

Белорусский государственный университет

УДК 621.396.96

ЛИПЛЯНИН
Антон Юрьевич

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ
ОБЪЕКТОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности
01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Минск – 2022

Научная работа выполнена
в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель – *Хижняк Александр Вячеславович*,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник НИЛ факультета
связи и автоматизированных систем управления
УО «Военная академия Республики Беларусь».

Официальные оппоненты: *Зеневич Андрей Олегович*,
доктор технических наук, профессор,
ректор УО «Белорусская государственная
академия связи»;

Садов Василий Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры интеллектуальных систем
Белорусского государственного университета.

Оппонирующая организация – УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники».

Защита состоится 30 сентября 2022 г. в 10.00 на заседании совета
по защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном
университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического
факультета), ауд. 407; e-mail: romanov@bsu.by. Телефон ученого секретаря
209-57-09.

Почтовый адрес: пр-т Независимости, 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке
Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «26» августа 2022 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук



А.Ф. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее стремительно развивающихся областей знаний является развитие теории и методов обработки информации. Ключевое место в этом направлении занимают современные оптико-электронные системы (ОЭС). С их помощью, как правило, решаются три основные задачи: обнаружение, сопровождение и распознавание. Эффективность решения перечисленных задач во многом зависит от качества полученных изображений. Как показывает анализ процесса получения изображений, причинами низкого качества их регистрации являются разного рода шумы и искажения. В частности, для изображений с бортового видеодатчика характерными искажениями являются разного рода шумы, а также «смаз» и «расфокусировка». Дефекты изображения приводят к потере информации и соответственно к ухудшению работы всего устройства в целом. А потеря информации в условиях поиска малоразмерного малококонтрастного объекта может привести к пропуску цели, что в свою очередь угрожает поражением своих сил и средств. По этим причинам цифровые изображения непосредственно после съемки зачастую требуют обработки.

Для компенсации разного рода искажений и шумов активно применяются методы восстановления изображений. При восстановлении изображений наиболее актуальной задачей является поиск функции искажения. Ввиду того, что невозможно учесть степень влияния всех воздействующих факторов, то ее определение является сложной научной и практической задачей. Кроме того, в задаче оценки качества восстановленного изображения нет единого подхода для вычисления критерия его качества. Это обусловлено назначением системы, условиями ее функционирования, особенностями обработки и др. Неразрешенность проблемы критерия порождает неопределенность как необходимости, так и целесообразности восстановления искаженного изображения. Таким образом, для обеспечения эффективного функционирования систем обнаружения в условиях искажений необходимо интегрировать в процесс обработки изображений алгоритмы восстановления, включающие оценку качества восстанавливаемого изображения и оценку функции искажения.

Настоящая диссертационная работа посвящена изучению физических процессов, возникающих при искажении изображений, определению их типа и параметров, а также разработке эффективных алгоритмов восстановления искаженных изображений для обнаружения малоразмерных объектов в ОЭС, установленных на подвижных носителях в сложных условиях в реальном масштабе времени.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертация выполнена в рамках НИР «Разработка алгоритмов цифровой обработки изображений на вычислительных средствах программируемой логики» – шифр «Обработка», ИПУП «ЦиклонБел», №ГР 20160881 от 13.04.2016 г. Результаты исследований использованы СЧ ОКР «Разработка программного обеспечения сопровождения оптически наблюдаемых объектов на основе комплексирования видеоинформации от датчиков инфракрасного и видимого спектральных диапазонов» – шифр «Объединение», ОАО «Пеленг» и УО «ВАРБ», №ГР 201813778 от 02.08.2018 г.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – повышение качества обнаружения малоразмерного объекта в условиях искажений изображений, обусловленных движением или расфокусированностью оптической системы.

Задачи исследования:

Анализ причин и механизмов возникновения искажений в ОЭС, их влияние на эффективность решения задачи обнаружения малоразмерного объекта. Анализ методов восстановления искаженных изображений.

Разработка полуслепой итерационной процедуры восстановления изображения с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка», включающей разработку алгоритма определения типа и параметров искажений и определения условий ее останова.

Разработка универсального инструментария для исследования алгоритмов обработки изображений, обеспечивающего возможность быстрой интеграции новых математических моделей, способов обработки и оценки качества изображений.

Разработка методики определения требуемого и допустимого значения критерия качества изображения, которая позволяет принять решение о целесообразности применения восстановления в зависимости от используемого алгоритма обнаружения.

Разработка алгоритма обнаружения с этапом восстановления и качественной оценки входного изображения на основе разработанной методики.

Реализация алгоритма обнаружения с этапом восстановления и качественной оценки входного изображения на базе программируемых логических интегральных схем либо систем на кристалле.

Научная новизна

1. Научно-методический аппарат обработки искаженных изображений в части методов полуслепой деконволюции, отличающийся, во-первых, способом вычисления параметров функции размытия точки по Фурье-образу искаженного изображения; во-вторых, расчетом количества итераций восстановления на основе эмпирически полученной аналитической зависимости значения выбранного критерия качества изображения от количества итераций; в-третьих, методикой определения критерия качества изображения, позволяющей определить минимальный и максимальный уровень искажений. Если искажение меньше минимального, то восстановление не требуется, если больше максимального, то оно нецелесообразно.

2. Научно-исследовательский инструментарий для исследования существующих и разрабатываемых алгоритмов обработки изображений, который позволяет проводить как верификацию математических моделей объектов и фонов, так и сравнительную оценку характеристик различных методов и алгоритмов обработки изображений в условиях искажений.

3. Способ корреляционного обнаружения малоразмерных объектов в условиях искажений типа «смаз» и «расфокусировка», отличающийся наличием разработанной процедуры восстановления и обоснованными допустимым и требуемым показателями качества изображения, что позволило обеспечить функционирование алгоритма обнаружения искомого объекта с заданными характеристиками в условиях искажений.

Положения, выносимые на защиту

1. Итерационная процедура восстановления изображений с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка» на основе метода Люси-Ричардсона, *отличающаяся*: во-первых, разработанным способом определения типа искажений и вычисления его параметров; во-вторых, разработанным критерием качества изображения, определяющим необходимое и достаточное количество итераций восстановления, что в совокупности *позволило* снизить время восстановления до 2 раз по сравнению с известными методами и обеспечить решение задачи автоматического обнаружения малоразмерного объекта в масштабе реального времени при размере изображений до 1360×1024 пикселей.

2. Методика определения требуемого значения критерия качества изображения, *позволяющая* принять решение о необходимости применения восстановления в зависимости от используемого алгоритма обнаружения

и параметров искажений, *отличающаяся* вычислением требуемого значения показателя качества изображения, определяющего условия, когда для эффективной работы алгоритма обнаружения восстановление изображения не требуется, когда оно необходимо, а также когда оно нецелесообразно.

3. Универсальный инструментарий для обоснования выбора наиболее рационального алгоритма обнаружения оптико-электронной системы, исходя из выполняемой ею задач, а также условий функционирования, *позволяющий* проводить оценку работы алгоритмов на реальных или смоделированных видеопоследовательностях, настраивать параметры алгоритмов обнаружения до начала и в процессе работы, получать количественные и качественные оценки работы каждого алгоритма, *отличающийся* гибкостью применения при исследовании алгоритмов обнаружения, которая заключается в возможности изменения математической модели построения генерируемой видеопоследовательности, алгоритмов обнаружения и параметров, оценивающих качество их работы.

4. Корреляционный способ обнаружения малоразмерных объектов в условиях искажений типа «смаз» и «расфокусировка», отличающийся введением трех этапов: идентификации искажений на текущем изображении; формирования ядра свертки на основе типа и параметров искажений; расчета количества итераций, исходя из требуемого и текущего значения критерия качества изображения, *позволяющий* при амплитуде искажений до 20 пикселей обеспечить значения точности не менее 0,8 и полноты не менее 0,9 для объекта размером не менее 6×6 при размере изображений 1360×1024 пикселей.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе теоретические и практические результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Научному руководителю в совместных работах принадлежит выбор направлений исследований, предметные постановки задач, обсуждение результатов исследований.

Совместно с Михненко Е. И. проведен анализ методов восстановления оптико-электронных изображений, смазанных при движении.

Совместно с Мамченко А.С. проведен сравнительный анализ разработанного способа восстановления с существующими способами.

Совместно с Сергеенко А.В., Царенковым Н.В. и Хижняк Е.И. проведен анализ работы алгоритмов обнаружения оптически наблюдаемых объектов с учетом воздействия внешних возмущающих факторов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований по теме диссертации докладывались на:

VII межвузовской научно-технической конференции курсантов и магистрантов факультета связи и автоматизированных систем управления УО «Военная академия Республики Беларусь» (Минск, 16 мая 2018 г.);

XVII Белорусско-Российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, 11 июня 2019 г.);

Международной военно-научной конференции «Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях» (Минск, 17 – 18 апреля 2019 г.).

Результаты диссертации внедрены в ОАО «Пеленг», Государственном пограничном комитете Республики Беларусь, ИП «ЦиклонБел» (имеется 3 акта о внедрении).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, из которых 5 статей в научных изданиях, включенных в Перечень изданий (общим объемом 2,5 авторского листа), 3 статьи в других научных изданиях, 3 тезисов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 151 страницу, в том числе 71 рисунок занимает 30 страниц, 16 таблиц на 23 страницах, два приложения занимают 20 страниц. Библиографический список содержит 126 наименований (на 10 страницах), включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена анализу проблемы обнаружения малоразмерных объектов в сложных условиях при наличии искажений. Проведена сравнительная оценка методов восстановления изображений.

Искаженное изображение представляется математической моделью вида

$$g(i, j) = f(i, j) \otimes h(i, j) + \eta(i, j), \quad (1)$$

где $f(i, j)$ – оригинальное изображение;
 $h(i, j)$ – функция искажения;
 i, j – координаты точки на изображении;
 $\eta(i, j)$ – шумовая составляющая.

Ввиду того, что причины искажений и шума на всех этапах получения изображения различны, то составляющие $h(i, j)$, $\eta(i, j)$ имеют индивидуальные формализованные представления. Искажения могут быть обусловлены влиянием атмосферы, подвижностью ОЭС, дефектами оптической системы, помехами и др. В диссертации показано, что при функционировании ОЭС целесообразно восстанавливать изображения с искажениями, обусловленными движением сенсора («смаз») и расфокусированностью оптической системы («расфокусировка»).

Из анализа работы алгоритмов обнаружения в сложных условиях следует, что эффективными остаются только алгоритмы, в основе которых положены принципы выделения информации, основанные на пространственных характеристиках и образах. Исследование перечисленных алгоритмов обнаружения показало, что они являются чувствительными к искажениям типа «смаз» и «расфокусировка». Для компенсации искажений, обусловленных расфокусированностью оптической системы и движением сенсора, целесообразно применять итерационные алгоритмы восстановления ввиду устойчивости их к ошибкам в формировании функции искажения [1]. Для использования алгоритмов восстановления требуется рассчитывать количество итераций восстановления, а также контролировать сходимость решения. Из рассмотренных итерационных алгоритмов наиболее приемлемым является метод Люси-Ричардсона ввиду наименьших вычислительных затрат.

Минимальные значения величины искажений, при которых целесообразно выполнять восстановление изображений, составляют от 3 до 5 пикселей. Максимальные значения амплитуды искажений варьируются от 30 до 40 пикселей и обусловлены, во-первых, возникающими артефактами при выполнении восстановления; во-вторых, временем восстановления; в-третьих, выбранным алгоритмом обнаружения и условиями наблюдения [4].

Во второй главе разработана итерационная процедура восстановления изображений с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка».

Одной из самых проблемных задач в восстановлении изображения является поиск функции искажения. Для решения задачи определения функции искажения существует четыре основных подхода: калибровка, выявление границ, слепая деконволюция и метод определения «нулей» на Фурье-образе искаженного изображения. Первый подход предполагает анализ тестовых изображений с последующей корректировкой этапов обработки. Второй способ

основан на анализе границ объектов, находящихся в кадре. С помощью теории проекций находят форму искажающей функции. Третий заключается в последовательном подборе такого вида искажающей функции, при котором восстановленное изображение соответствует экстремуму выбранного критерия. В основе четвертого подхода лежит анализ Фурье-образа искаженного изображения $g(i, j)$, а именно его изменения, возникающие вследствие искажения. Эти изменения выражаются снижением значений яркости на Фурье-образе искаженного изображения для высоких частот. Проведенный анализ позволил определить, что наиболее приемлемым является способ визуального определения «нулей» на Фурье-образе искаженного изображения. Для эффективного использования выбранного подхода необходимо автоматизировать процесс распознавания типа и параметров искажающей функции. Для этого определен глобальный порог бинаризации, равный половине динамического диапазона Фурье-образа, а также введены дополнительные этапы фильтрации.

Следующим аспектом, требующим разрешения, является вопрос останова итерационного алгоритма. Для этого требуется либо обосновать условия прекращения работы алгоритма восстановления, либо рассчитать количество итераций заранее. В первом случае имеется существенный недостаток. При невыполнении условия останова нахождение оригинального изображения может перейти в бесконечный цикл. Для второго случая необходимо только проводить контроль расхождения решения и знать уровень требуемого критерия качества изображения.

После анализа существующих показателей качества восстановления изображения было выявлено, что некоторые из них непригодны для использования (MSE, PSNR, SSIM и др.). Часть показателей ограничено применима (норма разности и норма Минковского). Наиболее пригодными для оценки изображения являются критерий Фергюса и резкость [2]. Использование резкости является затруднительным ввиду изрезанности ее зависимости от количества итераций. Использование критерия Фергюса в системах наблюдения, установленных на подвижном носителе, проблематично. Во-первых, непрерывно изменяющийся фон не позволяет использовать эталонную гистограмму. Во-вторых, построение нескольких гистограмм градиентов с вычислением их корреляционных моментов в масштабе реального времени сложно реализуемо с точки зрения вычислительных затрат. Основываясь на принципе формирования этого критерия, автор выдвинул и подтвердил гипотезу об использовании в качестве критерия среднего значения гистограммы градиента.

Предложенный критерий имеет вид

$$\Psi = \frac{1}{z} \frac{\sum_{i=0}^n p_i(\nabla g(x,y))}{p_0(\nabla g(x,y))}, \quad (2)$$

где $\nabla g(x,y)$ – результирующее изображение градиента, является суммой изображений после свертки $g(x,y)$ операторами Собеля и Лапласа (в обработке изображений применяют ядра свертки, представляющие собой матрицы с фиксированными значениями и расположением коэффициентов);

$p_i(\nabla g(x,y))$ – количество пикселей градиента искаженного изображения с i -ой интенсивностью;

$p_0(\nabla g(x,y))$ – количество пикселей с минимальной интенсивностью;

z – величина динамического диапазона изображения.

Применив разработанный способ определения типа и параметров искажений, а также способ расчета количества требуемых итераций в алгоритме восстановления Люси-Ричардсона была получена итерационная процедура восстановления изображения с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка» (рисунок 1), где авторские блоки заштрихованы.

На вход алгоритма поступает искаженное изображение, для которого рассчитываются значения типа и параметров искажений (Δ, ϕ), на основании

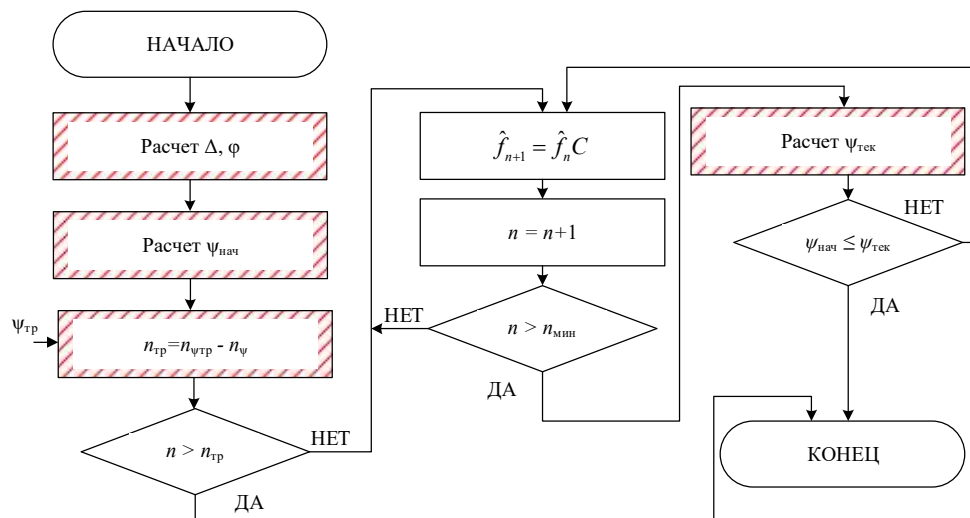


Рисунок 1. – Блок-схема итерационной процедуры восстановления изображений с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка»

которых формируется ядро свертки, требуемое для операции восстановления. Чтобы рассчитать необходимое количество итераций восстановления (n), вычисляется текущее значение критерия качества искаженного изображения. При известных текущем и требуемом значениях качества рассчитывается необходимое количество итераций. После этого производится первая итерация восстановления, далее текущее количество итераций инкрементируется

и сравнивается с заданным минимальным числом итераций. В случае, если текущее количество итераций меньше заданного, снова производится расчет текущего критерия качества восстанавливаемого изображения. Если текущее значение критерия качества менее входного, то принимается решение о том, что решение расходится и процедура восстановления прекращается. В противном случае восстанавливаемое изображение поступает на следующую итерацию восстановления. После выполнения расчетного количества итераций процедура восстановления останавливается, а изображение подается на выход алгоритма.

Для верификации итерационной процедуры восстановления и ее составных частей была разработана имитационная модель, включающая блок построения искаженного изображения, блок восстановления изображений, блок оценки эффективности восстановления (рисунок 2).

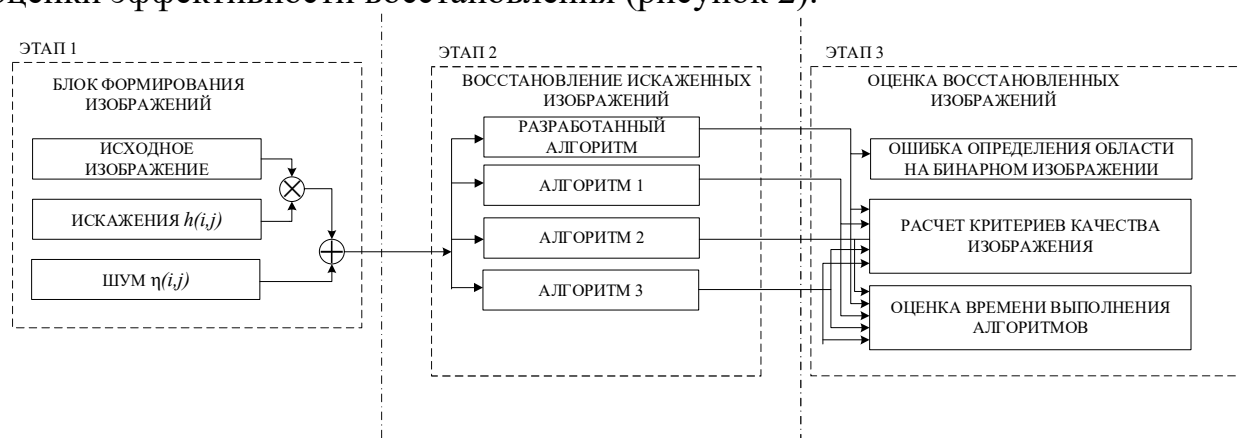
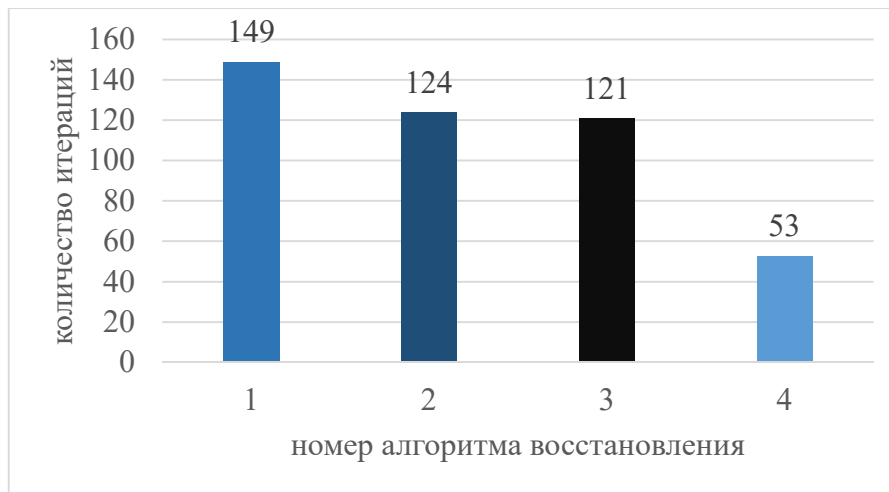


Рисунок 2. – Структурная схема разработанной модели для верификации итерационной процедуры восстановления искаженных изображений

Для сравнения были выбраны наиболее близкие по типу алгоритмы восстановления. Первый алгоритм предполагает в качестве критерия останова оценку нормы разности восстанавливаемого изображения с оригинальным. Сущность такого подхода состоит в том, что при известном оригинальном изображении можно оценить, когда достигается максимальное соответствие восстанавливаемого изображения оригинальному. Чаще всего такой подход используют при проведении компьютерного моделирования. Второй алгоритм использует в качестве критерия качества сравнение среднего квадратического отклонения с нормой разности i -й и $(i+1)$ -й процедуры. Условием останова алгоритма является превышение нормы разности над средним квадратическим отклонением яркости на 4 итерациях подряд. В третьем алгоритме был применен метод экспертных оценок.

В результате имитационного моделирования были получены результаты, представленные на рисунке 3 и в таблице 1. В среднем разработанный алгоритм работает на 79 итераций быстрее, чем анализируемые, что примерно в 2 раза быстрее.



1 – метод экспертных оценок; 2 – норма разности между восстанавливаемым изображением и оригинальным; 3 – норма разности между результатом текущей итерации и предыдущей, 4 – разработанный критерий

Рисунок 3. – Диаграмма количества итераций восстановления от вида критерия останова

В таблице 1 представлены значения критериев качества восстановленного изображения после восстановления. Анализируя таблицу 1, можно сказать, что использование предложенной процедуры восстановления с разработанным критерием качества примерно соответствует работе алгоритмов 1, 2, 3. При многократном проведении сравнения было выявлено, что прирост скорости восстановления в зависимости от выбранного уровня показателя качества изображения не превышает 2 раз. При этом значения показателей качества изображения, по которым оптимизированы другие алгоритмы, отличаются незначительно.

Таблица 1. – Значения показателей качества после восстановления искаженного изображения разработанной процедурой и иными алгоритмами

Алгоритм восстановления	ε	PSNR	γ	ψ
Алгоритм № 1	6	35	15	0,89
Алгоритм № 2	4	35	14	0,95
Алгоритм № 3	5	34,8	14	0,91
Разработанная процедура	8	30	11	0,9

Из вышесказанного следует, что разработанная итерационная процедура восстановления превосходит аналоги по времени выполнения.

В третьей главе разработан универсальный инструментарий исследования способов обработки изображений, методика определения требуемого и достаточного значения критерия качества изображения и корреляционный способ обнаружения малоразмерных целей в условиях искажений типа «смаз» и «расфокусировка».

Разработанный универсальный инструментарий (рисунок 4) позволяет определить наиболее рациональный способ или последовательность способов обработки изображений (в том числе алгоритмов восстановления, обнаружения, сопровождения и т.д.), исходя из выполняемых оптико-электронной системой задач, а также условий функционирования. Это обеспечивается гибкостью моделирования всех этапов работы ОЭС в различных условиях, начиная с формирования кадра видеопоследовательности и заканчивая оценкой качества алгоритмов обработки изображений. Также разработанный инструментарий позволяет проводить оценку качества исследуемых алгоритмов обработки изображений (видеопоследовательностей) по выбранным параметрам.

Использование универсального инструментария позволило разработать методику определения требуемого значения критерия качества изображения. Она позволяет принять решение о необходимости применения процедуры восстановления в зависимости от используемого алгоритма обнаружения и параметров искажения. Разработанная в рамках диссертационной работы методика выбора $\psi_{тр}$ и $\psi_{дон}$ представляет собой последовательность выполнения следующих основных операций (рисунок 5).

1. Задание необходимых значений показателей качества обнаружения.

– *точность* (precision, P) – отношение верно детектированных объектов к общему числу детектированных объектов, определяется по формуле:

$$P = \frac{tp}{tp + fp}, \quad (3)$$

где tp – количество истинно-положительных объектов (true positives);

fp – количество ложноположительных объектов (false positives);

– *полнота* (recall, R) – отношение верно детектированных объектов к общему числу объектов, которые должны быть детектированы, определяется по формуле:

$$R = \frac{tp}{tp + fn}, \quad (4)$$

где fn – количество ложноотрицательных объектов (false negatives).

2. Построение зависимостей показателей качества обнаружения от показателя качества изображения ($R=F(\psi)$, $P=F(\psi)$). Для получения искомой зависимости необходимо сформированное изображение (выход блока 1, в методике использован инструментарий, представленный на рисунке 4) подать на вход блока 2, который представляет собой реализацию анализируемого алгоритма обнаружения, одновременно с этим подать изображение

с координатами объектов на блок 3. После обработки входного изображения (выход блока 2) подать на блок 3. В блоке 3 после прихода обработанного изображения рассчитываются показатели качества обнаружения (выражения (3) и (4)), соответствующие текущему показателю качества изображения (выражение (2)).

3. Определение значения $\psi_{тр}$. Сопоставляя зависимости, полученные в пункте 2 ($R=F(\psi)$, $P=F(\psi)$), определяется $\psi_{тр}$, которое соответствует минимальному значению среди зависимостей, определенных в пункте 2, соответствующих заданным уровням показателей качества обнаружения (пункт 1).

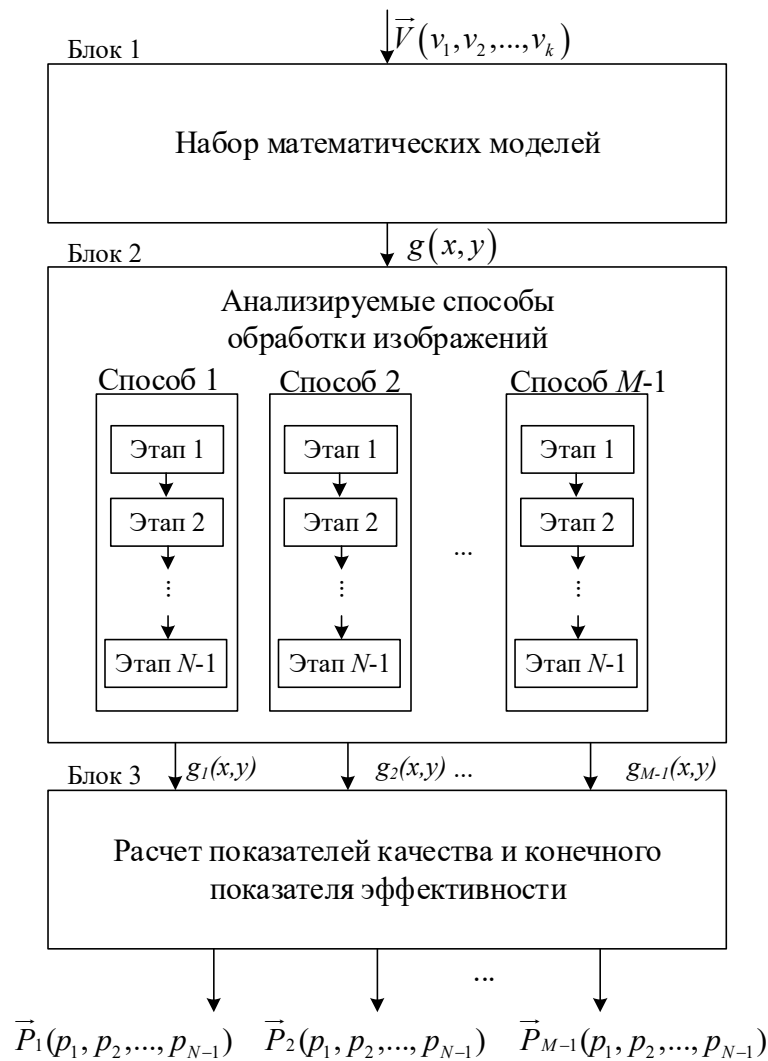


Рисунок 4. – Блок-схема разработанного универсального инструментария для исследования эффективности алгоритмов обработки изображений

4. Определение значения $\psi_{доп}$. Для определения $\psi_{доп}$ необходимо проанализировать время работы алгоритма на платформе реализации (процессоры общего назначения, микроконтроллер, ПЛИС и т.д.) и источник данных (матрица ОЭС). В случае, если требуемая частота меньше полученной при обработке, можно рассчитать максимально возможное время

восстановления. Зная время выполнения итерации восстановления, вычисляется максимальное количество итераций, которое можно провести на текущей платформе, далее по выражению (2) определяется искомая величина критерия $\psi_{\text{доп}}$.

По разработанной методике обосновано минимальное значение критерия качества изображения для типового корреляционного алгоритма обнаружения ($\psi = \psi_{\text{тр}} = 0,82$) для ЭИ размером от 6×6 пикселей. Это позволило адаптировать разработанную итерационную процедуру восстановления для типового корреляционного алгоритма обнаружения за счет введения дополнительного этапа идентификации искажения на текущем изображении. Блок-схема представлена на рисунке 6 (авторские блоки заштрихованы).

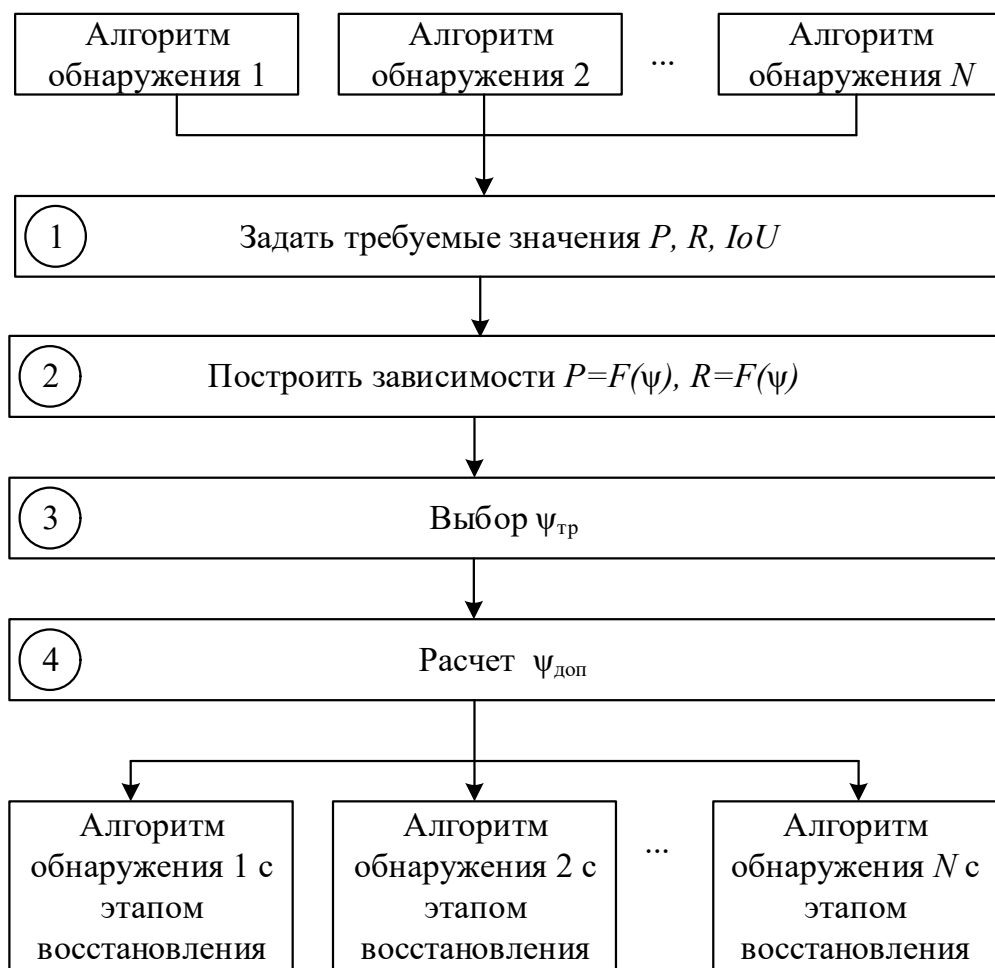


Рисунок 5. – Блок-схема методики определения требуемого значения критерия качества изображения

Корреляционный обнаружитель с этапом восстановления изображений был реализован на аппаратно-программной платформе Zynq-7000 и интегрирован в многоканальной оптико-электронной системе воздушного базирования, разработанной в рамках контракта №17-08/15. Данная платформа

обеспечивает гибкий подход к проектированию и имплементации устройств обработки изображений.

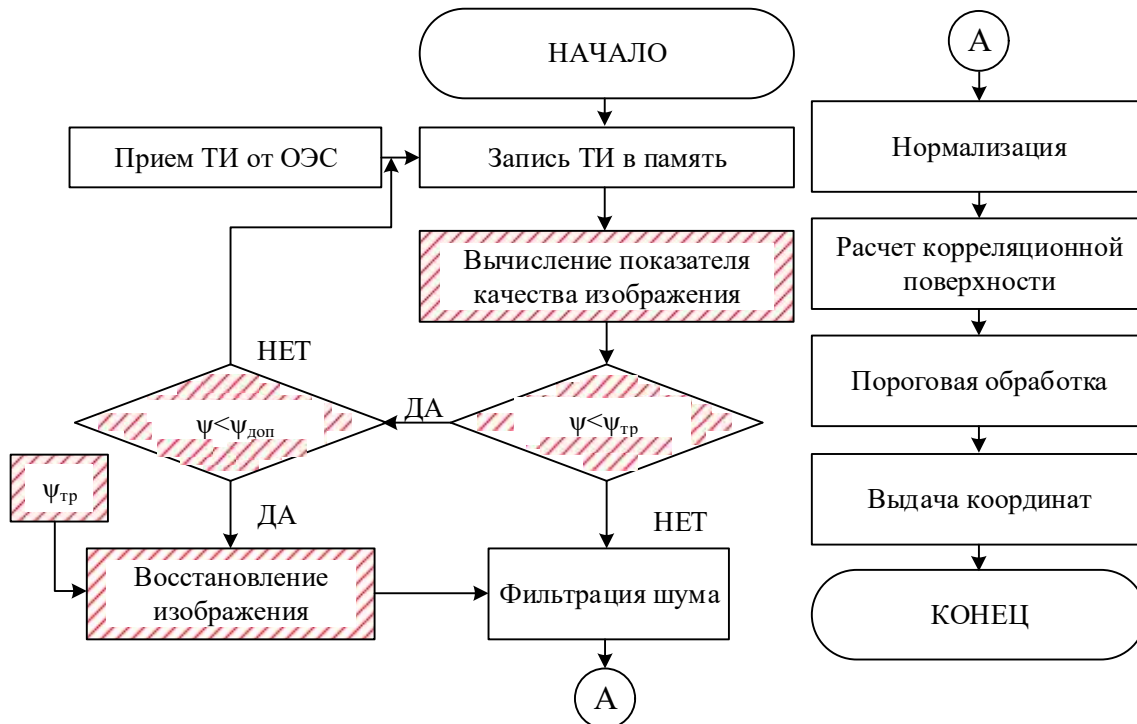


Рисунок 6. – Блок-схема корреляционного алгоритма обнаружения в условиях «смаза» и «расфокусировки» изображения

Схемотехническое решение позволяет реализовать обнаружение малоразмерных объектов в масштабе реального времени при экономии 30 процентов аппаратных ресурсов платформы относительно реализации средствами ПЛИС алгоритмов № 1 и 2 из таблицы 1, что позволило обрабатывать видеопоследовательность с частотой до 30 кадров в секунду и размером изображения 1360×1024 без сжатия информации (24 бита на пиксель).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана итерационная процедура восстановления изображений с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка». Она включает следующие отличительные особенности. Во-первых, автоматическое определение параметров и типа искажающей функции за счет использования бинаризации и применения математической морфологии, включающей фильтрацию отдельных вкраплений на спектре с объединением анализируемой области. Во-вторых, расчет необходимого и достаточного количества итераций восстановления на основе полученной эмпирически аналитической зависимости уточненного критерия качества изображения (среднее значение гистограммы

градиента искаженного изображения) от количества итераций. Это в совокупности позволило снизить время обработки до 2 раз и обеспечить работу системы в режиме реального времени при размере изображений до 1360×1024 пикселей [1, 2, 7, 10].

2. Разработан универсальный инструментарий, включающий в себя три основных блока: блок формирования изображения, соответствующий заданной математической модели; блок обработки изображений, представляющий совокупность исследуемых алгоритмов обработки изображений; блок оценки качества обработки изображений, представляющий собой набор реализованных способов оценки и критериев качества изображений. Инструментарий позволяет определить наиболее рациональный способ или последовательность способов обработки изображений (в том числе алгоритмов восстановления, обнаружения, сопровождения и т.д.), исходя из выполняемых оптико-электронной системой задач, а также условий функционирования. Это обеспечивается гибкостью моделирования всех этапов работы ОЭС в различных условиях, начиная с формирования кадра видеопоследовательности и заканчивая оценкой качества алгоритмов обработки изображений [5, 8].

3. Разработана методика определения требуемого значения критерия качества изображения с использованием разработанного универсального инструментария. Методика представляет собой последовательность действий для вычисления требуемого и достаточного значения показателя качества изображения. Она включает построение зависимостей критериев качества искаженных изображений, полноты, точности от величины искажений; сопоставительный анализ полученных характеристик; выбор требуемого уровня критерия качества изображений на основе заданных параметров качества работы алгоритма обнаружения. Заключительным этапом является вычисление допустимого значения искажений на основе параметров анализируемой системы. Использование методики совместно с применением итерационной процедуры восстановления в алгоритмах, основанных на пространственных характеристиках и образах, позволяет принять решение о необходимости применения восстановления в зависимости от используемого алгоритма обнаружения и параметров искажения, а также обеспечить работу алгоритмов обнаружения в условиях искажений амплитудой до 30 пикселей [4, 5, 6].

4. Разработан корреляционный способ обнаружения с восстановлением искажений изображений, обусловленных движением оптико-электронного сенсора или расфокусировкой оптической системы. Его отличительными особенностями являются: идентификация искажений на текущем изображении, формирование ядра свертки для этапа восстановления, расчет количества итераций, исходя из заданного и текущего значения критерия качества, и процедура восстановления, основанная на методе Люси-Ричардсона. Он

позволяет при амплитуде искажений до 20 пикселей обеспечить значения точности не менее 0,8 и полноты не менее 0,9 для объекта размером не менее 6×6 при размере изображений 1360×1024 пикселей [3, 5, 9, 11].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные в рамках диссертационного исследования способы восстановления и обработки изображений для корреляционных алгоритмов обнаружения и сопровождения реализованы: в многоканальной оптико-электронной системе воздушного базирования, разработанной в рамках контракта №17-08/15 от 17.08.2015 года с ИПУП «ЦиклонБел» (акт реализации от 29.09.2017 года); на посту технического наблюдения интегрированной системы контроля охраняемой территории, реализованной в рамках составной части ОКР, шифр «Объединение», №ГР20181378 от 02.08.2018 (акт реализации от 13.09.2019 года в ОАО «Пеленг», акт реализации от 09.09.2019 года в органах пограничной службы).

2. Для обеспечения быстродействия и точности расчетов разработанных способов рекомендуется их реализовывать при помощи встраиваемых систем или систем на кристалле типа Zynq UltraScale или им подобных.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, включенных в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях

1. Липлянин, А. Ю. Анализ методов восстановления оптико-электронных изображений, смазанных при движении / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк, Е.И. Михненко, А.С. Мамченко // Докл. БГУИР. – 2018. – № 2 (112). – С. 40–46.

2. Липлянин, А. Ю. Обоснование критерия оценки качества восстановления искаженных изображений для итерационного алгоритма в системах корреляционного обнаружения / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Докл. БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 64-71.

3. Липлянин, А. Ю. Способ обработки искаженных линейным смазом или расфокусировкой изображений для автоматической системы корреляционного обнаружения / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк, А. С. Мамченко // Известия Гомельского гос. ун-та. Естественные науки. – 2019. – № 3 (114). – С. 108-112.

4. Липлянин, А. Ю. Исследование работы алгоритмов обнаружения оптически наблюдаемых объектов с учетом воздействия внешних возмущающих факторов / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк, А. В. Сергеенко // Известия Гомельского гос. ун-та имени Ф. Скорины. Естественные науки. – 2021. – № 6 (129). – С. 77–83.

5. Липлянин, А. Ю. Методика определения требуемого значения показателя качества изображения для алгоритмов обнаружения в условиях искажений / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Докл. БГУИР. – 2022. – № 20 (3). – С. 69–75.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

6. Липлянин, А. Ю. Методика определения требуемого значения критерия качества изображения для алгоритмов обнаружения при наличии искажений / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Вестн. Полоц. Гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2019. – № 12 (116). – С. 62–66.

7. Липлянин, А. Ю. Способ восстановления изображений на основе автоматического расчета типа, параметров функции искажения и требуемого количества итераций / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Проблемы инфокоммуникации. – 2019. – № 1 (9). – С. 83–91.

8. Липлянин, А. Ю. Универсальный инструментарий для исследования работы алгоритмов обнаружения в оптическом диапазоне / А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк, А. В. Сергеенко // Вест. Полоц. Гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2020. – № 12 (116). – С. 103–108.

Тезисы докладов на научных конференциях

9. Липлянин, А. Ю. Повышение вероятности обнаружения и распознавания цели в оптико-электронных системах наблюдения при помощи восстановления изображений, смазанных при движении / А. Ю. Липлянин, Е. И. Хижняк // Тезисы выступлений 7-й молодежной межвузовской научно-технической конференции курсантов и магистрантов факультета связи и автоматизированных систем управления, Минск, 16 мая 2018 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – С. 39.

10. Липлянин, А. Ю. Определение параметров искажения изображения для решения задачи восстановления / А. Ю. Липлянин, Е. И. Хижняк // Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях: тезисы докладов Междун. воен.-науч. конф., Минск, 17-18 апреля 2019 г. / Воен. академ. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 109.

11. Липлянин, А. Ю. Влияние искажений изображения на решение задачи распознавания / А. Ю. Липлянин, Н. В. Царенков, А. В. Сергеенко // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVII Бел.–Рос. науч.–техн. конф., Минск, 11 июня 2019 г. / БГУИР. – Минск, 2019. – С. 75.

РЕЗЮМЕ

Липлянин Антон Юрьевич

Восстановление изображений в оптико-электронных системах для повышения эффективности обнаружения малоразмерных объектов

Ключевые слова: восстановление изображений, многоканальные оптико-электронные системы, обнаружение объектов, фоновое-целевая обстановка, оптически наблюдаемые объекты.

Цель работы: повышение качества обнаружения малоразмерных объектов в условиях искажений, обусловленных движением или расфокусированностью оптической системы.

Методы исследования и использованная аппаратура: методы статистической теории принятия решений и теории вероятностей, а также методы математического моделирования и натурального эксперимента. Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования SoC Zynq-7000.

Полученные результаты и их новизна: проведен анализ причин и механизмов возникновения искажений в ОЭС, их влияние на эффективность решения задачи обнаружения малоразмерных объектов. Проанализированы методы восстановления искаженных изображений. Разработана полуслепая итерационная процедура восстановления изображения с искажениями типа «смаз» или «расфокусировка», включающая разработку алгоритма определения типа и параметров искажений, а также условий ее останова. Разработан универсальный инструментарий, обеспечивающий возможность исследования существующих и вновь разработанных математических моделей изображений, в том числе с учетом искажений, а также способов их обработки с вычислением интегральных и частных показателей качества. Разработана методика определения требуемого и допустимого значения критерия качества изображения, которая позволяет принять решение о целесообразности применения восстановления в зависимости от используемого алгоритма обнаружения. Разработан и реализован алгоритм обнаружения с этапами восстановления и качественной оценки входного изображения.

Рекомендации по использованию: результаты могут быть использованы для оценки и исследования как существующих, так и вновь разрабатываемых алгоритмов обработки изображений.

Область применения: модернизация многоканальных оптико-электронных систем обнаружения, а также проектирование и создание перспективных систем обнаружения малоразмерных объектов.

РЭЗІЮМЭ

Ліплянін Антон Юр'евіч

Аднаўленне малюнкаў у аптычна-электронных сістэмах для павышэння
эфектыўнасці выяўлення маларазмерных аб'ектаў

Ключавыя словы: аднаўленне малюнкаў, шматканальныя аптычна-электронныя сістэмы, фонава-цэлевая абстаноўка, аптычна назіраемыя аб'екты.

Мэта работы: павышэнне якасці выяўлення малапамерных аб'ектаў ва ўмовах скажэнняў, абумоўленых рухам ці расфакусіраваннасцю аптычнай сістэмы.

Метады выкарыстання і апаратура, якая выкарысталася: метады статыстычнай тэорыі прыняцця рашэнняў і тэорыі імавернасці, а таксама метады матэматычнага мадэліравання і натурнага эксперыменту. Эксперыментальныя даследаванні выкананы з выкарыстаннем апаратуры SoC Zynq7000.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: праведзены аналіз прычын і механізмаў з'яўлення скажэнняў у АЭС, іх ўплыў на эфектыўнасць рашэнняў задачы выяўлення малапамерных аб'ектаў. Праведзен аналіз метадаў аднаўлення скажонных малюнкаў. Распрацавана паўсялякая ітэрацыйная працэдура аднаўлення малюнкаў з скажэннямі тыпу «змаз» ці «расфакусіроўка», якая ўключае распрацоўку алгарытма вызначэння тыпу і параметраў скажэнняў і ўмоў яго астанова. Распрацаваны ўніверсальны інструментарый, які дазваляе праводзіць даследаванні існуючых ды зноў распрацаваных матэматычных мадэляў малюнкаў, у тым ліку з улікам скажэнняў, а таксама спосаб іх апрацоўкі з вылічэннем інтэгральных і прыватных паказчыкаў якасці. Распрацавана метадыка вызначэння патрабаванага і дапушчальнага значэння крытэрыя якасці малюнкаў, якая дазваляе прыняць рашэнне аб неабходнасці аднаўлення ў залежнасці ад выкарыстоўваемага алгарытму выяўлення. Распрацаваны і рэалізаваны алгарытм выяўлення з этапамі аднаўлення і якаснай ацэнкі ўваходнага малюнка.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследавання могуць выкарыстоўвацца для ацэнкі існуючых ды зноў распрацоўваемых алгарытмаў выяўлення апрацоўкі малюнкаў.

Галіна прымянення: мадэрнізацыя існуючых і распрацоўка новых шматканальных аптычна-электронных сістэм выяўлення аптычна назіраемых аб'ектаў.

RESUME

Liplianin Anton

Image reconstruction in optic-electronic systems to increase the efficiency of detecting small objects

Keywords: image restoration, multichannel optoelectronic systems, object detection, background-target environment, optically observable objects.

Purpose of research: improving the quality of detection of small-sized objects in conditions of distortion caused by movement or defocusing of the optical system.

Research methods and equipment: the decision-making statistical theory and probability theory, methods of mathematical modeling and natural experiment.

Experimental studies were performed using the following equipment: Zynq-7000.

The results obtained and their novelty: The analysis of the causes and mechanisms of the occurrence of distortions in the ECO, their impact on the effectiveness of solving the problem of detecting small objects is carried out. Methods of restoration of distorted images are analyzed. A semi-blind iterative procedure for restoring an image with distortions of the "smudge" or "defocusing" type has been developed, including the development of an algorithm for determining the type and parameters of distortion and determining the conditions for its stop. A universal toolkit has been developed that provides an opportunity to study existing and newly developed mathematical models of images, including taking into account distortions, as well as ways of processing them with the calculation of integral and partial quality indicators. A method has been developed for determining the required and acceptable value of the image quality criterion, which allows you to make a decision on the feasibility of using recovery, depending on the detection algorithm used. A detection algorithm with stages of recovery and qualitative evaluation of the input image has been developed. A detection algorithm with a stage of recovery and qualitative evaluation of the input image based on systems on a chip is implemented.

Recommendations for using: research results can be used for known and newly developed optically observable objects tracking algorithms estimation and research.

Application: multichannel optiko-electronic automatic tracking systems modernization, perspective optically observable objects tracking systems upgrade and creation.