

*На правах рукописи*

*Калитов*

**Калитов Михаил Андреевич**

**МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ  
ОБЪЕКТОВ И СРЕД**

Специальность: 1.3.4 – Радиофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Великий Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент, Корнышев Николай Петрович, профессор кафедры радиосистем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор, Цыцулин Александр Константинович, заместитель генерального директора по науке акционерного общества «Научно-исследовательский институт телевидения», г. Санкт-Петербург.

кандидат технических наук Павлов Виталий Александрович, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института электроники и телекоммуникаций Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «19» декабря 2024 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.346.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» по адресу: 173003, Россия, Великий Новгород, ул. Б. Санкт-Петербургская, 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» и на сайте университета <https://portal.novsu.ru/file/2185785>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д.41.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.2.346.03 доктор физико-математических наук, доцент

Захаров М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Разработка новых методов и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды и совершенствование систем дистанционного мониторинга геосферы являются одними из актуальных и быстро развивающихся областей науки и техники.

Пассивная оптическая локация (ОЛ) широко применяется при дистанционном мониторинге геосферы, в частности, мониторинге состояния экологии, состояния посевов, геологических структур, природных явлений и т. п. Методы пассивной ОЛ основаны на формировании и обработке изображений, получаемых в различных зонах регистрации лучистых потоков.

Разработке подобных методов посвятили работы отечественные и зарубежные авторы, в частности, Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д., Лебедев Е.Г., Аванесов Г.А., Шаргородский В.Д., Канг Х. и др.

Одной из важнейших технических характеристик (ТХ) систем ОЛ является спектральная разрешающая способность, которая определяется числом спектральных каналов (СК), в которых производится ОЛ. В настоящее время имеется тенденция к увеличению числа СК в системах ОЛ. Так, например, большое распространение получают так называемые гиперспектральные системы, в которых число СК достигает нескольких сотен.

В свою очередь интерес к исследованию способов цифровой обработки спектральных изображений в системах пассивной ОЛ происходит из двух главных задач, решаемых ими, это улучшение качества визуализации изображений с целью повышения удобства восприятия человеком и обработка потока данных с фотоприемных устройств для их дальнейшего хранения, передачи и извлечения дополнительной визуальной информации.

Увеличение числа СК обеспечивает возможность лучшей дифференциации объектов по их спектральным характеристикам при решении задач распознавания или, иначе говоря, спектральной селекции.

Кроме числа СК к основным ТХ систем ОЛ относится контрастная чувствительность, пространственная разрешающая способность, а также отношение сигнал-шум. Как известно из формулы Альберта Роуза эти параметры связаны между

собой соотношением:  $K = \frac{\Psi_{nop}}{d\sqrt{n}}$ , где  $K$  – пороговый контраст, характеризующий контрастную чувствительность,  $\Psi_{nop}=1,2\dots$  – априорно задаваемое пороговое отношение сигнал-шум,  $d$  – размер элемента фотоприемника, характеризующий пространственное разрешение,  $n$  – число фотонов на единицу площади и, соответственно, число фотоэлектронов, приходящихся на единицу площади элемента фотоприемной матрицы.

Оптимальная система ОЛ – это всегда компромисс между указанными выше ТХ. Так, например, увеличение числа СК приводит к уменьшению контрастной чувствительности (увеличению порогового контраста), поскольку с уменьшением спектрального интервала происходит уменьшение лучистого потока (числа фотонов  $n$ ), попадающего в элементы фотоприемника. При этом попытка компенсации уменьшения лучистого потока за счет увеличения размера  $d$  элемента фотоприемника приводит к уменьшению пространственного разрешения.

Объединение данных различного происхождения для последующих совместного анализа и обработки представляет собой бесспорный выигрыш при обнаружении демаскирующих признаков объектов наблюдения в сравнении с отдельной обработкой за счет расширения объема получаемой информации благодаря как взаимодополняемости, так и взаимозаменяемости.



В совокупности с тенденциями к использованию средств вычислительной техники в ОЛ объектов и сред необходимо исследование существующих, а также разработка и внедрение новых методов увеличения количества СК, в том числе связанных с цифровой обработкой исходно получаемых изображений.

### **Цель работы.**

Целью диссертационной работы является увеличение числа спектральных каналов в системах оптической локации за счет дополнительной обработки получаемых спектральных изображений.

### **Задачи работы.**

- 1) Аналитический обзор методов обработки в оптической локации.
- 2) Разработка метода оценки соответствия изображений объектов оптической локации, получаемых оптическим путем и при цифровой обработке.
- 3) Разработка новых методов обработки в оптической локации, основанных на цифровой обработке исходных изображений.
- 4) Теоретические исследования вновь разработанных методов и их математическое описание.
- 5) Экспериментальные исследования вновь разработанных методов путем компьютерного моделирования

**Объектом диссертационного исследования** являются изображения объектов оптической локации, получаемые из различных спектральных диапазонов.

**Предметом исследования** являются способы и математическое описание методов обработки и анализа изображений объектов оптической локации, позволяющие увеличить число спектральных каналов.

### **Научная новизна.**

В ходе диссертационного исследования были достигнуты новые научные результаты, которые представлены ниже.

1. Разработан новый вариант метода дифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяющий повысить его точность за счет исключения искажений формы результирующего сигнала при использовании целых положительных значений, а также позволяющий обеспечить высокое быстродействие и простоту аппаратной реализации вычислительного устройства системы оптической локации.

2. Разработан новый мультипликативный метод обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяющий повысить уровень полезного сигнала не менее чем в 1,5 раза по отношению к дифференциальному методу обработки.

3. Разработан новый метод мультипликативно-дифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяющий повысить уровень полезного сигнала на 10-20% по отношению к мультипликативному методу обработки.

4. Разработан новый вариант метода спектральной селекции объектов, который обеспечивает повышение точности спектральной селекции относительно способа прототипа за счет сравнения формы спектральной характеристики текущего элемента изображения и формы эталонной спектральной характеристики, получаемой путем указания элемента изображения эталонного объекта, при заданной величине допуска  $\varepsilon$ .

### **Достоверность результатов работы.**

Достоверность положений, выносимых на защиту, теоретических и практических результатов диссертационного исследования подтверждается:

– соответствием изображений объектов, получаемых оптическим путем и при цифровой обработке;

– корректным математическим описанием процессов формирования сигналов при дифференциальном, мультипликативном и комбинированном методах визуализации в системе оптической локации, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков;

– практическим применением вновь разработанных методов обработки и анализа изображений.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в разработке и анализе новых методов формирования и обработки изображений, получаемых в результате оптической локации объектов и сред.

Практическая значимость работы определяется необходимостью совершенствования систем оптической локации объектов и сред, в том числе, предназначенных для дистанционного мониторинга геосферы.

#### **Внедрение результатов работы.**

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе на кафедре радиосистем ПТИ НовГУ при подготовке учебных курсов «Системный инжиниринг оптико-электронных средств» и «Оптико-электронные приборы и системы» для направления подготовки магистратуры 11.04.01 Радиотехника, направленности (профили) «Локация объектов и сред» и «Системы и устройства передачи, приема и обработки сигналов».

#### **Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности**

1.3.4. Радиофизика, а именно п. 5 «Разработка новых методов и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы. Разработка новых методов для радиоастрономического исследования ближнего и дальнего космического пространства» и п. 7 «Разработка теоретических основ новых методов и систем связи, навигационных, активных и пассивных локационных систем, основанных на использовании излучения и приема волновых полей различной физической природы и освоении новых частотных диапазонов».

#### **Методология и методы исследования.**

Теоретические исследования диссертационной работы проведены с применением системного и процессного подходов, анализа информационных источников.

Экспериментальные исследования разработанных методов проведены в среде математического моделирования Matlab, достоверность полученных результатов подтверждена с использованием лабораторной системы оптической локации.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанный новый вариант метода дифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяет повысить его точность за счет исключения искажений формы результирующего сигнала при использовании целых положительных значений, а также позволяет обеспечить высокое быстродействие и простоту аппаратной реализации вычислительного устройства системы оптической локации.

2. Разработанный мультипликативный метод формирования цифровых сигналов при оптической локации по отношению к дифференциальному методу формирования таких сигналов обеспечивает повышение контрастной чувствительности системы оптической локации не менее чем в 1,5 раза.

3. Разработанный новый метод мультипликативно-дифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяющий повысить уровень полезного сигнала на 10-20% по отношению к мультипликативному методу обработки.

4. Разработанный новый вариант метода спектральной селекции объектов, обеспечивает повышение точности спектральной селекции относительно способа прототипа за счет сравнения формы спектральной характеристики текущего элемента изображения и формы эталонной спектральной характеристики, получаемой путем указания элемента изображения эталонного объекта, при заданной величине допуска  $\epsilon$ .

5. Визуальное качество изображения, полученного в результате цифровой дифференциальной обработки, и его соответствие изображению, получаемому оптическим путем, может быть повышено путем дополнительной обработки алгоритмом CLANE с последующей линейной яркостной коррекцией.

6. Разработанный метод оценки соответствия изображений объектов, получаемых оптическим путем и при цифровой обработке, обеспечивает возможность качественного и количественного сравнения эффективности алгоритмов формирования цифровых сигналов в перекрывающихся зонах регистрации, регистрируемых в процессе оптической локации.

7. Обработка методом слияния высокодетального панхроматического и гиперспектрального изображения с укрупненными пикселями обеспечивает возможность вариации размера площади зоны накопления на основе поиска компромисса между такими показателями качества системы, как контрастная чувствительность, разрешающая способность и отношение сигнал-шум.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационного исследования и положения, выносимые на защиту, апробированы во время докладов на международных и всероссийских конференциях:

- Дни науки и инноваций, XXV научная конференция преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ (Великий Новгород, 27 марта 2018 г.);
- Open Innovations STARTUP TOUR 2018 (Великий Новгород, 17 апреля 2018 г.);
- 15-я Международная конференция «Телевидение: передача и обработка изображений» (Санкт-Петербург, 26, 27 июня 2018 г.);
- XXVI Международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики» (Севастополь, 17-21 сентября 2018 г.);
- IX Всероссийская конференция, посвященная методам технико-технологического и экспертного исследования архивных документов, фотодокументов и рукописно-книжных памятников «Экспертиза и фотография» (Санкт-Петербург, 29, 30 ноября 2018 г.);
- XXVI научная конференция преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ (Великий Новгород, 11, 12 апреля 2019 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование, программирование и прикладная математика» (Великий Новгород, 27, 28 июня 2019 г.);
- Научно-техническая конференция молодых специалистов «Вопросы радиоэлектроники: техника телевидения» (Санкт-Петербург, 7 октября 2019 г.);
- X Всероссийская конференция, посвященная методам технико-технологического и экспертного исследования архивных документов, фотодокументов и рукописно-книжных памятников «Экспертиза и фотография» (Санкт-Петербург, 27 ноября 2019 г.);
- Дни науки и инноваций, XXVII научная конференция преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ (Великий Новгород, 6-11 апреля 2020 г.);
- Научно-техническая конференция молодых специалистов «Вопросы радиоэлектроники: техника телевидения» (Санкт-Петербург, 7 октября 2020 г.).

### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, в том числе: 3 статьи в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности Радиофизика, 4 статьи базы данных Scopus, 5 докладов на международных и всероссийских конференциях, 4 патента РФ.

### **Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертационной работе.**

Основные результаты диссертационной работы, в том числе постановка задач, разработка и анализ методов визуализации в оптической локации, основные научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации по обработке спектральных изображений, принадлежат автору лично. Участие соавторов сводится к методическим консультациям.

### **Структура диссертации.**

Диссертация общим объемом 111 страниц состоит из введения, 3 глав и заключения, содержит 102 страницы основного текста, перечень используемой научно-технической литературы из 76 наименований на 9 страницах, 48 рисунков и 3 таблицы.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

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

#### **Глава 1.**

Рассмотрены принципы формирования изображений оптической локации, области применения и аппаратура съемки в узких зонах спектра. Произведен обзор существующих методов формирования и обработки спектральных изображений. Сделаны выводы о недостатках существующих методов, намечены пути их улучшения.

#### **Глава 2.**

Определены критерии качества визуализации изображений оптической локации. Описаны варианты улучшения существующих методов визуализации. Приведено математическое описание вновь разработанных методов визуализации. Рассмотрены линейная яркостная коррекция и алгоритм CLANE применительно к обработке спектральных изображений. В выводах отмечены отличия разработанных методов от существующих.

**Улучшение дифференциального метода** позволяет повысить его точность за счет исключения искажений формы результирующего сигнала при использовании целых положительных значений, а также позволяет обеспечить высокое быстродействие и простоту аппаратной реализации вычислительного устройства системы оптической локации.

Сущность данного метода заключается в выделении оптическим путем из лучистого потока в общем  $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$  спектральном интервале  $n$  спектральных лучистых потоков в интервалах длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$ ,  $\lambda_2 \div \lambda_{\text{макс.}}$ , ...,  $\lambda_n \div \lambda_{\text{макс.}}$ , где  $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n < \lambda_{\text{макс.}}$ , формировании электрических сигналов, пропорциональных яркости света в элементах спектральных изображений, преобразовании их в соответствующие цифровые коды  $U_1, U_2, \dots, U_n$  и вычислении разности цифровых кодов  $U_{\text{вых } 1} = U_1 - U_2, U_{\text{вых } 2} = U_2 - U_3, \dots, U_{\text{вых } n} = U_{n-1} - U_n$ . При этом, в отличие от известного, во вновь предложенном методе для повышения точности выходные коды цифровых спектральных сигналов оптической локации, соответствующих узким зонам регистрации  $\lambda_1 \div \lambda_2, \lambda_2 \div \lambda_3, \dots, \lambda_{n-1} \div \lambda_n$ , формируют в

соответствии с выражениями  $U_{\text{вых } 1}^* = (U_{\text{вых } 1} + U_{\text{макс.}})/2$ ,  $U_{\text{вых } 2}^* = (U_{\text{вых } 2} + U_{\text{макс.}})/2$ , ...  $U_{\text{вых } n}^* = (U_{\text{вых } n} + U_{\text{макс.}})/2$ , где  $U_{\text{макс.}}$  максимально возможное значение цифрового кода.

На рисунке 1 в изображении слева форма результирующего сигнала искажена, поскольку результирующие отрицательные отсчеты яркости преобразованы в модуль яркости. В изображении справа результирующие отрицательные отсчеты яркости отображаются с соответствующей полярностью выходного сигнала относительно уровня  $U_{\text{макс.}}/2$ , тем самым обеспечивается сохранение его формы и повышается точность формирования спектрального сигнала оптической локации в узкой зоне регистрации.

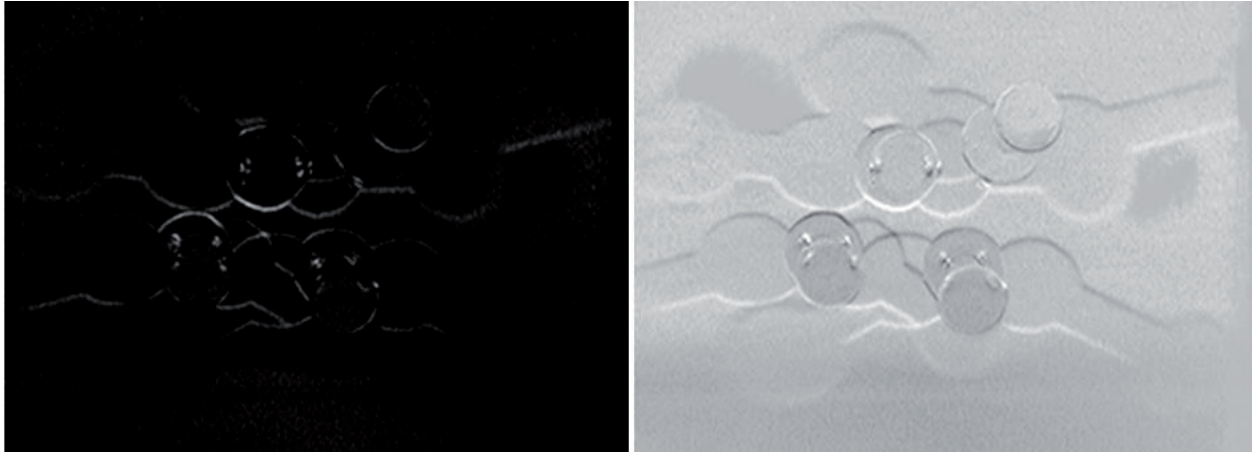


Рисунок 1 – Результирующие изображения, получаемые методом дифференциальной спектральной визуализации до (слева) и после его улучшения (справа)

#### Мультипликативный метод.

Сущность данного метода заключается в выделении оптическим путем из лучистого потока в общем  $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$  спектральном интервале  $n$  спектральных лучистых потоков в интервалах длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$ ,  $\lambda_2 \div \lambda_{\text{макс.}}$ , ...,  $\lambda_n \div \lambda_{\text{макс.}}$ , где  $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n < \lambda_{\text{макс.}}$ , формировании электрических сигналов, пропорциональных яркости света в элементах спектральных изображений, преобразовании их в соответствующие цифровые коды  $U_1, U_2, \dots, U_n$  и вычислении цифровых кодов  $U_{\text{вых } 1} = f(U_1; U_2; U_{\text{макс.}})$ ,  $U_{\text{вых } 2} = f(U_2; U_3; U_{\text{макс.}})$ , ...,  $U_{\text{вых } n-1} = f(U_{n-1}; U_n; U_{\text{макс.}})$ , где  $U_{\text{макс.}}$  максимально возможное значение цифровых кодов  $U_1, U_2, \dots, U_n$ . При этом, в отличие от известного, во вновь предложенном методе коды цифровых спектральных сигналов оптической локации, соответствующие узким зонам регистрации  $\lambda_1 \div \lambda_2, \lambda_2 \div \lambda_3, \dots, \lambda_{n-1} \div \lambda_n$ , вычисляют по формулам  $U_1^1 = [U_2 \times (U_{\text{макс.}} - U_1)]$ ,  $U_2^1 = [U_3 \times (U_{\text{макс.}} - U_2)]$ , ...,  $U_{n-1}^1 = [U_n \times (U_{\text{макс.}} - U_{n-1})]$  или по формулам  $U_1^1 = [U_1 \times (U_{\text{макс.}} - U_2)]$ ,  $U_2^1 = [U_2 \times (U_{\text{макс.}} - U_3)]$ , ...,  $U_{n-1}^1 = [U_{n-1} \times (U_{\text{макс.}} - U_n)]$ . Затем определяют максимальные значения  $U_{1\text{макс.}}^1, U_{2\text{макс.}}^1, \dots, U_{n-1\text{макс.}}^1$  соответствующих вычисленных цифровых кодов  $U_1^1, U_2^1, \dots, U_{n-1}^1$ , а выходные значения кодов цифровых спектральных сигналов оптической локации, соответствующие узким зонам регистрации  $\lambda_1 \div \lambda_2, \lambda_2 \div \lambda_3, \dots, \lambda_{n-1} \div \lambda_n$ , формируют в соответствии с выражениями  $U_{\text{вых } 1} = U_1^1 \times (U_{\text{макс.}} / U_{1\text{макс.}}^1)$ ,  $U_{\text{вых } 2} = U_2^1 \times (U_{\text{макс.}} / U_{2\text{макс.}}^1)$ , ...  $U_{\text{вых } n-1} = U_{n-1}^1 \times (U_{\text{макс.}} / U_{n-1\text{макс.}}^1)$ .

Технический результат вновь разработанного метода заключается в повышении контрастности цифровых спектральных сигналов оптической локации, наглядный пример улучшения изображен на рисунке 2.



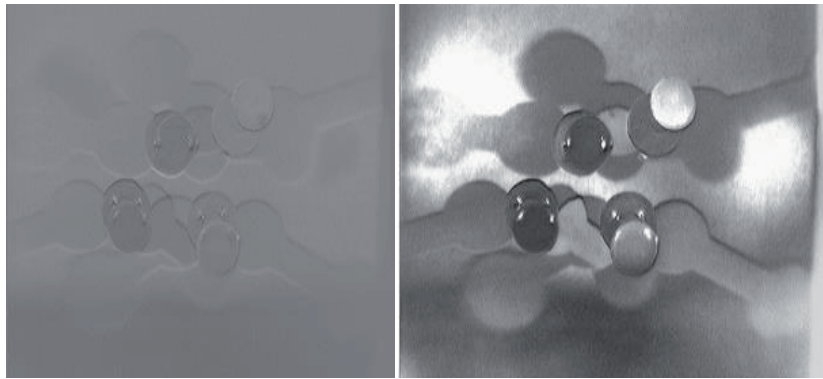
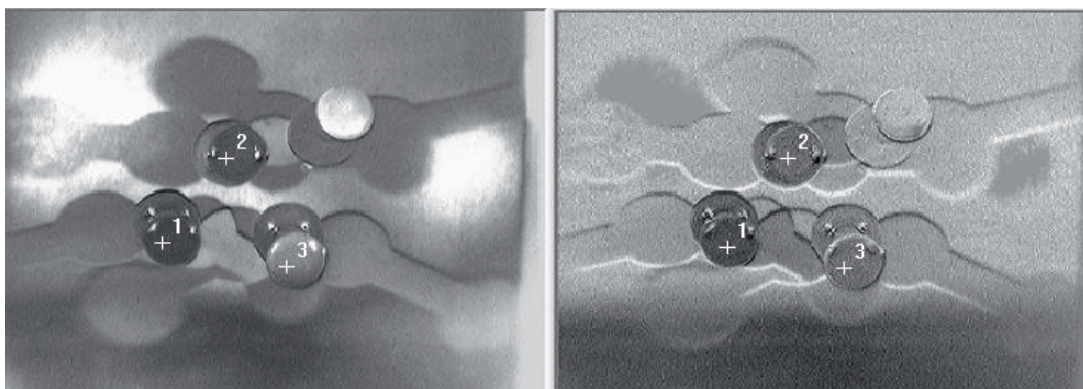


Рисунок 2 – Спектральные изображения оптической локации, полученные дифференциальным (слева) и мультипликативным (справа) методами

**Мультипликативно-дифференциальный метод.**

Мультипликативно-дифференциальный метод спектральной визуализации заключается в выделении оптическим путем из светового потока в общем  $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс}}$  спектральном интервале  $n$  спектральных световых потоков в интервалах длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс}}$ ,  $\lambda_2 \div \lambda_{\text{макс}}$ , ...,  $\lambda_n \div \lambda_{\text{макс}}$ , где  $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n < \lambda_{\text{макс}}$ , формирование электрических сигналов, пропорциональных яркости света в элементах спектральных изображений, преобразование их в соответствующие цифровые коды  $U_1, U_2 \dots U_n$  и вычисление цифровых кодов по формулам  $U_1^0 = c \times U_2 \times (U_{\text{макс}} - U_1)$ ,  $U_2^0 = c \times U_3 \times (U_{\text{макс}} - U_2)$ , ...  $U_{n-1}^0 = c \times U_n \times (U_{\text{макс}} - U_{n-1})$ , а также по формулам  $U_1^1 = c \times U_1 \times (U_{\text{макс}} - U_2)$ ,  $U_2^1 = c \times U_2 \times (U_{\text{макс}} - U_3)$ , ...  $U_{n-1}^1 = c \times U_{n-1} \times (U_{\text{макс}} - U_n)$ , где  $c < 1$  является нормировочным множителем. При этом выходные коды цифровых спектральных сигналов оптической локации, соответствующие узким зонам регистрации  $\lambda_1 \div \lambda_2, \lambda_2 \div \lambda_3, \dots, \lambda_{n-1} \div \lambda_n$ , формируют в соответствии с выражениями  $U_{\text{вых } 1} = [U_1^0 + (U_{\text{макс}} - U_1^1)]/2$ ,  $U_{\text{вых } 2} = [U_2^0 + (U_{\text{макс}} - U_2^1)]/2$ , ...  $U_{\text{вых } n-1} = [U_{n-1}^0 + (U_{\text{макс}} - U_{n-1}^1)]/2$  или  $U_{\text{вых } 1} = [U_1^1 + (U_{\text{макс}} - U_1^0)]/2$ ,  $U_{\text{вых } 2} = [U_2^1 + (U_{\text{макс}} - U_2^0)]/2$ , ...  $U_{\text{вых } n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{макс}} - U_{n-1}^0)]/2$ .

На рисунке 3 показаны примеры результирующих изображений, получаемые по мультипликативному способу (рисунок 3а) и по мультипликативно-дифференциального способу (рисунок 3б).



а)

б)

Рисунок 3 – Спектральные изображения, получаемые мультипликативным – а) и мультипликативно-дифференциальным - б) методами

Мультипликативно-дифференциальный способ по отношению к мультипликативному обеспечивает повышение контрастности изображений, а также

более точное соответствие исходному цвету (спектральному диапазону) визуализируемых объектов

### **Модификация метода спектральной селекции объектов.**

Улучшение проявляется в том, что в отличие от известного способа, заключающегося в получении исходных спектральных изображений оптической локации объекта, имеющих пространственное распределение яркости  $B_{x,y}(\Delta\lambda_i)$  в  $k$  зонах регистрации с интервалами длин волн  $\Delta\lambda_i$ , где  $i=1,2,\dots,k$ , а  $x,y$  – пространственные координаты элементов изображения, причем,  $x=1,2,\dots,j\dots m$ , а  $y=1,2,\dots,l\dots n$ , где  $m$  и  $n$  – число элементов изображения, соответственно, по горизонтали и вертикали, формировании соответствующих спектральных сигналов  $U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$ , преобразовании их в цифровую форму с запоминанием цифровых кодов соответствующих элементов спектральных изображений в виде массива спектральных характеристик

$S_{x,y} = \bigcup_{i=1}^k U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$ , сравнении этих цифровых кодов с соответствующими эталонными значениями и формировании при их совпадении бинарного изображения селектируемого объекта, дополнительно задают пространственные координаты  $x=a, y=b$  интересующего элемента изображения, запоминают в качестве эталона спектральную характеристику

$S_{x=a,y=b} = \bigcup_{i=1}^k U_{x=a,y=b}(\Delta\lambda_i)$  для заданного элемента изображения, а при сравнении значений цифровых кодов для соответствующих элементов спектральных изображений оптической локации проверяют выполнение условия  $|S_{x,y} - S_{x=a,y=b}| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – априорно заданное пороговое значение, и формирование бинарного изображения (селекцию) осуществляют в случае выполнения данного условия.

Для достижения указанного выше технического результата предложен способ спектральной селекции объектов, включающий получение исходных спектральных оптических изображений объекта, имеющих пространственное распределение яркости  $B_{x,y}(\Delta\lambda_i)$  в  $k$  зонах регистрации с интервалами длин волн  $\Delta\lambda_i$ , где  $i=1,2,\dots,k$ , а  $x,y$  – пространственные координаты элементов изображения, причем,  $x=1,2,\dots,j\dots m$ , а  $y=1,2,\dots,l\dots n$ , где  $m$  и  $n$  – число элементов изображения, соответственно, по горизонтали и вертикали, формирование соответствующих спектральных сигналов оптической локации  $U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$ , преобразование их в цифровую форму и получение, тем самым, цифровых кодов соответствующих элементов спектральных изображений в виде массива спектральных характеристик  $S_{x,y} = \bigcup_{i=1}^k U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$ , сравнение этих цифровых кодов с соответствующими эталонными значениями и формирование при их совпадении бинарного изображения селектируемого объекта, указывают пространственные координаты  $x=a, y=b$  интересующего элемента на одном из исходных изображений, запоминают в качестве эталона спектральную характеристику  $S_{x=a,y=b}$  для указанного элемента изображения, при сравнении цифровых кодов проверяют выполнение условия  $|S_{x,y} - S_{x=a,y=b}| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – априорно заданное пороговое значение, а формирование бинарного изображения селектируемого объекта осуществляют при выполнении данного условия.

Технический результат предложенного метода выражен в повышении точности спектральной селекции за счет сравнения формы спектральной характеристики текущего элемента изображения и формы эталонной спектральной характеристики, получаемой

путем указания элемента изображения эталонного объекта, при заданной величине допуска  $\varepsilon$ .

### **Применение алгоритма CLANE к обработке спектральных изображений.**

В процессе исследований проводилось компьютерное моделирование процессов обработки дифференциальных спектральных изображений путем яркостной коррекции и алгоритмом CLANE. Сделан вывод о целесообразности комбинированного (последовательного) применения указанных выше алгоритмов

На рисунках 4-6 приведены примеры спектральных изображений, обработанных различными алгоритмами.

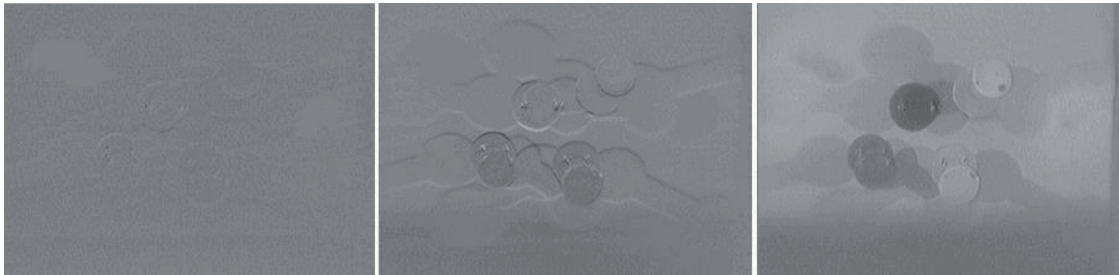


Рисунок 4 – Дифференциальные спектральные изображения оптической локации, соответствующие  $B$ ,  $G$  и  $R$  компонентам

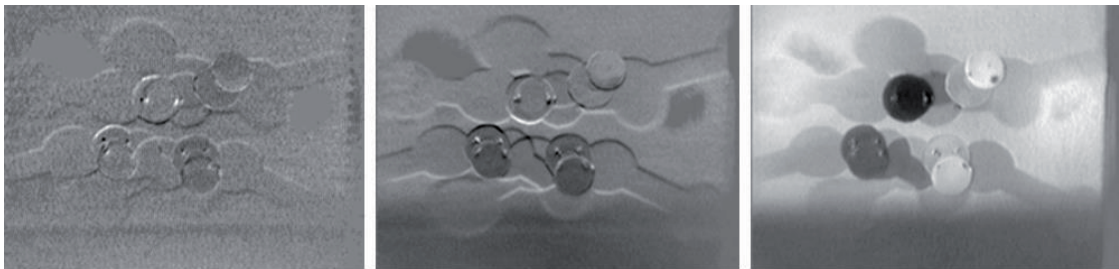


Рисунок 5 – Дифференциальные спектральные изображения оптической локации, соответствующие  $B$ ,  $G$  и  $R$  компонентам после линейной яркостной коррекции

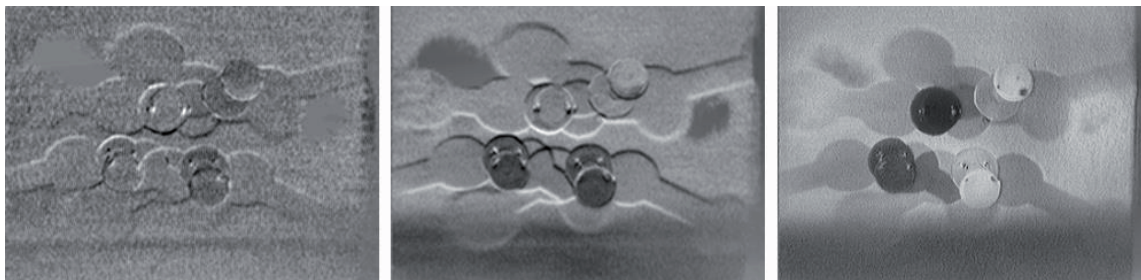


Рисунок 6 – Дифференциальные спектральные изображения оптической локации, соответствующие  $B$ ,  $G$  и  $R$  компонентам, обработанные алгоритмом CLANE с последующей линейной яркостной коррекцией

### **Математическое описание разработанных методов визуализации.**

В процессе исследований были рассмотрены сигнальные процессы в спектральной системе оптической локации, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков при общем диапазоне спектральной чувствительности матричного

фотоприемника  $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ , при реализации вновь разработанных методов цифровой обработки исходно получаемых спектральных изображений

Сущность их математического описания описана ниже.

Воспользуемся выражением для полного фототока элемента фотоприемника:

$$i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{A/W}(\lambda) P_W(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{A/W}(\lambda)$  [А/Вт] – характеристика спектральной чувствительности фотоприемника, а  $P_W(\lambda)$  [Вт] – характеристика спектральной мощности источника излучения.

С учетом нормировки характеристик  $0 \leq \varepsilon(\lambda) = \frac{\varepsilon_{A/W}(\lambda)}{\varepsilon_{\max}} \leq 1$  и  $0 \leq P(\lambda) = \frac{P_W(\lambda)}{P_{\max}} \leq 1$ ,

где  $\varepsilon_{\max}$  – максимальная чувствительность фотоприемника,  $P_{\max}$  – максимальная мощность источника излучения, выражение (1) имеет вид:

$$i = \varepsilon_{\max} P_{\max} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon(\lambda) P(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Поскольку функция  $\varepsilon(\lambda)$  интегрируема на интервале  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ , а функция  $P(\lambda) \geq 0$ , то воспользуемся теоремой о среднем и перепишем (2) в следующем образом:

$$i = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P(\lambda) d\lambda, \text{ где } i_0 = \varepsilon_{\max} P_{\max} \varepsilon_{\text{ср}}.$$

Тогда электрические сигналы (фототоки), получаемые в двух перекрывающихся участках зон регистрации лучистых потоков при помощи одного и того же фотоприемника, можно выразить в следующем виде:

$$i_1 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \text{ и } i_2 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda,$$

где  $P_1(\lambda)$  – характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от  $\lambda_1$  до  $\lambda_{\max}$ ,  $P_2(\lambda)$  – характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от  $\lambda_2$  до  $\lambda_{\max}$ , причем  $\lambda_{\min} \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_{\max}$ , а  $P_1(\lambda) \neq P_2(\lambda)$ .

Рассмотрим сигнальные процессы дифференциального метода, при котором имеем:

$$i = i_1 - i_2 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda.$$

Покажем, что инверсия  $\overline{i_2}$  сигнала  $i_2$  соответствует инверсии  $\overline{P_2(\lambda)}$  спектральной характеристики  $P_2(\lambda)$  лучистого потока с точностью до постоянной величины  $C$ . Здесь подразумевается, что  $\overline{i_2} = i_W - i_2$ , где  $i_W = \text{const}$  – уровень «белого» в сигнале



изображения, соответствующий, в частности, значению 255 относительных единиц для восьмиразрядного цифрового кодирования.

В этом случае должно выполняться соотношение:

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) + \overline{P_2(\lambda)}] d\lambda + C. \quad (3)$$

Заметим, что, с одной стороны,  $i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} - i_W$ , а, с другой стороны,  $\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda)$ .

Тогда интеграл в правой части выражения (3) может быть переписан в следующем виде:

$$i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \{P_1(\lambda) + [1 - P_2(\lambda)]\} d\lambda = i_0 \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [1 - P_2(\lambda)] d\lambda \right\}$$

или

$$i_0 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} d\lambda \right] = i_1 - i_2 + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) = i_1 + \overline{i_2} + C,$$

где  $C = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) - i_W$ .

Таким образом, правая часть выражения (3) соответствует его левой части, что и требовалось доказать.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для мультипликативного метода, при котором спектральный сигнал оптической локации формируется по формуле:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = \left[ i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] \times \left[ i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right].$$

Известно, что в общем случае справедливо:

$$\left[ i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] \times \left[ i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \neq i_0^2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda.$$

Рассмотрим отдельно интеграл в правой части данного неравенства. Обе функции  $P_2(\lambda)$  и  $\overline{P_1(\lambda)}$  интегрируемы на интервале  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ , причем,  $0 \leq P_2(\lambda) \leq 1$  и  $0 \leq \overline{P_1(\lambda)} \leq 1$ .

Таким образом, возможно использование теоремы о среднем, согласно которой в данном случае, с одной стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_1 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda, \quad (4)$$

а, с другой стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda = \mu_2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda)d\lambda , \quad (5)$$

где  $0 \leq \mu_1 \leq 1$  и  $0 \leq \mu_2 \leq 1$ .

Перемножив, соответственно, левые и правые части равенств (4) и (5) получим:

$$\left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda \right]^2 = \mu_1\mu_2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda)d\lambda \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda)d\lambda \right].$$

Таким образом, для мультипликативного метода справедливо:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda \right]^2, \text{ где } A = \frac{1}{\mu_1\mu_2}. \quad (6)$$

Однако, электрический сигнал от лучистого потока, получаемого, например, при комбинации светофильтров со спектральными характеристиками, соответствующими  $P_1(\lambda)$  и  $P_2(\lambda)$ , определяется выражением:

$$i_{1,2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda ,$$

которое исходит из того, что общий коэффициент пропускания последовательно расположенных оптических сред равен произведению коэффициентов пропускания этих сред.

Следовательно, для получения соответствия электрического сигнала реальному лучистому потоку необходима следующая коррекция выражения (6):  $i_{\text{вых}} = N\sqrt{i}$ , где  $N \leq 1$  – нормирующий множитель, обеспечивающий требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

Для инверсии выходного сигнала необходимо дополнительно выполнить

$$\overline{i_{\text{вых}}} = i_W - i_{\text{вых}} .$$

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для комбинированного (мультипликативно-дифференциального) метода, при котором спектральный сигнал оптической локации формируется по формуле:

$$i = i_1 \times \overline{i_2} + \overline{i_2} \times \overline{i_1} , \quad (7)$$

с последующей нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

В этом случае, с одной стороны, справедливо

$$i_1 \times \overline{i_2} = (i_W - i_2) \times i_1 , \quad i_2 \times \overline{i_1} = (i_W - i_1) \times i_2 \quad \text{и} \quad \overline{i_2 \times i_1} = i_W - i_2 \times \overline{i_1} .$$

Следовательно:

$$i = i_W \times (i_1 - i_2 + 1) = i_W \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) - P_2(\lambda)]d\lambda + 1 \right\} .$$

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (7) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (3) при дополнительном усилении (линейной яркостной коррекции) получаемого разностного сигнала.

С другой стороны, с учетом выражения (6) справедливо:

$$i = i_1 \times \overline{i_2} + \overline{i_2} \times i_1 = Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda \right]^2 + \{i_W - Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right]^2\},$$

ИЛИ

$$i = Ai_0^2 \left\{ \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda \right]^2 - \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right]^2 \right\} + i_W,$$

ИЛИ

$$i = Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda \right] + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] + i_W.$$

Поскольку  $\overline{P_1(\lambda)} = 1 - P_1(\lambda)$  и  $\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda)$  имеем:

$$i = Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] + i_W.$$

Обозначив через

$$I_1 = \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]$$

и

$$I_2 = \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right],$$

запишем:

$$i = Ai_0^2 I_1 I_2 + i_W.$$

Поскольку сигнал яркости униполярен, и нас интересуют его положительные значения, в дальнейшем будем рассматривать значения  $I_1$  и  $I_2$  по абсолютной величине.

Рассмотрим модуль  $I_1$ , для которого в данном случае можно записать неравенство:

$$\left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right| \leq |I_1| \leq \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2.$$

Тогда для произведения  $|I_1 I_2|$  будет справедливо неравенство:

$$\left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 \leq |I_1 I_2| \leq \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^3. \quad (8)$$

С учетом (8) запишем:

$$Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 + i_w \leq i \leq Ai_0^2 \left[ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^3 + i_w. \quad (9)$$

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (7) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (3) и отличается нелинейным усилением получаемого разностного сигнала.

Таким образом, эквивалентный результат можно получить тремя способами:

- 1) вычислением по формуле (3) с дополнительной линейной яркостной коррекцией,
- 2) вычислением по формуле (3) с последующим возведением в степень  $2 \leq b \leq 3$ , в соответствии с (9), и нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала,
- 3) вычислением комбинированным методом по формуле (7) с последующей нормировкой.

Таким образом, в отличие от дифференциального метода при комбинированном методе дополнительная яркостная коррекция получаемого разностного сигнала обеспечивается автоматически.

### Глава 3.

Разработана методика проведения экспериментов. Произведено описание лабораторного оборудования и программно-аппаратных средств моделирования. Приведены результаты исследования разработанных методов. Проведен сравнительный анализ разработанных методов. Сделаны выводы о целесообразности применения разработанных методов.

#### **Методика сравнения результатов извлечения дополнительной визуальной информации при обработке цифровых изображений объектов оптической локации.**

В основе методики эксперимента лежит качественная и количественная сравнительная оценка изображений, получаемых при различных вариантах обработки исходных спектральных изображений оптической локации. При качественной оценке требуется визуальное сравнение изображений, получаемых при оптическом выделении лучистых потоков и при цифровой обработке соответствующих спектральных изображений. В идеале изображение, полученное оптическим выделением спектрального потока в интервале длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$ , должно визуально восприниматься одинаково с изображением, полученным путем цифровой обработки пары спектральных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в данном интервале длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$ .

Для такого однозначного сравнения необходимо при оптическом выделении лучистых потоков в большинстве случаев использовать специальные оптические светофильтры, в частности, узкополосные интерференционные фильтры, которые далеко не всегда имеются в распоряжении исследователя. Однако, эффективность того или иного метода цифровой обработки пары спектральных изображений с перекрывающимися зонами регистрации можно проверить на частном случае.

Так, в частности, рассмотренные выше методы цифровой обработки позволяют получить сигналы синего –  $B$  (400-500 нм), зеленого –  $G$  (500-600 нм) и красного –  $R$  (600-700 нм) участков видимой области спектра, используя соответствующие пары спектральных изображений (рисунок 7):  $[U_1$  (ЖС4),  $U_2$  (ЖС18)],  $[U_2$  (ЖС18),  $U_3$  (КС11)] и  $[U_3$  (КС11),  $U_4$  (КС19)], получаемые в широких зонах регистрации при помощи стандартных цветных стекол, спектральные характеристики которых обеспечивают «отрезание» участков области спектра от 400, 500, 600 и 700 нм.



Суть качественной оценки эффективности метода цифровой обработки пар спектральных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в данном случае сводилась к оценке качества цветопередачи тестовых объектов по синтезируемому цветному изображению из соответствующих сформированных изображений синего –  $B$  (400-500 нм), зеленого –  $G$  (500-600 нм) и красного –  $R$  (600-700 нм) участков видимой области спектра.

Как известно, каждой длине волны излучения соответствует свой воспринимаемый глазом человека цвет. Несмотря на то, что обратное утверждение о том, что каждому наблюдаемому цвету соответствует излучение строго определенной длины волны, в общем случае не является верным, поскольку существуют, в частности, так называемые, метамерные красители, в данном конкретном случае можно рассчитывать на соответствие цвета визуализируемого объекта выделяемому участку спектра потока излучения.

На рисунке 7.1 показано изображение,  $RGB$  компоненты которого сформированы мультипликативным методом при нормировании сигнала с коэффициентом  $N=i_{max}/i_w$ . На рисунке 7.2 показано изображение, при формировании выходного сигнала по формуле (6) и извлечением корня квадратного. На рисунке 7.3 показано изображение 7.1 после дополнительной цветовой коррекции (баланс белого).

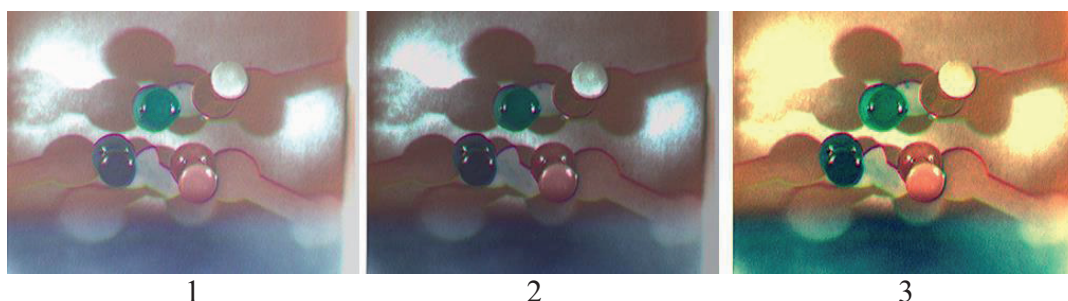


Рисунок 7 –  $RGB$  изображения: 1 – при формировании спектральных компонент мультипликативным методом с нормировкой, 2 – при формировании выходного сигнала по формуле (6), 3 – изображение 1 после цветовой коррекции

На рисунке 8.1 показано изображение,  $RGB$  компоненты которого сформированы по дифференциальному методу без яркостной коррекции, а на рисунке 8.2 показано то же самое изображение после линейной яркостной коррекции с предельными нижним и верхним пороговыми уровнями, соответственно 0,4 и 0,6, при которых отсутствует ограничение полезного сигнала. На рисунке 8.3 приведено реальное  $RGB$  изображение объектов, полученное при помощи цветной системы оптической локации.

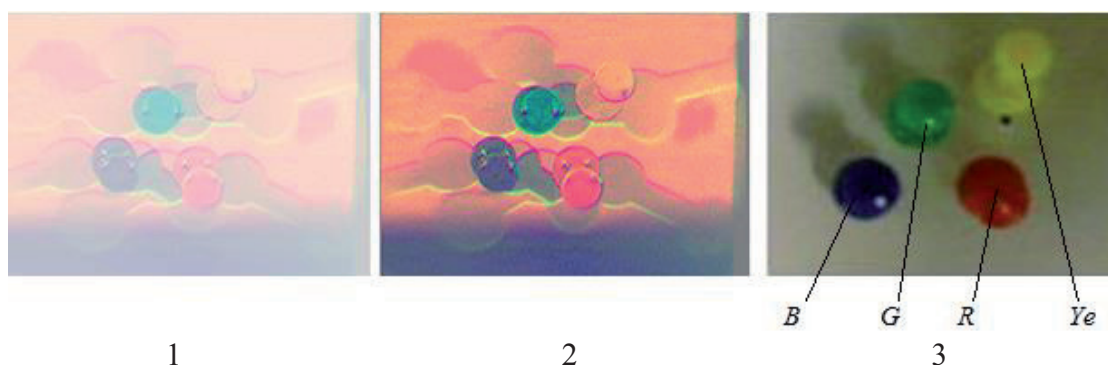


Рисунок 8 –  $RGB$  изображения: 1 – при формировании спектральных компонент дифференциальным методом без яркостной коррекции, 2 – после линейной яркостной коррекции, 3 – реальное  $RGB$  изображение объектов

Ниже показаны изображения,  $RGB$  компоненты которых сформированы комбинированным методом по формуле (7) – рисунок 9.1, по формуле (9) при  $b=2$  рисунок 9.2 и при  $b=3$  рисунок 9.3.

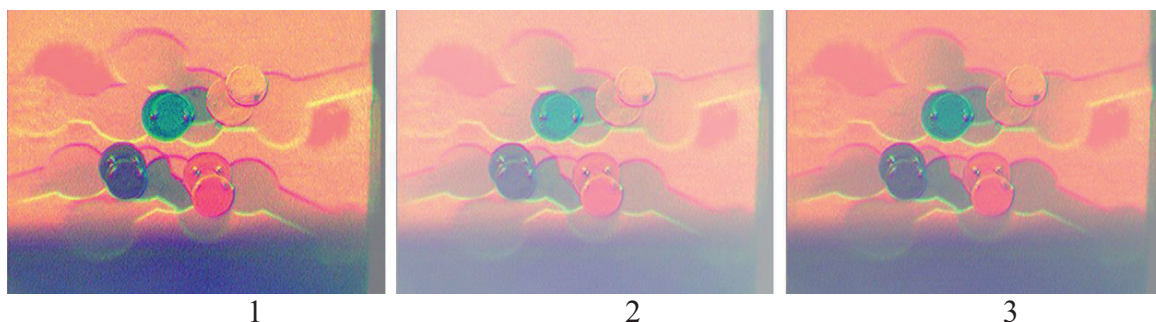


Рисунок 9 –  $RGB$  изображения при формировании спектральных компонент комбинированным методом: 1 – формула (7), 2 и 3 формула (9) при  $b=2$  и  $b=3$ , соответственно

Количественная оценка заключалась в определении уровней  $RGB$  сигналов для участков изображений, соответствующих синему ( $B$ ), зеленому ( $G$ ), красному ( $R$ ), желтому ( $Ye$ ) объектам и белому ( $W$ ) фону и вычислении цветовых коэффициентов  $r$ ,  $g$  и  $b$ , по формулам:  $r = R/(R + G + B)$ ,  $g = G/(R + G + B)$ ,  $b = B/(R + G + B)$ , где  $R$ ,  $G$  и  $B$  средние значения яркости в соответствующих каналах красного, зеленого и синего.

На рисунке 10 (слева) приведено результирующее  $RGB$ -изображение, полученное из дифференциальных спектральных изображений с последующей яркостной коррекцией. На рисунке 10 (справа) приведено результирующее  $RGB$ -изображение, полученное из этих же дифференциальных спектральных изображений, дополнительно обработанных алгоритмом CLANE с последующей яркостной коррекцией.

Яркостная коррекция в обоих случаях проводилась с автоматическим определением верхнего и нижнего порогов коррекции по максимуму и минимуму соответствующего сигнала. Полученные в процессе эксперимента изображения приведены ниже.

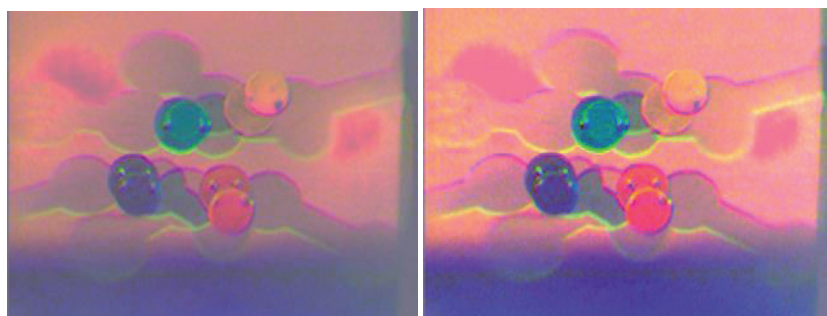


Рисунок 10 –  $RGB$  изображения

На рисунке 11 отражены нормированные максимальные значения  $RGB$  сигналов для сравниваемых изображений. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при дополнительной обработке алгоритмом CLANE повышается насыщенность цвета визуализируемых объектов.

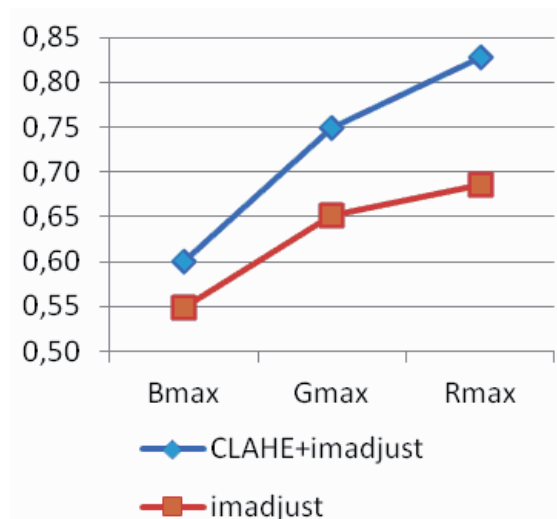


Рисунок 11 – Сравнение максимальных значений *RGB* сигналов без дополнительной обработки алгоритмом CLAHE и при его использовании

Количественное сравнение разностей максимальных и минимальных значений цифровых кодов, полученных дифференциальным методом и мультипликативным методом при обработке изображений, показано на рисунке 12. Как видно из сравнительных диаграмм, изображенных на рисунке 12, мультипликативный метод по отношению к дифференциальному обеспечивает повышение контрастности изображений не менее чем в 1,5 раза.

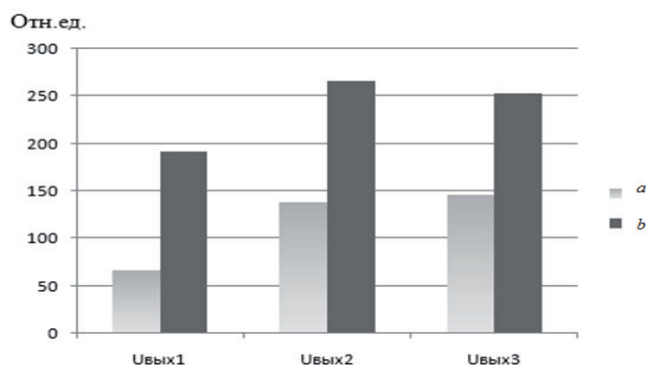


Рисунок 12 – Количественное сравнение максимальных и минимальных значений отсчетов яркости в спектральных изображениях оптической локации, получаемых дифференциальным – а) и мультипликативным – б) методом

Количественное сравнение разностей максимальных и минимальных значений цифровых кодов, полученных мультипликативным методом и мультипликативно-дифференциальным методом при обработке изображений, показано на рисунке 13. Как видно из сравнительных диаграмм на рисунке 13, мультипликативно-дифференциальный способ обеспечивает повышение уровня сигнала визуализируемых объектов на 10-20% по отношению к мультипликативному способу, а, следовательно, и повышение контрастности их изображений, а также более точное соответствие исходному цвету (спектральному диапазону) визуализируемых объектов

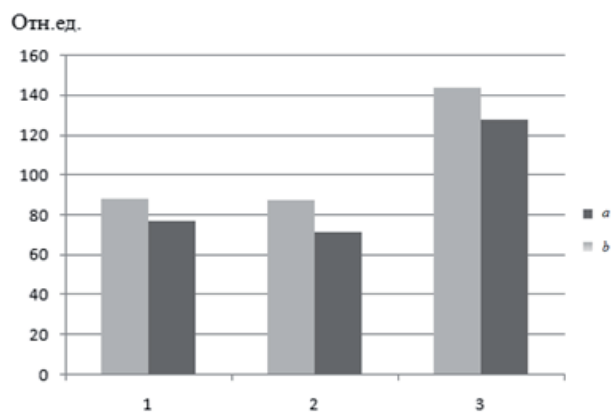


Рисунок 13 – Количественное сравнение значений цифровых кодов, получаемых мультипликативным – а) и мультипликативно-дифференциальным - б) методом

**Результаты исследования обработки методом слияния высокодетального панхроматического и гиперспектрального изображения с укрупненными пикселями.**

Исследовались результаты обработки пар изображений (широкоспектральное и узкоспектральное) трех типов: 1) имеющих между собой высокое  $\geq 0,9$ , 2) среднее  $\approx 0,5$  и 3) низкое  $\leq 0,3$  количественно значение коэффициента взаимной корреляции.

На рисунке 14 приведены графики, отражающие результаты количественной оценки взаимной корреляции соответствующих исходных узкоспектральных изображений с исходно высоким разрешением и изображений, восстановленных после обработки, в зависимости от кратности увеличения размера элемента разложения.

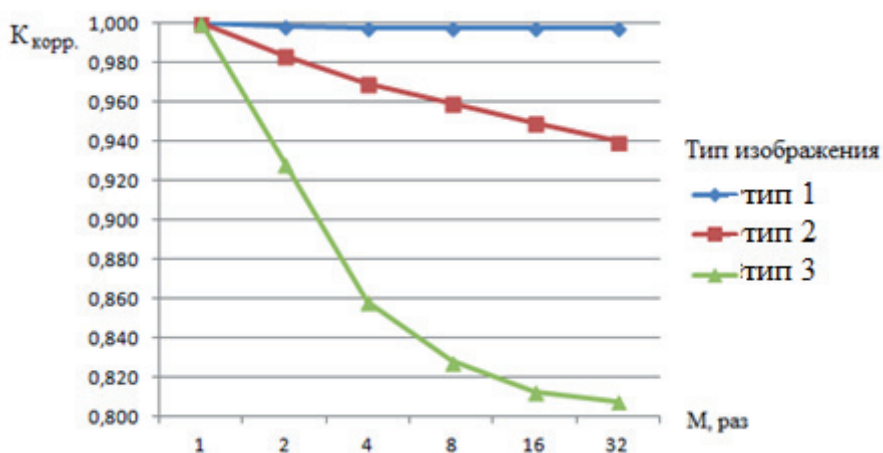


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента  $K_{корр}$  взаимной корреляции от кратности  $M$  увеличения размера элемента разложения для исходных узкоспектральных изображений и изображений, восстановленных в результате обработки.

Как видно из графиков, при задании величины достаточно высокого значения коэффициента корреляции на уровне  $K_{корр} \geq 0,95$  для изображения типа 2 предельная кратность увеличения размера элемента разложения  $M \leq 8$ , в то время как для изображения типа 1 величина  $M$  может быть существенно увеличена. При этом для изображения типа 3 допустимое значение  $M=2$ , при задании значения коэффициента корреляции на уровне  $K_{корр} \geq 0,92$ . Таким образом, кратность увеличения размера элемента разложения, а следовательно, чувствительность системы при использовании метода слияния изображений следует проводить адаптивно с учетом исходной взаимной корреляции между парами обрабатываемых изображений.



## Основные результаты работы.

В рамках диссертационной работы были получены следующие результаты:

1) Проведённый аналитический обзор методов и алгоритмов обработки и анализа спектральных изображений оптической локации выявил необходимость развития существующих и создания новых методов визуализации.

2) Улучшенный дифференциальный метод позволил повысить точность обработки за счет исключения искажений формы результирующего сигнала при использовании целых положительных значений, а также позволил обеспечить высокое быстродействие и простоту аппаратной реализации вычислительного устройства системы оптической локации.

3) Разработанный мультипликативный метод формирования спектральных изображений обеспечил повышение контрастности изображений не менее чем в 1,5 раза.

4) Разработанный мультипликативно-дифференциальный метод формирования спектральных изображений обеспечил увеличение уровня сигнала визуализируемых объектов на 10-20% по отношению к мультипликативному способу.

5) Разработанный новый вариант метода спектральной селекции объектов, обеспечил повышение точности спектральной селекции относительно способа прототипа.

6) Доказана целесообразность применения алгоритма CLANE к обработке спектральных изображений

7) Разработанный метод оценки обеспечил возможность качественного и количественного сравнения эффективности алгоритмов формирования цифровых спектральных сигналов системы оптической локации в перекрывающихся зонах регистрации.

8) Получены новые экспериментальные данные о зависимости качества результата слияния изображения высокого разрешения, получаемого в широкой зоне регистрации лучистого потока с изображением пониженного разрешения, получаемого в узкой зоне регистрации лучистого потока при укрупнении апертуры фотоприемной матрицы, от коэффициента корреляции между данными изображениями.

9) Получено экспериментальное подтверждение реализуемости и эффективности разработанных методов визуализации.

Совокупность сделанных выводов и научных положений позволяет утверждать, что поставленная цель работы достигнута.

## Список публикаций

### В изданиях из перечня ВАК

1. Калитов М.А. О применении спектральной визуализации в дистанционном зондировании Земли // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2024. №1(135). С. 95-107.
2. Гареев В.М., Гареев М.В., Калитов М.А., Корнышев Н.П., Серебряков Д.А. Телевизионная спектральная визуализация и обработка изображений в исследованиях бумажной основы исторических документов // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2024. №1(135). С. 43-56.
3. Гареев В.М., Гареев М.В., Калитов М.А., Корнышев Н.П., Серебряков Д.А., Лебединский Н.И. Оптимизация телевизионной гиперспектральной системы // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. Т.16. №2. 2024. С. 31-39.

## Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

4. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Computer simulation of the formation of digital spectrozonal images // Journal of Physics: Conference Series 1352 (2019) 012025 doi: 10.1088/1742-6596/1352/1/012025.
5. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Mathematical description of the processes of synthesis of digital multispectral images // Journal of Physics: Conference Series 2052 (2021) 012018. doi: 10.1088/1742-6596/2052/1/012018.
6. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Computer simulation of the multiplicative method for the formation of digital spectrozonal images // Journal of Physics: Conference Series 1658 (2020) 012023. doi: 10.1088/1742-6596/1658/1/012023.
7. Vaniev A.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Results of computer processing of digital spectrozonal images by the CLANE algorithm // Journal of Physics: Conference Series 1658 (2020) 012068. doi: 10.1088/1742-6596/1658/1/012068.

## Патенты

8. Патент № 2679921 RU, МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 28.04.2018. Оpubл. 14.02.2019. Бюл.5.
9. Патент № 2731880 RU, МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / Д.И. Борисов, Н.А. Ерганжиев, М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 20.01.2020; опубл. 08.09.2020. Бюл.25.
10. Патент № 2756578 RU, МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 24.11.2020. Оpubл. 04.10.2021. Бюл.28.
11. Патент № 2754966 RU, МПК H04N 7/18, G06T 7/136. Способ телевизионной спектральной селекции изображений объектов / М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 26.02.2021. Оpubл. 08.09.2021. Бюл.25.

## Прочие издания

12. Калитов М.А. Применение метода дифференциальной спектрозональной визуализации для цветовой селекции объектов // Ученые записки Новгородского государственного университета. 2018. № 5 (17). С. 17.
13. Корнышев Н.П., Калитов М.А., Сенин А.С. Особенности формирования сигнала изображения при инфракрасной рефлектографии в среднем и дальнем диапазонах спектра // Фотография. Изображение. Документ. 2018. № 8 (8). С. 35-38.
14. Корнышев Н.П., Калитов М.А., Сенин А.С. Математическое моделирование процесса формирования спектрозонального изображения // Прикладные задачи математики. Материалы XXVI международной научно-технической конференции. Севастоп. гос. ун-т; науч. ред. С.О. Папков. 2018. С. 198-200.
15. Корнышев Н.П., Калитов М.А. и Сенин А.С. Исследование метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ Сер. Технические науки. 2018. №.1 (107). С. 62-69.
16. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Повышение точности метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2019. №2(114). С. 31-34.
17. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Преобразование сигналов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С. 52-59.

18. Ваниев А.А., Калитов М.А., Корнышев Н.П. Улучшение изображений, полученных методом дифференциальной спектрональной визуализации // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2019. №4(116). С.9-12.
19. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Компьютерное моделирование мультипликативного метода формирования цифровых спектрональных изображений // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2020. №2 (118). С.76-78.
20. Ваниев А.А., Калитов М.А. О повышении визуального качества дифференциальных спектрональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. № 4. С. 118-123.

Подписано в печать 11.10.2024 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Печ. листов 1,5. Тираж 100 экз.  
Заказ 10-11-135 оп.

Отпечатано ООО «ТПК «Печатный Двор»  
г. Великий Новгород, ул. Нехинская, д.61,  
производственный корпус 3,  
тел.: 8 (816-2) 502-225  
vnovgorod.net