

На правах рукописи

Стариков Ростислав Сергеевич

**КОГЕРЕНТНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ С ДИСКРЕТНЫМИ КАНАЛАМИ ДАННЫХ**

01.04.21 - лазерная физика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Автор



Москва 2011

Работа выполнена в Национальном Исследовательском Ядерном Университете
«МИФИ»

Официальные оппоненты

академик РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Гуляев Юрий Васильевич

член-корр. РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Кульчин Юрий Николаевич

доктор физико-математических наук,
профессор Компанец Игорь Николаевич

Ведущая организация

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного
технического университета имени Н.Э. Баумана

Защита диссертации состоится 22 июня 2011 года в 14час.00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.130.05 при Национальном Исследовательском
Ядерном Университете МИФИ по адресу 115409, Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «20» мая 2011г

Секретарь Диссертационного совета



Евсеев И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Использование оптических и оптоэлектронных средств при построении систем обработки информации привлекательно благодаря принципиальной возможности достижения чрезвычайно высоких скоростей обработки информации в оптике. Современный прогресс элементной базы, характеристики которой в последнее десятилетие достигли уровня адекватного или почти адекватного требованиям, возникающим при создании оптических средств обработки информации, делает реальностью как появление коммерческих и «продвинутых» экспериментальных образцов оптических процессоров, так и формирование новых направлений разработки оптических устройств обработки информации. Как отмечено уже в ранних исследованиях по оптической обработке информации, возможность достижения высоких скоростей проведения вычислений в оптике обусловлена, прежде всего, параллелизмом действия оптических систем. Наиболее перспективные типы вычислений, реализуемые в оптике и в полной мере использующие её возможности, базируются на двух типах вычислительных операций: двумерном преобразовании Фурье в дифракционной оптической системе и поэлементном перемножении массивов данных в проецирующей оптической системе; в системах обоих указанных типов наибольшие информационные возможности открывает применение когерентного лазерного излучения. Важнейшей чертой элементной базы новейших поколений, отвечающей как параллелизму оптических систем, так и современным формам представления информации, является рост числа дискретных информационных каналов в оптических и оптоэлектронных устройствах: увеличение числа индивидуально управляемых элементов в интегральных наборах излучателей, отсчётов пространственно-временных модуляторов света и детекторов изображений и т.д. Одновременно, рост возможностей цифровой электроники по управлению световыми сигналами и их использованию привёл к фактическому формированию в последнее десятилетие целых классов оптико-цифровых систем, сочетающих достоинства оптики и цифровой электроники. В нынешних технологических пределах оптические устройства обработки информации могут обладать малой энергоёмкостью работы - до $1,5 \times 10^{-6}$ Ватт на переключение, а

также теоретически чрезвычайно высоким быстродействием - до 10^{15} вычислительных операций в секунду или до сотен терабайт в секунду пропускной способности. Именно эти факты определяют растущий интерес исследователей, разработчиков и производителей к оптоэлектронным устройствам обработки информации. Среди развивающихся направлений оптической обработки информации следует отметить во первых радиооптические и другие средства аналоговой и аналого-цифровой обработки сигналов, во вторых специализированные аналого-цифровые матричные процессоры, Фурье процессоры и корреляторы изображений, а также, в третьих, средства коммутации и поддержки для высокопроизводительных цифровых вычислительных систем. На настоящий момент последнее из перечисленных направлений находится в стадии определения методов, средств и технологий реализации, второе находится на уровне технологических исследований и появления практических образцов, в рамках первого получены применяющиеся практические результаты. Исследования по оптической обработке информации ведутся в наиболее развитых странах с возрастающей интенсивностью. В этой связи необходимо отметить, прежде всего, соответствующие работы в крупнейших технологических и исследовательских центрах США и Японии, некоторые проекты КНР и Индии, а также ряд проектов стран Евросоюза. В частности, в США работы в области фотоники ведутся такими организациями, как Los Alamos National Laboratory, Jet Propulsion Laboratory, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), в ряде ведущих университетов, IBM, Intel, и др. Как показывает сложившаяся реальная практика, принципиальным фактором развития оптоэлектронных устройств нынешнего и следующих поколений является увеличение числа одновременно работающих дискретных каналов приёма, обработки и передачи данных, использующих когерентное лазерное излучение; разработка таких устройств является актуальной задачей науки и практики.

Учитывая вышесказанное, **целью работы** являлись разработка и обоснование принципов построения эффективных оптоэлектронных устройств обработки массивов дискретных данных на основе применения методов дифракционной

оптики, компьютерной голографии и цифровой оптоэлектроники, а также определение условий и методов применения таких устройств в цифровых системах обработки информации.

К основным **задачам** работы относятся:

1. разработка и экспериментальное обоснование принципов реализации специализированных оптико-электронных процессоров, позволяющих осуществлять как аналоговую, так и цифровую обработку массивов дискретных данных;
2. анализ схемотехнических возможностей и принципиальных ограничений применения специализированных оптико-электронных процессоров в цифровых системах обработки информации;
3. исследование и анализ возможностей и способов реализации схемотехнически эффективных оптоэлектронных матричных процессоров, в том числе процессоров для операций линейной алгебры;
4. анализ возможностей и разработка методов построения оптико-цифровых дифракционных лазерных систем распознавания изображений реального времени;
5. анализ возможностей и разработка способов достижения инвариантности распознавания изображений в оптико-электронных системах, выполняющих измерение информативных признаков изображений или осуществляющих их корреляционную обработку.

Изложенные в диссертации теоретические и экспериментальные результаты отличаются от других исследований в этой области следующими положениями, определяющими **научную новизну**:

1. Показано, что широкий класс современных задач обработки информации может быть успешно решен при применении оптоэлектронных методов, базирующихся на использовании когерентного лазерного излучения. Показано, что основной перспективой вычислительных оптоэлектронных устройств на настоящем этапе является достижение скорости вычислений до 10^{12} - 10^{14} операций в секунду или пропускной способности до сотен терабайт в секунду.
2. Проведён анализ схемотехнических ограничений возможных скоростных и точностных параметров оптоэлектронных вектор-матричных перемножителей.

Доказано, что наиболее перспективной схемой оптоэлектронных вектор-матричных перемножителей при их использовании в качестве элемента цифровой вычислительной системы является схема с временным интегрированием.

3. Разработаны и обоснованы теоретически и экспериментально методы реализации оптических процессоров обработки массивов дискретных данных в виде гибридных микросхем и микромодулей. Предложен ряд архитектур гибридных микросхем и микромодулей, соответствующих различным вычислительным задачам.

4. С учётом возможностей современной элементной базы определены оптимальные варианты возможных схем инвариантной обработки изображений, использующие методы когерентной Фурье оптики и компьютерной голографии. Определены принципиальные ограничения таких схем.

5. Впервые предложен и экспериментально апробирован метод повышения точности измерения инвариантных признаков изображений в когерентной дифракционной оптико-цифровой системе. Теоретически показана и экспериментально продемонстрирована возможность достижения точности измерений инвариантных признаков до 14 бит и выше.

6. Сформулированы методики применения инвариантных корреляционных фильтров в условиях конкретных постановок задачи корреляционного распознавания изображений.

7. Впервые предложен и экспериментально продемонстрирован метод реализации инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в виде синтезированных амплитудных дифракционных элементов в когерентных дифракционных корреляторах изображений.

Практическое значение результатов состоит в том, что они служат теоретической, и экспериментальной базой для разработки и эффективного применения оптоэлектронных средств обработки информации в современных цифровых вычислительных системах. Методика построения оптоэлектронных матричных процессоров и схемотехнические принципы их реализации могут быть использованы при построении специализированных процессоров обработки сигналов, изображений и массивов дискретных данных со скоростью вычислений

до 10^{12} операций с целыми числами в секунду при цифровой точности 16 бит, и до 10^{13} операций с целыми числами в секунду при цифровой точности результата 7-8 бит. Принципы построения лазерных систем распознавания изображений, основанных на выделении инвариантных признаков с использованием методов Фурье оптики и нейросетевых алгоритмов предназначены для разработки и построения систем распознавания реального времени. Способ повышения точности результата измерений до 14 бит и выше в когерентной оптико-цифровой системе измерения инвариантных признаков пространственного спектра интенсивности изображений может применяться при построении систем распознавания изображений реального времени. Методики применения инвариантных корреляционных фильтров в системах оптико-электронного корреляционного распознавания изображений предназначены для использования при построении оптико-электронных систем распознавания изображений, базирующихся как на электронных цифровых, так и на лазерных дифракционных корреляторах изображений. Метод реализации инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в виде синтезированных амплитудных или фазовых дифракционных элементов (голографических фильтров), охраняемый в режиме коммерческой тайны в НИЯУ МИФИ, может применяться при создании инвариантных лазерных корреляторов с эквивалентным быстродействием до 10^{13} операций с целыми числами в секунду, в том числе в условиях ограничения динамического диапазона модуляции используемых для ввода фильтров голографических носителей.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика построения схемотехнически эффективных лазерных оптоэлектронных процессоров для операций линейной алгебры. Разработка и экспериментальное обоснование методов реализации специализированных процессоров в виде гибридных микросхем и микромодулей с послойной структурой организации. Экспериментальное обоснование возможности создания лазерных вектор-матричных перемножителей со скоростью вычислений до 10^{12} операций с целыми числами в секунду при цифровой точности 16 бит, и со

скоростью вычислений до 5×10^{13} операций с целыми числами в секунду при цифровой точности результата 7-8 бит.

2. Принципы построения лазерных систем распознавания изображений в реальном времени, основанных на выделении инвариантных признаков с использованием средств Фурье оптики и нейросетевых алгоритмов. Разработка и экспериментальная демонстрация способа повышения точности результата измерений до 14 бит и выше в когерентной дифракционной оптико-цифровой системе измерения инвариантных признаков пространственного спектра интенсивности изображений.

3. Методы применения инвариантных корреляционных фильтров в системах оптико-электронного корреляционного распознавания изображений, базирующихся как на электронных цифровых, так и на лазерных дифракционных корреляторах в условиях конкретных постановок задачи корреляционного распознавания изображений.

4. Способ реализации инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в виде синтезированных дифракционных элементов (голографических фильтров) в схемах лазерных корреляторов изображений.

5. Экспериментальная демонстрация реализации инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схемах когерентных дифракционных корреляторов, в том числе при использовании для ввода фильтров голографических носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции.

Данные положения определяют методы создания оптико-электронных систем обработки информации, позволяющие осуществлять как аналоговую, так и цифровую обработку массивов дискретных данных, в том числе специализированных оптоэлектронных матричных процессоров, когерентных систем измерения инвариантных признаков изображений, лазерных процессоров корреляционного распознавания изображений.

Апробация работы. Результаты работ докладывались: на международных конференциях «Аэрокосмические датчики» (Орландо, США, 1995, 1996 гг), на

международной конференции по фотонике и машинному зрению (Провиденс, США, 2003г), на международных конференциях «Фундаментальные проблемы опто- и микроэлектроники» (Хабаровск, 2004г, Харбин, КНР, 2006г), на международном конгрессе по оптическим вычислениям (Эдинбург, Великобритания, 1994г), на международной конференции «Оптическая память и нейронные сети» (Москва, 1995г), на международной конференции по оптической обработке информации (С.-Пб., 1996г), на всероссийских конференциях «Научная сессия МИФИ» (Москва, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 гг), на международной конференции «Оборона и безопасность» (Орlando, США, 2008, 2009 гг), на международной конференции по голографии (Прага, Чехия, 2009г), на международной конференции «Оборона и безопасность. Европа» (Тулуза, Франция, 2010г), на международной конференции «Голография Экспо» (Москва, 2010г), на международном конгрессе «Фундаментальные проблемы оптики - Оптика XXI век» (С.-Пб., 2006г, 2010г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 88 работ, из них 14 статей в реферируемых журналах рекомендованных ВАК, 24 статьи в сборниках и других изданиях, 50 тезисов в материалах научных конференций.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, их анализе и решении, обобщении полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 313 названий. Она изложена на 207 страницах, содержит 121 рисунок и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе первой приведён обзор литературы, представлены результаты анализа современного состояния элементной базы оптоэлектронных систем обработки информации и рассмотрены принципы их построения. Отмечено, что отличительной чертой современной вычислительной оптоэлектроники стала

интеграция оптоэлектронных информационных средств в электронные цифровые вычислительные системы.

В оптических системах двумерный оптический сигнал формируется устройствами ввода, актуальные реализации которых (массивы источников света и пространственно-временные модуляторы света) в качестве фундаментального принципа построения и функционирования предполагают параллельное использование независимо управляемых каналов. Аналогично, детектирование светового сигнала осуществляется в настоящее время с применением матричных детекторов изображений, при этом соответствующие электрические сигналы формируются параллельно функционирующими элементами таких детекторов. Таким образом, естественным способом описания работы рассматриваемых систем является их описание как совокупности независимых или связанных, действующих параллельно пространственно-дискретных каналов передачи/обработки сигнала. С точки зрения оптики, такой подход не противоречит ни геометрооптическому, ни дифракционному описанию оптических систем, кроме того, очевидно его соответствие описанию их действия с использованием широко применяемой теории линейных систем [1]. При расчёте аппаратные функции и отклики таких элементов и систем на их основе в целом могут быть удобно описаны с помощью аппарата обобщённых функций стандартным образом. В связи с этим, в диссертации в большей степени уделяется внимание описанию действия рассматриваемых систем исходя из вида производимых ими вычислительных операций.

Существенный прогресс элементной базы, в том числе интегральных массивов лазеров, пространственно-временных модуляторов, фотодетекторов и детекторов изображений, обеспечивает возможности увеличения числа дискретных каналов обработки оптического сигнала с целью достижения массивованного параллелизма. Отмечено, что в настоящее время при разработке оптических вычислителей возможны как адаптация существующей элементной базы, так и специальная разработка элементов с требуемой функциональностью. Основными нишами применения оптоэлектронных вычислительных устройств являются: 1) использование их в качестве специализированных вычислительных средств в составе цифровых систем в качестве процессоров-ускорителей, 2) использование

их в качестве средств поддержки в высокопараллельных вычислительных системах, фактически роль шины данных, возможно выполняющей часть обработки. В первом случае уже сейчас можно рассчитывать на создание относительно простых и недорогих устройств, с некоторой степенью миниатюризации. Во втором случае, в настоящий момент, можно говорить об уникальности применения и некоторой определенности в выборе архитектур и типа элементной базы. Основной перспективой информационных оптоэлектронных устройств на настоящем этапе является достижение скорости вычислений до 10^{13} - 10^{14} вычислительных операций в секунду или пропускной способности до сотен терабайт в секунду.

Во второй главе рассмотрены принципы построения лазерных оптоэлектронных матричных процессоров (ОМП). Отмечено, что на нынешнем этапе создание конкурентоспособных оптоэлектронных матричных процессоров сталкивается главным образом со сложностью их интеграции в цифровые вычислительные системы, а наиболее существенными проблемами в этом плане являются высокие значения коэффициентов разветвления и необходимость аппаратных и вычислительных затрат для постобработки результата вычислений. Конкурентоспособность оптоэлектронных матричных процессоров по сравнению с другими вычислительными средствами определяется: вычислительными параметрами и схемотехническими параметрами. К первым относятся быстродействие, точность вычислений, энергетическая эффективность. Ко вторым относятся параметры, определяющие технические требования, предъявляемые процессором к другим узлам вычислительной системы - объём и точность предобработки, объём и точность постобработки, характеризующиеся также отношением Псалтиса, а также коэффициенты разветвления.

Анализ [2] показывает, что наиболее перспективной схемой оптического линейно-алгебраического процессора является схема оптического вектор-матричного перемножителя (ОВМП), поэтому были подробно рассмотрены и проанализированы известные и возможные варианты схемы ОВМП. Архитектура ОВМП представлена на рис.1 и состоит из динамического устройства ввода вектора (УВВ), квазистатического устройства ввода матрицы (УВМ) и линейного массива фотодетекторов (МФД). Две анаморфотные оптические системы (на

рисунке не показаны) выполняют разводку излучения i -тых элементов УВВ по i -тым строкам УВМ и суммирование излучения j -тых столбцов УВМ на j -тых элементах МФД. Таким образом, система выполняет вектор матричные перемножения:

$$c_j = \sum_{i=1}^N a_{ij} b_i. \quad (1)$$

Предельное значение скорости вычислений ОВМП может быть оценено как:

$$B = (2N^2 - N)f_T, \quad (2)$$

где f_T - тактовая частота, N - размерность системы.

Рассмотрены возможные архитектуры ОВМП, проведён анализ их вычислительных и схемотехнических характеристик. Проведённый анализ доказывает, что в случае использования ОВМП в качестве специализированного процессора в цифровой вычислительной системе перспективными представляются только архитектуры с временным интегрированием с получением сумм перекрёстных бит.

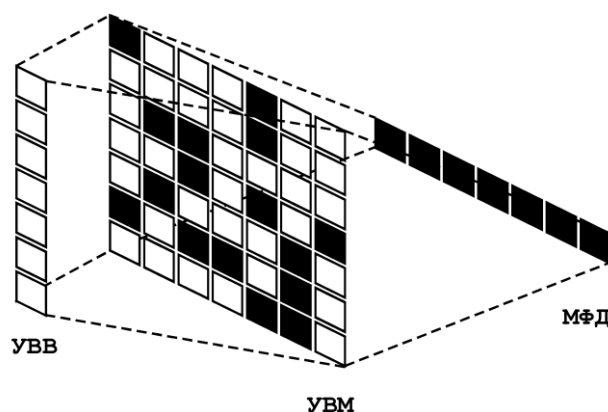


Рис.1: Базовая архитектура ОВМП.

Показано, что использование лазерных ОВМП может быть эффективно при решении задач реального времени с бинарным входом, небольшой разрядностью входных данных (1-3 бит), и невысокими требованиями к точности результата (7-16 бит) при достижении производительности, до 10^{12} - 10^{14} операций с целыми числами в секунду. Результаты анализа параметров ОВМП сведены в табл.1 и представлены на рис.2.

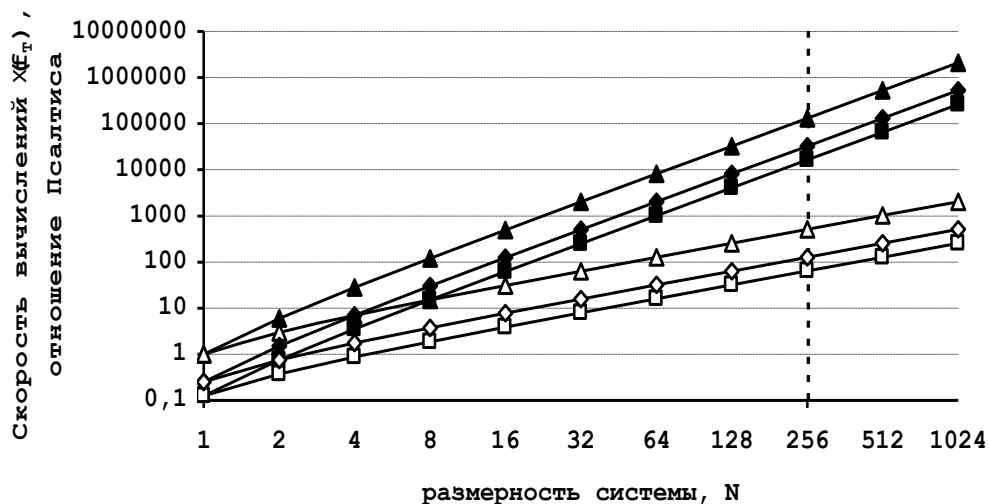


Рис.2: Зависимости скорости вычислений (тёмные значки, умножить на f_T) и отношения Псалтиса (белые значки) от размерности системы N для различных вариантов ОВМП с двоичным входом. Треугольники - аналоговый ОВМП с бинарным входом, ромбы - ОВМП ВИ II с разрядностью входных данных $L=4$, квадраты - ОВМП ВИ II с $L=8$. Вертикальная пунктирная линия - ограничение размерности, определяемое выходным динамическим диапазоном 8 бит.

Рассмотрены принципы реализации ОМП в виде гибридных микросхем и микромодулей с послойной структурой организации, показаны возможности создания миниатюризированных оптических вычислителей для выполнения различных типов вычислительных операций над массивами дискретных данных. Отмечено, что основной проблемой при разработке гибридных микросхем и микромодулей является создание устройств ввода-вывода, к которым помимо точностных, скоростных и энергетических предъявляются высокие требования по согласованности размеров и оптимизации топологии. Рассмотрены известные и предложены новые возможные архитектуры ОМП, реализуемых в виде гибридных микросхем и микромодулей, проведён анализ их характеристик, определены наиболее эффективные их типы. Экспериментально продемонстрированы основные алгоритмы работы ОМП.

Результаты проведённых исследований показывают, что для лучших вариантов ОМП с размерностью массива обрабатываемых данных $N \times N$, можно говорить об их использовании в качестве цифрового специализированного процессора, работающего с быстродействием в $N \sim 2N$ раз большем возможного быстродействия электронных устройств, осуществляющих постобработку результата.

Таблица 1: Вычислительные и схемотехнические параметры ОВМП.

Архитектура	Скорость счёта, I_{ps}	Размерность			Ограничение размерности	Точность счёта, бит	Кр вх		Кр вых аналог.	Кр вых цифровой.	Точность пред- обработки, бит	Точность пост- обработки, бит	Отношение Псалтиса
		УВВ	УВМ	МФД			min	max					
ОВМП	$(2N^2-N)f_T$	N	NN	N	$Nd_1d_2 < D$	$\log_2 D$	N	$N+N^2$	N	$N\log_2(Nd_1d_2)$	$\log_2 d$	-	$2N-1$
ОВМП ВИ I	$(2N^2-N)f_T/L$	N	NNL	NL	$NLk^2 < D$	$\log_2 N(k+1)^{2L}$	N	$N+N^2L$	NL	$NL\log_2(Nk^2+1)$	$\log_2(k+1)$	$\log_2 nLk^2$	$(2N-1)/(L^2+2L-2)$
ОВМП ВИ II	$(2N^2-N)f_T/L$	N	NNL	NL	$Nk^2 < D$	$\log_2 N(k+1)^{2L}$	N	$N+N^2L$	NL	$NL\log_2(Nk^2+1)$	$\log_2(k+1)$	$\log_2 nLk^2$	$(2N-1)/L$
ОВМП ПИ I	Nf_T/L	NNL	NL	N	$Lk^2 < D$	$\log_2(k+1)^{2L}$	$L+N$	$LN+N^2$	N	$N\log_2(Lk^2+1)$	$\log_2(k+1)$	$\log_2 Lk^2$	$1/(L^2+2L-2)$
ОВМП ПИ II	$(2N^2-N)f_T/L$	NL	NNL	N	$NLk^2 < D$	$\log_2 N(k+1)^{2L}$	$L+N$	$LN+N^2$	N	$N\log_2(Lk^2+1)$	$\log_2(k+1)$	$\log_2 nLk^2$	$(2N-1)/(L^2+2L-2)$

В таблице:

ОВМП ВИ I - архитектура с получением компонент результата в виде сумм свёрток, ОВМП ВИ II - архитектура с получением сумм перекрёстных бит; ОВМП ПИ I - архитектура с пространственным интегрированием, выполняющая только получение перекрёстных произведений в виде свёртки; ОВМП ПИ II - архитектура с получением сумм свёрток.

d_1, d_2 - диапазоны входных аналоговых величин, D - выходной динамический диапазон в уровнях сигнала, $(k+1)$ – основание системы счисления, N - размерность обрабатываемого массива, L - разрядность цифровых данных, f_T – тактовая частота работы системы, УВВ - устройство ввода вектора, УВМ - устройство ввода матрицы, МФД – массив фотодетекторов.

Третья глава посвящена исследованию методов построения лазерных дифракционных оптических систем инвариантного распознавания изображений с использованием современных методов компьютерной голографии и цифровой оптики. Как известно, когерентная оптическая система осуществляет линейное преобразование амплитуды, а некогерентная - линейное преобразование интенсивности, что описывается соответствующими интегралами суперпозиции [1]. Таким образом, тем или иным способом формируя соответствующий комплексный импульсный отклик оптической системы, можно осуществить требуемое интегральное преобразование [3]. В общем случае, вид преобразования определяется как:

$$T(u, v) = \iint_{\pm\infty} kern(x, y; u, v) f(x, y) dx dy, \quad (3)$$

где $kern(x, y; u, v)$ - ядро интегрального преобразования. Применение инвариантных преобразований даёт возможность верно распознавать изображение вне зависимости от изменения его положения, ориентации, размера и др. Анализ известных оптоэлектронных схем инвариантного распознавания изображений показывает, что в настоящее время возможно два функциональных типа подобных устройств: 1) осуществляющих инвариантное корреляционное сравнение и обеспечивающих выход типа «да-нет», и 2) осуществляющих вычисление (измерение) некоторого набора инвариантных признаков, используемого затем при распознавании. В качестве общей структуры системы распознавания принимается иерархическая схема, представленная на рис.3.

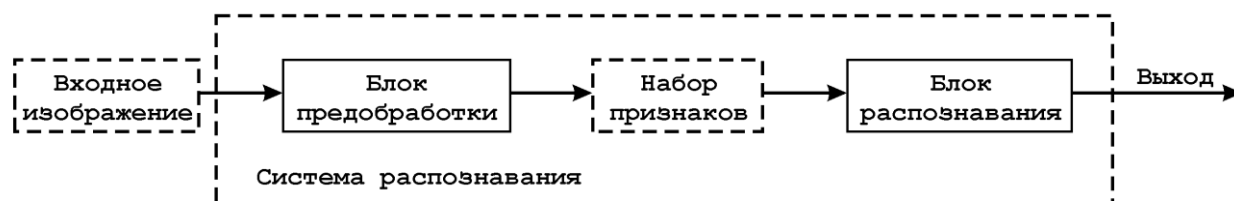


Рис. 3: Структурная схема иерархической системы распознавания.

Предполагается, что оптико-электронная система выделения признаков используется в качестве блока предобработки. Основной проблемой при построении систем, обеспечивающих вычисление инвариантных признаков в оптике является низкая точность результата оптических вычислений.

Рассмотрены возможности применения нейросетевых методов распознавания изображений при комбинировании в единой системе оптоэлектронного блока предобработки, осуществляющего выделение инвариантных признаков и нейронной сети, выполняющей распознавание с их использованием; отмечено, что, несмотря на устойчивость нейронных сетей к шумам и ошибкам, точность оптического вычисления инвариантных признаков часто оказывается недостаточной и в этом случае. Предложены метод и соответствующая когерентная дифракционная оптико-цифровая схема прецизионного измерения кольцевых и секторных элементов пространственного спектра интенсивности изображений, инвариантных соответственно к повороту и изменению масштаба. За счёт увеличения числа дискретных каналов измерения и применения цифровой постобработки схема, базирующаяся на массиве фотодетекторов специальной топологии, позволяет осуществлять параллельное вычисление инвариантных признаков с цифровой точностью. Топология массива фотодетекторов представлена на рис.4.



Рис. 4: Топология массива фотодетекторов.

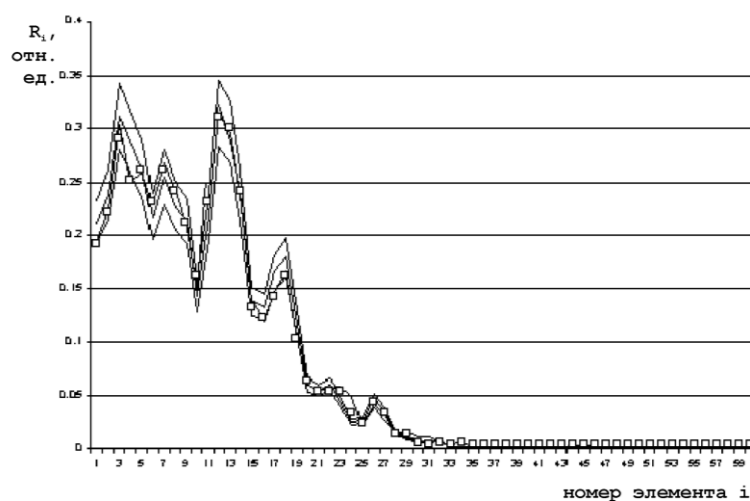


Рис.5: Пример вектора кольцевых элементов: компоненты вектора для изображения, повернутого на 45 градусов квадратики, тройные сплошные линии - усреднённые значения компонент векторов и их среднеквадратичное отклонение для неискажённого изображения.

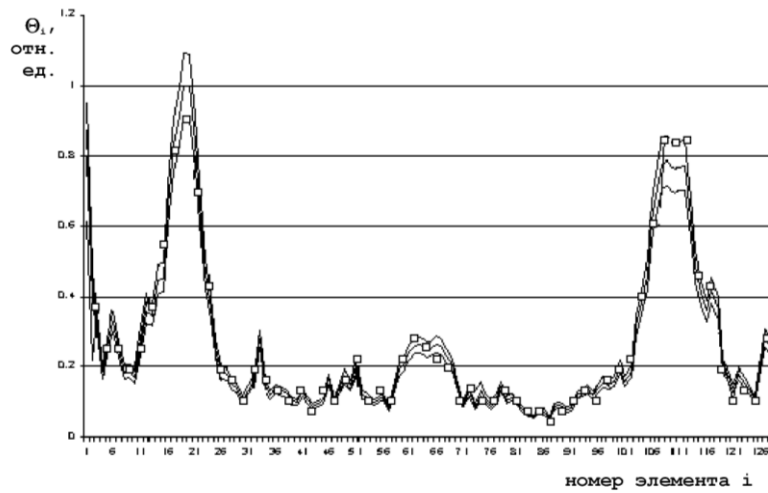


Рис.6: Пример вектора секторных элементов: компоненты вектора для изображения масштаба 125% - квадратики, тройные сплошные линии - усреднённые значения компонент векторов и их среднеквадратичное отклонение для неискажённого изображения.

Цифровая постобработка, обеспечивающая накопление точности результата состоит только в сложении результатов измерений. Экспериментально продемонстрирован эффект повышения точности результата в предложенной когерентной оптико-цифровой системе измерения 256 инвариантных признаков пространственного спектра интенсивности изображений размерности $10^3 \times 10^3$ до 14 бит и выше. Примеры измеренных векторов кольцевых и секторных элементов пространственного спектра интенсивности изображений, инвариантных соответственно к повороту и изменению масштаба представлены на рис.5 и рис.6. **В главе четвёртой** изложены результаты исследований методов применения инвариантных корреляционных фильтров в системах корреляционного распознавания изображений. Корреляционный метод распознавания является одним из наиболее распространенных в настоящее время и весьма перспективным в развитии; наиболее практически интересно применение данного метода при решении задач реального времени [4]. Суть метода состоит в вычислении корреляционной функции $C(x_C, y_C)$:

$$C(x_C, y_C) = \iint_{\pm\infty} s_{ЭТ}^*(x, y) s_{БХ}(x - x_C, y - y_C) dx dy = s_{ЭТ} \otimes s_{БХ}, \quad (4)$$

где $s_{ЭТ}(x, y)$ и $s_{БХ}(x, y)$ - соответственно эталонное изображение и распознаваемый сигнал, x, y - координаты поля изображения, x_C и y_C - координаты корреляционного поля. После вычисления $C(x_C, y_C)$, по её виду, а именно по

наличию, величине, форме и положению корреляционного пика судят о совпадении или несовпадении и/или степени схожести $s_{ЭТ}(x,y)$ и $s_{ВХ}(x,y)$, а так же об их относительной локализации. Реальные постановки задачи корреляционного распознавания часто требуют инвариантности выходного корреляционного пика к различным изменениям распознаваемого объекта на входе оптической системы: искажениям формы, повороту, изменению масштаба, к изменению освещения, их возможных комбинаций и др. Главным препятствием на пути успешного решения задач корреляционного распознавания является неустойчивость выходного корреляционного пика к подобного рода изменениям входного объекта. Так, например, практика показывает, что для большинства нетривиальных объектов, корреляционный пик критически вырождается при плоском повороте объекта на 3-5град или при изменении масштаба на 3-5%. Основным способом достижения инвариантности корреляционного пика при наличии искажений распознаваемого объекта относительно эталонного является применение инвариантных корреляционных фильтров. Данный подход состоит в замене эталонного изображения $s_{ЭТ}(x,y)$ на синтезированный эффективный эталонный корреляционный объект $h(x,y)$, далее инвариантный корреляционный фильтр (КФ), содержащий априори заложенную информацию о возможных состояниях распознаваемого сигнала.

Проведён сравнительный анализ инвариантных корреляционных фильтров основных типов. Проведены компьютерные эксперименты по синтезу КФ и моделированию корреляционного распознавания с их применением. Проведено сравнительное исследование свойств КФ различных типов. Проведено моделирование межклассового распознавания изображений с использованием КФ и различных корреляционных метрик, примеры результатов представлены на рис.6. Результаты моделирования распознавания позволили оценить возможности определения числа эталонных изображений, необходимых для синтеза КФ в условиях конкретной постановки задачи распознавания, определить возможности применения того или иного типа корреляционной метрики, используемой при распознавании, получить оценки вероятностных характеристик распознавания и т.д.

Результаты проведённых сравнительного анализа и моделирования КФ позволили сформулировать следующие выводы:

- инвариантные корреляционные фильтры на основе радиальных (КФ РГ) или кольцевых гармоник (КФ КГ) пригодны для распознавания соответственно масштабированных в диапазоне 70%-130% или повернутых в полном диапазоне углов поворота изображений, однако крайне чувствительны - сильнее, чем прямая корреляция - к различного рода зашумлению и изменению геометрии изображений. В случае КФ КГ отмечено сильное влияние ошибки поворота, характерной для матричных устройств регистрации и ввода, особенно в случае контурных изображений. КФ РГ непригодны для распознавания контурных изображений с разумно ограниченным произведением размера на ШППЧ.
- КФ РГ и КФ КГ допускают адаптацию к зашумлению входного изображения только при использовании методов множественной корреляции и чрезвычайно вычислительно ёмких процедур генерализации. Особенным требованием при синтезе КФ данных типов является потребность в поиске оптимального центра разложения эталонного изображения и выбора используемой гармоники.
- инвариантные корреляционные фильтры с синтезированной дискриминационной функцией (КФ СДФ) в ряде случаев оказываются непригодны для использования из-за ограничений числа изображений эталонного набора. КФ СДФ крайне чувствительны к шумам во входном изображении. Введение шума при синтезе КФ СДФ с минимумом дисперсии (КФ МДСДФ) в ряде случаев улучшает качество распознавания.
- составные КФ по методу Кальмана и КФ с «переключением» могут обеспечивать отличные результаты распознавания, в том числе для зашумлённых изображений, их синтез трудно формализуем и требует крайне больших вычислительных затрат.
- различные варианты инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров корреляционного пика (КФ с минимумом средней энергии корреляции - МСЭК, максимальной высотой корреляционного пика - МВК, минимумом шума и средней энергии корреляции – МШСЭК и др.) и оптимальные компромиссные фильтры на их основе (ОК КФ) могут обеспечивать

хорошие результаты распознавания для полутоновых изображений при геометрических искажениях, а также при изменении их яркости или контраста. При распознавании контурных изображений КФ данных типов часто менее эффективны, чем при распознавании полутоновых. Процедуры синтеза КФ с оптимизацией параметров вычислительно ёмки.

- КФ с оптимизацией параметров весьма эффективны при необходимости достижения инвариантности одновременно к двум разнородным факторам - «геометрическому» и «энергетическому», например, к повороту и изменению освещённости, дисторсии и изменению контраста, повороту и зашумлению и т.п., однако естественно существуют ограничения диапазона искажений, определяемые ограничениями размерности набора эталонных изображений.
- инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом (КФ ЛФК) непригодны для распознавания полутоновых изображений, однако дают хорошие результаты распознавания для контурных изображений. Корреляционная функция, обеспечиваемая КФ ЛФК наиболее близка по форме к прямой корреляции по сравнению с другими типами КФ, синтез фильтра вычислительно экономен. КФ ЛФК обладают некоторой устойчивостью к шумам. КФ ЛФК могут быть эффективны при необходимости достижения инвариантности одновременно к двум «геометрическим» факторам, например к повороту и изменению масштаба, в некотором диапазоне, определяемом ограничениями набора эталонных изображений.

Проведено детальное исследование дискриминационных свойств КФ ЛФК. Продемонстрирована межклассовая избирательность КФ ЛФК. Продемонстрировано сохранение корреляционного пика КФ ЛФК для промежуточных искажений входного изображения, не заложенных при синтезе фильтра. Определены условия, при которых КФ ЛФК теряет избирательность - отношение автокорреляции эталона к кросскорреляции эталона и возможного ложного изображения менее определённого порогового, а также «кратность» геометрических деталей КФ и ложного изображения (совпадение деталей изображения и деталей нескольких элементов КФ); в указанных случаях требуется изменять «шаг» тренировочных изображений и сокращать их количество, что понятным образом снижает эффективность применения КФ.

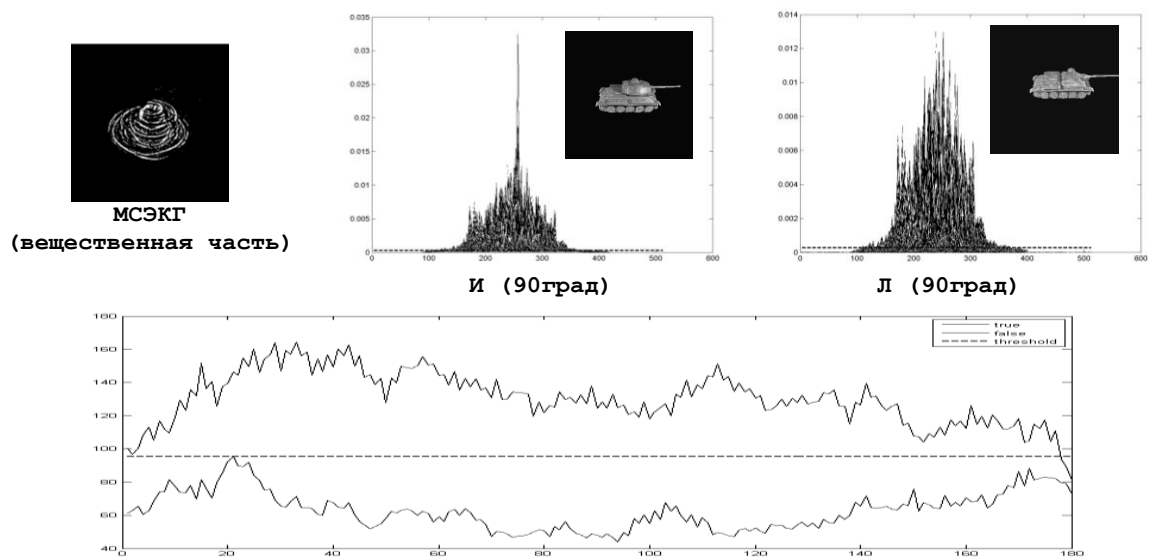
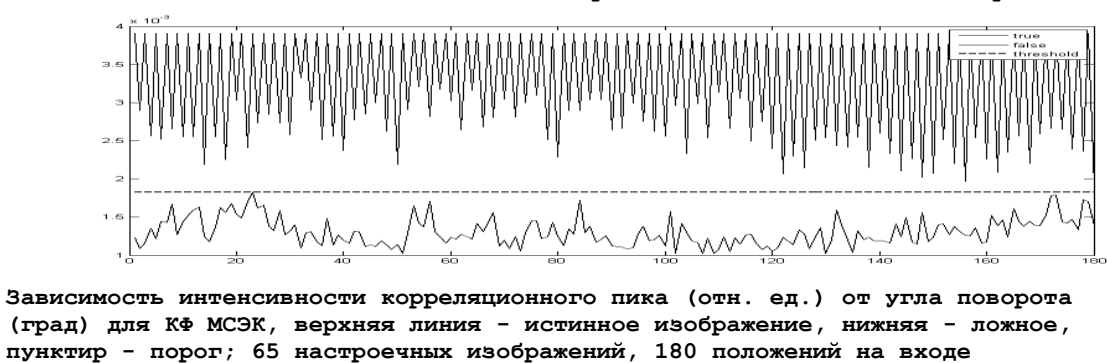
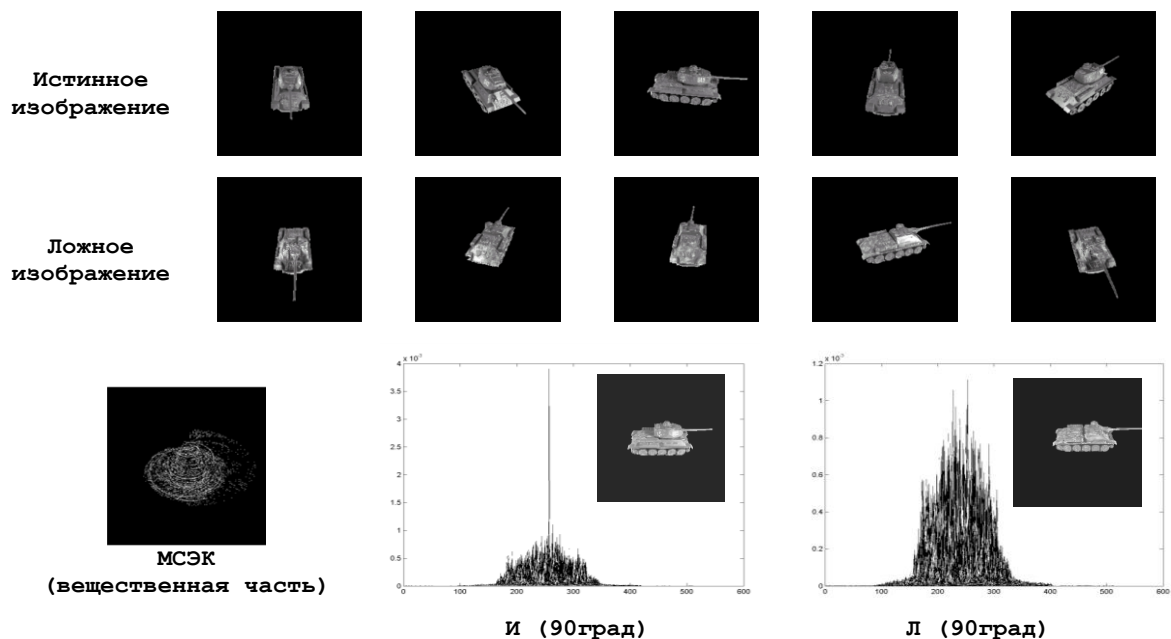


Рис. 7: Результаты моделирования межклассового распознавания при помощи КФ МСЭК и КФ МСЭК со сглаживающей функцией Гаусса (МСЭКГ) (пространственный поворот 180град, полутоновые изображения): примеры истинных и ложных изображений, распределения вещественных частей КФ, примеры корреляционных функций и полученные дискриминационные характеристики.

Проведёно исследование устойчивости распознавания при помощи КФ ЛФК к зашумлению входного изображения; использовалось добавление бинарного шума во входное бинарное контурное изображение. Установлено, что удовлетворительные характеристики корреляционного пика (по локализации и отношению амплитуды пика к амплитуде окружения) сохраняются при зашумлении до 25%.

Глава пятая посвящена проблемам применения инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом при решении задач корреляционного распознавания изображений в условиях их конкретных постановок. Составной фильтр с линейным фазовым коэффициентом (ЛФК, LPCC - Linear Phase Coefficient Composite filter). КФ ЛФК составляется из N эталонных изображений $s_0, s_1, \dots, s_{N-1}$, выбираемых исходя из требований к инвариантности [5]:

$$h_{\text{ЛФК}(k)}^*(x, y) = \sum_{n=0}^{(N-1)} \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk) s_n(x, y), \quad k = 0, 1, \dots, (N-1). \quad (5)$$

Сделан вывод о возможности реализации КФ ЛФК в корреляционных системах на основе цифровых электронных корреляторов в виде заранее заготовленного эталона - массива комплексных величин. С учетом параметров современной элементной базы, время возможна работа таких систем при размерностях входных изображений 1000x1000 и выше и достижимых скоростях обработки 10^{10} операций с целыми числами в секунду. Сделан вывод о возможности реализации КФ ЛФК в корреляционных системах на основе лазерных корреляторов при достижимых скоростях обработки до 10^{13} операций в секунду. В этом случае фильтр реализуется в виде синтезированного дифракционного объекта, в т.ч. формируемого при помощи пространственно-временного модулятора света (могут быть использованы коммерчески доступные образцы модуляторов).

Предложен метод для распознавания полутоновых изображений, регистрируемых в различных условиях освещённости и в условиях их возможных геометрических искажений; метод состоит в применении процедур выделения контуров полутоновых изображений и использования затем КФ ЛФК при распознавании полученных бинарных контурных изображений.



Рис. 8: Оконтуренное изображение сцены и увеличенные фрагмент сцены, использованный при построении КФ ЛФК и вещественная часть полученного фильтра.

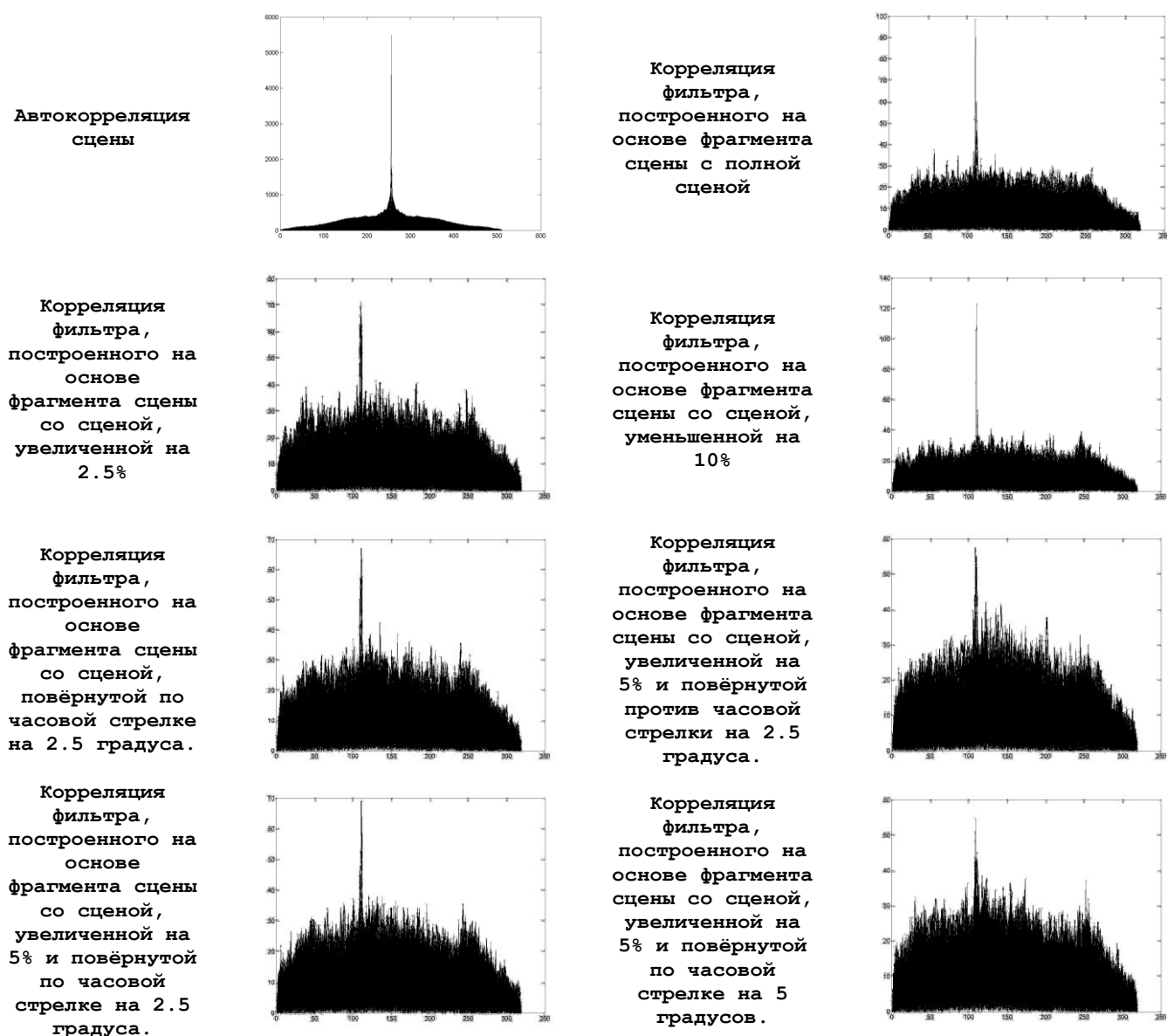


Рис. 9: Примеры корреляционных картин для КФ ЛФК инвариантного к повороту ± 10 град и изменению масштаба $\pm 10\%$ со сложной сценой (шаг фильтра 5%, 5 град.).

Проанализированы возможности применения стандартных алгоритмов оконтуривания, а также разработан и опробован оптимизированный морфологический алгоритм оконтуривания изображений, превосходящий по

соотношению «скорость/качество» стандартные. Проведены численные эксперименты по распознаванию полутоновых изображений, подвергнутых искажениям «плоский поворот и изменение масштаба» с использованием разработанного метода, примеры результатов представлены на рис.7 и рис.8.

Разработан и экспериментально опробован метод реализации инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в виде синтезированных дифракционных элементов (голографических фильтров) в схемах когерентных корреляторов с фильтрацией в частотной плоскости. При проведении исследований был синтезирован КФ ЛФК, инвариантный к повороту входного изображения. Фильтр был рассчитан на основе 18 эталонных изображений размерности 256x256 отсчётов, повернутых с шагом 10град. Эталонное и ложные изображения, а также распределение амплитуды КФ показаны на рис.10. Ложные изображения имеют одинаковую с эталонным толщину контура, схожие детали и одинаковые линейные размеры, а также близки по мощности; минимальное отношение автокорреляции эталонного изображения к кросскорреляции эталонного с ложным составляло 2,7.

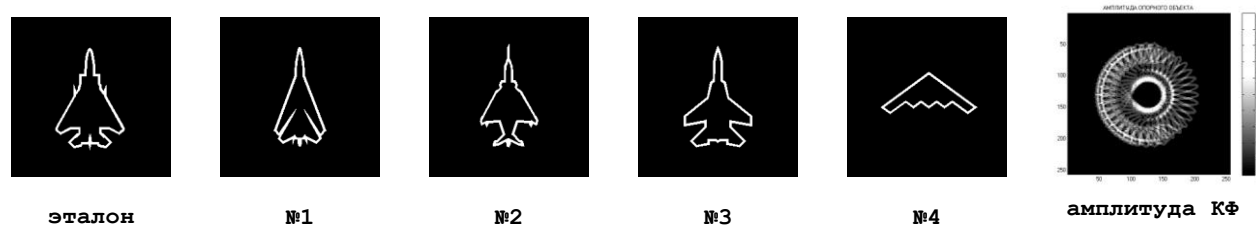


Рис. 10: Входные эталонное и ложные (№№ 1-4) изображения и амплитуда синтезированного КФ ЛФК (инвариантность к повороту ± 90 град, шаг 10град).

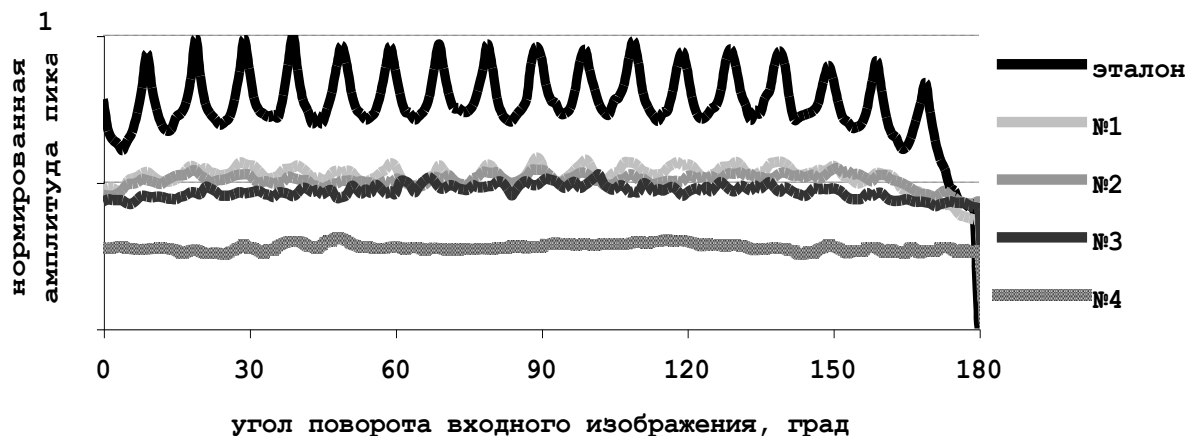


Рис. 11: Зависимость амплитуды корреляционного пика от угла поворота входного изображения.

Зависимость амплитуды корреляции от угла поворота входного изображения на рис.11. В качестве критерия распознавания принималось простое пороговое преобразование. Сцена, содержащая изображения повернутого эталонного объекта в диапазоне 180град с шагом 5град и распределение интенсивности корреляционной функции сцены и КФ ЛФК, подвергнутое операции порога представлены на рис. 12.

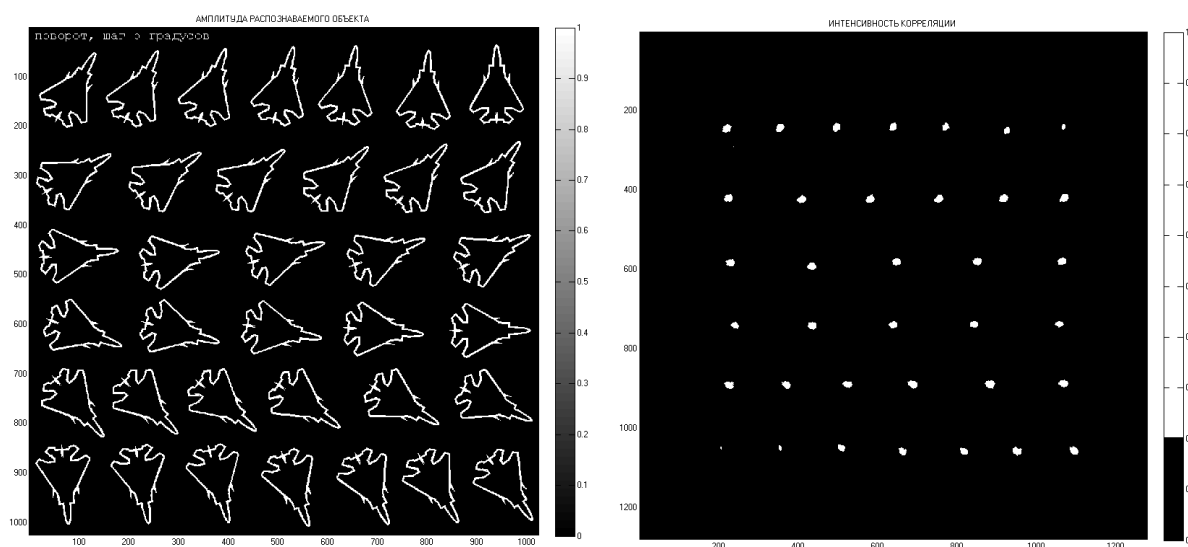


Рис. 12: Сцена, содержащая повороты от 0 до 175 градусов эталонного изображения. и интенсивность корреляции КФ ЛФК со сценой (порог 0,8).

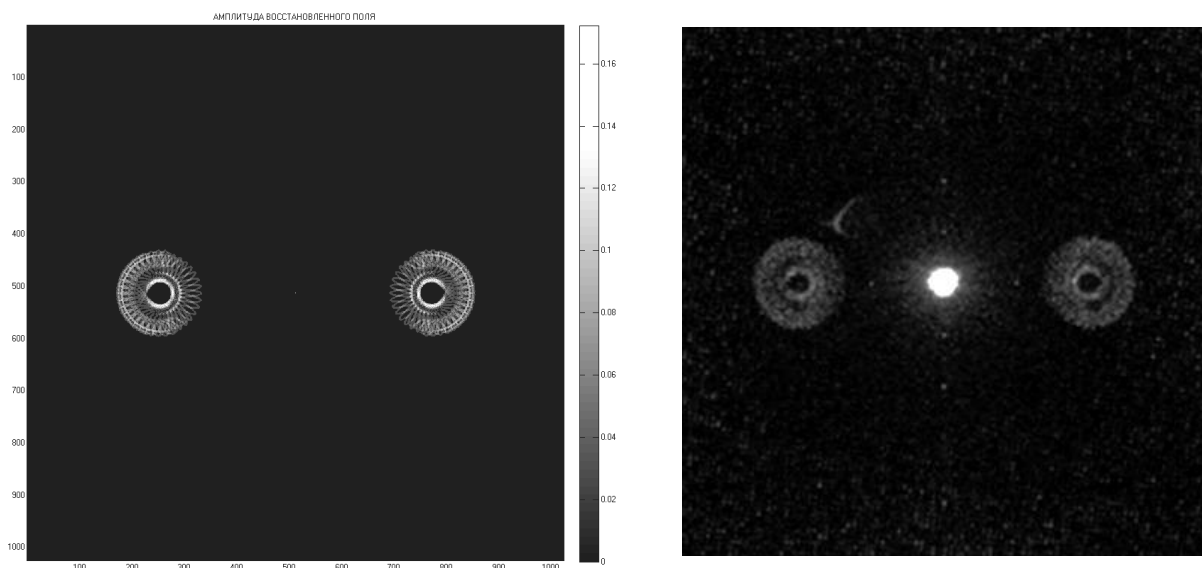


Рис. 13: Результат численного восстановления распределения амплитуды отклика голографического фильтра (слева) и результат измерения интенсивности отклика голографического фильтра (справа, $\lambda=632\text{nm}$).

С помощью имеющегося специального программного обеспечения для реализации синтезированного КФ ЛФК в схеме дифракционного коррелятора

были рассчитаны соответствующие Фурье-голограммы (голографические фильтры); различные варианты голограмм были реализованы.

Рассчитанное распределение амплитуды импульсного отклика голографического фильтра и результат его измерения представлены на рис.13; отклик состоит из δ -функции в нулевом порядке дифракции и двух взаимосопряжённых областей, соответствующих синтезированному фильтру в 1 и -1 порядках.

Было проведено численное моделирование работы коррелятора Вандер Люгта с КФ ЛФК, реализованными в виде голографических фильтров. Выходной сигнал коррелятора содержит пространственно разделённые область свёртки, область изображения и область корреляции, которая и используется на практике. Результаты моделирования представлены на рис.14, рис.15 и рис.16 и демонстрируют, что избирательные характеристики голографического фильтра адекватны исходному КФ ЛФК.

Существенной проблемой реализации КФ в схемах оптоэлектронных корреляторов является ограниченность динамического диапазона модуляции реально существующих средств ввода, используемых для представления КФ в оптической системе. При этом весьма интересной с практической точки зрения представляется возможность использования бинарного представления КФ, поскольку это отвечает возможностям наиболее скоростных ПВМС.

Для исследования возможности реализации КФ ЛФК в схеме коррелятора Вандер Люгта с использованием современных голографических носителей были рассмотрены несколько вариантов: использование носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции, использование бинарных носителей с применением стандартных методов прямой бинаризации и использование бинарных носителей с применением бинарного растривания для передачи градаций пропускания.

Во всех случаях проводился численный анализ СКО откликов голографических фильтров и расчёт выходных сигналов коррелятора.

В случае реализации голографического фильтра с помощью носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции было установлено, что для полного сохранения характеристик распознавания достаточно сохранить 32 градации пропускания.

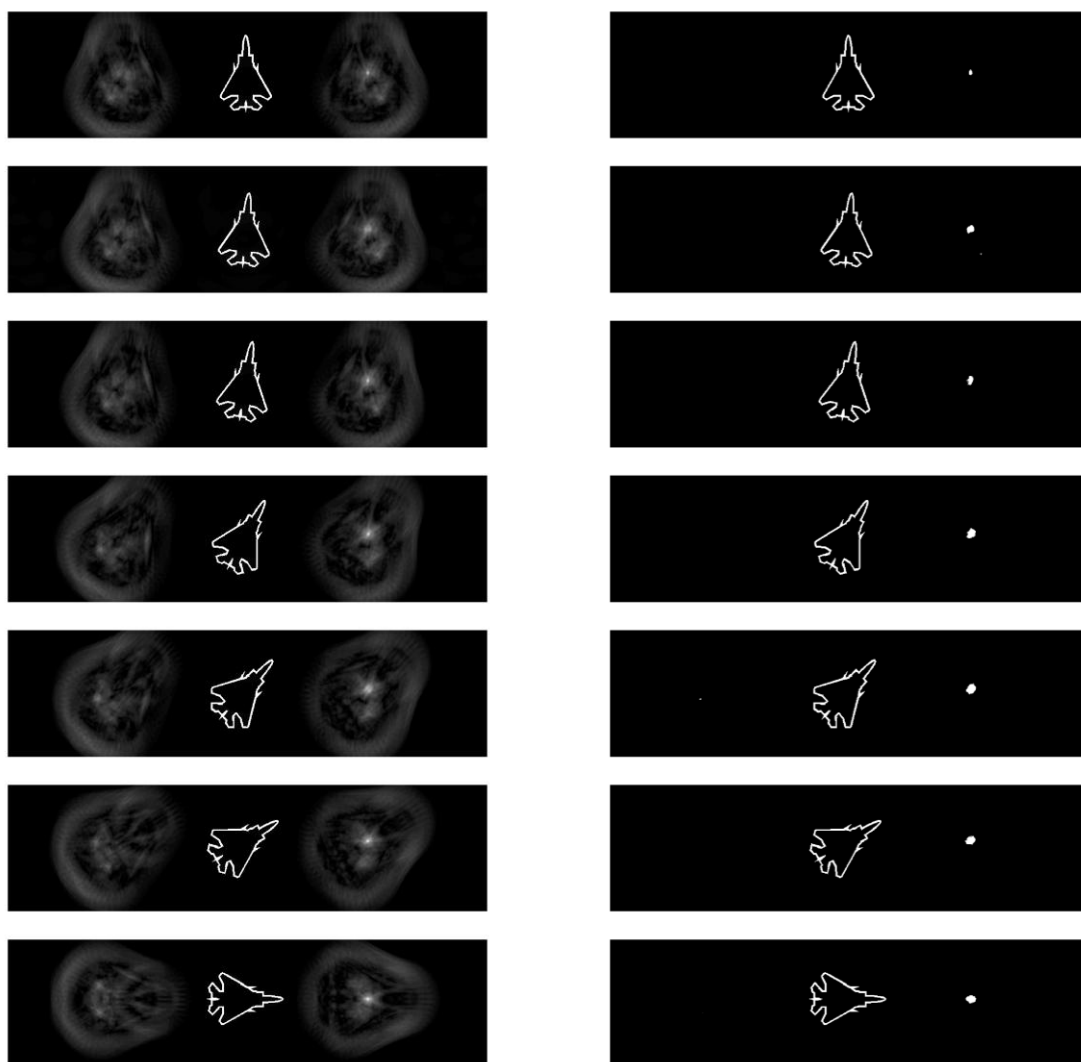


Рис. 14: Результат расчёта распределения амплитуды в выходной плоскости коррелятора для возможных поворотов входного изображения (слева) и те же сигналы, подвергнутые операции порога на уровне 0,5 от максимального значения корреляционного пика (справа).

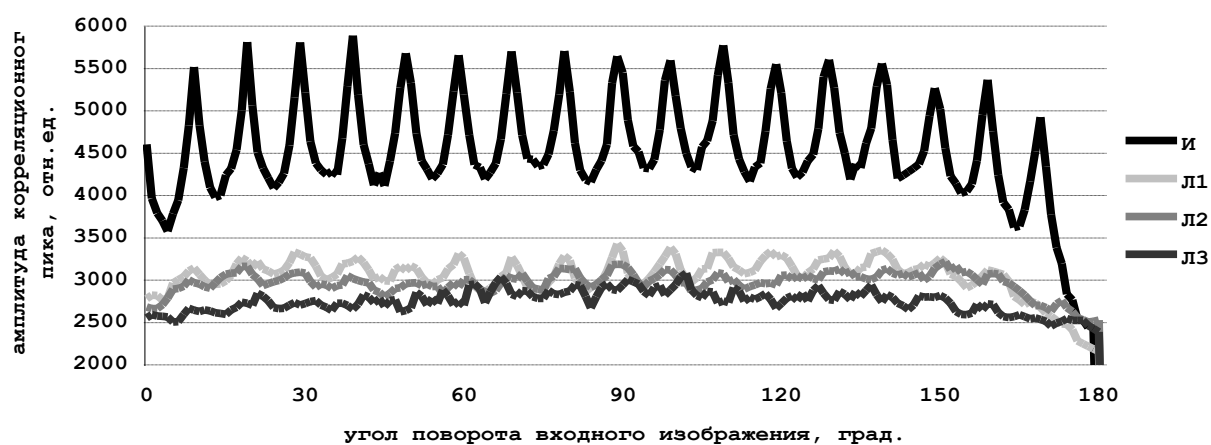


Рис. 15: Зависимость амплитуды корреляции от угла поворота входного изображения для амплитудного голографического фильтра.

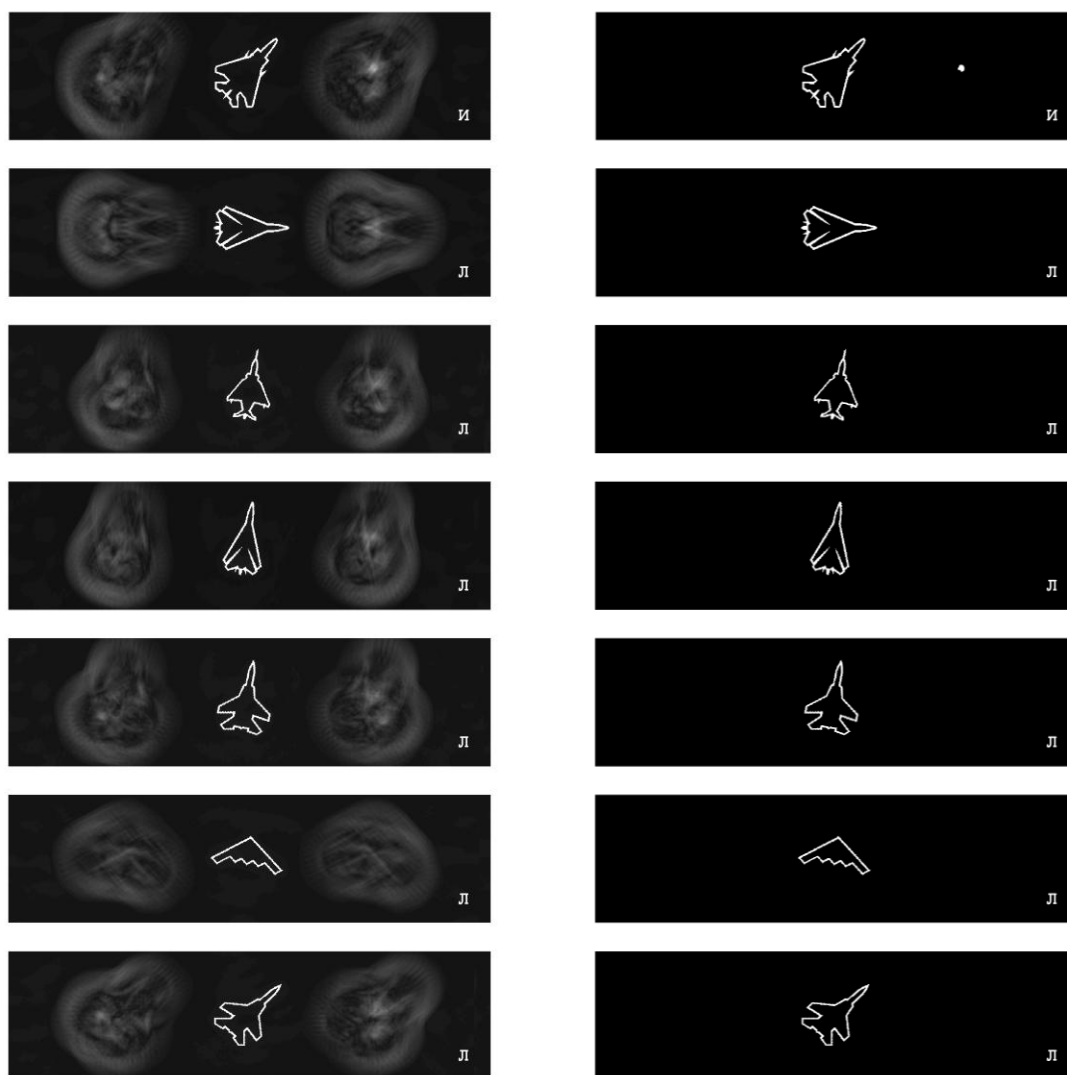


Рис. 16: Результат расчёта распределения амплитуды в выходной плоскости коррелятора для истинного (И) и ложных (Л) объектов (слева) и те же сигналы, подвергнутые операции порога на уровне 0,5 от максимального значения корреляционного пика (справа).

Корреляционный пик в случаях входных изображений объектов эталонного класса сохраняет удовлетворительные качества даже в случае передачи 4х уровней пропускания. Анализ результатов численного моделирования показал, что для адекватного представления КФ ЛФК достаточно использования 16ти градаций пропускания голографического фильтра. В случае реализации голографического фильтра с использованием бинарной модуляции света были рассмотрены стандартные алгоритмы бинаризации изображений: методы Ниблака и гистограмм, методы фиксированного порога и адаптивного порога Отсу.

В результате моделирования установлено, что применение методов Ниблака,

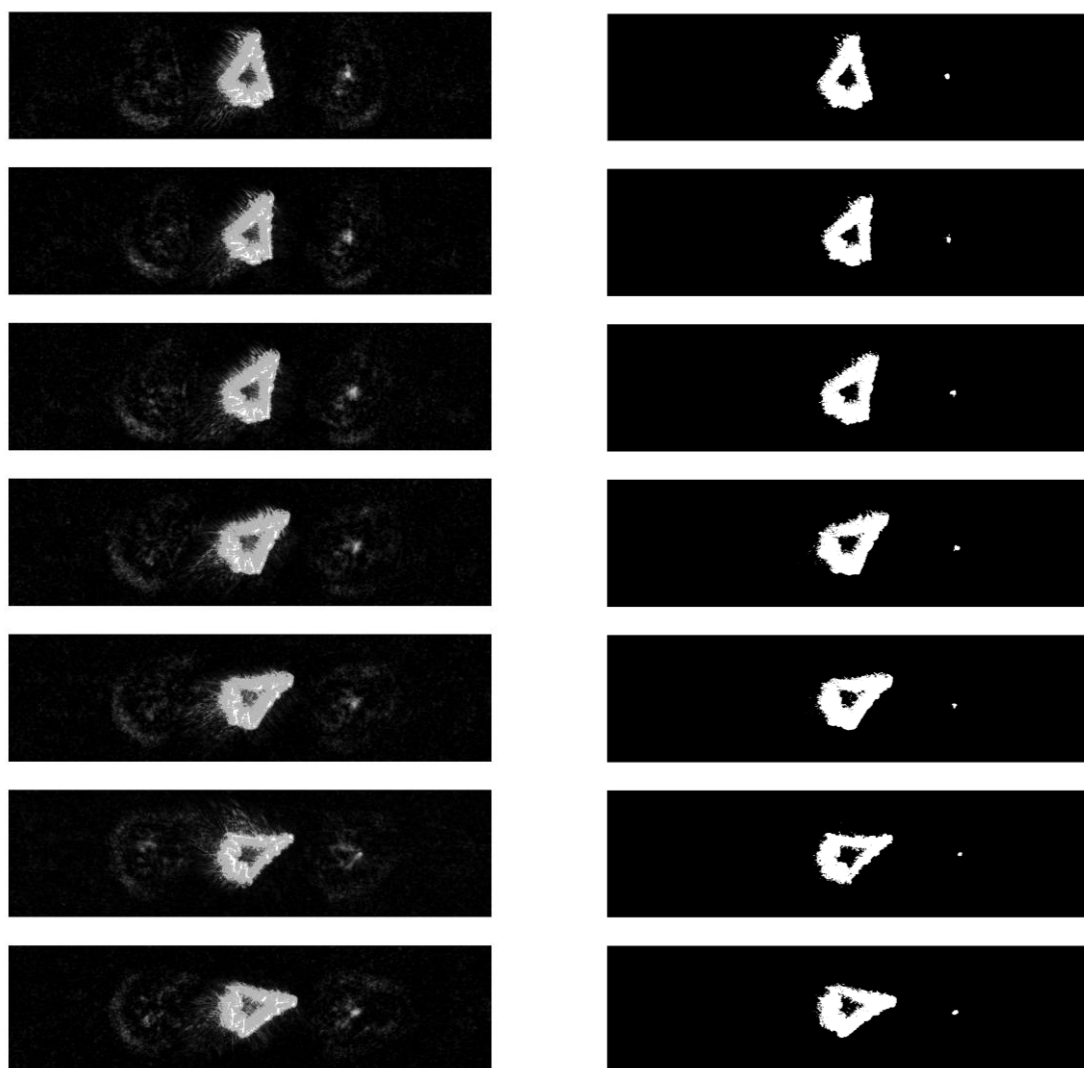


Рис. 17: Фото сигналов коррелятора (слева), те же сигналы, подвергнутые операции порога на уровне 0,5 от максимального значения корреляционного пика (справа). $\lambda=532\text{nm}$. Голограмма с представлением 26 градаций пропускания с использованием стохастического растра (см. также рис.14).

гистограмм и фиксированного порога не обеспечивает сохранения свойств КФ ЛФК. Реализация голограммы, бинаризованной методом Отсу в ряде случаев позволяет распознать эталонный объект среди всех используемых тестовых объектов.

Исследована возможность реализации голографического фильтра с помощью бинарных модуляторов с применением бинарного растривания для передачи градаций пропускания голограммы. В результате установлено, что в случае применения бинарного растривания для полного сохранения распознавательных свойств голографического фильтра достаточно использовать 16 уровней пропускания.

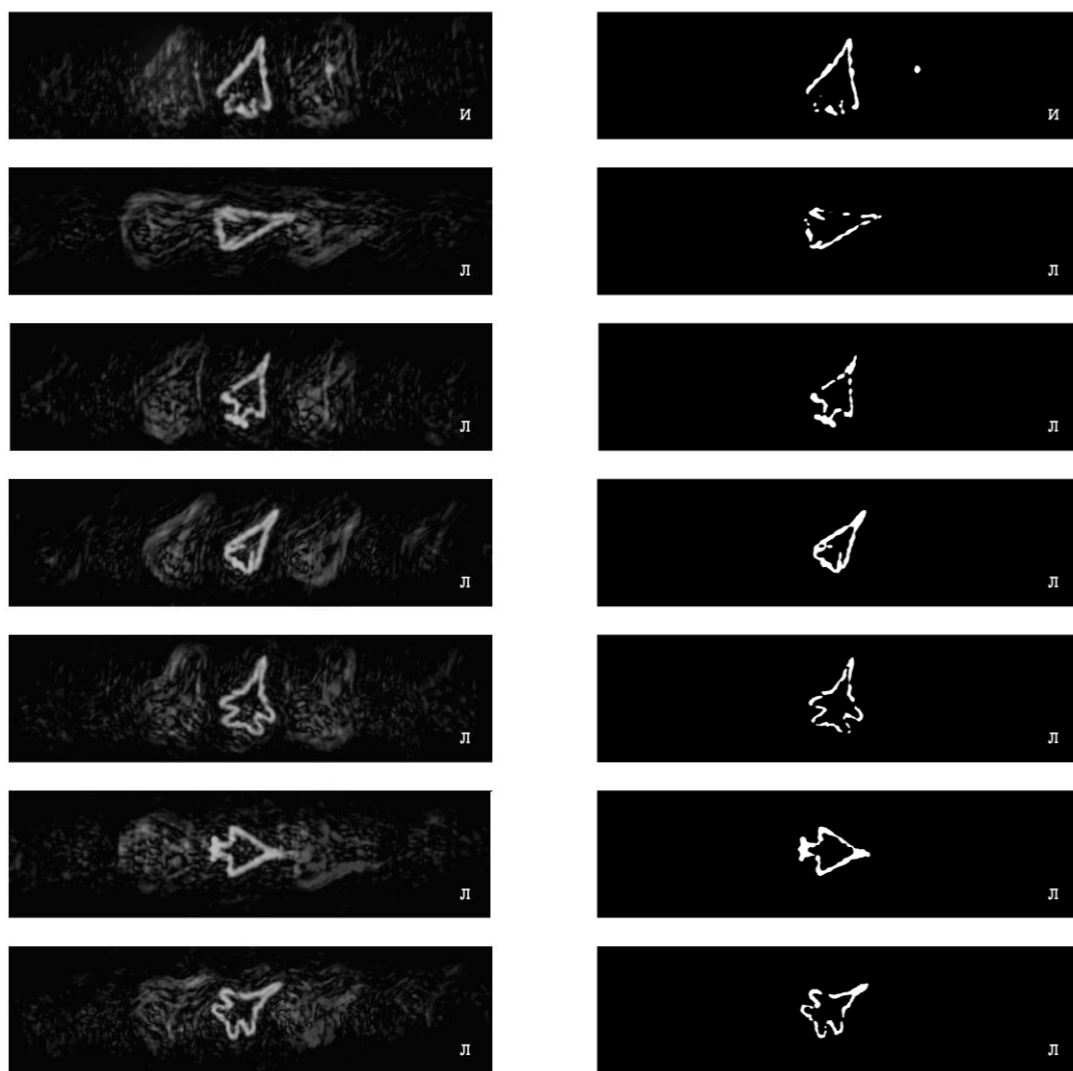


Рис. 18: Фото сигналов коррелятора (слева), те же сигналы, подвергнутые операции порога на уровне 0,5 от максимального значения корреляционного пика (справа). $\lambda=532\text{nm}$. Голограмма бинаризованная методом Отсу (см. также рис.16).

Проведено экспериментальное макетирование когерентного коррелятора с КФ ЛФК, реализованными в виде амплитудных Фурье-голограмм. В корреляционной области выходного поля коррелятора получены адекватно локализованные корреляционные сигналы, сохраняющиеся при повороте входного изображения. В проведённых экспериментах удалось обеспечить возможность отличить истинное изображение от ложных, что иллюстрируется примерами, приведёнными на рис.15 и 16. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют возможность достижения инвариантности распознавания при применении корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом, реализуемых в

виде компьютерно синтезированных голограмм в схемах когерентных дифракционных корреляторов, в том числе, при использовании для реализации фильтров голографических носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Анализ показывает, что отличительной чертой современной вычислительной оптоэлектроники стала интеграция оптоэлектронных информационных систем в электронные цифровые вычислительные системы. Существенный прогресс элементной базы обеспечивает увеличение числа дискретных каналов обработки оптического сигнала с целью достижения массивованного параллелизма; фундаментальными приборами и технологиями новейшего поколения вычислительной оптоэлектроники являются: массивы полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором (до 10^4 и выше каналов с полосой модуляции до десятков гигагерц); современные массивы фотодетекторов (до 10^7 каналов); жидкокристаллические, микромеханические пространственно временные модуляторы света (до 10^6 каналов и выше, смена кадра сотни килогерц при числе каналов 10^4 , размер элемента от единиц микрометров до десятков миллиметров, контраст до 10^4); интегральные массивы «приём-обработка-передача»; современные голографические материалы, массивы дифракционных элементов, массивы микролинз. При разработке оптоэлектронных вычислителей возможны как адаптация существующей элементной базы, так и специальная разработка элементов с требуемой функциональностью.

2. Основными нишами применения оптоэлектронных вычислительных устройств являются: использование их в качестве специализированных вычислительных средств в составе цифровых информационных систем в качестве спецпроцессоров-ускорителей, использование их в качестве средств коммутации и поддержки в высокопараллельных высокоскоростных цифровых универсальных вычислительных системах. В первом случае уже сейчас можно рассчитывать на

создание относительно простых и недорогих устройств, с некоторой степенью миниатюризации. Во втором случае, в настоящий момент, можно говорить об уникальности применения и некоторой определенности в выборе архитектур и элементной базы. Основной перспективой вычислительных оптоэлектронных устройств на настоящем этапе является достижение скорости вычислений до 10^{12} - 10^{14} операций с целыми числами (операций с фиксированной точкой) в секунду или пропускной способности до сотен терабайт в секунду.

3. Проведены исследования по разработке лазерных оптических матричных процессоров (ОМП). Показано, что создание конкурентоспособных ОМП сталкивается главным образом со сложностью их интеграции в цифровые вычислительные системы. Наиболее существенными проблемами построения ОМП в этом плане являются высокие значения коэффициентов разветвления и необходимость аппаратных и вычислительных затрат для поддержания результата вычислений. По сути, следует говорить об использовании ОМП в качестве спецпроцессора-ускорителя, работающего со скоростью вычислений в 100-200 раз большей допустимой скорости постобработки его результата. Наиболее универсальным типом ОМП являются оптические вектор-матричные перемножители (ОВМП); проведено детальное исследование таких схем, показавшее, что эффективное использование ОВМП возможно при необходимости решения задач реального времени с бинарным входом, небольшой разрядностью входных данных (1-3 бит), и невысокими требованиями к точности результата (7-16 бит). В случае аналогового ОВМП быстроедействие может составить около 5×10^{13} операций с целыми числами в секунду при семибитной точности результата и коэффициенте разветвления по выходу 100. В случае точных ОВМП пиковое быстроедействие может достигать 10^{12} операций с целыми числами в секунду при 16-17 битной точности результата и при коэффициенте разветвления по выходу 100.

4. Предложены архитектуры ОМП, реализуемых в виде гибридных микросхем и микромодулей (ГМ), соответствующие различным вычислительным задачам. Проведён анализ возможных архитектур ГМ, определены наиболее эффективные их типы. Экспериментально продемонстрированы основные алгоритмы работы ГМ - свёртка дискретных сигналов, варианты алгоритмов

вектор-матричного перемножения, варианты алгоритмов перемножения массивов данных. Результаты проведенных исследований подтверждают возможность создания ГМ с размерностью обрабатываемого массива до 100×100 , точностью 14-7 бит при достижении производительности, соответственно до 10^8 - 10^{12} операций с целыми числами в секунду. Рассмотренные принципы построения ОМП подразумевают возможность использования новейшей функциональной элементной базы, и интеграции с электроникой постобработки.

5. Анализ известных оптико-электронных схем выделения инвариантных признаков изображений показывает, что в настоящее время возможно два функциональных типа подобных устройств: осуществляющие инвариантное корреляционное сравнение и обеспечивающие вычисление (измерение) инвариантных признаков, используемых затем при распознавании. Основной проблемой при построении систем, обеспечивающих вычисление инвариантных признаков в оптике, является низкая точность результата оптических вычислений, не превышающая 7-8 бит. Применение нейросетевых методов распознавания изображений возможно при комбинировании в единой системе оптоэлектронного блока предобработки, осуществляющего вычисление (измерение) инвариантных признаков и нейронной сети, однако точность оптических методов часто оказывается недостаточной и в этом случае.

6. Предложены метод и когерентная дифракционная схема прецизионного измерения кольцевых и секторных элементов пространственного спектра интенсивности изображений, инвариантных соответственно к повороту и изменению масштаба. За счёт увеличения числа каналов измерения и применения цифровой постобработки схема, базирующаяся на применении массива фотодетекторов специальной топологии, позволяет осуществлять параллельное вычисление инвариантных признаков с цифровой точностью. Цифровая постобработка, обеспечивающая накопление точности результата состоит только в сложении результатов измерений. Экспериментально продемонстрирован эффект повышения точности результата в предложенной когерентной оптико-цифровой системе измерения инвариантных признаков пространственного спектра интенсивности изображений размерности $10^3 \times 10^3$ пикс до 14 бит и выше.

7. Проведён анализ инвариантных корреляционных фильтров (КФ) основных типов. Проведены синтез КФ основных известных типов и моделирование корреляционного распознавания изображений с их использованием. Результаты анализа литературы и проведённого оригинального моделирования позволили сформулировать практические выводы и рекомендации по синтезу и применению КФ в условиях конкретных постановок задачи корреляционного распознавания.

8. Проведено детальное исследование свойств инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом (КФ ЛФК). Продемонстрирована межклассовая избирательность КФ ЛФК. Продемонстрировано сохранение корреляционного пика КФ ЛФК для промежуточных искажений входного изображения, не заложенных при синтезе фильтра. Определены границы применимости КФ ЛФК. Сделан вывод о возможности применения КФ ЛФК в корреляционных системах на основе цифровых электронных корреляторов, в настоящее время возможна работа таких систем при достижении скоростей обработки 10^{10} операций в секунду. Сделан вывод о возможности реализации КФ ЛФК в системах на основе лазерных дифракционных корреляторов при достижимых скоростях обработки до 10^{13} операций в секунду. В этом случае фильтр реализуется в виде синтезированного дифракционного элемента - статического, или динамически формируемого при помощи пространственно-временного модулятора света.

9. Предложен метод для корреляционного распознавания полутоновых изображений, регистрируемых в различных условиях освещённости и в условиях их возможных геометрических искажений; метод состоит в применении процедур выделения контуров полутоновых изображений и использования затем инвариантных КФ ЛФК при распознавании полученных бинарных контурных изображений. Разработан оптимизированный алгоритм морфологического оконтуривания изображений; разработанный алгоритм превосходит по соотношению «скорость/качество» стандартные алгоритмы; продемонстрирована применимость алгоритма при использовании для предобработки полутоновых изображений в корреляционных системах, осуществляющих распознавание контурных изображений. Проведены компьютерные эксперименты по корреляционному распознаванию полутоновых изображений сцены,

подвергнутых искажениям «одновременно плоский поворот и изменение масштаба» с использованием КФ ЛФК и процедур оконтуривания. Возможные значения поворота ± 10 град, изменения масштаба $\pm 10\%$.

10. Разработан и экспериментально опробован способ реализации КФ ЛФК в виде компьютерно синтезированных Фурье-голограмм (голографических фильтров) в схемах лазерных дифракционных корреляторов. Проведен анализ ухудшения корреляционных свойств голографических фильтров при ограничении числа градаций пропускания; выявлена необходимость использования не менее 16ти уровней пропускания для сохранения избирательных характеристик фильтров. Показана возможность бинарного представления голографических фильтров при сохранении их избирательных характеристик. Результаты экспериментального макетирования когерентного коррелятора с голографическими фильтрами демонстрируют возможность достижения инвариантности распознавания при применении КФ ЛФК, в том числе, в случае использования для ввода соответствующих синтезированных Фурье-голограмм голографических носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В реферируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the optical two-layer neural network" // Optical memory & neural network v4, No 4, 1995, pp.315-321.
2. Н.Н. Евтихийев, Р.С. Старилов «Разработка принципов построения оптоэлектронных процессоров на основе сэндвич-структур» // Научноёмкие технологии т2, №4, 2001, стр.41-49.
3. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov "Methods of design of specialized optoelectronic processors constructed as hybrid microcircuits for realization of neural network algorithms" // Optical memory & neural network v10, No 4, 2001, pp.219-225.
4. N.N. Evtikhiev, P.A. Ivanov, A.V. Kamensky, R.S. Starikov, M.I. Zabulonov "Experiments on realization of wavelet transform based on architecture of hybrid optoelectronic chip" // Optical memory & neural network v11, No 1 2002, pp.39-43.

5. Н.Н. Евтихийев, А.В. Захарцев, П.А. Иванов, Б.М. Рейзин, С.А. Сироткин, Р.С. Стариков «Синтез и исследование инвариантных фильтров с линейным фазовым коэффициентом для задач оптико-электронного корреляционного различения изображений» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №5 2005, стр.12-19.
6. Н.Н. Евтихийев, М.И. Забулонов, П.А. Иванов, А.В. Каменский, Р.С. Стариков, А.В. Шевчук «Разработка оптических вычислителей в виде гибридных микросхем и микромодулей: компьютерное моделирование и экспериментальное макетирование» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №5 2005, стр.20-28.
7. Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков, Е.Ю. Злоказов, С.А. Сироткин, Р.С. Стариков «Реализация инвариантных голографических фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта» // Квантовая электроника т38, №2, 2008, стр.191-193.
8. Р.С. Стариков «Оптоэлектронный вектор-матричный процессор: схемотехнические ограничения» // Радиотехника и электроника т53, №8, 2008, стр.980-986.
9. Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, А.В. Шевчук «Экспериментальное моделирование схемы прецизионного измерения кольцевых и секторных элементов пространственного спектра интенсивности изображений на базе массива фотодетекторов специальной топологии» // Радиотехника и электроника т53, №11, 2008, стр.1410-1416.
10. Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков, М.В. Конник, Р.С. Стариков «Исследование алгоритмов оконтуривания изображений, полученных при различных условиях регистрации» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, т10, №5, 2009, стр.39-43.
11. Р.С. Стариков «Влияние ограничений динамического диапазона голографического носителя на свойства голографических инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, т10, №6, 2009, стр.51-54.
12. Р.С. Стариков «Сравнение свойств инвариантных корреляционных фильтров различных типов» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, т10, №7, 2009, стр. 57-64.
13. N. N. Evtikhiev, E. Yu. Zlokazov, S. N. Starikov, R. S. Starikov, E. A. Shapkarina, and D. V. Shaulskiy "LPCC Filter Realization in 4-F Correlator of Images with Application of Purely Amplitude Binary Spatial Modulation" // Optical memory & neural network (Information Optics) v18 No 3 2009 pp.141-150.
14. Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков, Е.Ю. Злоказов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков «Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом: варианты реализации в схемах когерентных корреляторов изображений» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление», №4 2010, стр.227-233.

Некоторые работы в других изданиях:

15. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the two-layer neural network based on an optical vector-matrix multiplier" // Optical Computing international conference, Edinburg 22-25 August 1994, Abstracts WP-147.
16. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the optical two-layer neural network." // proc. SPIE v2430, 1994, pp.189-197.
17. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, I.B. Scherbakov, A.E. Gaponov, B.N. Onyky. "Hybrid optoelectronic neurocomputer: variants of realizations" // proc. SPIE v2492, 1995, pp.96-103.
18. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the two-layer neural network based on an optical vector-matrix multiplier" // in Optical Computing (Inst. Phys. Conf. Ser. No139) Part 4, I.O.P. Publishing Ltd 1995, pp.467-470.
19. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, I.B. Scherbakov, B.N. Onyky, D.V. Repin, M.I. Zabulonov. "Optical Hardware Implementation of the Two-Layer Neural Network with the Pre-Processing Unit for Invariant Pattern Recognition" // proc. SPIE v2752 1996 pp.281-289.
20. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, I.B. Scherbakov, B.N. Onyky, D.V. Repin, M.I. Zabulonov. "The Hierarchical Hybrid Optoelectronic Neural Network System Based on the Vector-Matrix Multiplier with the Pre-Processing Unit" // Photonics and Optoelectronics v2, No 4, 1994, pp.187-196.
21. N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, I.B. Scherbakov, B.N. Onyky, D.V. Repin, M.I. Zabulonov. "The Hierarchical Hybrid Optoelectronic Neural Network System Based on the Vector-Matrix Multiplier with the Pre-Processing Unit" // proc. SPIE v2969, 1996, pp.48-51.
22. Н.Н. Евтихийев, Р.С. Старииков. «Методы построения специализированных оптоэлектронных вычислителей в виде гибридных микросхем и микромодулей для реализации нейросетевых алгоритмов» // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-99», часть 2, М., МИФИ, 1999, стр.50-55.
23. Н.Н. Евтихийев, А.В. Каменский, М.И. Забулонов, Р.С. Старииков «Экспериментальные исследования по применению широтно-импульсной модуляции для представления аналоговых сигналов в гибридных оптоэлектронных микросхемах» // Научная сессия МИФИ-1999, т.3, М., МИФИ 1999, стр.82-83.

24. N. N. Evtikhiev, P.A. Ivanov, A.S. Lyapin, A.V. Shevchuk, S.A. Sirotkin, R.S. Starikov, A.V. Zaharcev "Computer simulations for comparison of pattern recognition based on different variants of distortion invariant correlation filters" // proc. SPIE, v5267, 2003, pp.220-227.
25. N. N. Evtikhiev, P.A. Ivanov, A.S. Lyapin, B.M. Reyzin, A.V. Shevchuk, S.A. Sirotkin, R.S. Starikov, A.V. Zaharcev "Synthesis and research of LPCC invariant correlation filters for pattern recognition" // proc. SPIE v5851, 2005, pp.242-246.
26. Р.С. Стариков «Оптоэлектронный вектор-матричный процессор: схемотехнические ограничения» // сб. тезисов докладов конгресса «Фундаментальные проблемы оптики 2006», С-Пб., ИТМО, электронное издание, 2006.
27. S.Yu. Shelestov, A.V. Shevchuk, S.A. Sirotkin, R.S. Starikov "LPCC invariant correlation filters: variants of application" // proc. SPIE, v6595, 2007 65951Q.
28. N. N. Evtikhiev; S. N. Starikov; S. A. Sirotkin; R. S. Starikov; E. Yu. Zlokazov "LPCC invariant correlation filters: realization in 4-f holographic correlator" // proc. SPIE, v6977, 2008, 69770C.
29. N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, R.S. Starikov, E.Y. Zlokazov «LPCC filters realization as binary amplitude hologram in 4-f correlator: range limitation of hologram pixels representation» // Proc. SPIE, v7340, 2009, 73400C.
30. R.S. Starikov, E.Yu. Zlokazov «Computer generated holographic invariant LPCC filters for 4-f correlator» // Proc. SPIE, v7358, 2009, 73580W.
31. Н.Н. Евтихиев, С.Н. Стариков, Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Реализация инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта: влияние бинаризации» // Научная сессия МИФИ-2010, сборник трудов т4, М., МИФИ 2010, стр.207-210.
32. Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Голографические компьютерно-синтезированные инвариантные корреляционные фильтры с линейными фазовыми коэффициентами: влияние бинаризации на качество распознавания» // 7 Международная научно-практическая конференция «Голография. Наука и практика», 27 Школа по когерентной оптике и голографии, сборник трудов, Москва, 2010, стр.149-155.
33. N. N. Evtikhiev, E.Yu. Zlokazov, S.N. Starikov, R.S. Starikov, and D.V. Shaulskiy «Amplitude holographic LPCC filters for 4-f correlator: variants of binary realization» // Proc. SPIE, v7835, 2010, 78350M.

Список цитируемой литературы

1. Дж. Гудмен Введение в Фурье оптику. М.: Мир 1969
2. Р.С. Стариков Автореферат диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук, М.: МИФИ 1997
3. А. Папулис Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир 1971
4. B.V.K. Vijaya Kumar, A. Mahalanobis, R. Juday Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press 2005
5. L. Hassebrook, B.V.K. Vijaya Kumar, L. Hostetler "Linear phase coefficient composite filter banks for distortion invariant optical pattern recognition" // Opt Eng, v29, 1990, pp.1033-1043