

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.45:681.7

*На правах рукописи*

ВЕНСКО  
Андрей Вячеславович

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ПАЧИНИН Виталий Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой ИСиТ Института информационных технологий  
учреждения образования «Белорусский  
государственный университет информатики и ра-  
диоэлектроники»

Рецензент: **НОВИКОВ Сергей Олегович**,  
кандидат технических наук, доцент, кафедра  
«Электрические системы» учреждения образова-  
ния «Белорусский национальный технический  
университет»

Защита диссертации состоится «27» июня 2018 г. года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## **ВВЕДЕНИЕ**

Оптико-электронные приборы и комплексы нашли самое широкое применение в промышленности, медицине, космических системах дистанционного зондирования, системах охраны и наблюдения, системах связи и управления. В зависимости от области применения к ним применяются различные требования.

Характеристики качества изображения зависят от требований, предъявляемых к оптической системе приборов. Оценки качества оптического изображения для различных систем выбирают в зависимости от выполняемых ими задач.

Заложенные разработчиками характеристики и параметры реализуются в процессе изготовления. Важной задачей данной процедуры является совершенствование и развитие методов контроля и аттестации оптической продукции. Применяемые в настоящее время средства оптического контроля и исследования нередко по своим возможностям не удовлетворяет требованиям оценки качества оптических систем. Преобладают субъективные визуальные оценки. Слабо решаются задачи комплексного оснащения рабочих мест в условиях крупномасштабного производства, в процессе эксплуатации и ремонта.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Развитие средств оптических измерений происходит с использованием цифровой техники и технологии цифровой обработке изображений. Такие системы являются оптико-электронными, в состав которых входит оптическая система в виде специальной видеокамеры, которая подключена устройству обработки информации, микроконтроллеру или компьютеру. Компьютерная программа должна производить преобразование оптического изображения в цифровую форму, выполнить анализ и определить качество полученного изображения. Однако известные технологии определения качества изображения не всегда удовлетворяют возрастающим требованиям.

В настоящей работе решаются задачи оценки качества изображения прецизионных оптических систем путем применения новых технологий. Проведен анализ известных методов оценки качества изображений. На основе его предложены способы повышения точности измерений и эффективности контроля и исследования, проанализированы пакеты программ для

обеспечения функционирования установок оценки качества изображения оптических систем с новыми возможностями.

### **Степень разработанности проблемы**

Исследование алгоритмического и программного обеспечения для решения задач оценки качества изображения прецизионных оптических систем осуществлялось на основе построения теоретических моделей с использованием работ российских ученых: В.К. Кириловского, С.М. Латыева, И.Л. Анитропова-Лившица.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является неполное рассмотрение особенностей и условий улучшения качества изображения прецизионных оптических систем.

### **Цель и задачи исследования**

Целью настоящей работы являются разработка и исследование алгоритмического и программного обеспечения работы оптико-электронных приборов контроля обеспечивающих решения задач оценки качества изображения прецизионных оптических систем.

В соответствии с этим решались следующие задачи:

1. Информационное исследование прямых и косвенных методов оценки качества оптических систем, поиск путей повышения точности измерения.
2. Теоретический анализ математической базы алгоритмического и программного обеспечения компьютерной изофотометрии функции рассеивания точки (ФРТ) с изменяющимся временем накопления.
3. Исследование математической основы алгоритмического и программного обеспечения компьютерной изофотометрии функции рассеивания линии (ФРЛ) с изменяющимся световым потоком для установки автоматического определения ФРЛ и функции передачи модуля (ФПМ) оптической системы.

### **Область исследования**

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения.

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли работы зарубежных ученых в области определения качества изображения прецизионных оптических систем, а так-

же анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

### **Научная новизна**

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке алгоритмического и программного обеспечения измерительных систем, которые обеспечивают динамический диапазон регистрации освещенности в ФРТ до  $10^3 - 10^5$  при полноте передачи дифракционных осцилляций в изображении тест-объекта.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе методов оценки качества изображения прецизионных оптических систем.

Практическая значимость состоит в разработке алгоритмов расшифровки интерферограмм сдвига и метода восстановления деформации волнового фронта, что позволит улучшить качество оценки изображения прецизионных оптических систем.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математические основы метода компьютерной изофотометрии функции рассеяния точки.
2. Математические основы метода компьютерной изофотометрии функции рассеяния линии.
3. Способы восстановления волнового фронта при обработке интерферограмм сдвига.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и осуждались на 54-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь, 2018 г.), 13 Международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology» (г. Москва, Российская Федерация, 2018 г.), 14 Международная научно-практическая конференция «EurasiaScience» (г. Москва, Российская Федерация, 2018 г.), Международный научный журнал «Science Time» (г. Казань, Российская Федерация, 2018 г.), Международный научный журнал «Научное знание современности» (г. Казань, Российская Федерация, 2018 г.).

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Конструирование и технология электронных устройств».

### **Публикации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 5 печатных работах. В их числе 2 статьи в рецензируемом журнале, 3 статьи в сборнике материалов научных конференций.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 15 страниц.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

**Первая глава** посвящена исследованию общего способа оценки качества изображения оптических систем. Приведенный обзор позволяет классифицировать эти методы на две группы: методы косвенные и прямые.

**Во второй главе** рассмотрены традиционные методы оценки качества изображения и их достоинства и недостатки.

**Третья глава** посвящена исследованию компьютерной изофотометрии для анализа характеристик качества изображения по ФРЛ.

**Четвертая глава** посвящена исследованию косвенных методов контроля оптики и исследованию системы алгоритмов и программ обработки интерферограмм.

**В приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 103 страницы. Из них 69 страниц основного текста, 24 иллюстраций на 17 страницах, 7 таблиц на 7 страницах, библиографический список из 59 наименований на 7 страницах, список собственных публикаций соискателя из 5 наименований на 1 странице, 3 приложений на 10 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В **введении** приводят обзор литературы. Обосновывается актуальность избранной темы, формируются цель работы, ее задачи, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость, описывается структура диссертации.

**Первая глава** посвящена исследованию общего способа оценки качества изображения оптических систем. Приведенный обзор позволяет

классифицировать эти методы на две группы: методы косвенные и прямые.

Оба группы методов имеют свои достоинства и недостатки, но они хорошо дополняют друг друга, так как недостатки одной группы методов компенсируются достоинствами другой. Общая цель методов – определение базовой функции, характеризующей работу оптической системы (функция деформации волнового фронта в косвенном методе и функция рассеяния в прямом методе). С помощью математических средств преобразуют эти функции в различные характеристики качества изображения оптических систем, такие как, например частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), функция концентрации энергии (ФКЭ), пограничная кривая.

Исследование, выполненное в этой главе, показывает, что для определения по ФРТ характеристик качества оптических систем на соответствие требованиям, предъявляемым к изображению, нужно измерить функцию рассеяния точки в диапазоне освещенности свыше 4 порядков.

В результате проведенного анализа предложены следующие задачи исследования:

1. Исследование алгоритмического и программного обеспечения для компьютеризированной установки оценки качества оптических систем по функции рассеяния. При этом диапазон регистрируемой освещенности составляет  $10^4 - 10^5$ . Погрешность при преобразовании в другие характеристики меньше 5%.

2. Исследование алгоритмического и программного обеспечения для определения функции деформации волнового фронта на основе обработки интерферограмм сдвига.

Во **второй главе** рассмотрены традиционные методы оценки качества изображения и их достоинства и недостатки.

Исследование и анализ метода количественной оценки качества изображения оптических систем по ФРТ и ФРЛ показывают, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, метод видеосканирования широко используется из-за его простоты и оперативности, но он не позволяет измерить ФРТ с высокой точностью, так как динамический диапазон регистрации ФРТ по данному методу не выше  $10^2$ , что не позволяет определить ЧКХ с погрешностью меньше 10%.

При этом принципы изофотометрии, рассмотренные в этой главе для условий применения фотографического приемника изображения, полностью соблюдаются при использовании качественно иных приемников изображения, например таких, как телевизионные приемники, вклю-

чая видеокамеры широкого назначения, а также цифровые фотографические камеры. Они способны изменять время накопления в широком диапазоне, что обеспечивает перепады регистрируемой освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков.

К недостаткам метода изофотометрии можно отнести необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции. Это требование без применения компьютерных технологии приводит к снижению оперативности исследований. Поэтому данная работа посвящена развитию метода изофотометрии. Глубоко проанализированы теоретические основы методов изофотометрии. Выполнено объединение метода изофотометрии и метода видео-сканирования с помощью достижений информационных технологий для получения нового метода оценки качества оптических систем – компьютерной изофотометрии, на основе которого разработано новое поколение установок со следующими достоинствами: простотой, высокой скоростью (работа в реальном времени) и высокой точностью (погрешность меньше 5%).

**Третья глава** посвящена исследованию метода компьютерной изофотометрии для анализа характеристик качества изображения по функции рассеяния точки.

Показаны разработанные математические основы метода компьютерной изофотометрии ФРТ. Метод основан на регистрации серии фотоснимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции на одной и тоже ПЗС-матрице (рисунок 1), управляемой компьютером.

Из рисунка 1 можно выделить совокупность точек имеют один и тот же уровень освещенности. Такие точки составляет контур, который назван изофотой (слово «изофота» имеет значение – линия одинаковых освещенностей).

Уровень освещенности в точках изофоты соответствует времени накопления при регистрации фотоснимка.

Диапазон регистрации освещенности по данному методу не зависит от протяженности рабочего участка световой характеристики фотоприемника, а зависит от диапазона изменения времени накопления, который может быть свыше  $10^3$ .

Также показан алгоритм выделения изофоты и алгоритм определения ФРТ. В результате запоминания ряда фотометрических сечений и построения в пространственных координатах их исходного взаимного расположения формируется объемная диаграмма ФРТ, т.е. графическое отображение функции распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой.

Двумерный массив численных значений ФРТ фиксируется в памяти компьютера и далее используется для вычисления ряда характеристик качества изображения, таких как ФРЛ, ЧКХ, ФКЭ.

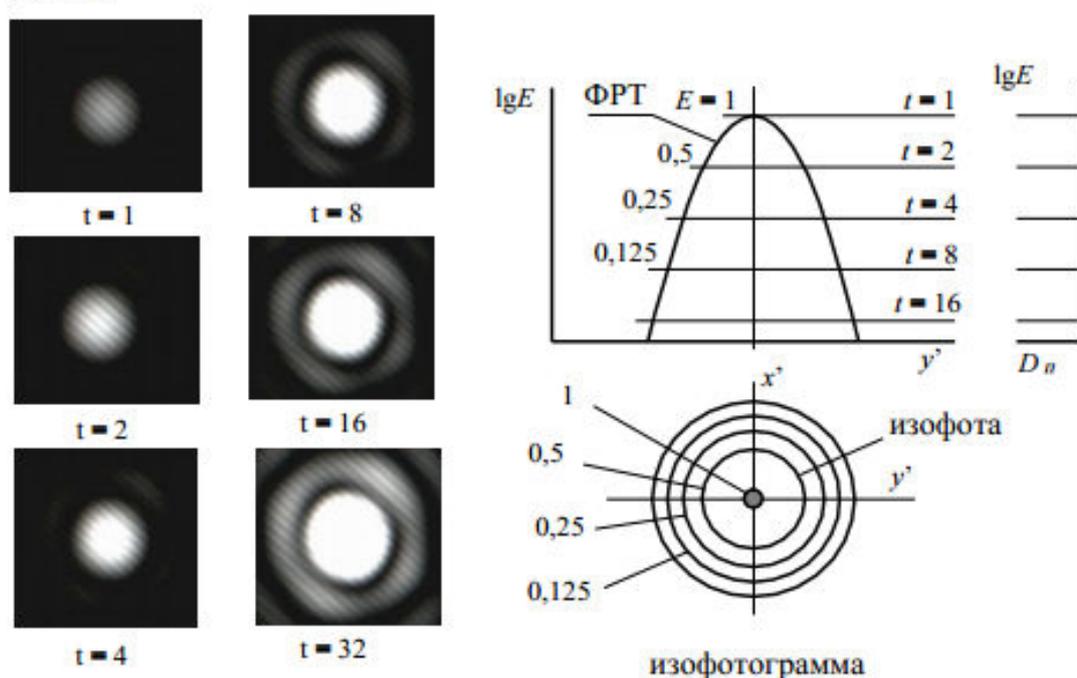
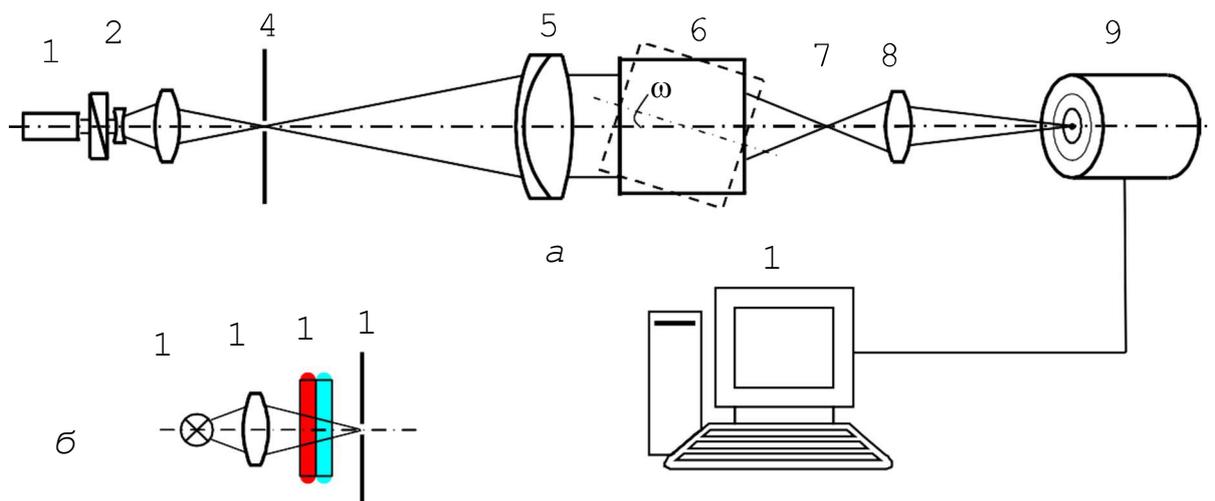


Рисунок 1 – Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотogramмы

Показана установка контроля качества изготовления оптических систем (рисунок 2) по методу компьютерной изофотометрии. Она исполнена на базе скамьи ОСК-2ЦЛ. Установка обеспечивает определение характеристик качества изображения оптических систем с фокусным расстоянием до 500 мм, диаметром входного зрачка до 150 мм. Погрешность определения ЧКХ и ФКЭ меньше 5%.

Так же представлены экспериментальные результаты оценки качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» при использовании источника белого света (рисунок 4). Разрешающая способность объектива по критерию Фуко составляет 30 мм-1, что соответствует требованиям, предъявляемым к кинообъективам и элементам фотоаппаратуры, выпускавшимся в СССР до 1988 г.

Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРТ на основе математического анализа и ряда экспериментов.



1 – лазер; 2 – фотометрический клин; 3 – система для фокусировки лазерного пучка; 4 – точечная диафрагма; 5 – объектив коллиматора; 6 – исследуемый объектив; 7 – изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 8 – проекционный микро-объектив; 9 – видеокамера (приемник изображения); 10 – компьютер; 11 – лампа накаливания; 12 – конденсор; 13 – светофильтр; 14 – точечная диафрагма

Рисунок 2 – Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления при помощи ПЗС-камеры

Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРТ по методу изофотометрии не превышает 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не более 5%.

**Четвертая глава** посвящена исследованию косвенных методов контроля оптики и разработке системы алгоритмов и программ обработки интерферограмм.

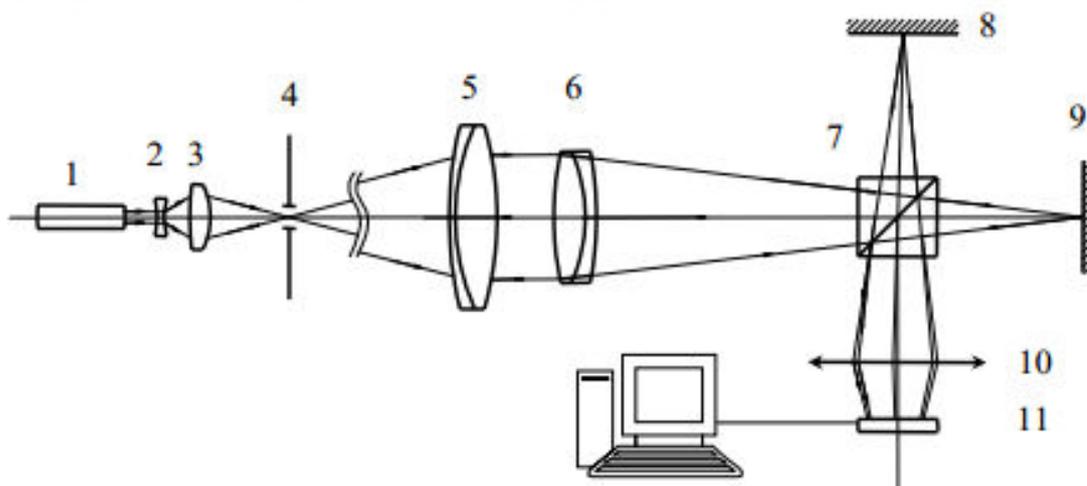
Представлено краткое описание интерференционного метода, его возможности и анализ источников погрешностей в этом метода.

Далее представлены схема и принцип работы интерферометра сдвига (рисунок 3). Интенсивность в произвольной точке в интерференционной картины выражает формула:

На базе принципа представлены алгоритм и программа для моделирования и исследования интерферограмм сдвига.

Далее в этом разделе показанны алгоритм и программа расшифровки интерферограмм сдвига методом восстановления функции дефор-

маций волнового фронта путем решения системы дифференциальных уравнений.



*1 – лазер; 2 и 3 – осветительный объектив; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемый объектив; 7 – светоделительный кубик; 8 и 9 – плоские автоколлимационные зеркала; 10 – объектив регистрирующей камеры; 11 – матрица регистрирующей камеры*

Рисунок 3 – Схема интерферометра бокового сдвига

Система уравнений решается численным методом Рунге – Кутты. В результате этого получаем функцию деформаций волнового фронта.

Представлено исследование и модернизация интерферометра сдвига с дифракционной решеткой Ронки. Здесь показана схема Ронки с диафрагмой, установленной в фокальной плоскости (рисунок 4). Вычислен диаметр диафрагмы, который позволяет схеме Ронки работать как интерферометр сдвига.

Проводим исследование интерферометра с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом. Здесь представлено краткое описание структуры и работы интерферометра, его достоинства и методика проведения измерения. Далее анализируем точность обработки интерферограмм, регистрируемых ПЗС-камерой.

В указанном процессе этап 3 играет большую роль. Рассмотрены факторы влияют на качество обработки интерферограмм. В первой версии программы мы используем алгоритм, который основан на «скольжении прямоугольника» по полосе и распознавании ее.

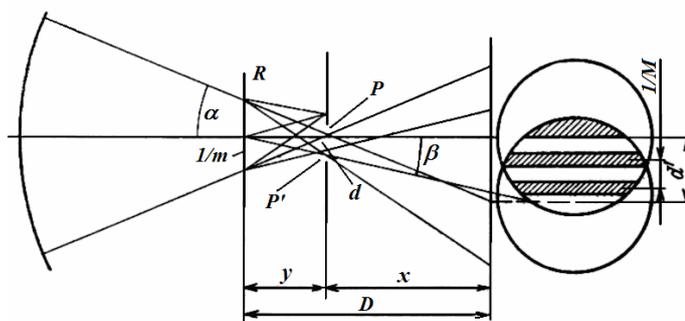


Рисунок 4 – Схема Ронки с диафрагмой

Рассмотрены основные этапы компьютерной обработки интерференционных картин:

1. Предварительная обработка интерферограммы с целью устранения шума;
2. Определение центра и преимущественного направления полос;
3. Отслеживание полос и расстановка точек на экстремумах;
4. Вычисление и отображение функции, характеризующей деформации волнового фронта.

Приведен алгоритм для повышения точности определения координат экстремумов, то есть повышения точности обработки интерферограмм. Предлагаемый алгоритм определения координат экстремальных точек интерферограммы использует информацию всех точек в сечении. Для этого перед процессом обнаружения экстремальных точек программа выполняет аппроксимацию сечения методом наименьших квадратов, тогда все точки в сечении участвуют в создании аппроксимирующего полинома. Определение экстремума полинома становится проще и результат увереннее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Проведено исследование способов оценки качества изображения, их связи с процессом формирования оптических изображений. Выведены достоинства и недостатки методов и требования к ним. Показано влияние диапазона регистрации интенсивностей в ФРТ на точность определения ЧКХ.

На основе исследования достоинств и недостатков прямых методов оценки качества изображения предложен способ; сочетающий достоинства нескольких методов. При этом предлагаемый метод – компьютерная изофо-

тометрия является сочетанием методов изофотометрии и видеофотометрии. Новый метод более простой и оперативный. Он дает возможность регистрации диапазона передачи интенсивности в пятне рассеяния от 3 до 5 порядков с высокой точностью во всем диапазоне.

Разработаны математические основы метода компьютерной изофотометрии ФРЛ, при этом найдены формулы применительно к задаче создания алгоритмов и программного обеспечения.

Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРЛ на основе математического анализа и экспериментов.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Примененные разработки методик улучшения качества изображения прицизионных оптических систем возможно в космической отрасли и медицине.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

### *Статьи в рецензируемых журналах*

1. Венско, А.В. Традиционные методы оценки качества изображения. Их достоинства и недостатки / А.В. Венско, П.С. Воронов, Д.И. Коваль // Журнал Science Time. – 2018. – №5 (73) – с. 23 – 28.
2. Венско, А.В. Интерференционные методы контроля оптики / А.В. Венско, П.С. Воронов // Сборник статей Advances in Science and Technology. – 2018. – с. 101 – 103.

### *Статьи в сборниках научных трудов*

1. Венско, А.В. Свойства классического ПЗС-формирователя изображения / А.В. Венско, П.С. Воронов, Д.И. Коваль // Журнал Научное знание современности. – 2018. – №5 (62) – с. 54 – 56.
2. Венско, А.В. Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом / А.В. Венско, П.С. Воронов, Д.И. Коваль // Сборник статей Eurasia Science. – 2018. – с. 82 – 84.

### *Тезисы конференций*

1. Венско, А.В. Метод изофотометрии функции рассеяния точки / А.В. Венско // материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные системы и технологии», Минск, Респ. Беларусь, 21 апреля 2018 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2018. – с. 28 – 29.

## РЭЗІЮМЭ

Венско Андрэй Вячаслававіч

### Алгарытмічны і праграмнае забеспячэнне для вырашэння задач ацэнкі якасці малюнка прэцызійных аптычных сістэм

**Ключавыя словы:** кампутарная изофотометрия, интерферограмма.

**Мэта працы:** мэтай сапраўднай працы з'яўляюцца распрацоўка і даследаванне алгарытмічнага і праграмнага забеспячэння для вырашэння задач ацэнкі якасці малюнка прэцызійных аптычных сістэм.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** выкананы аналіз існуючых метадаў ацэнкі якасці малюнка прэцызійных аптычных сістэм. Даследавана ўплыў дынамічнага дыяпазону рэгістрацыі асветленасці ў ФРТ на дакладнасці вызначэння ЧКХ і паказаны характар гэтага ўплыву. Даследаваны алгарытмы і праграмы, якія забяспечваюць дынамічны дыяпазон рэгістрацыі асветленасці ў ФРТ да 103 – 105 пры бездакорны паўнаце перадачы дыфракцыйных асцыляцый ў малюнку тэст-аб'екта. Паказана, што хібнасць вызначэння ФРТ па метадзе кампутарнай изофотометрии не перавышае 1,5% хібнасць пасля разліку ЧКХ не больш за 5%.

**Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» у навучальны курс «Канструяванне і тэхналогія электронных прылад».

**Вобласць ужывання** медыцына, касмічная прамысловасць, мікраэлектроніка.

## РЕЗЮМЕ

Венско Андрей Вячеславович

### Алгоритмическое и программное обеспечение для решения задач оценки качества изображения прецизионных оптических систем

**Ключевые слова:** компьютерная изофотометрия, интерферограмма.

**Цель работы:** целью настоящей работы являются разработка и исследование алгоритмического и программного обеспечения для решения задач оценки качества изображения прецизионных оптических систем.

**Полученные результаты и их новизна:** выполнен анализ существующих методов оценки качества изображения прецизионных оптических систем. Исследовано влияние динамического диапазона регистрации освещенности в ФРТ на точности определения ЧКХ и показан характер этого влияния. Исследованы алгоритмы и программы, которые обеспечивают динамический диапазон регистрации освещенности в ФРТ до  $10^3 - 10^5$  при безукоризненной полноте передачи дифракционных осцилляций в изображении тест-объекта. Показано, что погрешность определения ФРТ по методу компьютерной изофотометрии не превышает 1,5% погрешность после расчета ЧКХ не более 5%.

**Степень использования:** результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Конструирование и технология электронных устройств».

**Область применения:** медицина, космическая промышленность, микроэлектроника.

## SUMMARY

**Vensko Andrey Vyacheslavovich**

### **Algorithmic and software for solving problems of image quality estimation of precision optical systems**

**Keywords:** computer isophotometry, interferogram.

**The object of study:** the purpose of this work is the development and investigation of algorithmic and software for solving problems of image quality estimation of precision optical systems.

**The results and novelty:** the analysis of existing methods of an estimation of quality of the image of precision optical systems is carried out. The influence of the dynamic range of the illumination registration in the PSF on the accuracy of the MTF determination is studied and the character of this influence is shown. The algorithms and programs that provide the dynamic range of the illumination registration in the FRT up to  $10^3 - 10^5$  are investigated with an impeccable completeness of diffraction oscillation transmission in the image of the test object. It is shown. That the error in determining the PSF using the computer isophotometric method does not exceed 1,5% of the error after calculating the MTF no more than 5%.

**Degree of use:** the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Design and technology of electronic devices».

**Sphere of application:** medicine, space industry, microelectronics.