

На правах рукописи



Серебрянникова Ольга Анатольевна

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ДИСКРИМИНАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ
ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ФРАГМЕНТОВ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет» на кафедре радиофизики физического факультета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Радченко Юрий Степанович

Официальные оппоненты: **Самойлин Евгений Александрович**,
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), факультет 5, кафедра 54, профессор.

Чуриков Дмитрий Викторович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук» (г. Москва), заместитель директора по научной работе.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль

Защита состоится «7» октября 2021 года в 15 часов 10 минут на заседании диссертационного совета 24.2.288.05 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, дом 1, физический факультет, аудитория 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте:
<http://www.science.vsu.ru/disserinfo&cand=3359>

Автореферат разослан «__» августа 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.288.05



Степкин Владислав Андреевич

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию алгоритмов оценки параметров фрагментов неоднородных полей.

Актуальность работы. Регистрация и анализ пространственно-временных полей является важной частью радиофизики, астрономии и астрофизики, телевидения, медицины и других разделов науки и техники. Полученные цифровые изображения или видеопоследовательности подвергаются, как правило, преобразованиям: гистограммной коррекции, фильтрации, информационному сжатию и восстановлению, локализации неоднородностей. Эти этапы предобработки зарегистрированных полей позволяют повысить точность и надежность обнаружения и отождествления объектов, оценки их местоположения и размеров. В настоящее время остро востребованы и активно развиваются направления субпиксельной оценки сдвига фрагментов полей, сверхразрешения объектов по кадрам низкого качества.

Среди основных направлений субпиксельной оценки положения фрагмента выделим следующие.

1) Компенсация атмосферной турбулентности при наблюдении объектов. Данная задача, например, в астрономии, решается методами адаптивной оптики. Однако эти методы весьма трудоемки с технической и вычислительной точки зрения. Они требуют за время «замороженности» турбулентности порядка 10^{-3} с выполнить анализ искажений волнового фронта, передать команды на управляющие фазовые корректоры или сегментированные зеркала. Кроме сложности данные методы позволяют компенсировать искажения волнового фронта в довольно узком угловом секторе.

Альтернативой методам адаптивной оптики является компенсация сдвигов элементов зарегистрированного кадра видеопоследовательности с субпиксельной (дробной) точностью. Кроме технической простоты такой метод компенсации дает возможность коррекции изображения на большей части кадра.

2) Оценка дальности до объектов и определение их размеров в астрономических задачах и дистанционном зондировании Земли. Качество зафиксированного поля (изображения) ограничивается дискретным (пиксельным) характером матричного фоторегистратора. Одним из способов получить изображения более высокого качества является передискретизация совокупности кадров, определение смещения кадров с субпиксельной точностью и их последующее оптимальное объединение. Однако, такой подход приводит к значительным вычислительным затратам. Кроме того, в эффективность таких процедур вносит существенный вклад наличие шумов фоторегистрации и иных помех.

3) Кодирование (сжатие) видеопоследовательностей с субпиксельной оценкой межкадровых сдвигов блоков изображений. В настоящее время востребованы алгоритмы оценки сдвигов фрагментов и кадров с субпиксельной (до $1/8$ пикселя) точностью. В существующих алгоритмах оценки производится передискретизация изображения, интерполяция новых отсчетов, их сглаживание и использование поисковых алгоритмов оценки сдвига блоков. Причем все операции должны быть выполнены в режиме реального времени. Однако существующие алгоритмы требуют существенных вычислительных затрат, не учитывают корреляционную структуру поля и наличие помех.

Таким образом, существующие алгоритмы оценки параметров неоднородных полей обладают рядом недостатков, требуют поиска новых алгоритмов, более детального и точного исследования уже разработанных.

Степень разработанности темы. Существующие подходы к оценке параметров цифровых неоднородных полей, в том числе сдвига с субпиксельной точностью, не удовлетворяют возросшим требованиям эффективности используемых алгоритмов. Они отличаются, в частности, высокой вычислительной сложностью, что нежелательно особенно в задачах, решаемых в реальном времени, не учитывают наличие помех и корреляционные свойства полей, имеют ограниченное применение в случае

недифференцируемости решающей функции, по положению максимума которой вычисляется оценка неизвестного сдвига фрагмента поля.

В радиофизике известен подход к оценке положения сигнала на фоне помех, заключающийся в применении дискриминатора, свободный от ряда недостатков существующих алгоритмов. При анализе характеристик такого способа оценки используется асимптотически гауссовское приближение дискриминационной статистики [59,60]. Однако границы его применимости неизвестны, и при малом отношении сигнал/шум такое приближение некорректно.

Исследованиями установлено, что точность оценки и скорость выполнения операций возрастает после предобработки полей: гистограммной коррекции, оценки анизотропии поля, связанной с наличием объектов на изображении с неизвестной ориентацией, преобразованиям ракурса объектов.

Существующие алгоритмы оценки анизотропии поля и локализации границ неоднородностей, как правило, используют операции дифференцирования первого и второго порядков. Такой подход неприменим к полям с недифференцируемой корреляционной функцией и дискретным полям. Отказ от операций в пиксельном пространстве и переход к операциям со спектрами полей позволяет получить алгоритмы корректные с математической точки зрения и устойчивые к корреляционным характеристикам поля.

Цель работы. Целью научного исследования является построение алгоритмов оценки сдвига фрагментов неоднородных полей с помощью устройства типа дискриминатор и их статистический анализ, модификация алгоритмов для получения статистически устойчивых оценок.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие задачи:

1. Синтезировать алгоритмы оценки сдвига фрагмента неоднородного оцифрованного поля на основе дискриминационных алгоритмов. Найти точное аналитическое выражение для распределения статистики на выходе дискриминаторов.

2. Разработать, реализовать и исследовать способы предобработки изображений, повышающие эффективность последующих алгоритмов оценки положения фрагмента цифрового поля, а именно: а) новые методы гистограммной коррекции яркости поля, в том числе несколькими модами; б) оценка анизотропии поля с помощью устойчивых спектральных алгоритмов, не предполагающих процедуру дифференцирования; в) эвристические спектральные алгоритмы локализации неоднородностей и оценки их ракурса.

3. Исследовать распределение дискриминационной статистики при произвольном отношении сигнал/шум и различных параметрах дискриминатора. Определить условия, при которых распределение дискриминационной статистики можно считать асимптотически гауссовским, а оценки сдвига фрагмента состоятельными.

4. Исследовать методами математического моделирования дискриминационные и комбинированные алгоритмы оценки сдвига фрагмента, в том числе с субпиксельной точностью. Установить их применимость для дифференцируемых и недифференцируемых полей.

5. Разработать устойчивые оценки неизвестного сдвига с помощью модифицированного дискриминатора при любом отношении сигнал/шум. Теоретически и методами статистического моделирования показать эффективность и устойчивость точностных характеристик алгоритмов при любом отношении сигнал/шум.

Методы проведения исследований. При решении поставленных задач использовались основные методы статистической радиофизики, в том числе статистической теории оценок на фоне помех, алгоритм максимального правдоподобия и его реализация в виде дискретных процедур на основе аппроксимаций метода Ньютона – Рафсона, асимптотические методы математического анализа, непараметрические методы

обработки данных и ядерного сглаживания распределений. Теоретический анализ подтвержден моделированием в математических пакетах Mathcad 14, Matlab R2017b. Соответствие теоретических расчетов и результатов статистического моделирования установлено с помощью критериев согласия.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Предложен трехэтапный подход к реализации алгоритма оценки сдвига (положения) фрагментов неоднородного поля. Первый этап включает оценку анизотропии поля, локализацию объекта, предварительную оценку положения и ракурса фрагмента с помощью новых спектральных алгоритмов. На втором этапе вычисляется предварительная оценка положения, например, методами шаблонного поиска. На третьем этапе в качестве устройства, реализующего уточненную оценку сдвига фрагмента поля, предложено использовать дискриминатор, преимуществами которого являются небольшие вычислительные затраты и субпиксельная точность оценки.

2. Предложены новые алгоритмы предобработки и оценки анизотропии полей на основе спектрального подхода, а также комбинированные алгоритмы оценки сдвига с расширенной областью поиска максимума решающей функции, необходимые для повышения эффективности алгоритмов локализации объекта и оценки его положения.

3. Впервые получен аналитический вид распределения статистики на выходе дискриминатора при произвольном отношении сигнал/шум. Показано, что распределение статистики в общем случае является негауссовским с «тяжелыми хвостами». Установлены границы применимости известных подходов по расчету характеристик дискриминаторов.

4. Предложены и исследованы модифицированные на основе робастного подхода дискриминационные алгоритмы, позволяющие получить устойчивые оценки при любом отношении сигнал/шум.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы основана на корректном применении математического аппарата статистической радиофизики, подтверждаются совпадением с удовлетворительным согласованием (по критерию согласия Колмогорова) теоретических результатов и результатов, полученных посредством статистического моделирования и совпадением полученных аналитических результатов и результатов статистического моделирования на ЭВМ с ранее известными в частных случаях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что получено точное решение для распределения статистики на выходе дискриминатора, позволившее установить наличие «тяжелых хвостов» и несостоятельность оценки при небольших отношениях сигнал/шум. Аналитически найдены условия, когда при большом отношении сигнал/шум применима известная гауссовская аппроксимация статистики на выходе дискриминатора. Для практической реализации предложена и исследована возможность применения устройства типа дискриминатор-ограничитель, которое имеет конечные моменты статистики на выходе измерителя. В работе предложены и реализованы эффективные вычислительные алгоритмы предобработки неоднородных полей, основанные на спектральном анализе.

Внедрение научных результатов.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при выполнении ОКР в АО «Концерн «Созвездие».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Синтезированные комбинированные высокоэффективные алгоритмы оценки положения фрагментов неоднородных полей, основанные на применении дискриминаторов, позволяют реализовать оценку с субпиксельной точностью.

2. Предложенные устойчивые неградиентные алгоритмы предобработки полей, основанные на анализе спектральных свойств полей, позволяют локализовать неоднородности, количественно оценить степень анизотропии и ориентацию фрагмента

неоднородного поля, что повышает точность последующих оценок фрагмента неоднородного поля.

3. Анализ теоретического распределения статистики на выходе дискриминатора при произвольном отношении сигнал/шум и статистическое моделирование показывают несостоятельность оценки при малом отношении сигнал/шум: распределение дискриминационной статистики существенно негауссовское и имеет «тяжелые хвосты».

4. Предложенные робастные дискриминационные алгоритмы позволяют получить финитные распределения оценки положения фрагмента неоднородного поля, обеспечивающие состоятельность оценок, характеристики которых установлены теоретически и методами статистического моделирования.

5. При отношении сигнал/шум, меньшем трех, дисперсия модифицированной оценки превышает дисперсию оценки максимального правдоподобия (на ограниченном интервале) не более, чем на 6%, и совпадает с ней при отношении сигнал/шум, большем четырех.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (2017 г.), Радиолокация, навигация, связь (2017 г. – 2020 г.), DSPA-2019: 21-я Международная Конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение».

По итогам МНТК РЛНС-2017 и РЛНС-2019 получен диплом за лучший доклад.

Личный вклад автора. Основной объём работы и ключевые результаты были выполнены и получены автором лично. Формулировка проблематики, постановка задач и обсуждение результатов исследования выполнялись с непосредственным участием научного руководителя. Автором лично были проведены: численное моделирование, написание программ статистического моделирования и обработки изображений в математических пакетах Mathcad15 и Matlab R2017b.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 11 научных работ [1-11], из них 1 в издании, индексированном в базах Web of Science, SCOPUS [1], 4 статьи в рекомендованных ВАК РФ рецензируемых научных изданиях [2-5], 6 статей в трудах международных конференций [6-11].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения по работе, списка литературы. Полный объём диссертации составляет 149 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 147 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, изложены современные направления, перспективы и недостатки имеющихся подходов к решению поставленной задачи. Сформулированы цели и задачи работы. Дана характеристика работы, определены новые научные результаты и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор методов предобработки неоднородных полей (изображений), представленных в цифровом виде: методы гистограммной коррекции, позволяющие повысить качество регистрируемого кадра; ортогональные преобразования, на основе которых реализуется процедура сжатия и восстановления анализируемых кадров; подход к оценке типа анизотропии и ориентации объекта на анализируемом кадре; метрики структурного и спектрального подобия, позволяющие реализовать процедуру автоматического обнаружения изменений на кадрах видеопоследовательности.

Исследованный в диссертации подход к анализу неоднородных полей, позволяет выявить корреляцию поля по координатам (x, y) и путем геометрических преобразований к системе (x', y') устранить ее. Рассмотрен двумерный сигнал $s(x, y)$, $(x, y) \in D$, у которого в общем случае свойства по координатам (x, y) различны. Оценка ориентации фрагмента на двумерном неоднородном поле с учетом представления спектральной плотности в

окрестности максимума выражением $S(\omega_x, \omega_y) \approx S_{00} - 0.5 \cdot (S_{11}\omega_x^2 + S_{22}\omega_y^2 + 2S_{12}\omega_x\omega_y)$ вычисляется следующим образом: $\theta = 0.5 \cdot \arctg\left(\frac{2S_{12}}{S_{11} - S_{12}}\right)$,

где (ω_x, ω_y) - пространственные частоты,

$$S_{11} = \iint X^2 R(X, Y) dXdY, \quad S_{22} = \iint Y^2 R(X, Y) dXdY, \quad S_{12} = \iint XY \cdot R(X, Y) dXdY, \quad (1)$$

$R(X, Y)$ - двумерная автокорреляционная функция (АКФ) сигнала.

В диссертации решена задача оценки ориентации объекта (рис. 1а) на неоднородном цифровом поле (изображении), представленном на рис. 1б. АКФ изображения представлена на рис. 2.



Рис. 1 – а) макроблок анализируемого кадра, содержащий объект, б) анализируемый кадр

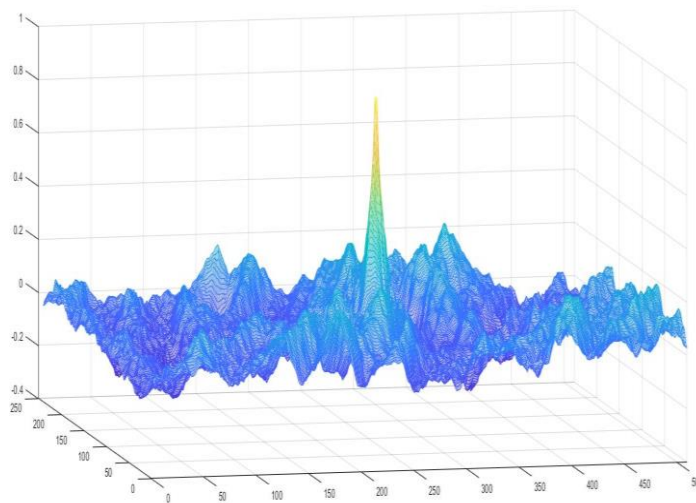


Рис. 2 – АКФ объекта

Для дискретного цифрового сигнала, двумерный спектр которого можно вычислить при разложении, например, по базису дискретного косинусного преобразования (ДКП), в диссертационной работе предложена метрика оценки типа анизотропии:

$$M_E = \frac{H - L}{H + L} \quad (2)$$

где $H = \sum_{k=0}^{N-2} \sum_{m=k+1}^{N-1} C_{km}^2$, $L = \sum_{m=0}^{N-2m+1} \sum_{k=1} C_{km}^2$,

C_{km} - спектральные коэффициенты подблоков изображения,

N - размер подблока изображения.

По значению M_E можно судить о величине и направлении анизотропии. Если $M_E < 0$, то поле анизотропно в вертикальном направлении. Если $M_E > 0$, то поле анизотропно в горизонтальном направлении. В случае если $M_E \approx 0$ поле является изотропным.

В диссертации предложен новый подход к локализации объектов на изображении в условиях априорной неопределенности относительно формы объекта, его пространственной протяженности, ориентации и местоположения, основанный на спектральном анализе неоднородностей. Подход заключается в сравнении статистики

$$S = \lg(H + L), \quad (3)$$

вычисляемой для каждого подблока изображения в спектральной области, с порогом, выбираемым в соответствии с критерием Неймана-Пирсона.

На рис. 3 представлен макроблок анализируемого кадра, а на рис. 4 – результат применения предложенного подхода к локализации объекта.



Рис. 3 – Исследуемое изображение

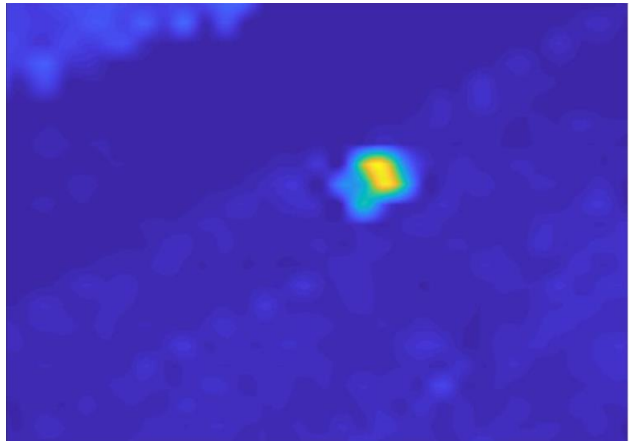


Рис. 4 – Поверхность значений статистики обнаружения неоднородностей на изображении для размера блока ДКП $N=24$

Решение о наличии или отсутствии неоднородностей на изображении принималось на основе сравнения статистики S с порогом, выбранным в соответствии с критерием Неймана-Пирсона. Для этого была построена гистограмма статистики S , рассчитанной для каждого спектрального подблока изображения. Для полученной гистограммы была реализована процедура ядерного сглаживания (непараметрическая оценка плотности вероятностей статистики, представляющая собой непрерывную функцию, полученную по дискретным значениям гистограммы) с гауссовским ядром (рис. 5).

На рис. 6 представлена зависимость вероятности ошибки первого рода от порога, рассчитанной по формуле

$$\alpha(h) = \int_h^{\max(S)} W_\xi(x) dx, \quad (4)$$

где $W_\xi(x)$ - функция, полученная в результате ядерного сглаживания, h - порог обнаружения. Для выбора порога задается некоторая фиксированная вероятность ошибки первого рода, например, 10^{-3} и по графику (рис. 6) находится соответствующее значение порога. Так, для $\alpha = 10^{-3}$ порог $h = 6.4$.

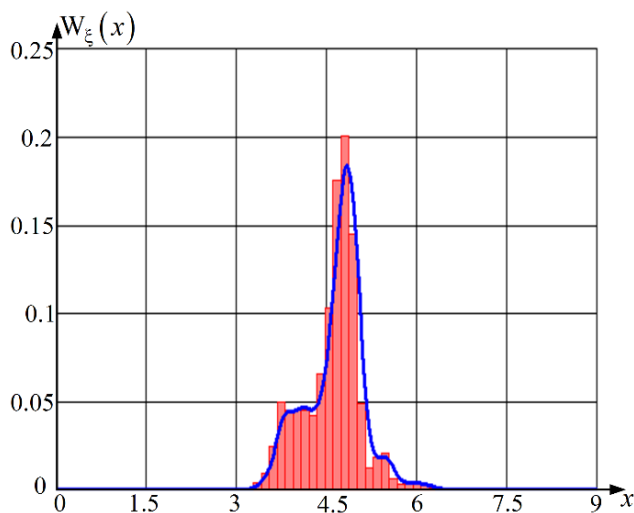


Рис. 5 – Гистограмма изображения и результат ядерного сглаживания

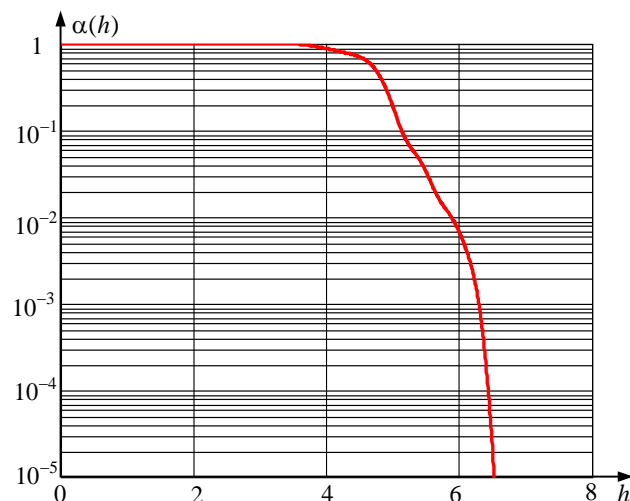


Рис. 6 – Вероятность ошибки первого рода от порога

Во **второй главе** предложен комбинированный подход к оценке сдвига фрагментов полей-изображений.

Оценку местоположения неоднородности поля внутри большой области предложено находить в несколько этапов.

- На первом этапе реализуется локализация области (макроблока), занятой объектом. Если область обработки разбита на блоки, то необходимо указать блоки с сигналом;

- На втором этапе вычисляется предварительная оценка местоположения фрагмента с точностью до одного пикселя дискретного поля. Этот этап целесообразно производить при помощи алгоритмов поиска экстремума некоторой целевой функции;

- На третьем этапе находится оценка координат с субпиксельной точностью.

В диссертации предложены новые подходы к локализации области (макроблока), занятой объектом. При анализе видеопоследовательностей целесообразно применять подход, основанный на вычислении метрик структурного подобия. Для этого предыдущий и исходный кадр разбиваются на квадратные блоки размером $N \times N$. Вычислив метрику разности характеристик поля одинаковых блоков двух кадров, можно обнаружить блоки, в которых произошло изменение. При этом изменением считают плоско-параллельный сдвиг объекта, поскольку большая частота кадров современных систем не позволяет зафиксировать изменение ракурса объекта. Просканировав кадр, можно локализовать макроблок с объектом. В случае анализа единичного кадра, целесообразно применять предложенный в диссертации подход к локализации фрагмента, основанный на спектральном анализе неоднородностей, предполагающий вычисление статистики (3).

На втором этапе для вычисления предварительной оценки с точностью до одного пикселя, в диссертации предложено применять метод шаблонного поиска. Шаботонный поиск может быть реализован как в пространственной области, так и с помощью спектрального анализа блоков.

На третьем этапе поиск оценки сдвига с субпиксельной точностью предложено выполнять с помощью дискриминатора.

Предполагалось, что фрагмент пространственного сигнала в момент t в области Ω_0 (макроблок опорного кадра) задан как двумерное поле вида $s(\vec{r}, t)$, $\vec{r} = (x, y)$. В момент $t + \Delta t$ в подобласти $\Omega \in \Omega_0$ наблюдается поле (анализируемый кадр)

$$\xi(\vec{r}, t + \Delta t) = s(\vec{r}, \vec{l}_0, t) + \eta(\vec{r}), \quad (5)$$

представляющее собой смесь полезного сигнала $s(\vec{r}, \vec{l}_0)$, смещенного на неизвестный вектор $\vec{l}_0 = (l_{0x}, l_{0y})$, и некоррелированной помехи $\eta(\vec{r})$ со спектральной плотностью мощности

$N_0/2$. Введение помехи обусловлено её неотделимостью от оптико-электронного преобразования сигналов и передачи их по каналам связи. В дальнейшем дискретная переменная времени t не фигурирует и может быть опущена.

Для вычисления оценки неизвестного параметра сдвига \vec{l}_0 был применен метод максимального правдоподобия, согласно которому в качестве целевой функции требуется сформировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ЛФОП)

$$M(\vec{l}) = \frac{2}{N_0\Omega} \int \xi(\vec{r}) s(\vec{r}, \vec{l}) d\vec{r} - \frac{1}{N_0\Omega} \int s(\vec{r}, \vec{l}) s(\vec{r}, \vec{l}) d\vec{r}. \quad (6)$$

Разделяя ЛФОП на детерминированную и флуктуационную компоненты, вводя замену $M(\vec{l})/q \rightarrow M(\vec{l})$ и вводя нормировку неизвестного параметра \vec{l} на интервал корреляции (τ_{lx}, τ_{ly}) функции $M(\vec{l})$, функционал отношения правдоподобия (6) принимает следующий вид:

$$M(\vec{\theta}) = qS(\vec{\theta}) + N(\vec{\theta}), \quad (7)$$

где $S(\vec{\theta})$ - нормированная АКФ, $N(\vec{\theta})$ - нормированная шумовая функция с нулевым средним значением и единичной дисперсией, $q^2 = 2E_s/N_0$ - энергетическое отношение сигнал/шум (ОСШ), E_s - энергия сигнала.

Для вычисления неизвестного параметра сдвига \vec{l} в диссертации использована оценка максимального правдоподобия (ОМП). С учетом численного алгоритма Ньютона-Рафсона получено выражение для компонент оценки в виде

$$\theta_{mx} = \theta_{fx} - \left. \frac{d_x(\vec{\theta})d_{yy}(\vec{\theta}) - d_y(\vec{\theta})d_{xy}(\vec{\theta})}{d_{xx}(\vec{\theta})d_{yy}(\vec{\theta}) - (d_{xy}(\vec{\theta}))^2} \right|_{\theta=\theta_f}, \quad \theta_{my} = \theta_{fy} - \left. \frac{d_y(\vec{\theta})d_{xx}(\vec{\theta}) - d_x(\vec{\theta})d_{xy}(\vec{\theta})}{d_{xx}(\vec{\theta})d_{yy}(\vec{\theta}) - (d_{xy}(\vec{\theta}))^2} \right|_{\theta=\theta_f} \quad (8)$$

$$d_x(\vec{\theta}) = \partial M(\vec{\theta}) / \partial \theta_x, \quad d_{xx}(\vec{\theta}) = \partial^2 M(\vec{\theta}) / \partial \theta_x^2,$$

$$\text{где } d_y(\vec{\theta}) = \partial M(\vec{\theta}) / \partial \theta_y, \quad d_{yy}(\vec{\theta}) = \partial^2 M(\vec{\theta}) / \partial \theta_y^2,$$

$$d_{xy}(\vec{\theta}) = \partial^2 M(\vec{\theta}) / (\partial \theta_x \partial \theta_y).$$

В диссертации показано, что для факторизуемых АКФ имеет место следующее равенство: $M(\vec{\theta}) = M(\theta_x)M(\theta_y)$, тогда смешанные производные обращаются в нуль вблизи точки максимума и получаются две отдельные оценки. Если ЛФОП не факторизуется, то отдельные оценки будут квазиоптимальными. В диссертации основные результаты получены для случая факторизуемых АКФ, то есть, реализована отдельная оценка положения фрагмент θ_{mx}, θ_{my} , что имеет место для ряда реальных полей-изображений.

Для сравнения применимости различных вариантов дискриминаторов в диссертации построены детерминированные дискриминационные характеристики (при $q \rightarrow \infty$) конечно-разностного, суммарно-разностного дискриминаторов и дискриминатора с АРУ и показано, что наилучшими характеристиками из указанных обладает суммарно-разностный дискриминатор:

$$\lambda = \kappa \cdot \frac{\left[S(\theta_f + \delta) - S(\theta_f - \delta) \right] + \left[N(\theta_f + \delta) - N(\theta_f - \delta) \right]}{\left[S(\theta_f + \delta) + S(\theta_f - \delta) \right] + \left[N(\theta_f + \delta) + N(\theta_f - \delta) \right]}, \quad (9)$$

где κ – некоторая, константа, не влияющая на вид распределения,
 δ – параметр расстройки,

θ_f – некоторое фиксированное значение, лежащее в окрестности истинного значения.

Результаты, представленные далее, справедливы для всех рассмотренных вариантов дискриминаторов, но конкретизированы для суммарно-разностного дискриминатора.

В **третьей главе** выполнен аналитический расчет вероятностно-статистических характеристик дискриминаторов. Известно, что при анализе дискриминаторов основное внимание уделяется вопросам устойчивости, анализу динамических процессов, особенностям реализации дискриминаторов. При этом предполагается нормальный закон распределения для сигнала рассогласования по параметру, а предельная точность оценки характеризуется границей Крамера – Рао.

В диссертации показано, что для дискриминаторов, реализующих алгоритм обработки в виде отношения двух случайных величин ξ_1 и ξ_2 с гауссовским законом распределения (ньютоновский алгоритм, алгоритмы с АРУ)

$$\lambda = \xi_1 / \xi_2 = \frac{qM_1 + U_1}{qM_2 + U_2}, \quad (10)$$

где $U_1 \sim N(0, D_1)$, $U_2 \sim N(0, D_2)$ - гауссовские случайные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями равными соответственно D_1 и D_2 , M_1, M_2 – детерминированные компоненты числителя и знаменателя, зависящие от значений сигнальной функции или ее первых двух производных, D_1, D_2 – дисперсии случайных компонент U_1, U_2 , зависящие от значений сигнальной функции или ее первых двух производных, гауссовская аппроксимация сигнала рассогласования может быть неприменима при конечных ОСШ, что приводит к неустойчивой оценке неизвестного параметра.

В диссертации получено точное распределение для процесса на выходе дискриминатора и определено условие сходимости этого распределения к нормальному, то есть то значение ОСШ, при котором справедливо допущение о гауссовском законе распределения дискриминационной статистики. Кроме того, показана неприменимость классических характеристик оценки - смещения и рассеяния при малых значениях параметра ОСШ.

Плотность вероятностей статистики λ получается на основе распределения частного двух случайных гауссовских величин (10):

$$W(\lambda, q) = \frac{\sqrt{\mu}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |t| \exp \left\{ - \frac{[(t - q\chi)^2 + \mu(\lambda t - q\chi\lambda_0)^2]}{2} \right\} dt, \quad (11)$$

где введены следующие обозначения $t = \frac{\xi_2}{\sqrt{D_2}}$, $\mu = \frac{D_2}{D_1}$, $\chi = \frac{M_2}{\sqrt{D_2}}$, $\frac{M_1}{M_2} = \lambda_0$, $\frac{M_1}{\sqrt{D_2}} = \frac{M_1}{M_2} \frac{M_2}{\sqrt{D_2}} = \chi\lambda_0$.

Для распределения (11) в диссертации получен явный аналитический вид в двух случаях: ОСШ $q=0$ и $q \gg 1$. Первый случай соответствует распределению Коши:

$$W(\lambda, q=0) = \frac{\sqrt{\mu}}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + \mu\lambda^2}. \quad (12)$$

Во втором случае после асимптотического интегрирования по методу Лапласа получено выражение:

$$W(\lambda, q) = \frac{\sqrt{\mu} q \chi}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{|1 + \mu\lambda\lambda_0|}{(1 + \mu\lambda^2)^{3/2}} \cdot \exp \left(- \frac{1}{2} q^2 \chi^2 \frac{\mu(\lambda - \lambda_0)^2}{1 + \mu\lambda^2} \right). \quad (13)$$

В диссертации показано, что при конечном ОСШ распределение дискриминационной статистики λ является существенно негауссовским и имеет «тяжелые хвосты».

В частном случае, когда $\theta_f = 0$, а, следовательно, и значение $M_1 = 0$, плотность вероятностей λ может представлена в виде:

$$W(\lambda, q) = \frac{\sqrt{\mu}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} t \exp\left\{-\frac{[(t-q\chi)^2 + \mu(\lambda t)^2]}{2}\right\} dt. \quad (14)$$

При $q \gg 1$ (то есть $\mu\lambda^2 \ll 1$) имеют место следующие равенства

$$\exp\left(-\frac{1}{2}q^2\chi^2 \cdot \frac{\mu\lambda^2}{1+\mu\lambda^2}\right) \approx \exp\left(-\frac{1}{2}\chi^2 q^2 \mu\lambda^2\right), \quad \frac{\chi}{(1+\mu\lambda^2)^{3/2}} \approx \chi \rightarrow const. \quad (15)$$

С учетом (15) распределение стремится к нормальному:

$$W(\lambda, q) = \frac{\sqrt{\mu} q \chi}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}q^2\chi^2 \mu\lambda^2\right). \quad (16)$$

с дисперсией $\sigma_\lambda^2 = 1/q^2\chi^2\mu$, а поведение хвостов распределения при $\mu\lambda^2 \gg 1$ определяется следующим выражением

$$W(\lambda) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi}} \frac{q\chi}{(1+\mu\lambda^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{q^2\chi^2}{2} \cdot \frac{\mu\lambda^2}{1+\mu\lambda^2}\right). \quad (17)$$

Как следует из (17), выражение имеет два множителя: первый характеризует «хвосты» распределения, а второй, содержащий экспоненту, характеризует центральную часть распределения.

На рис. 7 сплошной линией представлено теоретическое распределение дискриминационной статистики с параметром $q=3$ и параметром рассогласования $\theta_f \neq 0$.

Точками представлено эмпирическое распределение (ядерная оценка с гауссовским ядром), построенное для верификации результатов моделирования по выборке объемом $n=3000$ статистики λ . Из рис. 7 видно, что теоретическое и экспериментальное распределения имеют хорошее соответствие, однако для

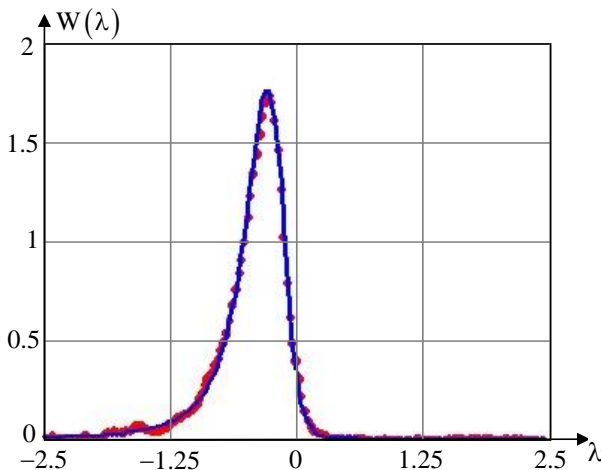


Рис. 7 - Теоретическая (сплошная линия) и эмпирическая плотность вероятности

количественного критерия был применен критерий согласия Колмогорова, который установил согласие гипотезы о соответствии эмпирического и теоретического распределений (при $\alpha \leq 0.1$).

В диссертации показано, что распределение дискриминационной статистики при малом значении ОСШ (негауссовское распределение с «тяжелыми хвостами») делает невозможным применение обычных характеристик – смещения и рассеяния для определения точности оценки параметра. Вместо выборочного среднего целесообразно использовать медиану выборки, а вместо дисперсии – медианный квадрат оценки – непараметрический аналог дисперсии, определяемый соотношением $mediana\left[(\lambda_i - mediana(\lambda_i))^2\right]$.

Так, на рис. 8 точками приведены результаты моделирования зависимости дисперсии $D(q)$ оценки λ от ОСШ. Здесь же сплошной линией показана граница Крамера–Рао $D_m(q)$. На рис. 9 точками приведена зависимость смещения оценки, полученной с помощью дискриминатора $M(q)$ от отношения сигнал/шум для значения параметра рассогласования $\theta_f = 0$, а ромбиками – поведение медианы $ME(q)$.

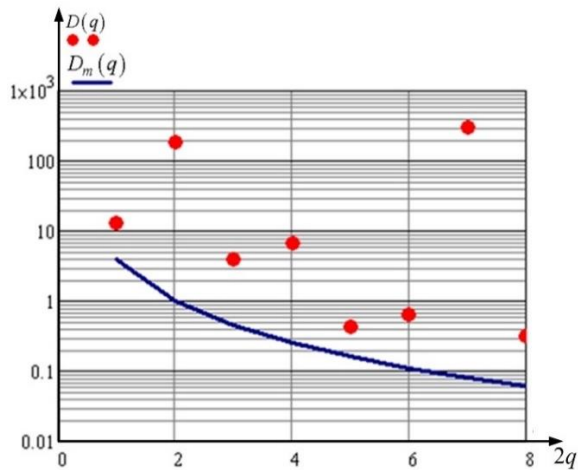


Рис. 8 - Выборочная дисперсия оценки и граница Крамера-Рао $D_m(q)$

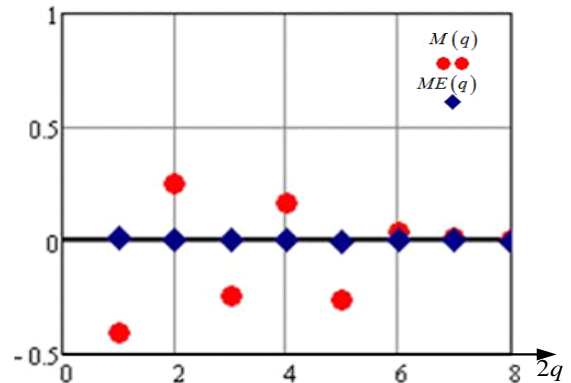


Рис. 9 – Выборочное среднее оценки $M(q)$ и выборочная медиана $ME(q)$

В диссертации показано, что можно перейти от повернутого изображения объекта к виду с необходимым ракурсом. При этом можно привести АКФ к виду $S(\theta_x, \theta_y) \approx S(\theta_x) \cdot S(\theta_y)$ для широкого класса изображений. В таком случае оценку можно производить отдельно по координатам. Так, если в качестве эталонной оценки взять ОМП, тогда используя численный алгоритм Ньютона – Рафсона, можно записать выражение для оценки в виде (8).

Применение суммарно-разностного алгоритма по дискретному изображению позволило при отсутствии шумов получить ошибку оценки порядка $10^{-2} - 10^{-3}$, в то время как поиск максимума по дискретной сетке дает точность оценки в 1 пиксель. На рис. 10 представлены модельные АКФ: рис. 10а – соответствует дифференцируемой модели АКФ, а рис. 10б – недифференцируемой. Здесь точками отмечена оценка, полученная с помощью дискриминатора. Истинное значение практически (с точностью до сотых) совпадает с оценкой. Установлено, что для недифференцируемой модели АКФ (рис. 10б) межпиксельная интерполяция не повышает точности оценки.

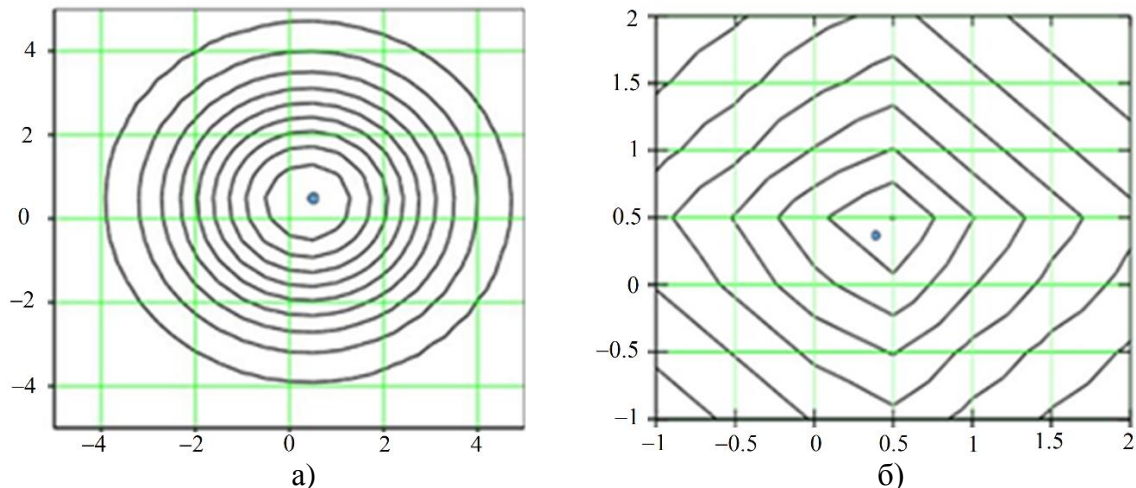


Рис. 10 – Контурные сечения АКФ

В **четвертой главе** предложено на выходе дискриминатора применять нелинейное преобразование с целью подавления экстремально больших выбросов дискриминационной статистики. Идея применения таких нелинейных преобразований взята из теории робастных алгоритмов. Для корректного применения таких алгоритмов, в диссертации приведен анализ поведения вероятности выхода статистики за пределы $[-h, h]$. Влияние «хвостов» распределения $W(\lambda, q)$ дискриминационной статистики при малом отношении сигнал/шум и гауссовского распределения оценки максимального правдоподобия $W_{ml}(\lambda, q)$ исследовано

при помощи анализа вероятностей $P(h,q)$ и $P_{ml}(h,q)$ невыхода за пределы $[-h,h]$, которые вычисляются по следующим формулам:

$$P(h,q) = \int_{-h}^h W(\lambda,q) d\lambda, \quad P_{ml}(h,q) = \int_{-h}^h W_{ml}(\lambda,q) d\lambda. \quad (18)$$

На рис. 11 приведены вероятности выхода значений статистики за пределы $[-h,h]$: $1-P(h,q)$ сплошной линией для дискриминационной статистики при малом отношении сигнал/шум ($q=2$) и $1-P_{ml}(h,q)$ - штриховой линией для статистики, имеющей гауссовское распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой в соответствии с неравенством Крамера-Рао.

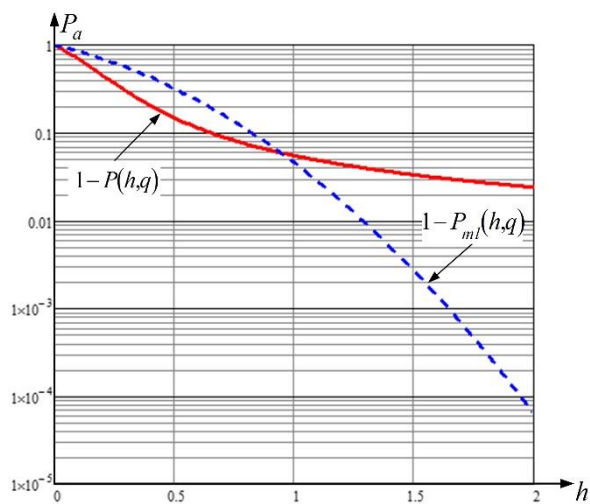


Рис. 11 – Вероятность anomalно больших выбросов

Из рис. 11 видно, что при малых h поведение вероятности $P(h,q)$ определяется центральной частью распределения, а при больших значениях h - «тяжелыми хвостами». Так, например, при параметре ОСШ $q=2$ условная граница изменения характера зависимости, находится в окрестности $h=1.2 \div 1.5$. Из сравнения кривых на рис. 11 получен вывод, что вероятность

аномально больших выбросов $P_a = \begin{cases} 1-P(h,q) \\ 1-P_{ml}(h,q) \end{cases}$

для дискриминационной статистики на несколько порядков больше, чем для гауссовской модели.

В таблице 1 кратко изложены основные результаты, полученные в диссертации для ограничителей в виде нелинейных функций Тьюки, Хьюбера и Хампеля, предложенных для подавления «тяжелых хвостов» распределения дискриминационной статистики. Показано, что М-оценка Тьюки обеспечивает наименьшую выборочную дисперсию, однако отбрасывание

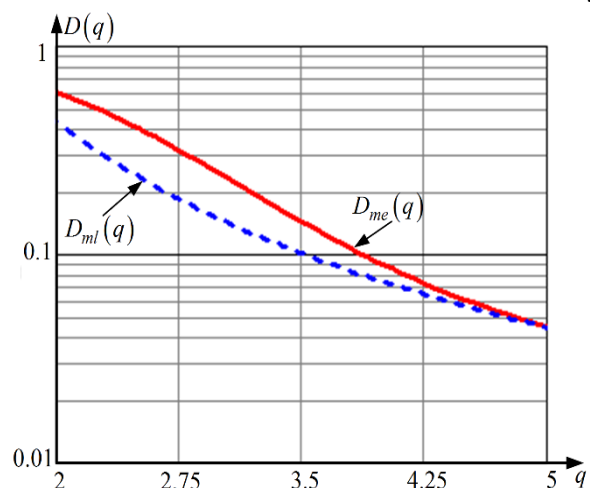


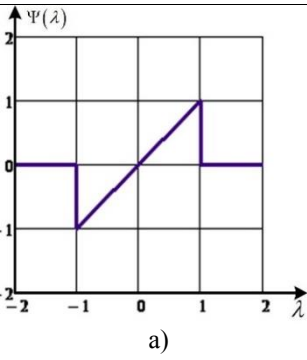
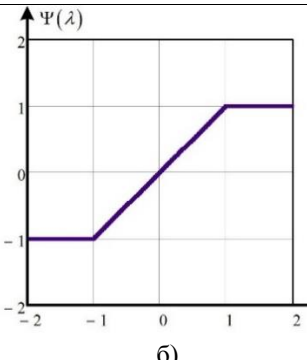
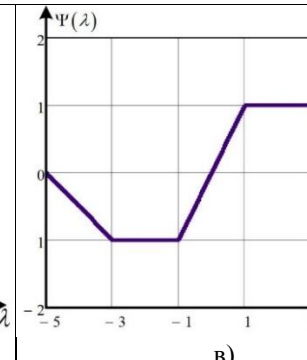
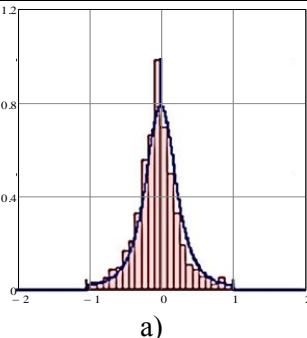
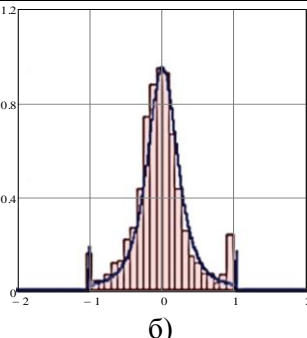
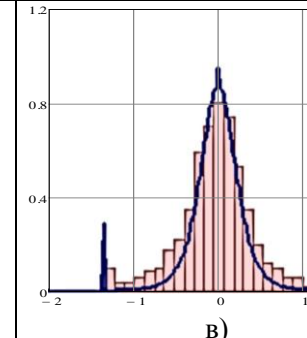
Рис. 12 – Зависимость дисперсии модифицированной оценки и ОМП от отношения сигнал/шум

части значений сигнала рассогласования отсекает не anomalные ошибки, а искажает саму оценку параметра на выходе дискриминатора. Оценочная функция Хампеля наиболее мягко подавляет большие значения сигнала рассогласования. Показана высокая эффективность применения рассмотренных робастных алгоритмов, предназначенных для «отсечения» anomalных ошибок, для задачи оценки неизвестного параметра с помощью измерителя типа дискриминатор, который в случае малого отношения сигнал/шум, дает оценку с существенно негауссовским законом распределения.

Для сравнения эффективности оценки, полученной с помощью устройства типа дискриминатор-ограничитель с нелинейностью в м априорном интервале при малом ОСШ было которое показало, что при отношении сигнал/шум, ной оценки D_{me} превышает дисперсию оценки раниченном интервале) не более, чем на 6%, и совпадает с ней при отношении сигнал/шум, большем четырех. Так, на рис. 12 представлена

зависимость дисперсии оценки на выходе устройства типа дискриминатор-ограничитель и ОМП от отношения сигнал/шум.

Таблица 1 – Основные характеристики нелинейностей в виде функции Тьюки, Хьюбера и Хампеля

Оценочная М-функция	Тьюки	Хьюбер	Хампель
Аналитическая запись нелинейного преобразования	Пусть случайная величина λ поступает на ограничитель с характеристикой $\Psi(\lambda)$		
	$\Psi(\lambda) = \begin{cases} \lambda, & \lambda < a \\ 0, & \lambda > a \end{cases},$ $a=1$	$\Psi(\lambda) = \begin{cases} a, & \lambda \geq a \\ \lambda, & \lambda < a \\ -a, & \lambda \leq -a \end{cases},$ $a=1.$	$\Psi(\lambda) = -\Psi(-\lambda) = \begin{cases} \lambda, & 0 < \lambda \leq a \\ a, & a < \lambda \leq b \\ a \cdot \frac{c-\lambda}{c-b}, & b < \lambda \leq c \\ 0, & c < \lambda \end{cases},$ $a=1, b=3, c=5$
Плотность распределения вероятностей дискриминационной статистики	$W_{\eta}(u) = (P^+ + P^-)\delta(u) + I(u < a)W_{\lambda}(u),$	$W_{\eta}(u) = P^-\delta(u+a) + P^+\delta(u-a) + I(u/a)W_{\lambda}(u),$	$W_{\eta}(u) = (P_c^+ + P_c^-)\delta(u) + (P_{ab}^+\delta(u-a) + P_{ab}^-\delta(u+a)) + I(b < u < c)\frac{c-b}{a}W_{\lambda}(c - \frac{u}{a}(c-b)) + I(-c < u < -b)\frac{ c-b }{a}W_{\lambda}(-c - \frac{u}{a}(c-b)) + I(u/a)W_{\lambda}(u)$
	<p>где $I(z) = \begin{cases} 1, & z < 1 \\ 0, & z \geq 1 \end{cases}$ – индикаторная функция, $\delta(u)$ - дельта функция, $P^+ = \int_a^{\infty} W_{\lambda}(u)du$, $P^- = \int_{-\infty}^{-a} W_{\lambda}(u)du$, $P_c^+ = \int_c^{\infty} W_{\lambda}(u)du$, $P_c^- = \int_{-\infty}^{-c} W_{\lambda}(u)du$, $P_{ab}^+ = \int_a^b W_{\lambda}(u)du$, $P_{ab}^- = \int_{-b}^{-a} W_{\lambda}(u)du$.</p>		
Рис. 13 – Оценочная М-функция а) Тьюки, б) Хьюбера, в) Хампеля			
Рис. 14 - Теоретическое распределение (сплошной линией) и гистограмма М-оценок: а) Тьюки, б) Хьюбера, в) Хампеля			
Выборочная дисперсия	0.086	0.137	0.125
Теоретическая дисперсия	0.083	0.139	0.125

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Предложен комбинированный метод оценки сдвига фрагмента поля, основанный на локализации неоднородности, применении алгоритмов первоначального шаблонного поиска сдвига в расширенной области и последующей точной (в том числе субпиксельной) оценки с помощью дискриминаторов.

2. Предложен новый метод оценки анизотропии поля, локализации объекта, предварительной оценки положения и ракурса фрагмента с помощью новых спектральных алгоритмов, лишенный недостатков существующих подходов, реализующих процедуру дифференцирования полей. Анализ анизотропии позволяет повысить точность последующего оценивания неизвестного сдвига фрагмента.

3. Предложено использовать дискриминаторы для оценки сдвига фрагмента зарегистрированного поля с небольшими вычислительными затратами и возможностью измерять субпиксельные сдвиги. Проведено исследование методами математического моделирования дискриминационных и комбинированных алгоритмов оценки сдвига фрагмента, в том числе с субпиксельной точностью.

4. Впервые получен аналитический вид распределения статистики на выходе дискриминатора при произвольном отношении сигнал/шум. Показано, что при малом отношении сигнал/шум статистика является существенно негауссовской и имеет «тяжелые хвосты» распределения. Это приводит к несостоятельности полученной оценки и отсутствию моментов распределения. Установлено значение отношения сигнал/шум, при котором распределение статистики можно считать асимптотически гауссовским. Методами статистического моделирования подтверждено соответствие теоретических и экспериментальных распределений дискриминационной статистики для произвольного отношения сигнал/шум.

5. Предложены и исследованы устойчивые оценки для статистики на выходе дискриминатора, полученные путем добавления кусочно-линейных преобразований выходного сигнала дискриминатора. Для некоторых типов нелинейностей – Тьюки, Хьюбера, Хампеля, получены аналитические распределения модифицированных оценок, обеспечивающих конечность их моментов. Статистическое моделирование модифицированных оценок показало соответствие их теоретических и экспериментальных характеристик: среднего, дисперсии.

Публикации по теме диссертации

Публикация в издании, индексируемом в базах Web of Science, SCOPUS

1. Radchenko Yu.S., Masharova O.A. New methods of forming and measurement of sub-pixel shift of digital images / Yu.S. Radchenko, O.A. Masharova // Computer vision in advanced control systems. Intelligent System Reference Library. – 2019. – V.182. – P. 7-24.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Машарова О.А., Радченко Ю.С. О законе распределения сигналов рассогласования некоторых типов дискриминаторов / О.А. Машарова, Ю.С. Радченко // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6, № 2 (24). – С. 90-97.

3. Машарова О.А., Радченко Ю.С. Статистический анализ устойчивых оценок параметров в измерителях типа дискриминатор / О.А. Машарова, Ю.С. Радченко // Физические основы приборостроения. – 2018. – Т.7. – № 3(29). – С. 78-85.

4. Радченко Ю.С., Машарова О.А. Характеристики двумерной оценки положения фрагмента изображения на основе алгоритма Ньютона-Рафсона / Ю.С. Радченко, О.А. Машарова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. – № 4. – С. 140-146.

5. Серебрянникова О.А. Спектрально-энергетические и вероятностные характеристики анизотропии изображений / О.А. Серебрянникова // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 3. – С. 53-61.

Публикации в сборниках международных конференций

6. Машарова О.А., Радченко Ю.С. Алгоритм субпиксельного сдвига изображений и способ оценки такого сдвига / О.А. Машарова, Ю.С. Радченко // Сборник трудов 21-ой Международной Конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение». – 2019. – С. 413-417.
7. Радченко Ю.С., Машарова О.А. Вероятностные характеристики сигналов рассогласования некоторых типов дискриминаторов / Ю.С. Радченко, О.А. Машарова // Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2017. – Т.3. – С. 1001-1007.
8. Радченко Ю.С., Машарова О.А. Исследование оценки положения фрагмента изображения в измерителях типа дискриминатор-ограничитель / Ю.С. Радченко, О.А. Машарова // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2018. – Т.1. – С. 89-99.
9. Машарова О.А., Радченко Ю.С. О некоторых способах оценки анизотропии изображений / О.А. Машарова, Ю.С. Радченко // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2019. – Т.2. – С. 181-189.
10. Серебрянникова О.А., Радченко Ю.С. Комбинированный метод высокоточной оценки положения объекта в кадре изображения / О.А. Серебрянникова, Ю.С. Радченко // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2020. – Т.2. – С. 136-145.
11. Радченко Ю.С., Машарова О.А. Статистический анализ характеристик сигналов рассогласования некоторых типов дискриминаторов / Ю.С. Радченко, О.А. Машарова // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2017. – № 7. – С. 416-422.