signal Processing. Volume 23, Issue 5, September 2013, P. 1738-1746.

35. Филимонов, В.А. Цифровой рекурсивный фильтр, согласованный со сложным сигналом / В.А. Филимонов // Информация и космос. №1, – 2016, С. 54-61.

36. Турулин, И.И. Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров / И.И. Турулин // Издательство Южного федерального университета. 2016 г., С. 263.

37. Губин, А.Н. Особенности совместного использования цифровых рекурсивных и нерекурсивных фильтров / А.Н. Губин, В.Л. Литвинов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, 2015. –С. 479–482.

38. Губин, А.Н. Выбор параметров при разработке рекурсивных цифровых сглаживающих фильтров / А.Н. Губин, В.Л. Литвинов, Ф.В.Филиппов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, 2018. –С. 258–262.

39. Palenichka, R.M. Fast local image processing algorithms using recursive computation / R.M. Palenichka, A. Yu. Lutsyk // Cybernetics and Systems Analysis. January 1994, Volume 30, Issue1, P. 121–130.

40. Величкин, В.А. Синтез квазиоптимального рекурсивного фильтра телевизионных сигналов / В.А. Величкин, В.А. Завьялов, В.П. Бережной, А.М.Мугаттырова // Научное обозрение, 2015. – С. 177–181.

41. Nehad, D. GPU-Efficient Recursive Filtering and Summed-Area Tables / D. Nehad, A. Maximo, R. S. Lima, H Hoppe // Proceeding of the 2011 SIGGRAPH Asia Conference/ Hong Kong, China – December 12–15, 2011.

42. Солони́на, А.И. Оценки собственного шума структур рекурсивных цифровых фильтров и их вычисление в Matlab / А.И.Солони́на // Цифровая обработка сигналов, №2/2015. –С. 39–45.

43. Ehsan, S. Integral Images: Efficient Algorithms for Their Computation and Storage in Resource-Constrained Embedded Vision Systems / S. Ehsan, A. F. Clark, N. ur Rehman, K. D. McDonald-Maier // Sensors 2015, 15, 16804–16830.

44. Ali, R.A. Recursive non-local means filter for video denoising / R.A. Ali, R.C. Hardie // EURASIP Journal on Image and Video Processing (2017) 2017:29.

45. Almahdi, R.A. Recursive non-local means filter for video denoising with Poisson-Gaussian noise / R.A. Almahdi, R.C. Hardie // 2016 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON) and Ohio Innovation Summit (OIS), Dayton, OH, USA, 25-29 July 2016, P. 318–322.

46. Зиятдинов, С.И. Синтез комплексных рекурсивных цифровых фильтров / С.И. Зиятдинов, Ю.В.Соколова // Научная сессия ГУАП, 2018. С. 333–335.

47. Maheswaran, S. A Real Time Image Processing Based System to Scaring the Birds from the Agricultural Field / S. Maheswaran, M. Ramya, P. Priyadharshini, P. Sivaranjani // Indian Journal of Science and Technology, August 2016, Volume 9, Issue 30, P.5.

48. Anderson, B.D., Jury E. I., Stability Test for Two-Dimensional Recursive Filters, IEEE Trans. Audio and Electroacoustics, AU-21, 4, 366–372 (August 1973).

49. Егорова, М.А. Исследование рекурсивной и сепарабельной реализации фильтра нелокального усреднения / М.А. Егорова, В.Е.Литвинов // Цифровая обработка сигналов и ее применение. С. 427–429.

50. Коваль, Ю.А. Метод предварительной фильтрации изображений для повышения точности распознавания образов / Ю.А. Коваль, М.В. Филиппов // Инженерный журнал: Наука и инновации, 2014, № 12(36), С. 12.

51. Крапчатова, Т.В. Анализ эффективности алгоритмов билатеральной фильтрации / Т.В. Крапчатова, М.В. Филиппов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, Февраль 2012. – № 2, С. 10.

52. Филиппов, М.В. Быстрый метод билатеральной фильтрации изображений / М.В. Филиппов, О.С. Ермилова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах, 2017 .– № 20 .– С. 29 – 36.

53. Беляева, О.В. Быстрая билатеральная фильтрация аэрофотоснимков на основе параллельной декомпозиции на пространственные фильтры / О.В. Беляева, О.Б. Пащенко, М.В. Филиппов // Машиностроение и компьютерные технологии, 2017 .- № 12, С. 45–56.

54. Рудникович, А.С. Сепарабельная билатеральная фильтрация в задачах предобработки видеоданных / А.С. Рудникович // Научная сессия ТУСУР–2010: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 4–7 мая 2010 г. – Томск: В-Спектр, 2010. Ч. 1., С. 169–172.

55. Ефремова, Т.Ф. Новый словарь русского языка. Толково-словообразовательный / Т.Ф. Ефремова. – М.: Русский язык, 2000.

56. Huang, T.S. Two-Dimensional Digital Signal Processing I: Linear Filters, Topics in Applied Physics, Vol. 42, 1981, P. 210.

57. Huang, T.S. Picture Processing and Digital Filtering. 2nd ed., 1979

58. Хуанг, Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г.Дж. Нуссбаумер и др.; Под ред. Т.С. Хуанга: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 224с.

59. Захожай, О.И. Высокоскоростная обработка изображений с применением цифровых фильтров на базе FPGA / О. И. Захожай, А. Н. Солошенко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - 2013. - Вып. 39. – С. 250–254.

60. Альтман, Е.А. Применение метода разложения двумерной свертки при реализации цифровых фильтров / Е.А. Альтман, Е.И. Захаренко, Т.В. Васеева // Научный вестник НГТУ, том 69, №4, 2017, С. 95–104.

61. Чобану, М. Цифровая обработка многомерных сигналов: предпосылки прорыва / М. Чобану, М.Волков // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. Микропроцессорная и вычислительная техника, №3, 2007, – 126с., С. 64–74.

62. Sugimoto, K. Fast Gaussian filter with second-order shift property of DCT-5 / K. Sugimoto, S. Kamata // Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP), Sept. 2013. P. 514–518.

63. Chaurasia, G. Compiling High Performance Recursive Filters / G. Chaurasia, J. Ragan-Kelley, S. Paris, G. Drettakis, F. Durand // HPG '15 Proceedings of the 7th Conference on High-Performance Graphics, Los Angeles, California – August 07-09. 2015. P. 85–94.

64. Attanasi, A. GReTA – a novel Global and Recursive Tracking Algorithm in three dimensions / A. Attanasi, A. Cavagna, L. D. Castello, I. Giardina, A. Jelic, S. Melillo, L. Parisi, F. Pellacini, E. Shen, E. Silvestri, M. Viale // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 37, Issue: 12, Dec. 2015, P. 2451–2463.

65. Цифровой шум изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.photomanual.ru/articles/noise/>, свободный (дата обращения: 14.05.2019г.)

66. Петропавловский, В.А. Телевизионные передающие камеры / В.А. Петропавловский, Л.Н. Постникова, А.Я. Хесин, А.Л. Штеймберг.– М.: Радио и связь, 1998. – 304 с.

67. ISO 122232;1998 Photography-Electronic still-picture cameras-Determination of ISO. – 1998–08.

68. Цифровой шум. Цифровой шум – что это такое? Способы борьбы с цифровым шумом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lepser.ru/teoriya-fotografii/tsifrovoy-shum-chto-eto-takoe-sposobyi-borbyi-s-tsifrovym-shumom.html>, свободный (дата обращения: 14.05.2019г.)

69. Каменский, А.В. 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.

70. Митрофанов, С.С. Оптические измерительные приборы и устройства: Учебное пособие / С.С. Митрофанов. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 34 с.

71. Иофис, Е.А. Фотокинетика/ Е.А. Иофис, И.Ю. Шебалин. – «Советская энциклопедия», 1981. – 447с.

72. Гордийчук, О.Ф. Раздел III. Киносъёмочные объективы. Справочник кинооператора / О.Ф. Гордийчук, В.Г. Пелль, Н.Н. Жердецкая – М.: «Искусство», 1979. – 440с.

73. Волосов, Д.С. Фотографическая оптика / Д.С. Волосов. – 2-е изд.– М.: «Искусство», 1978. – С.31. – 543с.

74. ГОСТ 7427-76. Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения.

75. Льюэлли, М. История физики / М. Льюэлли — М.: «Мир», 1970. — С. 43. — 464 с.

76. Вознесенская, А.О. Основы оптики. Конспект лекций / А.О. Вознесенская, Н.Б. Вознесенский, Т.В. Иванова; под ред А. А. Шехонина. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. — С. 65—70. — 162 с.

77. Фомин, А.В. Общий курс фотографии: Учеб. Для техникумов / А.В. Фомин. – 3-е изд., перераб. и до. – М.: Легпромбыт, 1987. – 256с.

78. Слюсарев, Г.Г. Методы расчета оптических систем. / Г.Г. Слюсарев. Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.

79. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. / Д.В. Сивухин. Учебное пособие для вузов в 5-ти томах.– 3-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2005. – 792 с.

80. Сай, С.В. Качество передачи и воспроизведения мелких деталей цветных телевизионных изображений / С.В. Сай. Владивосток: Дальнаука, 2003. – 160 с.

81. Ярышев, С.Н. Цифровые методы записи и воспроизведения видеоинформации / С.Н. Ярышев, Н.Ф. Гусаров. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 86 с.

82. ГОСТ 19139-73 Кинескопы для черно-белого и цветного телевидения. Методы измерения разрешающей способности, 1984 – 9с.

83. Каменский, А.В. 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. С. 120–123.

84. Каменский, А.В. 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. 83 с. С. 29.

85. Разрешение. Мифы и реальность. MTF и её измерение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://camera-history.ru/obedineniya/73-biblioteka/elektronnye-versii/562-razreshenie-matritsa-mify-i-realnost-mtf-i-ejo-izmerenie.html/>, свободный (дата обращения: 26.05.2019г.)

86. Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.imatest.com/docs/sfr_mtfplot/, свободный (дата обращения: 26.05.2019г.)

87. MTF или частотно-контрастная характеристика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vasili-photo.com/articles/mtf.html>, свободный (дата обращения: 26.05.2019г.)

88. Каменский, А.В. 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. – 420 с. С. 235-237

89. Использование SFR часть 2: Запуск Imatest SFR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.imatest.com/docs/sfr_instructions2/, свободный (дата обращения: 26.05.2019г.)

90. Каменский, А.В. 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.

91. Каменский, А.В. 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.

92. Головина, Д.Е. 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. – 270 с., С 135–137.

93. Каменский, А.В. 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.

94. Каменский, А.В. 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.

95. Каменский, А.В. 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.

96. Монгуш, О.О. 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.

97. Монгуш, О.О. Эквиализация 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.

98. Ильин, А.Г. Цифровое телевидение в видеоинформационных системах: моногр. / А.Г. Ильин, Г.Д. Казанцев, А.Г. Костевич, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский, В.А. Шалимов. – Томск: Томск. гос.ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – 465 с.

99. Каменский, А.В. 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.

100. Kapustin V.V. 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.

101. Капустин В.В. 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.

102. Шипунова, К. В. 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.

103. 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.

104. 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.

105. Каменский, А.В. 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.

106. Айткалиева, А.М. 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.

107. Головина, Д.Е. 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.

108. Салыкова, Д.А. 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.

109. Максимов, А.Е. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
КОПИИ ДОКУМЕНТОВ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019660074

«MIR: Множественное измерение разрешения»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Автор: *Каменский Андрей Викторович (RU)*




Заявка № 2019618804

Дата поступления 17 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019660075**«SFI: Построчная фильтрация изображений»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Автор: *Каменский Андрей Викторович (RU)*

Заявка № **2019618808**

Дата поступления **17 июля 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **30 июля 2019 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе и
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент
А.Г. Лоцилов

« 4 » 10 2019г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
результатов диссертационной работы
Каменского Андрея Викторовича

Я, нижеподписавшийся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ) ТУСУР, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Газизов Т.Р., подтверждаю, что в проекте выполненном в рамках базовой части государственного задания №2014/225 по НИР «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), использованы следующие результаты диссертационной работы Каменского А.В.

1. Результаты оптимизации параметров двумерных фильтров повышения четкости телевизионных изображений по контрастно-частотным характеристикам.
2. Результаты оценки разрешающей способности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем по характерным фрагментам формируемых изображений.

Использование данных результатов способствовало успешному завершению проекта.

Заведующий кафедрой ТУ

Т.Р. Газизов



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент

А.Г. Лоцилов

«4» 10 2019г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
результатов диссертационной работы
Каменского Андрея Викторовича

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ) ТУСУР, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Газизов Т.Р. и руководитель проекта РФФИ «Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения комплексной безопасности объектов» (номер проекта 16-47-700939), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры ТУ Курячий М.И. настоящим актом подтверждаем, что в указанном проекте использованы следующие результаты диссертационной работы Каменского А.В.: исследование методов и алгоритмов измерения и коррекции координатных искажений в телевизионных изображениях.

Использование данных результатов способствовало успешному завершению проекта.

Заведующий кафедрой ТУ

Т.Р. Газизов

Руководитель проекта

РФФИ № 16-47-700939

М.И. Курячий



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе и
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент
А.Г. Лоцилов

« 4 » 10 2019г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
результатов диссертационной работы
Каменского Андрея Викторовича

Я, нижеподписавшийся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ) ТУСУР, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Газизов Т.Р., руководитель проекта, выполняемого в рамках базовой части государственного задания по НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» (шифр проекта 8.9562.2017/БЧ), подтверждаю, что в указанном проекте использованы следующие результаты диссертационной работы Каменского А.В.

1. Результаты разработки рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений на примере фильтров лапласиан “усеченная пирамида” и лапласиан “двойная пирамида”.

2. Результаты экспериментальной оценки эффективности разработанных рекурсивно-сепарабельных алгоритмов обработки изображений.

Использование данных результатов способствовало успешному завершению первого и второго этапов проекта.

Заведующий кафедрой ТУ,
руководитель проекта №8.9562.2017/БЧ

Т.Р. Газизов



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент

А.Г. Лоцилов

« 4 » 10 2019г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
результатов диссертационной работы
Каменского Андрея Викторовича

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ) ТУСУР, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Газизов Т.Р. и руководитель работ по договору на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка технического задания согласно ГОСТ 34 по теме «Распознавание объектов на поверхности расплава на основе данных видеопотока» в части «Цифровой управляемый видеодатчик и телекоммуникационная система передачи видеоданных для автоматизированного анализа параметров производственного процесса» (договор №18/18) для АО «Монокристалл» г. Ставрополь, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры ТУ Курячий М.И. настоящим актом подтверждаем, что в указанном проекте использованы следующие результаты диссертационной работы Каменского А.В.

1. Результаты исследования распределения разрешения по полю изображения при различных положениях тестового изображения, относительно оптической оси системы видеорегистрации.
2. Результаты исследования распределения разрешения по полю изображения на стенде имитации процесса выращивания кристаллов.
3. Результаты измерения координатных искажений при различных углах наблюдения.

Использование данных результатов способствовало успешному завершению договора №18/18.

Заведующий кафедрой ТУ

Т.Р. Газизов

Руководитель работ
по договору №18/18

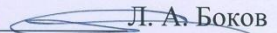
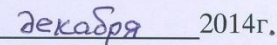
М.И. Курячий

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор

по учебной работе ТУСУР,

к.ф.-м.н., профессор

 Л. А. Боков декабря 2014г.

об использовании в учебном процессе

результатов работы группы проектного обучения ТУ-1203

“Интеллектуальные системы видеонаблюдения”

Настоящий акт свидетельствует о том, что в учебном процессе кафедры «Телевидение и управление» ТУСУР используется методическое пособие Каменского А.В., Маланина М.Ю., Курячего М.И. “Измерение разрешающей способности и четкости телевизионного изображения” при подготовке бакалавров по направлениям:

- 210.400.62 «Радиотехника»(профиль «Аудиовизуальная техника»);
- 210.700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи(профиль «Цифровое телерадиовещание»).

В частности, при подготовке учебно-методического и программного обеспечения для лабораторного практикума по дисциплине «Измерительное телевидение» были использованы:

- Программные модули «AverTV», «Imatest» и «Imagej» (учебные версии) для съемки тестовых изображений, их обработки и проведения тестовых измерений;
- документация по эксплуатации программного обеспечения “Imatest”;
- разработанное описание лабораторной работы.

Заведующий кафедрой ТУ,

д.т.н., профессор



И.Н. Пустынский

УТВЕРЖДАЮ

Директор департамента

образования ТУСУР,

д.т.н., профессор

П.Е. Троян

2017 г.



АКТ

об использовании в учебном процессе
результатов работы аспиранта Каменского Андрея Викторовича и
магистранта Головиной Дарьи Евгеньевны

Настоящий акт свидетельствует о том, что в учебном процессе кафедры «Телевидение и управление» ТУСУР используется методическое пособие Каменского А.В., Головиной Д.Е., Курячего М.И. «Измерение характеристик сигналов и шумов в телевизионном изображении» при подготовке бакалавров по направлениям:

- 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Аудиовизуальная техника»);
- 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Цифровое телерадиовещание»).

В частности, при подготовке учебно-методического и программного обеспечения для лабораторного практикума по дисциплине «Измерительное телевидение» были использованы:

- программное обеспечение «AverTV», «Imatest» и «Imagej» (учебные версии) для съемки тестовых изображений, их обработки и проведения тестовых измерений;
- документация по эксплуатации программного обеспечения «Imatest» и «Imagej»;
- разработанное описание лабораторной работы.

Заведующий кафедрой ТУ


 Т.Р. Газизов

