

На правах рукописи



Чиркунова Анастасия Анатольевна

**МЕТОДЫ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ОПТИМИЗАЦИИ И АДАПТАЦИИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ
ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГАОУВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре «Телевидение и видеотехника» и АО «НИИ телевидения».

Научный руководитель:

Лысенко Николай Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Телевидение и видеотехника» СПбГЭТУ
«ЛЭТИ»

Официальные оппоненты:

Гоголь Александр Александрович
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой телевидения и метрологии Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Румянцев Александр Иванович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Центра перспективных научных исследований и
подготовки высококвалифицированных специалистов в
области радиоэлектроники АО «НИИ «Вектор»

Ведущая организация:

ЗАО «Московский научно-исследовательский
телевизионный институт» (ЗАО «МНИТИ»)

Защита состоится «19» апреля 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, дом 5, ауд 2316.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <http://www.eltech.ru/>

Автореферат разослан «17» февраля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.238.03
к.т.н., доцент



Шевченко М. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные телевизионные (ТВ) системы в операторном или автоматическом режимах обеспечивают решение задач обнаружения, селекции, измерения, классификации и распознавания объектов во многих областях народного хозяйства, таких как: подводное видение, обнаружение объектов в сложных метеоусловиях, дистанционное зондирование Земли: определение состояния растительности и содержания воды в биомассе, оценка степени загрязненности водоемов, локализация водоемов, русел рек, болот и границ лесов; обнаружение людей в условиях задымленности; оптическая микроскопия и сортировка, в том числе определение состава материалов; обнаружение подделок; анализ свежести продуктов питания; ТВ методы визуализации и диагностики биологических тканей и др.

В основу анализа изображений на обозначенных уровнях заложено исследование информационных признаков объектов: пространственных, временных, спектрально-энергетических.

При использовании спектрально-энергетических признаков особую сложность вызывает обнаружение малоконтрастных объектов, т. е. объектов близких спектрально-энергетических классов, появление которых возможно в любой из перечисленных областей народного хозяйства.

Степень разработанности. В настоящее время для обнаружения малоконтрастных объектов применяются активно-импульсные (АИ), тепловизионные (ТПВ) и ТВ системы на кремниевых фотоприемниках (ФП).

Как правило, АИ системы эффективны лишь в некоторых типах мутных сред, имеют малый угол поля зрения, который ограничивает их возможности и позволяет использовать только в режиме идентификации объекта. В режиме поиска, используются ТВ системы на кремниевых ФП, что в сложных условиях видимости не всегда эффективно, т. к. не позволяет обеспечить дальность действия сравнимую с дальностью действия АИ ТВ систем. Кроме того, демаскирующий режим работы АИ ТВ систем ограничивает их использование при решении ряда специальных задач.

Известные ТПВ системы позволяют наблюдать только тепловые контрасты вплоть до 50 мК, однако часто тепловой контраст на наблюдаемых изображениях отсутствует и, к тому же, распространение теплового излучения 8...14 мкм сильно подвержено метеорологическим условиям, значительно поглощается водой и рядом других сред, например, дымом.

ТВ системы обнаружения малоконтрастных объектов на кремниевых ФП имеют ряд преимуществ, заключающихся в том, что они превосходят ТПВ и АИ ТВ системы в существенно более широком диапазоне условий наблюдения. В видимом и ближнем инфракрасном диапазонах наблюдения данные системы широко распространены, имеют низкие значения массогабаритных параметров и стоимость, а массовость производства позволяет постоянно улучшать их технические параметры и характеристики. Кроме того, изображения, формируемые ТВ системами на кремниевых ФП, комфортны для системы «глаз-мозг» человека, что важно при операторном режиме работы. С целью повышения

эффективности, они могут применяться в составе комбинированных ТВ систем, совместно с ТПВ и АИ ТВ системами, вплоть до синтеза изображений.

Для повышения достоверности и результативности анализа видеосигналов ТВ системами на кремниевых ФП, а также увеличения дальности их действия, актуальным является повышение качества передачи изображений малоконтрастных объектов.

Разработке и исследованию методов повышения качества передачи изображений малоконтрастных объектов и спектральной селекции посвящены работы таких авторов, как В. К. Зворыкин, А. Роуз, Я. А. Рыфтин, Р. Е. Быков, Н. В. Лысенко, А. К. Цыцулин, А. А. Гоголь, Ю. С. Сагдуллаев, С. Д. Ковин, А. Н. Куликов, А. И. Румянцев, Н. П. Корнышев, Б. С. Тимофеев, S. Süsstrunk, D. Firmenich, X. Zhang, T. Sim, коллектива авторов кафедры ТВ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и др.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка методов адаптации и оптимизации характеристик и параметров ТВ систем обнаружения малоконтрастных объектов в различных условиях наблюдения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

1. Синтез алгоритмов оптимизации спектральной характеристики ТВ системы обнаружения малоконтрастных объектов при наличии априорной или апостериорной информации о среде, а также адаптации в условиях априорной неопределенности оптических свойств среды.

2. Разработка метода комбинирования спектральных диапазонов с целью компенсации сигнала помехи, создаваемой средой.

3. Оптимизация и адаптация временных и пространственных параметров ТВ системы для повышения ее контрастной чувствительности с минимальными потерями во временном и пространственном разрешении.

4. Оптимизация числа уровней квантования видеосигналов от малоконтрастных объектов с целью его согласования с контрастной чувствительностью и пропускной способностью канала связи.

5. Разработка метода формирования адаптивного порога обнаружения малоконтрастных объектов.

Научная новизна.

1. Синтезирован алгоритм адаптации спектральной характеристики ТВ системы обнаружения малоконтрастных объектов в условиях априорной неопределенности оптических свойств среды распространения излучения, обеспечивающий максимум отношения сигнал/шум на выходе ТВ системы.

2. Синтезирован алгоритм оптимизации спектральной характеристики ТВ системы в условиях наличия априорной или апостериорной информации о среде, обеспечивающий максимум произведения отношения сигнал/шум и контраста при обнаружении малоконтрастных объектов.

3. Разработан метод компенсации сигнала помехи, создаваемой средой, отличающийся учетом особенностей формирования изображений в условиях переменных оптических свойств среды и позволяющий повысить отношение сигнал/шум на выходе ТВ системы и контраст формируемых изображений.

4. Предложен вариант реализации режима адаптивного суммирования

соседних пикселей по пространству и времени, отличающийся сниженными потерями в пространственном и временном разрешении ТВ системы, работающий с сигналами средней интенсивности и позволяющий повысить контрастную чувствительность ТВ системы.

5. Получено аналитическое выражение для определения числа уровней квантования, позволяющее согласовать поток цифровых видеоданных с ограниченной пропускной способностью канала связи без ухудшения контрастной чувствительности и отличающееся адаптивностью к условиям наблюдения.

6. Разработан метод формирования адаптивного порога, позволяющий принять решение о наличии полезного сигнала при обнаружении малоконтрастных объектов и отличающийся учетом уровня освещенности в фокальной плоскости.

Теоретическая значимость работы.

1. Исследовано влияние среды распространения излучения на суммарный оптический сигнал, приходящий на вход ТВ системы. Установлено, что разделение полезного сигнала и сигнала помехи, формируемой средой с последующей компенсацией его в суммарном сигнале позволяет повысить качество передачи изображений малоконтрастных объектов.

2. Показано, что верхняя и нижняя границы оптимального в данных условиях наблюдения спектрального фильтра для выделения малоконтрастных объектов соответствуют максимуму произведения отношения сигнал/шум и контраста и могут быть найдены итерационным путем.

3. Разработан метод, позволяющий решить задачу выставления адаптивного порога обнаружения малоконтрастного объекта на фоне и учитывающий, что среднеквадратическое отклонение (СКО) фотонного шума увеличивается по мере роста полезного сигнала.

Практическая значимость работы.

1. Предложенный алгоритм адаптации с последующей оптимизацией спектральной характеристики ТВ системы позволяет определить границы спектральных диапазонов для обнаружения малоконтрастных объектов.

2. Разработанный метод комбинирования спектральных диапазонов позволяет скомпенсировать влияние среды распространения излучения на полезный сигнал, и как следствие, повысить качество передачи изображений малоконтрастных объектов.

3. На основе полученного аналитического выражения разработчик ТВ систем может выбрать оптимальное число и значение уровней квантования, позволяющее минимизировать поток цифровых видеоданных, реализуя при этом потенциальную контрастную чувствительность.

4. Разработанный пороговый метод позволяет рассчитать значение адаптивного к уровням входного сигнала порога обнаружения.

Практическая ценность разработанных методов и алгоритмов адаптации и оптимизации подтверждается успешной реализацией их в опытном образце ТВ системы визуализации кровеносных сосудов «ВЕНОВИЗОР» и в ТВ системе пригоризонтного обнаружения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы: статистические методы

анализа и синтеза радиотехнических систем, методы теории приближенных вычислений, методы теории информации, методы математического анализа, методы математического моделирования и численного анализа, методы компьютерного моделирования в среде *Matlab* и физические эксперименты.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложенный алгоритм повышения отношения сигнал/шум на выходе ТВ системы, базирующийся на адаптации и оптимизации спектральной характеристики ТВ системы, позволяет повысить отношение сигнал/шум и контраст изображения до 10 раз в зависимости от типа обнаруживаемого объекта.

2. Предложенный метод комбинирования спектральных диапазонов, основанный на компенсации сигнала помехи, формируемой средой, при обнаружении объектов в мутных средах обеспечивает выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе ТВ системы в комплексированном канале и в контрасте на изображении в 1,3...2,1 раза по сравнению с системами с одним спектральным каналом.

3. Разработанный вариант реализации режима адаптивного суммирования сигналов n соседних пикселей по пространству и времени позволяет в корень из n повысить контрастную чувствительность с минимальными потерями в пространственном и временном разрешении.

4. Оптимизация числа и значения уровней квантования позволяет согласовать поток цифровых видеоданных с ограниченной пропускной способностью канала связи без ухудшения контрастной чувствительности.

5. Предложенный метод формирования адаптивного порога позволяет обнаруживать сигналы от малоконтрастных объектов различной интенсивности.

Степень достоверности и апробация работы. Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации обуславливается корректным использованием методов исследования, применением современных вычислительных средств и программных комплексов, а также результатами экспериментальных исследований. Полученные результаты не противоречат ранее полученным данным, описанным в литературе другими авторами.

Основные положения и научные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях (НТК): международной НТК «Телевидение: передача и обработка изображений» в 2013-2016 гг. (г. СПб), международной НТК «Современное телевидение и радиоэлектроника» в 2014 г. (г. Москва), НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» в 2014 г. (г. Сочи), International Scientific Symposium «Sense. Enable. SPITSE» в 2015 г. (г. СПб), международной НТК DSPA-2016 в 2016 г. (г. Москва), Proceedings of the 2016 IEEE ElConRusNW в 2016 г. (г. СПб), 68-69-ой НТК ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2015-2016 гг. (г. СПб).

За результаты исследований и разработок по теме диссертации получены дипломы победителя конкурсов: 6-й ежегодной НТК молодых специалистов «Техника и технология современной фотоэлектроники»; в номинации «Лучший инновационный проект» на 5-м международном молодежном промышленном форуме «Инженеры будущего-2015»; программы «УМНИК».

Внедрение результатов диссертации. Полученные научные и практические

результаты использовались при выполнении ОКР в АО «НИИ телевидения», ООО «Адванст Мобилити Солюшинз»; в учебном процессе СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, среди которых 5 научных статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, в т. ч. 1 статья без соавторов, 3 статьи были опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в базе Scopus и WoS, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство программы для ЭВМ, 6 статей, опубликованных в других изданиях и материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения. Основная часть изложена на 137 страницах машинописного текста, включает 91 рисунок, 19 таблиц, 4 приложения и содержит список литературы из 121 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна, показаны теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматриваются физические основы формирования изображений малоконтрастных объектов и особенности их обнаружения по спектрально-энергетическим признакам.

Показано, что с одной стороны, малый контраст объектов связан с их природой, а с другой стороны, проявляется в результате воздействия среды, распространения оптических сигналов от объектов к приемнику – ТВ системе.

Особенности формирования изображений объектов, находящихся в мутных средах, рассмотрены на примере двух типов сред.

Первый тип – атмосфера, наполненная взвешенными частицами. Обнаружение в атмосфере ведется, как правило, в условиях априорной неопределенности оптических свойств среды, что вызвано сложной структурой наполняющих атмосферу частиц.

Второй тип – биологическая ткань – кожа, оптические свойства которой априори известны. Особый интерес представляет визуализация подкожных кровеносных сосудов.

Основной проблемой при обнаружении объектов в мутных средах является снижение качества изображений, вызванное экстинкцией сигналов при прохождении через среду и добавлением сигнала помехи, формируемой слоями среды, лежащими между объектом и ТВ системой, к суммарному сигналу, поступающему на вход ТВ системы.

Проведенный анализ процесса прохождения сигналов от объекта и фона через среду и звенья ТВ системы, а также достоинств и недостатков известных методов обнаружения малоконтрастных объектов, показал, что дальнейшее повышение качества их передачи (отношения сигнал/шум и контраста) возможно путем согласования параметров и характеристик ТВ системы с информационными

признаками объекта, фона и среды.

Таким образом, решение крупной научно-технической проблемы повышения качества передачи изображений малоконтрастных объектов связано с двумя аспектами.

С одной стороны, необходима оптимизация и адаптация спектральной характеристики ТВ системы к объекту, фону и среде, а также компенсация сигнала помехи, формируемой средой.

С другой стороны, повышение контрастной чувствительности ТВ систем за счет оптимизации ее параметров по пространственным координатам x , y и времени t , числу и значению уровней квантования и адаптации к уровням входного сигнала и к переменным оптическим свойствам среды.

Как известно потенциальная контрастная чувствительность ТВ систем определяется формулой А. Роуза и может быть выражена через пороговое отношение сигнал/шум $\Psi_{\text{пор}}$ и емкость пиксела, выраженную в числе электронов N_{MAX}

$$K_{\text{пор}} = \Psi_{\text{пор}} / \sqrt{N_{\text{MAX}}}.$$

В общем виде решение задачи повышения качества передачи малоконтрастных объектов является слишком общей задачей, т. к. условия наблюдения могут меняться в очень широких пределах. В связи с этим целесообразно ввести ряд ограничений: обнаруживаемые объекты несамосветящиеся, планарные и по линейному размеру относятся к средним или протяженным, оптические свойства объекта и фона изотропны по всей площади поверхности, а в рассматриваемый промежуток времени объект, фон и среда статичны и др.

Разработанные в работе методы реализуют предварительную обработку изображений малоконтрастных объектов. Применение известных цифровых методов обеспечит дальнейшее повышение качества. Однако, нерациональный выбор методов предварительной обработки приведет к невозможным потерям информации и не позволит достичь потенциального качества.

Во второй главе рассмотрены вопросы адаптации и оптимизации ТВ систем обнаружения малоконтрастных объектов.

Повышение контрастной чувствительности ТВ систем. Проведенный анализ путей повышения контрастной чувствительности показал, что эффективным методом ее повышения является адаптивное суммирование по пространству и времени во внешней памяти.

В отличие от классического суммирования, которое применяется в области сигналов малой интенсивности и направлено на снижение влияния собственных шумов ТВ систем, предлагаемый вариант реализации работает с сигналами средней и высокой интенсивности, поскольку, в соответствии с формулой А. Роуза именно в этих условиях должно вестись обнаружение малоконтрастных объектов.

Отношение сигнал/шум и, как следствие, контрастная чувствительность, при суммировании увеличится в корень квадратный из числа суммируемых пикселей по вертикали p , горизонтали o и по времени k

$$K_{\text{пор}} = \Psi_{\text{пор}} / \sqrt{opkN_{\text{MAX}}}.$$

В отличие от классического суммирования, реализующего обмен

пространственного и временного разрешения на контрастную чувствительность, предлагаемые варианты режимов адаптивного суммирования, позволяют снизить потери в пространственном и временном разрешении.

1. Предлагаемый режим адаптивного суммирования по пространству и времени во внешней памяти представлен на рисунке 1.

Потери в пространственном разрешении снижены в $(m - o)o/m$ по горизонтали и в $(n - p)p/n$ по вертикали, где (m, n) – размер изображения в пикселах. Потери во временном разрешении определяются только задержкой по времени $(k-1)T_{\text{кадр}}$. Показано, что такой метод адаптивного суммирования позволяет одновременно решать две задачи – обнаруживать или оценивать малоконтрастные объекты с пониженной разрешающей способностью и просматривать изображения в полной разрешающей способности, но с пониженной контрастной чувствительностью.

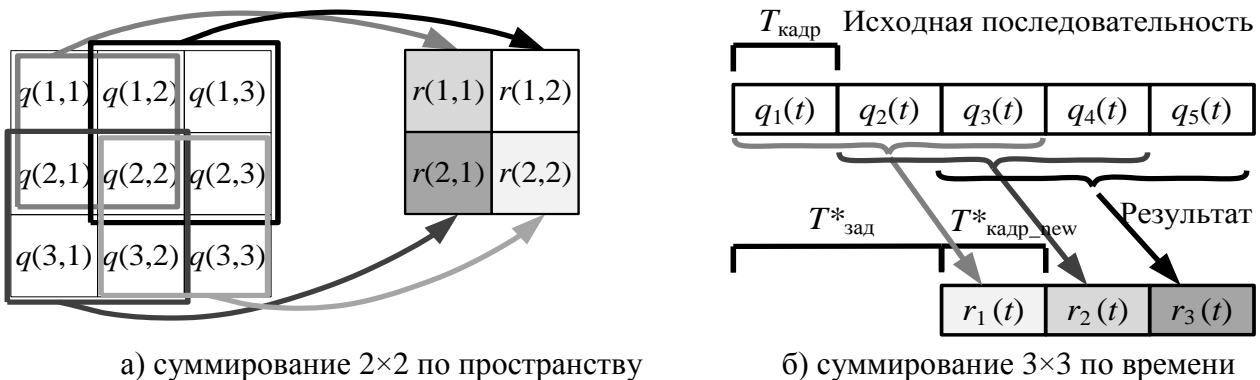


Рисунок 1 – Предложенная реализация режимов суммирования

2. В отсутствие ограничений на массогабаритные параметры реализация режима суммирования по пространству возможна следующим образом. Для сохранения угловой разрешающей способности увеличение числа суммируемых пикселей сопровождается пропорциональным увеличением фокусного расстояния объектива, а для сохранения угла поля зрения системы – использованием сборок из матриц ФП.

Оптимизация спектральной характеристики ТВ системы при наличии априорной или апостериорной информации о среде. Предложен алгоритм оптимизации спектральной характеристики ТВ системы, рисунок 2, который опирается на теорию приближенных вычислений и заключается в применении итерационного подхода.

Данный подход основан на последовательном уточнении границ спектральных диапазонов обнаружения сигналов от объекта N_S и фона N_B в расширенной области спектра от λ_{MIN} до λ_{MAX} и решении задачи поиска локальных максимумов качества: максимума произведения отношения сигнал/шум Ψ и контраста K на каждой итерации. Затем, по найденным спектральным диапазонам с локальными максимумами производится поиск спектрального диапазона, который обеспечивает глобальный максимум.

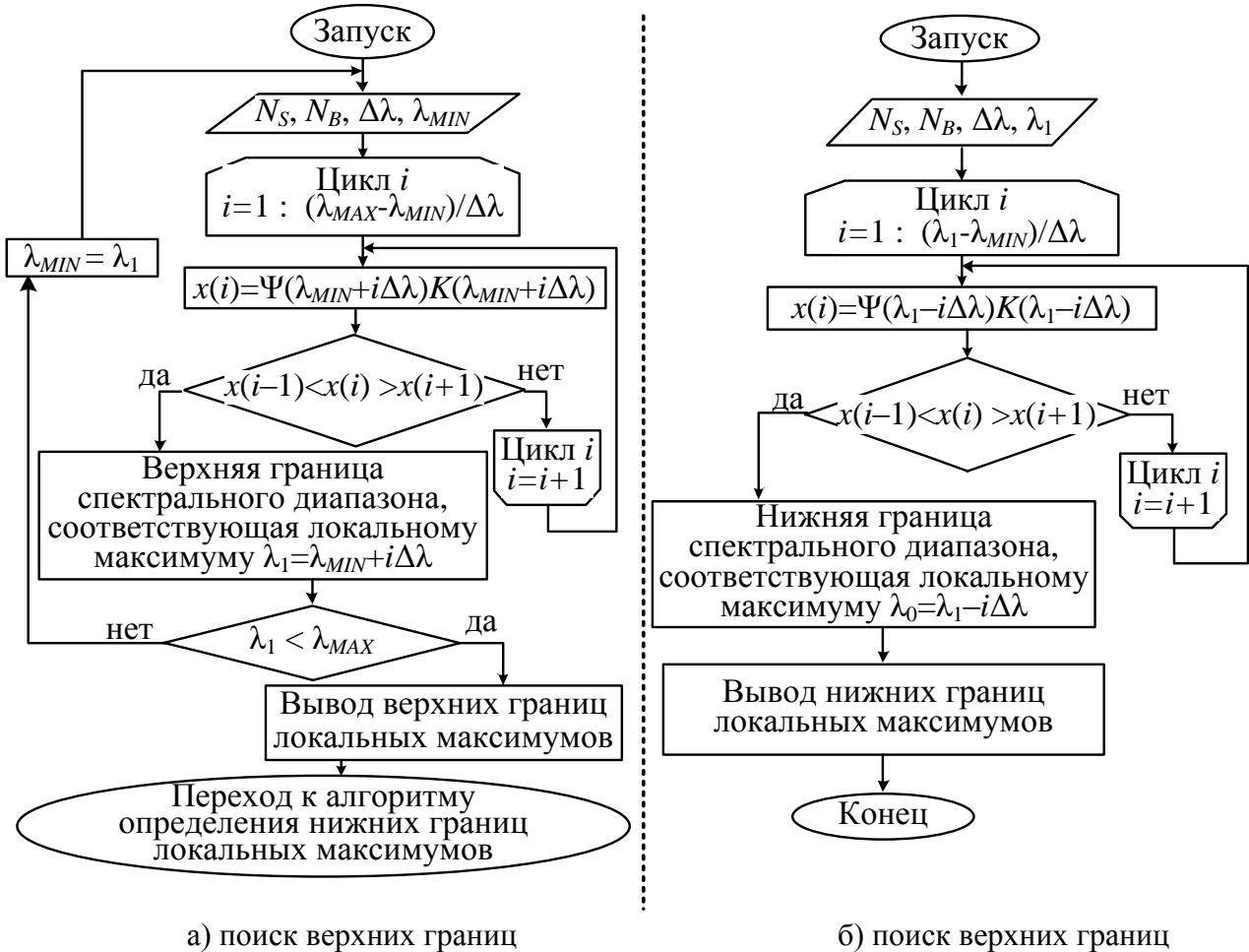


Рисунок 2 – Алгоритм оптимизации спектральной характеристики

Адаптация спектральной характеристики ТВ системы при априорной неопределенности оптических свойств среды. Предложен алгоритм адаптации спектральной характеристики. Он заключается в определении нижней границы спектрального диапазона, начиная с которой влияние среды незначительно и обеспечивается максимум качества, определяемый отношением сигнал/шум $\max(\Psi_i)$.

Решение обозначенной задачи осуществляется с помощью итеративного подхода по алгоритму, представленному на рисунке 3.

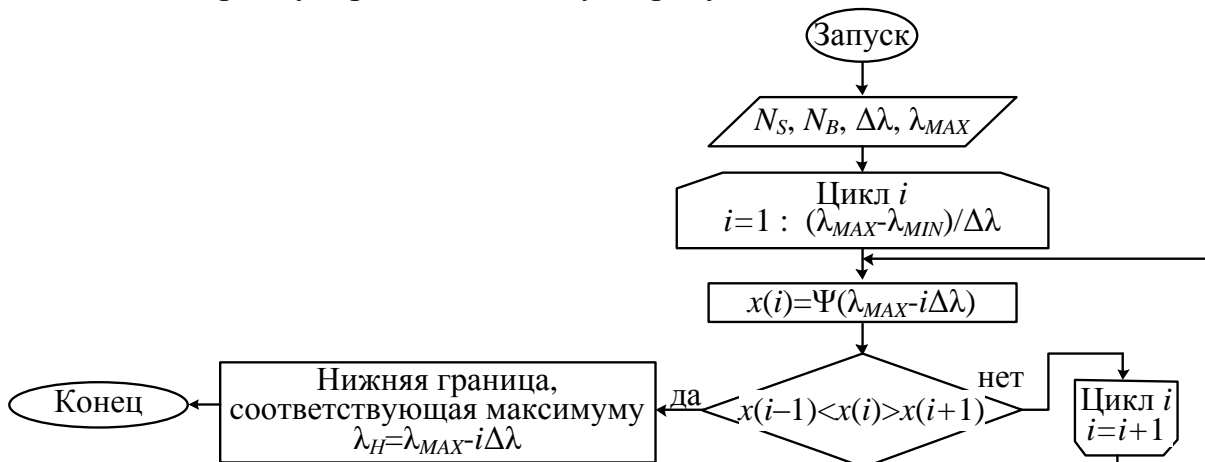


Рисунок 3 – Алгоритм адаптации спектральной характеристики

Метод комбинирования спектральных диапазонов. Метод применим при обнаружении объектов в мутных средах и заключается в компенсации сигнала помехи, сформированной средой.

Суммарный сигнал в каждом спектральном диапазоне $\Delta\lambda_i$ представляет собой аддитивную сумму сигналов от объекта N_s и помехи от среды N_t , взятых с некоторыми весовыми коэффициентами b_i и c_i

$$N_{\Sigma}(\Delta\lambda_i) = b_i N_s(\Delta\lambda_i) + c_i N_t(\Delta\lambda_i).$$

Для реализации предложенного метода комбинирования спектральных диапазонов необходимо разделение сигнала помехи, создаваемой средой, и сигнала от объекта.

Компенсация сигнала помехи, формируемой средой, соответствует преобразованию

$$X_{S_i} = \frac{X_i - c_i X_t}{b_i}.$$

где X_i – суммарный видеосигнал анализируемого i -го спектрального канала, X_t – сигнала помехи, формируемой средой, X_{S_i} – сигнал от объекта.

Предложенный метод основан на спектральном анализе регистрируемого светового потока по длинам волн и по пространственным частотам.

Разработан алгоритм синтеза, заключающийся в нескольких последовательных шагах, на которых:

1. Проводится спектральный анализ по длинам волн с целью адаптации спектральной характеристики ТВ системы к условиям наблюдения по алгоритму, представленному на рисунке 3. В результате определяются границы спектрального диапазона λ_H , λ_{MAX} .

2. Оптимизируются границы спектрального диапазона, найденного на шаге 1 по алгоритму, представленному на рисунке 2.

3. Уточняется верхняя граница λ_B спектрального диапазона $\lambda \in [\lambda_{MIN}, \lambda_H]$, в котором наблюдается максимум коэффициента экстинкции среды. Для этого необходимо применение спектрального анализа по пространственным частотам. Видеосигналы спектральных каналов $\lambda \in [\lambda_{MIN}, \lambda_H]$ и $\lambda \in [\lambda_H, \lambda_{MAX}]$ подвергаются низкочастотной (НЧ) фильтрации, затем рассчитывается СКО. Обосновывается, что полученные значения СКО должны быть аппроксимированы степенной функцией, а значение длины волны λ_B , соответствующей спаду кривой в e раз. За спектральный диапазон, содержащий максимум информации о среде принимается диапазон $\lambda \in [\lambda_{MIN}, \lambda_B]$, видеосигнал на выходе данного спектрального диапазона – X_t . С целью подавления шумов данный сигнал берется после НЧ фильтрации.

4. Проводится компенсация сигнала среды. Для получения изображения с повышенным качеством необходимо из видеосигналов каждого спектрального канала, вычесть сигнал среды X_t , взятый с коэффициентом пропорциональности c_i . Коэффициент пропорциональности c_i определяется максимумом отношения сигнал/шум. Затем производится масштабирование полученного видеосигнала с коэффициентом b_i . Данный метод защищен патентом.

Оценка минимально достаточного числа уровней квантования при передаче изображений малококонтрастных объектов. Предложены рекомендации по снижению числа уровней квантования видеосигнала в условиях ограниченной пропускной способности канала связи с сохранением контрастной чувствительности ТВ системы.

С помощью полученного аналитического выражения при известной максимальной глубине потенциальной ямы N_{\max} оценивается число различных уровней видеосигнала m от малококонтрастного объекта с заданным отношением сигнал/шум Ψ с учетом влияния среды распространения

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{\Psi_i^2}{4\tau_{t_i}} + \frac{\Psi_i}{\tau_{t_i}} \sqrt{\Psi_i^2/16 + \tau_{t_i}N_{Bi} + N_{сч}^2 + N_{t_i}} \right) = N_{\max},$$

где τ_t – спектральный коэффициент пропускания среды, $N_{сч}$ – шум считывания, N_t – сигнал помехи, формируемой средой.

Выражение стоящее под знаком суммы определяет значение текущего уровня квантования.

Таким образом, чем больше максимальная глубина потенциальной ямы, тем большее число уровней может быть распознано с заданной вероятностью.

Выбор числа уровней квантования меньшей, чем полученное число m приводит к потерям в контрастной чувствительности. Выбор числа уровней квантования существенно большей, чем m приводит к избыточности и наталкивается на ограничение, связанное с пропускной способностью канала связи.

Метод формирования адаптивного порога. Рассмотрена задача обнаружения малококонтрастного объекта на фоне на основе критерия Неймана-Пирсона. Особенностью данной задачи по сравнению с классической является то, что СКО фотонного шума увеличивается по мере роста полезного сигнала N_S и определяется как $\sqrt{N_S}$. Таким образом, СКО шума различно при различных уровнях сигнала.

Показано, что задача обнаружения малококонтрастного объекта сводится к выставлению порога обнаружения N_P , который вычисляется на основе заданного разработчиком значения вероятности ложной тревоги.

Аналитическое выражение для вычисления значения порога

$$N_P = \pm y \sqrt{2 \cdot N_B} + N_B.$$

где y – аргумент функции ошибок $\text{erf}(y) = \text{erf}[(\pm N_P \mp N_B)/\sqrt{2 \cdot N_B}] = 1 - 2P_{л.т.}$

Данный порог адаптивен к уровням входного сигнала N_B . Наличие знака \pm указывает на положительный или отрицательный контраст объекта.

В третьей главе рассматривается аппаратно-программная реализация предложенных во второй главе методов и алгоритмов.

Описываются возможные области применения предложенного метода комбинирования спектральных диапазонов, программная реализация представлена для двух случаев.

Первый – визуализация поверхностных кровеносных сосудов. Повышение качества изображений достигается за счет компенсации сигнала помехи, сформированной слоями кожи, лежащими между сосудами и ТВ системой. На основе полученных выражений определены спектральные диапазоны для формирования сигнала помехи ($\lambda \in [350, 500]$ нм) и сигнала от сосудов ($\lambda \in [800, 1000]$ нм).

Второй случай – рассмотрены особенности построения ТВ системы обнаружения малоконтрастных объектов в неблагоприятных метеоусловиях.

Разработаны функциональные схемы устройства визуализации кровеносных сосудов на базе трехсигнального и четырехсигнального ФП и ТВ системы обнаружения в неблагоприятных метеоусловиях.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования предлагаемых методов и алгоритмов адаптации и оптимизации.

Экспериментальная оценка эффективности алгоритма оптимизации спектральной характеристики ТВ системы проведена на тестовом объекте – красном кленовом листе на фоне зеленого, рисунок 4. С помощью разработанного алгоритма были определены границы спектрального диапазона: 495 и 590 нм. По отношению к черно/белой (цветной) ТВ камере контраст повысился в 3 (2) раза, а отношение сигнал/шум в 4 (2,5).

Исходное – черно/белое

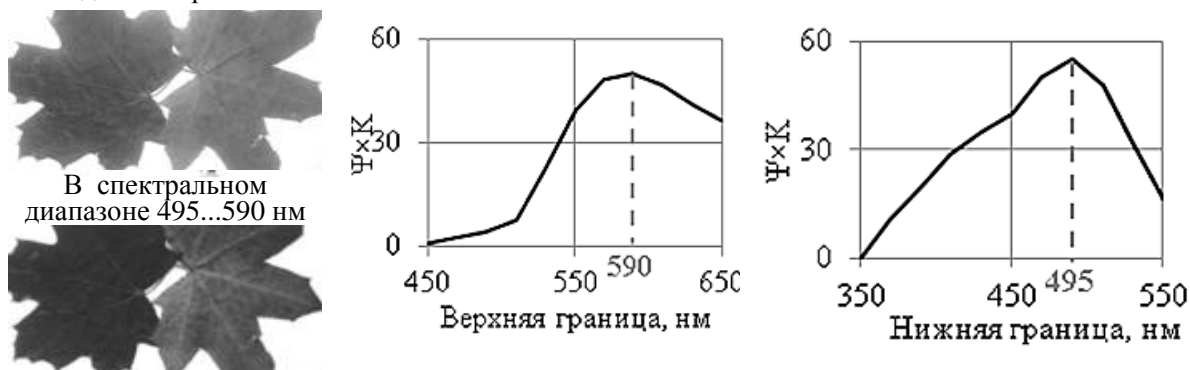


Рисунок 4 – Результаты работы алгоритма оптимизации спектральной характеристики

Также, проведено компьютерное моделирование алгоритма оптимизации спектральной характеристики ТВ системы, предназначенной для обнаружения образцов экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), применяемой для теплоизоляции космических аппаратов (серые кривые на рисунке 5), на фоне алюминия (черная кривая на рисунке 5). Для обнаружения было выбрано два спектральных диапазона: измерительный и опорный. Измерительный диапазон соответствует $\max(\Psi \times K)$. В результате работы предложенного алгоритма были определены границы спектрального диапазона 290 и 430 нм.

Определен опорный спектральный диапазон, в котором наблюдается $\min(\Psi \times K)$, т. е. различие между сигналами от ЭВТИ и алюминия менее 5%: $\lambda \in [900, 1050]$ нм. На основе этого можно оценить выигрыш при применении

алгоритма оптимизации спектральной характеристики.

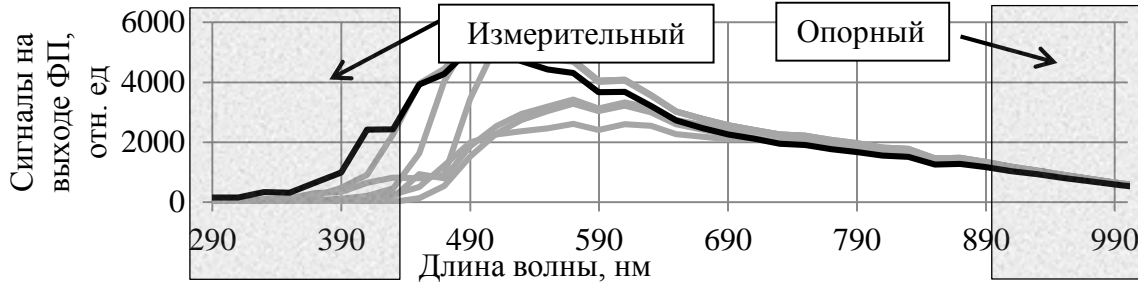


Рисунок 5 – Сигналы на выходе ФП

Оценка коэффициентов различия между сигналами опорного $N_{\text{ЭВТИ}(al)_{\text{оп}}}$ и измерительного $N_{\text{ЭВТИ}(al)_{\text{изм}}}$ каналов позволяет принять решение о наличии материала ЭВТИ в кадре.

$$K_{\text{infoЭВТИ}(al)} = N_{\text{ЭВТИ}(al)_{\text{изм}}} / N_{\text{ЭВТИ}(al)_{\text{оп}}}.$$

Проведена экспериментальная оценка эффективности алгоритма адаптации спектральной характеристики ТВ системы к метеоусловиям наблюдения.

Тестовым объектом являлись промышленные трубы, расположенные на расстоянии 4 км в условиях снежной метели, рисунок 6. Метеорологическая дальность видимости составляла 5 км. Для проведения экспериментальных исследований использовалась турель со спектральными светофильтрами ЖС11, ЖС12, ЖС16, ЖС17, ЖС18, ОС12, ОС13, ОС14, КС11, КС14. В результате работы алгоритма найдена нижняя граница спектрального диапазона, которая соответствует $\max(\Psi)$ и составляет 560 нм (ОС14).

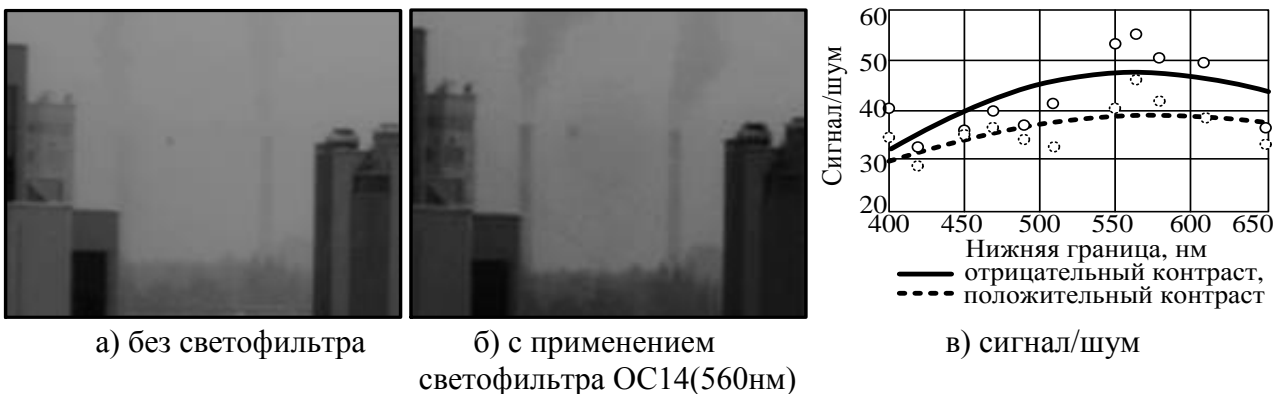


Рисунок 6 – Результаты работы алгоритма адаптации спектральной характеристики

Экспериментальное исследование метода комбинирования спектральных диапазонов проведено для двух типов мутных сред: атмосфера, наполненная взвешенными частицами, - снежная метель, рисунок 7 и кожа, рисунок 8.



Рисунок 7 – Результаты метода комбинирования спектральных диапазонов

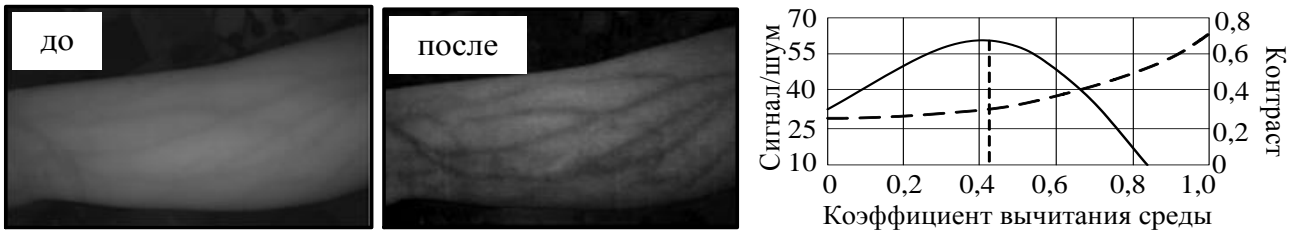
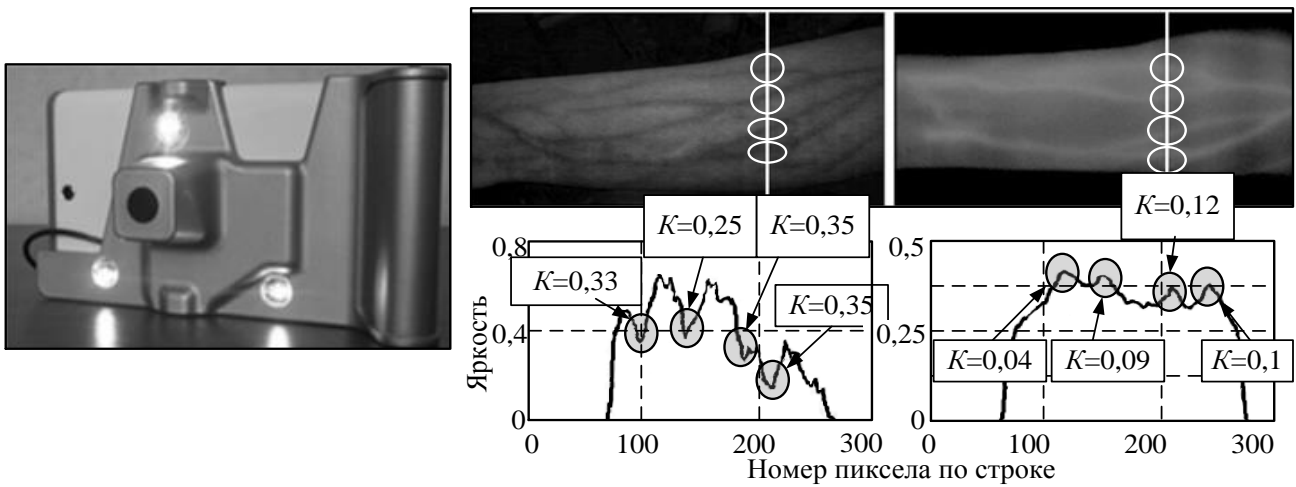


Рисунок 8 – Результаты метода комбинирования спектральных диапазонов

В результате компенсации сигнала среды отношение сигнал/шум выросло в 1,5 раза, контраст наблюдаемых объектов в 1,3 – 2,1 раза.

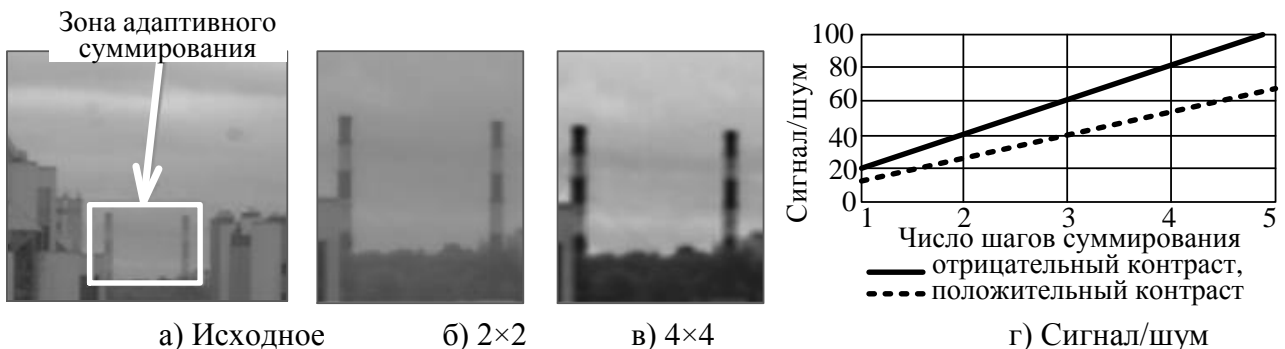
Разработанный метод комбинирования спектральных диапазонов внедрен в ТВ устройство визуализации кровеносных сосудов «Веновизор», рисунок 9, выпускаемое в АО «НИИ телевидения».



а) «Веновизор» б) изображение с «Веновизора» в) изображение с ТПВ системы
Рисунок 9 – «Веновизор» и результаты сравнения с ТПВ системой

Также на рисунке 9 приведены результаты сравнения «Веновизора» и ТПВ системы. Контраст изображений, полученных с «Веновизора», в среднем 4 раза выше по сравнению изображениями, сформированными ТПВ системой.

Экспериментальные исследования разработанных вариантов реализации адаптивного суммирования по пространству проведены для тестового объекта – промышленных труб. На рисунке 10 (а) представлено исходное изображение, на рисунке 10 (б, в) – результат адаптивного суммирования в зоне малококонтрастного изображения.



а) Исходное б) 2×2 в) 4×4 г) Сигнал/шум
Рисунок 10 – Результаты применения предложенного режима адаптивного суммирования

На рисунке 11 (а, б, в) – приведены результаты суммирования пикселей с пропорциональным увеличением фокусного расстояния.

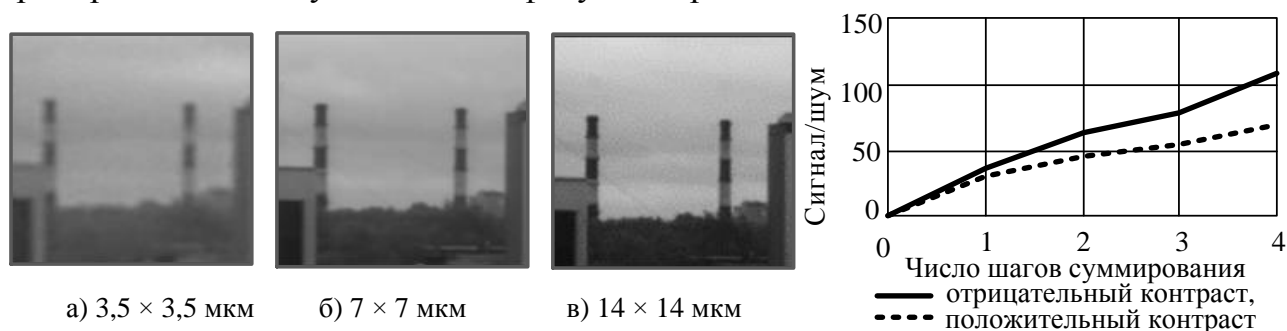


Рисунок 11 – Результаты применения предложенного режима суммирования

В обоих случаях, рисунки 10 (г) и 11 (г), наблюдается монотонный рост отношения сигнал/шум, и как следствие контрастной чувствительности, при увеличении числа шагов суммирования. При этом пространственное разрешение как видно из результатов, снижается незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы.

1. Разработан алгоритм оптимизации и адаптации спектральной характеристики оптико-электронного тракта ТВ системы, который позволяет повысить отношение сигнал/шум и контраст изображения до 10 раз в зависимости от типа обнаруживаемого объекта.

2. Разработан вариант реализации режима адаптивного суммирования сигналов соседних пикселей по пространству и времени со сниженными потерями в пространственном и временном разрешении, который позволяет повысить отношение сигнал/шум, и, соответственно, контрастную чувствительность, при применении n шагов суммирования в $0,86 \cdot n - n$ раз.

3. Предложен метод комбинирования спектральных диапазонов, при обнаружении объектов в мутных средах позволяющий благодаря обмену спектрального разрешения на качество передачи изображений, повысить отношение сигнал/шум в 1,5 раза, контраст в 1,3 – 2,1 раза.

4. Разработано устройство визуализации кровеносных сосудов, реализующее предложенные методы, отношение сигнал/шум на выходе которого повышено в 1,5 раза и контраст изображений – в 1,6 раз по сравнению с устройствами работающими в оптическом диапазоне.

Предлагаемое устройство позволяет получить контраст в среднем 4 раза выше по сравнению с ТПВ системой.

5. Оптимизация числа и значений уровней квантования, заключающаяся в определении максимального числа различимых уровней видеосигнала различимых с заданной вероятностью, позволила согласовать поток цифровых видеоданных с ограниченной пропускной способностью канала связи без ухудшения контрастной чувствительности.

6. Предложен метод формирования адаптивного порога, позволяющий оптимизировать обнаружение малококонтрастных объектов на фоне.

В качестве наиболее перспективных направлений дальнейших исследований можно рекомендовать решение задач синтеза изображений, сформированных в разных спектральных диапазонах и разными типами ТВ систем, и разработки методов адаптации ТВ систем к условиям априорной неопределенности среды в условиях реального времени.

Общий вывод. Разработанные методы адаптации и оптимизации телевизионных систем обнаружения малококонтрастных объектов прошли экспериментальную проверку и были использованы при проектировании специализированных ТВ систем.

Данные методы прошли практическую апробацию – выпущен опытный образец ТВ системы визуализации сосудистого русла, прошедший медицинские исследования, разработан макет ТВ системы пригоризонтного наблюдения, часть методов используется в учебном процессе в СПбГЭТУ, о чем свидетельствуют соответствующие акты внедрения. Полученные в диссертации результаты, отражающие практический выигрыш, а также акты внедрения, свидетельствуют о достижении поставленной цели и задач исследования.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Чиркунова, А. А. Оптимизация телевизионной системы пригоризонтного наблюдения [Текст] / Д. Ю. Адамов, Г. В. Левко, А. А. Манцветов, А. В. Морозов, А. К. Цыцулин, А. А. Чиркунова // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2014. – Вып. 2. – С. 34-45.

2. Чиркунова, А. А. Телевизионная камера RGB-NIR диапазона [Текст] / П. С. Баранов, А. А. Чиркунова // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2015. – № 4. – С. 47-57.

3. Чиркунова, А. А. Телевизионная система визуализации венозного кровотока поверхностных вен [Текст] / П. С. Баранов, Ю. П. Гультяев, Ф. В. Гумаров, А. А. Чиркунова // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2015. – Вып. 5. – С. 32-43.

4. Чиркунова, А. А. Статистический анализ и синтез прикладных телевизионных систем [Текст] / Г. В. Левко, А. А. Манцветов, А. В. Морозов, В. В. Пятков, А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин, А. А. Чиркунова // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2015. – Вып. 6. – С. 4-15.

5. Чиркунова, А. А. Метод формирования телевизионного изображения при наблюдении в мутных средах [Текст] / А. А. Чиркунова // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2015. – Вып. 6. – С. 90-95.

Патенты

6. Чиркунова, А. А. Способ формирования телевизионного изображения в мутных средах с преобладающим над поглощением рассеянием (варианты) и устройство для его реализации / П. С. Баранов, Ю. П. Гультяев, В. Пан, А. А. Чиркунова // Патент на изобретение № 2602505. Заявка № 2015145038 приоритет изобретения 20.10.2015, зарегистрирован в Гос. Реестре изобретений РФ

25.10.2016.

7. Чиркунова, А. А. Визуализатор сосудистого русла / А. А. Чиркунова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663037. Заявка № 2016661197, дата поступления 18.10.2016, зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ 28.11.2016.

Другие статьи и материалы конференций

8. Чиркунова, А. А. Спектральный метод выделения малоконтрастных объектов [Текст] / А. А. Манцветов, А. А. Чиркунова // Современное телевидение и радиоэлектроника: 22-я межд. научно-техн. конф.: Докл. конф., г. Москва, 18 – 19 марта 2014 г. – М.: изд-во СКБ «Электрон». – 2014.– С. 58-59.

9. Чиркунова, А. А. Достижение предельной контрастной чувствительности при пригоризонтном наблюдении [Текст] / Г. В. Левко, А. К. Цыцулин, А. А. Чиркунова // XI научно-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли»: Материалы конф., г. Сочи, 13 - 18 сент. 2014 г. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»-НПП «ОПТЭКС». – 2014.– С. 236-237.

10. Чиркунова, А. А. Система обнаружения пригоризонтных объектов [Текст] / А. А. Чиркунова // 68-я научно-техн. конф. проф.-препод. сост. СПбГЭТУ: Сборник докл., г. СПб, 28 янв. – 5 февр. 2015 г. – СПб: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015.– С. 20-23.

11. Chirkunova, A. A Television Camera Based On RGB-NIR Single Image Sensor (Телевизионная камера на базе одноматричного RGB-NIR фотоприемника) / P. Baranov, A. Mansvetov, A. Chirkunova // 2nd International Scientific Symposium «Sense. Enable. SPITSE», St. Petersburg, Russia, 22 june – 3 july 2015. СПб: изд-во ООО «Технолит». – 2015.– С. 192-194.

12. Chirkunova, A. A Television System of Venous Bloodstream Visualization of Interfacial Veins (Телевизионная система визуализации венозного кровотока поверхностных вен) / P. Baranov, A. Chirkunova // Proceedings of the 2016 IEEE ElConRusNW, St. Petersburg, 22 june – 3 july 2015.– P. 788-791.

13. Chirkunova, A. A Method of Increasing the Contrast of Low-Contrast Objects by Combining Spectral Bands (Метод повышения контраста малоконтрастных изображений за счет комбинирования спектральных диапазонов) / N. Lysenko, A. Chirkunova // Proceedings of the 2016 IEEE ElConRusNW, St. Petersburg, 22 june – 3 july 2015.– P. 283-287.

14. Чиркунова, А. А. Оценка пороговой контрастной чувствительности ТВ камер на основе твердотельных фотоприемников [Текст] / А. А. Чиркунова // 69-я научно-техн. конф. проф.-препод. сост. СПбГЭТУ: Сборник докл., г. СПб, 26 янв. – 4 февр. 2016 г. – СПб: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016.– С. 26-29.

15. Чиркунова, А. А. Комбинирование спектральных диапазонов как метод повышения качества изображений объектов, маскированных фоном в [Текст] / А. А. Чиркунова // 18-я межд. конф. DSPA-2016, Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение (выпуск XVIII-2): Сборник докл., г. Москва, 28 – 30 апр. 2016 г. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2016.– С. 995-999.

16. Чиркунова, А. А. Модель малоконтрастного изображения при наблюдении удаленных объектов и объектов, находящихся в мутных средах [Текст] / А. А. Чиркунова // 13-я межд. конф. «Телевидение: передача и обработка изображений»: Материалы конф., г. СПб., 29 - 30 июня 2016 г. – СПб: изд-во ООО «Технолит». – 2016.– С. 43-46.