

На правах рукописи

Шаульский Дмитрий Викторович

**Инвариантные фильтры с минимизацией энергии
корреляции для лазерных систем распознавания
полутоновых изображений**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



20 АПР 2016



006648289

Москва 2016

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете "МИФИ"

- Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Стариков Ростислав Сергеевич
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
академик РАН, директор института автоматике
и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук
Кульчин Юрий Николаевич
- доктор технических наук, профессор,
руководитель научно-исследовательской
лаборатории ВНИИ оптико-физических измерений
Вишняков Геннадий Николаевич
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики»
(Университет ИТМО)

Защита состоится **18 мая 2016** года в 16-30 на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направить по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., 31, диссертационные советы НИЯУ МИФИ (тел. +7(495)324-84-98).

Автореферат разослан "07" 04 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Стариков Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Методы корреляционного распознавания изображений применяются в задачах поиска, идентификации, классификации, локализации и слежения за объектами. Перспективность данных методов в значительной степени определяется возможностями их оперативной реализации в оптико-электронных системах, базирующихся как на электронных цифровых, так и на сверхвысокоскоростных лазерных корреляторах.

В основе корреляционных методов распознавания лежит операция сравнения входного распознаваемого изображения с набором изображений эталонных объектов из базы данных системы распознавания. Под сравнением подразумевается вычисление двумерной корреляционной функции между изображениями. По характеристикам результирующего корреляционного распределения, в частности по наличию или отсутствию корреляционного пика, его локализации, интенсивности и форме делают вывод о принадлежности входного объекта, представленного на изображении, к классу эталонного.

Существенной проблемой корреляционного метода является его неустойчивость к шумам и помехам входного изображения. Для адекватного распознавания необходимо, чтобы корреляционный пик обладал характеристиками, достаточными для выделения его на фоне всего выходного распределения, которое может включать в себя ложные корреляционные пики и шумы различной природы. Ложные корреляционные пики могут появиться как следствие корреляции эталона с ложными объектами. Наличие шумов во входной плоскости может привести к снижению точности локализации интересующего объекта в плоскости входного изображения. Наравне с этим метод корреляционного распознавания неустойчив к возможным искажениям изображения эталонного объекта. Применение в качестве опорного объекта математически синтезированных инвариантных корреляционных фильтров, содержащих информацию как об эталонном объекте, так и об его возможных искажениях, позволяет в той или иной степени избавиться от перечисленных недостатков.

Наибольший практический интерес в настоящее время представляет рас-

познавание объектов представленных в виде полутоновых изображений. Анализ показывает, что перспективным способом для устойчивого к искажениям и помехам распознавания полутоновых изображений является использование составных фильтров с минимизацией энергии корреляции.

Для достижения наибольшей производительности оптико-электронной системы корреляционного распознавания необходимо использовать устройства с как можно меньшим временем ввода кадра. Однако, доступные в настоящее время высокоскоростные модуляторы с большим разрешением обладают ограниченным динамическим диапазоном модуляции. Наиболее быстрыми являются бинарные модуляторы света. Исследование влияния ограничений динамического диапазона модуляции на дискриминационную способность и исследование возможностей применения бинарной модуляции при реализации корреляционных фильтров играет ключевую роль при разработке оптико-электронных корреляционных устройств для систем высокоскоростного распознавания изображений.

В соответствии с выше указанным, целью диссертации является разработка методов синтеза и применения инвариантных фильтров с минимизацией энергии корреляции для распознавания полутоновых изображений, в том числе разработка способов их реализации в современных лазерных дифракционных корреляторах.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение сравнительных исследований особенностей синтеза и характеристик распознавания различных типов инвариантных фильтров с минимизацией энергии корреляции.
2. Исследование и разработка методов реализации инвариантных фильтров с минимизацией корреляционной энергии в виде синтезированных дифракционных элементов в схемах когерентных оптических корреляторов изображений, в том числе посредством их адаптации к модуляционным характеристикам устройств ввода, используемых в схемах когерентных оптических корреляторов изображений.

3. Численное моделирование работы когерентного оптического коррелятора, использующего фильтры с минимизацией энергии корреляции, реализуемых с помощью современных средств модуляции лазерного излучения в условиях ограничений динамического диапазона модуляции.
4. Экспериментальная реализация инвариантных фильтров с минимизацией энергии корреляции на базе современных средств модуляции лазерного излучения.
5. Исследование и разработка методов синтеза и реализации инвариантных фильтров с минимизацией энергии корреляции при решении задач распознавания в конкретных практических постановках.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Показано, что характеристики современных средств пространственно-временной модуляции лазерного излучения допускают реализацию инвариантных фильтров с минимизацией корреляционной энергии в схемах когерентных корреляторов изображений в виде синтезированных дифракционных элементов двух типов - голографического и получаемого проекцией значений КФ на комплексную модуляционную характеристику.
2. Впервые предложен и опробован инвариантный фильтр с минимизацией средней энергии корреляции со сглаживающей вейвлет-функцией.
3. На основании результатов численного моделирования работы коррелятора Вандер Люгта, использующего средства модуляции с ограниченным динамическим диапазоном, впервые определены допустимые и достаточные границы числа уровней представления пропускания таких устройств, используемых для реализации фильтров с минимизацией энергии корреляции.
4. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность реализации фильтра с минимизацией корреляционной энергии в схеме когерент-

ного оптического коррелятора изображений в виде амплитудных Фурье-голограмм с использованием бинарных голографических носителей.

5. Впервые показано, что наличие дополнительной фазовой модуляции в амплитудном устройстве ввода входных изображений коррелятора Ван-дер Люгта может быть использовано для повышения качества распознавания путём учета фазового набега при синтезе инвариантного фильтра.

Практическое значение диссертации заключается в том, что она служит теоретической и экспериментальной базой для создания лазерных корреляционных устройств для высокоскоростных систем распознавания полутонных изображений. В работе предложены методы реализации инвариантных корреляционных фильтров с использованием современных средств модуляции лазерного излучения для их использования в когерентных корреляторах изображений.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Расчетным путем показано, что инвариантные фильтры с минимизацией энергии корреляции обеспечивают высокие статистические характеристики распознавания, в том числе при зашумлении входного объекта. Предложен и опробован новый тип фильтров с минимизацией энергии корреляции со сглаживающей вейвлет-функцией. В условиях сформулированной постановки модельной задачи распознавания определены требования к синтезу различных вариантов фильтров с минимизацией энергии корреляции - по числу эталонных изображений, к характеристикам фильтрации шума.
2. Инвариантные корреляционные фильтры с минимизацией энергии корреляции могут быть реализованы в когерентном корреляторе Ван-дер Люгта для решения задач высокоскоростного инвариантного распознавания полутонных изображений как в виде синтезированных Фурье-голограмм (голографических фильтров), так и в виде дифракционных элементов, получаемых проекцией значений КФ на комплексную модуляционную характеристику (проекционных фильтров).

3. В случае реализации в виде проекционного фильтра существенное влияние имеет наличие фазовой составляющей в модуляционной характеристике устройства ввода. Показана возможность повышения дискриминационных характеристик фильтра при его проектировании за счет применения дополнительных методов оптимизации.
4. В случае реализации в виде голографического фильтра ограничение числа уровней модуляции с 256 до 64 не приводит к заметным изменениям в результате распознавания. Также показана возможность использования бинарного раstra для представления уровней пропускания голографического фильтра. Определено, что при этом число передаваемых уровней пропускания должно быть не менее 16.
5. Продемонстрированы возможности решения ряда практических задач инвариантного распознавания с применением фильтров с минимизацией энергии корреляции.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на конференциях: на международной конференции SPIE "Defence, Security and Sensing" (Балтимор, США, 2012, 2013, 2014); на международной конференции SPIE "Optics + Photonics" (Сан Диего, США, 2015); на VII Международной конференции "Фундаментальные проблемы оптики" (С-Пб., ИТМО, 2011, 2012); на международных конференциях ГОЛОЭКСПО (2010, 2012, 2014); на всероссийских и международных научных Конференциях по фотонике и информационной оптике (НИЯУ МИФИ, Москва, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 гг).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, среди них: 10 статей в изданиях, включённых в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в базах данных WoS и Scopus, 18 - в трудах международных и всероссийских конференций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Результаты исследований в рамках диссертационной темы изложены в следующем порядке.

Первая глава содержит обзор сведений о методе инвариантного распознавания изображений по средством составных корреляционных фильтров и соответствующих им корреляционных метрик, а также о способах реализации метода в лазерных систем распознавания полутоновых изображений.

В §1.1 представлен обзор алгоритмов по синтезу инвариантных корреляционных фильтров для распознавания полутоновых изображений. Последовательно рассмотрены как базовые методы, позволяющие решать задачу распознавания при условии ограниченной применимости, так и более общие, отличающиеся высокой стойкостью к различным вариантам постановок задачи распознавания. Основной акцент в обзоре сделан на группу фильтров с минимизацией энергии корреляции ввиду их способности производить легко детектируемые острые корреляционные пики поддающиеся регулировке по высоте в задачах многоклассового распознавания. Также в разделе представлен новый, не встречавшийся ранее в литературе вид фильтра с минимизацией энергии корреляции (фильтр со сглаживающей вейвлет-функцией, МСЭКВ).

В §1.2 подробно рассмотрены существующие способы оценки результата применения фильтров, именуемые корреляционными метриками.



Рис. 1: Исследуемые объекты - модели танков Abrams, Chieftain, Leopard2, T72. Пример используемых ракурсов обзора

Приведен обзор литературы отражающий различную их интерпретацию, как статистических величин, так и характеристик формы отдельно взятого корреляционного выхода.

В §1.3 описаны две базовые схемы лазерных систем распознавания (когерентных корреляторов), позволяющие использовать корреляционные фильтры для задач операционного распознавания изображений. Рассмотрены основные принципы реализации фильтров в данных схемах.

Вторая глава содержит результаты первичного моделирования использования существующих фильтров с минимизацией энергии корреляции для решения задачи распознавания изображений. В главе представлена постановка задачи распознавания, включающая требование инвариантности действия фильтра к изменению ракурса обзора объекта (рис. 1) и наличие шума в изображении объекта. Действие фильтра подразумевает дискриминацию объектов ложного класса и распознавание объектов эталонного класса, выраженные в отсутствии или наличии корреляционного пика установленной высоты соответственно. В результате обзора литературы и проведенного первичного моделирования было выявлено, что наиболее перспективным фильтром является фильтр с минимальным шумом и энергией корреляции (МШЭК).

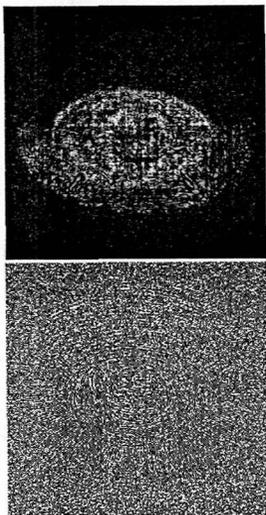


Рис. 2: Амплитуда (сверху) и фаза (снизу) фильтра МШЭК

В третьей главе более детально раскрыты особенности синтеза и применения фильтра с минимальным шумом и энергией корреляции. В §3.1 исследован вопрос влияния фона в изображениях распознаваемого объекта. Выявлено, что сложность корреляционного различия возрастает с увеличением степени перекрытия спектра мощности шумового фона с "информативной" областью спектра мощности объектов. Также подтвердилась возможность повышения качества распознавания за счет учета априорной информации о шумовом фоне при синтезе фильтра МШЭК.

В §3.2 представлен результат по исследованию максимально допустимого количества входящих в состав фильтра изображений обучающего набора, выявлен рост высоты ложных корреляционных пи-

ков выражающийся в увеличении значения оценки ошибки распознавания. Получены зависимости значения оценки ошибки распознавания от числа входящих в состав фильтра изображений для различных ракурсов обзора объекта. Результат демонстрирует эффект, который можно интерпретировать как увеличение коэффициента пропуска фильтра по мере увеличения количества изображений входящих в его состав, также зависящий от размера области занимаемой объектом на изображении (ракурса обзора).

§3.3 содержит результаты исследования возможности использования различных источников (камер) для получения изображений обучающего набора и изображений распознаваемого объекта. Представлен результат по синтезу фильтра из изображений векторной 3D модели и последующему его применению в распознавании реального объекта.

Выявлена сильная зависимость результата распознавания от условий освещения при захвате изображения векторной модели.

В §3.4 представлен результат моделирования решения задачи многоклассового распознавания (рис. 3) с применением фильтра МШЭЖ.

Возможность предопределять значение высоты результирующего корреляционного пика (рис. 4) при синтезе фильтра позволяет классифицировать объекты на более чем две группы (ложные и эталонные).

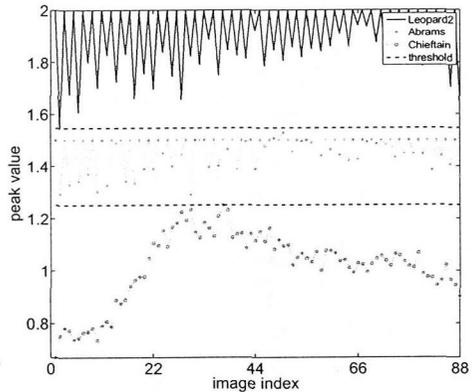


Рис. 3: Пример многоклассового распознавания. Зависимость высоты корреляционных пиков от угла поворота объектов для трех типов объектов.

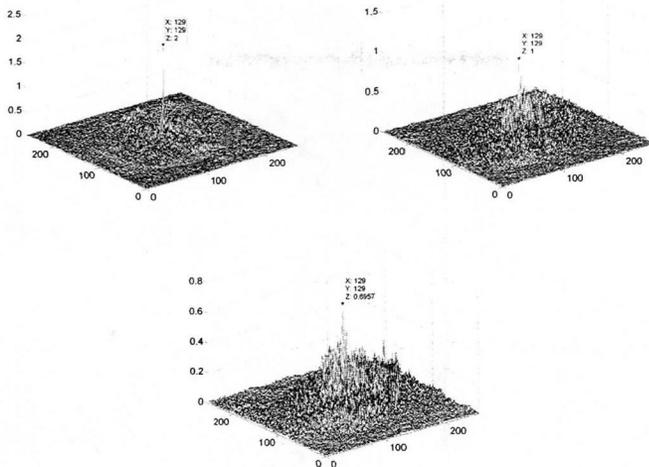


Рис. 4: Вид корреляционного выхода для (слева направо) эталонного класса 1, эталонного класса 2 и ложного класса (не участвует в обучении фильтра).

В §3.5 демонстрируется зависимость результата применения корреляционных метрик от параметров их расчета. Установлена необходимость предопределения данных параметров, приведен пример метода расчета для получения оптимальных значений.

Четвертая глава посвящена рассмотрению вопроса реализации фильтра в лазерных системах распознавания с применением современных средств модуляции света.

§4.1 содержит результаты моделирования реализации корреляционного фильтра МШЭК в условиях ограничения глубины градации полутонового представления. В данном разделе рассмотрен способ представления корреляционного фильтра как комплексного объекта в виде чисто амплитудного объекта - голографического фильтра. Определены нижние предельные значения необходимого уровня глубины градации полутонового представления - 64 уровня (рис. 5).

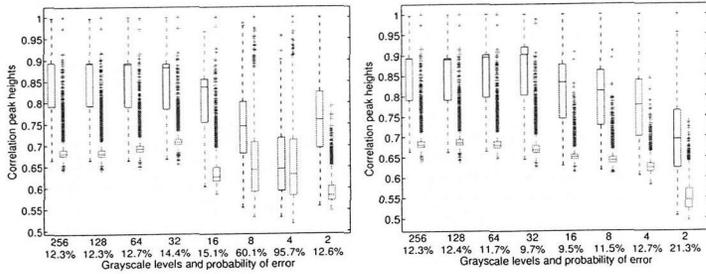


Рис. 5: Диаграмма "box-and-whiskers" демонстрирующая зависимости распределений значений высоты корреляционных пиков от уровня глубины градации полутонового представления с указанием соответствующих значений оценки ошибки распознавания. Представлены метод деления гистограммы на равные участки (слева) и метод мульти-Отсу (справа).

В §4.2 представлены результаты экспериментального восстановления импульсного отклика голографических фильтров отображаемых посредством различных современных пространственно-волновых модуляторов света (ПВМС) рис. 6.

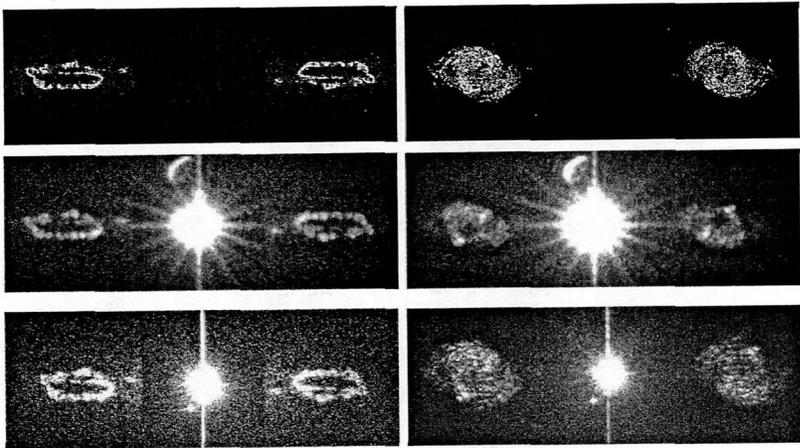


Рис. 6: Центральные части откликов голографических фильтров. Сверху вниз: численное восстановление (DC компонента удалена), амплитудный ПВМС LC 2002 (эксперимент), фазовый ПВМС Hologue Pluto VIS (эксперимент). Фильтр рассчитанный из 3x (слева) и 405i (справа) изображений.

В §4.3 представлен второй способ реализации корреляционных фильтров в условиях ограничения глубины градации полутонового представления. Данный способ определен как поиск оптимальной проекции фильтра. В результате численной обработки корреляционный фильтр представляется в виде объекта, не требующего сокращения глубины градации полутонового представления с учетом типа используемого ПВМС. На примере бинарного амплитудного модулятора расчетно и экспериментально были получены отклики оптимальной проекции фильтра (рис. 7).

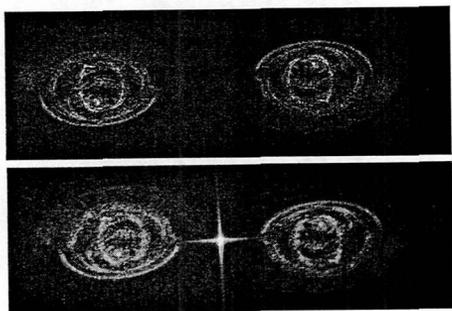


Рис. 7: Численно (сверху) и экспериментально (снизу) полученные отклики оптимальной проекции фильтра.

§4.4 содержит результаты численного эксперимента по использованию ПВМС с сопряженной амплитудной и фазовой модуляцией в задачах распознавания объектов. Продемонстрировано, что в случае учета при синтезе фильтра добавляющейся в ПВМС фазовой модуляции качество распознавания может возрасти в сравнении со случаем чисто амплитудной модуляции.

В пятой главе приведены результаты по использованию корреляционного фильтра при распознавании полутоновых изображений полученных с помощью аэрофотосъемки. Рассмотрена устойчивость инвариантного распознавания к изменению климатических условий регистрируемой территории. Проведено исследование по возможному синтетическому расширению обучающего набора изображений. Продемонстрированы результаты распознавания объектов представленных на радиолокационных изображениях и изображениях видеопоследовательности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведены обзор и предварительное моделирование методов корреляционного распознавания с использованием составных корреляционных фильтров, продемонстрирована их пригодность и устойчивость к различного рода искажениям в задачах инвариантного распознавания. Многообразие вариантов фильтров с минимизацией энергии корреляции позволяет адаптировать корреляционный метод к специфике конкретной задачи распознавания.
2. Предложен и опробован инвариантный фильтр с минимизацией средней энергии корреляции со сглаживающей вейвлет-функцией. Продемонстрирована возможность управления специфической формой корреляционного пика, которая может быть использована для повышения характеристик распознавания при применении соответствующих специальных корреляционных метрик.
3. Создан комплекс программного обеспечения, позволяющий синтезировать и исследовать различные варианты фильтров с минимизацией энергии корреляции. Собрана установка, позволяющая создавать базы данных изображений, представляющих объект в различных ракурсах и условиях освещения. Для проведения исследований сформулирована «жёсткая» модельная постановка задачи распознавания изображений, подразумевающая различение объектов истинного класса от сходных ложных в условиях пространственного поворота. Определены условия синтеза и возможные характеристики распознавания корреляционных фильтров исследуемых типов.
4. Анализ методов корреляционного распознавания, основанных на использовании составных корреляционных фильтров, и результаты первичного моделирования показали, что благодаря возможности решения задач многоклассового распознавания и устойчивости к шуму одним из наиболее перспективных для применения корреляционных фильтров является фильтр с минимумом шума и энергии корреляции.

5. В условиях модельной задачи распознавания определены условия и выделены особенности синтеза фильтров с минимумом шума и энергии корреляции. В частности, показано, что: Использование фильтров с минимумом шума и энергии корреляции совместно с обучающим спектром мощности шума позволяет повысить дискриминационные характеристики фильтра. Увеличение количества изображений, входящих в состав фильтра увеличивает коэффициент пропускания фильтра, что в конечном счете ведет к критическому снижению его дискриминационных характеристик.
6. Использование различных источников для получения изображений обучающего набора и захвата изображений распознаваемого объекта влечет за собой снижение степени инвариантности КФ. Использование векторной модели при получении обучающих изображений для КФ может быть использовано для автоматизации процесса синтеза фильтра. В этом случае требуется решение задачи адаптации освещения объекта.
7. Показано, что характеристики современных средств пространственно-временной модуляции лазерного излучения допускают реализацию инвариантных фильтров с минимизацией корреляционной энергии в схемах когерентных корреляторов изображений в виде синтезированных дифракционных элементов двух типов - голографического фильтра, синтезируемого как голограмма Фурье и проекционного, получаемого проекцией значений КФ на комплексную модуляционную характеристику.
8. Для реализации КФ с оптимизацией корреляционных характеристик в схеме коррелятора Вандер Люгта в виде синтезированных голографических фильтров могут быть использованы пространственно-временные модуляторы света с ограниченным динамическим диапазоном представления пропускания. При этом ограничение числа уровней модуляции с 256 до 64 не приводит к заметным изменениям в результате распознавания. Возможно использование бинарного раstra для представления уровней пропускания голографического фильтра при этом число пере-

даваемых уровней пропускания должно быть не менее 16.

9. Реализация фильтра проекционного типа требует его адаптации к характеристикам используемого ПВМС. В ряде случаев поиск представления фильтра требует решения дополнительной задачи оптимизации. Продемонстрированы возможности такой реализации.
10. Учет фазового набега ПВМС при синтезе фильтра влечет за собой повышение дискриминационных характеристик фильтра.
11. Продемонстрированы возможности применения разрабатываемых методов в задачах распознавания изображений аэросъемки различных типов: аэрофотоснимках с различным атмосферным фактором, радиолокационных изображений наземных объектов, а также объектов на кадрах видеопоследовательности, полученной при аэросъемке.

СТАТЬИ В ИЗДАНИЯХ, ВКЛЮЧЁННЫХ В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК РФ
И/ИЛИ ИНДЕКСИРУЕМЫХ В БАЗАХ ДАННЫХ WOS И SCOPUS:

1. N.N. Evtikhiev, E.Y. Zlokazov, S.N. Starikov, R.S. Starikov, E.A. Shapkarina, 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), Vol. 18 No 3, 141-150 (2009)
2. N. N. Evtikhiev, E.Yu. Zlokazov., S.N. Starikov, R.S. Starikov, D.V. Shaulskiy "Amplitude holographic LPCC filters for 4-f correlator: variants of binary realization"// Proceedings of SPIE Vol. 7835, 78350M (2010)
3. N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, D.V. Shaulskiy, R.S. Starikov, E.Y. Zlokazov "Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator"// Optical Engineering, Vol. 50 No 6, 065803 (2011)
4. N.N. Evtikhiev, D.V. Shaulskiy, E.Y. Zlokazov, R.S. Starikov "Variants of minimum correlation energy filters: comparative study"// Proceedings of SPIE Vol. 8398, 83980G (2012)
5. Н.Н. Евтихиев, С.Н. Стариков, Е.Д. Проценко, Е.Ю. Злоказов, И.В. Солякин, Р.С. Стариков, Е.А. Шапкарина, Д.В. Шаульский «Макет инвариантного коррелятора с использованием жидкокристаллических пространственных временных модуляторов света» // Квантовая электроника, т.42 №11, 1039-1041 (2012)
6. N.N. Evtikhiev, D.V. Shaulskiy, E.Y. Zlokazov, R.S. Starikov "MINACE filter realization as computer generated hologram for 4-f correlator"// Proceedings of SPIE Vol. 8748, 87480O (2013)
7. D.V. Shaulskiy, N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, S.N. Starikov, E.Y. Zlokazov, "MINACE filter: variants of realization in 4-f correlator"// Proceedings of SPIE Vol. 9094, 90940K (2014)
8. D.V. Shaulskiy, M.V. Konstantinov, R.S. Starikov "Object recognition via MINACE filter trained on synthetic 3D model"// Proceedings of SPIE Vol.

9598, 959810 (2015)

9. D.V. Shaulskiy, N.N. Evtikhiev, E.Y. Zlokazov, S.N. Starikov, R.S. Starikov, E.K. Petrova, D.Y. Molodtsov "Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators" // Proceedings of SPIE Vol. 9598, 95980T (2015)
10. N.N. Evtikhiev, E.K. Petrova, R.S. Starikov, D.V. Shaulskiy, E.Y. Zlokazov "MINACE Filters: Recognition of the Images Received from Various Independent Sources" // Physics Procedia, Vol. 73, 246-250 (2015)

ПУБЛИКАЦИИ В ТРУДАХ КОНФЕРЕНЦИЙ:

11. Е.Ю. Злоказов, Д.В. Шаульский, научные руководители - Н.Н. Евтихийев, Р.С. Стариков, «Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом: влияние характеристик обрабатываемых изображений» // Научная сессия МИФИ-2010, XIII конференция студентов и молодых учёных ч.3, М., МИФИ 2010, стр.134.
12. Е.Ю. Злоказов, Д.В. Шаульский, научные руководители - Н.Н. Евтихийев, Р.С. Стариков «Реализация инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта: влияние бинаризации» // Научная сессия МИФИ-2010, XIII конференция студентов и молодых учёных ч.3, М., МИФИ 2010, с.135.
13. Н.Н. Евтихийев, 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, Аннотации докладов т.2, М., МИФИ 2010, с.215.
14. Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом: влияние характеристик обрабатываемых изображений» // Научная сессия МИФИ-2010, Аннотации докладов т.2, М., МИФИ 2010, с.216.

15. Н.Н. Евтихийев, 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, т.4, М., МИФИ 2010, с.207-210.
16. Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Голографические компьютерно-синтезированные инвариантные корреляционные фильтры с линейными фазовыми коэффициентами: влияние бинаризации на качество распознавания» // Сборник трудов 7 Международной научно-практической конференции «ГОЛОЭКСПО-2010 - Голография. Наука и практика» и 27 Школы по когерентной оптике и голографии, Москва, 2010, с.149-155.
17. Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский, «Реализация инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта в виде бинарных голограмм» // сб. тезисов докладов конгресса Фундаментальные проблемы оптики 2010, СПб., ИТМО, с.73-76
18. Е.Ю. Злоказов, И.А. Курбатов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Исследование дискриминационных свойств инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров корреляционного пика» // Сборник трудов научно-технической конференции-семинара по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2011, с.187-188.
19. N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, D.V. Shaulskiy, R.S. Starikov, E.Y. Zloказov "Holographic filter based on Linear Phase Coefficient Composite Filter for image recognition using 4-F correlator" // Information Photonics (IP), 2011 ICO International Conference 18-20 May 2011, 5953717.
20. Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Разработка методов применения инвариантных корреляционных фильтров для обработки полутоновых изображений, полученных при аэрофото-съемке» // Сборник трудов всероссийской конференции по фотонике и

информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2012, с.180-181.

21. Е.Ю. Злоказов, И.А Курбатов, Е.К. Петрова, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Исследование информативной ёмкости и шумовых характеристик инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров корреляционного пика» // Сборник трудов всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2012, с.196-197.
22. Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Варианты корреляционных фильтров с минимизацией энергии корреляции для схем голографических корреляторов изображений» // Сборник трудов 9 Международной научно-практической конференции «ГОЛОЭКСПО-2012», Суздаль, 2012
23. Н.Н. Евтихийев Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Исследование дискриминационных характеристик вариантов корреляционных фильтров с минимизацией энергии корреляции» // Сборник трудов всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2013, с.156-158.
24. Е.Ю. Злоказов, И.А. Курбатов, Е.К. Петрова, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Варианты корреляционных фильтров с минимизацией энергии корреляции: голографическая реализация» // Сборник трудов всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2013, с.268.
25. Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Исследование корреляционных метрик для распознавания изображений с использованием инвариантных фильтров с минимумом шума и энергии корреляции» // Сборник трудов всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2014, с.151
26. Р.С. Стариков, С.Н. Стариков, Е.Ю. Злоказов, Д.В. Шаульский, Е.К. Петрова, М.В. Константинов, Н.Н. Евтихийев «Инвариантные фильтры с

минимумом шума и энергии корреляции: голографическая реализация»
// Сборник трудов Международной научно-практической конференции
«ГОЛОЭКСПО-2014», Сочи, 2014

27. М.В. Константинов, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Применение векторных моделей трёхмерных объектов для представления эталонной информации при синтезе инвариантных корреляционных фильтров с минимизацией шума и энергии корреляции» // Сборник трудов международной конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2015, с.165
28. Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, Е.К. Петрова, Р.С. Стариков, Д.В. Шаульский «Инвариантные фильтры с минимизацией шума и энергии корреляции: исследование характеристик распознавания изображений, полученных из различных независимых источников» // Сборник трудов международной конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, Москва, 2015, с.360