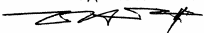


На правах рукописи

УДК 681.78



Чан Тиен Хай

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ
ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

МОСКВА - 2014

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Колючкин Василий Яковлевич**,
доктор технических наук, профессор кафедры
лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им.
Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: **Бажанов Юрий Вадимович**,
доктор технических наук, главный конструктор
оптических систем ОАО «НПК «СПП».

Солдатов Виктор Петрович,
кандидат технических наук, профессор кафедры
оптико-электронных приборов МИИГАиК.

Ведущая организация: **ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»**

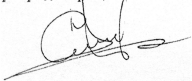
Защита диссертации состоится «18» марта 2015 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан «22» декабря 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



2074997

1,00 р.

Чан Тхен Хэй Оптико – электронные приборы

Семеренко Денис Алексеевич.

-4.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В различных областях техники, в том числе в приборостроении, станкостроении, машиностроении, существует задача измерения координат объектов, которые перемещаются механическими устройствами вдоль заданных направлений. Такими механическими устройствами могут быть, например, координатные столы. При этом, кроме измерения значений перемещений вдоль координатных осей, требуется определять погрешности траектории движения объектов в виде поперечных перемещений, которые характеризуют отклонения от прямолинейности. Сложность задачи подобного контроля обусловлена тем, что в большинстве случаев требуется измерять указанные погрешности перемещений в системе координат, связанной с конструктивными базами механизмов перемещения. Например, при контроле погрешностей взаимного положения рабочих органов механообрабатывающих станков и обрабатываемой детали требуется проводить измерения относительно конструктивных баз, которые связаны со станиной станка. Следует отметить, что эта актуальная техническая задача в настоящее время не решена.

Для осуществления оперативного контроля погрешностей перемещения объектов в соответствии с поставленной выше задачей, необходимы средства, которые также удовлетворяют требованиям по точности, бесконтактности с объектом контроля и быстродействию. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют оптико-электронные средства контроля, работающие на различных физических принципах.

Большой вклад в исследование и разработку измерительных оптико-электронных приборов (ОЭП) внесли русские ученые, в том числе: Ю.Г. Якушенков, В.К. Кирилловский, Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев, В.А. Афанасьев, Г.М. Мосягин, В.Я. Колючкин, А.Ф. Котюк, Ю.Ф. Застрогин. Среди зарубежных учёных можно отметить Georges Asch, John G. Webster, Sergey Y. Yurish и др.

На основе анализа литературных и патентных источников установлено, что существуют схемные решения приборов, которые позволяют производить контроль погрешностей поперечных перемещений объектов. В том числе, известны приборы, работающие на интерференционном принципе, которые обеспечивают проведение измерений с погрешностью до десятых долей микрометра. Недостатком таких приборов является неустойчивость воздействию вибраций, а также необходимость задания начала отсчёта измеряемых величин перемещений. Известна функциональная схема лазерного измерителя поперечных перемещений, который свободен от этих недостатков. Работа измерителя основана на фазовом методе измерения перемещений. Недостатком данного измерителя является относительно высокая погрешность, составляющая десятки микрометров, а также малый диапазон измерений, составляющий десятые доли метра, что ограничивает возможности применения этого прибора.

На основании изложенного сделан вывод об актуальности научно-технической задачи по разработке функциональных схем высокоточных

бесконтактных измерительных оптико-электронных приборов для контроля погрешностей линейных перемещений объектов.

Целью диссертации является разработка функциональных схем и методики проектирования высокоточных оптико-электронных приборов для бесконтактного автоматического измерения поперечных перемещений объектов при их значительном продольном перемещении.

Для достижения поставленной цели в диссертации были сформулированы и решены следующие задачи:

- разработаны функциональные схемы оптико-электронных приборов, предназначенные для автоматического измерения поперечных перемещений объектов, обусловленных отклонением от прямолинейности траектории движения и поворотами;
- разработаны схемы измерения, позволяющие осуществлять контроль поперечных перемещений объектов по нескольким направлениям от единых конструктивных баз;
- обосновано применение известных алгоритмов цифровой обработки сигналов, обеспечивающих достижение высокой точности в оптико-электронных приборах измерительного типа;
- разработана методика проектирования оптико-электронных приборов, предназначенных для автоматического контроля погрешностей линейных перемещений объектов;
- проведены экспериментальные исследования с целью проверки основных теоретических результатов диссертации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны оригинальные функциональные схемы оптико-электронных приборов, позволяющих с высокой точностью измерять поперечные перемещения объектов от единых конструктивных баз при продольном перемещении этих объектов;
- на основе разработанной в диссертации математической модели ОЭП и предложенных алгоритмов оценки координат изображений тест-объектов определены целевые функции проектирования ОЭП для измерения поперечных перемещений объектов, позволяющие на системотехническом уровне выполнять проектные процедуры многовариантного анализа и параметрической оптимизации.
- впервые получены математические выражения для оценки погрешности измерения координат изображения по методу «центра масс», справедливость которых подтверждена численным моделированием.

Практическая ценность заключается в том, что разработанные функциональные схемы измерительных ОЭП могут найти применение в областях техники, где требуется высокоточный бесконтактный автоматический контроль погрешностей механизмов линейных перемещений, в частности, при реализации принципов активного контроля на станках с ЧПУ.

Положения, выносимые на защиту:

- оригинальные функциональные схемы ОЭП, позволяющие с высокой точностью производить измерение поперечных перемещений объектов от единичных конструктивных баз при его продольном перемещении;
- методика проектирования ОЭП для контроля перемещений объектов;
- целевые функции проектирования оптико-электронных приборов измерения поперечных перемещений объектов;
- математические выражения для оценки погрешности измерения координат изображения объектов по методу «центра масс».

Достоверность выводов диссертационной работы обеспечивается адекватностью использованной математической модели, применением для численных расчетов проверенных и широко используемых программных сред Mathcad и Matlab, высокоточного оборудования при проведении экспериментов, а также согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II конференции молодых ученых "Будущее Оптики 2013", Санкт – Петербург, 2013 г. и на VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2013», Санкт – Петербург, 2013 г.

Внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы реализованы в учебном процессе на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «ОЭП обеспечения безопасности».

Публикации результатов. Результаты диссертационной работы изложены в 5 публикациях, в том числе, в 2 научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 120 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка и 3 таблицы, список литературы включает 45 библиографических описаний.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературных источников, на основании которых выполнен анализ современного состояния в области методов и средств контроля погрешностей линейных перемещений объектов, используемых в

различных областях техники и технологий. Сформулированная в диссертации задача контроля непосредственно связана с измерением координат этих объектов при их перемещении с помощью различных механических устройств вдоль заданных координатных осей. В частном случае такими механическими устройствами могут быть координатные столы, снабжённые направляющими с перемещающимися по ним каретками, на которых крепятся перемещающиеся объекты.

На основе анализа методов и средств контроля перемещений, которые используются, например, в измерительных машинах, механизмах перемещений электронно-лучевых литографов, а также металлорежущих станках, определена актуальная задача контроля, решение которой позволит повысить качественные показатели этих изделий. Эта задача заключается в контроле не только рабочих линейных перемещений объектов, которые осуществляются вдоль некоторых заданных направлений, но и контроле погрешностей этих перемещений, обусловленных перемещениями объектов в направлениях, перпендикулярных рабочим перемещениям (непрямолинейность), а также угловых отклонений (поворотов) объектов. Решение поставленной задачи особенно актуально для реализации принципов активного контроля на механообрабатывающих станках с ЧПУ в случае использования средств бесконтактных измерений на основе оптико-электронных приборов и обеспечения возможности осуществления контроля от единых конструктивных баз оборудования.

Анализ научных и патентных публикаций в области оптико-электронных средств для контроля линейных перемещений позволил сделать вывод о том, что существующие устройства имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение для решения поставленных задач. В частности, приборы, основанные на интерферометрических методах практически не функционируют в условиях возможного воздействия вибраций, а известный лазерный измеритель поперечных перемещений содержит механические устройства, ограничивающие его точностные показатели.

Результаты анализа литературных источников позволили обосновать актуальность темы, цель и задачи диссертации, посвящённой разработке функциональных схем и методики проектирования оптико-электронных приборов для бесконтактного автоматического контроля погрешностей линейных перемещений объектов.

Вторая глава посвящена разработке функциональных схем и принципов действия оптико-электронных приборов для бесконтактного контроля погрешностей линейных перемещений объектов. Предложен базовый вариант ОЭП для контроля погрешностей линейных перемещений, функциональная схема которого представлена на Рисунке 1.

Предлагаемый прибор состоит из передающей и приёмной частей, причём передающая часть устанавливается неподвижно, а приёмная часть крепится на объекте, который может перемещаться вдоль оптической оси (ось Z) на значительные расстояния и при этом смещаться в поперечных направлениях (вдоль осей X и Y).

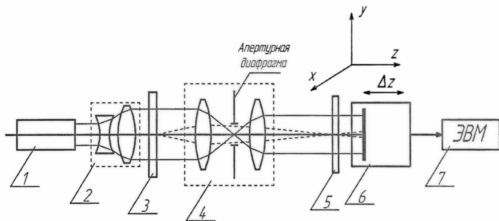


Рисунок 1.

Функциональная схема базового варианта ОЭП для контроля линейных перемещений объектов:

1 – лазер; 2 – ОС формирования пучка; 3 – транспарант; 4 – афокальная репродукционная ОС; 5 – оптический фильтр; 6 – цифровая телевизионная камера; 7 – ЭВМ

Транспарант 3, подсвеченный плоской когерентной волной, проецируется афокальной репродукционной оптической системой (ОС) в пространство предметов. За счёт телецентрического хода главных лучей в ОС обеспечивается постоянство масштаба изображения вдоль оптической оси. За счёт подбора параметров транспаранта и ОС можно обеспечить постоянство распределения интенсивности в изображении вдоль оптической оси, т.е. при значительных расфокусировках. Поэтому одним из достоинств такого ОЭП является возможность измерения поперечных перемещений объектов при их значительном продольном перемещении. Если перемещение – прямолинейное, как в случае линейных механических трансляторов, то предлагаемый прибор позволит контролировать отступление от прямолинейности. Использование в составе прибора ЭВМ позволяет использовать различные алгоритмы для вычисления значений координат изображений транспаранта, которые содержат информацию о перемещениях объекта.

Недостатком схемы данного прибора является необходимость установки приёмной части прибора на объекте, поперечные смещения которого требуется измерять. Это накладывает эксплуатационные ограничения на возможность использования такого прибора, в частности на механообрабатывающих станках. Свободным от этого недостатка является прибор, функциональная схема которого представлена на Рисунке 2. В этой схеме передающая и приёмная части крепятся неподвижно на конструктивной базе, а призма 5 крепится на объекте, поперечные смещения которого подлежат измерению при значительных перемещениях в направлении оси Z . В связи с этим, приёмная и передающая части прибора конструктивно объединяются в одну часть и за счёт двойного

отражения от граней призмы чувствительность возрастает в два раза: при перемещении объекта на величину δx , ось пучка смещается в том же направлении на величину $2\delta x$. Для увеличения диапазона продольных перемещений, а также повышения чувствительности при измерении поперечных смещений объекта, было предложено добавить еще одну афокальную репродукционную ОС в приемную часть функциональной схемы.

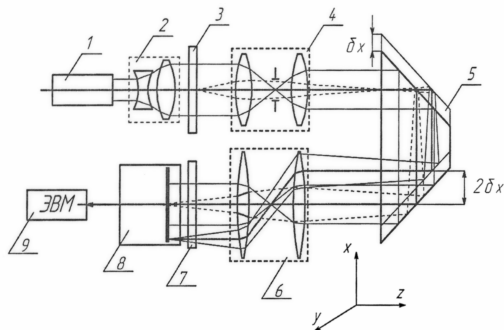


Рисунок 2.

Функциональная схема ОЭП для контроля линейных перемещений объектов с дополнительной афокальной репродукционной ОС:

- 1 – лазер; 2 – афокальная ОС формирования пучка; 3 – транспарант;
- 4 и 6 – афокальные репродукционные ОС; 5 – призма; 7 – оптический фильтр;
- 8 – цифровая телевизионная камера; 9 – ЭВМ

Для реализации одновременного контроля прямолинейности перемещения и поворотов объекта в схеме прибора, представленной на Рисунке 3, введен дополнительный канал контроля, в состав которого входят полупрозрачное зеркало 5, оптический фильтр 12 и цифровая телевизионная камера 6. Кроме этого, на гипотенузной грани призмы 7 нанесено полупрозрачное покрытие. При поворотах объекта вокруг оси Y изображение тест-объекта, регистрируемое цифровой телевизионной камерой 6, будет линейно смещаться пропорционально значению угла поворота объекта и расстоянию от гипотенузной грани призмы 7 до плоскости МПИ телевизионной камеры 6.

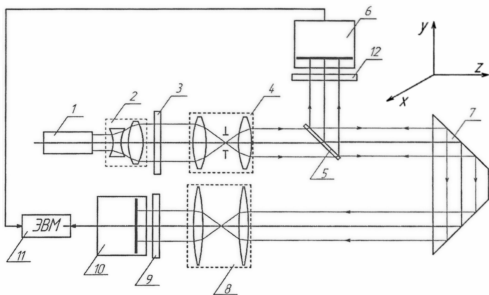


Рисунок 3.

Функциональная схема ОЭП для контроля линейных и угловых перемещений объектов:

- 1 – лазер; 2 – афокальная ОС формирования пучка; 3 – транспарант;
 4, 8 – афокальные репродукционные ОС; 5 – полупрозрачное зеркало;
 6, 10 – цифровые телевизионные камеры; 7 – призма типа А90;
 9, 12 – оптические фильтры, 11 – ЭВМ

Во второй главе приведены системы координат станков с ЧПУ, схемы организации активного контроля на токарном и фрезерном станках и сделан анализ оптико-электронных устройств, которые могут быть использованы в составе системы контроля прецизионного токарного станка с ЧПУ. Общей особенностью этих устройств является бесконтактный способ измерения размеров обрабатываемых деталей, а также положения рабочих органов станка. В данной главе также предложены разные функциональные схемы контроля перемещений рабочих органов металлообрабатывающих станков, в которых используются описанные выше измерительные ОЭП. На Рисунке 4 представлена схема реализации контроля погрешностей линейных перемещений салазок на вертикально-фрезерном станке. Для измерения перемещений δx салазок в направлении оси X приёмо-передающая часть прибора крепится на конструктивной базе фрезерного станка, которая связана со станиной, а призма крепится на салазках. Пучки лазерного излучения от передающей части к призме и от призмы к приёмной части прибора направляются пента-призмой, которое крепится на консоли. В такой схеме расположения элементов прибора при рабочих перемещениях консоли и салазок сохраняется возможность измерения перемещений салазок в направлении оси X , которые обусловлены нежёсткостью механизмов перемещения салазок вдоль оси Y .

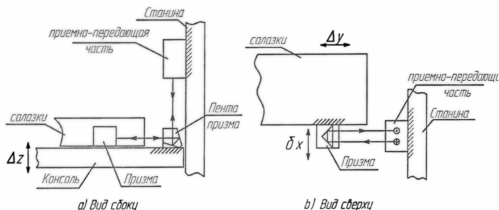


Рисунок 4.

Схема реализации контроля погрешностей перемещений салазок относительно конструктивной базы фрезерного станка

На Рисунке 5 представлена схема контроля погрешности δy линейных перемещений стола в направлении оси Y вертикально-фрезерного станка. Приёмно-передающая часть прибора крепится на конструктивной базе фрезерного станка, которая связана со станиной. Пучки лазерного излучения от передающей части к призме и от призмы к приёмной части прибора направляются двумя пентапризмами, которые крепятся на салазках и консоли, соответственно. В предлагаемой схеме расположения элементов ОЭП при рабочих перемещениях консоли на величину Δz , салазок на величину Δy и стола на величину Δx сохраняется возможность измерения перемещений δz стола в направлении оси Y , которые обусловлены нежёсткостью механизмов перемещения стола вдоль оси X .

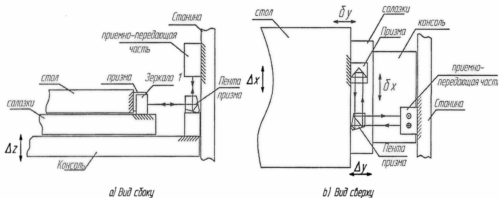


Рисунок 5.

Схема реализации ОЭП, предназначенного для контроля прямолинейности перемещений стола относительно конструктивной базы фрезерного станка

Третья глава посвящена разработке математической модели и целевой функции проектирования ОЭП для измерения перемещений объектов. Изложен подход к проектированию, в котором целевая функция используется при выполнении проектных процедур анализа и параметрической оптимизации. На Рисунке 6 представлена структурная схема модели измерительного ОЭП, как объекта проектирования на системотехническом уровне.

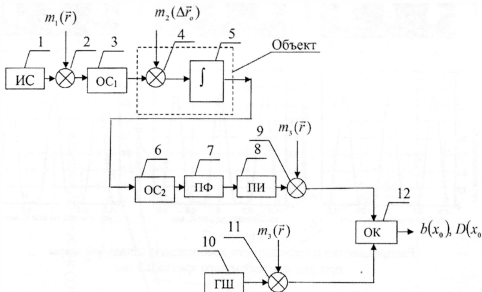


Рисунок 6.

Структурная схема модели измерительного ОЭП, как объекта проектирования на системотехническом уровне:

- 1 – источник оптического сигнала; 2 – модулятор; 3 – оптическая система;
- 4 – модулятор; 5 – интегратор; 6 – оптическая система; 7 – пространственный фильтр; 8 – приемник излучения; 9, 11 – модуляторы; 10 – генератор шума;
- 12 – алгоритм оценки качества

На основе математической модели, описывающей преобразование сигнала в базовом варианте ОЭП для контроля перемещений, выполнен анализ влияния параметров транспаранта и репродукционной ОС на распределение интенсивности в различных плоскостях регистрации сигнала. В исследованиях использовались бинарные транспаранты с различным законом пропускания. На Рисунке 7 представлены графики распределения интенсивности изображения в различных положениях плоскости регистрации (в гауссовой плоскости ОС₁ и при расфокусировках, равных 0,3 м и 0,8 м) при размере апертурной диафрагмы 0,3 мм. Этот результат обосновывает возможность использования алгоритма оценки максимального правдоподобия, обеспечивающего минимальную погрешность оценки координат при обработке регистрируемых изображений.

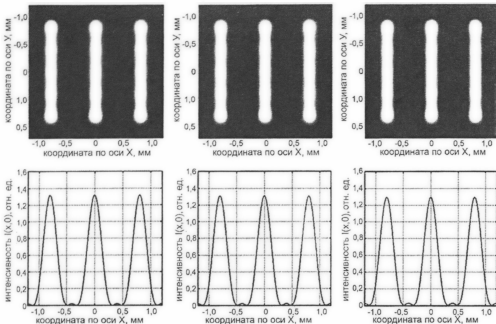


Рисунок 7.

**Распределение интенсивности изображения шпальной миры
при размере выходного зрачка 0.3 мм**

В работе проведены исследования эффективности двух алгоритмов оценки координат объектов: алгоритм оценки максимального правдоподобия (ОМП) и алгоритм оценки координат по положению «центр масс» (ОЦМ). Как известно, формулы для условных значений смещения $b(\Delta\hat{x}|\Delta x_0)$ и дисперсии $D(\Delta\hat{x}|\Delta x_0)$ погрешности оценки $\Delta\hat{x}$ максимального правдоподобия параметра Δx_0 , при допущении о больших значениях отношения ρ сигнала к шуму на выходе оптимального фильтра, в первом приближении имеют вид:

$$b(\Delta\hat{x}|\Delta x_0) = -\frac{1}{2\rho^2} \frac{[\partial^3 S(\Delta x_1, \Delta x_2)/\partial \Delta x_1^2 \partial \Delta x_2]_{\Delta x_0}}{[\partial S(\Delta x_1, \Delta x_2)/\partial \Delta x_1 \partial \Delta x_2]_{\Delta x_0}^2}, \quad (1)$$

$$D(\Delta\hat{x}|\Delta x_0) = \frac{1}{\rho^2} \left[\frac{\partial^2 S(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1 \partial \Delta x_2} \right]_{\Delta x_0}^{-1}, \quad (2)$$

где $S(\Delta x_1, \Delta x_2)$ – нормированная сигнальная функция.

Проведены исследования зависимости погрешности измерений перемещений от размера изображения транспаранта в виде шпальной миры. При выполнении расчётов полагалось: линейное увеличение афокальной репродукционной ОС

$\beta = 2^X$; периоды расположения чувствительных элементов МПИ $T_x = T_y = 5\text{мм}$; расстояния от плоскости Гаусса афокальной системы до плоскости

объекта равны $\Delta F = 0$, $\Delta F = 0,3$ м, $\Delta F = 0,8$ м; пиковое отношение сигнала к шуму равно $\rho = 60$. Смещение оценки координат равно нулю. На Рисунке 8 приведены графики зависимостей СКО погрешности $\sigma = \sqrt{D(\Delta \hat{x})}$ оценки максимального правдоподобия координат перемещения от размера изображения транспаранта. Эти результаты рассчитаны при обработке изображения только одной строки изображения транспаранта.

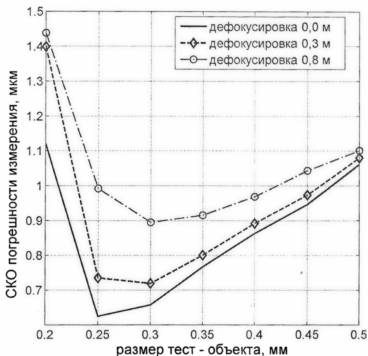


Рисунок 8.

График зависимости СКО погрешности от размера изображения транспаранта в виде шпальной миры

Для оценки погрешности при определении значений перемещений по алгоритму «центра масс» в работе были выведены приближённые формулы для погрешностей оценки $\Delta \hat{x}$ перемещений. Такая оценка является безусловно несмещённой. При допущении о больших значениях пикового отношения сигнала к шуму μ_0 , а также выполнении операции предварительной сегментации изображения транспаранта, формула для СКО погрешности имеет вид

$$\sigma(\Delta \hat{x}) = \frac{T_x}{\sqrt{12\mu_0 \bar{u}}}, \quad (3)$$

где $\bar{u}$ — среднее значение нормированного двумерного массива регистрируемого изображения.

Для проверки справедливости выведенных формул были проведены статистические испытания с использованием разработанной математической модели ОЭП. В процессе вычислительных экспериментов к массиву изображения транспаранта были добавлены выборочные значения реализаций аддитивного гауссова шума с различными значениями СКО. Размерность двумерного сегментированного массива изображения составляла 204×204 элементов, при периоде пространственной дискретизации $T_x = 5\text{мкм}$. В процессе испытаний анализировано 200 реализаций при каждом значении СКО аддитивного шума. На Рисунке 9 представлены графики теоретической, рассчитанной по формуле (3), и экспериментальной, полученной в процессе статистического моделирования, зависимостей СКО погрешности оценки координат от значения μ_0^{-1} , представляющего собой величину, обратную пиковому отношению сигнала к шуму.

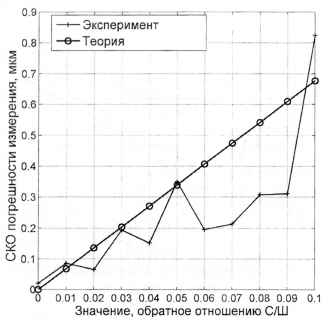


Рисунок 9.

Зависимости СКО погрешности оценки координат по методу «центра масс» от значения μ_0^{-1} для сегментированного изображения транспаранта

Из графика следует, что отличие расчётных значений от экспериментальных не превышает 20% в диапазоне значений пикового отношения сигнала к шуму до $\mu_0 < 15$. На основе полученных результатов сделан вывод о правильности формул для погрешности оценки координат по алгоритму «центра масс» и, в частности формулы (3), т.к. они выведены при допущении о больших значениях μ_0 .

Важным результатом диссертации является то, что при достаточном отношении сигнала к шуму оба алгоритма позволяют производить измерение координат изображений с СКО погрешности, не превышающей значений 1 мкм.

В третьей главе приведено описание разработанной в диссертации методики проектирования ОЭП для контроля линейных перемещений. В методике определены содержание и последовательность операций и процедур, выполняемых на системотехническом уровне проектирования ОЭП, а также изложены особенности процедур, выполняемых на схемотехническом уровне проектирования этих приборов.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям, выполненным с целью проверки правильности основных теоретических результатов диссертации. Экспериментальные исследования проведены на установке, разработанной по предложенной в диссертации методике проектирования для базового варианта ОЭП контроля перемещений объектов, функциональная схема которого представлена на Рисунке 1. Фотография экспериментальной установки представлена на Рисунке 10.

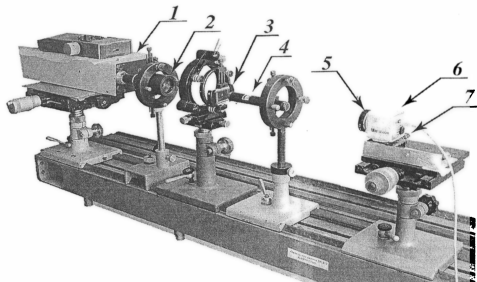


Рисунок 10.

Фотография экспериментальной установки:

- 1 – Гелий-неоновый лазер; 2 – формирующая телескопическая ОС;
3 – транспарант; 4 – афокальная ОС; 5 – оптический фильтр; 6 – телевизионная камера; 7 – линейный транслятор

Методика проведения экспериментов заключалась в измерении поперечных перемещений объекта – телевизионной камеры, которые осуществлялись линейным транслятором с погрешностью ± 2 мкм для плоскостей регистрации в диапазоне продольных перемещений от 0,1 м до 1,0 м. По измеренным с

использованием алгоритма оценки максимального правдоподобия и алгоритма «центр масс» значениям поперечных перемещений вычислялись погрешности, которые сравнивались с расчётными. На Рисунке 11 представлены графики СКО экспериментальной погрешности, полученные для плоскостей регистрации, в диапазоне продольных перемещений от 0,1 м до 1,0 м.

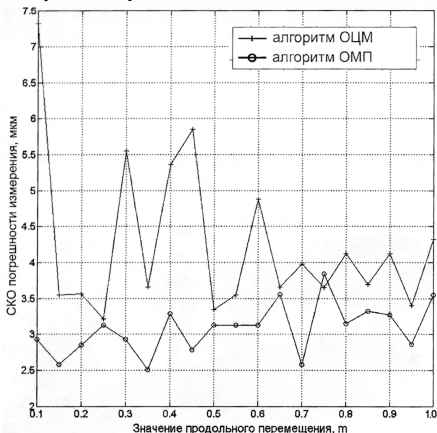


Рисунок 11.

Графики СКО погрешности измерения перемещений по оптимальному алгоритму и алгоритму «центра масс» с процедурой предварительной сегментации изображения

Из графиков следует, что среднее значение СКО погрешности оценки координат, вычисленное по алгоритму центра масс равно 4,5 мкм, что практически совпало с расчётным значением. Среднее значение СКО погрешности оценки координат по алгоритму оценки максимального правдоподобия практически совпадает со значением, которое определяется суммой погрешности микрометрического винта и погрешности алгоритма.

На основе полученных экспериментальных результатов сделан вывод о справедливости основных теоретических положений диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны оригинальные функциональные схемы оптико-электронных приборов, позволяющих с высокой точностью измерять поперечные перемещения объектов при их продольном перемещении от единых конструктивных баз;

2. Разработана методика проектирования ОЭП для контроля перемещений на системотехническом уровне. На основе разработанной в диссертации математической модели ОЭП и применимых алгоритмов оценки координат изображений объектов сформированы целевые функции проектирования ОЭП для контроля перемещений, позволяющие на системотехническом уровне выполнять проектные процедуры многовариантного анализа и параметрической оптимизации.

3. На основе разработанной математической модели афокальной репродукционной ОС показано, что путём оптимизации её параметров можно обеспечить постоянство распределения интенсивности в изображении транспаранта при значительном перемещении плоскости регистрации вдоль оптической оси.

4. Впервые получены математические выражения для оценки погрешности оценки координат по методу «центра масс», справедливость которых подтверждена численными расчетами.

5. В процессе численного моделирования и натурных экспериментов показано, что предложенные схемы ОЭП при оптимизированных значениях параметров элементов позволяют производить измерение координат объектов с СКО погрешности, не превышающей 1 мкм.

6. На основе предложенной в диссертации методики разработана и изготовлена экспериментальная установка, на которой проведены экспериментальные исследования. На основе результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований, подтверждена справедливость основных теоретических положений диссертации, в том числе:

- подтверждена адекватность математической модели преобразования сигнала в ОЭП, а также правильность разработанных на её основе целевых функций проектирования;

- подтверждена правильность разработанной методики проектирования ОЭП для контроля перемещений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Колючкин В.Я., Нгуен К.М., Чан Т.Х. Алгоритмы обработки изображений в системах машинного зрения роботизированных производственных линий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. М.: Издательство «Радиотехника». 2014. №3. С.44-51. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Колючкин В.Я., Чан Т.Х. Исследование характеристик репродукционной афокальной оптической системы в устройствах для измерения перемещений объектов // Электронное научно-техническое издание «Наука и Образование». 2013, №02, февраль. DOI 10.7463/0213.0531036 . С.187-200. (0,8 п.л. / 0,6 п.л.)

URL: <http://technomag.edu.ru/doc/531036.html> (дата обращения 28.10.2014).

3. Колючкин В.Я., Нгуен К.М., Чан Т.Х. Алгоритмы обработки информации в системах технического зрения промышленных роботов // Современные проблемы оптотехники: 75 лет кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. ст. Москва.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. С.139-150. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.).

4. Чан Т.Х. Анализ формирования изображения афокальной репродукционной оптической системы // Сборник трудов II конференций «Будущее оптики» для молодых специалистов, кандидатов наук, аспирантов и студентов оптической отрасли и смежных дисциплин. Санкт-Петербург, 2013. С.15-18.

5. Чан Т.Х., Нгуен К.М. Алгоритмы обработки информации в системах технического зрения промышленных роботов // Сборник трудов VIII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013». Санкт-Петербург, 2013. С.187-189. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).