Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

На правах рукописи

Калитов Михаил Андреевич

Методы визуализации в оптической локации объектов и сред

Специальность: 1.3.4 Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Корнышев Николай Петрович

Великий Новгород – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ, ОБЛАСТЕЙ	
ПРИМЕНЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИ	И
ОБЪЕКТОВ И СРЕД	16
1.1 Принципы формирования изображений в оптической локации	16
1.1.1 Односпектральные (панхроматические) системы	17
1.1.2 Мультиспектральные системы	17
1.1.3 Гиперспектральные системы	18
1.2 Области применения и аппаратура	22
1.2.1 Системы оптической локации дистанционного мониторинга	
геосферы	22
1.2.2 Использование систем оптической локации при исследовании объект	OB
культурного наследия	31
1.3 Анализ известных методов визуализации объектов оптической локации	ии
извлечения дополнительной визуальной информации	35
1.3.1 Дифференциальный метод	36
1.3.2 Интегральный метод	38
1.3.3 Интегрально-дифференциальный метод	41
1.3.4 Линейная яркостная коррекция	44
1.3.5 Алгоритм CLAHE	45
1.3.6 Спектральная селекция объектов	48
Выводы по главе 1	52

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ОБЪЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ 54
2.1 Методика сравнения результатов извлечения дополнительной визуальной
информации при обработке цифровых изображений объектов оптической
локации
2.2 Модификация дифференциального метода
2.3 Мультипликативный метод 56
2.4 Мультипликативно-дифференциальный метод 56
2.5 Модификация метода спектральной селекции объектов 57
2.6 Математическое описание процессов формирования сигналов при
дифференциальном, мультипликативном и комбинированном методах и
обработки
Выводы по главе 2
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ
3.1 Методика проведения экспериментов 70
3.2 Описание лабораторного оборудования72
3.3 Описание программных средств моделирования и оценки параметров
результатов визуализации объектов оптической локации
3.4 Результаты исследования дифференциального метода
3.5 Результаты исследования мультипликативного метода
3.6 Результаты исследования мультипликативно-дифференциального
метода
3.7 Результаты исследования алгоритма CLAHE применительно к
дифференциальным цифровым изображениям объектов оптической
локаци

3.8 Результаты исследования модифицированного метода спектральной
селекции объектов
3.9 Результаты исследования обработки методом слияния высокодетального
панхроматического и гиперспектрального изображения с укрупненными
пикселами
Выводы по главе 3
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 100
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ103

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

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.

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 оптической локации 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 [2].

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, $\Psi nop=1,2...$ – априорно задаваемое пороговое отношение сигнал-шум, d – размер элемента фотоприемника, характеризующий пространственное разрешение, n – число фотонов 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.

Например, в одних случаях может потребоваться локация объектов и сред в широких зонах регистрации, а в других – в избранных узких зонах регистрации, причем, как в видимой, так и ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра [3].

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

В совокупности с тенденциями к использованию средств вычислительной техники в оптической локации 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.

Проведение подобных исследований является актуальным, поскольку создает основу для создания технических систем на новой вычислительной базе, обеспечивающих значительное конкурентное превосходство в качестве и количестве решаемых задач. Быстрое развитие микросхем программируемой логики, фактически обеспечивающих параллельное выполнение сложных задач обработки сигналов, создает предпосылки для их применения в области цифровой обработки изображений, где задачи предварительной обработки, повышения качества изображений, а так же увеличения количества СК могут быть конвейеризованы и выполнены с высокой скоростью [1].

Приведенные выше обстоятельства подтверждают актуальность разработки новых методов увеличения количества СК в системах ОЛ, которые позволят повысить качество дистанционного мониторинга геосферы.

Тематика диссертации соответствует указу Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». В частности, приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Информационно-телекоммуникационные системы» и критических технологии Российской Федерации «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи», «Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем», «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения».

Степень разработанности темы исследования.

В работах отечественных и зарубежных авторов, в частности, Зубарева Ю.Б., Сагдуллаева Ю.С., Ковина С.Д., Сагдуллаева Т.Ю., Х. Канга и др. рассматриваются методы обработки изображений, получаемых в расширенных зонах регистрации с целью получения, с одной стороны, выигрыша в количестве СК за счет синтеза программным путем дополнительных узкоспектральных изображений, соответствующих зонам взаимного спектрального пере-

крытия лучистых потоков, а, с другой стороны, компенсации потери пространственной разрешающей способности путем слияния широкоспектральных изображений высокой четкости с узкоспектральным изображениями пониженной четкости.

Проведенный анализ литературы показал, что проблема увеличения количества спектральных каналов широко освещена, однако так же стало известно, что использованию методов цифровой обработки изображений объектов оптической локации, полученных в перекрывающихся участках зон регистрации лучистых потоков, посвящено малое количество научных работ, а также выявил ряд недостатков среди известных способов их формирования.

На основании вышеизложенного анализа публикаций сформулированы цель и задачи и диссертационного исследования.

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, представленные ниже.

1. Способ формирования цифровых спектральных изображений, заключающийся в выделении оптическим путем из лучистого потока в общем $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$ спектральном интервале *n* 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 интенсивности этих потоков, преобразовании сигналов в соответствующие цифровые коды U_1 , $U_2 \dots U_n$ и вычислении разности цифровых кодов $U_{\text{вых 1}} = U_1 - U_2$, $U_{\text{вых 2}} = U_2 - U_3$, ..., $U_{\text{вых n}} = U_{n-1} - U_n$, отличающийся тем, что для повышения точности при операциях с целыми положительными числами выходные цифровые коды, соответствующие узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2$, $\lambda_2 \div \lambda_3$, ..., $\lambda_{n-1} \div \lambda_n$, формируют по формулам $U_{\text{вых 1}}^* = (U_{\text{вых 1}} + U_{\text{макс.}})/2$, $U_{\text{вых 2}}^* = (U_{\text{вых 2}} + U_{\text{макс.}})/2$, ..., $U_{\text{вых n}}^* = (U_{\text{вых n}} + U_{\text{макс.}})/2$, где $U_{\text{макс.}}$ максимально возможное значение цифрового кода.

2. Способ формирования цифровых спектральных изображений, включающий выделение оптическим путем из лучистого потока в общем $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$ спектральном интервале *n* 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 $\lambda_1 < \lambda_2 ... < \lambda_n < \lambda_{\text{макс.}}$, формировании электрических сигналов, пропорциональных интенсивности этих потоков, преобразовании сигналов в соответствующие цифровые коды U_1 , $U_2 \ldots U_n$ и вычисление 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 , $U_2 \ldots U_n$, коды цифровых сигналов, соответствующие узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2$, $\lambda_2 \div \lambda_3$, ..., $\lambda_{n-1} \div \lambda_n$, 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 фор-

Мулам $U_1^1 = [U_1 \times (U_{\text{макс.}} - U_2)], \quad U_2^1 = [U_2 \times (U_{\text{макс.}} - U_3)], \quad \dots \quad U_{n-1}^1 = [U_{n-1} \times (U_{\text{макс.}} - U_n)],$ определяют максимальные значения $U_{1\text{макс.}}^1, \quad U_{2\text{макс.}}^1, \quad \dots \quad U_{n-1\text{макс.}}^1$ соответствующих вычисленных цифровых кодов $U_1^1, \quad U_2^1, \quad \dots \quad U_{n-1}^1$, а выходные значения кодов цифровых сигналов, соответствующие узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2, \quad \lambda_2 \div \lambda_3,$ $\dots, \quad \lambda_{n-1} \div \lambda_n, \quad \phi$ ормируют в соответствии с выражениями $U_{\text{вых 1}} = U_1^1 \times (U_{\text{макс.}} / U_{1\text{макс.}}^1),$ $U_{\text{вых 2}} = U_2^1 \times (U_{\text{макс.}} / U_{2\text{макс.}}^1), \quad \dots \quad U_{\text{вых n-1}} = U_{n-1}^1 \times (U_{\text{макс.}} / U_{n-1\text{макс.}}^1).$

Способ формирования цифровых спектральных изображений, за-3. ключающийся 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 $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}, \lambda_2 \div \lambda_{\text{макс.}}, \dots, \lambda_n \div \lambda_{\text{макс.}},$ где $\lambda_1 \lt \lambda_2 \dots \lt \lambda_n \lt \lambda_{\text{макс.}},$ формирование электрических сигналов, пропорциональных яркости света в элементах спектральных изображений, преобразование их в соответствующие цифровые коды U_1 , U_2 ... U_n и вычисление цифровых кодов по формулам $U_{1}^{0} = c \times U_{2} \times (U_{\text{make.}} - U_{1}), \ U_{2}^{0} = c \times U_{3} \times (U_{\text{make.}} - U_{2}), \ \cdots \ U_{n-1}^{0} = c \times U_{n} \times (U_{\text{make.}} - U_{n-1}), \ \text{a Takme}$ формулам $U_1^1 = c \times U_1 \times (U_{\text{мат}} - U_2), \qquad U_2^1 = c \times U_2 \times (U_{\text{мат}} - U_3),$ ПО . . . $U_{n-1}^{1} = c \times U_{n-1} \times (U_{\text{макс.}} - U_{n})$, где c < 1 является нормировочным множителем. При этом выходные коды цифровых спектральных сигналов оптической локации, соответствующие узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2$, $\lambda_2 \div \lambda_3$, ..., $\lambda_{n-1} \div \lambda_n$, формивыражениями $U_{\text{вых 1}} = [U_1^0 + (U_{\text{макс.}} - U_1^1)]/2$, руют В соответствии С $U_{\text{BJX 2}} = [U_2^0 + (U_{\text{MAKC}} - U_2^1)]/2, \qquad \cdots \qquad U_{\text{BJX } n-1} = [U_{n-1}^0 + (U_{\text{MAKC}} - U_{n-1}^1)]/2$ ИЛИ $U_{\text{BEX 1}} = [U_1^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_1^0)]/2, \ U_{\text{BEX 2}} = [U_2^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_2^0)]/2, \ \cdots \ U_{\text{BEX } n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{\text{MAKC.}} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2, \ \cdots \ U_{n-1} = [U_{n-1}^1 + (U_{\text{MAKC.}} - U_{n-1}^0)]/2$

4. Способ спектральной селекции, заключающийся в получении исходных спектральных изображений объекта оптической локации, 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...k, а x,y – пространственные координаты элементов изображения, причем, x=1,2...j...m, а y=1,2...l...n, где m и n – число элементов изображения, соответственно, по горизонтали и вертикали, формировании соответствующих спектральных сигналов оптической локации $U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$, преобразовании их в цифровую форму и получении, тем самым, цифровых кодов соответствующих элементов спектральных изображений в виде массива спектральных характеристик $S_{x,y} = \bigcup_{i=1}^{k} U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$, сравнении этих цифровых кодов с соответствующими эталонными значениями и формировании при их совпадении бинарного изображения селектируемого объекта, отличающийся тем, что задают 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 $|S_{x,y} - S_{x=a,y=b}| \le \varepsilon$, где ε – априорно заданное пороговое значение, а формирование бинарного изображения селектируемого объекта осуществляют ризображения.

Достоверность результатов научного исследования.

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.

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 мультипликативнодифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяет 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 *ε*.

5. Визуальное качество изображения, полученного в результате цифровой дифференциальной обработки, и его соответствие изображению, получаемому оптическим путем, может быть повышено путем дополнительной обработки алгоритмом CLAHE 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 пикселами обеспечивает возможность вариации размера площади зоны накопления на основе поиска компромисса между такими показателями качества системы, как кон-

трастная чувствительность, разрешающая способность и отношение сигналшум.

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 техникотехнологического 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 техникотехнологического и экспертного исследования архивных документов, фото-

документов 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ, ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ И СРЕД

Изображения с оптических локационных систем, полученные в нескольких диапазонах спектра, используются для решения различных задач [4-29]. Наиболее часто встречаются следующие задачи:

- извлечение дополнительной информации из изображения;
- исследование и реставрация объектов культурного наследия;
- спектральная селекция объектов;
- дистанционная диагностика окружающей среды;
- визуализация изображений, недоступных в видимом спектральном диапазоне.

В зависимости от решаемой задачи и предъявляемых требований, применяются различные цифровые и аппаратные средства формирования лучистых потоков.

1.1 Принципы формирования изображений в оптической локации

Визуализация объекта в нескольких спектральных диапазонах впервые была успешно применена при изучении Марса и Сатурна в 1909 г. русским ученым Г.А. Тиховым путем оптической локации одновременно в двух зонах спектра [30]. Большой вклад в дальнейшее развитие работ по визуализации в оптической локации внес Е.Л. Кринов [31], исследовавший и опубликовавший в 1947 г. результаты спектральной отражательной способности большого числа природных образований Земли. Его исследования способствовали расширению работ в этом направлении и, в частности, привели к созданию первых опытных систем оптической локации, включающих в себя нескольких спектральных каналов [19]. Все современные системы регистрации лучистых потоков по количеству каналов и спектральному разрешению можно разделить на: односпектральные (панхроматические), мультиспектральные (многоспектральные), гиперспектральные и ультраспектральные [27]. Характеристики систем приведены в таблице 1.

Система Количество каналов N	Количество каналов <i>N</i>	Спектральное разреше-
	ние СР, нм	
односпектральная	N=1	CP<2300
мультиспектральная	2≤N≤99	23,2≤ CP ≤1150
гиперспектральная	100≤ <i>N</i> ≤999	2,3≤ CP ≤23
ультраспектральная	N>1000	0,1≤ CP ≤2,3

Таблица 1 – Основные характеристики спектральных систем

1.1.1 Односпектральные (панхроматические) системы

Панхроматические изображения оптической локации состоят из одного канала цветовой информации, обладают высоким пространственным, но низким спектральным разрешением, ввиду того, что выделение лучистых потоков с различной длиной волны просто невозможно [28]. Они применяются в ситуациях, когда важно выявление деталей и текстур окружающей среды.

1.1.2 Мультиспектральные системы

Мультиспектральные системы оптической локации обладают преимуществами каждого спектрального канала, находящегося в их составе, имеют возможность беспрерывного наблюдения за окружающим пространством днем и ночью, инфракрасный канал спектра позволяет наблюдать объекты, имеющие тепловой контраст, наблюдение сквозь оконные стекла становится возможным при переключении на матричный фотоприемник видимого спектрального диапазона. При этом визуализация изображений, получаемых из разных спектральных каналов, обеспечивает бесспорный выигрыш в обнаружении и разрешении целей оптической локации при ухудшении видимости вследствие смены погодных условий или техногенных факторов [32].

Естественно, наиболее простой способ разработки мультиспектральных систем – это использование регистраторов лучистых потоков, обладающих высокой чувствительностью во всем рабочем диапазоне спектра, а также приемного оптического тракта, пропускающего лучистые потоки в том же диапазоне. Но эти вещи сложны в изготовлении и закупе. Ввиду отсутствия необходимых технологий, материалов и покрытий элементов оптического тракта подобные системы оптической локации существовали лишь в научных трудах.

Достижения современной науки и техники в производстве материалов и покрытий, создание новых типов матричных фотоприемников обеспечили физическую реализацию систем оптической локации широкого спектрального диапазона. На данный момент наиболее распространенным принципом построения мультиспектральных систем оптической локации является внедрение в комплекс нескольких узких спектральных каналов, каждый из которых подобран с учетом задач, отраженных в техническом задании на изделие. Среди распространенных характеристик, отражаемых в техническом задании, стоит отметить обнаружение целей, разрешающую способность каналов и сопровождение объектов [32].

1.1.3 Гиперспектральные системы

Гиперспектральные изображения оптической локации, обладая высоким спектральным разрешением, позволяют получать гораздо больше визуальной информации о цели, чем человеческий глаз. Гиперспектральные системы, анализируя спектр принимаемых лучистых потоков, позволяют различать типы почв и пород, стадии вегетации культур, степень распространения сине-зеленых водорослей, обнаруживать загрязнения водоемов [28].

Гиперспектральный метод оптической локации заключается в формировании для каждого элемента двумерного изображения дополнительно еще одной (спектральной) координаты, которая в физическом смысле является номером исследуемого диапазона спектра. Такой массив координат называют «гиперкубом данных» [9].

На рисунке 1 отражены варианты формирования «гиперкуба данных» [33]:

1) путем сканирования по пространственной координате с разложением света от строки оптического изображения в непрерывный спектр (например, на призме или дифракционной решетке) с фиксацией матричным фотоприемником получаемых двумерных картин для каждой строки кадра и последующей их программной обработкой [9];

2) путем сканирования по спектральной координате (последовательная спектральная подсветка объекта или ввод отрезающих светофильтров перед матричным фотоприемником) с фиксацией получаемых спектральных изображений и последующей их программной обработкой [9].



Рисунок 1 – Сканирование по пространству вдоль оси *x* (слева) и сканирование по спектру вдоль оси λ (справа) [9]

Первый способ наиболее часто применяется при дистанционном мониторинге геосферы. Оптическая схема [33], иллюстрирующая описанный выше метод, приведена на рисунке 2.

За счет дисперсии света на призме строка оптического изображения раскладывается на спектральные составляющие, образуя так называемую дисперсионную картину. Дисперсионные картины для всех строк кадра изображения и образуют «гиперкуб данных», изображенный на рисунке 3 [9].

Как видно на рисунках 2 и 3, сканирование по пространственной координате и обработка получаемых дисперсионных картин для каждой строки изображения потенциально обеспечивает существенное увеличение числа спектральных зон регистрации, ограничиваемое фактически контрастной чувствительностью и разрешающей способностью матричного фотоприемника. Однако, с другой стороны, реализация данного способа получения «гиперкуба данных» представляет собой достаточно сложную техническую задачу по отношению к аппаратному и программному обеспечению [9].



Рисунок 2 – Пример сканирования по пространству при дистанционном мониторинге геосферы [9]



Рисунок 3 – Дисперсия света на призме (слева) и образование «гиперкуба данных» (справа) [9]

В спектральных системах оптической локации для гиперспектрального анализа следует применять метод сканирования по спектральной координате, ввиду того, что его реализация в подобных системах осуществима при помощи модификации программного обеспечения почти без увеличения аппаратных затрат [9].

С использованием спектральной системы оптической локации возможна реализация автоматического ввода в вычислительное устройство спектральных изображений, полученных в заданных узких зонах регистрации лучистых потоков с дальнейшим преобразованием их в «гиперкуб данных», состоящий из двумерного массива изображения, каждому элементу которого соответствует номер спектрального канала.

Данный способ позволяет снимать спектральные характеристики в интересующей зоне геосферы, дополнительно реализуя возможность спектральной селекции исследуемых целей.

Путем сравнения номеров спектральных каналов может быть обеспечена возможность синтеза результирующего гиперспектрального изображения, в котором элементы с одинаковым номером спектрального канала окрашены в свой условный цвет [9].

При этом потенциальное число получаемых спектральных каналов *N* соответствует числу размещений с повторениями, которое определяется по формуле [9]:

$$N = m^k, \tag{1}$$

где *m* – число градаций яркости (обратно пропорционально ширине зоны допуска); *k* – число зон регистрации (соответствует количеству анализируемых спектральных изображений) [9].

1.2 Области применения и аппаратура

В зависимости от области применения спектральной визуализации используются различные аппаратно-программные системы, обрабатывающие изображения оптической локации. Традиционно аппаратный блок включает в себя модуль приема-передачи информации и вычислительное устройство. А в программной части заключена последовательность набора команд и функций, позволяющих выполнить обработку изображений оптической локации, наиболее результативным способом. Рассмотрим характеристики некоторых современных спектральных систем, а также решаемые ими задачи.

1.2.1 Системы оптической локации дистанционного мониторинга геосферы

Дистанционный мониторинг геосферы системами оптической локации заключается в получении визуальной информации об объектах и явлениях, происходящий в атмосфере, литосфере, гидросфере и биосфере, без непосредственного взаимодействия с ними.

Пассивные системы оптической локации регистрируют следующие виды излучений:

- свет, отраженный или излученный от объектов наблюдения;

 – электромагнитные волны теплового излучения, испускаемые или отраженные объектом;

 – электромагнитные волны оптического диапазона, порожденные явлениями в атмосфере.

Системы оптической локации, используемые в дистанционном мониторинге геосферы, регистрируют электромагнитные волны оптического спектра и обычно монтируются на летательные и космические аппараты, однако современные системы все чаще начинают размещать на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Идеальная схема дистанционного мониторинга показана на рисунке 4 [28].

На данной схеме наглядно отражено взаимодействие объектов, процессов и сред при дистанционном мониторинге геосферы:

- Солнце, как источник излучения оптического диапазона;

- оптическая трасса лучистых потоков;
- излучение и поглощения объекта;

- прием, обработка, регистрация и визуализация данных для оператора.



Рисунок 4 – Идеальная схема дистанционного мониторинга

Основным источником оптического излучения для геосферы является Солнце. Показанная схема дистанционного мониторинга справедлива при следующих условиях:

уровень оптического излучения высок и равномерен во всем спектре;

оптическая трасса лучистых потоков не оказывает воздействия на них;

 объект исследования при взаимодействии с излучением часть его поглощает, а остальное отражает, причем отраженное излучение однородно во всем диапазоне спектра.

Лучистые потоки от объекта исследования детектируются матричным фотоприемником, преобразуются в фототок, затем в напряжение, регистрируются, проходят цифровую обработку в вычислительном устройстве и по каналам связи передаются оператору с необходимым качеством визуализации.

На надежность и качество данных систем оптической локации в дистанционном мониторинге оказывают влияние следующие обстоятельства:

- неоднородность реальных источников оптического излучения;

 воздействие оптического тракта на лучистые потоки (переотражение, преломление, ослабление);

 нестабильность спектральной чувствительности веществ при изменении значений внешних воздействующих факторов;

 трудноразличимые спектральные характеристики исследуемых объектов;

 отсутствие в данный момент времени матричных фотоприемников, способных детектировать лучистые потоки во всем диапазоне спектра оптического излучения;

 временные затраты, связанные с длительной передачей сигналов с космических аппаратов, а также на постобработку высокодетальных изображений.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения числа визуализируемых спектральных каналов и применения в дистанционном мониторинге геосферы гиперспектральных и псевдогиперспектральных методов. В той связи большой интерес представляет развитие методов дифференциальной и интегральной обработки спектральных изображений, позволяющих получить дополнительную визуальную информацию.

Перспективным направлением являются также методы, позволяющие повысить контрастную чувствительность гиперспектральных систем при сохранении четкости изображений оптической локации за счет слиянии пары изображений: изображения с высоким спектральным, но низким пространственным разрешением и изображения, с высоким пространственным, но низким спектральным разрешением [34].

Система дистанционного мониторинга Landsat

Общий вид системы Landsat 7 приведен на рисунке 5 [35].



Рисунок 5 – Общий вид КА Landsat 7 с внешним оборудованием [35]

LANDSAT – одна из первых систем дистанционного мониторинга геосферы, размещенная на космическом аппарате. Аппарат этой серии впервые был запущен в 1972 году, на тот момент первоочередными задачами являлись: геологическая разведка полезных ископаемых, контроль лесовозобновлением, инвентаризация лесных ресурсов и решение сельскохозяйственных вопросов. В дальнейшем полученные снимки дистанционного мониторинга начали использовать для составления топографических и специальных карт, включающих в себя карты растительности и ландшафта, наблюдения за извержениями вулканов, цунами, таяния ледников, а так же прогнозирования процессов заболачивания, опустынивания и т.п.

Система дистанционного мониторинга КА Spot-5

Спутниковая система дистанционного мониторинга геосферы SPOT (Satellite Pour L'Observation de la Terre), разработанная во Франции совместно с другими странами Европейского союза, состоит из совокупности космических аппаратов и наземных модулей, выполняющих функции управления КА, сбора и анализа данных, обработки и передачи изображений. Структура системы Spot-5 приведена на рисунке 6 [35]. Аппарат включает в себя высокоточные матричные фотоприемные устройства, которые способны выдавать панхроматические изображения с разрешением до 2,5 м и цветные с разрешением 10 м, на борту также имеется оптический локатор VEGETATION-2, способный ежедневно выдавать изображения всей земной поверхности с разрешением в 1 км.



Рисунок 6 – Структура КА Spot-5 [35]

Снимки КА дистанционного мониторинга Spot-5 применяются для анализа и мониторинга состояния гидросферы, наблюдения за катаклизмами, городского планирования, построения карт местности и рационального природопользования. Пример изображения с КА Spot-5 приведен на рисунке 7 [35].



Рисунок 7 – Красноярский край. Мультиспектральное изображение. Пространственное разрешение – 10 м [35]

Космический комплекс дистанционного мониторинга «Ресурс-П»

Внешний вид комплекса «Ресурс-П» приведен на рисунке 8 [36].



Рисунок 8 – Космический комплекс «Ресурс-П» [36]

Данный комплекс разработан для получения изображений с высокой разрешающей способностью и широким полем зрения, имеет возможность получения гиперспектральных снимком геосферы.

Снимки КА дистанционного мониторинга «Ресурс-П» применяются для анализа и мониторинга состояния гидросферы, наблюдения за катаклизмами, городского планирования, построения карт местности и рационального природопользования, изучения последствий катастроф техногенного характера, оценки состояния инфраструктуры, поиска и оценки выработки месторождений полезных ископаемых, определения состояния ледового покрытия.

Особенности космического комплекса дистанционного мониторинга Земли «Ресурс-П» [36]:

сверхвысокое пространственное разрешение – лучше 1,0 м за
счет использования системы оптической локации «Геотон-Л1»;

– 216 спектральных каналов со спектральным разрешением от 5 до 10 нм. С их помощью возможно различение практически любые элементы на земной поверхность за счет отличающихся спектральных характеристик излучения объектов исследования;

 – RPC полиномы – позволяющие увеличить производительность вычислительного устройства при обработке информации с систем оптической локации;

 мультиспектральная система оптической локации с шириной полосы захвата до 441 км;

 стереоскопическая съемка – позволяющая построить высокодетальное трехмерное изображение земной поверхности.

Аппаратная составляющая комплекса «Ресурс-П» позволяет получать изображения геосферы в широкозахватном, панхроматическом, спектральном, и гиперспектральном методах оптической локации, далее идет передача данных на наземные командные пункты как в режиме реального времени, так и записей с устройства регистрации.

Пример изображения с космического комплекса «Ресурс-П» приведен на рисунке 9 [36].



Рисунок 9 – Мониторинг пожаров на полуострове Перахора [36]

Космический комплекс дистанционного мониторинга «Метеор-3М»

Внешний вид комплекса «Метеор-3М» приведен на рисунке 10 [37].



Рисунок 10 – Космический комплекс «Метеор-3М» [37]

Изображения КА дистанционного мониторинга «Метеор-ЗМ» используются для отслеживания атмосферных явлений и климатических изменений в окружающей среде, исследования гидросферы, построения карт облачности, определения качества лесовозобновления и рациональности природопользования, определения вертикального профиля температуры и влажности в атмосфере Земли, анализа распределении озона, изучения последствий катастроф техногенного и природного характера

Особенности космического комплекса дистанционного мониторинга Земли «Метеор-3М» [37]:

 наличие на борту радиолокационной системы «Северянин-М», позволяющей исследовать состояние ледовых покровов и осуществлять наблюдение за уровнем вод;

 непрерывный процесс съемки сканирующим устройством малого разрешения;

 Наличие радиометрической аппаратуры СВЧ-диапазона, позволяющей осуществлять исследование и прогнозирование ураганов и тайфунов;

 наличие инфракрасного Фурье-спектрометра, позволяющего строить профили температуры и влажности в тропосфере и нижней стратосфере;

 наличие гелиогеофизического аппаратурного комплекса, позволяющего отслеживать радиационной обстановку в околоземном пространстве.

Пример изображения с космического комплекса «Метеор-3М» приведен на рисунке 11 [37].



Рисунок 11 – Озеро Байкал [37]

1.2.2 Использование систем оптической локации при исследовании объектов культурного наследия

В работе музейных исследовательских лабораторий спектральные системы оптической локации получили широкое распространение, поскольку с изменением длины волны падающего излучения изменяются оптические характеристики вещества в зависимости от его химического состава. С увеличением поглощения вещество становится более темным, с увеличением пропускания увеличивается прозрачность, а с увеличением отражения вещество выглядит более светлым. В настоящее время для этих целей используют видимый и ближний инфракрасный (ИК) диапазон излучения, так как это связано с диапазоном спектральной чувствительности стандартных твердотельных фотоприемников, выполненных по технологии ПЗС и КМОП [4-9]. Так спектральные изображения, полученные от систем с аналогичными фотоприемными устройствами, после математической обработки различной степени ресурсоемкости, позволяют отличить бумажную основу тестового образца, изготовленного по старинной технологии (ручной отлив), и обычную бумагу, визуально схожую с данным тестовым образцом [38].

Наиболее простые в технической реализации методы, связанные с формированием и анализом *RGB* изображений могут быть рекомендованы для экспресс-анализа больших массивов документов.

Более сложные в технической реализации методы, связанные с мультии гиперспектральной визуализацией, а также методы, требующие больших вычислительных ресурсов для анализа изображений, в частности построение спектральных гистограмм и спектральная селекция, могут быть рекомендованы для углубленных исследований документов, представляющих наибольшую ценность [38].

Особый интерес в музейной исследовательской практике визуализация оптической локации в ИК диапазоне, получившая название «инфракрасной рефлектографии». Исследование в ближнем инфракрасном диапазоне излучения дает, например, весьма полезные сведения о произведениях иконописи. Так, например, сквозь плотный слой олифы хорошо выявляются скрытые изображения и надписи. В ИК диапазоне белила выглядят белыми – самыми светлыми. В такой же степени светлеют почти все желтые и оранжевые. Синие, зеленые и коричневые становятся темными или светлеют в зависимости от химического состава. Многие виды загрязнений прозрачны для ИК излучения. Таким образом, могут быть выявлены или лучше различимы скрытые надписи, рисунки и изображения, если они поглощают ИК излучение. Надписи, нанесенные графитным карандашом, также становятся более читаемыми. Хорошо выявляются уголь, копоть и сажа и выглядят черными. Черными выглядят даже самые тонкие штрихи, нанесенные тушью [4, 5].

Визуализация оптической локации в ИК спектре с успехом применяется при исследовании произведений живописи, а также исторических фото-

графий, может с успехом применяться при исследовании берестяных грамот с целью обнаружения и прочтения нанесенных на них надписей. При исследовании исторических бумаг и рукописно-книжных памятников практический интерес представляет обнаружение и идентификация веществ, входящих в состав бумажной основы и красителей, что позволяет уточнять датировку и место происхождения объекта. На рисунке 12 показан пример проявления закрашенной записи в ближнем ИК спектре [6-8].



Рисунок 12 – Запись железо-галловыми чернилами, закрашенная самим писцом (вверху), прочтение закрашенной записи в ближнем ИК спектре, 870 нм – комбинация снимков (внизу)

Несмотря на то, что в ближнем ИК диапазоне имеется возможность визуализации целого ряда особенностей музейных объектов, практический интерес может представлять использование в таких исследованиях ИК оптических локаторов с более длинноволновым диапазоном спектральной чувствительности. Так, например, поскольку с увеличением длины волны излучения контраст деталей изображения, выявляемых на произведениях живописи под слоем краски, значительно возрастает, расширение диапазона спектральной чувствительности в более далекую инфракрасную область является весьма ценным. Особенно это существенно в случаях, когда на картинах требуется выявить подготовительный авторский рисунок, композиционные изменения в подмалевке, маскируемые лежащим сверху сильно-поглощающим слоем краски [4].

Эффективность визуализации в диапазоне 3-5 мкм внутренних слоев краски, находящихся под внешним, более поздним слоем, иллюстрирует рисунок 13 [39]. На рисунке 13 показаны совмещенные по горизонтальной границе раздела изображения одного и того же фрагмента иконы для разных спектральных диапазонов. Изображение, расположенное над границей раздела, соответствует длине волны 910 нм. В изображении, расположенном под границей раздела и соответствующем диапазону 3-5 мкм, отчетливо проявляются детали первоначального рисунка, скрытого нанесенным на него более поздним слоем [40].



Рисунок 13 – Изображения совмещенных фрагментов иконы, полученные в диапазоне 910 нм (сверху от горизонтальной границы раздела) и в диапазоне 3-5 мкм (снизу от горизонтальной границы раздела)

1.3 Анализ известных методов визуализации объектов оптической локации и извлечения дополнительной визуальной информации

Основными критериями качества визуализации изображений являются контрастность и разрешающая способность, которые в совокупности повышают достоверность обнаружения и распознавания объектов оптической локации, на улучшение этих параметром и направлены существующие многочисленные методы обработки. К таким методам относятся линейная яркостная коррекция, пространственная и частотная фильтрация, инверсия изображения, алгоритм адаптивной контрастно-ограниченной эквализации гистограммы, степенные и логарифмические преобразования, и прочие. При этом следует выделить два основных вида обработки сигналов спектральных изображений [41]:

 раздельную (предварительную) обработку спектральных изображений;

 совместную обработку спектральных изображений, направленную на формирование результирующего сигнала из исходных.

Раздельная обработка *m*-спектральных каналов системы оптической локации предполагает повышение качества спектрального изображения каждого канала, например, увеличение контрастности и резкости изображения, в отличие от нее совместная обработка *m*-спектральных сигналов оптической локации ориентирована на выполнение следующих задач [41]:

 формирования единого (результирующего) изображения из mспектральных изображений, в котором сохранены лучшие различительные признаки по контрастности и отношению сигнал/шум в отдельных изображениях;

– идентификации объектов по спектрально-энергетическим признакам, путем автоматического анализа распределения сигналов в *m*-зонах регистрации лучистого потока.

При совместной обработке сигналов цветной оптической локационной системы $U_R(t)$, $U_G(t)$, $U_B(t)$, спектральной визуализации $U_{\Delta\lambda 1}(t)$, $U_{\Delta\lambda 2}(t)$, $U_{\Delta\lambda 3}(t)$, так и тепловидения $U_{\Delta\lambda 4}(t)$, $U_{\Delta\lambda 5}(t)$, сформированные исходные и результирующие сигналы могут подаваться на входы *RGB* цветных видеоконтрольных устройств в различных сочетаниях и полярности для решения задач визуального анализа изображений наблюдаемого пространства [42].

На рисунке 14 [43] проиллюстрированы варианты приема лучистых потоков в системах дистанционного мониторинга спектральной оптической локации, разделяющиеся на три метода обработки: дифференциальный, интегральный и интегрально-дифференциальный.



Рисунок 14 – Варианты приема лучистых потоков в системах дистанционного мониторинга спектральной оптической локации [43]

1.3.1 Дифференциальный метод

Дифференциальным называется способ регистрации лучистого потока, при котором наблюдение ведется в некотором количестве узких зон, расположенных в границах спектрального диапазона от λ_1 до λ_n [43].

При спектральной визуализации по дифференциальному способу критерии определения ширины и количества узких зон регистрации целесообразно представлять в данном виде. Предположим, что {*M*} это зоны реги-
страции спектральных диапазонов лучистого потока, а $\{N\}$ это селектируемые объекты в поле зрения системы оптической локации. Тогда необходимо определить минимальное достаточное количество узких диапазонов регистрации лучистого потока m, а также их положение на отрезке спектрального диапазона от λ_1 до λ_n при котором количество обнаруживаемых и распознаваемых объектов n будет стремиться к максимально возможному значению [43].

В таблице 2 отображено предельно достижимое количество зон наблюдения от их ширины в различных диапазонах спектра. Ультрафиолетовый спектральный диапазон (УФ) от 0,25 до 0,37 мкм, видимый спектральный диапазон (ВИ) от 0,38 до 0,76 мкм, ближний инфракрасный спектральный диапазон (ИК₁) от 0,77 до 2,5 мкм, средний ИК₂ спектральный диапазон от 3 до 5 мкм, а также дальний ИК₃ спектральный диапазон от 8 до 12 мкм [43].

n/n	Ширина зоны регистрации, нм	Области оптического спектра					
		и их принятая ширина					
		УΦ	ВИ	ИК1	ИК2	ИК3	
		120 нм	380 нм	1730 нм	2000 нм	4000 нм	
		Число зон регистрации, т					
1.	10	12	-	-	-	-	
2.	20	6	19	-	-	-	
3.	30	4	12	-	-	-	
4.	60	2	6	28	-	-	
5.	120	1	3	14	-	-	
6.	180	-	2	8	11	-	
7.	360	-	1	4	5	-	
8.	610	-	-	2	3	6	
9.	950	-	-	1	2	4	
10.	1900	-	-	-	1	2	
11.	3800	-	-	-	-	1	

Таблица 2 – Предельно достижимое количество зон наблюдения от их ширины в различных диапазонах спектра

Проанализировав таблицу 2 можно сделать вывод, что предельно достижимое количество узких зон регистрации лучистого потока в рассмотренном широком диапазоне спектра равно 76, из которых 12 расположены в диапазоне от 0,25 до 0,37 мкм, 19 в диапазоне 0,38 до 0,76 мкм, 28 в диапазоне от 0,77 до 2,5 мкм, 11 в диапазоне от 3 до 5 мкм и 6 в диапазоне от 8 до 12 мкм [43].

Чтобы реализовать дифференциальный метод визуализации требуется регистрация лучистого потока минимум в двух зонах рассмотренного спектра от 0,25 до 12 мкм, которые могут принадлежать к любой из приведенных областей УФ, ВИ, ИК. В результате данного подхода количество диапазонов визуализации лучистого потока в общем спектральном диапазоне от 0,25 до 12 мкм будет равно четырем [43].

1.3.2 Интегральный метод

Интегральным называется способ регистрации лучистого потока, при котором наблюдение ведется в некотором количестве условно широких зон, расположенных в границах спектрального диапазона от λ_1 до λ_n [43]. Для эффективного применения данного способа необходимо располагать информацией о количестве объектов наблюдения, их спектральных характеристиках, притом нет необходимости знать спектрально-энергетические характеристики объектов, а также количество регистрируемых сочетаний целей. Система оптической локации, построенная по данному способу использует одинаковый диапазон регистрации на все спектральные каналы, содержащие в себе оптические светофильтры со спектральными характеристиками, удовлетворяющими условию [43]

$$\Phi_1(\lambda) \neq \Phi_2(\lambda) \neq \Phi_i(\lambda) \neq \dots, \neq \Phi_m(\lambda),$$
 (2)

где $\Phi_1(\lambda)$ – СХ *i*-го О Φ , *m* – число О Φ с разными СХ ($m \ge 2$).

В системе, где количество оптических фильтров *m* равно 2, спектральные характеристики этих фильтров могут соответствовать условию (3), т.е. являться взаимно противоположными, но их форма может отличаться друг от друга [43].

$$\Phi_1(\lambda) = 1 - \Phi_2(\lambda). \tag{3}$$

Системы оптической локации, построенные с применением интегрального метода регистрации успешно решают задачи спектральной селекции объектов за счет индивидуального распределения интегральных спектральных сигналов $U_{ci}(\lambda)$ во всех рассматриваемых случаях. Из выражения (2) следует, что амплитудные значения спектральных сигналов, соответствующие селектируемым целям, обладают собственным распределением, удовлетворяющим неравенству [43]

$$U_{c1}(t) \neq U_{c2}(t) \neq U_{ci}(t) \neq ..., \neq U_{cm}(t)$$
. (4)

Стоит добавить, что интегральный метод регистрации способствует снижению требований к системам оптической локации, в частности к чувствительности спектральных каналов за счет регистрации лучистых поток в относительно широком диапазоне спектра. Используя данный метод, можно получить прирост в отношении сигнал/шум в спектральных сигналах каналов системы оптической локации. Среди прочих преимуществ метода следует отметить возможность обнаружения целей, имеющих малую отражательную способность, а также устойчивость к колебанию освещенности сектора наблюдения в широком диапазоне [43].

Применение интегрального способа регистрации светового потока позволяет вычислить амплитудное значение сигналов в Δλ_i участке наблюдения. Чтобы это реализовать, необходимо условно широкий спектральный диапазон принимаемого светового потока условно разделить на меньшие участки регистрации исследуемого лучистого потока [43]

$$(\lambda_n - \lambda_1) = (\Delta \lambda_1 + \Delta \lambda_2 + \dots + \Delta \lambda_i + \dots + \Delta \lambda_m), \tag{5}$$

где ширина $\Delta \lambda_i$ диапазона наблюдения выбирается вне зависимости от ширины остальных участков, на которые условно разделен широкий диапазон регистрации.

Учитывая (4) и (5) можно составить систему линейных уравнений [44]:

$$a_{11}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{i}} + \dots + a_{1i}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{i}} + \dots + a_{1m}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{m}} = U_{\epsilon1}(t),$$

$$a_{21}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{i}} + \dots + a_{2i}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{i}} + \dots + a_{2m}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{m}} = U_{\epsilon2}(t),$$

$$\dots$$

$$a_{i1}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{i}} + \dots + a_{ii}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{i}} + \dots + a_{im}U_{\epsilon}(t)_{\Delta\lambda_{m}} = U_{\epsiloni}(t),$$
(6)

 $a_{nl}U_{\mathfrak{c}}(t)_{\Delta\lambda_{l}}+,\ldots,+a_{ni}U_{\mathfrak{c}}(t)_{\Delta\lambda_{i}}+,\ldots,+a_{nm}U_{\mathfrak{c}}(t)_{\Delta\lambda_{m}}=U_{\mathfrak{c}n}(t)\,.$

В системе уравнений (6) интегральные (общие) сигналы U_{c1}(t), ..., $U_{ci}(t)$, ..., $U_{cn}(t)$, передаваемые *i*-й фотоприемной матрицей, являются результатом суммирования сигналов различных участков спектрального диапазона (5) $\Delta \lambda_i \epsilon \{M\}$ с известными коэффициентами a_{11} , ..., a_{1m} , ..., a_{i1} , ..., a_{ni} , ..., a_{nm} , учитывающими результирующую спектральную характеристику 1, 2, ..., *i*, ..., *m*-го спектрального канала системы оптической локации. Для того чтобы, решить систему линейных уравнений (6) требуется соблюдение неравенства определитель системы линейных уравнений $\Delta > 0$ [45].

Разделение светового потока в приемном тракте оптического локатора возможно реализовать оптическими схемами с различным количеством каналов. Однако считается, что спектральные характеристики фотоприемника оптической системы (объектива) и среды наблюдения должны быть заранее известны. Изменение значений коэффициентов *a_{nm}* определяется известными спектральными характеристиками оптических фильтров [43].

Если предположить, что спектральная характеристика среды наблюдения, оптического тракта и приемника в регистрируемом спектральном диапазоне длин волн от λ_1 до λ_n равномерны и равны условной единице. Тогда значение коэффициентов a_{11} , a_{12} и a_{21} , a_{22} будет определяться ходом СХ ОФ₁ и ОФ₂. На рисунке 15 показаны идеализированные СХ ОФ1 и ОФ2 (а и б) [43].



Рисунок 15 – Спектральные характеристики первого и второго оптических фильтров

Спектральные характеристики оптических фильтров и их форма могут отличаться, но обязательно соблюдение условия (2), что справедливо и для общей результирующей спектральной характеристике 1, 2, ..., *i*, ..., *m*-го оптико-электронного тракта в совокупности с матричным фотоприемником в многоканальной спектральной системе оптической локации [43].

1.3.3 Интегрально-дифференциальный метод

Интегрально-дифференциальный метод подразумевает сочетание в себе стразу два способа – это интегральный способ для регистрации светового потока и представления его в виде спектральных сигналов, а далее применение дифференциального способа для последующей обработки спектральных сигналов изображений, соответствующих наблюдаемой сцене, в системах оптической локации. [46]. Типичный порядок действий при обработке данным методом состоит из следующего набора выполняемых операций [44]:

– пропускание светового потока сквозь оптические фильтры, имеющие прямоугольную характеристику в диапазонах длин волн $\lambda_2...\lambda_1$, $\lambda_3...\lambda_1$, $\lambda_4...\lambda_1$ и т. д.;

– преобразование потоков света;

 формирование нескольких спектральных сигналов оптической локации и их раздельную обработку;

 совместную обработку спектральных сигналов оптической локации в виде их последовательного вычитания между собой;

– формирование и выделение сигналов, соответствующих узким участкам наблюдения $\Delta \lambda_i$ диапазона спектра от λ_1 до λ_n .

Регистрация светового потока по интегрально-дифференциальному способу в спектральном диапазоне длин волн от λ_1 до λ_n производится с применением участков наблюдения различной шириной вида [45]

$$(\lambda_{2} - \lambda_{1}), (\lambda_{3} - \lambda_{1}), (\lambda_{4} - \lambda_{1}), ..., (\lambda_{n} - \lambda_{1}).$$
 (7)

Данные участки наблюдения световых потоков формируют спектральные сигналы изображений в виде

$$U_{1(\lambda 2 - \lambda 1)}(t), U_{2(\lambda 3 - \lambda 1)}(t), U_{3(\lambda 4 - \lambda 1)}(t), ..., U_{n(\lambda n - \lambda 1)}(t).$$
 (8)

Имея несколько спектральных сигналов, посредством их вычитания, можно получить дополнительную визуальную информацию, соответствующую иным спектральным диапазонам наблюдения

$$U_{(\lambda 3 - \lambda 2)}(t) = [U_{2(\lambda 3 - \lambda 1)}(t) - U_{1(\lambda 2 - \lambda 1)}(t)],$$

$$U_{(\lambda 4 - \lambda 3)}(t) = [U_{3(\lambda 4 - \lambda 1)}(t) - U_{2(\lambda 3 - \lambda 1)}(t)],$$
...
$$U_{(\lambda n - \lambda n - 1)}(t) = [U_{m(\lambda n - \lambda 1)}(t) - U_{m - 1(\lambda n - 1 - \lambda 1)}(t)].$$
(9)

Путем изменения ширины соседних участков приема светового потока, например, $(\lambda_3 - \lambda_1)$ и $(\lambda_2 - \lambda_1)$ возможно вычислить величину спектрального сигнала нового узкого участка наблюдения $(\lambda_3 - \lambda_2)$. Варьированием границы

 λ_3 или λ_2 достигается искомое значение ширины для желаемого узкого участка наблюдения в заданном диапазоне спектра [43].

На рисунке 15 отображены спектральные характеристики двух оптических фильтров (а и б) при помощи которых получают дополнительный спектральный сигнал, в соответствии с (9), альтернативным вариантом получения сигнала является использование фильтра со спектральной характеристикой – Ф3(λ), отображенной на рисунке 16 в [43].



Рисунок 16 – Спектральные характеристики исходных (а, б) и сформированного ОФ (в)

Описанный выше метод позволяет увеличить количество спектральных каналов на выходе системы оптической локации без увеличения их физического количества в оптическом тракте. Суммарное количество спектральных каналов, получаемых при обработке 2, 3, 4,..., *m* сигналов, образующихся за счет приема светового потока с изменяемой шириной участка регистрации и выполнением операций по вычитанию спектральных сигналов, отражено в таблице 3, и может быть вычислено по формуле [43]

$$M = 2^m - 1. (10)$$

Таблица 3 – Зависимость достижимого количества участков регистрации от их ширины различных спектральных диапазонах (УФ, ВИ, ИК) [43]

n/n	Число исходных спектральных сигна- лов	Число новых спек- тральных сигналов после совместной обработки	Общее число фор- мируемых спек- тральных сигналов
1.	2	1	3
2.	3	4	7
3.	4	11	15
4.	5	26	31
5.	6	57	63

1.3.4 Линейная яркостная коррекция

Линейная яркостная коррекция изображений спектральной оптической локации необходима в случаях, когда динамический диапазон яркости очень узок, что приводит к снижению качества визуализации и переутомлению оператора. Методика улучшения сводится к растяжению значений яркости пикселей на весь динамический диапазон (0...255), что приводит к увеличению контраста изображения

При линейном контрастировании используется линейное поэлементное преобразование вида [47]

$$y = a * x + b , \tag{11}$$

параметры которого и определяются желаемыми значениями минимальной *y*_{min} и максимальной *y*_{max} выходной яркости. Решив систему уравнений

$$\begin{cases} y_{\min} = a * x_{\min} + b \\ y_{\max} = a * x_{\max} + b \end{cases}$$

относительно параметров преобразования *a* и *b*, нетрудно привести (11) к виду

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} (y_{\max} - y_{\min}) + y_{\min}.$$

На рисунке 17 показаны исходное изображение (а) и результат контрастирования (б) при $y_{min} = 0$ и $y_{max} = 255$ [47].



Рисунок 17 – Пример линейного контрастирования [47]

Проанализировав изображения на рисунке 22, можно уверенно заключить, что визуальное восприятие и количество различимых деталей изображения после линейной яркостной коррекции значительно возросло.

1.3.5 Алгоритм CLAHE

Алгоритм адаптивной контрастно-ограниченной эквализации гистограммы (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalizaton, CLAHE) был разработан в конце 80-х годов XX века для обработки медицинских изображений [48, 49].

Сущность алгоритма CLAHE заключается в следующем. Исходное изображение разбивается на квадратные области (блоки), для каждого из которых вычисляется гистограмма яркости, причем высота столбцов гистограммы ограничивается сверху заданным порогом. В случае превышения по-

рога пиксели равномерно распределяются по другим столбцам гистограммы, как показано на рисунке 18.



Рисунок 18 – Пример перераспределения пикселей при ограничении контраста в алгоритме CLAHE

Затем для каждого блока аналогично традиционному методу эквализации гистограммы [2] рассчитываются таблицы отображения яркости. Таблица отображения яркости представляет собой таблицу поиска (Lookup Table, LUT), задающую соответствие между уровнями яркости пикселей исходного и результирующего изображений. Такие таблицы широко используются при обработке изображений для сокращения объема вычислений. Таблица отображения яркости представляет собой функцию, и на практике ее удобно представлять в виде графика, как показано на рисунке 19.

График для таблицы, не вносящей изменений в исходное изображение, представляет собой прямую под углом 45 градусов, как показано на рисунке 19а.



Рисунок 19 – Применение таблицы отображения яркости к фрагменту изображения: а) отсутствие изменения яркости (результат равен исходному изображению); б) пример изменения яркости (растяжение темной и светлой части

гистограммы): θ – угол наклона касательной к графику

Результат применения традиционного алгоритма эквализации гистограммы, развитием которого является CLAHE, заключается в том, что распределение яркости в изображении становится ближе к равномерному [2]. Соответственно, пики на гистограмме (соответствующие обширным областям приблизительно одинаковой яркости) расширяются. Это, с одной стороны, позволяет выявить слабоконтрастные детали изображения, но с другой стороны приводит к резкому повышению уровня шума. Как показано на рисунке 196, растяжение некоторого диапазона яркостей ведет к увеличению угла наклона касательной к графику функции преобразования яркости. Соответственно, сжатие диапазона приведет к уменьшению угла наклона касательной.

Введение в алгоритме CLAHE ограничения высоты столбца гистограммы позволяет регулировать степень растяжения пиков на гистограмме и тем самым влиять на усиление шума. Применительно к таблице отображения яркости это ведет к ограничению максимального угла наклона графика.

Поскольку гистограммы яркости для блоков изображения вычисляются независимо, непосредственное применение полученных таблиц отображения яркости приведет к появлению границ между блоками на результирующем изображении (каждый блок будет обработан как отдельное изображение).

Для подавления данного явления каждому пикселю выходного изображения присваивается не просто значение из соответствующей таблицы, а результат билинейной интерполяции соответствующих значений из таблиц отображения яркости четырех соседних блоков.

1.3.6 Спектральная селекция объектов

Основным источником информации для различения объектов при спектральной селекции оптических изображений (ОИ) являются спектральноэнергетические признаки (СЭП), пространственные признаки (ПП) и динамические (дополнительные) признаки (ДП) объектов. Спектральная селекция ОИ базируется на анализе распределения интенсивности отраженного лучистого (светового) потока (сигналов изображений) объектов в различных спектральных участках (зонах) оптического спектра [50].

Рассмотрим ОИ, которые могут включать некоторое множество классов объектов

$$N = \{A, B, C, ..., W\},$$
(12)

где каждый конкретный класс объектов *A*, *B*, *C*,..., *W* может состоять из своего множества отдельных объектов

$$A = \{a_1, a_2, ..., a_i, ..., a_k\}$$

$$B = \{b_1, b_2, ..., b_i, ..., b_h\}$$

$$W = \{w_1, w_2, ..., w_i, ..., w_z\}$$

где k, h, ..., z – число объектов для каждого класса $\{N\}$ в наблюдаемом пространстве.

При спектральной селекции получение информации об объектах осуществляется путем регистрации и преобразования лучистого (светового) потока в некотором множестве зон регистрации $\{M\}$ [50]

$$M = \{ \Delta \lambda_1, \Delta \lambda_2, ..., \Delta \lambda_i, ..., \Delta \lambda_m \},$$
(13)

где *т* – общее число зон регистрации лучистого (светового) потока.

Интенсивность отраженного (излученного) лучистого потока от отдельных классов объектов некоторого множества {N} в зонах регистрации {M} охарактеризуем некоторым множеством спектрально-энергетических признаков {X(N)} [50]

$$X(N) = \{X(A), X(B), ..., X(W)\},$$
(14)

где каждый класс объектов включает свое множество спектральноэнергетических признаков (СЭП) по отдельным объектам

(

$$X(A) = \{X(a_1), X(a_2), ..., X(a_k)\},$$
....,
$$X(W) = \{X(w_1), X(w_2), ..., X(w_z)\},$$
(15)

а также каждый объект из {N} для m зон регистрации {M} характеризуются множеством своих признаков [50]

$$X(a_{1}) = \{x(a_{1})_{\Delta\lambda_{1}}, x(a_{1})_{\Delta\lambda_{2}}, ..., x(a_{1})_{\Delta\lambda_{i}}, ..., x(a_{1})_{\Delta\lambda_{m}}\},$$

$$X(a_{k}) = \{x(a_{k})_{\Delta\lambda_{1}}, x(a_{k})_{\Delta\lambda_{2}}, ..., x(a_{k})_{\Delta\lambda_{i}}, ..., x(a_{k})_{\Delta\lambda_{m}}\},$$

$$X(w_{z}) = \{x(w_{z})_{\Delta\lambda_{1}}, x(w_{z})_{\Delta\lambda_{2}}, ..., x(w_{z})_{\Delta\lambda_{i}}, ..., x(w_{z})_{\Delta\lambda_{m}}\}.$$
(16)

Для спектральной селекции объектов {*N*}, образующих признаки 0 < $X(a_1), X(a_2), ..., X(w_z) < p$ в зонах регистрации {*M*}, всегда существует некоторое число зон регистрации лучистого (светового) потока $1 \le m \le V$, так что $X(a_1) \ne X(a_2), ..., X(a_1) \ne X(w_z)$ [50].

Вначале докажем, что выражение $0 < X(a_1), X(a_2), ..., X(w_z) < p$ справедливо для любого числа зон регистрации m из $\{M\}$. Значения признаков $X(a_1)$, $X(a_2), ..., X(w_z)$ зависит и определяется зонами регистрации $\{M\}$ и представляет собой функцию от длины волны оптического спектра.

Как известно лучистый (световой) поток, отраженный от объектов, всегда положителен и ненулевой, что выражается равенством [50]

$$0 < F_{\text{orp}}(\lambda)_{x,y,z} = \left[\rho(\lambda) * F_{\text{nag}}(\lambda)\right]_{x,y,z} < \infty, \qquad (17)$$

где $F_{\text{отр}}(\lambda)$ и $F_{\text{пад}}(\lambda)$ – отраженный и падающий лучистый (световой) поток; $\rho(\lambda)$ – коэффициент отражения лучистого (светового) потока; *x*, *y*, *z* – пространственная область объекта.

В соответствии с (17) можно записать, что признаки $X(a_1)$, $X(a_2)$,..., $X(w_7)$ также положительные и ненулевые, то есть [50]

$$0 < X(a_1), X(a_2), ..., X(w_z) < \rho$$
,

где *р* – число, всегда меньшее бесконечности.

Неравенства признаков $X(a_1) \neq X(a_2),..., X(a_1) \neq X(w_z)$ выполняются хоть для одной зоны регистрации из $\{M\}$. Для доказательства этого представим распределения значений признаков $X(a_1), X(a_2),..., X(w_z)$ в зонах регистрации $\{M\}$ по убывающей, возрастающей или переменно возрастающей и убывающей последовательности чисел вариационного ряда. Для признаков $X(a_1), X(a_2),..., X(w_z)$, характеризующих объекты $\{N\}$ в зонах регистрации $\{M\}$ всегда может иметь место [50]

$$\begin{array}{l}
x(a_{1})_{\Delta\lambda_{1}} < x(a_{1})_{\Delta\lambda_{2}} <, ..., < x(a_{1})_{\Delta\lambda_{i}} <, ..., < x(a_{1})_{\Delta\lambda_{m}}, \\
\vdots \\
x(a_{k})_{\Delta\lambda_{1}} < x(a_{k})_{\Delta\lambda_{2}} <, ..., < x(a_{k})_{\Delta\lambda_{i}} <, ..., = x(a_{k})_{\Delta\lambda_{m}}, \\
\vdots \\
x(b_{h})_{\Delta\lambda_{1}} > x(b_{h})_{\Delta\lambda_{2}} >, ..., > x(b_{h})_{\Delta\lambda_{i}} >, ..., > x(b_{h})_{\Delta\lambda_{m}}, \\
\vdots \\
x(w_{z})_{\Delta\lambda_{1}} < x(w_{z})_{\Delta\lambda_{2}} >, ..., < x(w_{z})_{\Delta\lambda_{i}} <, ..., > x(w_{z})_{\Delta\lambda_{m}}.
\end{array}$$
(18)

В противном случае не существуют классы объектов {*N*} или {*A*}, {*B*},..., {*W*}, а только отдельные объекты, либо a_1 , либо a_2 , ..., либо w_z . Из выражения (18) следует, что всегда будет конкретная зона регистрации $\Delta \lambda_1$, $\Delta \lambda_2,..., \Delta \lambda_i,...,\Delta \lambda_m$ для которой справедливо, что признаки удовлетворяют условию [50]

$$x(a_1)_{\Delta\lambda_i} \neq x(a_2)_{\Delta\lambda_i}, \dots, x(a_i)_{\Delta\lambda_i} \neq x(b_i)_{\Delta\lambda_i}, \dots, x(c_1)_{\Delta\lambda_i} \neq x(w_z)_{\Delta\lambda_i}.$$
(19)

В соответствии с этим существует также $\Delta \lambda_i$ -зона регистрации, так что

$$X(a_1) \neq X(a_2), \dots, X(a_1) \neq X(b_h), \dots, X(a_k) \neq X(w_k) .$$
(20)

Вследствие этого всегда имеется некоторое число зон регистрации m из $\{M\}$ для селекции всех объектов $\{N\}$. Согласно изложенному при спектральной селекции объектов возможно различение любого числа объектов между собой по СЭП в наблюдаемом пространстве. На практике эта возможность может ограничиваться рядом условий, которые принципиально могут быть успешно решены по мере совершенствования систем оптической локации и технологий по обработке сигналов [50].

Выводы по главе 1

Изучив материалы научных исследований по тематике диссертации, стоит отметить следующие моменты. Отличительные черты, выявляемые при оптической локации объектов культурного наследия, во многом пересекаются с задачами, решаемыми системами дистанционного мониторинга геосферы. Это и цветовая селекция объектов, и выделение веществ определенного химического состава по их отражающей способности в различных спектральных диапазонах, что в свою очередь позволяет выявлять наиболее четкие границы зон на изображениях. Столь схожие решаемые задачи, а так же имеющиеся общие проблемы в исследованиях дают право апробации методов обработки спектральных изображений на объектах культурного наследия перед применением в системах дистанционного мониторинга геосферы, ввиду их большей доступности, упрощения и удешевления экспериментов.

На основании изложенных в первой главе диссертации:

 принципов формирования спектральных изображений в процессе оптической локации,

 методов и примеров реализации аппаратно-программных средств оптической локации, в том числе, предназначенных для дистанционного мониторинга геосферы,

3) аналитического обзора методов извлечения дополнительной визуальной информации путем обработки сигналов изображений, получаемых от лучистых потоков в процессе оптической локации объектов и сред, в том числе при дистанционном мониторинге геосферы.

Определены следующие задачи диссертационной работы по развитию существующих и созданию новых методов обработки и анализа этих сигналов.

1. Разработка новых методов качественной и количественной оценки эффективности результатов обработки сигналов оптической локации, по-

лучаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации.

2. Разработка новых методов оценки соответствия операций непосредственных преобразований лучистых потоков и операций, связанных с функциями от лучистых потоков, а именно: операций над пропорциональными им цифровыми сигналами.

3. Разработка новых методов цифровой обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации спектральной визуализации, с целью повышения спектральной избирательности системы и извлечения за счет этого дополнительной визуальной информации.

4. Теоретические исследования вновь разработанных методов и их математическое описание.

5. Экспериментальные исследования вновь разработанных методов путем компьютерного моделирования.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1 Методика сравнения результатов извлечения дополнительной визуальной информации при обработке цифровых изображений объектов оптической локации

Существует множество критериев качества обработки изображений (резкость, контраст, отношение сигнал-шум и многие другие) [2]. Они являются классическими и хорошо подходят для общей оценки эффективности методов обработки изображений. Но в частных случаях возникают иные задачи оценки, для которых необходимо вновь разрабатывать критерии качества.

Разработанный метод позволяет оценить соответствие спектральных изображений, полученных оптическим выделением спектрального потока в интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$ изображениям, полученным путем цифровой обработки пары спектральных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в том же интервале длин волн. Метод основан на оценке качества цветопередачи цветного изображения, восстановленного из сигналов, полученных оптическим выделением и путем цифровой обработки. Выбор узких зон регистрации излучения обусловлен следующими факторами: возможностями зрительной системы человека и наличием недорогих оптических фильтров, для формирования исходных расширенных зон регистрации. Поэтому для проверки разработанных методов спектральной визуализации были выбраны узкие зоны регистрации излучения, соответствующие трехкомпонентному восприятию человека, а именно красный, зеленый и синий.

Наравне с вновь разработанным методом использовалась количественная оценка повышения контрастности изображения.

2.2 Модификация дифференциального метода

Формирование спектральных изображений по методу дифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, сводится к следующему. Из светового потока в общем спектральном интервале $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$ оптическим путем выделяют п 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 $\lambda_1 < \lambda_2 ... < \lambda_n < \lambda_{\text{макс.}}$, затем формируют электрические сигналы, пропорциональные яркости света в элементах спектральных изображений, и получают соответствующие цифровые коды U_1 , U_2 U_n , из которых формируют разностные выходные цифровые коды $U_{\text{вых1}} =$ $U_1 - U_2, U_{\text{вых2}} = U_2 - U_3, ..., U_{\text{выхn}} = U_{n-1} - U_n$, соответствующие узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2, \lambda_2 \div \lambda_3, ..., \lambda_{n-1} \div \lambda_n$ [51].

Однако нетрудно заметить, что при взаимном вычитании цифровых кодов форма выходного сигнала может искажаться. Действительно, в случае, если вычитаемое больше уменьшаемого, то получаемая отрицательная разность для отсчета яркости не имеет физического смысла. В этом случае в качестве результата берется либо модуль яркости, либо результирующему (выходному) отсчету яркости присваивается нулевое значение [52, 53].

Сущность улучшения метода дифференциальной спектральной визуализации заключается в том, что выходные коды цифровых спектральных сигналов оптической локации, соответствующие узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2$, $\lambda_2 \div \lambda_3$, ..., $\lambda_{n-1} \div \lambda_n$, 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 [54].

2.3 Мультипликативный метод

Дифференциальные изображения, полученные по методу, описанному в [52, 54], как правило, обладают малым контрастом, поскольку разности соответствующих отсчетов яркости $U_{\text{вых1}}=U_1-U_2$, $U_{\text{вых2}}=U_2-U_3$, ..., $U_{\text{вых }n-1}=U_{n-1}-U_n$ весьма малы по сравнению с динамическим диапазоном возможного изменения сигнала.

Метод мультипликативной спектральной визуализации заключается в формировании матриц отчетов яркости спектральных изображений, соответствующих узким зонам регистрации $\lambda_1 \div \lambda_2$, $\lambda_2 \div \lambda_3$, ..., $\lambda_{n-1} \div \lambda_n$, путем следующих преобразований. Вычисления производят по формулам $U^1_1 = [U_2^*(U_{\text{max}} - U_1)]$, $U^1_2 = [U_3^*(U_{\text{makc}} - U_2)]$,... $U^1_{n-1} = [U_n^*(U_{\text{makc}} - U_{n-1})]$. Возможен также вариант вычисления по формулам $U^1_1 = [U_2^*(U_{\text{makc}} - U_2)]$, ... $U^1_{n-1} = [U_1^*(U_{\text{makc}} - U_2)]$, $U^1_2 = [U_2^*(U_{\text{makc}} - U_3)]$,... $U^1_{n-1} = [U_{n-1}^*(U_{\text{makc}} - U_3)]$.

Затем определяют максимальные значения $U^{1}_{1\text{макс.}}$, $U^{1}_{2\text{макс.}}$, ... $U^{1}_{n-1\text{макс.}}$ соответствующих матриц U^{1}_{1} , U^{1}_{2} , ... U^{1}_{n-1} . Результирующие матрицы отсчетов яркости спектральных изображений формируют в соответствии с выражениями: $U_{\text{вых1}} = [U^{1}_{1} (U_{\text{макс.}}/U^{1}_{1\text{макс.}})], \qquad U_{\text{вых2}} = [U^{1}_{2} (U_{\text{макс.}}/U^{1}_{2\text{макс.}})], ... U_{\text{вых2}} = [U^{1}_{n-1} (U_{\text{макс.}}/U^{1}_{n-1\text{макс.}})]$

2.4 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 $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}, \lambda_2 \div \lambda_{\text{макс.}}, ..., \lambda_n \div \lambda_{\text{макс.}}, где \lambda_1 < \lambda_2 ... < \lambda_n < \lambda_{\text{макс.}}, форми$ рование электрических сигналов, пропорциональных яркости света в элементах спектральных изображений, преобразование их в соответствующие циф $ровые коды <math>U_1, U_2 \dots U_n$ и вычисление цифровых кодов по формулам $U_{1}^{0} = c \times U_{2} \times (U_{\text{макс.}} - U_{1}), \ U_{2}^{0} = c \times U_{3} \times (U_{\text{макс.}} - U_{2}), \ \cdots \ U_{n-1}^{0} = c \times U_{n} \times (U_{\text{макс.}} - U_{n-1}), \ \text{а также}$ по формулам $U_{1}^{1} = c \times U_{1} \times (U_{\text{макс.}} - U_{2}), \ U_{2}^{1} = c \times U_{2} \times (U_{\text{макс.}} - U_{3}), \ \cdots$ $U_{n-1}^{1} = c \times U_{n-1} \times (U_{\text{макс.}} - U_{n}), \ \text{где } c < 1 \ \text{является нормировочным множителем. При}$ этом выходные коды цифровых спектральных сигналов оптической локации, coorветствующие узким зонам регистрации $\lambda_{1} \div \lambda_{2}, \ \lambda_{2} \div \lambda_{3}, \ \cdots, \ \lambda_{n-1} \div \lambda_{n}, \ \text{формируют в соответствии с выражениями } U_{\text{вых 1}} = [U_{1}^{0} + (U_{\text{макс.}} - U_{1}^{1})]/2, \ U_{\text{вых 2}} = [U_{2}^{0} + (U_{\text{макс.}} - U_{2}^{1})]/2, \ \cdots \ U_{\text{вых n-1}} = [U_{n-1}^{0} + (U_{\text{макс.}} - U_{n-1}^{1})]/2 \ \text{или}$ $U_{\text{вых 1}} = [U_{1}^{1} + (U_{\text{макс.}} - U_{1}^{0})]/2, \ U_{\text{вых 2}} = [U_{2}^{1} + (U_{\text{макс.}} - U_{2}^{0})]/2, \ \cdots \ U_{\text{вых n-1}} = [U_{n-1}^{1} + (U_{\text{макс.}} - U_{n-1}^{0})]/2 \ \text{или}$

2.5 Модификация метода спектральной селекции объектов

Известен способ спектральной селекции объектов, описанный в статье [18].

Данный способ заключается в получении спектральных изображений оптической локации, имеющих пространственное распределение яркости $B_{x,y}(\Delta\lambda_i)$ в *n* зонах регистрации с интервалами длин волн $\Delta\lambda_i$, где *i*=1,2...*n*, а x,y – пространственные координаты, формировании соответствующих спектральных сигналов оптической локации $U_{x,y}(\Delta\lambda_i)$, преобразовании их в цифровую форму, сравнении цифровых кодов сигналов оптической локации для каждой последующей и предыдущей зоны регистрации, определении результата сравнения *F* в соответствии с выражением

$$F = \begin{cases} 0, \text{если}U_{x,y}(\Delta\lambda_{i-1}) \leq U_{x,y}(\Delta\lambda_i) \\ 1, \text{если}U_{x,y}(\Delta\lambda_{i-1}) > U_{x,y}(\Delta\lambda_i) \end{cases},$$

получении, тем самым, *n*-разрядного двоичного кода для соответствующих элементов изображения, что эквивалентно массиву спектральных характери-

стик $S_{x,y} = \bigcup_{i=1}^{k} U_{x,y}(\Delta \lambda_i)$, и селекции элементов изображения при совпадении

эталонного двоичного кода с зафиксированными значениями двоичного кода *F*.

Данный способ имеет недостаточную точность спектральной селекции.

Поэтому предложена модификация метода спектральной селекции объектов, которая обеспечивает повышение точности спектральной селекции.

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 ε.

Технический результат достигается тем, 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...k, а x,y – пространственные координаты элементов изображения, причем, x=1,2...j...m, а y=1,2...l...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=bинтересующего 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

$$\left| S_{x,y} - S_{x=a,y=b} \right| \leq \varepsilon$$
,

где *є* – 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...k, а x,y – пространственные координаты элементов изображения, причем, x=1,2...j...m, а y=1,2...l...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

$$\left| S_{x,y} - S_{x=a,y=b} \right| \leq \varepsilon$$
,

где *є* – априорно заданное пороговое значение, а формирование бинарного изображения селектируемого объекта осуществляют при выполнении данно-го условия.

Таким образом, при сравнении разности текущих и эталонных цифровых кодов с пороговым значением для каждого элемента изображения осуществляется анализ формы спектральной характеристики. Точность анализа формы зависит от величины априорно задаваемого порогового значения ε . Максимальная точность достигается при минимальном значении ε , которое в свою очередь лимитируется отношением сигнал-шум для данной системы оптической локации [58].

2.6 Математическое описание процессов формирования сигналов при дифференциальном, мультипликативном и комбинированном методах и обработки

Рассмотрим сигнальные процессы в спектральной системе оптической локации, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков при общем диапазоне спектральной чувствительности фотоприемника $\Delta \lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min}$.

Воспользуемся выражением для полного фототока элемента фотоприемника [59]

$$i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon_{A/W}(\lambda) P_W(\lambda) d\lambda, \qquad (21)$$

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

С учетом нормировки характеристик

$$0 \leq \varepsilon(\lambda) = \frac{\varepsilon_{A/W}(\lambda)}{\varepsilon_{\max}} \leq 1 \text{ M } 0 \leq P(\lambda) = \frac{P_W(\lambda)}{P_{\max}} \leq 1,$$

где ε_{max} – максимальная чувствительность фотоприемника, P_{max} – максимальная мощность источника излучения, выражение (21) имеет вид

$$i = \varepsilon_{\max} P_{\max} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon(\lambda) P(\lambda) d\lambda.$$
(22)

Поскольку функция $\varepsilon(\lambda)$ интегрируема на интервале [λ_{\min} , λ_{\max}], а функция $P(\lambda) \ge 0$, то воспользуемся теоремой о среднем [60] и перепишем (22) в следующим образом:

$$i = i_0 \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} P(\lambda) d\lambda$$

ГДе $i_0 = \varepsilon_{\max} P_{\max} \varepsilon_{cp}$.

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:

$$i_1 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda$$

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 λ_1 до λ_{\max} , $P_2(\lambda)$ – характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от λ_2 до λ_{\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 [51-54, 61-64] 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 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 $i_2 = i_W - i_2$, где $i_W = const$ – уровень «белого» в сигнале изображения, соответствующий, в частности, значению 255 относительных единиц для восьмиразрядного цифрового кодирования.

В этом случае должно выполняться соотношение

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) + \overline{P_2(\lambda)}] d\lambda + C.$$
(23)

Заметим, что, с одной стороны

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + i_2 - i_W$$
,

а, с другой стороны:

$$\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda) \,.$$

Тогда интеграл в правой части выражения (23) может быть переписан в следующем виде

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

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 (23) соответствует его левой части, что и требовалось доказать.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для мультипликативного [55, 56, 64, 65] метода, при котором спектральный сигнал формируется по формуле

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

Известно, что в общем случае справедливо

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

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, $0 \le P_2(\lambda) \le 1$ и $0 \le \overline{P_1(\lambda)} \le 1$.

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

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_1 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda , \qquad (24)$$

а, с другой стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda, \qquad (25)$$

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

Перемножив, соответственно, левые и правые части равенств (24) и (25) получим

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

Таким образом, для мультипликативного метода справедливо:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = A i_0^2 \left[\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2, \, \Gamma \text{де} \ A = \frac{1}{\mu_1 \mu_2}.$$
(26)

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

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

которое исходит из того, что общий коэффициент пропускания последовательно расположенных оптических сред равен произведению коэффициентов пропускания этих сред [66].

Следовательно, для получения соответствия электрического сигнала реальному лучистому потоку необходима следующая коррекция выражения (26):

$$i_{\rm BBIX} = N\sqrt{i}$$

где *N* ≤ 1 – нормирующий множитель, обеспечивающий требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

Для инверсии выходного сигнала необходимо дополнительно выполнить $\overline{i_{\scriptscriptstyle \rm BbIX}}=i_W-i_{\scriptscriptstyle \rm BbIX}$.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для комбинированного (мультипликативно-дифференциального) метода [57], при котором спектральный сигнал формируется по формуле

$$i = i_1 \times \overline{i_2} + \overline{i_2 \times \overline{i_1}}, \qquad (27)$$

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

В этом случае, с одной стороны, справедливо

$$i_1 \times \overline{i_2} = (i_W - i_2) \times i_1$$
,
 $i_2 \times \overline{i_1} = (i_W - i_1) \times i_2$

И

$$\overline{i_2 \times \overline{i_1}} = i_W - i_2 \times \overline{i_1} .$$

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 (27) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (23) при дополнительном усилении (линейной яркостной коррекции) получаемого разностного сигнала.

С другой стороны, с учетом выражения (26) справедливо

$$i = i_1 \times \overline{i_2} + \overline{i_2 \times \overline{i_1}} = A i_0^2 [\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda]^2 + \{i_W - A i_0^2 [\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda]^2\},$$

ИЛИ

$$i = A i_0^2 \{ [\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda]^2 - [\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda]^2 \} + i_W,$$

ИЛИ

$$i = A i_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda \right] + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] + i_W.$$

Поскольку

$$\overline{P_1(\lambda)} = 1 - P_1(\lambda)$$
 M $\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda)$

имеем

$$i = A i_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] + i_W.$$

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

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

Тогда для произведения $|I_1I_2|$ будет справедливо неравенство

$$\left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda\right]^2 \le \left|I_1 I_2\right| \le \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda\right]^3\right|.$$
 (28)

С учетом (8) запишем

$$Ai_{0}^{2}\left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_{1}(\lambda)d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_{2}(\lambda)d\lambda\right]^{2} + i_{W} \leq i \leq Ai_{0}^{2}\left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_{1}(\lambda)d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_{2}(\lambda)d\lambda\right]^{3} + i_{W}.$$
 (29)

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (27) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (23) и отличается нелинейным усилением получаемого разностного сигнала.

Таким образом, эквивалентный результат можно получить тремя способами:

1) вычислением по формуле (23) с дополнительной линейной яркостной коррекцией, вычислением по формуле (23) с последующим возведением в степень 2≤b≤3, в соответствии с (29), и нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала,

3) вычислением комбинированным методом по формуле (27) с последующей нормировкой.

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

Выводы по главе 2

1. Разработанный новый метод оценки эффективности результатов обработки спектральных изображений, получаемых при оптической локации объектов в перекрывающихся зонах регистрации, основан на синтезе цветного изображения тестовых объектов из четырех обрабатываемых спектральных изображений в зонах регистрации, нижние границы которых соответствуют началу синей, зеленой, красной и инфракрасной области спектра, осуществляется простым визуальным сравнением качества цветопередачи в синтезированном изображении, а также количественным сравнением соответствующих цветовых коэффициентов в компонентах цветного изображения.

2. 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.

3. Разработанный новый мультипликативный метод обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяет повысить уровень полезного сигнала по отношению к дифференциальному методу обработки.

4. Разработанный новый метод мультипликативнодифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, позволяет повысить уровень полезного сигнала по отношению к мультипликативному методу обработки.

5. Разработанный вариант метода спектральной селекции объектов, позволяет повысить точность выделения объектов по заданному критерию.

6. Созданное математическое описание процессов формирования сигналов лучистых потоков позволяет теоретически обосновать соответствие результатов операций по обработке цифровых спектральных изображений и результатов операций при непосредственных преобразованиях лучистых потоков оптическими методами.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ

3.1 Методика проведения экспериментов

В основе методики эксперимента лежит качественная и количественная сравнительная оценка изображений, получаемых при различных вариантах обработки исходных спектральных изображений. При качественной оценке требуется визуальное сравнение изображений, получаемых при оптическом выделении спектральных 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 спектральных потоков использовать в большинстве случаев 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.



Рисунок 20 – Спектральные изображения *U*₁, *U*₂, *U*₃, *U*₄,, полученные при помощи стандартных светофильтров ЖС4, ЖС18, КС11, КС19

Так, в частности, для получения рассмотренными выше методами цифровой обработки сигналов синего – B (400-500 нм), зеленого – G (500-600 нм) и красного – R (600-700 нм) участков видимой области спектра, можно использовать соответствующие пары спектральных изображений: [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 (рисунки 20, 21).

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.



Рисунок 21 – Спектральные характеристики стандартных светофильтров ЖС4, ЖС18, КС11, КС19

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.

3.2 Описание лабораторного оборудования

На рисунке 22 показана спектральная система оптической локации, реализующая выделение спектральных потоков оптическим способом и содержащая объектив 1, линейку 2 светофильтров, оптически связанных с оптическим локатором 3, последовательно подключенной к устройству 4 видеозаписи и компьютеру 5 [52].

Способ выделения осуществляется следующим образом. Световой поток в общем спектральном интервале $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}$ проходит через объектив 1, в заднем рабочем отрезке которого размещается линейка 2 стандартных светофильтров. В простейшем случае линейку 2 светофильтров в заднем рабочем отрезке объектива перемещают вручную, последовательно устанавливая перед фотоприемником оптического локатора 3 светофильтры, выделяющие спектральные световые потоки в интервалах длин волн $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.}}, \lambda_2 \div \lambda_{\text{макс.}}, ..., \lambda_n \div \lambda_{\text{макс.}}, где \lambda_1 < \lambda_2 ... < \lambda_n < \lambda_{\text{макс.}}$. Каждое получаемое спектральное оптическое изображение последовательно преобразуется оптическим локатором 3 в электрический сигнал, который в свою очередь преобразуется в цифровую форму стандартным устройством 4 видеозаписи и последовательно вводится в компьютер 5.


Рисунок 22 – Структурная схема спектральной системы оптической локации: 1 – объектив, 2 – линейка оптических фильтров, 3 – матричный фотоприемник, 4 – устройство видеозаписи, 5 – вычислительное устройство

Введенные в компьютер исходные цифровые коды элементов спектральных изображений цифровые коды $U_1, U_2 \dots U_n$ обрабатываются программным путем с целью реализации желаемого способа формирования цифровых спектральных сигналов системы оптической локации.

Спектральные изображения для исследуемых объектов были получены от системы оптической локации путем последовательной съемки через стандартные светофильтры типа ЖС, ОС или КС с фиксацией в компьютере через стандартное устройство видеозаписи типа AverEZCapture фирмы AverMedia, подключаемое к PCI-шине компьютера. Результирующее изображение может было получено путем программирования в среде стандартного пакета MATLAB.

3.3 Описание программных средств моделирования и оценки параметров результатов визуализации объектов оптической локации

Модерирование и оценка параметров изображений проводились путем программирования в среде пакета MATLAB с использованием стандартного набора функций: imread, imhist, histeq, imcrop, imadjust, cat и др.

imread – функция, отвечающая за выполнение операции чтения изображения из выбранного для анализа файла. Позволяет обрабатывать как полноцветные так монохромные изображения, преобразуя их в массив данных [67].

imhist – функция, отвечающая за выполнение операции по построению гистограммы. Позволяет преобразовывать массив данных изображения в столбчатую диаграмму, наглядно иллюстрируя распределение шкалы яркостей [68].

histeq – функция, отвечающая за выполнение операции по выравниванию гистограммы. Обычно используется для улучшения качества изображения путем увеличения контраста, которое достигается путем преобразования значений яркости пикселов, тем самым приближая гистограмму распределения яркости к некоторой заранее определенной форме [69].

imcrop – функция, отвечающая за выполнение операции по кадрированию изображений. Заключается в выделении на исходном изображении прямоугольной области при помощи манипулятора типа мышь или прописыванием через параметры функции координаты одного из углов прямоугольника, его ширину и высоту. Обозначенная прямоугольная область будет вырезана из исходного [70].

imadjust – функция, отвечающая за выполнение операции контрастирования с гамма–коррекцией. Используется для улучшения качества изображения путем увеличения контраста. Результат достигается путем преобразования значений яркости находящихся в одном диапазоне [low, high] в диапазон [bottom, top]. Параметр gamma, присутсвующий в описании функции imadjust определяет форму кривой характеристики передачи уровней яркости, данные зависимости приведены на рисунке 23 [71].



Рисунок 23 – Формы кривой характеристики передачи уровней яркости в зависимости от gamma

cat – функция, отвечающая за выполнение операции по объединению массивов.

Функция C = cat(dim, A, B) объединяет массивы A и B вдоль размерности dim.

Функция C = cat(dim, A1, A2, A3, A4?) объединяет множество исходных массивов Ai вдоль размерности dim.

При этом cat(1, A, B) равносильно массиву [A; B], объединяемому вдоль строк; cat(2, A, B) равносильно массиву [A, B], объединяемому вдоль столбцов.

Функции вида cat(dim, A{:}) и cat(dim, A.<имя_поля>) задают объединение массива ячеек или массива записей, содержащего числовые матрицы, в некоторый многомерный массив [72].

3.4 Результаты исследования дифференциального метода

При приведенном выше выборе расширенных спектральных интервалов формирование разностных изображений U_1 - U_2 , U_2 - U_3 , U_3 - U_4 обеспечивает их соответствие красной, зеленой и синей областям спектра. Таким образом, формирование *RGB* компонент в соответствии с выражениями $R=U_1$ - U_2 , $G=U_2$ - U_3 , $B=U_3$ - U_4 и результирующего *RGB* изображения позволяет проверить адекватность цветопередачи визуализируемого объекта [61].

Результирующее *RGB* изображение, полученное при моделировании, приведено на рисунке 24. В нем наблюдается эффект цветопередачи визуализируемого объекта. Однако, полного соответствия цветопередачи при этом не достигается. Отмечается также недостаток в насыщенности получаемых цветов. Таким образом, дифференциальный метод может быть использован, в частности, для получения цветного изображения из широкодиапазонных спектральных изображений с целью расширения функциональных возможностей спектральной аппаратуры при отсутствии жестких требований по его качеству.



красный

Рисунок 24 – *RGB* изображение, полученное из исходных спектральных изображений оптической локации с расширенными зонами регистрации

Ниже приведены результаты моделирования процессов получения разностных изображений и *RGB* компонент цветного изображения с целью оценки возможности и целесообразности извлечения из них дополнительной спектральной информации рассматриваемым дифференциальным методом.

При моделировании из исходного цветного изображения выделялись *RGB* компоненты (рисунок 25) и формировались разностные изображения: *R*-*G*, *G*-*B* и *B*-*R* (рисунок 26). Разностные изображения характеризуются сужением зоны регистрации, что обеспечивает цветовую селекцию объектов в соответствии с их спектральными свойствами. Действительно, в разностном изображении *R-G* наблюдается только красный объект, разностном изображении *G-B* наблюдается желтый и зеленый объект, причем, уровень сигнала от желтого объекта является преобладающим, а разностном изображении *B-R* наблюдается только синий и зеленый объект, причем, преобладающим является уровень сигнала от синего объекта.

Таким образом, дифференциальный метод может быть использован, в частности, для цветовой селекции объектов при использовании *RGB* компонент цветного изображения.

Кроме этого формировались разностные изображения *R-G-B*, *G-B-R* и *B-R-G* (рисунок 27) с дополнительно суженными зонами регистрации. Дополнительное сужение зон регистрации проявляется, в частности, в подавлении сигнала от желтого объекта в зеленой области спектра, и в подавлении сигнала от зеленого объекта в синей области спектра.



Рисунок 25 – Исходное цветное изображение (слева) и его RGB компоненты



Рисунок 26 – Разностные изображения, полученные из исходных *RGB* компонент: *R-G* (слева), *G-B* (в центре), *B-R* (справа)



Рисунок 27 – Разностные изображения, полученные из исходных *RGB* компонент: *R-G-B* (слева), *G-B-R* (в центре), *B-R-G* (справа)

Практический интерес представляет оценка возможности и целесообразности применения дифференциального метода для пар взаимно перекрывающихся спектральных изображений с диапазонами $\lambda_1 \div \lambda_{\text{макс.1}}$, $\lambda_2 \div \lambda_{\text{макс.2}}$, причем, $\lambda_1 < \lambda_{\text{макс.1}}$, $\lambda_2 < \lambda_{\text{макс.2}}$ при $\lambda_2 < \lambda_{\text{макс.1}}$. Ниже рассматривается моделирование данного процесса при использовании *RGB* компонент.

Пара взаимно перекрывающихся изображений U_1 , U_2 , с условием $\lambda_1 < \lambda_{\text{макс.1}}$, $\lambda_2 < \lambda_{\text{макс.2}}$ при $\lambda_2 < \lambda_{\text{макс.1}}$ была сформирована следующим образом: $U_1 = B + G$, $U_2 = R$. Моделировались следующие варианты получения разностных изображений $U_{\text{вых 1}} = U_1 - U_2$, $U_{\text{вых 2}} = U_2 - U_1$, $U_{\text{вых 3}} = \overline{U_1} - U_2$, где $\overline{U_1}$ - инверсия U_1 , а также вариант получения половины суммы $U_{\text{вых 4}} = (U_1 - U_2)/2$.

Полученные изображения сравнивались между собой на предмет выявления в них различий, а также соответствия преобладающего в них сигнала исходному цвету объектов. Исходные и результирующие изображения для рассматриваемого случая приведены на рисунке 28.

Поскольку варианты разностных изображений соответствуют трем суженым зонам регистрации, а именно: красной, зеленой и сине-зеленой зоне, то в них доминируют объекты соответствующих цветов, что свидетельствует об адекватности выделения дифференциальным методом сигналов для трех узких зон из пары взаимно перекрывающихся спектральных изображений.





Рисунок 28 – Изображения (нижний ряд), полученные из исходных *RGB* компонент (верхний ряд), на основе дифференциального метода

Ниже приводятся примеры применения данного подхода для визуализации смежных перекрывающихся участков в видимой и ближней инфракрасной (ИК) области спектра.

В качестве визуализируемого объекта использовался фрагмент иконы. Спектральные изображения, полученные в смежных перекрывающихся участках видимого и ближнего ИК диапазона спектра, взаимно вычитались и формировались следующие разностные изображения: $U_{\rm вых 1} = U_{625\rm HM} - U_{590\rm HM}$, $U_{\rm вых 2} = U_{910\rm HM} - U_{870\rm HM}$, $U_{\rm вых 3} = U_{505\rm HM} - U_{470\rm HM}$. Перекрывающиеся области спектра для рассмотренных пар изображений примерно оцениваются в 25 – 30 нм и располагаются между соответствующими, указанными в нижних индексах при переменной U максимумами.

Дополнительно формировались изображения, соответственно, суммы и разности при инверсии первого изображения: $U_{\text{вых 1}}^{'} = \overline{U}_{625\text{HM}} + U_{590\text{HM}}$,

 $U_{\text{вых 1}}^{"} = \overline{U}_{625\text{нм}} - U_{590\text{нм}}, \quad U_{\text{вых 2}}^{'} = \overline{U}_{910\text{нм}} + U_{870\text{нм}}, \quad U_{\text{вых 2}}^{"} = \overline{U}_{910\text{нм}} - U_{870\text{нм}}, \quad U_{\text{вых 3}}^{'} = \overline{U}_{505\text{нм}} + U_{470\text{нм}},$ $U_{\text{вых 3}}^{"} = \overline{U}_{505\text{нм}} - U_{470\text{нм}}.$ Полученные изображения визуально сравнивались между собой на предмет выявления в них различий.

Результаты моделирования приведены на рисунке 29. Как видно на рисунке 29 сформированные дифференциальным методом изображения имеют существенные отличия в деталях и несут дополнительную визуальную информацию об объекте визуализации. В частности, такая информация может быть использована при изучении объектов культурного наследия и при проведении с ними реставрационных работ, наряду с традиционными методами визуализации сигналов оптической локации [6-9].



Рисунок 29 – Изображения исходные – 1, разностные – 2, сумма при инверсии – 3, разность при инверсии – 4. Верхний ряд соответствует диапазонам

 ${U_{_{625\rm HM}}} \div {U_{_{590\rm HM}}}$, средний ряд ${U_{_{910\rm HM}}} \div {U_{_{870\rm HM}}}$, нижний ряд ${U_{_{625\rm HM}}} \div {U_{_{590\rm HM}}}$

Рассмотрим результаты сравнения улучшенного метода дифференциальной обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации [54] и способа прототипа, описанного в работе [51].

На рисунке 30 показаны результирующие изображения, получаемые методом дифференциальной спектральной визуализации (рисунок 30а) и после его улучшения (рисунок 30б). В изображении (рисунок 30а) форма результирующего сигнала искажена, поскольку результирующие отрицательные отсчеты яркости преобразованы в модуль яркости. В изображении (рисунок 30б) 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 в узкой зоне регистрации [61].



а)
 б)
 Рисунок 30 – Результирующие изображения, получаемые методом дифференциальной спектральной визуализации до (а) и после него
 улучшения (б)

3.5 Результаты исследования мультипликативного метода

При компьютерном моделировании осуществлялись преобразования исходных матриц U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , в соответствии с описанными выше методами. Мультипликативный метод предусматривает инверсию одной из перемножаемых матриц. Приведенные в настоящей статье результаты получены при инверсии матрицы, соответствующей более широкому спектральному диапазону из двух сомножителей. Значение $U_{\text{макс.}}$ при моделировании соответствовало максимуму динамического диапазона изменения сигнала и соответствовало 255 при 8-ми разрядном кодировании.

Компьютерное моделирование проводилось в среде MATLAB. Полученные результирующие изображения по дифференциальному и мультипликативному методу визуально сравнивались между собой, а также производилось количественное сравнение соответствующих максимальных и минимальных значений цифровых отсчетов яркости [55].

На рисунке 31 показаны примеры результирующих изображений, получаемые дифференциальным методом (рисунок 31а) и мультипликативным методом (рисунок 31б) при соответствующей обработке пары исходных матриц U_2 и U_3 . Изображение, полученное дифференциальным методом (рисунок 31а) имеет низкую контрастность. Контрастность изображения, полученного мультипликативным методом (рисунок 31б), существенно выше.



а) б) Рисунок 31 – Спектральные изображения, получаемые дифференциальным – а) и мультипликативным – б) методами

Количественное сравнение разностей максимальных и минимальных значений цифровых кодов, полученных дифференциальным методом и муль-

типликативным методом при обработке изображений, показано на рисунке 32. Как видно из приведенных на рисунке 32 сравнительных диаграмм, мультипликативный метод по отношению к дифференциальному обеспечивает повышение контрастности изображений не менее чем в 1,5 раза.



Рисунок 32 – Количественное сравнение максимальных и минимальных значений отсчетов яркости в спектральных изображениях, получаемых дифференциальным – а) и мультипликативным – б) методами

3.6 Результаты исследования мультипликативнодифференциального метода

На рисунке 33 показаны примеры результирующих изображений, получаемые по мультипликативному способу (рисунок 33а) и по мультипликативно-дифференциального способу (рисунок 33б). Результирующие изображения представляют собой *RGB*-изображения, синтезированные из трех изображений, получаемых для соответствующих трех узких зон регистрации (красной 600-700 нм, зеленой 500-600 нм и синей 400-500 нм). Точкой 1 указан объект синего цвета, точкой 2 – зеленого цвета, точкой 3 – красного цвета. Количественное сравнение значений цифровых кодов в указанных точках 1, 2 и 3, полученных при обработке изображений, приведенных на рисунке мультипликативному 20, способу по мультипликативно-И ПО

дифференциальному способу показано на рисунке 34. Приведенные значения являются усредненными по трем компонентам *R*, *G* и *B*.

Как видно из сравнительных диаграмм на рисунке 34, 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 [57].



a)

б)

Рисунок 33 – Спектральные изображения, получаемые мультипликативным –





Рисунок 34 – Количественное сравнение значений цифровых кодов, получаемых мультипликативным – а) и мультипликативно-дифференциальным - б) методами

3.7 Результаты исследования алгоритма CLAHE применительно к дифференциальным цифровым изображениям объектов оптической локации

Результаты обработки дифференциальных спектральных изображений методом CLAHE в программе ImageJ приведены на рисунке 35. Вариант обработки изображений с параметрами Blocksize 127, Histogram bins 256, Maxslope 3, показанный на рисунке 35г, является наиболее предпочтительным с точки зрения допустимого уровня шума и достигаемого повышения контраста.





Рисунок 35 – Результат обработки изображений методом CLAHE: а) исходное изображение); б) обработка с параметрами Blocksize 32, Histogram bins 256, Maxslope 20; в) обработка с параметрами Blocksize 127, Histogram bins 256, Maxslope 20; г) обработка с параметрами Blocksize 127, Histogram bins 256, Maxslope 3

Сравним результирующее *RGB* изображение, полученное из дифференциальных спектральных изображений с последующей яркостной коррекцией и результирующее *RGB* изображение, полученное из этих же дифференциальных спектральных изображений, дополнительно обработанных алгоритмом CLAHE с последующей яркостной коррекцией. Яркостная коррекция в обоих случаях проводилась с автоматическим определением верхнего и нижнего порогов коррекции по максимуму и минимума соответствующего сигнала. Полученные в процессе эксперимента изображения приведены на рисунках 36-40 [63, 73].



Рисунок 36 – Дифференциальные спектральные изображения, соответствующие *B*, *G* и *R* компонентам



Рисунок 37 – Дифференциальные спектральные изображения, соответствующие *B*, *G* и *R* компонентам после линейной яркостной коррекции



Рисунок 38 – Дифференциальные спектральные изображения, соответствующие *B*, *G* и *R* компонентам, обработанные алгоритмом CLAHE



Рисунок 39 – Дифференциальные спектральные изображения, соответствующие *B*, *G* и *R* компонентам, обработанные алгоритмом CLAHE с последующей линейной яркостной коррекцией



Рисунок 40 – *RGB* изображения: слева – полученные из изображений, приведенных на рисунке 37, справа – полученные из изображений, приведенных на рисунке 39

Как видно на рисунке 40, применение дополнительной обработки алгоритмом CLAHE позволяет заметно улучшить изображения, полученные методом дифференциальной спектральной визуализации, с точки зрения обеспечения более точного соответствия узкополосным спектральным изображениям, получаемым оптическим путем. Это подтверждается тем, что, в частности, улучшается цветопередача объектов в цветном изображении, полученном из *RGB* компонент, синтезированных дифференциальным методом. Так, например, синий объект на рисунке 40 в цветном изображении без обработки алгоритмом CLAHE имеет фиолетовый, а желтый объект – оранжевый оттенок в то время, как на дополнительно обработанном алгоритмом CLAHE цвета данных объектов соответствуют в значительно большей степени своим истинным оттенкам.

Кроме этого, повышается насыщенность цвета визуализируемых объектов, что соответствует графикам (рисунок 41), где приведены нормированные максимальные значения *RGB* сигналов для сравниваемых изображений.



Рисунок 41 – Сравнение максимальных значений *RGB* сигналов без дополнительной обработки алгоритмом CLAHE и при его использовании

3.8 Результаты исследования модифицированного метода спектральной селекции объектов

Спектральные изображения для исследуемого документа могут быть получены, например, путем последовательного облучения поля зрения системы оптической локации светодиодами с различной длиной волны излучения в диапазоне от 400 до 1000 нм и фиксации изображений в компьютере через стандартное устройство видеозаписи, например, типа AverEZCapture фирмы AverMedia, подключаемое PCI-шине компьютера. В этом случае в качестве системы оптической локации может быть использована практически любая ПЗС-камера стандартной чувствительности [58].

При получении эталонных цифровых кодов на одном из зафиксированных изображений, отображаемом на экране монитора, указывают курсором интересующий элемент изображения. Тем самым однозначно определяются пространственные координаты x=a, y=b и, соответственно, эталонная спектральная характеристика $S_{x=a,y=b}$ из соответствующих спектральных изображений.

Затем цифровые коды массива спектральных характеристик $S_{x,y} = \bigcup_{i=1}^{k} U_{x,y}(\Delta \lambda_i)$ обрабатывают в компьютере программным путем в соответствии с выражением $|S_{x,y} - S_{x=a,y=b}| \le \varepsilon$, и, в случае выполнения данного условия, элементы изображения, отображаемого на мониторе, помечают условным цветом, выделяют контуром или формируют отдельное бинарное изображение, соответствующее искомым элементам, тем самым, осуществляя спектральную селекцию объектов с заданной спектральной характеристикой.

Результирующее изображение может быть получено, например, путем программирования в среде стандартного пакета MATLAB или путем создания специализированной программы, например, в среде C++.

На рисунке 42 приведены примеры изображений объектов, полученных в шести спектральных зонах, соответствующие цифровым кодам элементов спектральных изображений $U_{x,y}(\Delta \lambda_i)$ для *i*=1,2,3,4,5,6.

На рисунке 43 слева показано изображение объектов в одной из этих зон с произвольно указанным элементом, имеющим пространственные координаты x=a, y=b (точка 1 на изображении), справа показан результат спектральной селекции (бинарное изображение селектируемых элементов объекта помечено черным).

На рисунке 44 представлена эталонная спектральная характеристика $S_{x=a,y=b}$ (верхний график), построенная по исходным спектральным изображения ниям для указанного элемента 1, а также спектральная характеристика для селектируемых элементов изображения (нижний график). Цифровые значения на графиках и в таблице окна справа соответствуют яркости указанного элемента изображения в относительных единицах в диапазоне от 0 до 255 для каждой из шести спектральных зон. Как видно из графиков, эталонная спек-

тральная характеристика по форме совпадает со спектральной характеристикой для селектируемых элементов при заданном пороговом значении ε=10.

Изображения представленные на рисунках 42-44, получены, в частности, при помощи специальной программы ZONA, написанной в среде C++.



Рисунок 42 – Пример изображений объектов, полученных в шести спектральных зонах, соответствующих цифровым кодам элементов спектральных изображений U_{x,y} (Δλ_i) для *i*=1,2,3,4,5,6



Рисунок 43 – Слева – изображение объектов в одной из шести спектральных зон с произвольно указанным элементом, имеющим пространственные координаты *x*=*a*, *y*=*b* (точка 1 на изображении), справа – результат спектральной селекции (селектируемые элементы изображения помечены черным)



Рисунок 44 – Эталонная спектральная характеристика *S*_{*x*=*a*,*y*=*b*} (верхний график), построенная по исходным спектральным изображениям для указанного элемента 1, а также спектральная характеристика для селектируемых элементов изображения (нижний график). Цифровые значения на графиках и в таблице окна справа соответствуют яркости указанного элемента изображения в относительных единицах в диапазоне от 0 до 255 для каждой из шести спектральных зон

3.9 Результаты исследования обработки методом слияния высокодетального панхроматического и гиперспектрального изображения с укрупненными пикселами

Экспериментальные исследования проводились на основе компьютерного моделирования в среде MATLAB. При моделировании в качестве тестовых изображений использовались изображения трех типов: рукописного текста, цветных кнопок и банкноты, полученные в широкоспектральном (изображения Y) и узкоспектральном (изображения S) диапазоне с исходно высоким пространственным разрешением и имеющие разные значения коэффициента взаимной корреляции в данных диапазонах (соответственно, высокое, среднее и низкое).

На рисунке 45 приведена диаграмма, иллюстрирующая различия в соответствующих парах (широкоспектральное и узкоспектральное) для трех исследованных типов изображений, количественно оцененные в значениях коэффициента корреляции. Как видно из диаграммы, наибольшая взаимная корреляция имеет место в изображении рукописного текста, а наименьшая в изображении банкноты, что соответствует их изображениям, приведенным на рисунке 46.



Рисунок 45 – Диаграмма коэффициентов взаимной корреляции исходных пар широкоспектральных и узкоспектральных изображений



Рисунок 46 – Исходные пары широкоспектральных (верхний ряд) и узкоспектральных (нижний ряд) изображений с высоким пространственным

разрешением

Действительно, в узкоспектральном изображении банкноты существенно меньше мелких деталей изображения, чем в ее широкоспектральном изображении. В аналогичных изображениях цветных кнопок различия в основном проявляются в нескольких крупных деталях (разные цвета кнопок), в то время как в изображении рукописного текста имеются небольшие различия лишь в яркости фона (бумажной основы) [74].

Моделирование процесса обработки путем слияния пар изображений заключался в следующем. Укрупнение апертуры узкоспектральных изображений S моделировалось путем сокращения их размерности в M раз с использованием функции MATLAB SM=imresize(S, 1/M). Матрицы широкоспектральных изображений У также подвергались соответствующему сокращению размерности в результате чего формировались изображения Үм. Затем для каждого типа изображений с использованием целых положительных цифровых значений яркости (формат MATLAB-изображений «uint8») формировались разностные изображения с уменьшенной размерностью вида $D_1 = Y_M - S_M$ и $D_2 = S_M - Y_M$. Полученные разностные изображения D_1 и D_2 интерповосстановления изначальной размерности функцией лировались ДЛЯ MATLAB вида D=imresize(D, M, 'bicubic') и подвергались слиянию с исходным широкоспектральным изображением высокого разрешения У в соответствии с выражением Sвых.=Y-D1+D2 в формате MATLAB-изображений «uint8» (целые положительные значения яркости) [75]. Обработанные и исходные узкоспектральные изображения сравнивались визуально и оценивались количественно путем расчета ковариаций и коэффициентов Ккорр взаимной корреляции [76].

Как показало компьютерное моделирование, результат существенным образом зависит от типа обрабатываемого изображения, который в свою очередь определяется спектральными свойствами исследуемого объекта и, соответственно, проявляющимися различиями между широкоспектральным и узкоспектральным изображением. На рисунке 47 приведены исходные узкоспектральные изображения с высоким разрешением, эти же изображения при

укрупнении элементов и изображения, восстановленные в результате обработки путем слияния с исходными широкоспектральными изображениями.

Kigener unight of KA examination offi Kyrner Tudupa & Kot examineering other REALAUVEPENTIANA Kigine whom & Kt mannenet Experie whom & Kt manuniturelow ที่ธราสากกรรรณการรรับการเหตุ HEET ANAEDEALINGEFERMENHUH ที่หยาให้และหะสมเกตะตุ²กแมะกันแห intertannenenineereninennun Non Kanne intra 11 anim any him Kanna inter i fit anim Kagine mentra & K at when Icagine neadra & Kot an where

Рисунок 47 – Узкоспектральные изображения текста, цветных кнопок и банкноты: с высоким разрешением (ряд а), при укрупнении элемента изображения для текста в 16 раз, для цветных кнопок в 8 раз и для банкноты в 2 раза (ряд b), восстановленные в результате слияния с исходными широкоспектральными изображениями (ряд с)

Как видно из рисунков, для различных типов исследованных изображений достигается различная степень сокращения размерности при приемлемой степени точности восстановления. Так, например, для рукописного текста, широкоспектральные и узкоспектральные изображения которого имеют высокую степень взаимной корреляции, вполне допустимо сокращение размерности *M*=16, а для банкноты с низкой степенью корреляции соответствующих изображений даже минимальное сокращение размерности M=2вызывает появление артефактов, что, несмотря на повышение четкости, может оказаться неприемлемым для пользователя. Средняя степень корреляции, имеющая место для соответствующей пары изображений цветных кнопок, позволяет при приемлемом качестве сократить размерность до $M \leq 8$.

На рисунке 48 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 48 – Зависимость коэффициента $K_{\text{корр}}$ 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 $K_{\text{корр}} \ge 0,95$ для изображения цветных кнопок достигается предельная величина сокращения размерности $M \le 8$, в то время как для изображения рукописного текста величина M может быть существенно увеличена. При этом для изображения банкноты возможно лишь сокращение размерности M=2, при задании значения коэффициента

корреляции на уровне $K_{\text{корр}} \ge 0,92$. Таким образом, количественная оценка точности восстановления изображений соответствует визуальной (качественной) оценке.

Обработка методом слияния высокодетального панхроматического и гиперспектрального изображения с укрупненными пикселами обеспечивает возможность вариации размера площади зоны накопления на основе поиска компромисса между такими показателями качества системы, как контрастная чувствительность, разрешающая способность, отношение сигнал-шум. При этом достигаемый результат существенно зависит от спектральных характеристик объекта визуализации, которые обуславливают степень различия широкоспектрального изображения от изображения, формируемого гиперспектральной системой оптической локации в узком спектральном диапазоне. В зависимости от указанного фактора, получаемый выигрыш в контрастной чувствительности при восстановлении исходной разрешающей способности с приемлемой степенью точности в результате обработки изображения методом, рассмотренным в настоящей статье, определяется выбором кратности *M* увеличения размера элемента разложения фотоприемника.

Кратность M может варьироваться в достаточно широких пределах от M=2 для изображений, имеющих в узких спектральных диапазонах значительные отличия от широкоспектрального изображения (низкий коэффициент взаимной корреляции), до M=16 и выше для изображений, имеющих в узких спектральных диапазонах малые отличия от широкоспектрального изображения (высокий коэффициент взаимной корреляции).

При этом достигается соответственное в *M* раз сжатие гиперкуба данных, что весьма важно для повышения быстродействия гиперспектральной системы оптической локации. Некоторое дополнительное сжатие гиперкуба данных обеспечивается путем дифференциальной обработки спектральных изображений за счет устранения «пустых» разрядных плоскостей, соответствующих старшим разрядам цифровых кодов разностных изображений с последующей несложной процедурой восстановления спектральных изображе-

ний. Для этого целесообразно использовать опорное широкоспектральное изображение, применяемое в процедуре повышения разрешающей способности. Необходимо отметить, что степень дополнительного сжатия гиперкуба данных, осуществляемого за счет сокращения разрядных плоскостей, существенно меньше степени основного сжатия, осуществляемого за счет сокращения размерности спектральных изображений.

Для варьирования кратности *M* увеличения размера элемента разложения фотоприемника в рассматриваемой гиперспектральной системе оптической локации имеется принципиальная возможность ее адаптации к визуализируемому сюжету, при которой оптимальный выбор значения *M* осуществляется автоматически в зависимости от значений коэффициентов взаимной корреляции изображений исследуемых объектов, оцениваемых при предварительном анализе широкоспектрального и узкоспектрального изображения.

Выводы по главе 3

В рамках диссертационной работы были проведены экспериментальные исследования вновь разработанных методов путем их компьютерного моделирования. При этом в процессе экспериментальных исследований была:

1) разработана методика проведения экспериментов,

 создано лабораторное оборудование и использованы программные средства моделирования,

3) получены результаты исследования разработанных методов,

4) проведен сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования разработанных методов,

5) сделаны выводы о целесообразности применения разработанных методов в системах оптической локации и выработаны практические рекомендации.

Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования разработанных методов, показывает, что:

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

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

 результирующие изображения целесообразно дополнительно подвергать обработке методом CLAHE в сочетании с линейной яркостной коррекцией.

При практической реализации методов обработки следует учитывать компромисс между сложностью аппаратной реализации вычислительного устройства, быстродействием и точностью.

Обработка методом 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, должна проводиться на основе поиска компромисса между такими характеристиками (показателями качества) системы оптической локации, как контрастная чувствительность, разрешающая способность, отношение сигнал-шум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертации были получены следующие результаты:

1) Проведен аналитический обзор методов извлечения дополнительной визуальной информации путем обработки сигналов изображений, получаемых от лучистых потоков в процессе оптической локации объектов и сред, в том числе при дистанционном мониторинге геосферы, и определены пути для развития существующих и создания новых методов обработки и анализа этих сигналов.

2) 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.

3) 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.

4) 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.

5) Разработан новый вариант метода спектральной селекции объектов, который обеспечивает повышение точности спектральной селекции относительно способа прототипа за счет сравнения формы спектральной харак-

теристики текущего элемента изображения и формы эталонной спектральной характеристики, получаемой путем указания элемента изображения эталонного объекта при заданной величине допуска є.

6) Показана целесообразность применения комбинированной обработки результирующих изображений, соответствующих перекрывающимся зонам регистрации лучистых потоков, методом контрастно-ограниченной эквализации гистограмм (CLAHE) и методом линейной яркостной коррекции.

7) Разработан новый метод качественной и количественной оценки эффективности результатов обработки сигналов оптической локации, получаемых от лучистых потоков в широких перекрывающихся зонах регистрации, а также оценки соответствия операций непосредственных преобразований лучистых потоков и операций, связанных с функциями от лучистых потоков, а именно: операций над пропорциональными им цифровыми сигналами.

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) Получены экспериментальные подтверждения реализуемости и эффективности разработанных методов.

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ФГБОУ ВО – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования;

НовГУ – Новгородский государственный университет;

РФ – Российская Федерация;

ВАК – Высшая аттестационная комиссия;

СК – спектральные каналы;

ТХ – технические характеристики;

ОЛ – оптическая локация;

УФ – ультрафиолетовое излучение;

ИК – инфракрасное излучение;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник;

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли;

КА – космический аппарат;

ВИ – видимое излучение;

СХ – спектральная характеристика;

ОФ – оптический фильтр;

МФП – матричный фотоприемник;

CLAHE – Contrast Limited Adaptive Histogram Equalizaton;

LUT – Lookup Table;

ОИ – оптическое изображение;

СЭП – спектрально-энергетические признаки;

ПП – пространственные признаки;

ДП – динамические (дополнительные) признаки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарак, Д.С. Объединение изображений, получаемых по данным источников различного спектрального диапазона / Д.С. Шарак, Е.И. Михненок, А.С. Шеин, А.В. Хижняк // Доклады БГУИР. – 2017. – №3 (105). – С. 45-51.

 Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонзалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

 Большая Советская Энциклопедия (СП). – Текст: электронный. – URL: https://www.rulit.me/books/bolshaya-sovetskaya-enciklopediya-sp-read-88904-26.html (дата обращения 06.05.2024).

4. Технология, исследование и хранение произведений станковой и настенной живописи: учеб. пособие / В.Я. Бирштейн, В.П. Голиков, Ю.И. Гренберг [и др.]; под редакцией Ю.И. Гренберга. – М.: Изобраз. искусство, 1987. – 392 с.

5. Реставрация икон: Методические рекомендации / под редакцией и с иллюстрациями М.В. Наумовой. – М.: Изд-во Всерос. худож. науч.реставрац. центр им. И.Э. Грабаря, 1993 – VII, 226 с.

6. Корнышев Н.П., Ляховицкий Е.А., Родионов И.С. Оптико-электронные и телевизионные методы и средства в историко-бумаговедческих исследованиях рукописно-книжных памятников // Фотография. Изображение. Документ. 2013. № 4(4). С. 65-72.

7. Корнышев Н.П., Лифар А.В., Ляховицкий Е.А., Родионов И.С., Цыпкин Д.О., Шеин Г.М. Телевизионные и оптико-электронные методы исследования исторических бумаг // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. 2013. №1(2). С. 153-158.

8. Корнышев Н.П., Лифар А.В., Ляховицкий Е.А., Родионов И.С., Цыпкин Д.О., Шеин Г.М. Телевидение в исследовании исторических бумаг // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2014. № 1. С. 30-37.

9. Корнышев Н.П. Новые возможности телевизионных спектральных систем // Фотография. Изображение. Документ. 2015. № 6 (6). С. 89-93.

10. Бутусов В.В., Корнышев Н.П., Родионов О.Ф., Челпанов В.И. Телевизионные спектральные системы для криминалистических экспертиз // Специальная техника. 2003. №4. С. 24-33.

 Корнышев Н.П. Телевизионные спектральные системы для визуализации люминесцирующих объектов // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки.
 2005. №34. С. 100-105.

12. Андреева Е.В., Бутусов В.В., Иванов И.Г., Корнышев Н.П., Кузьмин В.П., Никитин Н.С., Тимофеева А.В., Челпанов В.И. Модернизированная телевизионная спектральная система для экспресс-анализа подлинности и целостности документов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2010. № 1. С. 44-50.

 Гаврилов А.Л., Исаев В.А., Корнышев Н.П. Камеры ИК-диапазона ЗАО «ЭЛСИ» (Великий Новгород) и предложения по их использованию в исследованиях музейных объектов // Фотография. Изображение. Документ. 2016. № 7 (7). С. 56-61.

MacDonald L. Multispectral Imaging of Degraded Parchment // Proc. 4th
 Int. Workshop on Computational Color Imaging (CCIW 2013). 2013. Vol. 7786 P.
 143-157.

15. Bianco G. A Framework for Virtual Restoration of Ancient Documents by Combination of Multispectral and 3D Imaging. // Eurographics Italian Chapter Conference. 2010. P. 1-7. doi: 10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChap Conf2010/001-007.

16. Колтовой Н.А. Спектральные методы в криминалистике // Фотоника.
2016. № 5(59). С. 76-89.

Бутусов В.В., Корнышев Н.П., Кузьмин В.П., Никитин Н.С., Челпанов
 В.И. Телевизионные спектральные системы. Новые разработки и перспективы развития // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. 2006. №1(2). С. 41-43.

18. Козин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Спектрозональное телевидение и тепловидение в задачах селекции и идентификации объектов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2013. № 2. С. 123-135.

19. Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. Спектрозональные методы и системы в космическом телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. № 1. С. 47-64.

20. Delpueyo X. Multispectral and colour imaging systems for the detection of small vertebrate fossils: A preliminary study. // Palaeontologia Electronica. 2016.P. 1-7.

21. Dyer J. Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual. / The British Museum. 2013. 192 p.

22. Christian G. Applications of Multispectral Imaging and Reflection Spectroscopy in the Field of Palaeography. URL: https://chiccman chester.files.wordpress.com/2014/08/george_christian_mphys_report.pdf (дата обращения 02.04.2023).

23. Horton R. Peach Flower Monitoring Using Aerial Multispectral Imaging // Journal of Imaging, 2017. P. 1-10. doi: 10.3390/jimaging3010002.

24. Levenson R., Kobayashi H. Multiplexing with Multispectral Imaging: From Mice to Microscopy // ILAR Journal. 2008. Vol. 49(1). P 78-88. doi: 10.1093/ilar.49.1.78.

25. Everdell N. L., Blessy B.I. Multispectral Imaging of the Ocular Fundus Using LED Illumination // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2009. Vol. 7371. P. 1-7. doi: 10.1117/12.831769.

26. Carmona P. Multispectral integral imaging acquisition and processing using a monochrome camera and a liquid crystal tunable filter // Optics Express. 2012. Vol.20(23). P. 1-10. doi: 10.1364/OE.20.025960.

27. Шухостанов В.К., Ведешин Л.А., Цыбанов А.Г. Гиперспектральная диагностика современной техносферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. №1(6). С. 243-248.

28. Толстохатько, В. А. Конспект лекций по курсу «Фотограмметрия и дистанционное зондирование». Модуль 2: «Дистанционное зондирование» (для студентов 4 курса дневной и заочной форм обучения по направлению 6.080101 «Геодезия, картография и землеустройство») / В. А. Толстохатько, В. А. Пеньков. – Харьков: ХНАГХ, 2013. – 113 с.

29. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Спектральная селекция объектов в системах технического зрения: Монография. – М. : Издательство «Спутник +», 2023. – 470 с

Брок Б. К. Физические основы аэрофотографии / Пер. с анг.: Под ред. Г.
 А. Истомина. М.: Геодезиздат, 1958. – 330 с.

31. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М.: АН СССР, 1947. – 168 с.

32. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Мультиспектральные системы различного назначения // Фотоника. 2015. № 5(53). С. 68-81.

33. Орлов А. Г., Егоров В. В., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник МГТУ им. Баумана. – 2006. – № 3. – С. 11-24.

34. Калитов М.А. О применении спектрозональной визуализации в дистанционном зондировании Земли // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2024. №1(135). С. 95-107.

35. Малинников, В. А. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами: учеб. пособие / В. А. Малинников, А. Ф. Стеценко, А. Е. Алтынов, С. М. Попов. – М. : Изд-во МИИГАиК, 2009. – 142 с.

36. Космический комплекс «Ресурс-П». – Текст: электронный. – URL: https://www.roscosmos.ru/24984 (дата обращения 06.05.2024).

37. Космический комплекс «Метеор-3М». – Текст: электронный. – URL: https://www.roscosmos.ru/24986 (дата обращения 06.05.2024).

38. 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 Нов-ГУ Сер.: Технические науки. 2024. №1(135). С. 43-56. 39. 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.

40. Корнышев Н.П., Калитов М.А., Сенин А.С. Применение телевизионных спектрозональных методов при исследовании музейных объектов // Материалы 15-й международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений». СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С.105-107.

41. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Формирование и совместная обработка сигналов спектрозональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 5. С. 44-57.

42. Ковин С. Д., Сагдуллаев Ю. С. Способы обработки и отображения разноспектральных ТВ изображений. Материалы научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2014. С. 257–261.

43. Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. Основы построения информационно-измерительных систем спектрозонального телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 4. С. 59-67.

44. Сагдуллаев Т. Ю., Сагдуллаев Ю. С. К вопросу выбора зон регистрации в спектрозональном телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2011. № 2. С. 3-25.

45. Сагдуллаев Т. Ю., Сагдуллаев Ю. С. Интегрально-дифференциальный метод формирования сигналов в системах объемного спектрозонального телевидения. Сборник материалов 13-й Международной конференции «Телевидение: Передача и обработка изображений». 2016. С. 247–251.

46. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д., Сагдуллаев Т.Ю., Смирнов А.И. Информационно-измерительные системы телевидения М.: "Спутник +", 2013. – 199 с.

47. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб.пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 352 с.

48. Zimmerman, J.B., Pizer S.M., Staab E.V., Perry J.R., McCartney W., Brenton B.C., «An Evaluation of the Effectiveness of Adaptive Histogram Equalization for Contrast Enhancement» // IEEETrans. Med. Imaging. 1988. Vol. 7(4). P. 304-312. doi: 10.1109/42.14513.

49. Zuiderveld, K. Contrast limited adaptive histogram equalization, // Graphics gems IV, Academic Press Professional, Inc., 1994. P. 474-485. doi:10.1016/b978-0-12-336156-1.50061-6

50. Сагдуллаев Ю. С., Ковин С. Д., Попов А. В., Шавкунов О. В. К вопросу распознавания объектов по спектральным признакам // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 44-50.

51. Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. К вопросу выбора зон регистрации в спектрозональном телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2011. № 2. С. 20.

52. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Повышение точности метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2019. №2(114). С. 31-34.

53. Ваниев А.А., Калитов М.А. О повышении визуального качества дифференциальных спектрозональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. № 4. С. 118-123.

54. Патент № 2679921 RU, МПК Н04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 28.04.2018. Опубл. 14.02.2019. Бюл.5.

55. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Компьютерное моделирование мультипликативного метода формирования цифровых спектрозональных изображений // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2020. №2 (118). С.76-78.
56. Патент № 2731880 RU, МПК Н04N 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.

57. Патент № 2756578 RU, МПК Н04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 24.11.2020. Опубл. 04.10.2021. Бюл.28.

58. Патент № 2754966 RU, МПК Н04N 7/18, G06T 7/136. Способ телевизионной спектральной селекции изображений объектов / М.А. Калитов, Н.П. Корнышев. Заявл. 26.02.2021. Опубл. 08.09.2021. Бюл.25.

59. Халфин, А. М. Основы телевизионной техники / А. М. Халфин. – М.: Советское радио, 1955. 580 с.

Бронштейн, И. А. Справочник по математике / И. А. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. 544 с.

61. 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.

62. 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.

63. Ваниев А.А., Калитов М.А., Корнышев Н.П. Улучшение изображений, полученных методом дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2019. №4(116). С.9-12.

64. 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.

65. 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.

66. Вильчинская, С.С. Оптические материалы и технологии: учебное пособие / С.С. Вильчинская, В.М. Лисицин. – Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 107 с.

67. Список функций Image Processing Toolbox. – Текст: электронный. – URL: https://hub.exponenta.ru/post/spisok-funktsiy-image-processing-toolbox152 #imread / (дата обращения 06.05.2024).

68. Список функций Image Processing Toolbox. – Текст: электронный. – URL: https://hub.exponenta.ru/post/spisok-funktsiy-image-processing-toolbox152
#imhist / (дата обращения 06.05.2024).

69. Список функций Image Processing Toolbox. – Текст: электронный. – URL: https://hub.exponenta.ru/post/spisok-funktsiy-image-processing-toolbox152
#histeq / (дата обращения 06.05.2024).

70. Список функций Image Processing Toolbox. – Текст: электронный. – URL: https://hub.exponenta.ru/post/spisok-funktsiy-image-processing-toolbox152
#imcrop / (дата обращения 06.05.2024).

71. Список функций Image Processing Toolbox. – Текст: электронный. – URL: https://hub.exponenta.ru/post/spisok-funktsiy-image-processing-toolbox152
#imadjust / (дата обращения 06.05.2024).

72. Команды и функции обработки многомерных массивов. – Текст: электронный. – URL:http://old.exponenta.ru/soft/Matlab/potemkin/book/matlab/ chapter5/5_4.asp / (дата обращения 06.05.2024).

73. Vaniev A.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Results of computer processing of digital spectrozonal images by the CLAHE algorithm // Journal of Physics: Conference Series 1658 (2020) 012068. doi: 10.1088/1742-6596/1658/1/012068.

74. 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.

110

75. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Методы повышения четкости цифровых телевизионных спектрозональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 2. С. 19-24.

76. Быстров Н.Е. Введение в теорию случайных величин и процессов:
учебное пособие. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2020.
– 104 с.