

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина»

На правах рукописи



Сычев Алексей Сергеевич

***Комплексирование мультиспектральных изображений на основе
безэталонной оценки их качества***

Специальность: 2.2.13. Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (РГРТУ) на кафедре радиотехнических систем.

Научный руководитель:

Холопов Иван Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры радиотехнических систем
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Официальные оппоненты:

Приоров Андрей Леонидович,
доктор технических наук,
профессор Ярославского государственного
университета им. П.Г. Демидова, г. Ярославль

Бондаренко Максим Андреевич,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», г. Москва

Ведущая организация:


Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», г. Москва

Защита состоится 13 декабря 2024 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте университета <https://rsreu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. *Комплексирование изображений* является технологией повышения ситуационной осведомленности оператора летательного аппарата либо робототехнического комплекса, предназначенного для работы в условиях плохой и недостаточной видимости (тёмное время суток, сложные метеоусловия). Для реализации подобных технологий обработки данных применяют *мультиспектральные системы технического зрения (МСТЗ)*, включающие в себя датчики по крайней мере двух диапазонов оптического электромагнитного излучения: видимого и инфракрасного (тепловизионного).

Из-за различной природы формирования изображений, полученных в различных диапазонах, а также из-за различных физических принципов фиксации таких изображений их качество и информативность для субъективного наблюдателя (оператора системы) могут различаться. Если при этом типовые способы улучшения видения не обеспечивают требуемого уровня качества выходного изображения и его детализации хотя бы в одном из диапазонов оптического спектра, то комплексирование выполнять, как правило, целесообразно. В то же время при комплексировании изображений, одно из которых сильно зашумлено или смазано под действием низкого уровня освещённости, осадков, дымки в атмосфере, ухудшающих субъективно воспринимаемую информативность, деструктивные факторы негативно влияют на результат: комплексирование не только не обеспечивает повышения качества и детализации, а напротив, может давать результат даже худший, чем одно или несколько исходных изображений. Выработка критериев и разработка способов автоматического принятия решения о целесообразности комплексирования с выбором для него набора исходных изображений являются важными задачами по повышению ситуационной осведомленности конечных потребителей фото- и видеoinформации от МСТЗ.

Степень разработанности темы исследования. Методы и алгоритмы оценки качества с целью комплексирования мультиспектральных изображений зародились в конце 80-х — 90-х годах XX века. Так, предтечей развития мультиспектральных систем стали работы американского учёного Р. J. Burt (Политехнический институт Ренсселера в Нью-Йорке и Принстон в Нью-Джерси) в 1983-85 гг. В 1989 г. нидерландский исследователь института сенсорной физиологии А. Тоет одним из первых вынес в название публикации термин *«image fusion»* (англ. «слияние изображений») либо *«комплексирование изображений»*), ставший сегодня общепринятым.

Среди зарубежных исследователей в области обработки (в т.ч. комплексирования) гипер- и мультиспектральных изображений наиболее известны¹: D.L. Hall, J. Llinas, L.A. Klein, R.S. Blum, Z. Liu, T. Stathaki, I. Bloch, M.E. Liggins, H.B. Mitchell, A.A. Ursani, M.C. Mezouar, S. Chaudhuri, K. Kotwal, P. Marzullo, G. Mariani, L. Alparone, B. Aiazzi, C.H. Chen, E.A. Tusa Jumbo, C. Pohl,

1 Перечислены в хронологическом порядке опубликования работ.

J. Genderen, N. Chang, K. Bai, M.V. Joshi, K.P. Upla, C. Kuntner-Hannes, Y. Haemisch, A. Azarang, N. Kehtarnavaz, A.C. Bovik, A.K. Kuras, E. Kaba.

В России импульс развитию направления мультиспектрального видения дали в 2010-2013 гг. научные работы коллективов под руководством Ю.В. Визильтера в Государственном научно-исследовательском институте авиационных систем (ГосНИИАС) и Л.Н. Костяшкина в Научно-конструкторском центре видеокomпьютерных технологий (НКЦ ВКТ) акционерного общества «Государственный Рязанский приборный завод» (ГРПЗ). Большой вклад в разработку темы совместной обработки и комплексирования мультиспектральных изображений внесли также следующие отечественные исследователи²: В.К. Злобин, А.Э. Москвитин, В.В. Еремеев, В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков, М.С. Смагин, П.Н. Светелкин, Б.А. Алпатов, В.В. Стротов, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин, С.В. Антонущкина, А.А. Макаренков, Ю.А. Никишин, С.М. Михеев, О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, Ю.С. Бехтин, В.В. Инсаров, С.В. Тихонова, И.И. Михайлов, А.С. Васильев, А.В. Никоноров, М.А. Бондаренко, В.Н. Дрынкин, В.В. Шипко, А.И. Новиков, Д.В. Титов, А.А. Логинов, М.Б. Никифоров, О.В. Павлов, А.В. Воробьёв, П.Н. Сконников.

Зарубежными и отечественными учёными разработаны различные методы комплексирования изображений, обзор которых приведён в настоящей работе. В то же время слабо проработанной остаётся тема комплексирования изображений, качество которых различается в несколько раз из-за влияния в одном из диапазонов описанных выше деструктивных факторов.

Задача автоматической безэталонной оценки качества известна в области разработки систем технического зрения различного назначения. За рубежом способам её решения посвящены работы P.G.J. Barten, B.W. Keelan, I. Begin, W. Zhang, D. Kundu, H. Al-bandawi, S.S. Ghosh. Среди отечественных учёных существенный вклад в развитие данной тематики внесли³ В.А. Сойфер, В.В. Сергеев, С.Б. Попов, В.В. Мясников, А.В. Чернов, А.Л. Приоров, В.В. Хрящев, В.В. Старовойтов, А.П. Богданов, Ю.Н. Романов, А.К. Цыцулин, Д.Ю. Адамов, А.А. Манцветов, И.А. Зубакин, Н.Н. Пономаренко, И.С. Ненахов, М.А. Бондаренко, В.Н. Дрынкин, Ф.В. Старовойтов. В то же время слабо проработанным остаётся направление комплексной численной оценки качества для получения коррелирующих с субъективным восприятием значений.

Цель работы и основные задачи. Целью работы является разработка алгоритмов комплексирования мультиспектральных изображений для максимизации информативности результата для субъективного наблюдателя.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи:

- разработка алгоритма оценивания среднеквадратического отклонения (СКО) шума на изображении;
- разработка алгоритма оценивания информативности изображения;

2 Перечислены в хронологическом порядке опубликования работ.

3 Перечислены в хронологическом порядке опубликования работ.

- разработка алгоритма комплексирования мультиспектральных изображений, повышающего информативность результата посредством учёта оценок информативности исходных изображений, полученных в различных диапазонах оптического электромагнитного излучения.

Научная новизна. Результатами выполнения работы являются:

- новый алгоритм оценки СКО шума на изображении, основанный на параметрической оценке функции плотности распределения вероятностей (ФПРВ) значений локального среднеквадратического отклонения яркости изображения;
- новый численный безэталонный **показатель качества и информативности** цифровых полутоновых изображений;
- модификация алгоритма **комплексирования** методом главных компонент, повышающая отношение сигнал-шум (ОСШ) результирующего изображения;
- новый алгоритм комплексирования мультиспектральных изображений **методом главных компонент**, отличающийся тем, что низкочастотные компоненты исходных изображений комплексируют с весами, пропорциональными численной оценке качества и информативности соответствующих изображений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм оценки СКО белого гауссовского шума (БГШ) изображения на основе **локальной меры дисперсии GLVM** обеспечивает минимальную и в 1,3... 8,1 раза меньшую погрешность оценки по сравнению с методами аппроксимации автокорреляционной функции, гармонического анализа, медианным и блочными методами.
2. **Интегрально-мультипликативный показатель качества (ИМПК)** обеспечивает выигрыш в коэффициенте корреляции Спирмена с экспертными оценками качества в 3,7 раза по сравнению с интегральным показателем качества и в 2,4 раза — по сравнению с мультипликативным показателем качества.
3. Алгоритм комплексирования мультиспектральных изображений модифицированным **методом главных компонент** на основе **локальной меры дисперсии GLVM** обеспечивает выигрыш в ИМПК в среднем в 3,2 раза по сравнению с комплексированием посредством арифметического усреднения и в 2,1 раза — по сравнению с комплексированием методом главных компонент. Выигрыш в пиковом отношении сигнал-шум (ПОСШ) составляет в среднем 4,1 раза по сравнению с комплексированием посредством арифметического усреднения и 3,1 раза — по сравнению с комплексированием методом главных компонент.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.13. «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»:

6. Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости.

12. Разработка методов повышения четкости, качества цветопередачи, абсолютной и контрастной чувствительности изображений, формируемых и используемых в вещательных и прикладных системах телевидения.
16. Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических и телевизионных устройств и систем, включая черно-белые, цветные, спектрзональные, инфракрасные, терагерцовые и многоракурсные телевизионные системы, пассивные и активные системы объемного телевидения.
17. Разработка методов и устройств телевизионных измерений, включая колориметрию, количественную оценку качества формируемой, передаваемой и воспроизводимой видеоинформации.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертации внедрены:

- в разработки ООО «Квантрон Групп» в составе программно-аппаратного комплекса дефектоскопии проволочных фильтров и программного решения калибровки оптических сенсоров;
- в учебный процесс кафедры радиотехнических систем ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по дисциплине «Цифровая обработка изображений».

Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Методология и методы исследования. Настоящая работа использует как общенаучные методы эмпирического познания — с опорой на **индуктивный** и **диалектический**, так и множество специальных из таких областей науки, как линейная алгебра, дифференциальное исчисление, математическая статистика, цифровая обработка сигналов, программирование и т.д.

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным применением математического аппарата, результатами математического, имитационного и полунатурного моделирования.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на следующих конференциях:

1. Международный научно-технический форум «*Современные технологии в науке и образовании*» (СТНО), 2018-2023 гг. (г. Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина).
2. VI научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов АО «ГРПЗ» 2019 г. (г. Рязань, АО «Государственный Рязанский приборный завод»).
3. Семинар по последним достижениям в области вычислительных и инженерных методов в биомедицине и реабилитации «Средиземноморские встроенные вычисления» в Черногории, в Будве (*Workshop on Recent Advances in Computational and Engineering Methods in Biomedicine and Rehabilitation «Mediterranean Embedded Computing» (MECO), Budva, Montenegro*), 2020 и 2021 гг.
4. VII Международная конференция и молодежная школа «Информационные

технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2021, г. Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева).

5. 32-я Международная конференция по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения «ГрафиКон-2022», 2022 г. (г. Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, включая статьи и тезисы докладов внутривузовских, всероссийских и международных конференций. Из них 3 работы проиндексированы в международной базе научного цитирования Scopus, 1 работа — в Web of Science, 3 статьи опубликованы в изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, приложений, изложенных на 198 страницах (включая 68 рисунков и 13 таблиц). Список литературы содержит 176 наименований.

Основное содержание работы

Во введении показаны актуальность работы и степень разработанности темы, определены цель и задачи исследования, обоснована научная новизна полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы и публикациях, представлены структура и объём диссертации.

В первой главе диссертации описаны характерные черты изображений, получаемых в различных диапазонах оптического излучения, общие принципы формирования цифрового изображения и функционирования МСТЗ.

Выполнен обзор показателей качества цифровых изображений и алгоритмов комплексирования мультиспектральных изображений. Выделены два основных подхода к оценке качества изображений — *с использованием математических методов (автоматические оценки)* и субъективная оценка на основе *экспертных оценок* — и выполнена их классификация. Среди *автоматических оценок качества* различают *меры сравнения с эталоном и безэталонные*, в свою очередь подразделяемые на *частные и комплексные*. **Комплексный** показатель качества формирует значение оценки качества из нескольких *частных* и может представлять из себя их весовую сумму (*интегральный показатель качества*, ИПК) или произведение (*мультипликативный показатель качества*, МПК).

Выполнен обзор основных известных алгоритмов комплексирования мультиспектральных изображений оптического диапазона спектра электромагнитного излучения:

- методы максимума, маски, чересстрочного комплексирования; методы усреднения, весовой функции (весового суммирования), главных компонент, степенного преобразования;
- алгоритм комплексирования с приоритетом одного канала и адаптивного выбора наиболее информативных каналов;

- комплексирование с использованием сегментации изображения по значениям яркости, а также морфологическое комплексирование, основанное на гистограммной сегментации;
- на основе пирамид разложения исходных изображений и на основе вейвлет-разложения; на основе анализа низко- и высокочастотных составляющих изображений и на базе трёхмерного интерполирующего фильтра нижних частот;
- алгоритм комплексирования в псевдоцветах с учётом особенностей восприятия цветного изображения человеческим глазом.

Большинство известных алгоритмов комплексирования изображений использует слияние сигналов, получаемых в отдельных спектральных каналах, путём их поэлементного объединения, то есть объединение сигналов, получаемых для отдельных пикселей изображений. Также большое распространение получили алгоритмы комплексирования на основе **кратномасштабного разложения**. **Критериями локальной информативности** изображения на каждом уровне кратномасштабного разложения являются выбор максимального по модулю значения, в том числе в некоторой окрестности, и расчёт локальной дисперсии яркости, а мера соответствия (англ. «match measure») позволяет оценить корреляцию информативных для субъективного наблюдателя сигналов между различными каналами МСТЗ. Известные меры локальной информативности изображений не являются мерами их качества, что оказывает негативное влияние на качество результата комплексирования в случае значительного (в разы и более) отличия СКО шума и/или резкости изображений между различными каналами МСТЗ. По этой причине с целью повышения качества и информативности результата требуется разработка алгоритма комплексирования, учитывающего качество и информативность исходных изображений.

Во второй главе диссертации выполнен обзор существующих алгоритмов оценки СКО шума на изображении. Описана разработка нового алгоритма оценки на основе **локальной меры дисперсии «modified gray level variance» (GLVM)**. Показано, что его использование обеспечивает минимальную из всех исследованных методов среднеквадратическую ошибку оценивания.

Оценка СКО шума изображения возможна посредством формирования локальных оценок СКО. Для этого в области изображения, накрытой пространственной апертурой \mathbf{h} , выделим низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) компоненты, а также рассчитаем локальную дисперсию \mathbf{D} высокочастотной компоненты изображения — меру **GLVM** — и локальное СКО ВЧ-компоненты σ :

$$\mathbf{I}_{\text{НЧ}} = \mathbf{I} * \mathbf{h}, \quad \mathbf{I}_{\text{ВЧ}} = \mathbf{I} - \mathbf{I}_{\text{НЧ}}, \quad D_{\text{Пикс } ij} = I_{\text{ВЧ } ij}^2, \quad \mathbf{D} = \mathbf{D}_{\text{Пикс}} * \mathbf{h}, \quad \sigma_{ij} = \sqrt{D_{ij}}.$$

Распределение значений локального СКО должно быть далее аппроксимировано тем или иным законом распределения, а значение моды будет принято за СКО шума. Известно использование различных ФПРВ для аппроксимации распределений локальных показателей. Для их сравнения были оценены значения критерия согласия χ^2 для оценок локального СКО 17-и

мультиспектральных изображений, зафиксированных в 3-х диапазонах оптического излучения (51 изображение суммарно). Показателем качества аппроксимации выступали медиана значений χ^2 для каждого из распределений (таблица 1) и среднее время вычислений Δt . Для выполнения некоторых оценок необходима итерационная оптимизация вектора параметров распределения, из-за чего они требуют дополнительных затрат вычислительных ресурсов. Среди оценок, выполняемых на одном процессорном ядре за время порядка единиц миллисекунд, оценка свойств гамма-распределения в соответствии с описанным ниже методом обеспечивает минимальную ошибку по критерию χ^2 .

Таблица 1 — Медианные значения критерия согласия χ^2 и среднее время вычислений Δt аппроксимации значений локального СКО различными ФПРВ

	Функция распределения	χ^2	Δt , мс
а)	Гамма-распределение	0,032	0,99
б)	Распределение Рэлея	0,062	2,17
в)	Распределение Вейбулла	0,04	0,47
г)	Распределение Райса с итерационной оптимизацией	0,029	24,14
д)	Гамма-распределение с итерационной оптимизацией	0,024	18,36

Для аппроксимации распределения значений σ ФПРВ гамма-распределения вычислим оценки матожидания μ_Γ и дисперсии σ_Γ^2 выборки σ и получим параметры θ и k распределения, а также его моду, принимаемую за значение оценки СКО шума:

$$\theta = \sigma_\Gamma^2 / \mu_\Gamma, \quad k = \mu_\Gamma / \theta = \mu_\Gamma^2 / \sigma_\Gamma^2, \quad \sigma_{\text{он}\sqrt{\text{GLVM}}} = \begin{cases} (k-1)\theta, & k \geq 1, \\ 0, & k < 1. \end{cases}$$

Таким образом, алгоритм оценивания СКО шума на основе меры GLVM включает в себя следующие шаги:

- 1) расчёт значений локальной меры GLVM;
- 2) расчёт значений локального СКО яркости;
- 3) расчёт математического ожидания и СКО выборки значений СКО яркости;
- 4) расчёт соответствующей полученным на шаге 3) значениям моды гамма-распределения, принимаемой за значение оценки СКО шума.

Сравнение эффективности алгоритмов оценки СКО шума реализовано путём наложения на 16 изображений из набора «*TAMPERE17 noise-free image database*» модельного белого гауссовского шума с изменяющимся СКО, оценивания СКО шума различными методами и расчёта среднеквадратической ошибки полученных оценок. Значения средних ошибок оценок СКО различными методами приведены в таблице 2.

Из приведённых в таблице 2 значений следует, что алгоритм оценки СКО шума на основе локальной меры GLVM обеспечивает минимальную и в 1,3...8,1 раза меньшую среднеквадратическую ошибку оценки. Таким образом,

положение 1, выносимое на защиту, следует считать доказанным.

Таблица 2 — Средняя ошибка $\Delta\sigma$ между оценкой СКО шума и истинным значением СКО модельного БГШ, а также среднее время вычислений Δt

Алгоритм оценивания СКО шума изображения	$\Delta\sigma$	Δt , мс
1. По параболической аппроксимации АКФ $\sigma_{\text{оц. АКФ парабола}}$	3,02	18,9
2. Экспоненциальной аппроксимацией АКФ $\sigma_{\text{оц. АКФ Гаусс}}$	2,94	22,5
3. Дробно-рациональной аппроксимацией АКФ $\sigma_{\text{оц. АКФ др.рац}}$	2,86	22,7
4. По конусообразной аппроксимации АКФ $\sigma_{\text{оц. АКФ конус}}$	1,03	19,5
5. Посредством гармонического анализа результатов двумерного преобразования Фурье $\sigma_{\text{оц. гарм. ан}}$	4,97	54,4
6. Медианная оценка СКО шума $\sigma_{\text{оц. MAD}}$	1,84	17
7. По линейной разности векторных свёрток $\sigma_{\text{оц. ЛРВС}}$	2,45	2,3
8. Быстрой реализацией метода на основе линейной разности векторных свёрток $\sigma_{\text{оц. ЛРВС б}}$	3,12	1,6
9. Блочным методом $\sigma_{\text{оц. блочный}}$	0,77	2,2
10. На основе локальной меры дисперсии яркости GLVM $\sigma_{\text{оц.}\sqrt{\text{GLVM}}}$	0,61	7,7

Во второй главе также рассмотрена разработка нового комплексного безэталонного **интегрально-мультипликативного показателя качества** (ИМПК) цифровых полутонных изображений:

$$Q_{\text{ИМПК}} = L_Q(w_1 w(q) \sigma_{\text{ВЧн}}^* + w_2 \overline{K_{\text{ВЧ ср}}^*} + w_3 \overline{K_{\text{НЧ ср}}^*}),$$

где L_Q — **нормированная средняя яркость**, $\overline{K_{\text{ВЧ ср}}^*}$ и $\overline{K_{\text{НЧ ср}}^*}$ — скорректированные с учётом оценки СКО шума средние значения **высокочастотного контраста** внутри локальных квадратных блоков и **низкочастотного контраста** между блоками. Весовой коэффициент $w(q)$ учитывает степень искажения шумом малоразмерных деталей изображения и задан сигмоидальной зависимостью $w(q) = 1 - \exp(-0,2q^2)$ от **глобального ОСШ** $q = \sigma_{\text{ВЧ}}^* / \sigma_{\text{ш}}$, где $\sigma_{\text{ВЧ}}^*$ — **СКО ВЧ-компоненты изображения**, $\sigma_{\text{ш}}$ — **СКО шума**, оцениваемое одним из существующих методов. Коэффициенты w_1 , w_2 и w_3 определяют вес частных показателей в ИМПК.

Сравнение эффективности ИПК, МПК и ИМПК реализовано с использованием набора изображений «TID2013», включающего в себя эталонные изображения и результаты их искажения, полученные посредством применения к эталонам различных преобразований. Каждому изображению поставлена в соответствие **экспертная оценка качества** (от англ. MOS — «mean opinion score»). На рисунке 1 продемонстрировано, что значения ИМПК

коррелируют со значениями экспертных оценок качества изображений лучше, чем значения ИПК и МПК.

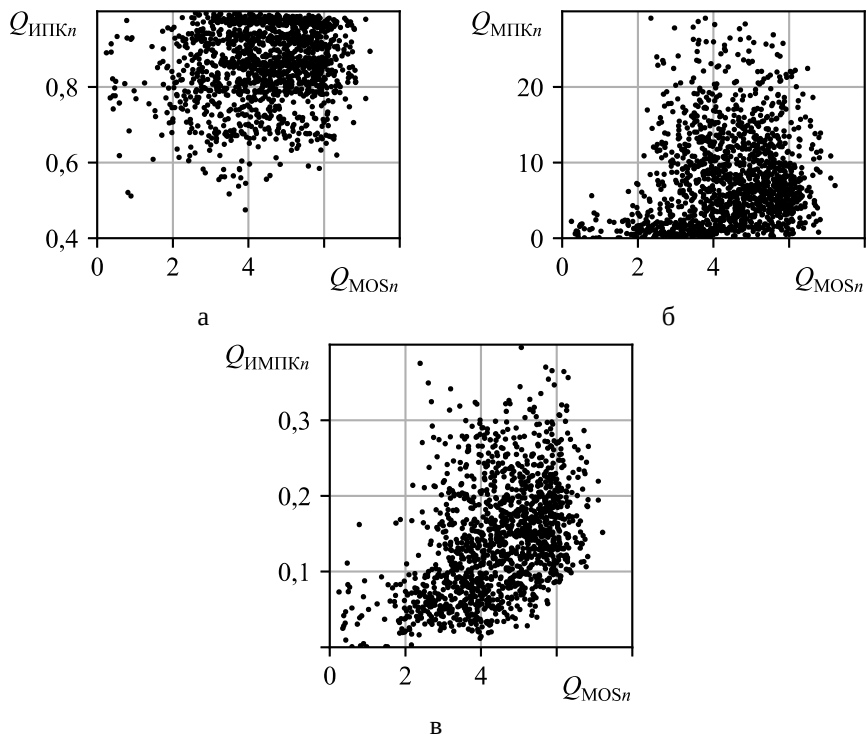


Рисунок 1 — Взаимное соответствие значений оценки качества MOS значениям автоматических оценок: ИПК (а), МПК (б), ИМПК (в)

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между значениями экспертных оценок качества изображений и значениями ИПК составил 0,12 (рисунок 1, а), МПК — 0,188 (рисунок 1, б), а ИМПК — 0,445 (рисунок 1, в). Следовательно, ИМПК обеспечивает выигрыш в корреляции значений автоматического и экспертного показателей в 3,7 раза по сравнению с ИПК и в 2,4 раза по сравнению с МПК. Эти значения подтверждают положение 2, выносимое на защиту.

Исследованные во второй главе алгоритмы оценки СКО шума изображения основаны на оценке статистических свойств ВЧ-компоненты изображения. ВЧ-составляющая может быть выделена с помощью медианной либо ВОХ-фильтрации, посредством поблочной оценки статистических свойств либо посредством оценки статистических свойств результатов преобразования изображения — автокорреляционной функции или двумерного дискретного спектра.

В третьей главе диссертации описана разработка алгоритмов

комплексирования изображений, адаптивных к качеству и информативности исходных изображений, полученных в различных диапазонах спектра оптического излучения. Описана разработка макета МСТЗ, на котором выполнено полунатурное моделирование работы МСТЗ.

Алгоритм комплексирования изображений на основе меры GLVM включает следующие основные этапы:

- 1) расчёт оценки локального СКО изображений;
- 2) оценка СКО шума изображений;
- 3) расчёт локального ОСШ (ЛОСШ) изображений;
- 4) нормировка ЛОСШ к сумме ЛОСШ исходных изображений;
- 5) ортогональное комплексирование методом главных компонент, в котором весами для ВЧ-компонент выступают нормированные локальные ОСШ.

На рисунке 2, а, б в графическом виде представлены зависимости соответственно ПОСШ и ИМПК результата комплексирования описываемым методом от аналогичных показателей качества результатов комплексирования арифметическим усреднением и методом главных компонент.

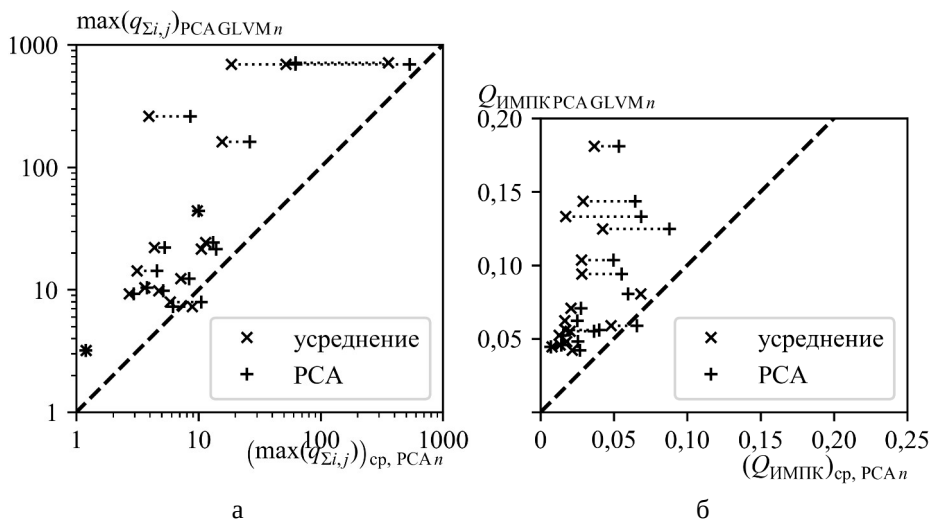


Рисунок 2 — Взаимное соответствие ПОСШ и ИМПК результатов комплексирования

Для каждого результата комплексирования мультиспектральных триад изображений рассчитано значение коэффициента улучшения $k = Q_{\text{PCA GLVM}} / Q_{\text{прототип}}$, где $Q_{\text{PCA GLVM}}$ — значение показателя для результата комплексирования алгоритмом автора, $Q_{\text{прототип}}$ — значение показателя для результата комплексирования алгоритмом, с которым выполнено сравнение. Среднее геометрическое коэффициента улучшения численных показателей качества приведено в таблице 3. Приведённые в таблице 3 значения подтверждают положение 3, выносимое на защиту.

Таблица 3 — Среднее геометрическое коэффициента улучшения ИМПК и ПОСШ изображений, являющихся результатом комплексирования модифицированным методом главных компонент по сравнению с альтернативными методами

Показатель	По сравнению с комплексированием посредством арифметического усреднения	По сравнению с комплексированием посредством метода главных компонент
$k_{\text{ПОСШ}}$	4,1	3,1
$k_{\text{ИМПК}}$	3,2	2,1

Способ комплексирования мультиспектральных изображений на основе ИМПК предназначен для уменьшения в результирующем изображении весовой доли изображений исходных каналов при ухудшении их качества. Для его применения необходимо рассчитать значения ИМПК исходных изображений, а на их основе — бинарные признаки включения исходных изображений в комплексирование по факту превышения порогового значения качества (0,08 или половина от максимального по всем диапазонам данного кадра), а после нормировать значения ИМПК к сумме значений:

$$Q_{\text{ИМПК норм}} = Q_{\text{ИМПК}} / \sum_{k=1}^L Q_{\text{ИМПК } k}$$

Для исходных изображений \mathbf{I}^k выполняют низкочастотную фильтрацию ВОХ-фильтром с апертурой 64×64 , результат низкочастотной фильтрации $\mathbf{I}_{\text{НЧ}}^k$ вычитают из \mathbf{I}^k , результатом является высокочастотная компонента каждого изображения $\mathbf{I}_{\text{ВЧ}}^k$. Для выполнения комплексирования методом главных компонент находят матрицу ковариации: $C_{m,n} = 1/(WH) \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W I_{\text{ВЧ } i,j}^m I_{\text{ВЧ } i,j}^n$, рассчитывают её собственные векторы λ и собственные значения Λ , а также главные компоненты комплекслируемых изображений $I_{\text{ГК } i,j}^m = \sum_{n=1}^L |\lambda_n^m| I_{\text{ВЧ } i,j}^n$, модуль значения которых дальше проходит через пространственный НЧ-фильтр большой апертуры \mathbf{h} :

$$I_{\text{ГК модуль } i,j}^m = |I_{\text{ГК } i,j}^m|, \quad \mathbf{I}_{\text{ГК смаз}}^m = \mathbf{I}_{\text{ГК модуль}}^m * \mathbf{h}$$

Необходимо выполнить нормировку результата НЧ-фильтрации к сумме значений, что превращает их в попиксельные весовые коэффициенты высокочастотной компоненты:

$$w_{\text{ГК } i,j}^m = k_{\text{вкл } m} I_{\text{ГК смаз } i,j}^m / \sum_{k=1}^L (k_{\text{вкл } k} I_{\text{ГК смаз } i,j}^k)$$

Результат комплексирования получают в соответствии с выражением:

$$I_{\Sigma i,j} = \sum_{m=1}^L k_{\text{вкл } m} \cdot (w_{\text{ГК } i,j}^m I_{\text{ВЧ } i,j}^m + Q_{\text{ИМПК норм } m} I_{\text{НЧ } i,j}^m) \quad (1)$$

На рисунке 3, а-в приведены изображения видимого, коротковолнового инфракрасного и тепловизионного диапазонов оптического электромагнитного излучения. На рисунке 3, г представлен результат комплексирования исходных изображений на основе меры GLVM, а на рисунке 3, д — способом (1).

Результаты комплексирования обоими способами имеют высокое качество. Так, рассчитанные ИМПК исходных изображений составили соответственно 0,068; 0,025 и 0,041. ИМПК результата комплексирования на основе GLVM составил 0,042, а способом (1) — 0,096. В обоих изображениях отсутствует заметная на рисунке 3, б помеховая составляющая, изображение на рисунке 3, д более информативно, чем на рисунке 3, г за счёт больших локальных контрастов отображения лесного массива и облачности в небе.

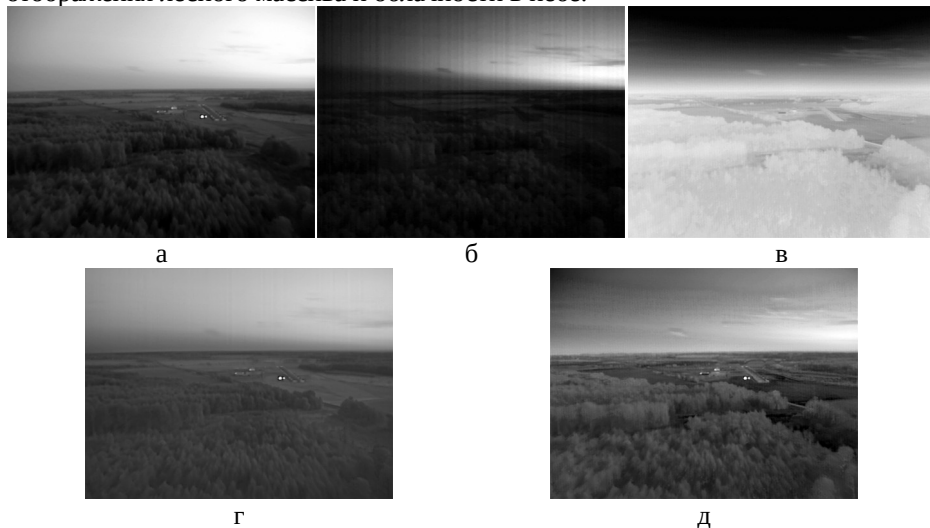


Рисунок 3 — Изображения трёх диапазонов оптического излучения: видимого (а), коротковолнового инфракрасного (б), тепловизионного (в); результат комплексирования исходных изображений на основе GLVM (г) и способом (1) (д)

Для проведения полунатурного эксперимента разработан макет МСТЗ, аппаратная часть которого включает в себя видеокамеру «Axis P1355-E» и тепловизор «Xenics Gobi 384» с интерфейсами Ethernet. Структурная схема макета и его внешний облик приведены на рис. 4, а, б. Для крепления камер на типовой штатив для фото- и видеоборудования применён специально разработанный конструктив адаптера-переходника.

Программная реализация алгоритмов обработки данных и имитационное моделирование работы МСТЗ выполнены с использованием интерпретируемого языка программирования Python 3.8 с применением популярных библиотек **Open CV** и **PyQt5**.

Разработанная в процессе работы над диссертацией «Программа синхронного захвата мультиспектрального видеоизображения с камер видимого и тепловизионного диапазонов» может быть использована для синхронного захвата видеок кадров с частотой 10 кадр/с. Её графический интерфейс пользователя показан на рисунке 5, а.

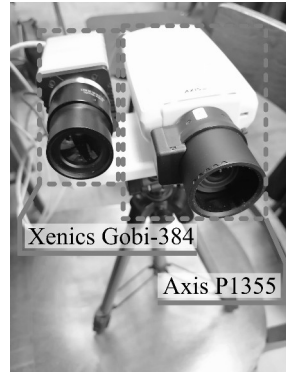
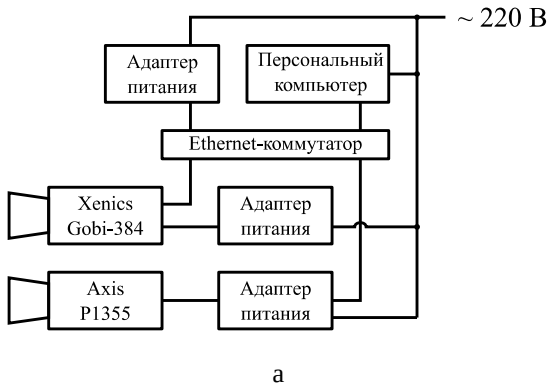


Рисунок 4 — Структурная схема (а) и внешний облик (б) макета МСТЗ

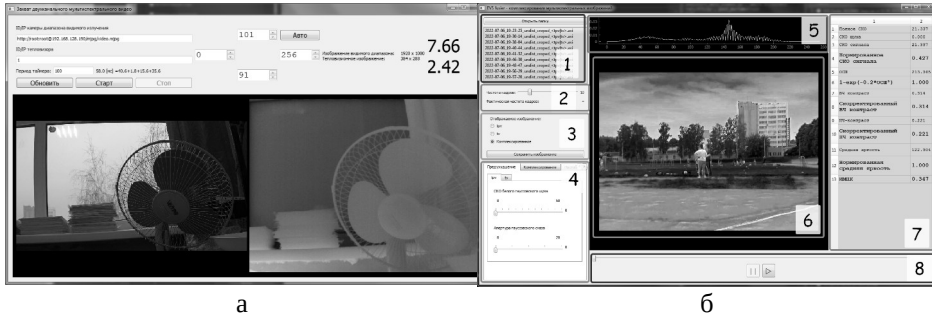


Рисунок 5 — Графический интерфейс пользователя разработанного ПО

Программа комплексирования и отображения мультиспектральных изображений «*EVS fusier*» предназначена для имитационного моделирования работы алгоритмов комплексирования мультиспектральных изображений. Её графический интерфейс пользователя включает в себя следующие элементы, обозначенные на рисунке 5, б областями 1 — 8.

1. Панель взаимодействия с файлами изображений и настройки параметров комплексирования и отображения: кнопка «Открыть папку» и панель выбора изображения из списка хранящихся в выбранной папке (*область 1*); отображаемые при обработке видеозаписей слайдер настройки желаемой частоты кадров (*область 2*) и слайдер перемещения по видеоролику с кнопками паузы и продолжения воспроизведения (*область 8*); панель выбора отображаемого на экране изображения с кнопкой «Сохранить изображение» (*область 3*); виджет настройки (*область 4*), включающий в себя панели «Предухудшение», «Комплексирование», «Постобработка».

2. Центральный виджет отображения изображения (*область 6*) и его гистограммы (*область 5*).

3. Панель отображения результатов расчёта ИМПК (*область 7*).

Рассмотренные в третьей главе алгоритмы комплексирования

предназначены для повышения качества и информативности результата комплексирования мультиспектральных изображений за счёт учёта качества и информативности каждого из исходных изображений МСТЗ, полученных в различных диапазонах оптического излучения.

Заключение

В заключении описаны основные результаты диссертационного исследования. В процессе выполнения работы автором успешно решены поставленные задачи. Получены следующие результаты.

1. Исследованы основные известные к сегодняшнему дню алгоритмы комплексирования мультиспектральных изображений. Показаны их недостатки, приводящие к ухудшению качества результата комплексирования по сравнению с результатами комплексирования другими методами либо по сравнению с изображением в одном из диапазонов оптического спектра.

2. Исследованы известные алгоритмы оценки СКО шума на изображении. Показаны общие черты алгоритмов и ограничения, существующие при безэталонной оценке статистических свойств шума натуральных (фотореалистичных) изображений.

3. Разработан новый алгоритм оценки СКО шума изображения на основе локальной меры дисперсии, обеспечивающий минимальную и в 1,3...8,1 раза меньшую погрешность оценки по сравнению с известными методами.

4. Исследованы известные алгоритмы оценки качества изображений. Показаны их недостатки, ограничивающие применимость для автоматического ранжирования изображений в МСТЗ.

5. Разработан новый интегрально-мультипликативный показатель качества цифрового полутонового изображения. Эффективность его работы доказана статистически — выигрышем в значении коэффициента ранговой корреляции Спирмена получаемых значений оценки со значениями экспертных оценок, составившим $2,4 \div 3,7$ раза в сравнении с известными методами. ИМПК предназначен для ранжирования изображений, получаемых в различных каналах МСТЗ, по численному критерию их качества и информативности с целью повышения качества и информативности результата комплексирования.

6. Предложена модификация метода главных компонент, повышающая ОСШ результата комплексирования. Выигрыш в ИМПК по сравнению с известными методами составил $2,1 \div 3,2$ раза. ПОСШ при этом выросло в $3,1 \div 4,1$ раза.

7. Предложен новый способ комплексирования мультиспектральных изображений на основе интегрально-мультипликативного показателя качества. Продемонстрировано преимущество ранжирования изображений, полученных от различных каналов МСТЗ, по критерию их информативности. Научная новизна разработанного алгоритма подтверждена патентом на способ комплексирования.

8. На языке программирования Python разработано программное обеспечение, реализующее полунатурное моделирование работы известных алгоритмов комплексирования мультиспектральных изображений.

Достоверность результатов исследования подтверждена в ходе полунатурных экспериментов с макетным образцом МСТЗ, включающим в себя видеокамеру, тепловизор и адаптер для их установки на штатив для видеооборудования, а также персональный компьютер с программным обеспечением синхронного захвата мультиспектрального видеоизображения с камер видимого и тепловизионного диапазонов, а также комплексирования и оценки качества.

Разработанное программное обеспечение открывает простор для его модификации с целью разработки и отладки способов и алгоритмов обработки мультиспектральных изображений с перспективой расширения на терагерцовый и ультрафиолетовый диапазоны электромагнитного излучения, в том числе комплексирования и оценки качества.

Автор выражает благодарность ведущему научному сотруднику ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ» Бондаренко М. А. за предоставленные наборы изображений видимого и инфракрасного диапазонов для проведения сопоставительного анализа ИМПК с нормированным показателем информативности и выпускнику группы 614 факультета радиотехники и телекоммуникаций РГРТУ Астаркину И. В. за изготовление с использованием 3D-печати адаптера в составе макета МСТЗ.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК

1. **Сычев, А.С.** Безэталонный интегрально-мультипликативный показатель качества цифровых полутоновых изображений / А.С. Сычев, И.С. Холопов // Цифровая обработка сигналов. — 2018. — № 3. — С. 51-57.
2. **Сычев, А.С.** Комплексирование изображений по методу главных компонент с адаптацией к мощности шума / А.С. Сычев, И.С. Холопов // Вестник РГРТУ. — 2020. — №71. — С. 3-14.
3. **Сычев, А.С.** Исследование соответствия интегрально-мультипликативного показателя качества цифровых изображений экспертным оценкам качества и информативности цифровых изображений // Цифровая обработка сигналов. — 2023. — № 4. — С. 47-52.

В изданиях, включённых в реферативную базу Scopus

4. **Sychev, A.S.** Image Fusion Based on Principle Component Analysis and Modified Gray-level Variance / A.S. Sychev, I.S. Kholopov // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). — 2020. — P. 1-4
(*работа также проиндексирована в реферативной базе Web of Science*).
5. **Sychev, A.S.** Nonlinear function parameters optimization implementation by Python programming language // 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). — 2021. — P. 246-249.
6. **Sychev, A.S.** Comparative analysis of image noise estimation methods / A.S. Sychev, I.S. Kholopov // International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). — 2021. — P. 1-7.

В прочих изданиях

7. **Сычев, А.С.** Разработка безэталонного интегрально-мультипликативного

показателя качества цифровых изображений // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2018: сборник трудов. — 2018. — Т. 4 из 10. — С. 85-91.

8. **Сычев, А.С.** Сравнительный анализ двух алгоритмов комплексирования цифровых полутоновых изображений с применением безэталонного показателя качества // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2019: сборник трудов. — 2019. — Т. 1 из 10. — С. 78-83.

9. **Сычёв, А.С.** Разработка безэталонного показателя качества цифровых полутоновых изображений // VI научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов АО «ГРПЗ». — 2019. — С. 37-48.

10. **Сычев, А.С.** Комплексирование изображений на основе метода главных компонент и локальной оценки мощности // III Международный научно-технический форум СТНО-2020: сборник трудов. — 2020. — С. 31-36.

11. **Сычев, А.С.** Реализация численных методов оптимизации параметров нелинейной функции на языке программирования Python // IV Международный научно-технический форум СТНО-2021: сборник трудов. — 2021. — С. 73-79.

12. **Сычев, А.С.** Сравнительный анализ методик оценки мощности шума на цифровом изображении / А.С. Сычев, И.С. Холопов // VII Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2021). — 2021. — С. 020392.

13. **Сычев, А.С.** Методы комплексирования изображений на основе кратномасштабного разложения // V Международный научно-технический форум СТНО-2022: сборник трудов. — 2022. — Т. 1 из 10. — С. 48-53.

14. **Сычев, А.С.** Исследование эффективности алгоритмов комплексирования зашумлённых мультиспектральных изображений на базе алгоритмов кратномасштабного разложения / А.С. Сычев, И.С. Холопов // GraphiCon. — 2022. — С. 462-469.

15. **Сычев, А.С.** Полунатурный макет мультиспектральной системы технического зрения // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2023: сборник трудов. — 2023. — Т. 1 из 10. — С. 99-103.

Свидетельства о регистрации ПО

16. **Сычев, А.С.** Библиотека функций оптимизации вектора параметров нелинейной функции / А.С. Сычев, А.В. Сафонова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022666896.

17. **Сычев, А.С.** Программа синхронного захвата мультиспектрального видеоизображения с камер видимого и тепловизионного диапазонов / А.С. Сычев, Т.С. Кислицына // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022666897.

Патент на изобретение

18. **Сычев, А.С.** Способ комплексирования цифровых полутоновых изображений нескольких диапазонов оптического спектра / А.С. Сычев, И.С. Холопов: пат. № RU 2775592 // Патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина».

С ы ч е в Алексей Сергеевич

***Комплексирование мультиспектральных изображений
на основе безэталонной оценки их качества***

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.