

На правах рукописи



Сконников Пётр Николаевич

**АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ В ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ
УЛУЧШЕННОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

Специальность:

2.2.13. – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2022

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина»

Научный
руководитель: **Дмитриев Владимир Тимурович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные
оппоненты: **Приоров Андрей Леонидович**
Доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет
им. П.Г. Демидова»
Профессор кафедры инфокоммуникаций и радиофизики

Привезенцев Денис Геннадьевич
Кандидат технических наук, доцент
Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»
Доцент кафедры САПР

Ведущая
организация: **АО «Научно-производственное объединение
Государственный институт прикладной оптики»**
г. Казань

Защита состоится «03» июня 2022 г. в 12 часов на заседании диссертацион-
ного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехниче-
ский университет им. В. Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина,
д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государ-
ственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» и на официальном сайте
университета <http://www.rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять
по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент

Г. В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных пилотируемых и беспилотных аппаратах при проведении поисково-спасательных работ применяются телевизионные системы улучшенного видения (СУВ), выполняющие обработку и отображение информации о закабинном пространстве. Круглосуточная и всепогодная работа таких систем осложняется в тёмное время суток недостаточной освещённостью, при неблагоприятной метеорологической обстановке – присутствием осадков (дождь, снег, туман) а при специфических условиях применения (например, при работе вблизи очагов лесных пожаров) – наличием дыма. Для повышения качества изображения в условиях недостаточной видимости, вызванных действием указанных факторов, в таких системах совместно с телевизионными устройствами получения видеоинформации применяются сенсоры различных спектральных диапазонов. Наиболее широкое распространение в многоспектральных СУВ находят сенсоры ближнего, коротковолнового и длинноволнового инфракрасных диапазонов.

В СУВ информация, поступающая от телевизионной камеры, дополненной одним или несколькими сенсорами инфракрасных диапазонов, визуализируется и представляется оператору. При этом данная видеоинформация может как передаваться оператору при помощи радиосвязи, так и отображаться непосредственно на борту пилотируемого аппарата.

В обоих случаях целесообразно применять комплексирование кадров видеопоследовательностей, поступающих с сенсоров различных спектральных диапазонов, по двум причинам. Во-первых, при передаче комплексированных изображений при помощи радиоканалов требуется меньшая скорость передачи информации по сравнению с передачей кадров всех диапазонов, а, следовательно, при равной помехоустойчивости, и меньшая ширина занимаемой радиосигналом полосы частот. Во-вторых, отображение на едином телевизионном изображении информации, поступающей от различных сенсоров, снижает нагрузку на оператора.

Таким образом, комплексирование изображений различных спектральных диапазонов является неотъемлемым этапом обработки видеоинформации, необходимым для круглосуточного и всепогодного проведения поисково-спасательных работ.

Степень разработанности темы. Задачам комплексирования и оценки качества комплексирования изображений различных спектральных диапазонов, а также сопряжённым с ними задачам цифровой обработки изображений посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей и учёных. В их числе: Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, В. Н. Дрынкин, М. А. Бондаренко,

А. В. Бондаренко, Б. А. Алпатов, В. К. Злобин, В. В. Еремеев, В. А. Сойфер, В. В. Инсаров, Н. Н. Красильников, А. А. Потапов, А. С. Васильев, а также R. C. Gonzalez, R. E. Woods, R. Szeliski, T. Stathaki, R. S. Blum, W. K. Pratt, Y. Zheng, A. K. Jain, L. Shapiro, D. A. Forsyth и другие.

В настоящее время разработано большое количество алгоритмов комплексирования (АК) изображений различных спектральных диапазонов (ИРСД). Некоторые алгоритмы предназначены для навигации воздушных судов и, в первую очередь, обеспечения видимости взлётно-посадочной полосы. Зачастую в таких приложениях АК оказывается достаточно отобразить только один наиболее информативный канал, на котором отчётливо различимы основные ориентиры, пусть даже и с потерей некоторой информации, поступающей от остальных каналов. Также в задачах обеспечения видимости взлётно-посадочной полосы может происходить потеря информации при выборе только двух наиболее информативных каналов из трёх имеющихся. В задачах, связанных с мониторингом тепловых потерь, приоритетной задачей является сохранение теплового контраста. Значительная часть АК носит универсальный характер и не имеет чёткой формализации задачи. Некоторые АК используются для комплексирования медицинских снимков или уменьшения влияния помех по серии кадров.

При этом специальный АК ИРСД для проведения поисково-спасательных работ не разработан, а вопросы возможности использования известных АК и качества их работы применительно к решаемой задаче не исследованы.

Цель работы и основные задачи. Целью работы является повышение качества комплексирования изображений различных спектральных диапазонов в телевизионных системах улучшенного видения, используемых при проведении поисково-спасательных работ.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- сформулировать цель комплексирования и требования к АК ИРСД в соответствии с особенностями его применения;
- обосновать объективный показатель качества (ОПК) комплексирования ИРСД, в наибольшей мере согласованный с целью комплексирования;
- разработать АК ИРСД в соответствии с установленными требованиями и целью комплексирования;
- оптимизировать параметры разработанного АК ИРСД для обеспечения наивысшего значения обоснованного ОПК;

- оценить возможность реализации разработанного АК ИРСД в режиме реального времени;
- оценить качество работы известных АК ИРСД с учётом условий применения, то есть сравнить разработанный и известные алгоритмы по обоснованному показателю качества.

Научная новизна. В ходе настоящей работы получены следующие новые научные результаты:

- разработана процедура оценки степени соответствия объективных показателей и неявно формализованных критериев качества комплексирования изображений;
- обоснован новый ОПК комплексирования ИРСД;
- предложен АК ИРСД, оптимальный по обоснованному ОПК;
- получены качественные характеристики предложенного и известных АК ИРСД по новому ОПК.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанный АК ИРСД соответствует всем предъявленным требованиям, экспериментальные исследования подтвердили его высокую эффективность по обоснованному ОПК. Показана возможность реализации данного АК ИРСД в режиме реального времени.

Таким образом, разработанный алгоритм может применяться в СУВ при проведении поисково-спасательных работ для обеспечения круглосуточного и всепогодного видения.

Предложенная процедура оценки степени соответствия объективных показателей и неявно формализованных критериев качества комплексирования изображений позволяет получать для различных приложений собственные ОПК комплексирования ИРСД, которые, в свою очередь, могут быть использованы для разработки, оптимизации и сравнения различных АК ИРСД.

На основе разработанных в настоящей диссертационной работе алгоритмов и сделанных теоретических выводов достигнуты практические результаты в научно-конструкторском центре видеоинформационных и лазерных технологий (НКЦ ВЛТ) в составе АО «РИФ». Предложенный АК ИРСД на основе локального весового суммирования и новый комбинированный ОПК комплексирования ИРСД нашли практическое применение в двух работах АО «РИФ». Теоретическая и практическая значимость работы подтверждена соответствующим актом о внедрении результатов диссертации.

Методология и методы исследования. В настоящей работе использовались следующие математические методы: регрессионный анализ, статистический анализ,

численные методы многомерной оптимизации, методы цифровой обработки изображений, в том числе корреляционный анализ, применение детекторов краёв, приложения теории информации. Кроме того, проводились субъективные оценки и экспериментальные исследования качества комплексирования ИРСД.

Положения, выносимые на защиту. По результатам настоящей работы на защиту выносятся три положения:

1) разработанная процедура сопоставления объективных показателей неявно формализованным критериям качества комплексирования изображений позволила сравнить известные объективные показатели качества комплексирования изображений; выявлен объективный показатель качества, для которого точность соответствия субъективной оценке достигает значения 0,71, что соответствует инструкции Международного союза электросвязи;

2) обоснованный объективный показатель качества комплексирования изображений имеет значения точности соответствия субъективной оценке 0,73, а монотонности – 0,62; для определённого набора сцен выигрыш в точности по сравнению с известным показателем качества составляет в среднем 21,6 %;

3) разработанный алгоритм комплексирования изображений различных спектральных диапазонов, основанный на локальном весовом суммировании, реализуем в режиме реального времени и превосходит известные алгоритмы по качественным и количественным показателям (достигнуто значение комбинированного показателя качества 0,845).

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты, полученные в ходе настоящей работы, обсуждались на 11 научно-технических конференциях: XXIII Всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2018); XXI Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (Москва, 2019); Международная IEEE-сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2019 (Томск, 2019); Всероссийская научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления» (Москва, 2019); IV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2019); IV Международная научная конференция «Арктика: история и современность» (Санкт-Петербург, 2019); XXIV Всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2019); XXII Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (Москва, 2020); XXV юбилейная Всероссийская научно-техническая кон-

ференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2020); XXIV Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир, 2021); XXVI Всероссийская научно-техническая «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2021).

По результатам, полученным в диссертации, опубликовано 16 работ, из них 4 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, и ещё 2 работы проиндексированы в базах Scopus и Web of Science. Всего автором диссертации опубликовано 26 работы, из которых 4 – в научных журналах из перечня ВАК и ещё 5 проиндексированы в базах Scopus и Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трёх структурированных глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 160 страниц, содержащих 18 рисунков и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 140 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена решению вопросов субъективных оценок и анализу объективных показателей качества (ОПК) комплексирования ИРСД. По результатам первой главы обоснован комбинированный ОПК комплексирования ИРСД, используемый в дальнейшем для оптимизации параметров разрабатываемого алгоритма комплексирования (АК) ИРСД и для сравнения предложенного и существующих АК ИРСД.

В начале первой главы рассмотрены 10 известных ОПК: на основе метрики Пиеллы, объёма восприятия, общей информации (MI), общих особенностей (FMI, FAST-FMI), суммы корреляций разностных изображений, качества краёв, индекса структурного сходства (UIQI, SSIM). При помощи разложения некоторых из перечисленных ОПК на составные части представлены ещё 10 дополнительных ОПК. Каждый из этих ОПК был программно реализован для дальнейших экспериментальных исследований.

Далее на основе стандартов (ГОСТов) и рекомендаций Международного союза электросвязи, регламентирующих проведение субъективных оценок качества (СОК) отдельных изображений, обоснована процедура оценки степени соответствия объективных показателей и неявно формализованных критериев качества комплексирова-

ния изображений, выносимая на защиту. Данная процедура может быть сокращённо представлена следующим образом:

1) формируется набор троек тестовых изображений (ТТИ), включающий наилучшие, наихудшие, средние и медианные результаты комплексирования по каждому из используемых ОПК, а также такие изображения, которые в различной степени субъективно характеризуются следующими параметрами: степень заметности объектов на изображениях, взаимные сходство или отличие комплексированного и исходных изображений, наличие или отсутствие мешающих факторов, общее качество изображений;

2) изображения, формирующие каждую ТТИ, подготавливаются для одновременного представления на сером фоне;

3) из полученного набора отбираются ТТИ, используемые для дальнейшего инструктажа, а также тренировочная и установочная последовательности;

4) в оставшийся тренировочный набор вносятся дублирующие ТТИ для выявления наблюдателей, выставяющих непредставительные оценки;

5) набор ТТИ разбивается на сессии таким образом, чтобы при заданном времени анализа одной ТТИ общее время сессии не превышало 30 минут;

6) формируется группа наблюдателей;

7) производится инструктаж наблюдателей, в ходе которого участникам СОК разъясняются цель и методика СОК, распорядок, количество и длительность сеансов, шкала оценки, разъясняются критерии оценки;

8) проводится предварительная СОК, полученные оценки анализируются и обсуждаются с инструктором. Оценки по предварительной СОК не учитываются;

9) проводятся основные сессии СОК;

10) производится обработка результатов СОК, то есть, в простейшем случае, усреднение полученных результатов по оценкам различных участников;

11) вычисляются значения всех исследуемых ОПК для того же набора ТТИ, что использовался в СОК;

12) производится аппроксимация зависимости значений ОПК от соответствующих значений СОК;

13) с использованием полученной аппроксимации компенсируется нелинейность данной зависимости;

14) для полученного набора значений ОПК с компенсированной нелинейностью и значений СОК рассчитываются характеристики соответствия: точность, монотонность, несогласованность. Показатель точности ρ_p определяется по формуле:

$$\rho_P = \frac{\sum_{n=1}^N w_n (Q_0^n - \bar{Q}_0) (f(Q_k^n | \beta_k) - \bar{f}_k)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N w_n (Q_0^n - \bar{Q}_0)^2 \sum_{n=1}^N w_n (f(Q_k^n | \beta_k) - \bar{f}_k)^2}}, \quad (1)$$

где Q_0^n и Q_k^n – соответственно значения СОК и ОПК после компенсации нелинейной составляющей, w_n – весовые коэффициенты, β_k – вектор параметров аппроксимирующей функции f . Для компенсации нелинейной составляющей использовался метод нелинейной весовой регрессии с аппроксимацией зависимости СОК от ОПК тремя различными параметрическими кривыми, среди которых наилучшие результаты показала логистическая кривая с четырьмя параметрами $\{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$:

$$f(q | \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}) = \frac{\beta_1}{1 + \exp(-\beta_2(q - \beta_3))} + \beta_4, \quad (2)$$

Монотонность соответствия ОПК и СОК определялась с помощью модифицированного коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Несогласованность ОПК рассчитывалась как отношение количества «выбросов» к общему количеству ТТИ, причём пара значений Q_0^n и $f(Q_k^n | \beta_k)$ считается «выбросом», если модуль невязки, соответствующей этой паре, превосходит удвоенное среднеквадратическое отклонение текущей СОК.

С использованием данной процедуры определены ОПК, в наибольшей мере соответствующие результатам проведённой СОК по точности и монотонности при малом уровне несогласованности. Показано, что такими ОПК являются показатели на основе отдельных компонент метрики Пиеллы, рассчитанные для карт модулей градиентов яркостей входных изображений.

Выявленные наилучшие ОПК $Q_{18} \div Q_{20}$ объединены в комбинированный ОПК для дополнительного увеличения соответствия СОК. При этом для того, чтобы определить не только веса соответствующих ОПК, но и способ объединения данных ОПК, использовался полином вида:

$$Q_C = a_1 Q_{20} + a_2 Q_{19} + a_3 Q_{19} Q_{20} + a_4 Q_{18} + a_5 Q_{18} Q_{20} + a_6 Q_{18} Q_{19} + a_7 Q_{18} Q_{19} Q_{20}, \quad (3)$$

где $a_1 \div a_7$ – весовые коэффициенты.

При помощи оптимизация весов $a_1 \div a_7$ по критерию максимизации точности соответствия комбинированного ОПК субъективной оценке получены оптимальные значения: $a_1 = 0,236$, $a_4 = 0,764$, а остальные компоненты отброшены как незначительные. В ходе оптимизации показатель точности ρ_P рассчитывался на каждой ите-

рации после коррекции вектора параметров $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_7\}$ и расчёта новых значений Q_c .

Полученный таким образом комбинированный ОПК обладает высокими характеристиками точности и монотонности и низким уровнем несогласованности соответствия СОК (0,73, 0,62, и 0,027, соответственно). Данные значения являются наилучшими среди всех рассмотренных ОПК по точности и монотонности при низком уровне несогласованности.

Для того, чтобы получить степень соответствия ОПК субъективной оценке для наихудших случаев, а не усреднённую по всей базе, был проведён дополнительный эксперимент, в котором под наихудшими случаями понимались ситуации, когда расхождения значений ОПК и СОК были максимальны. В таких ситуациях точность соответствия СОК предложенному комбинированному показателю Q_c составляет 0,62, а известному показателю $Q_{18} - 0,51$, то есть в сложных ситуациях предложенный ОПК имеет на 21,6 % большую точность соответствия СОК, чем известный ОПК, что подтверждает второе положение, выносимое на защиту.

Во второй главе предложена общая структура АК ИРСД, не зависящая от выбора значений постоянных параметров и вида весовых функций, используемых в данном АК.

Представленный алгоритм включает:

- 1) выбор размера фрагмента S_w ;
- 2) разбиение исходных изображений на фрагменты;
- 3) расчёт весовых коэффициентов фрагментов;
- 4) фильтрацию карт весов во времени (опционально);
- 5) масштабирование и сглаживание карт весов;
- 6) нормировку карт весов Ω_b ;
- 7) весовое суммирование исходных изображений с использованием полученных карт весов.

Функциональная схема предлагаемого АК ИРСД показана на рисунке 1.

На вход предлагаемого алгоритма поступают совмещённые геометрически ИРСД I_b . В блоках 3–3' производится автоматический анализ размеров присутствующих объектов и выбор размеров фрагментов, которые на следующем этапе выделяются на изображениях. Процедура, выполняющая такой анализ, основана на расчёте энергетического спектра изображения с подавлением постоянной составля-

ющей. Определение верхней частоты производится путём последовательного увеличения размера f_{\max} квадратной области пространственных частот до тех пор, пока сумма элементов этой области не превысит часть λ от суммы всех элементов спектра w_b , то есть пока не выполнится условие:

$$\sum_{f_x=0}^{f_{\max}} \sum_{f_y=0}^{f_{\max}} w_b(f_x, f_y) > \lambda \sum_{f_x=0}^{\lfloor S_x/2 \rfloor} \sum_{f_y=0}^{\lfloor S_y/2 \rfloor} w_b(f_x, f_y). \quad (4)$$

Коэффициент размера фрагмента K_w , определяющий, во сколько раз размер фрагмента превышает размер объектов, определяется в главе 3. В блоках 4–4' производится разбиение входных изображений на фрагменты, охватывающие всё поле изображения и взаимно перекрывающиеся не менее чем на половину размера фрагмента, причём размер фрагментов в различных каналах может отличаться.

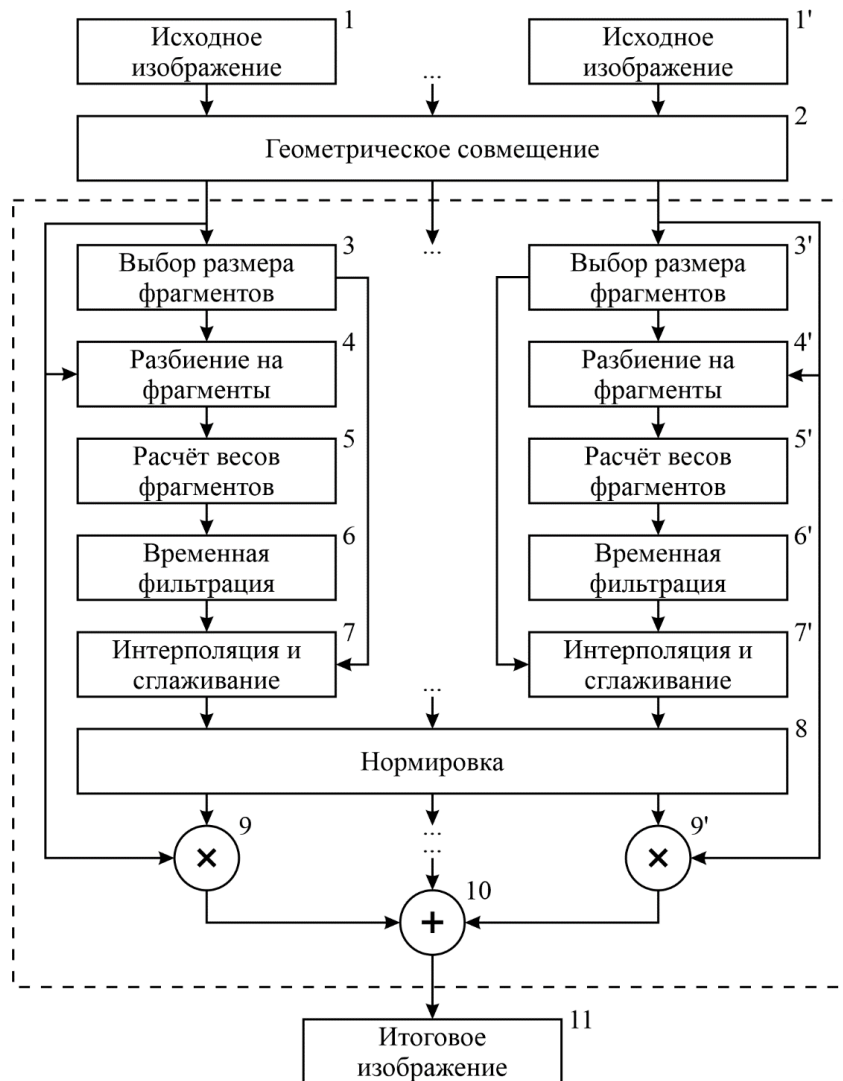


Рисунок 1 — Функциональная схема алгоритма комплексирования изображений различных спектральных диапазонов

В блоках 5–5' для всех фрагментов рассчитываются весовые коэффициенты, определяющие в дальнейшем степень вклада различных участков изображений каждого канала в результирующее изображение. Во второй главе предложено 8 способов определения весовых коэффициентов, основанных на безэталонных ОПК изображений, а выбор наилучшей весовой функции осуществлён в главе 3. В блоках 6–6' производится временная фильтрация карт весовых коэффициентов. В блоках 7–7' совместно производится увеличение и сглаживание данных карт. В ходе предложенной процедуры карты весовых коэффициентов преобразуются к размеру входных изображений и сглаживаются для уменьшения резких пространственных изменений. Коэффициент размера фильтра K_F , равный отношению размера фильтра и размера окна, определяется в главе 3. В блоках 8–8' производится попиксельная нормировка наборов весовых коэффициентов различных каналов. Заключительным этапом предложенного АК ИРСД является весовое суммирование входных изображений:

$$I_C(x, y) = \sum_{b=1}^B I_b(x, y) \Omega_b(x, y). \quad (5)$$

Проведён анализ использования следующих функций, определяющих весовые коэффициенты:

- 1) первый абсолютный центральный момент элементов фрагмента;
- 2) второй центральный момент яркости (дисперсия);
- 3) количественная характеристика горизонтальных перепадов яркости;
- 4) дисперсия элементов после свёртки изображения с лапласианом;
- 5) дисперсия квадрата градиента Собела;
- 6) ширина диапазона значений яркости после медианной фильтрации;
- 7) оценка информативной составляющей пикселей фрагмента.

Кроме того, во второй главе предложен ряд модификаций разработанного АК ИРСД, направленных на уменьшение вычислительной сложности, на ослабление эффекта потери контрастности, характерного для специфических сцен, и на использование АК при наличии цветного видеоизображения.

В третьей главе параметры предложенного в главе 2 АК ИРСД оптимизированы по комбинированному ОПК Q_C , обоснованному в главе 1. Кроме того, произведено сравнение предложенного и известных АК ИРСД по данному ОПК.

В начале третьей главы описаны решения по созданию расширенной базы ТТИ, на которых производились дальнейшие экспериментальные исследования.

Далее для каждой из рассмотренных весовых функций изменялись параметры K_w и K_G , подлежащие оптимизации. При помощи разработанного АК для каждой пары ИРСД из расширенной базы рассчитывались результаты комплексирования, полученных при различных весовых функциях f и значениях параметров K_w и K_G . Для каждого из более чем 50 тысяч полученных изображений рассчитывались значения комбинированного ОПК. Кроме того, засекалось время, необходимое для получения результирующего изображения.

Для каждой весовой функции f рассчитано усреднённое $\langle \bar{Q}_c \rangle$ и максимальное $\bar{Q}_{c \max}$ по параметрам K_w и K_G значение комбинированного ОПК, а также усреднённое $\langle \bar{t} \rangle$ и минимальное \bar{t}_{\min} время на комплексирование. Полученные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение качества и времени комплексирования изображений при использовании различных весовых функций

Весовая функция f	Усреднённое качество комплексирования $\langle \bar{Q}_c \rangle$	Максимальное качество комплексирования $\bar{Q}_{c \max}$	Усреднённое время на комплексирование $\langle \bar{t} \rangle$, с	Минимальное время на комплексирование \bar{t}_{\min} , с
f_1	0,8330	0,8422	0,6106	0,1494
f_2	0,8322	0,8449	0,6100	0,1517
f_3	0,8466	0,8498	0,5804	0,1399
f_4	0,8432	0,8449	0,5807	0,1393
f_5	0,8475	0,8530	0,5818	0,1410
f_6	0,8111	0,8292	0,5829	0,1417
f_7	0,8468	0,8536	0,5902	0,1439

По результатам сравнения качества комплексирования ИРСД с применением различных весовых функций с различными значениями параметров K_w и K_F сделан вывод, что наилучшее качество комплексирования Q_c при низких вычислительных затратах обеспечивает весовая функция, представляющая собой дисперсию квадрата градиента яркости ∂W :

$$f_5(W) = \frac{1}{(S_w)^2 - 1} \sum_{i=1}^{S_w} \sum_{j=1}^{S_w} (\partial W(i, j) - \overline{\partial W})^2. \quad (6)$$

Весовая функция f_7 (оценка информативной составляющей пикселей фрагмента) показала аналогичные функции f_5 , показатели эффективности, но была отброшена как принципиально более сложная.

Для выбора значений K_w и K_G были получены зависимости качества комплексирования Q_c и среднего времени t , затрачиваемого на обработку, от параметров K_w и K_G . Данные зависимости приведены на рисунке 2.

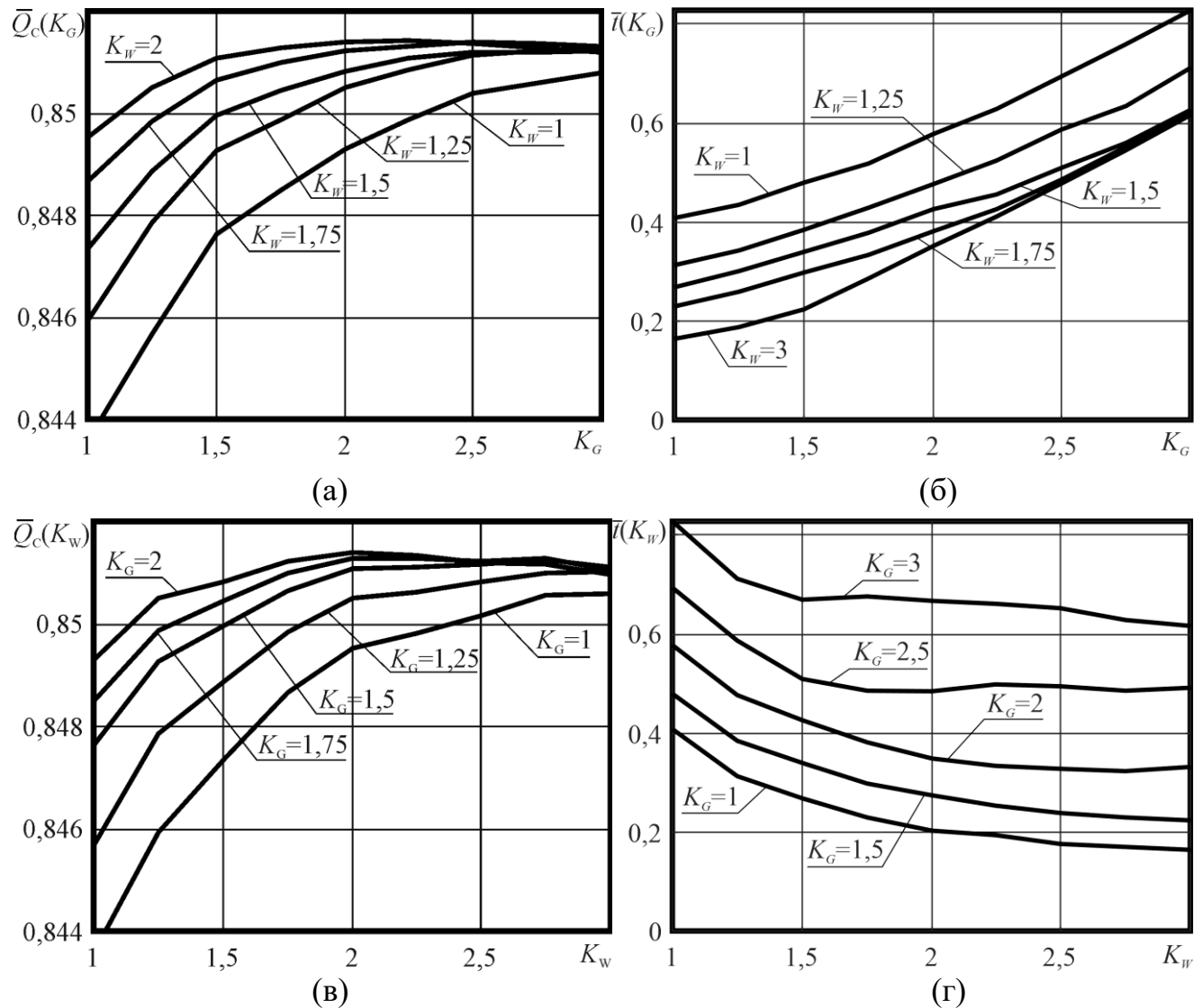


Рисунок 2 — Зависимости качества комплексирования Q_c и времени на обработку t от коэффициента размера фильтра K_G при различных значениях коэффициента размера окна K_w

Из анализа данных зависимостей следует, что заданного качества Q_c комплексирования ИРСД при помощи разработанного АК можно достичь при различных комбинациях параметров K_w и K_G в рассмотренных пределах, но при этом

наименьшего времени на вычисления потребует такая комбинация параметров, при которой коэффициент K_G имеет минимальное значение. Отсюда следует, что для максимизации качества Q_C и одновременной минимизации времени на комплексирование необходимо принять минимально возможное значение параметра K_G (то есть $K_G = 1$) и определить оптимальное значение параметра K_w . По результатам такой оптимизации получено оптимальное значение $K_w = 3$.

Исследование быстродействия данного алгоритма, реализованного на ПК в среде MATLAB показало, что данный АК обеспечивает частоту кадров более 26 кадр./с для видеоизображений размером 640×480 пикселей.

После определения наилучшей весовой функции и оптимальных значений параметров было проведено сравнение качества комплексирования предложенным и известными АК ИРСД. Результаты сравнения приведены в таблице 2:

Таблица 2 — Показатели качества комплексирования изображений

Алгоритм комплексирования	Q_C без коррекции контрастности	Q_C с коррекцией контрастности
Усреднение	0,812	0,830
Анализ НЧ и ВЧ составляющих	0,796	0,815
Оценка информативности	0,834	0,839
Добавление отличий	0,720	0,724
Выделение локальных контрастов	0,752	0,752
Пирамида Лапласа	0,838	0,831
Вейвлет-преобразование	0,806	0,800
Анализ главных компонент	0,840	0,840
Трёхмерный фильтр нижних частот	0,780	0,797
Метод максимума	0,659	0,675
Степенное преобразование	0,506	0,687
Приоритет телевизионного канала	0,820	0,819
Морфология Пытьева	0,778	0,808
Диффузная морфология	0,800	0,797
Предложенный алгоритм	0,845	0,844

Из данной таблицы следует, что предложенный алгоритм превосходит известные АК по обоснованному ОПК, что подтверждает третье положение, выносимое на защиту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

- обоснована процедура оценки степени соответствия объективных показателей и неявно формализованных критериев качества комплексирования изображений;
- проведено сопоставление 20 ОПК комплексирования ИРСД с результатами субъективной оценки, наиболее эффективные ОПК комплексирования изображений объединены в комбинированный показатель качества;
- по результатам двухэтапной оптимизации параметров комбинированного ОПК получены значения точности соответствия субъективной оценке 0,73, монотонности – 0,62 и несогласованности – 2,7 %;
- разработан АК неограниченного количества ИРСД, адаптивный к изменениям наблюдаемой сцены, и автоматически изменяющий свои параметры в результате анализа комплексируемых изображений;
- разработана процедура автоматического определения каналов, требующих инверсии;
- совместно оптимизированы значения двух параметров разработанного АК: коэффициента размера окна и коэффициента размера фильтра; выбрана наилучшая весовая функция из семи рассмотренных; оптимизация произведена по объективному показателю качества комплексирования с учётом времени, требуемого на вычисления;
- проведено сравнение результатов комплексирования ИРСД предложенным и известными алгоритмами; разработанный алгоритм показал наилучшее усреднённое качество комплексирования и высокий уровень устойчивости качества.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Кириллов, С. Н. Сравнение алгоритмов улучшения низкоконтрастных изображений и оценок качества комплексирования разноспектральных изображений для цифровых систем видеонаблюдения / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников, А. А. Бауков // Цифровая обработка сигналов. – 2019.– № 1.– С. 52-58.
2. Кириллов, С. Н. Алгоритмы формирования телевизионного изображения улучшенного качества для дистанционного управления робототехническими комплексами / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, А. А. Бауков, П. Н. Сконников // Радиотехника. – 2019.– Т. 83.– № 5(II). – С. 205-214.

3. Кириллов, С. Н. Процедура определения размеров окон для алгоритма локального весового суммирования мультиспектральных изображений / С. Н. Кириллов, П. Н. Сконников // Вестник РГРТУ. – 2020. – № 73. – С. 3-9.

4. Дмитриев, В. Т. Сравнительный анализ алгоритмов комплексирования изображений различных спектральных диапазонов / В. Т. Дмитриев, П. Н. Сконников // Вестник РГРТУ. – 2021. – № 78. – С. 29-37.

Работы, входящие в базы данных Web of Science и Scopus:

5. Kirillov, S. Contrast Enhancement Algorithm Modification and Comparative Analysis of Image Fusion Quality Indices for Enhanced Vision Systems of Robotic Complexes / S. N. Kirillov, A. A. Baukov, P. S. Pokrovsky, P. N. Skonnikov // 2019 Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk: IEEE, 2019. – pp. 1-6.

6. Kirillov, S. N. Multispectral image processing algorithms for enhanced vision systems in the Arctic / S. N. Kirillov, P. S. Pokrovskij, A. A. Baukov, P. N. Skonnikov // 4th International Scientific Conference "Arctic: History and Modernity". – Saint Petersburg: IOP Publishing, 2019. – Vol. 302. – No. 1.– pp. 1-8.

Работы, опубликованные в других изданиях:

7. Кириллов, С. Н. Алгоритм комплексирования изображений видимого и инфракрасного диапазонов для систем дистанционного управления объектами / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников // НИТ-2018: мат. XXIII Всерос. науч.-тех. конф. – Рязань: РГРТУ, 2018. – Т. 1. – С. 117-118.

8. Кириллов, С. Н. Сравнение оценок качества комплексирования разноспектральных изображений и алгоритмы улучшения качества низкоконтрастных изображений для систем видеонаблюдения / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников, А. А. Бауков // 21-я Междунар. конф. «ДСРА-2019»: сб. докл. Кн. 2. – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2019. – С. 403-408.

9. Кириллов, С. Н. Алгоритм комплексирования телевизионного и инфракрасного изображений для систем улучшенного видения беспилотных летательных аппаратов / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников // ТЗСУ-2019: сб. тез. докл. научно-техн. конф. – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 32-33.

10. Кириллов, С. Н. Методика проведения субъективной оценки качества комплексирования изображений различных спектральных диапазонов / С. Н. Кириллов, П. Н. Сконников // Мат. IV Всерос. науч.-тех. конф. «АПСНИП-2019». – Рязань: РГРТУ, 2019. – С. 13-21.

11. Кириллов, С. Н. Сравнительный анализ показателей качества комплексирования изображений видимого и инфракрасного диапазонов для систем дистанцион-

ного управления объектами / С. Н. Кириллов, П. Н. Сконников // НИТ-2019: мат. XXIV Всерос. конф. – Рязань: РГРТУ, 2019. – Т. 1 – С. 102-103.

12. Кириллов, С. Н. Алгоритм комплексирования телевизионного и инфракрасного изображений для систем улучшенного видения беспилотных летательных аппаратов / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников // Техническое зрение. – 2019. – № 1(13). – С. 14-20.

13. Кириллов, С. Н. Оптимизация комбинированного объективного показателя качества комплексирования изображений различных спектральных диапазонов / С. Н. Кириллов, П. Н. Сконников // Сб. докл. 22-й Междунар. конф. «DSPА-2020». – Москва, 2020. – С. 592-596.

14. Сконников, П. Н. Модификация алгоритма весового суммирования изображений различных спектральных диапазонов для систем телеуправления / П. Н. Сконников // НИТ-2020: мат. XXV Юбил. Всерос. науч.-тех. конф. – Рязань: Book Jet, 2020. – С. 70-71.

15. Дмитриев, В. Т. Алгоритм комплексирования изображений различных спектральных диапазонов для систем улучшенного видения / В. Т. Дмитриев, П. Н. Сконников // ПТСПИ-2021: Мат. 14 междунар. науч.-тех. конф. – Владимир: ВлГУ. - 2021. – С. 233 - 236.

16. Сконников, П. Н. Сравнение алгоритмов комплексирования изображений различных спектральных диапазонов по комбинированному объективному показателю качества / П. Н. Сконников, В. Т. Дмитриев. НИТ-2021: мат. XXVI Всерос. науч.-тех. конф. – Рязань: Book Jet, 2021. – С. 77–78.

Сконников Пётр Николаевич

**АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ В ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ
УЛУЧШЕННОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ . ____ .2022 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.