

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

*О. А. ЗАЯКИН*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**  
**Лабораторный практикум**

**С а м а р а 2 0 1 3**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

*О. А. ЗАЯКИН*

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Лабораторный практикум

*Утвержден Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний*

С а м а р а  
Издательство СГАУ  
2 0 1 3

УДК СГАУ 531.717.81 (088.8) (520)

ББК СГАУ \_\_\_\_\_

З \_\_\_\_

Рецензент:

д. ф.-м. н. профессор **З и м н я к о в Д. А.**

***Заякин, О. А.***

**З \_\_ Автоматизация оптических измерений:** лабораторный практикум  
[Текст] / *О. А. Заякин.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокос. ун-та,  
2013. - 146 с.: ил.

**ISBN-**\_\_\_\_\_

Изучаются вопросы автоматизации оптических измерений с целями прикладных научных исследований и производственного контроля.

Для изучения использована автоматизированная система, относящаяся к областям измерений геометрических величин, оптимизированная для задачи контроля локальных поверхностных дефектов и отклонений геометрической формы деталей подшипников.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности «Автоматизированные системы обработки данных и управления». Может быть полезен студентам, обучающимся по специальностям, связанным с оптикой, квантовой электроникой и менеджментом качества.

УДК СГАУ 531.717.81 (088.8) (520)

ББК СГАУ \_\_\_\_\_

ISBN \_\_\_\_\_

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## Сведения об авторе



**Заякин Олег Александрович** кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем Самарского филиала Физического института РАН (СФ ФИАН), доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). Область научных интересов: лазерные измерения геометрических

величин, когерентная оптика, жидкокристаллическая адаптивная оптика.

Результаты его работы нашли отражение в 40 научных работах, в том числе в патенте на изобретение, выступлениях более чем на 10 международных, и региональных конференциях и симпозиумах.

Являлся руководителем более 40 дипломных проектов и работ.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	7
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	9
ВВЕДЕНИЕ .....	12
1 ДВУМЕРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ТРИАНГУЛЯТОР .....	16
1.1 Теоретические основы лабораторной работы	16
1.1.1 Сбор данных .....	16
1.1.2 Обработка данных .....	22
1.1.3 Пользовательский интерфейс .....	26
1.1.4 Требования к качеству контролируемой детали по отклонениям геометрической формы поверхности вращения .....	34
1.1.5 Требование к погрешности измерительного канала АС .....	37
1.1.6 Влияние локальных дефектов на погрешность измерительной информации .....	40
1.1.7 Сравнительный анализ кругломеров различного типа .....	42
1.2 Лабораторная работа №1. Функциональные возможности двумерного лазерного триангулятора и его погрешности	43
1.2.1 Задание на самостоятельную работу .....	43
1.2.2 Содержание отчета .....	45
1.2.3 Контрольные вопросы .....	46
1.3 Лабораторная работа №2. Влияние дискретности сканирования на погрешность измерений АС	47
1.3.1 Задание на самостоятельную работу .....	47
1.3.2 Содержание отчета .....	48
1.3.3 Контрольные вопросы .....	49
1.4 Лабораторная работа №3. Динамические характеристики АС	50
1.4.1 Задание на самостоятельную работу .....	50
1.4.2 Содержание отчета .....	51

1.4.3 Контрольные вопросы .....	52
1.5 Лабораторная работа №4. Влияние адаптивной пороговой фильтрации входного сигнала на погрешность измерений АС	53
1.5.1 Задание на самостоятельную работу .....	53
1.5.2 Содержание отчета .....	55
1.5.3 Контрольные вопросы .....	55
2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДВУМЕРНОГО ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯТОРА .....	57
2.1 Теоретические основы лабораторной работы .....	57
2.2 Лабораторная работа №5. Чувствительность двумерного лазерного триангулятора .....	66
2.2.1 Задание на самостоятельную работу .....	66
2.2.2 Содержание отчета .....	69
2.2.3 Контрольные вопросы .....	69
2.3 Лабораторная работа №6. Влияние шумов на входной сигнал двумерного лазерного триангулятора .....	70
2.3.1 Задание на самостоятельную работу .....	70
2.3.2 Содержание отчета .....	72
2.3.3 Контрольные вопросы .....	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	75
ПРИЛОЖЕНИЕ А Обработка данных в двумерном лазерном триангуляторе	78
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Преобразование пучка света в оптической системе в приближении геометрической оптики	84
ПРИЛОЖЕНИЕ В Описание сфокусированного пучка света лазера	90
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Программа численного расчета изменения величин информативных параметров двумерного лазерного триангулятора под влиянием электронных шумов	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Примеры отчетов по лабораторным работам	129

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АС – автоматизированная система;

АСНИ – автоматизированная система научных исследований;

АСОИУ – автоматизированные системы обработки информации и управления;

ВНИПП – Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт подшипниковой промышленности»;

ВЧ – фильтр высоких частот;

ГОСТ – государственный стандарт;

ДЛТ – двумерный лазерный триангулятор;

ИИС – информационно-измерительная система;

КТС – комплекс технических средств;

МНК – метод наименьших квадратов;

М. О. – математическое ожидание;

ОАО – открытое акционерное общество;

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство;

ОС – операционная система;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

ПО – программное обеспечение;

РАН – Российская академия наук;

РД – руководящий документ;

СГАУ – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)»;

С. К. О. – среднеквадратическое отклонение;

СФ ФИАН – Самарский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук;

ФД – фотодиод;

ФП – фотоприемник;

АССII – American Standard Code Information Interchange;

DOS – Microsoft Disc Operational System, в данной публикации использовано как сокращенное наименование MS DOS;

IBM PC – International Business Machines Personal Computer;

MS-DOS – Microsoft Disc Operational System;

$P_I$ ,  $P_{II}$  – вероятности ошибок контроля первого (отбраковка годной детали) и второго (принятие негодной детали) рода;

$\Phi(x)$  - функция Хэвисайда,  $\Phi(x) = 1$  при  $x > 0$ ,  $\Phi(x) = 0$  при  $x \leq 0$ .



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный лабораторный практикум посвящен изучению вопросов автоматизации оптических измерений с целями прикладных научных исследований и производственного контроля. В брошюре приведено описание шести лабораторных работ.

Практикум дает студентам практические знания по применению современных средств комплексной автоматизации в промышленности, а также знакомит с возникающими при этом проблемами и возможными путями их преодоления.

Рассматривается применение матричного фоточувствительного преобразователя с зарядовой связью в качестве позиционно-чувствительного фотоприемника. Обсуждаются особенности источников излучения, использованных в лабораторных работах и их согласование с контролируемым/исследуемым объектом и фотоприемником. Затронуты также вопросы интерфейса оптических датчиков с компьютером, а также цифровой обработки данных, поступающих с этих датчиков.

В лабораторных работах использована автоматизированная система, относящаяся к области измерений геометрических величин. Она оптимизированная для задачи контроля локальных поверхностных дефектов и отклонений геометрической формы деталей подшипников.

В практикуме использованы средства автоматизации, разработанные в Самарском филиале Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. В них реализованы как известные методы и технические решения, так и оригинальные разработки СФ ФИАН, выполненные в ходе сотрудничества с предприятиями подшипниковой промышленности г. Самары.

Лабораторный практикум рассчитан на один семестр и призван дать знания в рассматриваемой предметной области студентам, обучающимся по специальности «Автоматизированные системы обработки данных и

управления» (АСОИУ), в соответствии с планом 230102.65-10-О-П, при изучении ими таких дисциплин, как «Устройство связи с объектом», «Теория цифровой обработки сигналов и изображений». Он может быть полезен студентам, обучающимся по специальностям, связанным с оптикой, квантовой электроникой и менеджментом качества.

Данный лабораторный практикум ставит перед студентами следующие основные задачи:

- ознакомление с одной из типичных методик контроля качества деталей в машиностроении;
- изучение оптических методов измерения геометрических величин;
- знакомство с научно-исследовательской автоматизированной системой, использующей один из этих методов;
- применение знаний по автоматизированной статистической оценке случайных величин и процессов для получения метрологических характеристик рассматриваемой автоматизированной системы с целью возможной оптимизации функций и структуры последней.

При сокращенном обучении можно опустить некоторые разделы и лабораторные работы: подразделы 1.1.4 – 1.1.7, лабораторные работы 3, 4 и 6.

Это – первое, «пилотное» издание данного практикума. Разумеется, оно не свободно от недостатков. Они будут устраняться по мере использования его в учебном процессе, а также в ходе работ по дальнейшему развитию данной системы. Все замечания и предложения будут учтены.

Информация для контактов – адрес электронной почты: oleg\_zayakin@inbox.ru ; адрес обычной почты: СФ ФИАН, ул. Ново-Садовая, 221, г. Самара, 443011, Россия; номер служебного телефона: +7 846 335 95 83; номер служебного факса: +7 846 335 56 00; служебная веб-страница (строго модерируется!):

[http://www.fian.smr.ru/personal\\_page.php?id=48&lang=rus](http://www.fian.smr.ru/personal_page.php?id=48&lang=rus) .

Автор выражает признательность В. Н. Белопухову, М. Ю. Грачеву, М. В. Лесникову, Ю. О. Понявину за помощь в создании аппаратно-программного комплекса. Отмечу также большой творческий вклад в работу, который сделал В. Н. Белопухов за время нашей с ним многолетней работы в СФ ФИАН.

## ВВЕДЕНИЕ

Оптические измерения заключаются в нахождении величин параметров и определении характеристик оптических полей, включая также поля излучений, невидимых человеческим глазом – ультрафиолетового и инфракрасного. Оптические измерения довольно разнообразны, и сфера их применений чрезвычайно обширна. Методы оптических измерений широко используются в настоящее время и для измерений других физических величин. Этому способствуют преимущества оптических методов измерений и реализующих их оптических датчиков. Главным образом это быстродействие, неинвазивность (то есть, «неразрушаемость» физического объекта, часто довольно «нежного», который подвергается операции измерения и контроля) и устойчивость к электромагнитным помехам. Оптические датчики в настоящее время нередко используют в качестве вторичных преобразователей входного сигнала.

Сигналы, поступающие с оптических датчиков, часто бывают весьма информативны, а также сложны для обработки. На протяжении долгого времени это сдерживало практическое применение оптических датчиков. Однако развитие вычислительной техники способствовало значительному прогрессу в сборе и обработке данных. В результате этого стали решаемы многие прикладные задачи, в том числе и связанные с оптическими измерительными преобразователями. Появились коммерчески доступные приборы, решающие эти задачи. Число этих задач и этих приборов растет, что увеличивает важность и актуальность изучения вопросов автоматизации оптических измерений.

В данном практикуме рассмотрены вопросы автоматизации оптических измерений геометрических величин. Рассмотрены все стадии преобразования сигнала – от входного до информационного (то есть, выходного). Для

примера взята задача контроля геометрических параметров рабочих поверхностей деталей подшипников.

Важную роль в оптических измерениях и в их автоматизации играет источник излучения. Многие современные задачи исследования и контроля решаются с помощью применения лазеров. Решение многих задач было бы недоступно без них. Либо же, при прочих равных условиях, при этом удастся значительно выиграть в технико-экономических показателях систем.

В данном практикуме рассмотрено применение в качестве источников излучения лазеров различных типов. Это газовый лазер, точнее, гелий-неоновый лазер, а также полупроводниковый лазер и твердотельный лазер с диодной накачкой, то есть, с возбуждением генерации с помощью лазерного диода.

До настоящего времени все оптические измерения сводятся к измерению фотометрических величин – мощности и/или энергии света/излучения. Для сопряжения оптических датчиков со средствами вычислительной цифровой и аналоговой техники служат фотоприемники – преобразователи оптического сигнала в электрический. Фотоприемники в настоящее время существуют самые разнообразные. В данном практикуме рассмотрена работа с матричным фоточувствительным преобразователем с зарядовой связью. Фотоприемники этого типа составляют основу широко распространенных в настоящее время фото- и видеокамер.

Изучение характеристик входного сигнала, преобразованного датчиком, составляет одну из важных целей данного практикума. Изучение функции преобразования, погрешностей, динамических свойств оптических преобразователей и систем составляет другую цель данного практикума.

Изучение предмета в данном практикуме основано на теории вероятностей и случайных процессов и основанных на них приемах практической метрологии. Для характеристики оптических полей источников излучения в данном практикуме применены методы физической оптики и

квантовой электроники. С их помощью получены расчетные характеристики оптических полей, характерных для изучаемой предметной области.

В подготовке лабораторного практикума использовались – в качестве ядра автоматизированной системы – компьютеры, совместимые IBM PC. Используются компьютеры на основе микропроцессоров типов X86, а также Pentium, в частности, Pentium MMX.

Программное обеспечение (ПО) компьютеров, использованных в практикуме, следующее. Это операционные системы MS DOS 6.22, Windows 98 и Windows XP. Прикладное программное обеспечение включает в себя типичный набор прикладных программ для офиса, обычно устанавливаемых на компьютере вместе с операционной системой.

Так, в ходе лабораторных работ потребуется приложение Excel, в версии не ниже 97, из стандартного пакета прикладных программ Microsoft Office.

Для выполнения лабораторных работ потребуется также и специализированное приложение – система автоматизированного проектирования Mathcad (MathSoft, Inc., США), в версии не ниже четвертой.

Используется также и прикладное ПО, разработанное специально для данного практикума. Помимо программ, входящих в изучаемую АС, студентам предлагается поработать с программой автоматизированной статистической обработки данных, получаемых от АС. Также есть программы, написанные на Mathcad, служащие для расчета требуемых параметров оптической схемы источника излучения в АС.

В практикуме достаточно подробно излагаются теоретические вопросы.

Для успешного обучения по данному лабораторному практикуму студентам потребуются базовые физико-математические знания в объеме технического вуза.

Знания, полученные из данного практикума, будут полезными в курсе «Проектирование АСОИУ».

Данный практикум основан на оригинальных разработках сотрудников Самарского государственного аэрокосмического университета и СФ ФИАН. Автоматизированная система, на которой основан практикум, была одним из результатов долговременного сотрудничества коллектива исследователей СФ ФИАН с предприятиями подшипниковой промышленности г. Самары. В течение трех последних лет она успешно использовалась в процессе дипломного проектирования на базе СФ ФИАН студентами СГАУ специальности «АСОИУ». Все научные результаты прошли соответствующую апробацию. Созданные программы тщательно протестированы.

Надеемся, что изложенные в нем сведения будут интересны и полезны студентам и специалистам соответствующих специальностей.

# 1. ДВУМЕРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ТРИАНГУЛЯТОР

## 1.1. Теоретические основы лабораторной работы

Данная разработка СФ ФИАН, названная нами как Двумерный лазерный триангулятор (далее – ДЛТ) оптимизирована для контроля геометрической формы и микрорельефа рабочих поверхностей деталей подшипников. Однако область ее применений может быть шире, так как способ, лежащий в ее основе [3], дает возможность контролировать тела с зеркальной поверхностью произвольной формы. Она может найти применение в машино- и приборостроении, оптике, лазерной технике, микроэлектронике [4], атомной энергетике [23]. Можно назвать ряд подходящих практических приложений: контроль формы валов изделий точной механики; контроль формы рабочих поверхностей деталей машин после моторесурсных испытаний; контроль поверхности топливных стержней атомного реактора.

### 1.1.1 Сбор данных

Способ измерений, реализованный с данной автоматизированной системе, заключается в сканировании контролируемой поверхности детали узким сфокусированным пучком света и регистрации зеркально отраженного пучка света позиционно-чувствительным фотоприемником.

Перед началом измерений оператору надо задать только небольшое количество уставок, характеризующих настройку системы. Цикл измерений выполняется автоматически.

Оптико-механический блок системы показан на рисунках 1 – 3. Обозначения на рисунках 2 и 3: 1 – источник излучения; 2 – контролируемая деталь; 3 – фотоприемник;  $\vec{a}$  - падающий луч;  $\vec{b}$  - отраженный луч;  $AB, C$  – направления сканирования;  $\psi, \xi$  - координаты точки падения отраженного луча на фотоприемник;  $d$  - смещение источника излучения;  $L$  - радиус



поворота каретки с видеокамерой;  $\vec{N}$  - вектор нормали контролируемой поверхности в ее освещенной точке;  $\rho$ ,  $\varphi$  - радиальная и осевая координаты этой освещенной точки в системе цилиндрических координат контролируемой поверхности, ее ось совпадает с  $OZ$ ;  $H(\varphi)$  - высота радиального профиля, ее отсчет ведется в направлении  $\rho$ ;  $\varphi_c$  - осевая координата освещенной точки контролируемой поверхности, она определяется в системе цилиндрических координат оптико-механического блока, ее начало находится в точке  $O$ , ось совпадает с  $OZ$ , начало отсчета  $\varphi_c$  совпадает с  $OX$ , отсчет  $\varphi_c$  ведется в сторону оси  $OY$ ;  $\varphi_R$  - угол поворота контролируемой детали, он измеряется в этой же системе цилиндрических координат оптико-механического блока.

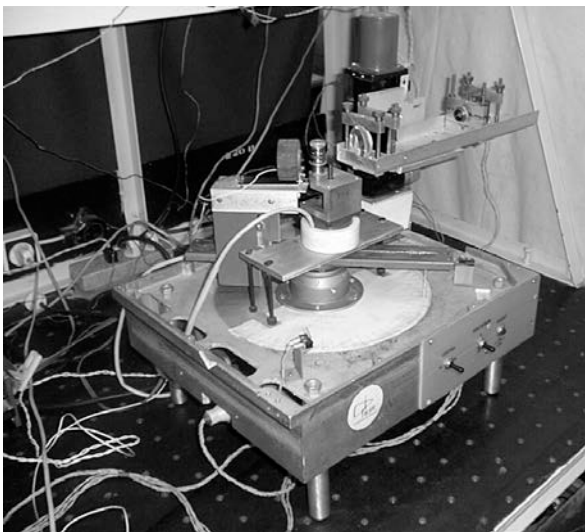


Рисунок 1 - Оптико-механический блок

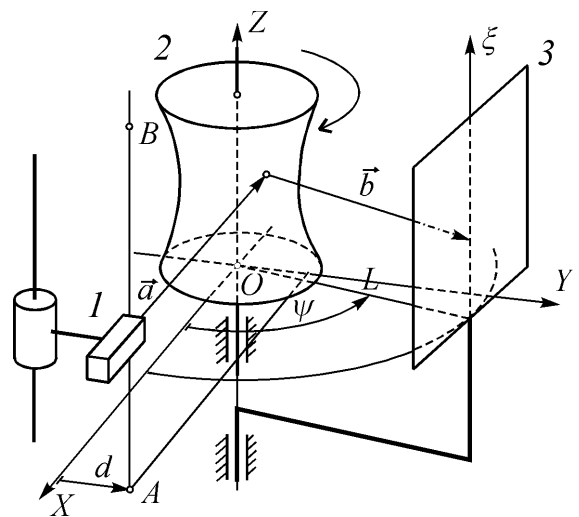


Рисунок 2 - Конфигурация оптико-механического блока системы

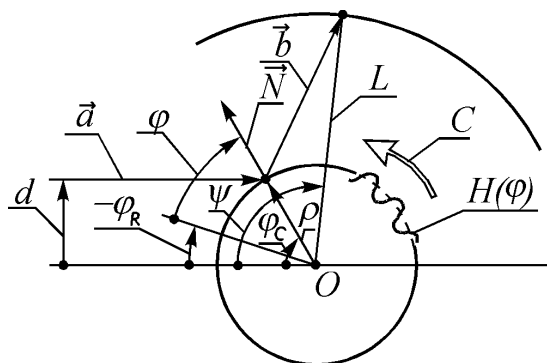


Рисунок 3 - Оптико-механическая схема координатных измерений

Система способна адаптироваться под конкретный типоразмер детали. Для этого фотоприемник 3 установлен на каретке с возможностью перемещения по дуге окружности радиуса  $L$  в плоскости  $XOY$ .

Сканирование контролируемой поверхности проводится по ее радиальным профилям. Оно проводится дискретно, поворотом контролируемой детали вокруг  $OZ$  с постоянным шагом. Величина этого шага определяется заданным количеством шагов  $N$  на радиальный профиль контролируемой поверхности. Во время сканирования радиального профиля компоненты 1 и 3 оптико-механического блока остаются неподвижными.

По окончании сканирования одного радиального профиля происходит остановка контролируемой детали 2. Затем сканирующий пучок света перемещается на другой радиальный профиль детали 2. Это происходит путем параллельного перемещения источника излучения 1 вдоль линии  $AB$  на заданное расстояние. Затем цикл сканирования детали повторяется, уже по другому ее радиальному профилю. Количество  $M$  шагов источника излучения в цикле измерения, а также постоянная величина этого шага задаются оператором. Эта величина выбирается, исходя из требуемой дискретности сканирования контролируемой поверхности.

На рисунке 4 приведена схема алгоритма сбора данных в двумерном лазерном триангуляторе.

Входным сигналом в двумерном лазерном триангуляторе является зависимость распределения мощности пучка света на фотоприемнике от времени. Это аналоговый сигнал.

Выходными сигналами являются измеренные параметры отклонений от круглости – амплитуда и количество волн – радиального профиля контролируемой поверхности, а также круглограмма этого профиля. Выводятся также опциональные параметры: средний радиус и средний наклон радиального профиля.

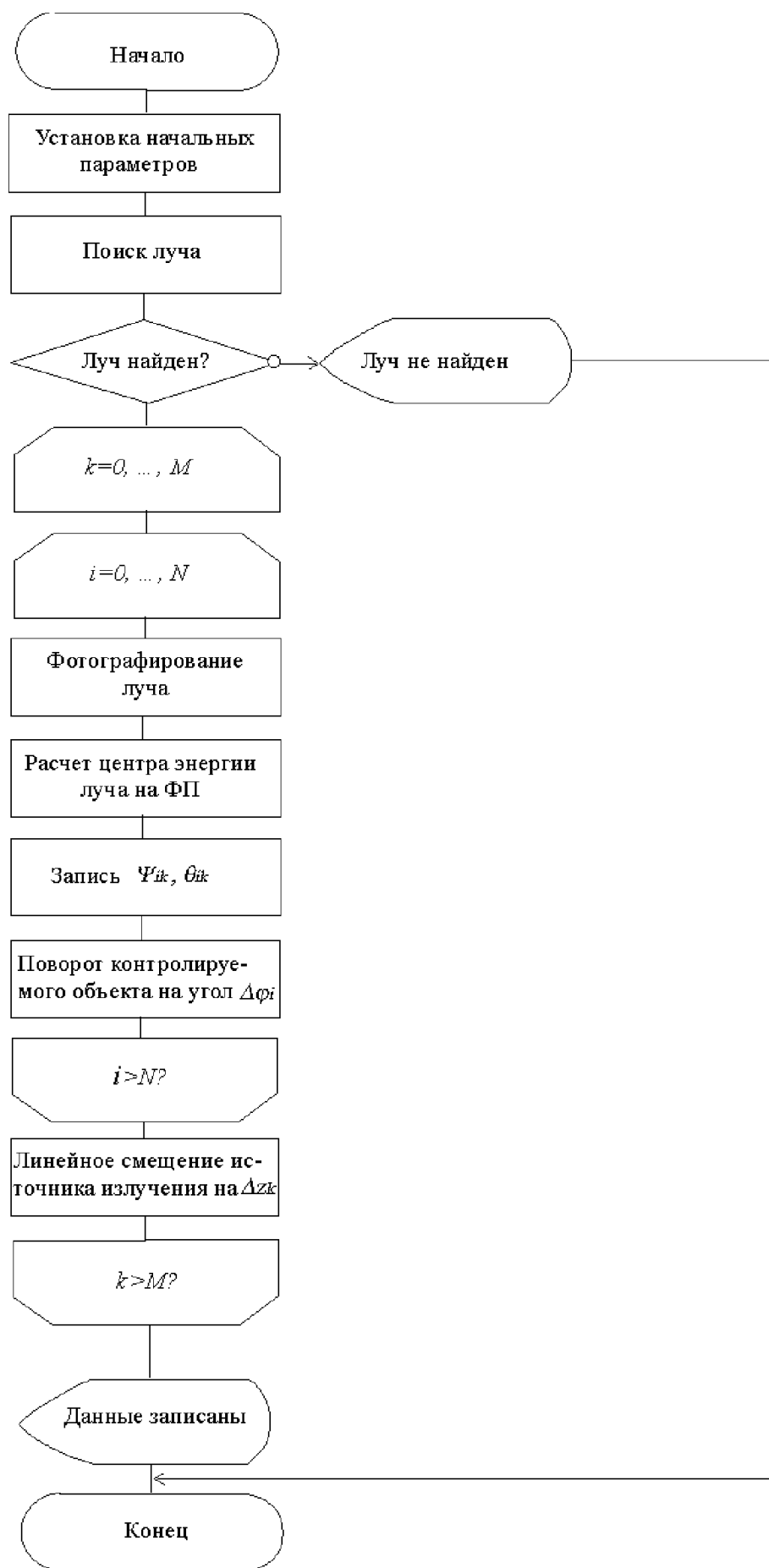


Рисунок 4 –Алгоритм сбора данных

Величины параметров представлены действительными числами с фиксированной запятой. Значения параметров выводятся на экран дисплея в виде цифр, а круглограмма – в виде графика. Она также представлена в виде массива отсчетов высоты радиального профиля. Этот массив выводится на экран дисплея в виде таблицы цифр, а также сохраняется в долговременной памяти компьютера в виде файла в символьных кодах (ASCII).

Информативными параметрами являются зависимости  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ . Для визуального представления и последующей обработки зависимостей  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$  их отсчет удобно вести в сферической системе координат, расположенной следующим образом. Начало этой системы находится в точке пересечения оси  $OZ$  плоскостью, параллельной плоскости  $XOY$  и проходящей через  $\vec{a}$ . В этой плоскости ведется отсчет азимутальных углов  $\psi$ . Начало отсчета углов  $\psi$  ведется от положительного направления  $OX$ . Угол  $\theta$  отсчитывается в меридиональной плоскости – она проходит через  $OZ$ . Начало отсчета угла  $\theta$  ведется от  $XOY$  в сторону положительного направления оси  $OZ$ .

На рисунке 5 приведена структурно-функциональная схема автоматизированной системы. В системе использованы такие высокотехнологичные компоненты, как полупроводниковый лазер, импульсные шаговые двигатели, видеокамера на основе матричного фоточувствительного ПЗС, датчик угла поворота с масочным АЦП оптоэлектронного типа, компьютер. Система дает оператору удобный графический диалоговый интерфейс.

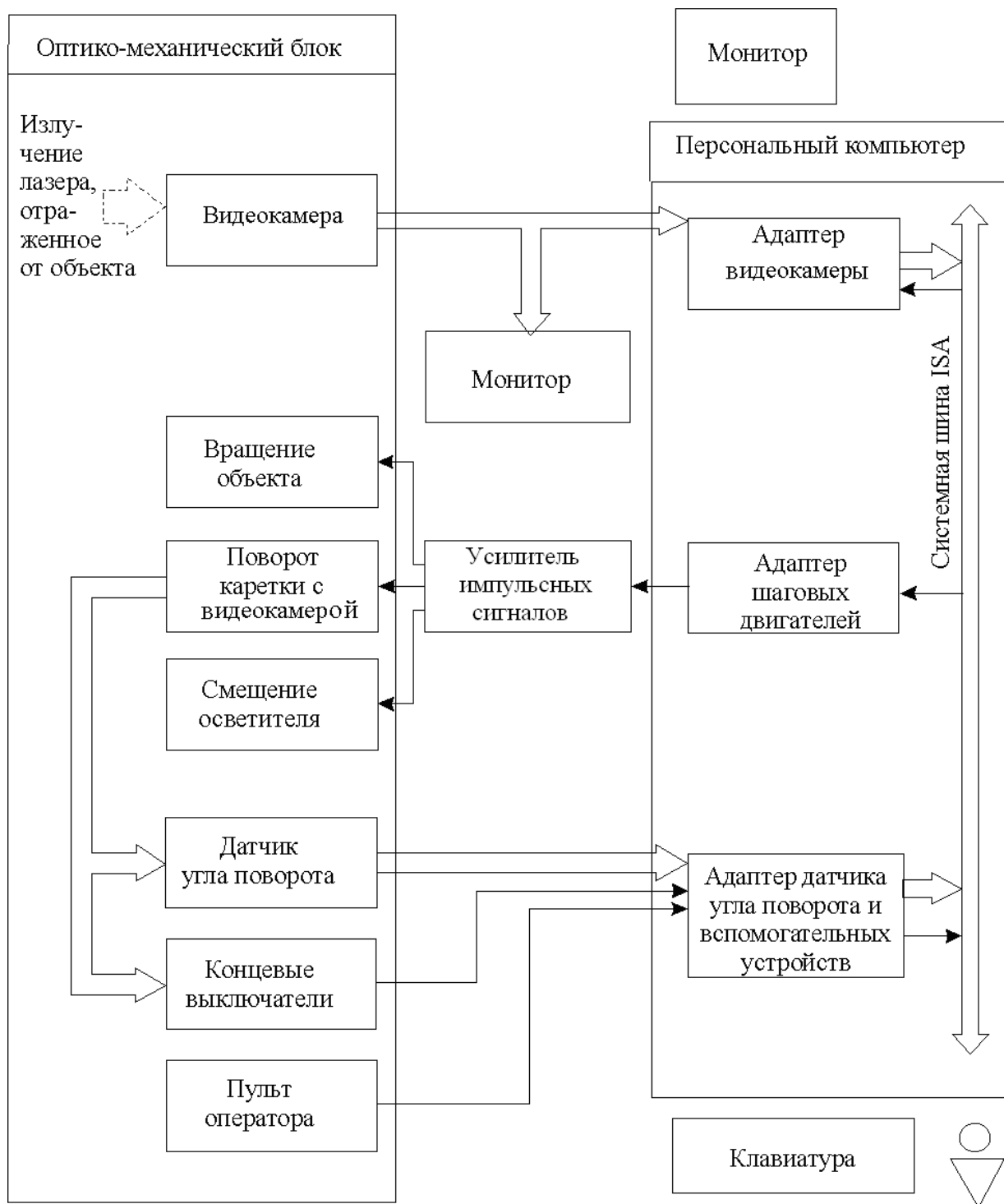


Рисунок 5 – Структурно-функциональная схема автоматизированной системы

### 1.1.2 Обработка данных

Процедура обработки данных в системе подробно описана в приложении А.

Входные и выходные сигналы подсистемы обработки данных

В качестве входных данных использованы зависимости  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ . Они являются выходными сигналами подсистемы сбора данных. Они представлены в виде цифрового кода. Это последовательности дискретных отчетов с равномерным шагом. Эти последовательности получены в пределах каждого радиального профиля. Отметим, что радиальный профиль определен, исходя из ГОСТ 24642-81 «Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения» [12]. Разрядность отсчетов задана, исходя из целей исследования точностных характеристик системы.

Также использованы значения величин  $d$  и  $L$ . Назовем их параметрами настройки [3].

Также использованы параметры, характеризующие дискретность сканирования. Это количество отсчетов радиального профиля, количество радиальных профилей и расстояние между соседними радиальными профилями.

Выходные сигналы выдаются системой в виде цифрового кода. Это радиальные профили и осевой профиль, а также их измеренные статистические параметры. Отметим, что осевой профиль определен, также исходя из ГОСТ 24642-81. Радиальные профили представлены дискретными равномерными отсчетами своих отклонений относительно средней окружности. Радиальные профили, в общем случае, имеют различную величину радиуса средней окружности.

Согласно ГОСТ 24642-81, измерению и контролю подлежат отклонения от номинальной формы. Поэтому измеренные профили часто

представляют в виде либо последовательности отсчетов, либо координатной функции этих отклонений.

Согласно методике ВНИПП [5], для определения статистических показателей отклонений от круглости и их составляющих требуется гармоническая фильтрация радиальных профилей. В системе это выполняется автоматически. Радиальные профили в системе фильтруются с помощью цифровой обработки. Для этого использовано дискретное преобразование Фурье (см., например, [13]).

Автоматизированная система измеряет статистические параметры отклонений от номинального профиля. Для радиальных профилей они определены методикой ВНИПП [5]. Это амплитуда отклонений от круглости и число волн. Эти параметры определяются также и для частотных составляющих отклонений от круглости.

В отличие от ГОСТ 24642-81, оба вида профилей получены относительно средней интегральной, а не прилегающей базовой линии или поверхности. Для шероховатости этот способ представления базовой линии требует ГОСТ 25142-82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения» [9]. При измерениях отклонений от круглости такой способ может привести к завышенным результатам измерений амплитуды. Это сказывается тем сильнее, чем меньше пространственные частоты (количество длин волн по окружности) спектра радиального профиля. Однако эта разница существенна только при явном преобладании какого-либо локального отклонения от круглости. Пользователь мог бы учесть это расхождение введением эмпирической поправки. Разработчик мог бы добавить дополнительную цифровую обработку выходного сигнала. Она заключается в определении параметров прилегающего номинального профиля (например, окружности - для радиального профиля) и пересчете отклонений профиля в его базисе.

## Вывод функции преобразования системы

Вычисление искомых координат контролируемой поверхности производится по тригонометрическим формулам. Они определяют координаты освещенной точки контролируемой поверхности на каждом шаге сканирования. Они выражают собой законы геометрической оптики для отражения света: первый - прямолинейность распространения световых лучей, второй - равенство угла падения углу отражения и третий - то, что падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к поверхности в точке падения луча лежат в одной плоскости.

Указанные три закона выразим в системе уравнений, описывающей одновременное равенство скалярного и векторного произведений двух пар векторов:  $-\vec{a}$ ,  $\vec{N}$  и  $\vec{N}$ ,  $\vec{b}$ . Это система из четырех алгебраических уравнений.

При выводе формул использован тот факт, известный из дифференциальной геометрии, что перпендикуляр к гладкой поверхности в какой-либо ее точке параллелен вектору, проекции которого в декартовых координатах представляют собой частные производные неявной функции вида  $F = 0$  в этой точке.

Перейдя в систему цилиндрических координат (см. рисунок 2), удобную для вывода целевой функции преобразования, получим, что в указанной выше системе имеются три неизвестных:  $\rho$ ,  $\partial\rho/\partial\varphi$  и  $\partial\rho/\partial z$ . Первое из них – это локальный радиус контролируемой поверхности в точке падения луча  $\vec{a}$ , два другие – локальный наклон этого участка поверхности по отношению к осям координат.

Оказывается, что в уравнения системы неизвестные  $\partial\rho/\partial\varphi$  и  $\partial\rho/\partial z$  входят только в первой степени. Оказывается также, что в уравнениях системы нет произведений этих неизвестных величин друг на друга. Это означает, что система уравнений линейна относительно этих двух неизвестных. Это позволяет нам упростить ее методами линейной алгебры.

После линейных преобразований системы оказалось, что ее уравнения составляют две тождественные пары. В то же время неизвестных величин



у нас три – на одно больше. Поэтому, к сожалению, однозначно решить систему не удастся.

Тем не менее, однозначное решение задачи было найдено. Оно было получено решением только одного из двух уравнений этой системы. Для определения координат точки поверхности оказалось недостаточным использовать данные, полученные только с этой точки. Для этого потребовалась вся совокупность данных с какого-нибудь одного профиля.

Большое значение для достижения этой цели имело то, что путем преобразований системы уравнений методами линейной алгебры удалось, во-первых, разделить производные  $\partial\rho/\partial\varphi$  и  $\partial\rho/\partial z$  между двумя уравнениями и, во-вторых, добиться того, чтобы эти производные присутствовали в уравнениях в виде только одного слагаемого.

Наиболее удобным для решения оказалось уравнение, связывающее  $\rho$  и  $\partial\rho/\partial\varphi$ . Это обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка. То есть, в этом уравнении производная находится в левой части, а все остальное – в правой. Оно было решено известным способом. Однозначное его решение было получено по радиальному профилю, используя в качестве граничного условия равенства локального радиуса в начале и в конце замкнутого профиля.

Правая часть указанного дифференциального уравнения есть нелинейная функция переменных  $\rho$ ,  $\psi$  и  $\theta$ . Его можно решать численно, как нелинейное обыкновенное (не в смысле «обычное», а в смысле математического термина) дифференциальное уравнение первого порядка. Но при малых, относительно среднего радиуса, отклонениях от круглости радиального профиля допустима линеаризация правой части уравнения по  $\rho$ ,  $\psi$  и  $\theta$ . Это позволило нам получить алгебраическое решение. Точнее, была найдена алгебраическая связь между гармоникой спектра пространственных частот функций  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$  с гармоникой той же частоты спектра  $\rho(\varphi)$ .

Отметим еще два допущения, принятые нами при выводе функции преобразования.

Первое, перед линеаризацией из правой части дифференциального уравнения был выделен сомножитель  $\rho$  и перенесен в левую его часть. Далее, при решении дифференциального уравнения мы пренебрегли изменением этого сомножителя в левой части.

И второе, мы считаем переменную  $\varphi$  независимой, в то время как она связана с  $\rho$  простым тригонометрическим уравнением.

### 1.1.3 Пользовательский интерфейс

Программное обеспечение состоит из двух программ:

- программа сбора данных;
- программа обработки данных и получения измерительной информации.

На рисунке 6 приведены изображения общего вида экрана дисплея при работе программы сбора данных. На этом рисунке каждый элемент (окно) пользовательского экрана имеет свой номер в левом верхнем углу.



Рисунок 6 - Пользовательский экран программы

Программное обеспечение размещено на жестком диске компьютера и предназначено для использования в среде операционной системы MS-DOS (использовалась версия 6.22). После запуска программы на экране дисплея появляется меню пользователя, позволяющее выбрать интересующие его режимы работы.

Программа сбора данных и получения измерительной информации содержит следующие пункты:

- «Исх. полож»;
- 2) «Калибровка»;
- 3) «Измерение»;
- 4) «Сохранить файл»;
- 5) «Загрузить файл»;
- 6) «График сигнала»;
- 7) «Выход в DOS».

В первом режиме производится установка параметров для второго и третьего режимов работы в окне №2 (см. рисунок 6). Этих параметров – шесть:

- радиус фотоприемника, мм;
- 2) смещение источника излучения, мм;
- 3) количество точек отсчета на радиальный профиль;
- 4) число радиальных сечений;
- 5) шаг источника излучения, мкм;
- 6) исходное положение  $(z_R)_{\min}$  источника излучения, мкм.

Для ввода этих параметров используют функциональные клавиши от F1 до F6. Например, для ввода значения параметра «Радиус фотоприёмника» надо нажать клавишу F1, для ввода значения параметра «Смещение источника излучения» надо соответственно нажать клавишу F2 и так дальше, для ввода параметра « $(z_R)_{\min}$  источника излучения» надо нажать клавишу F6. После нажатия любой клавиши из 6 клавиш: F1, F2, F3, F4, F5, F6 появляется красное окно №3 в котором есть надпись «Ввод данных». Значение

соответствующего параметра в окне №2 окрашивается жёлтым цветом. После нажатия любой вводной функциональной клавиши, кроме функциональной клавиши F3 появляется окно ввода №4, в котором можно ввести значение параметра. После нажатия клавиши F3 окно №4 не появляется. Ввод осуществляется клавишами «стрелка вверх» и «стрелка вниз». После нажатия клавиши «стрелка вверх» значение параметра увеличивается, а после нажатия клавиши «стрелка вниз» - уменьшается. Возможно ввести только одно значение из следующего набора значений: {1, 2, 3, 4, 6, 12, 15, 20, 24, 30, 40, 50, 60, 100, 120, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 2000}.

Для целей исследования динамических свойств системы дополнительно предусмотрено задание двух параметров. Это  $t_1$  - время задержки между командой на поворот контролируемой детали и командой на фотографирование кадра видеокамерой. И  $t_2$  - время задержки между указанной командой на фотографирование и командой на следующий поворот контролируемой детали. На экране интерфейса указано, что они задаются в миллисекундах.

Но на самом деле это верно только для компьютеров IBM PC и совместимых с ним, имеющих центральный процессор типов X86, который работает с тактовой частотой 12 МГц. В случае, если эта частота имеет другое значение, время отличается от номинальной величины в число раз, пропорциональное отношению этих частот. Это проверено на нескольких компьютерах названного типа, а также на компьютере с центральным процессором Pentium MMX с тактовой частотой 200 МГц.

При использовании программ-эмуляторов указанное соотношение не будет соблюдаться. Тогда реальное время задержки следует определить опытным путем. В данном практикуме для этого предусмотрена специальная программа test1.exe в папке lr1\_2. Она после своего запуска попросит ввести задержку в миллисекундах. Это номинальная величина. Затем она выполняет эту задержку. Задача пользователя – определить реальное время задержки по

секундомеру. При работе с этой программой следует подобрать такую номинальную величину, которая была бы удобна для таких измерений времени.

Во втором режиме осуществляется поиск луча и его центрирование в видеокамере.

В третьем режиме осуществляется сканирование объекта и запись результатов измерения в массив данных. При этом в окне №11 выводятся значения рассчитанного среднего радиуса и среднего наклона поверхности к оси  $z$  в данном радиальном сечении, а также средних угловых координат  $\psi_0$  и  $\theta_0$  отраженного пучка света. Кроме того, выводятся также значения коэффициентов линеаризованного дифференциального уравнения, с помощью которого производится восстановление профиля микрорельефа в каждом радиальном сечении.

Для целей исследования контролируемую деталь при операции сбора данных можно оставлять неподвижной. Для этого достаточно отсоединить разъем «ДВ0» блока усилителя импульсных сигналов. Во избежание повреждения аппаратуры следует до проведения этой операции отключить компьютер и усилитель импульсных сигналов.

В четвёртом режиме происходит запись данных из массива данных в файл `bem_XY.dat`, где XY – двузначное число, значение которого можно менять клавишами «стрелка вверх», «стрелка вниз», а также клавишами «Page Up» и «Page Down». После нажатия клавиши «стрелка вверх» значение параметра XY увеличивается на единицу, а после нажатия клавиши «стрелка вниз» - уменьшается на единицу. После нажатия клавиши «Page Up» значение параметра XY увеличивается на 10, а после нажатия клавиши «Page Down» - уменьшается на 10.

В пятом режиме производится чтение файла данных `bem_XY.dat`.

Ввод значения XY осуществляется также, как и в четвёртом режиме. В начале этого файла в текстовом формате содержатся параметры, характеризующие условия измерения, а затем расположены отсчеты

информативных параметров в каждой точке сканирования поверхности объекта. Эти отсчеты представлены в виде трех столбцов. В первом столбце приведен порядковый номер, начиная с единицы, освещенного участка объекта в последовательности этих участков, образующих радиальное сечение поверхности, во втором и третьем столбцах соответственно - значения угловых координат отраженного пучка света на поверхности регистрации - углов  $\psi$  и  $\theta$ . Все углы представлены в градусах. Данные в этих трех столбцах размещены построчно в соответствии с последовательностью просканированных точек поверхности объекта. После считывания выбранного пользователем файла в окне № 2 выводятся параметры, характеризующие условия измерения - они считываются из того же файла.

В шестом режиме можно посмотреть график зависимостей  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ . Первая из них имеет на экране красный цвет, а вторая – синий.

В седьмом режиме происходит выход из программы.

На рисунке 7 приведены изображения общего вида экрана дисплея при работе программы обработки данных и получения измерительной информации.

Эта программа содержит следующие пункты:

- 1) загрузка файла с зависимостями  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ ;
- 2) восстановление усредненного осевого профиля;
- 3) восстановление радиальных профилей отклонений от круглости заданного частотного диапазона;
- 4) вывод графиков зависимостей  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ ;
- 5) вывод графиков на принтер;
- 6) тестирование программ;
- 7) выход в DOS.

В первом режиме производится чтение файла данных, который был выдан программой сбора данных, полученных во время сканирования

объекта. В начале этого файла в текстовом формате содержатся параметры, характеризующие условия измерения, а затем расположены отсчеты  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$  в каждой точке сканирования поверхности объекта. Эти отсчеты представлены в виде трех столбцов. В первом столбце приведен порядковый номер, начиная с единицы, освещенного участка объекта в последовательности этих участков, образующих радиальное сечение поверхности, во втором и третьем столбцах соответственно - значения угловых координат отраженного пучка света на поверхности регистрации - углов  $\psi$  и  $\theta$ . Все углы представлены в градусах. Данные в этих трех столбцах размещены построчно в соответствии с последовательностью просканированных точек поверхности объекта.

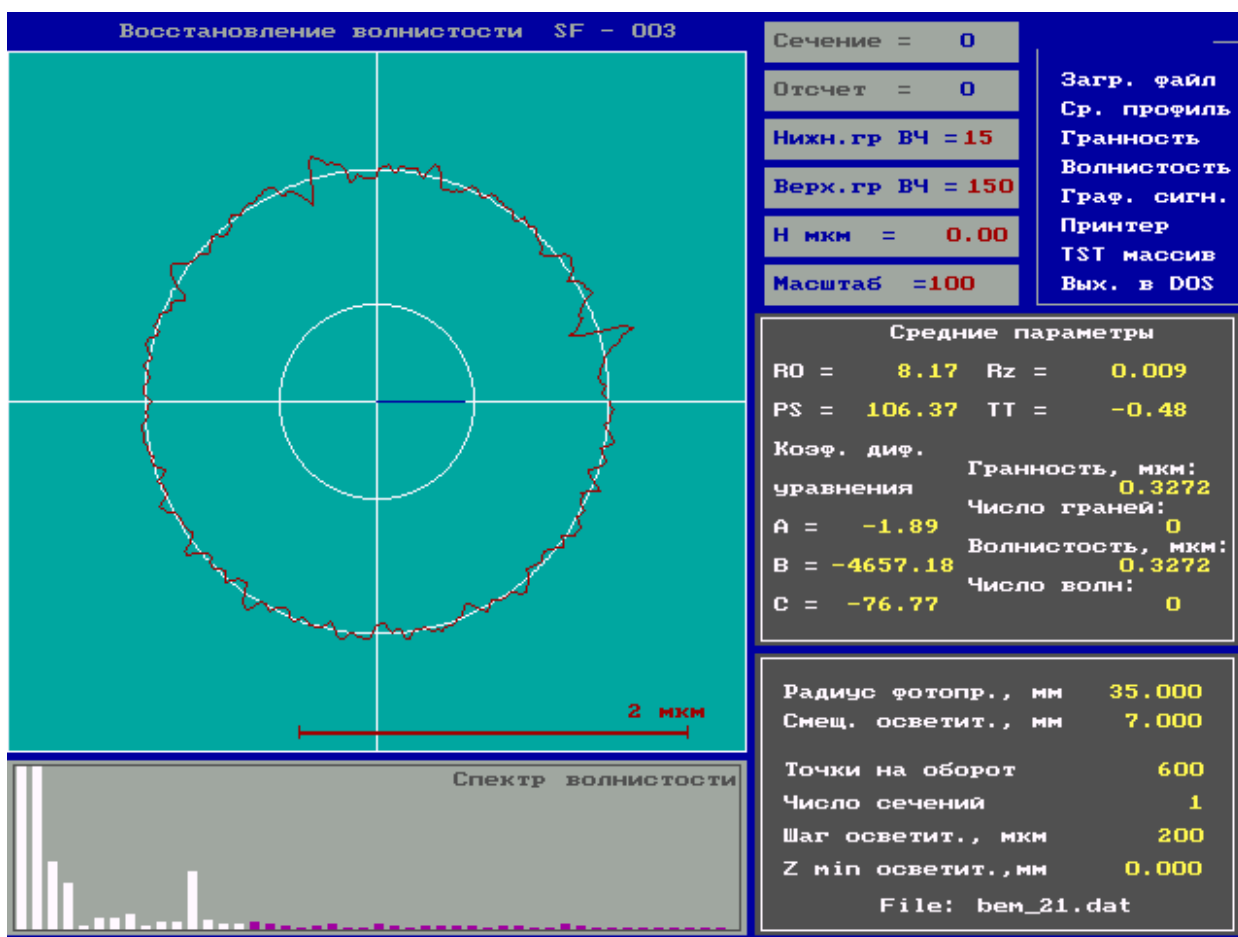


Рисунок 7 - Экран дисплея при работе программы обработки данных и получения измерительной информации

После считывания выбранного пользователем файла в отдельном окне выводятся параметры, характеризующие условия измерения - они считываются из того же файла. Это окно присутствует все время в течение дальнейшей работы программы.

Во втором режиме по данным из загруженного файла восстанавливается усредненный осевой профиль  $R_0(z)$  поверхности вращения, с выводом его в виде графика, а также с выводом числовых коэффициентов, характеризующих функцию  $R_0(z)$ , аппроксимирующую восстановленный профиль. Профиль аппроксимируется степенным полиномом Чебышева по критерию наилучшего приближения на всем интервале восстановления. Также вычисляется среднеквадратическая ошибка приближения функции профиля этим полиномом, которое также выводится на экран. Порядок степенного аппроксимирующего полинома может варьироваться пользователем от одного до шести.

В третьем режиме по данным из загруженного файла производится восстановление профиля отклонений от круглости радиальных сечений контролируемой поверхности. Эти графики приведены на экране в виде круглограмм, как функции высоты, отсчитываемой относительно среднего профиля, от угловой координаты точки контролируемой поверхности. Круглограмма каждого из сечений может быть выведена пользователем поочередно. При этом в дополнительном окне выводится Фурье-спектр амплитуд гармоник отклонений от круглости данного сечения.

С помощью управляющих клавиш клавиатуры можно выбрать любую нужную точку на круглограмме, чтобы получить значения координат этой точки в цифровой форме. При необходимости можно получить круглограмму отфильтрованного профиля, когда некоторые гармоники удалены.

В четвертом режиме можно посмотреть графики зависимостей  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ , а также Фурье-спектры этих двух функций.



В пятом режиме изображение с экрана дисплея может быть распечатано на принтере, или записано в файл на диске. Полученные круглограммы также могут быть выведены в виде текстового файла, аналогично файлу, в котором содержались данные  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$ .

В шестом режиме на экран дисплея выводится круглограмма, полученная из массива тестовых данных, которые представляют собой отсчеты синусоиды с количеством волн на оборот, равным семи.

В седьмом режиме происходит выход из программы.

Так как разработанная версия АС предназначена для ее исследования с целью дальнейшего усовершенствования, то на экран дисплея также выводится некоторая дополнительная информация, необязательная для конечного пользователя. Так, в третьем режиме выводятся значения рассчитанного среднего радиуса и среднего наклона поверхности в данном радиальном сечении, а также средних угловых координат отраженного пучка света. Кроме того, выводятся также значения коэффициентов линеаризованного дифференциального уравнения, с помощью которого производится восстановление профиля микрорельефа в каждом радиальном сечении. Эти данные могут помочь при тестировании АС и оценке точности результатов расчетов, которые в дальнейшем можно будет делать автоматически.

Исходное программное обеспечение реализовано на языке «Си». Программирование производилось с помощью интегрированной среды «Турбо-Си», версия 2.0, (Borland International, США). При запуске программа занимает не более 350 Кбайт в ОЗУ компьютера.

Помимо прикладных программ АС, студенты при изучении данного лабораторного практикума должны использовать и программы статистической обработки данных.

Для этого можно использовать программу статистической обработки данных `dates3.xls`, написанную на Excel 97. Программа находится в подкаталоге `lr1_1`.

Однако предпочтительней более современная программа, которая находится в папке «2012У». Эту программу любезно предоставил выпускник факультета «Информатика» СГАУ Юрий Понявин. Она имеет развитый интерактивный графический интерфейс с пользователем, и не требует от последнего знания программного синтаксиса, подобно MathCad или Excel. Более того, эта программа удобнее в работе. Она автоматически обрабатывает сразу все файлы данных из нужной статистической выборки, полученной при сборе данных от АС. То есть, выполняет работу программы вычисления высот круглограммы и определения статистических параметров радиального профиля, а затем записывает их в массив и проводит его статистическую обработку.

#### **1.1.4 Требования к качеству контролируемой детали по отклонениям геометрической формы поверхности вращения**

В качестве контролируемого объекта в данной работе выбрана дорожка качения внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201. Контролируется качество его рабочей поверхности. Дорожка представляет собой желоб и имеет форму тора. В системе контролируется отклонение его геометрической формы. Контроль производится по радиальному профилю в районе дна желоба, в соответствии с руководящими документами ВНИИ подшипниковой промышленности РД ВНИПП 37.006.106.90 [5], РД ВНИПП 013-00 [6].

Основные размеры детали приведены на рисунке 8.

Размеры для справок:

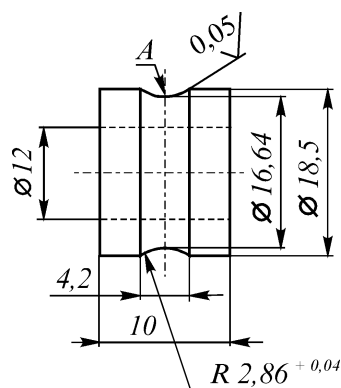
большой радиус тора 11,2 мм,

малый радиус тора 2,86 мм,

ширина дорожки качения 4,2 мм.

В ГОСТ 24642-81[7] указано в качестве характеристики частоты рельефа поверхности определять количество волн на профиле ее сечения, где

одна волна охватывает участок, заключенный между тремя соседними точками пересечения восстановленного профиля со средней окружностью.



A – дорожка качения (желоб); отверстие обозначают стандартным параметром  $d$

Рисунок 8 –Контролируемая деталь

В настоящее время, согласно ГОСТ 520-2002 [8], отклонения формы рабочих поверхностей подшипников проверяются путем выборочного контроля.

Согласно [5], все отклонения формы, кроме шероховатости, характеризуются термином «отклонение от круглости», которое определяется как наибольшее расстояние от точек реального графика прилегающей окружности. При этом данный термин подразумевает что названный параметр включает весь спектр частот, кроме первой гармоники и гармоник, которые относятся к шероховатости. Если количество волн профиля по окружности равно или менее 15, то отклонение от круглости определяется как сумма абсолютных значений двух наибольших отклонений точек реального графика по обе стороны от средней окружности (по одному в каждую сторону).

Отклонения формы классифицируются на несколько групп:

- волнистость – отклонение от круглости с количеством волн по окружности от 16 до 500;
- гранность – отклонение от круглости с количеством волн по окружности от четырех до 15;

- огранка – отклонение от круглости, при котором реальный профиль представляет собой многогранную фигуру, огранка подразделяется по числу граней [9].

Согласно РД ВНИПП. 013-00, существуют допуски круглости и волнистости дорожек качения колец подшипников. Тип 201 относится к шариковым радиальным подшипникам. В таблице 1 приведены названные допуски для его внутреннего кольца, использованного в данной работе.

Таблица 1 - Допуски круглости и волнистости дорожек качения колец

<i>d</i> , мм Св. 10 до 18	Внутреннее кольцо					
	Категория В			Категория А		
	Класс точности					
	0	6	5	5	4	Т и 2
	<i>мкм</i> , не более					
круглость	1,6	1,2	1	0,8	0,5	0,3
волнистость	0,2	0,16	0,12	0,1	0,08	0,05

В пределах данной таблицы приведено стандартное обозначение *d* – внутренний диаметр радиального подшипника [8], он является и внутренним диаметром его внутреннего кольца.

Необходимо указать, что понятие «реальный профиль», использованное в стандартах, и введенное ГОСТ 24642-81 [12] аналогично понятию «действительное значение измеряемой величины», и представляет собой не сечение поверхности, а круглограмму, то есть, график, осью абсцисс которого является окружность, а значения функции отчитываются в радиальном направлении, причем с большим линейным увеличением. В [12] введено также понятия «радиальный профиль» и «радиальное сечение». Это сечение, перпендикулярное оси вращения номинальной поверхности детали. Там же определено, что «номинальная поверхность»,

это поверхность, заданная при проектировании детали номинальными размерами.

Для волнистости в [5] предложена также альтернативная оценка. Она производится путем подсчета среднего арифметического значения из пяти максимальных волн. При этом за высоту каждой отдельной волны следует принимать расстояние между двумя окружностями, концентричными линии абсцисс-окружностей на круглограмме. Одна из этих окружностей расположена касательно к вершине, а вторая проходит через две впадины, смежные с вершиной измеряемой волны.

### 1.1.5. Требование к погрешности измерительного канала АС

Согласно методике [5], ориентированной на контактный метод, процесс измерений производится путем относительного прецизионного вращения измерительного наконечника вокруг оси вращения контролируемой детали (см. рисунок 9). На рисунке 10 показано положение измерительного наконечника при этом процессе.

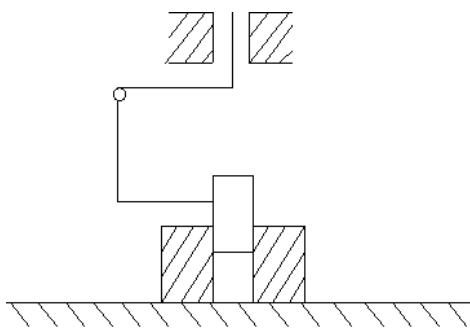


Рисунок 9 – Кинематическая схема измерений контактным кругломером

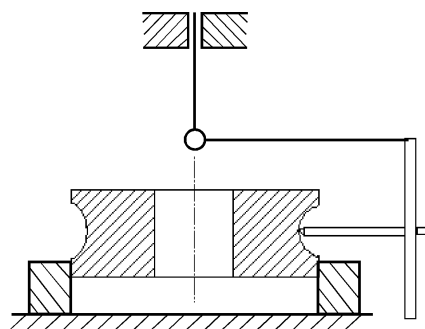


Рисунок 10 - Схема положения измерительного наконечника при измерении детали подшипника

Основные принципы выбора средств измерения для определения геометрических параметров такие же, как и для других размерных параметров в машиностроении: точность измерительного средства должна быть выше заданной точности величины геометрических параметров контролируемого изделия, а трудоемкость измерений и их стоимость должны

быть возможно низкими, обеспечивающими наиболее высокие показатели производительности труда и экономичности.

Рассмотрим требования к производственному контролю [10].

Недостаточная точность измерений приводит к тому, что часть годной (по геометрическим параметрам) продукции бракуют (ошибка I рода) и вместе с тем брак частично принимают как годную продукцию (ошибка II рода).

Ошибка первого рода, приводящая к не использованию фактически годного изделия, вызывает прямые экономические потери. Ошибка второго рода, приводящая к использованию дефектных изделий, влечет за собой снижения качества или другие отрицательные явления во время применения ее на практике.

Излишняя точность измерений, как правило, бывает связана с чрезмерным повышением трудоемкости и стоимости контроля качества продукции, а следовательно, ведет к удорожанию и ограничению выпуска. Вопрос в том, какая точность измерений в каждом конкретном случае достаточна, сложен: требуется установить приемлемые при контроле значения рисков (вероятностей) получения ошибок I и II рода, а иногда еще и приемлемые относительные переходы границ поля допуска контролируемого параметра детали. По этим данным можно рассчитать допустимую величину предельной погрешности измерений в предположении определенных законов распределений как геометрических параметров, так и погрешностей измерений. По расчетной предельной погрешности можно выбрать подходящее средство (или метод) измерений по табличным нормативным предельным погрешностям измерений, показанных в таблице 2 [10].

Особенности выбора средств измерений геометрических параметров состоят в следующем. Для измерения параметров имеется ограниченный набор средств измерения с погрешностями показаний от 4,5 до 45%. Эти средства обычно используют в измерительных лабораториях в основном для

аттестации образцовых деталей и проверок образцов, а также реже для выборочного, главным образом, арбитражного контроля наиболее важных деталей.

Таблица 2 - Вероятности  $P_I$  и  $P_{II}$  ошибок I и II рода при размерном контроле деталей машиностроения

$\frac{\sigma_M}{\delta_r} \times 100\%$	Законы распределения контролируемых параметров неровностей поверхности							
	нормальный				существенно положительных величин			
	Законы распределения погрешности измерения							
	нормальный		равномерный		нормальный		равномерный	
	$P_{II} \cdot 100$	$P_I \cdot 100$	$P_{II} \cdot 100$	$P_I \cdot 100$	$P_{II} \cdot 100$	$P_I \cdot 100$	$P_{II} \cdot 100$	$P_I \cdot 100$
1,6	0,37	0,39	0,7	0,75	0,15	0,25	0,4	0,5
3	0,87	0,9	1,2	1,3	0,6	0,7	0,7	0,9
5	1,6	1,7	2,0	2,25	1,2	1,25	1,5	1,5
8	2,6	2,8	3,4	3,7	1,9	2,2	2,4	2,8
10	3,1	3,5	4,5	4,75	2,5	2,75	3,2	3,8
12	3,75	4,1	5,4	5,8	3,0	3,25	3,55	4,2
16	5,0	5,4	7,8	8,25	3,9	4,35	5,2	5,5

Примечание -  $\sigma_M$  - среднее квадратическое отклонение погрешности измерений;  $\delta_r$  - допуск на контролируемый параметр.

Требования к предельной допустимой погрешности измерений в нашей задаче стандартизованы (см. ГОСТ 17353-89 [11]). Они получены исходя из предельной допустимой вероятности ошибки I и II рода. При этом учтены ограничения, определяемые, с одной стороны, технической возможностью средств измерений (контактные кругломеры), а с другой стороны, требованиями погрешностей контролируемой детали наивысшего класса

точности. Класс точности и допускаемая погрешность приведены в таблице 3. В пределах данной таблицы  $h$  – это высота над базовой поверхностью узла крепления контролируемой детали, выраженная в миллиметрах. На этой поверхности деталь устанавливается в процессе контроля (см. рисунок 9).

Таблица 3 – Предельные допустимые погрешности кругломеров [11]

Класс точности прибора	Допускаемая погрешность, <i>мкм</i>	
	радиальная	осевая
1	$0,05 \pm 0,0005 h$	0,08
2	$0,12 \pm 0,0012 h$	0,15

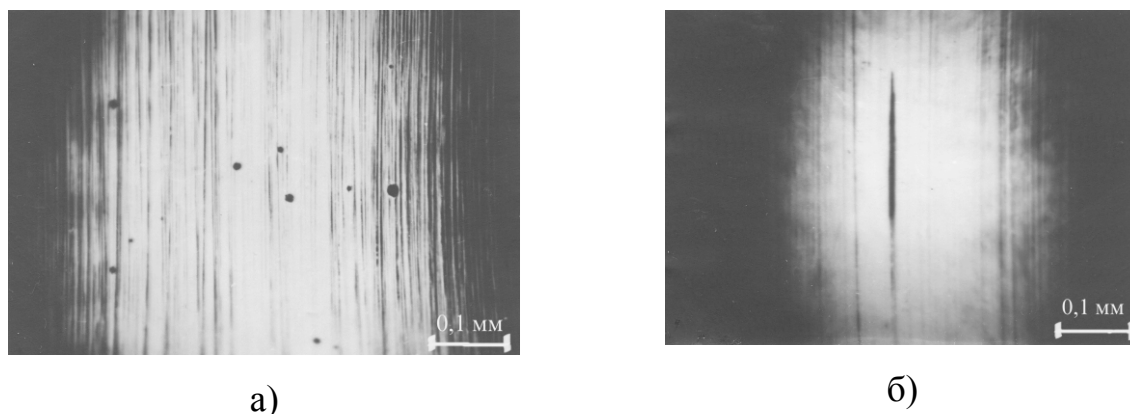
### 1.1.6 Влияние локальных дефектов на погрешность измерительной информации

На погрешность измерений, описанную в данном практикуме АС, заметно влияют локальные микродефекты (примеры см. на рисунке 11). Они приводят к уменьшению амплитуды входного сигнала и искажению его формы. Из-за этого измеренные значения информативных параметров имеют большие отклонения от модели (описанной в приложении А). Это приводит к недопустимому увеличению погрешности измерений.

Борьба с этими помехами ведется с помощью адаптивной пороговой фильтрации. Она выполняется в программе сбора данных. Для этого устанавливается относительный пороговый уровень амплитуды входного сигнала, преобразованного в цифровую форму. Сигналы ниже этого уровня отбрасываются, а на их место записываются медианные значения, определенные по близлежащим дискретным отсчетам  $\varphi$  в помощью



линейной интерполяции. Можно экспериментально определить оптимальную величину указанного уровня.



участки поверхности, имеющей типичные локальные микродефекты:

а) точечные, б) в виде короткой риски

Рисунок 11 - Увеличенные изображения участков контролируемой поверхности

Величина относительного уровня в данном случае в программе задается постоянной в процессе измерений. Она может быть изменена пользователем с помощью функциональной клавиши F9, с последующим вводом нового значения с клавиатуры, которое высвечивается в появившемся окне, для контроля правильности ввода.

Программа по этому значению автоматически определяет абсолютный уровень фильтрации, который задается в количестве пикселей квантования по уровню оцифрованного входного сигнала.

Отметим, что использовать математическое моделирование в данном случае довольно сложно из-за непараксиальности угла падения зондирующего пучка на контролируемую поверхность и неплоскости экрана – освещенного участка контролируемой поверхности. В классической теории дифракции (интеграл Кирхгофа), широко используемой для подобных задач, эти условия не предусмотрены. Корректное решение могло бы быть получено с помощью классической электромагнитной теории (уравнения Максвелла).

### 1.1.7 Сравнительный анализ кругломеров различного типа

В настоящее время на большинстве предприятий подшипниковой промышленности России рассматриваемые измерения проводятся контактным методом. В них часто используют, например, кругломер Talyrond-51 (Rank Taylor Hobson Ltd., Великобритания).

В настоящее время существуют средства активного контроля дефектов формы, то есть, применяемые в процессе шлифования рабочих поверхностей деталей. Это, например, разработки фирмы «Юнкер» (Германия), или фирмы «Ренишоу» (Россия, г. Москва). Эти системы основаны на контактных датчиках. Их естественным недостатком является низкое быстродействие, которое намного снижает производительность.

В настоящее время существуют также оптические приборы для рассматриваемых задач в лабораторных условиях (см, напр., [14]). Они основаны на интерферометрических методах. Недостатки этих методов: сложность обработки входного сигнала; сложность адаптации системы при переходе к контролю поверхностей другой геометрической формы, например, при переходе с торической формы на коническую [15].

АС, описанная в данном практикуме, свободна от этих недостатков. Поэтому способ, лежащий в ее основе, имеет более благоприятные предпосылки к применению в системах активного контроля. Этому способствует и простота предварительной обработки входного сигнала, что допускает проведение этой операции аналоговым способом. Благодаря этому допустимо создание систем активного контроля, гораздо более быстродействующих, чем существующие системы, что является актуальной задачей.

## **1.2 Лабораторная работа № 1. Функциональные возможности двумерного лазерного триангулятора и его погрешности**

**Цель работы:** ознакомление с функциями двумерного лазерного триангулятора, приобретение навыков работы с ним.

### **1.2.1 Задание на самостоятельную работу**

В соответствии с подразделом 1.1.3 ознакомьтесь с функциями пользовательского меню обеих программ. Для этого скопируйте в текущий каталог обеих программ «2009А» и «2009Е» файл из подкаталога «160196», находящегося в текущем каталоге «2009D», и именем «bem\_00.dat». Здесь и далее возможна замена файла и каталогов по указанию преподавателя. Если в текущем каталоге программ есть уже файлы с именами «bem\_XX.dat», где XX – число от 0 до 99, то эти файлы следует предварительно удалить.

В скопированном файле записаны данные, снятые с подряд расположенных радиальных профилей в районе дна желоба внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201.

Измерьте параметры гранности, волнистости и некруглости поверхности во всех радиальных профилях, данные с которых записаны в скопированном файле.

Для этого выберите пункт меню «Гранность» или «Волнистость», затем, после того как диалоговое окно изменится, установите стрелками с клавиатуры границы частотного диапазона получаемых профилей. Значения границ выводятся в окнах «Ниж. гр. ВЧ» и «Верх. гр. ВЧ». В первом из названных окон показан номер на единицу меньше самой нижней гармоники, пропущенной фильтром. Сверьте эти значения с графиком спектра на экране дисплея. На этом графике белым цветом показаны удаленные фильтром гармоники.

Теперь, чтобы получить расчетные данные, сначала выйдите из пункта меню, где вы находитесь, путем нажатия «Esc», а затем выберите еще раз тот же пункт меню.

Сравните полученные данные измерений.

Скопируйте из подкаталога «220909» файлы «bem\_54.dat», bem\_21.dat» и «bem\_02.dat». Они содержат данные, полученные с детали без дефектов формы, с дефектом формы «гранность» и с остановленного кольца, соответственно. В таблице 4 приведены атрибуты файлов, для их идентификации.

Таблица 4 – Атрибуты файлов, используемых в работе

Имя, с расширением dos	Размер, байт	Дата создания, число. месяц. год	Время создания, часы: минуты
bem_02.dat	14476	29.06.07	15:25
bem_21.dat	14476	15.08.04	18:18
bem_54.dat	14476	28.05.07	19:23

Данные с остановленного кольца снимались для оценки предельных минимальных погрешностей, то есть, при исключении фактора, связанного с погрешностью разворота детали во время сканирования.

Повторите измерения с этими тремя файлами.

Оцените погрешность измерений АС. Для этого обработайте данные из нескольких серий измерений, полученных с дефектного, с бездефектного, и с остановленного кольца. Вначале получите параметры радиального профиля с каждого из этих файлов. Файлы с подкаталогах содержат результаты серии из 200 измерений. Размер статистической выборки может быть изменен преподавателем.

Серия данных с дефектного кольца содержится в подкаталогах «26.06.07» и «27.06.07», - с бездефектного кольца, в «28.06.07» и «29.06.07». Серия данных с остановленного кольца находится в подкаталогах

«100707» и «110707». Данные снимались последовательно, каждая серия из 200 измерений снималась в два этапа. За один день делалось по 100 измерений.

Обработайте полученные данные, с целью нахождения статистических характеристик погрешности измерений АС. Рекомендуем использовать процедуру, изложенную в [16]. Для этого можно использовать программу статистической обработки данных *dates3.xls*, написанную на Excel 97. Программа находится в подкаталоге *lr1\_1*.

Однако предпочтительней более современная программа, которая находится в папке «2012Y» (см. конец подраздела 1.1.3).

Сравните полученные данные с результатами измерений тех же деталей контактным кругломером. Они дали для дефектного кольца амплитуду гранности от 0,4 до 0,5 *мкм*, амплитуду волнистости 0,2 *мкм*. Для бездефектного кольца результаты были следующими: амплитуда гранности 0,2 *мкм*, волнистости – 0,05 *мкм*.

Оцените, исходя из полученных и имеющихся данных составляющие погрешности измерений АС. Перед оценкой доверительного интервала проверьте гипотезу нормального распределения случайной величины для всех трех серий данных. Уровень значимости для статистических вычислений возьмите 0,05.

### **1.2.2 Содержание отчета**

Отчет должен содержать следующие компоненты:

- гистограммы измеренных величин – гранности, волнистости, некруглости - всех трех серий;
- оценки погрешностей, включая все ее составляющие, а также оценку погрешности сделанной оценки;
- параметры данных измерений, включая границы частотного фильтра;
- выводы по результатам сравнения с контактным кругломером.

### 1.2.3 Контрольные вопросы

1) Назовите цели и задачи контроля геометрической формы деталей подшипников.

2) Назовите контролируемые параметры геометрической формы деталей подшипников.

3) Расскажите, как проводится контроль геометрической формы деталей подшипников.

4) Назовите основные физические методы, используемые в АС контроля геометрической формы деталей подшипников. Охарактеризуйте эти методы, назовите их достоинства и недостатки.

5) Объясните, чем обоснован выбор количества отсчетов на радиальный профиль в программе сбора данных.

6) Дайте определение ошибок I и II рода при контроле деталей в машиностроении.

7) Оцените величины ошибок I и II рода при контроле в рассматриваемой задаче при использовании контактного кругломера.

8) Дайте ответ, можно ли измеренные величины считать распределенными по нормальному закону, обоснуйте свой ответ.

9) Определите основные факторы, влияющие на погрешность измерений АС. Дайте ответ, есть ли среди них преобладающий фактор. Обоснуйте свой ответ.

## 1.3 Лабораторная работа № 2. Влияние дискретности сканирования на погрешность измерений АС

**Цель работы:** изучение влияния дискретности сканирования на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора.

### 1.3.1 Задание на самостоятельную работу

Проведите измерения параметров гранности радиального профиля внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201, имеющего типичный дефект «гранность». Оптико-механический блок должен быть настроен. Значения параметров настройки получите у преподавателя. Динамические параметры сканирования  $t_1$  и  $t_2$  выберите равными нулю.

Проведите по одному сканированию радиального профиля при разных значениях дискретности профиля. Рекомендуемые значения: 60, 600, 1200, 2000. Файлы с полученными данными добавьте в подкаталоги с соответствующими именами в папке lг1\_2. Имя файла данных выбирайте, исходя из порядкового номера последнего из ранее записанных файлов bem\_XY.dat. Подкаталог может содержать несколько папок, если количество ранее записанных файлов больше 100. В этом случае выбирайте незаполненную папку.

При измерениях следите за начальным положением контролируемой детали в оптико-механическом блоке. Для этого на контролируемой детали нанесена риска. Возможны два варианта измерений, которые указываются преподавателем: при одном и том же начальном положении контролируемой поверхности; при разных ее начальных положениях. В последнем случае следует избегать повторяемости начальных положений контролируемой детали. Для этого перед сканированием следует повернуть контролируемую деталь вокруг ее оси вращения с помощью разворотного узла оптико-механического блока.

Поворот производится по команде с пульта управления, размещенного на оптико-механическом блоке, при выборе в программе сбора данных опции «Настройка». Выбор этой опции, как и ее отмена, производится путем нажатия клавиши «Esc» клавиатуры компьютера. Вращение контролируемой детали по команде от пульта производится при нажатой кнопке «Объект» пульта.

После сканирования контролируемой детали проследите, чтобы она совершила полный оборот. В противном случае сканирование следует повторить.

Получите значения параметров гранности с помощью программы восстановления профилей поверхности 2009А, используя файлы данных, полученные вами с помощью программы 2000Е. Добавьте полученные значения в конец файла Hr.dat в папках «60», ..., «2000» подкаталога lr1\_2.

Выполните статистическую обработку данных, находящихся в файлах Hr.dat. Рекомендуем для этого использовать [16]. Можно использовать программу dates3.xls из папки lr1\_1.

Однако предпочтительней более современная программа, которая находится в папке «2012Y» (см. конец подраздела 1.1.3).

По указанию преподавателя повторите измерения, но уже с неподвижной контролируемой деталью. Данные добавьте в конец файлов, находящихся в папке lr1\_2\ stop.

Сравните полученные результаты с данными, полученными контактным кругломером, оцените составляющие погрешности измерений, исследуйте вид статистического распределения данных (см. подраздел 1.2.1).

### **1.3.2 Содержание отчета**

Отчет должен содержать следующие компоненты:

- гистограммы амплитуды гранности для всех серий измерений;
- оценки погрешностей, включая все ее составляющие, а также оценку погрешности сделанной оценки;



- параметры данных измерений, включая границы частотного фильтра;
- выводы по результатам сравнения погрешности измерений между сериями измерений, проведенными при различной дискретности сканирования.

### **1.3.3 Контрольные вопросы**

- 1) Расскажите, в чем суть теорем Шеннона и Котельникова. Какое отношение они имеют к данной работе?
- 2) Объясните, чем обоснован выбор количества отсчетов на радиальный профиль в программе сбора данных.
- 3) Назовите верхний и нижний пределы дискретности сканирования в двумерном лазерном триангуляторе. Какие факторы их определяют?
- 4) Существуют ли физические ограничения на пространственное разрешение профиля при измерениях контактным кругломером? Каковы пределы этого пространственного разрешения и с чем они связаны?
- 5) Объясните, какие факторы определяют вид полученной экспериментальной зависимости погрешности амплитуды гранности от дискретности сканирования.
- 6) Объясните, зачем нужны эксперименты с неподвижной контролируемой деталью в данной работе.
- 7) Влияют ли величины параметров настройки оптической схемы на минимальный допустимый шаг дискретности сканирования контролируемой детали в данной работе, и если да, то как именно?

## 1.4 Лабораторная работа № 3. Динамические характеристики АС

**Цель работы:** изучение влияния скорости сканирования контролируемой детали на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора.

### 1.4.1 Задание на самостоятельную работу

Убедитесь, с помощью преподавателя, что оптико-механический блок системы настроен. Узнайте у преподавателя параметры настройки этого блока.

С помощью программы сбора данных 2009Е выполните сканирование контролируемой детали, содержащей дефект «гранность». Сделайте несколько измерений. При этом последовательно установите в программе значения  $t_1$  равными 0, 100, 200 и 300 мс, а значения  $t_2$  равными нулю.

Проведите оценку реального времени задержки, соответствующего его номинальному значению. Для этого можете использовать программу test1.exe в папке lr1\_2 (см. подраздел 1.1.3).

Установите максимальную дискретность сканирования – 2000 отсчетов на радиальный профиль. С помощью программы обработки данных 2009А определите параметры гранности, волнистости и некруглости контролируемой поверхности. При этом следуйте указаниям, изложенным в подразделе 1.2.1.

Результаты измерений добавьте в соответствующие файлы и папки директории lr1\_3. Для навигации используйте файлы dirinfo в этих папках. Допишите в файлы dirinfo этих папок сведения о проведенных вами измерениях с обязательным указанием длины волны и типа лазера в источнике излучения, а также характеристики контролируемой поверхности. Для примера можете использовать текст, уже имеющийся в файлах dirinfo указанных папок.

Выполните статистическую обработку данных, находящихся в файлах с результатами измеренных значений амплитуды отклонений от круглости. Рекомендуем для этого использовать [16]. Можно использовать программу `dates3.xls` из папки `lr1_1`.

Однако предпочтительней более современная программа, которая находится в папке «2012Y» (см. конец подраздела 1.1.3).

По указанию преподавателя повторите измерения, но уже с неподвижной контролируемой деталью. Данные добавьте в конец файлов, находящихся в папке `lr1_3\stop`.

Сравните полученные результаты с данными, полученными контактным кругломером, оцените составляющие погрешности измерений, исследуйте вид статистического распределения данных (см. подраздел 1.2.1).

Постройте зависимость составляющих погрешности измерений и суммарной погрешности от  $t_1$ . Вместо этого параметра используйте время сканирования одного радиального профиля.

#### **1.4.2 Содержание отчета**

Отчет должен содержать следующие компоненты:

- гистограммы одной из измеренных величин, по указанию преподавателя, – гранности, волнистости, некруглости - всех четырех серий, соответствующих различным значениям  $t_1$ ;
- оценки погрешностей, включая все ее составляющие, а также оценку погрешности сделанной оценки;
- параметры данных измерений, включая границы частотного фильтра и дискретность отсчетов радиального профиля;
- экспериментальную зависимость всех составляющих погрешности измерений и суммарную погрешность от времени сканирования радиального профиля с указанием ошибки измерений;
- выводы по результатам измерений.

### 1.4.3 Контрольные вопросы

1) Расскажите, как влияет скорость сканирования контролируемой детали на погрешность измерительной информации в двумерном лазерном триангуляторе.

2) Существуют ли физические ограничения максимальной возможной скорости сканирования контролируемой поверхности при использовании способа, реализованного в двумерном лазерном триангуляторе? Каковы пределы этой скорости и с чем они связаны?

3) Назовите верхний и нижний пределы скорости сканирования контролируемой детали в используемом в данной работе двумерном лазерном триангуляторе. Какие факторы их определяют?

4) Объясните, какие факторы определяют вид полученной экспериментальной зависимости погрешности амплитуды отклонений от круглости от времени сканирования радиального профиля контролируемой поверхности в двумерном лазерном триангуляторе.

5) Объясните, зачем нужны эксперименты с неподвижной контролируемой деталью в данной работе.

6) Влияют ли величины параметров настройки оптической схемы на исследуемую зависимость и если да, то как именно?

7) Почему значение  $t_2$  во всех сериях измерений устанавливалось равным нулю, а  $t_1$  изменялось? Что было бы, если бы поступали наоборот?

8) Соблюдалось ли в используемой вами в данной работе автоматизированной системе пропорциональное соотношение между частотой центрального процессора компьютера и реальным временем задержки, соответствующим  $t_1$ , в программе сбора данных, и если нет, то почему?

## **1.5 Лабораторная работа № 4. Влияние адаптивной пороговой фильтрации входного сигнала на погрешность измерений АС**

**Цель работы:** изучение влияние уровня адаптивной пороговой фильтрации на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора.

### **1.5.1 Задание на самостоятельную работу**

Изучите под микроскопом контролируемую деталь, имеющую локальные дефекты на рабочей поверхности. Для изучения предлагается использовать ту же деталь, которая использована в трех предыдущих работах. Кроме типичного дефекта - «гранность» - она имеет и локальные дефекты, по которым ее также следует забраковать по существующим отраслевым нормам контроля.

Для изучения предлагаем использовать микроскоп МИС-11, а также приспособление для разворота детали, которое используется для ручного контроля на наличие локальных дефектов. Данный микроскоп для нас удобен тем, что содержит прецизионные линейные подвижки предметного столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

С помощью микроскопа, перемещая предметный столик с установленным на нем образцом, определите характерные размеры локальных микродефектов в плане контролируемой поверхности. Сравните их с поперечной шириной зондирующего пучка света двумерного лазерного триангулятора на контролируемой поверхности. Для этого используйте приложения Б и В. По указанию преподавателя, вы можете экспериментально измерить поперечную ширину пучка света на поверхности контролируемой детали в данной работе.

Убедитесь, с помощью преподавателя, что оптико-механический блок системы настроен. Узнайте у преподавателя параметры настройки этого блока.

С помощью программы сбора данных 2009Е выполните сканирование контролируемой детали, исследованной вами в микроскоп. Сделайте несколько измерений. При этом последовательно установите в программе значение относительного порогового уровня фильтрации входного сигнала, равное 0, 0,5, 0,9 и 0,95.

При измерениях установите максимальную дискретность сканирования – 2000 отсчетов на радиальный профиль и значения  $t_1$  и  $t_2$ , равные нулю.

С помощью программы обработки данных 2009А определите параметры гранности, волнистости и некруглости контролируемой поверхности. При этом следуйте указаниям, изложенным в подразделе 1.2.1.

Результаты измерений добавьте в соответствующие файлы и папки директории lr1\_4. Для навигации используйте файлы dirinfo в этих папках. Допишите в файлы dirinfo этих папок сведения о проведенных вами измерениях с обязательным указанием длины волны и типа лазера в источнике излучения, а также характеристики контролируемой поверхности. Для примера можете использовать текст, уже имеющийся в файлах dirinfo указанных папок.

Выполните статистическую обработку данных, находящихся в файлах с результатами измеренных значений амплитуды отклонений от круглости. Рекомендуем для этого использовать [16]. Можно использовать программу dates3.xls из папки lr1\_1.

Однако предпочтительней более современная программа, которая находится в папке «2012У» (см. конец подраздела 1.1.3).

По указанию преподавателя повторите измерения, но уже с неподвижной контролируемой деталью. Данные добавьте в конец файлов, находящихся в папке lr1\_4\ stop.

Сравните полученные результаты с данными, полученными контактным кругломером, оцените составляющие погрешности измерений, исследуйте вид статистического распределения данных (см. подраздел 1.2.1).

Постройте зависимость составляющих погрешности измерений и суммарной погрешности от величины относительного уровня пороговой фильтрации.

### **1.5.2 Содержание отчета**

Отчет должен содержать следующие компоненты:

- гистограммы одной из измеренных величин, по указанию преподавателя, – гранности, волнистости, некруглости - всех четырех серий, соответствующих различным значениям величины относительного уровня пороговой фильтрации;
- оценки погрешностей, включая все ее составляющие, а также оценку погрешности сделанной оценки;
- параметры данных измерений, включая границы частотного фильтра, дискретность отсчетов радиального профиля,  $t_1$  и  $t_2$ ;
- экспериментальную зависимость всех составляющих погрешности измерений и суммарную погрешность от значения величины относительного уровня пороговой фильтрации;
- выводы по результатам измерений.

### **1.5.3 Контрольные вопросы**

1) Расскажите, как влияет величина порогового уровня фильтрации входного сигнала на погрешность измерительной информации в двумерном лазерном триангуляторе.

2) Существуют ли физические ограничения на величину порогового уровня фильтрации входного сигнала при использовании способа, реализованного в двумерном лазерном триангуляторе? Каковы пределы этой величины и с чем они связаны?

3) Назовите верхний и нижний пределы уровня пороговой фильтрации входного сигнала в используемом в данной лабораторной работе двумерном лазерном триангуляторе. Какие факторы их определяют?

4) Для чего пороговая фильтрация входного сигнала двумерного лазерного триангулятора сделана адаптивной? К чему адаптирует система уровень этой фильтрации?

5) Каким способом происходит изучаемая в данной работе пороговая фильтрация? Этот способ цифровой или аналоговый?

6) Объясните, какие факторы определяют вид полученной экспериментальной зависимости погрешности амплитуды отклонений от круглости от величины уровня пороговой фильтрации входного сигнала в двумерном лазерном триангуляторе.

7) Объясните, зачем нужны эксперименты с неподвижной контролируемой деталью в данной работе.

8) Влияют ли величины параметров настройки оптической схемы на исследуемую зависимость и если да, то как именно?

9) Каков определенный вами в эксперименте оптимальный уровень пороговой фильтрации входного сигнала?



## **2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДВУМЕРНОГО ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯТОРА**

### **2.1. Теоретические основы лабораторной работы**

Помимо локальных дефектов, на входной сигнал двумерного лазерного триангулятора существенное влияние оказывают шумы. В данном случае шум означает случайное изменение во времени как собственно входного оптического сигнала, так и преобразованного в электронный аналоговый видеосигнал. Природа этих шумов разная.

Оптические шумы порождаются как процессами, происходящими внутри лазера, так и внешним воздействием на него и другие элементы источника излучения. По этим причинам излучение источника имеет непостоянную интенсивность во времени. Имеет место как модуляция интенсивности, как правило, высокочастотная, в диапазоне от гигагерц, так и случайное ее изменение в широком диапазоне спектра.

Шумы уменьшают, управляя лазерным излучением внутри резонатора лазера и оптимизируя внешние условия его работы. Однако это требует значительных затрат.

Большинство существующих лазеров не имеют таких усовершенствований. Их относят к лазерам с режимом свободной генерации излучения. К ним принадлежит и источник излучения в двумерном лазерном триангуляторе, используемом в данной работе.

Время накопления заряда в ПЗС фотоприемнике, используемом в видеокамере в нашей задаче, составляет  $1/25$  с. Поэтому наибольшее влияние на входной сигнал имеют низкочастотные оптические шумы.

В принципе, информативные параметры в нашей работе не связаны с мощностью лазерного излучения. К тому же основой источника излучения в двумерном лазерном триангуляторе служит лазерный диод, а современные лазерные диоды имеют стабильную диаграмму направленности излучения.

Однако входной сигнал все же изменяется от оптических шумов. Этому способствует паразитная интерференция лазерного пучка на входе ПЗС фотоприемника. Основной вклад вносит лазерный свет, отраженный сначала назад от не чувствительных к свету участков поверхности микросхемы ПЗС фотоприемника и затем отраженный снова вперед защитным стеклом этого фотоприемника. Этот свет попадает на поверхность fotocувствительных секций ПЗС фотоприемника и складывается когерентно с прямо прошедшим лазерным светом.

Из-за шумов лазера в картине интерференции наблюдаются следующие явления: скачкообразное изменение рисунка; кратковременное уменьшение контрастности. Эти явления повторяются, но нерегулярно. Во многих случаях промежутки времени между ними намного превышают  $1/25$  с.

В оптический шум в двумерном лазерном триангуляторе, помимо факторов, связанных с источником излучения, свой вклад вносит и контролируемая поверхность, поскольку при изменении ее положения также изменяется диаграмма направленности отраженного пучка света. При этом разность фаз интерферирующих пучков света, в общем случае, изменяется. Значит, изменяется и интерференционная картина.

В эксперименте при цифровой обработке входного сигнала, преобразованного ПЗС фотоприемником, видны характерные круглые, или же прямолинейные полосы интерференции, амплитуда которых составляет от 4 до 5% от амплитуды входного сигнала. Это удовлетворительно согласуется с известной формулой Френеля для коэффициента отражения на границе двух сред (при перпендикулярном падении на нее луча света):

$$\frac{I}{I_0} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}, \quad (1)$$

где  $I$  и  $I_0$  - интенсивности падающего и прошедшего света соответственно;

$n$  - относительный показатель преломления среды.

Отметим, что для стекла  $n = 1,5$ .

Влияние оптических шумов, связанных с паразитной интерференцией, можно практически устранить, если использовать ПЗС фотоприемник, в котором в качестве защитного стекла использована оптоволоконная шайба, своей задней поверхностью вплотную примыкающая к поверхности микросхемы фотоприемника.

Однако такое техническое решение довольно дорого стоит. И, кроме того, не избавляет от оптических шумов, вызванных внешними шумами и вибрациями. Эти шумы вызываются и работой самого оптико-механического блока, поскольку механическое сканирование нельзя исключить. Не устраняется также влияние вариации локальной кривизны контролируемой поверхности, что приводит к искажению формы входного сигнала. Все это можно отнести к погрешности метода.

В завершение рассмотрения оптических шумов укажем еще на один фактор. Его влиянием в данном случае можно пренебречь. Однако при проектировании оптических систем для измерений геометрических величин он требует анализа.

Контролируемая поверхность своей шероховатостью вызывает в отраженном лазерном пучке спеклы. Это хаотическая мелкомасштабная вариация интенсивности в объеме или в сечении пучка света. Спеклы изменяются и во времени. Причины этого те же, как и в рассмотренных выше факторах. Спеклы особенно характерны для лазерного излучения.

Эксперименты показали, что в двумерном лазерном триангуляторе амплитуда спеклов не превосходит 0,001 от максимальной амплитуды входного сигнала. Так что бороться с ними нам было не нужно. Для сведения укажем, что эта борьба сводится к разрушению когерентности лазерного пучка.

На измерительную информацию влияют также шумы, которые имеют место при оптико-электронном преобразовании. Электронные шумы связаны с физическими процессами, происходящими при работе в приборе с переносом заряда [18], [19] и в других полупроводниковых элементах,

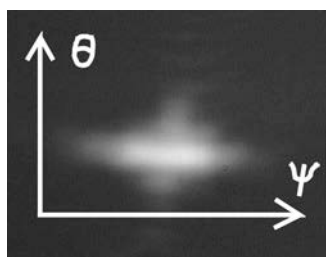
входящих в блок фотоприемника. На эти процессы существенно влияют и внешние факторы, например, температура. Электронные шумы вызываются также помехами в сети электрического питания и радиоволнами.

Электронные шумы можно значительно уменьшить. Наиболее действенный путь – это охлаждение фотоприемника, а также тотальное применение криоэлектроники в блоке фотоприемника. На практике применяют охлаждение до температур жидкого азота. Очевидно, это увеличивает затраты.

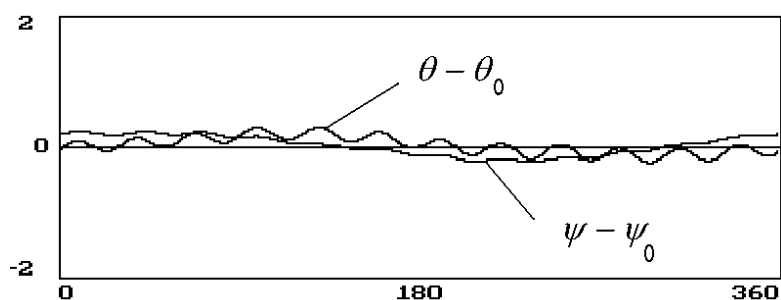
Таким образом, в двумерном лазерном триангуляторе влияние шумов многообразно. Не будем глубоко вдаваться в их анализ. Для оценки влияния шумов применим так называемый «кибернетический подход». Для этого используем математическое моделирование. Параметры шумов для математической модели возьмем из экспериментальных данных – это цифровые фотографии входного сигнала, сделанные тем же оптико-механическим блоком рассматриваемой АС, который используется и при ее работе. Геометрические величины типичного входного сигнала также возьмем из экспериментов. Они были проведены в СФ ФИАН.

Получим типичные величины параметров дискретности входного сигнала, анализируя типичный случай контроля детали с отклонениями формы. Пример типичного входного сигнала, преобразованного в ПЗС фотоприемнике и оцифрованного в компьютере, а также типичные зависимости информативных параметров  $\psi(\varphi)$  и  $\theta(\varphi)$  приведены на рисунке 1 [4]. Расшифровку обозначений см. в разделе 1. На рисунке 2 [17] приведены профили входного сигнала, приведенного на рисунке 1.

На рисунке 2 по горизонтальной оси отложены значения координат профилей в пикселях оцифрованного изображения с ПЗС фотоприемника. По вертикальной оси на этом рисунке отложена интенсивность оцифрованного сигнала в уровнях квантования. Отметим, что в изображение в АС оцифровывается в 64-х градациях интенсивности.



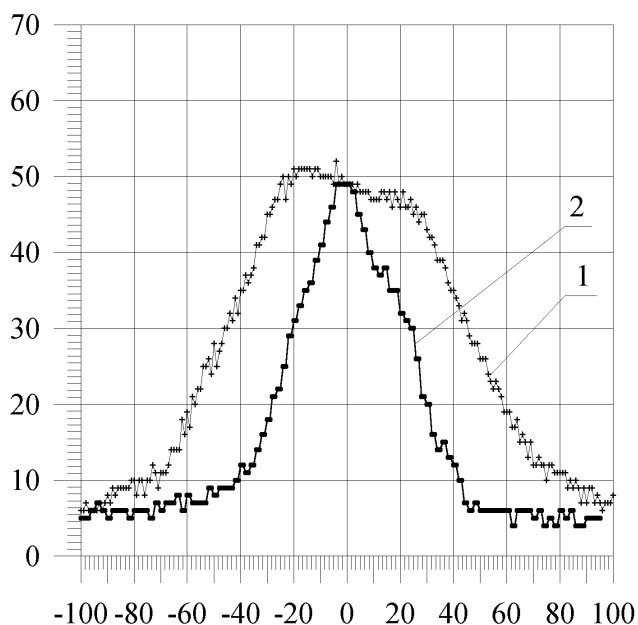
а)



б)

значения углов на осях - в градусах; масштаб осей  $\psi$  и  $\theta$  на рисунках (а) и (б) одинаков

Рисунок 1 - Зависимости  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$ , полученные с дефектного образца



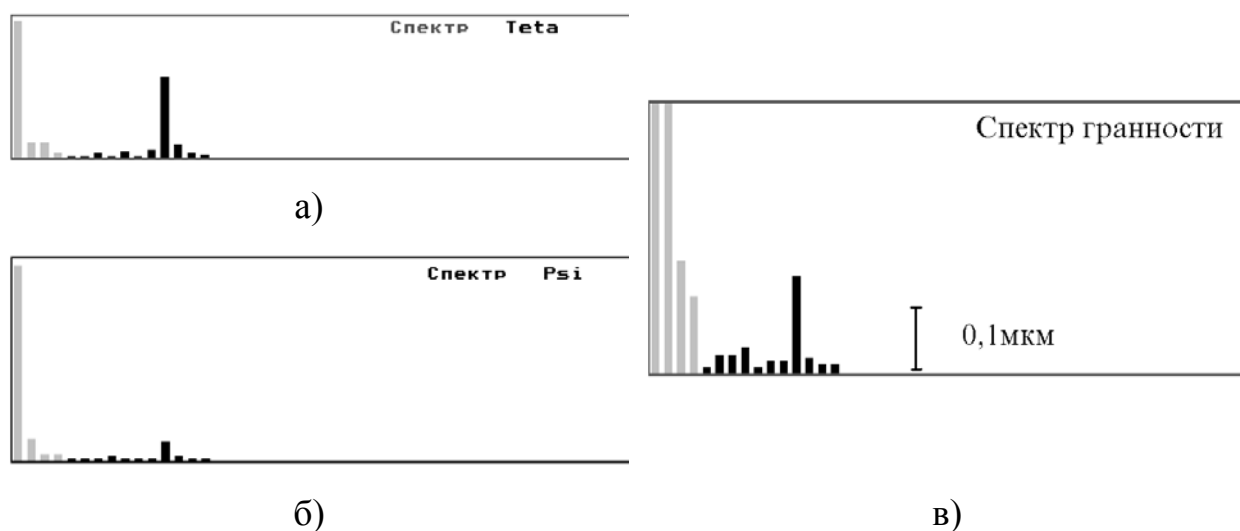
профили 1 – в горизонтальной плоскости, 2 – в вертикальной плоскости, соответствуют рисунку 1 (а); проведены через точку, где видеосигнал имеет максимальную амплитуду в кадре, что практически соответствует центру данного поперечного сечения пучка

Рисунок 2 - Профили распределения интенсивности пучка света на ПЗС фотоприемнике

Данные получены с контролируемого образца с дефектом «гранность», использованным в работах, описанных в разделе 1. Ширина прямоугольника,

изображенного на рисунке 1 (а), соответствует на поверхности ПЗС матрицы расстоянию 3,3 мм. На этой длине укладывается 256 пикселей. Откуда получаем, что шаг дискретизации по апертуре ПЗС фотоприемника составляет 13 мкм.

Для указанных зависимостей и для восстановленного профиля также были получены спектры пространственных гармоник (рисунок 3).



номер гармоники отсчитывается слева направо, начиная с 1; амплитуды волн на рис. (а) и (б) изображены в одинаковом масштабе относительных величин

Рисунок 3 - Разложение зависимостей  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$ , а также восстановленного профиля поверхности в спектр количества волн по этому профилю

Данные были получена с частотным фильтром, пропускающим с 5-й по 15-ю гармонику включительно. Нижняя граница спектра была увеличена на единицу для устранения влияния кинематических погрешностей при сканировании детали, которые имели место из-за недостаточно качественного редуктора узла поворота контролируемой детали.

На рисунках 3 (а), (б) видно, что диапазон изменений  $\gamma$  был больше, чем  $\varepsilon$  - от пяти до шести раз. Судя по графикам  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$  и спектрам пространственных гармоник, волны гранности направлены практически поперек желоба. По своей структуре она похожа на шероховатость этой же поверхности вращения. Это - результат обработки на токарных и

шлифовальных станках. Линии горбов и впадин лишь незначительно отклонялись от направления вдоль желоба. Можно предположить, что такая структура гранности и волнистости типична для поверхностей вращения. Это не самый благоприятный случай для двумерного лазерного триангулятора, особенно при работе с углом  $\theta$  близким к нулю.

Действительно, как нетрудно показать, в (1.8) фактор, связанный с  $\gamma$ , пропорционален  $\theta_0$ , а без учета этого множителя  $\theta_0$  он по величине практически равен фактору при  $\varepsilon$ .

Очевидно, более полное использование составляющей измерительных данных, связанных с углом  $\theta$ , в алгоритмах восстановления поверхностей могло бы значительно повысить чувствительность и точность разработанной АС. В пользу этого говорит то, что амплитуда  $\varepsilon(\varphi)$  в экспериментах была того же порядка, что и у угла  $\gamma$ .

Рассмотрим возможные пути увеличения чувствительности и уменьшения погрешности АС.

Ясно, что чем ближе радиальный профиль к краю желоба, тем больше абсолютная величина  $\theta_0$ , и тем больше вклад зависимости  $\gamma(\varphi)$  в восстанавливаемый радиальный профиль. То есть, чувствительность системы при этом возрастает, и, соответственно, влияние шумов на погрешность измерительной информации уменьшается. Однако по [5] требуется проводить измерения на дне желоба.

Можно повернуть в схеме оптико-механического блока контролируемую деталь, так чтобы средний наклон радиального профиля на дне желоба был отличен от нуля. Однако при этом сечение контролируемой поверхности будет уже не плоским, а круговым коническим, а это тоже не согласуется с [5]. Можно в этом случае воспользоваться поправочным коэффициентом, чтобы пересчитать высоты профиля в радиальном направлении, учитывая, что длины волн отклонений от круглости много

больше их высот. Тогда останется только убедить ответственных за нормоконтроль в допустимости этой замены.

Еще один радикальный способ состоит в изменении обработки сигнала. Из системы уравнений (1.2) можно получить дифференциальное уравнение, пригодное для восстановления контура, в принципе, любой формы на контролируемой поверхности, только бы он был замкнутым. В левой части этого уравнения будет стоять производная по направлению. Это уравнение станет параметрическим, так как будет зависеть от формы восстанавливаемого контура. Точнее, от этого будет зависеть его правая часть. Кроме того, ее величина в пределах всего контура может существенно отличаться от своего среднего. То есть, уравнение будет нелинейным.

Для реализации этого способа нужно собрать данные не с одного, а с нескольких расположенных рядом радиальных профилей. Их количество, может быть от двух до четырех, как минимум. Оно зависит от особенностей какого-либо из известных численных методов, который будет использоваться в данном случае для решения дифференциального уравнения.

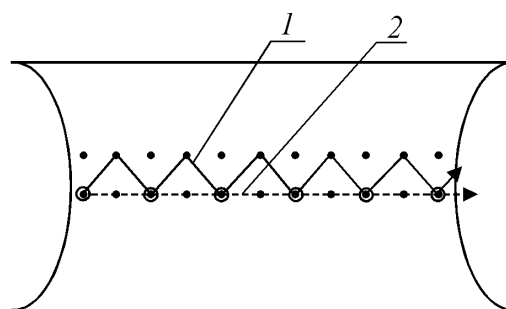
Очевидно, для увеличения чувствительности контур, по которому восстанавливается поверхность, должен отклоняться в сторону оси  $Z$ . Чем больше отклонение этого контура от направления качения, тем больше чувствительность АС. При этом следует позаботиться, чтобы вариация этой чувствительности в пределах всего этого контура была меньше, так как участки контура, где АС имеет наименьшую чувствительность, определяют погрешность измерений. Для этого был бы подходящим контур симметричной треугольной формы (см. рисунок 4).

Отметим, что при любой форме профиля его высоты будут отсчитываться в радиальном направлении, что отвечает стандартам. К тому же из восстановленного контура несложно получить и радиальный профиль.

Недостатки этого подхода – избыточная дискретность профиля и увеличение необходимого количества радиальных профилей. Это приведет к увеличению времени сканирования в несколько раз. Для ускорения



процесса сбора данных можно мультиплицировать зондирующий пучок при помощи усложнения оптической схемы. Кроме того, при этом радиальные профили будут более точно состыковываться друг с другом.



1 – контур при получении промежуточных результатов; 2 – искомый радиальный профиль

Рисунок 4 – Возможный контур восстановления профиля поверхности

Итак, мы вкратце рассмотрели возможные пути увеличения чувствительности и уменьшения погрешности АС. Однако в данной работе мы предлагаем изучить более простые оптическую схему и алгоритм, изложенные в разделе 1. При этом измерительная информация получается, как мы выяснили, практически только из зависимости  $\varepsilon(\theta)$ .

Для оценки влияния шумов используйте программу, записанную в файле `noise2.mcd`, размещенную в папке `lr2`. Программа составлена на MathCad'e, версия 8 SE. Текст программы с примером работы приведен в приложении В. Эта программа пригодна и для оценки влияния шумов в обычном триангуляторе, то есть, в котором приемной оптической системой формируется оптическое изображение освещенного участка контролируемой поверхности.

В программе рассматривается одномерный случай, то есть, считается, что входной сигнал зависит только от одной координаты. Это упрощенный подход, однако он способен дать адекватную оценку величины искомого параметра.

Искомым параметром в программе служит отклонение центра кривой, аппроксимирующей зашумленный сигнал. Эта кривая аппроксимирует

сигнал по методу наименьших квадратов (МНК). Отклонение отсчитывается по оси абсцисс. Это более сложный алгоритм, чем тот, который используется в программе сбора данных. Однако он должен быть более устойчив к шумам. В программе сбора данных рассматриваемой АС координаты отраженного пучка находятся как центр энергии пучка («центр тяжести»).

Шумы в данной работе в программе noise2 заданы в виде двух составляющих – аддитивной и мультипликативной. Они добавляются к исходному гауссовому профилю в виде двух слагаемых. В каждом отсчете модельного профиля величина слагаемых шума определяется с помощью генератора случайных чисел с равномерным распределением случайной величины. Амплитуда шумов задана, исходя из экспериментальных данных.

## **2.2 Лабораторная работа № 5. Чувствительность двумерного лазерного триангулятора**

**Цель работы:** Изучение на компьютерной модели функции преобразования двумерного лазерного триангулятора.

### **2.2.1 Задание на самостоятельную работу**

С помощью компьютерной модели оцените основные характеристики функции преобразования двумерного лазерного триангулятора: чувствительность и нелинейность. Определите зависимость первой из них от параметров настройки оптической схемы АС. Предварительно оцените чувствительность используемой компьютерной модели.

Компьютерная модель, предлагаемая для использования в данной работе, численно воспроизводит процесс сбора данных, а также получение измерительной информации в двумерном лазерном триангуляторе. Она находится в файле indif2.exe в папке lr2\_1.

Так же, как и в программах двумерного лазерного триангулятора, расчеты основаны на геометрооптическом приближении тонких пучков света

(см. приложение Б). Ход отраженного пучка света описывается одним, главным лучом, представляющим собой главную оптическую ось этого пучка света. Это же приближение использовано и для моделирования процесса падения и зеркального отражения света.

В данной модели описывается только одна из двух зависимостей информативных параметров – это  $\psi(\varphi)$  (см. приложение А). Для этого контролируемая поверхность представлена в модели зависимостью одной координаты, то есть как  $H(\varphi)$ .

Отклонения от круглости в данной компьютерной модели представлены синусоидой. Параметры этой синусоиды – амплитуда, отсчитываемая от среднего радиуса профиля, количество волн на профиле – задаются пользователем. Можно также задать начальную фазу этой синусоиды.

Программа также запрашивает от пользователя значения величин параметров настройки оптической схемы, а также среднего радиуса моделируемого профиля.

Данная компьютерная модель была создана первоначально для исследования алгоритмической составляющей погрешности метода измерений. Поэтому алгоритмы расчетов в ней составлены таким образом, чтобы исключить из погрешности восстановления  $H(\varphi)$  фактор дискретности сканирования. Пользователю оставлена, в качестве опции, возможность зафиксировать шаг дискретизации профиля. Также в программе не учитываются кинематическая погрешность и дополнительные погрешности.

Программа выдает следующие результаты расчетов:

- средний радиус профиля;
- максимальное и минимальное значения  $\psi$ ;
- погрешности восстановления  $H(\varphi)$  в точке - максимальная и среднеквадратическая;

- погрешность восстановления размаха профиля  $H(\varphi)$ , с учетом знака.

При задании фиксированного шага дискретизации  $H(\varphi)$  программа выдает исходную и восстановленные профили  $H(\varphi)$ , а также зависимость  $\psi(\varphi)$ . Эти зависимости программа записывает в выходной файл в кодах ASCII. Значения углов в нем представлены в градусах, линейные величины – в микрометрах.

Для расчетов возьмите значения параметров, близкие к реальным, из приложения А и подраздела 2.1. В этих экспериментах параметры настройки  $d=7$  мм,  $L=35$  мм. Параметры модельной функции  $H(\varphi)$ , отвечающие этим экспериментам: амплитуда 0,2 мкм (от нуля до максимальной величины), частота 12 волн на профиль. Величину начальной фазы выберите равной нулю.

Постройте зависимость размаха  $\psi$  от размаха  $H$  при разных значениях параметров настройки оптической схемы АС и параметрах модельного синусоидального профиля  $H(\varphi)$ . Используйте разные значения параметра  $d$ : 5, 6, 7 и 7,5 мм при одинаковом  $L$ .

Пересчитайте размах  $\psi$  в линейное смещение отраженного луча на ПЗС фотоприемнике. Сравните его с шириной апертуры ПЗС фотоприемника и с параметрами типичного входного сигнала, полученного в эксперименте (см. подраздел 2.1).

Задав фиксированную дискретность  $H(\varphi)$ , запустите компьютерную программу при больших отклонениях модельного профиля от круглости. Получите графики исходного и восстановленного профилей  $H(\varphi)$ .

### 2.2.2 Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие компоненты:

- результаты численной оценки чувствительности использованной в работе компьютерной модели с их обоснованием;
- зависимость чувствительности АС от величин параметров настройки оптической схемы и параметров модельного профиля  $H(\varphi)$ ;
- оценку нелинейности функции преобразования АС;
- зависимости модельной оценки алгоритмической составляющей погрешности восстановления профиля  $H(\varphi)$  в точке и этой же составляющей погрешности измерения амплитуды профиля  $H(\varphi)$  от величин параметров настройки оптической схемы, а также от параметров модельного профиля  $H(\varphi)$ .
- графики модельного и восстановленного профилей  $H(\varphi)$  при больших отклонениях от круглости.
- выводы по результатам сравнения данных, полученных в ходе этой работы путем компьютерного моделирования и полученных ранее в экспериментах (подраздел 2.1).

### 2.2.3 Контрольные вопросы

- 10) Как зависит чувствительность АС от количества волн отклонений от круглости?
- 11) Как зависит чувствительность АС от величин параметров настройки оптической схемы? Существует ли оптимальные величины этих параметров?
- 12) Почему допустимо использование упрощающих предположений в компьютерной программе, моделирующей АС?
- 13) Соответствует ли расчетная чувствительность оптической схемы АС ее технической реализации?

14) Отвечает ли расчетная алгоритмическая составляющая погрешности измерений АС требованиям стандартов?

15) Отвечает ли чувствительность компьютерной программы, моделирующей АС, предложенная в данной работе, поставленной задаче?

16) Чем вызвано возрастание погрешности АС при больших отклонениях радиального профиля от круглости? Какие отклонения от круглости поверхности детали, контролируемой рассматриваемой АС, будут для этой АС неприемлемыми? Обоснованно оцените эту величину.

17) Как ее можно было бы уменьшить погрешность АС при больших отклонениях от круглости?

### **2.3 Лабораторна работа № 6. Влияние шумов на входной сигнал двумерного лазерного триангулятора**

*Цель работы:* Изучение на компьютерной модели влияния шумов на информативные параметры двумерного лазерного триангулятора.

#### **2.3.1 Задание на самостоятельную работу**

Ознакомьтесь с предлагаемой для работы компьютерной моделью noise2. Файл noise2.mcd находится в папке lr2\_2.

Задайте в модели ширину оптического сигнала, соответствующую реальному случаю (см. подраздел 2.1).

Получите с помощью программы статистический набор отклонений параметра координаты максимума оптического сигнала, при аппроксимации его гауссовой функцией по методу наименьших квадратов.

Получите с помощью программы аналогичный набор отклонений центра энергии оптического сигнала (первый центральный момент, или «центр тяжести»).

Повторите расчеты при разной ширине модельной функции, например, в два раза меньшей или в пять раз большей.

Обработайте полученные статистические результаты по стандартной методике. Запишите полученные вами результаты, а также исходные файлы данных в папку с именем DDMMYY в подкаталоге lr2\_2, где DD –текущий день, MM – номер текущего месяца, YY – последние два цифры текущего года. Если папка с таким именем уже есть, к имени добавьте латинскую букву «а», и т. д. по алфавиту. По согласованию с преподавателем вы можете добавить свои данные в уже имеющуюся папку и обработать все статистически данные из этой папки, включая и свои данные.

Оцените влияние шумов входного сигнала на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора.

Для этого используя полученные вами, а также имеющиеся данные в подкаталоге lr2\_2, получите модельную зависимость  $\psi(\varphi)$ . Значение  $\psi_0$  получите из компьютерной модели процесса сбора данных и получения измерительной информации в двумерном лазерном триангуляторе. Она находится в файле indif2.exe в папке lr2\_1. Полученную зависимость  $\psi(\varphi)$  запишите в символьный файл такой же структуры, как и файлы bem\_XY.dat, используемые в программе сбора данных «2009Е» и в программе получения измерительной информации «2009А» двумерного лазерного триангулятора. Значения зависимости  $\theta(\varphi)$  при этом поставьте равные нулю.

Загрузите созданный вами таким образом файл программами «2009Е» и «2009А». Посмотрите с их помощью спектр  $\psi(\varphi)$  и  $H(\varphi)$ , получите значения некруглости, гранности и волнистости. Используя эти полученные значения, оцените влияние шумов входного сигнала на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора.

Сравните полученные данные с результатами статистической обработки данных с неподвижной детали (см. подраздел 1.3.3, файлы из папки lr1\_2\ stop.

### 2.3.2 Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие компоненты:

- гистограммы распределения отклонений информативного параметра оптического сигнала, полученные в результате компьютерного моделирования;

- статистическую оценку отклонения информативного параметра оптического сигнала, полученную в результате компьютерного моделирования, и погрешность этой оценки с результатом проверки гипотезы о нормальном распределении случайной величины;

- зависимости среднеквадратического отклонения информативного параметра оптического сигнала, полученного в результате компьютерного моделирования, от ширины оптического сигнала.

- статистическую оценку погрешности измерительной информации двумерного лазерного триангулятора от влияния шумов на входной сигнал, полученную путем компьютерного моделирования, в сравнении с экспериментальными результатами.

### 2.3.3 Контрольные вопросы

8) Зачем нужна оценка влияния шумов во входном сигнале на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора?

9) Какие методы использованы в данной работе для оценки влияния шумов во входном сигнале на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора?

10) Зачем для оценки влияния шумов во входном сигнале на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора нужно использовать компьютерное моделирование?

11) Можно ли для оценки влияния шумов во входном сигнале на погрешность измерительной информации двумерного лазерного



триангулятора ограничиться компьютерным моделированием, или же экспериментом?

12) Каково отношение «сигнал/шум» во входном и выходном сигнале двумерного лазерного триангулятора?

13) Расскажите о природе шумов во входном сигнале двумерного лазерного триангулятора.

14) Нужно ли уменьшать влияние шумов во входном сигнале двумерного лазерного триангулятора?

15) Расскажите, что можно сделать для уменьшения влияния шумов во входном сигнале на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора.

16) Как влияют параметры входного сигнала на погрешность измерительной информации двумерного лазерного триангулятора, связанную с шумами на его входе? Есть ли оптимальные значения этих параметров?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемом лабораторном практикуме рассмотрены вопросы:

- 1) изучение функциональных возможностей АС - двумерного лазерного триангулятора и анализ его погрешностей;
- 2) изучение влияния дискретности сканирования на погрешность измерений АС;
- 3) изучение динамических характеристик АС;
- 4) анализ чувствительности двумерного лазерного триангулятора;
- 5) анализ влияния шумов на входной сигнал АС.

Лабораторные работы выполняются с помощью программ Mathcad, Excel, Grapher и Surfer (Golden Software), а также с помощью разработанного двумерного лазерного триангулятора. Используются также разработанные автором и студентами СГАУ компьютерные модели.

Учитывая современный этап разработки двумерного лазерного триангулятора, работу в этой области нельзя считать полностью завершенной. Однако автор считает, что предлагаемый базовый вариант лабораторных работ предоставляет возможность для обучения научных сотрудников, аспирантов и студентов применению оптических методов измерения геометрических величин для контроля в машино- и приборостроении, а также обучению типичным практическим приемам разработки автоматизированных систем для этих целей. Практикум также дает опыт в применении статистического анализа данных эксперимента и компьютерного моделирования.

Отметим, что предлагаемый перечень лабораторных работ отражает лишь опыт и точку зрения автора и может быть существенно расширен как по номенклатуре работ, так и по количеству пунктов исследований в каждой работе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Бутиков, Е. И. Оптика: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Е. И. Бутиков ; под ред. Н. И. Калитеевского. – М.: Высш. шк., 1986. – 512 с.
- 2 Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. - Изд. 2-е. - М.: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1973. – 720 с.
- 3 Пат. 2109250 Россия, МПК <sup>6</sup>G 01 В 11/24. Способ измерения геометрической формы тел вращения с отражающей поверхностью [Текст] / Белопухов В. Н., Бесталаный С. И., Заякин О. А.; заявитель и патентообладатель Самарский филиал ФИАН. – № 95100536/28 (001062); заявл. 12.01.1995; опубл. 20.04.1998, Бюл. № 11. – 5 с.
- 4 Заякин, О. А. Информационно-измерительная система для контроля деталей подшипников, экспериментальная оценка точности восстановления микрорельефа рабочих поверхностей [Электронный ресурс] / О. А. Заякин // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2004. – 187. – С. 1992 – 2001. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/187.pdf>.
- 5 Методика измерения отклонений от круглости и шероховатости поверхности деталей подшипников качения [Текст] : Руководящий документ РД 37.006.106.90. – Согласован. – М.: НПО ВНИПП, 1990 – 40 с.
- 6 Подшипники качения. Допуски круглости и волнистости поверхностей качения подшипников категорий А и В [Текст] : Руководящий документ РД ВНИПП.013-00. – Введ. 2000 – 06 – 01 ; срок действия до 2007 – 01 – 01. – М.: ОАО «ВНИПП», 2000. – 15 с.
- 7 ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 14 с. – (Основные нормы взаимозаменяемости).
- 8 ГОСТ 520-2002. Подшипники качения. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 2003 – 01 – 01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 67 с.

- 9 ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1983 – 01 - 01 - М.: Изд-во стандартов, 1991. - 21 с.
- 10 Дунин-Барковский, И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности [Текст] / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. - М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
- 11 ГОСТ 17353-89 Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения. Типы. Общие технические требования [Текст] – Введ. 1989 – 03 – 29 – М.: Госстандарт СССР, 1989. – 16 с.
- 12 ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения [Текст]. – Введ. 1982 – 01 – 01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 68 с. – (Основные нормы взаимозаменяемости).
- 13 Каханер, Д. Численные методы и математическое обеспечение [Текст] / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М.: Мир, 1998. – 575 с.
- 14 Atsushi, S. Высокоточный профилометр типа Maxim 3D-5700 / Sato Atsushi // Кэйсоку гидзюцу. = Instruments and Automation. – 1991. – Vol. 19, No. 2. P. 54 – 58. – (Яп.).
- 15 Осипович, И. Р. Интерферометрический метод контроля формы асферических поверхностей качения прецизионных подшипников [Текст] / И. Р. Осипович, Д. Т. Пуряев // Вестник Московского государственного технического университета. Сер. Приборостроение. – 1999. – Вып. 3. – С. 65 – 75, 128.
- 16 СТО СГАУ 02068410-009-2007. Обработка и оформление результатов измерений [Текст]. - Взамен СТП КуАИ 144-5-88; введ. 2007-11-01. - Самара : СГАУ, 2007. - IV; 33 с. - (Комплексная система управления качеством деятельности вуза).
- 17 Заякин, О. А. Информационно-измерительная система контроля деталей подшипников на основе двумерной лазерной триангуляции [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / О. А. Заякин; Сам. гос. техн. ун-т. – Самара, 2005. – 20 с.

- 18 Носов, Ю. Р. Основы физики приборов с зарядовой связью [Текст] / Ю. Р. Носов, В. А. Шилин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1996. – 320 с. – (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов).
- 19 Цикин, И. А. Дискретно-аналоговая обработка сигналов [Текст] / И. А. Цикин. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
- 20 Velichanskii, V. L. Method of measuring the astigmatic distance of laser diodes [Text] / V. L. Velichanskii, A. S. Zibrov, S. P. Kotova, G. T. Pak, A. K. Chernyshov // Journal of soviet laser research. – 1991. – Vol. 12, No. 4. – P. 341 – 352.
- 21 Сивухин, Д. В. Оптика: Учеб. пособие [Текст] / Д. В. Сивухин. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985. – 752 с. – (Общ. курс физики).
- 22 Ярив, А. Квантовая электроника [Текст] / А. Ярив; пер. с англ.; под ред. Я. И. Ханина. – 2-е изд. – М.: Сов. Радио, 1980. – 488 с. – (Пер. изд. Yariv A. Quantum electronics, США, 1975).
- 23 Caulier, Y. Automatic detection of surface and structural defects on reflecting workpieces [Text] / Y. Caulier, K. Spinnler, M. Arnold, A. Goldschmidt // Photonik International. – 2008. – No. 2. – P. 30 - 32.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Обработка данных в двумерном лазерном триангуляторе

Для численного восстановления контролируемые поверхности представим формулой следующего вида:

$$F(\rho, \varphi, z) = \rho - R(z) - H(\varphi, z), \quad (\text{A.1})$$

где  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  - цилиндрические координаты,  $R(z)$  - функция номинального профиля,  $H(\varphi, z)$  - функция отклонения от номинальной формы. Величины  $R$  и  $H$  отсчитываются в направлении  $\rho$ . Система координат  $\{\rho, \varphi, z\}$ , жестко связана с контролируемой поверхностью.

Вычисление искомых координат контролируемой поверхности производится из формул для определения координат освещенной точки контролируемой поверхности на каждом шаге сканирования. Они выражают собой законы геометрической оптики для отражения света: первый - прямолинейность распространения световых лучей, второй - равенство угла падения углу отражения и третий - то, что падающий луч, отраженный луч и нормаль к поверхности в точке падения луча лежат в одной плоскости:

$$\frac{[-\vec{a}, \vec{N}]}{|\vec{a}|} = \frac{[\vec{N}, \vec{b}]}{|\vec{b}|}, \quad \frac{(-\vec{a}, \vec{N})}{|\vec{a}|} = \frac{(\vec{b}, \vec{N})}{|\vec{b}|}, \quad (\text{A.2})$$

где, только в пределах этих двух формул, квадратными скобками обозначено векторное произведение, круглыми скобками – скалярное произведение; в знаменателе обозначен модуль векторов, то есть, их длина.

Из системы уравнений (A.2) получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = \rho \Phi, \quad (\text{A.3})$$

где  $\Phi$  является функцией переменных:  $\rho$ ,  $\varphi_R$ ,  $z_R$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ ;

$z_R$  - смещение источника излучения в направлении оси  $OZ$ ;

$\varphi_R$  - поворот контролируемой детали вокруг оси  $OZ$ .

Функция в правой части уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi(\rho_c, z_c, \varphi_R, z_R) = \\ = \frac{[\cos(\psi - \varphi_c) - A - B \cos \varphi_c](\sin \psi - A \sin \varphi_c) + \operatorname{tg}^2 \theta \sin \varphi_c}{[\sin(\psi - \varphi_c) + B \sin \varphi_c](\sin \psi - A \sin \varphi_c) + \operatorname{tg}^2 \theta \cos \varphi_c}, \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

где

$$A = \frac{\rho_c}{L}, \quad \sin \varphi_c = \frac{d}{\rho_c}, \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{\xi - z_c}{L}, \quad (\text{A.5})$$

$$B = \sqrt{1 + A^2 - 2 A \cos(\psi - \varphi_c) + \operatorname{tg}^2 \theta};$$

$\rho_c$ ,  $\varphi_c$  и  $z_c$  - координаты освещенной точки контролируемой поверхности в цилиндрической системе координат, жестко связанной с оптико-механическим блоком ( $XYZ$  на рисунке 2).

При этом уравнения связи между двумя названными системами координат имеют вид:

$$\rho = \rho_c, \quad \varphi = \varphi_c - \varphi_R + \text{const}, \quad z = z_c = z_R, \quad (\text{A.6})$$

Отметим, что  $B L = |\vec{b}|$ . Величины  $\psi$  и  $\xi$ , а также тесно связанная с последней  $\theta$  - это измеряемые параметры. Они - функции переменных  $\varphi_R$  и  $z_R$ , задаваемые дискретными отсчетами в процессе сканирования, а также неизвестной переменной  $\rho$ . Величины  $d$  и  $L$  назовем «параметрами настройки» [3], они задаются оператором вручную и в цикле измерения остаются постоянными.

Функция вида  $\rho(\varphi, z)$  является частным решением уравнения (A.3) при каком-нибудь постоянном  $z$  и при граничном условии

$$\rho(\varphi_R = 0, z_R = z_{Rk}) = \rho(\varphi_R = 2\pi, z_R = z_{Rk}), \quad (\text{A.7})$$

где  $k$  обозначает конкретный радиальный профиль, на котором рассматриваются эти условия. Из сетки таких профилей можно получить

изображение всей контролируемой поверхности. Важно отметить, что при получении радиального профиля используются данные, собранные только с него самого.

Граничное условие (А.7), при малых отклонениях  $\rho$  от своей средней величины вдоль восстанавливаемого профиля поверхности, позволяет получить аналитическое решение при замене нелинейного дифференциального уравнения (А.3) упрощенным дифференциальным уравнением, полученным путем его линеаризации в окрестности средних интегральных, по этому профилю, величин  $\rho$ ,  $\psi$  и  $\theta$ .

Из (А.3) получаем дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\frac{1}{R_0} \times \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = \Phi_{approx}(\rho, \psi, \theta) = \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0) + \frac{\partial \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{\partial \rho} (\rho - R_0) + \frac{\partial \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{\partial \psi} (\psi - \psi_0) + \frac{\partial \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{\partial \theta} (\theta - \theta_0), \quad (A.8)$$

где  $\frac{\partial \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{\partial \rho}$ ,  $\frac{\partial \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{\partial \psi}$  и  $\frac{\partial \Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{\partial \theta}$  означают частные производные функции  $\Phi$ , взятые при  $\rho = R_0$ ,  $\psi = \psi_0$  и  $\theta = \theta_0$ ;

$R_0$ ,  $\psi_0$  и  $\theta_0$  - средние интегральные величины  $\rho$ ,  $\psi$  и  $\theta$  по радиальному профилю. Точнее, в рамках используемой модели, это величины, которые бы имели место при идеальной круглости контролируемой детали. В расчетах мы их заменяем на средние интегральные величины. Они должны быть рассчитаны по тому радиальному профилю, по которому решается (А.8).

Считаем, что в (А.8) приращения переменных  $\rho$ ,  $\psi$  и  $\theta$  независимы, а также, что зависимостью  $\varphi$  от других переменных можно пренебречь. Приращение  $z_R$  равно нулю для заданного радиального профиля. Поэтому производные в ряде Тейлора в (А.8) записаны как частные, а два последних слагаемых отсутствуют.

Еще одно упрощение, сделанное при переходе от (А.3) к (А.8) – это замена множителя  $\rho$  в правой части (А.3) на  $R_0$ . Для заданного



радиального профиля, по которому решается (А.8), это величина постоянная. Она записана в левой части (А.8) для удобства дальнейших преобразований этого уравнения.

Подставим в уравнение (А.3) вместо  $\psi$  и  $\theta$  значения  $\psi_0$  и  $\theta_0$  и приравняем нулю его правую часть. Тогда для нахождения  $R_0$ , нужного нам для дальнейших расчетов, получим уравнение:

$$\Phi(R_0, \psi_0, \theta_0) = 0. \quad (\text{А.9})$$

Это уравнение имеет аналитическое решение, однако оно довольно громоздко, и в программе оно решается численно.

Запишем (А.8) в виде:

$$\frac{1}{R_0} \left( \frac{dH}{d\varphi} - a H \right) = b \varepsilon + c \gamma, \quad (\text{А.10})$$

где

$$a = R_0 \frac{d\Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{d\rho}, \quad b = \frac{d\Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{d\psi}, \quad c = \frac{d\Phi(R_0, \psi_0, \theta_0)}{d\theta},$$

$$\varepsilon = \psi - \psi_0, \quad \gamma = \theta - \theta_0, \quad \psi = \psi(\varphi, z), \quad \theta = \theta(\varphi, z).$$

Уравнение (А.10) решается при граничном условии

$$H(\varphi = 0, z = z_k) = H(\varphi = 2\pi, z = z_k), \quad (\text{А.11})$$

где  $k$  обозначает конкретный радиальный профиль.

Для каждого  $z_k$  имеется свое уравнение (А.10), отличающееся только значениями коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

С целью аппроксимации, либо фильтрации измерительной информации функцию

$$W(\varphi) = b \varepsilon(\varphi) + c \gamma(\varphi) \quad (\text{А.12})$$

удобно представить в виде разложения в ряд Фурье. В этом случае решение дифференциального уравнения (А.10) можно получить в общей форме через

соответствующие коэффициенты разложения. Для данных в цифровой форме при этом наиболее подходит дискретное преобразование Фурье [13, с. 483 - 484]. Напишем, как выглядит решение уравнения (A.10), полученное с помощью этого преобразования. В пределах обсуждения этого преобразования индексы при переменных показывают номер гармоники спектра, или порядковый номер отсчета точек профиля.

Пусть функция  $W(\varphi)$  задана своими дискретными отсчетами  $W(\varphi_i)$  с равномерным шагом по радиальному профилю;  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ;  $\varphi_0 = 0$ ;  $\varphi_N = 2\pi$  радиан. Тогда она однозначно представима в виде конечного ряда Фурье в виде:

$$W(\varphi_i) = \sum_{j=1}^{[N/2]} \alpha_j \cos(j \varphi_i) + \beta_j \sin(j \varphi_i), \quad (\text{A.13})$$

где  $\varphi_i = 2\pi \frac{i}{N}$ , [...] - целая часть. Коэффициенты этого ряда Фурье вычисляются по формулам:

$$\alpha_j = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} W(\varphi_i) \cos(j \varphi_i), \quad \beta_j = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} W(\varphi_i) \sin(j \varphi_i), \quad (\text{A.14})$$

$$\alpha_{N/2} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^i W(\varphi_i)$$

где  $i < j < N/2$ .

Тогда искомый радиальный профиль представлен дискретными отсчетами высоты  $H(\varphi_i)$  в  $N$  точках при тех же значениях  $\varphi_i$ , что и  $W(\varphi_i)$ :

$$H(\varphi_i) = R_0 \times \left\{ \sum_{n=1}^{[N/2]} \frac{1}{a^2 + n^2} \left[ (n \alpha_n - a \beta_n) \sin(n \varphi_i) - (a \alpha_n + n \beta_n) \cos(n \varphi_i) \right] \right\} \quad (\text{A.15})$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

Таким образом, найдена алгебраическая связь между параметрами гармоника Фурье-спектра функций (A.12) и соответствующей гармоника (то есть, с тем же числом волн на оборот поверхности) Фурье-спектра профиля высот контролируемой поверхности.

Выражения (A.4) – (A.6), (A.9), (A.10), (A.12) – (A.15) представляют собой функцию преобразования автоматизированной системы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Преобразование пучка света в оптической системе в приближении геометрической оптики

В расчетах используем приближение тонких пучков [2, с. 168], как это обычно принято в триангуляции. Это означает, что, их поперечная ширина не учитывается. В этом случае, во первых, ход пучка света полностью описывается его центральным, главным лучом. Этот луч совпадает с направлением распространения пучка света. А во вторых, преобразование этого пучка света в линзах описывается известной формулой Ньютона для тонкой линзы:

$$\frac{1}{s} - \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}, \quad (\text{Б.1})$$

где  $s$  - расстояние от точки предмета до линзы, точнее, до ее передней главной плоскости;

$s'$  - расстояние от линзы до точки изображения;

$f$  - переднее фокусное расстояние линзы. Знаки указанных величин определяются по правилам, указанным ниже в этом приложении.

Отметим, что главный луч нашего пучка света не совпадает, в общем случае, с главной оптической осью оптической приемной системы. Это различие как раз и служит информационным сигналом в триангуляторе.

Для расчета воспользуемся известным способом описания хода и преобразования лучей с помощью матриц, впервые предложенным Гауссом. Этот способ пригоден для параксиальных лучей. При выводе расчетных формул следуем [1]. Ход лучей рассмотрим в одном главном сечении, то есть, в плоскости, проходящем через главную оптическую ось. При расчете, как это принято в геометрической оптике, полагаем, что главная оптическая ось идет слева направо. Так же идут и лучи света. Точнее, так направлена продольная, вдоль главной оптической оси, составляющая луча, если луч

считать вектором, равным векторной сумме его продольной и поперечной составляющих. Расстояние от точки, через которую проходит луч, до главной оптической оси, обозначим как  $v$ . Если точка находится выше главной оптической оси, то  $v > 0$ , если ниже – то  $v < 0$ . Введем условно положительное направление поперек главной оптической оси. Для определенности, направим его вверх на рисунке хода лучей. Если поперечная составляющая луча направлена вверх, то считаем, что угол наклона луча положительный, если вниз – отрицательный, вне зависимости от того, как луч располагается по отношению к главной оптической оси. Обозначим этот угол как  $u$ . Значения этой величины в приведенных ниже формулах должны быть подставлены в радианах.

Пучок света, излучаемый лазером, фокусируется на контролируемую поверхность объекта. Оптическое изображение пятна на контролируемой поверхности строится объективом оптической системы в плоскости фотоприемника.

Заметим, что в оптической схеме рассматриваемого источника излучения изображение тела свечения лазера формировалось на расстоянии от фокусирующей линзы, равном фокусному расстоянию этой линзы. При этом, как известно из геометрической оптики, поперечное линейное увеличение равно отношению фокусных расстояний этой линзы и коллимирующего объектива. В данной схеме фокусное расстояние фокусирующей линзы (в нашем случае это цилиндрическая линза) на порядок больше фокусного расстояния коллиматора, объединенного с лазерным диодом в единый серийный модуль. Поэтому пятно получается увеличенным, по отношению к исходному размеру тела свечения лазерного диода.

Однако для одномодовый лазерный диод имеет размеры тела свечения лишь ненамного превосходящие длину волны света, то есть, не более 10 *мкм*. К тому же используемый в работе лазерный модуль имеет коллиматор, исправляющий астигматизм, присущий лазерному диоду. Кроме того,

в модуле использован современный лазерный диод, у которого астигматизм значительно меньше, чем у лазерных диодов, выпускавшихся ранее, он сравним с длиной волны света. Таким образом, для расчета поперечной ширины фокального пятна в данном случае следует применять формулы волновой гауссовой оптики (см. приложение В). Согласно этим формулам, поперечная ширина пучка лазера изменяется как квадратный корень отношения фокусных расстояний фокусирующей линзы и коллиматора. Поэтому поперечная ширина пучка на контролируемой поверхности получается меньше, чем в геометрическом приближении. Эксперимент показал, что картина в нашем случае соответствует волновой гауссовой оптике. В этом несложно убедиться самостоятельно, поставив видеокамеру без объектива в фокус источника излучения, конечно, с соответствующим светофильтром, чтобы не испортить видеокамеру.

Изображение пятна света на контролируемой поверхности, получаемое оптической схемой источника излучения, затем преобразуется оптической приемной системой. В согласии с ходом световых лучей, пятно света на контролируемой поверхности находится в пространстве предметов, а фотоприемник – в пространстве изображений освещенного участка контролируемой поверхности. При этом точки предмета и изображения не являются, в общем случае, сопряженными. Точнее, их юстируют для достижения оптического сопряжения для середины рабочего диапазона триангулятора, соответствующего некой «нулевой», базовой высоте точек профиля светового сечения, которое дает фокусирующая цилиндрическая линза на контролируемой поверхности. Для нахождения координаты точки падения пучка света на фотоприемнике воспользуемся выражением, связывающим параметры падающего и отраженного лучей в двух произвольных поперечных сечениях [1, с. 343].

Приведем вывод этого выражения.

Матричная формула преобразования луча записывается в общем виде так:

$$\begin{pmatrix} v' \\ u' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix}. \quad (\text{Б.2})$$

В (Б.2) и далее, в этом приложении, штрихом обозначены параметры луча после преобразования. В настоящей диссертации мы используем матрицу преобразования луча линзой.

Преобразование луча в линзе представлено как последовательность трех преобразований: прохождения луча в пространстве от исходной точки до линзы, преломление линзой, прохождение луча от линзы дальше, до конечной точки (см. [1, с. 156]). Матрица результирующего преобразования равна произведению матриц составляющих его последовательных преобразований, взятых в обратном порядке:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{Б.3})$$

где  $a$  - расстояние от начальной точки до линзы;

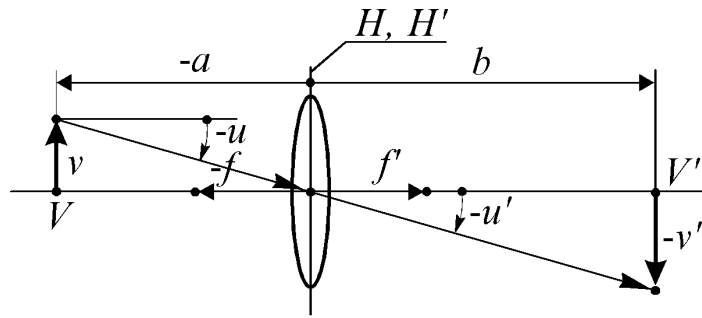
$b$  - расстояние от конечной точки до линзы;

$f'$  - заднее фокусное расстояние линзы.

Отметим, что в параксиальном приближении практически выполняются упрощенные формулы, связывающие линейные и угловые величины, подобные следующим:

$$u = \frac{v}{a}, \quad u' = \frac{v'}{b}.$$

Символы  $a$  и  $b$  обозначают названные величины только в пределах данного приложения. Отсчет положительных величин  $a$  и  $b$  идет в направлении луча света вдоль главной оптической оси (см. рисунок Б.1), в соответствии с принятым правилом знаков лучевой оптики. При этом за начало отсчета принимаются главные плоскости линзы – передняя  $H$  - для  $a$ , и задняя  $H'$  - для  $b$ . У тонкой линзы плоскости  $H$  и  $H'$  практически совпадают. Помимо



( $VV'$ ) - главная оптическая ось;  $H, H'$  - главные плоскости линзы, соответственно, передняя и задняя (изображены совпадающими); знак «минус» показывает направление отсчета отрицательных величин

Рисунок Б.1 – К выводу матрицы преобразования лучей

указанных выше правил, принимается, что переднее фокусное расстояние собирающей линзы отрицательно, а заднее – положительно. Наконец, укажем, что если среда вокруг линзы однородна, то по законам лучевой оптики  $f = -f'$ .

После перемножения матриц в (Б.3) получаем:

$$M = \begin{pmatrix} 1 - \frac{b}{f'} & a - \frac{a \cdot b}{f'} + b \\ -\frac{1}{f'} & 1 - \frac{a}{f'} \end{pmatrix}. \quad (\text{Б.4})$$

Подставляя (Б.4) в (Б.2), получаем для  $v'$  следующее выражение:

$$v' = \left(1 - \frac{b}{f'}\right) \cdot v + \left(a - \frac{a \cdot b}{f'} + b\right) \cdot u. \quad (\text{Б.5})$$

В данном случае  $v$  описывает отклонение точки падения луча от точки пересечения фотоприемника главной оптической осью в сторону, перпендикулярную этой оптической оси, то есть, согласно нашей оптической схеме, отклонение пучка света на фотоприемнике от базового положения этого пучка на этом фотоприемнике.



Формула (Б.5) дает нам функцию преобразования триангулятора. Остается только учесть, что высота  $h$  освещенной точки на контролируемой поверхности связана с  $v$  соотношением

$$h = v \cdot \cos \theta , \quad (\text{Б.6})$$

где  $\theta$  - угол между главной оптической осью источника излучения и главной оптической осью оптической приемной системы.

Мы видим, что, когда точки на контролируемой поверхности и на фотоприемнике являются оптически сопряженными, то есть, когда  $a$  и  $b$  удовлетворяют (Б.1), второе слагаемое в (Б.5) равно нулю. В пределах рабочего диапазона триангулятора относительное изменение  $a$  не превосходит 0,1. При этом вторым слагаемым в (Б.5) можно пренебречь, и считать, что функция преобразования триангулятора линейна.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Описание сфокусированного пучка света лазера

При расчетах параметров сфокусированного лазерного пучка в двумерном лазерном триангуляторе необходимо учитывать волновую природу света. Геометрооптического приближения для этого уже недостаточно.

При описании лазерного пучка используют классическую теорию дифракции, причем для расчетов используют наиболее простые формулы, относящиеся к этой теории. Это формулы, которые описывают гауссовы пучки. Пучки такой структуры характерны для лазеров.

Когерентное излучение, испускаемое лазером, а также преобразуемое в оптических элементах, принято описывать с помощью приближения гауссовых пучков [1]. В ряде случаев используется представление в виде астигматического гауссова пучка.

Все введенные ниже обозначения действительны в пределах данного приложения.

Введем систему декартовых координат  $\{x, y, z\}$ . Ось  $OZ$  расположим на главной оптической оси лазерного пучка. Направление этой оси выберем совпадающим с распространением лазерного пучка. Начало системы координат поместим в точку, где лазерный пучок имеет наименьшую поперечную ширину. Тогда средняя по времени интенсивность  $I$  света в произвольной точке с координатами  $x, y, z$  описывается формулой [20]:

$$I = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z - \Delta z}{z_{0x}} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_{0y}} \right)^2 \right]} \cdot \exp \left[ -2 \cdot \left( \frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2} \right) \right], \quad (\text{B.1})$$

где  $P$  - средняя по времени мощность пучка света;

$z_{0x}$ ,  $z_{0y}$  - радиус дифракционной расходимости лазерного пучка в главных сечениях -  $XOZ$  и  $YOZ$ , соответственно;

$w_x$ ,  $w_y$  - половина ширины лазерного пучка в главных сечениях  $XOZ$  и  $YOZ$ , соответственно, отсчитываемой по линии, проходящей через точку с координатой  $z$ ;

$\Delta z$  - расстояние по оси  $OZ$  между перетяжками лазерного пучка;

$\pi$  - математическая константа, равная отношению длины окружности к радиусу.

Другие величины в (Б.1) выражаются следующим образом:

$$w_x = w_{0x} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z - \Delta z}{z_{0x}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{B.2})$$

$$w_y = w_{0y} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_{0y}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{B.3})$$

где  $w_{0x}$ ,  $w_{0y}$  - половина поперечной ширины лазерного пучка в главных сечениях -  $XOZ$  и  $YOZ$ , соответственно, которая имеет место в области перетяжки (т. е., самого узкого места) пучка в этих плоскостях.

Формулы (B.1) – (B.3) описывают астигматический, в общем случае, гауссов пучок. Его поперечное сечение по линии уровня одинаковой интенсивности представляет собой эллипс. В выбранной системе координат главные оси этого эллипса лежат в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$ , а начало координат помещено в одну из двух перетяжек астигматического гауссова пучка.

Приведем еще две формулы. Они выражают радиусы  $R_x$  и  $R_y$  кривизны волнового фронта рассматриваемого гауссова пучка в поперечном сечении пучка с координатой  $z$ :

$$R_x = (z - \Delta z) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z_{0x}}{z - \Delta z} \right)^2 \right], \quad (\text{B.4})$$

$$R_y = z \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z_{0y}}{z} \right)^2 \right], \quad (\text{B.5})$$

где радиус кривизны условно считается отрицательным в сходящемся пучке, и положительным в расходящемся пучке. В (B.4) и (B.5) предполагается, что радиус кривизны волнового фронта определяется в точке на оси  $OZ$  с координатой  $z$  по касательной прямой, заданной пересечением поперечного сечения этой оси в этой координате плоскостью  $XOZ$ , либо  $YOZ$ , соответственно.

На рисунке B.1 схематически изображен гауссов пучок в своем осевом сечении и показаны его геометрические параметры. Боковая граница пучка определена условно по одинаковому уровню интенсивности света относительно максимума в каждом поперечном сечении. В формулах, описывающих гауссов пучок, принято, что  $w$ ,  $w_0$  и  $\theta$  всегда положительны, в какую бы сторону они не отсчитывались. Аксиально-симметричный гауссов пучок, то есть при  $\Delta z = 0$ , симметричен относительно точки  $O$  на любых расстояниях от нее.

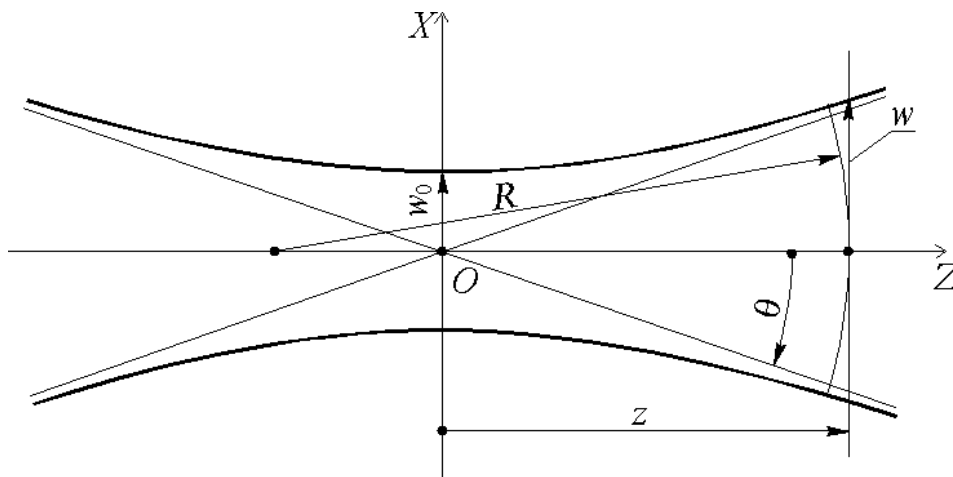
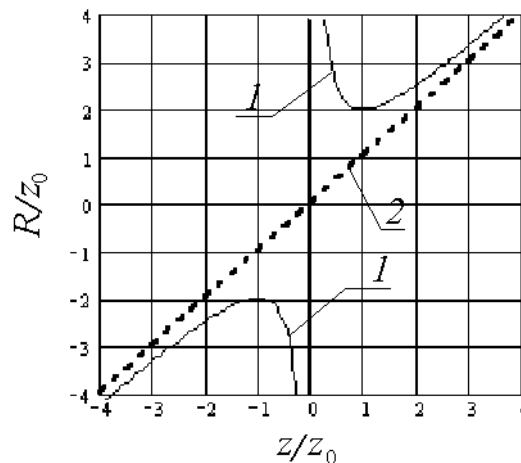


Рисунок B.1 – Гауссов пучок

Зависимость радиуса кривизны волнового фронта поперечного сечения лазерного пучка от его расстояния до перетяжки пучка, полученная из (B.5), приведена на рисунке B.2.

Формулы (В.4), (В.5) важны для расчета преобразования гауссова пучка в оптических элементах – линзах и зеркалах. При этом пучок остается гауссовым, а радиус его кривизны преобразуется по правилам геометрической оптики.

В двумерном лазерном триангуляторе пучок преобразуется сначала линзой – коллимированный пучок фокусируется линзой на контролируемой поверхности.



1 – гауссов пучок; асимптотика 2 соответствует геометрооптическому пучку; для нее на обеих осях отложены значения одной и той же величины - радиуса кривизны (на подписях к осям не обозначены); эти значения отложены в произвольных относительных величинах, но в одинаковом масштабе по обеим осям

Рисунок В.2 – Зависимость радиуса кривизны волнового фронта поперечного сечения гауссова пучка от его расстояния до перетяжки пучка.

При  $\Delta z = 0$  формулы (В.1) – (В.5) описывают аксиально-симметричный гауссов пучок. Такой пучок излучает, например, гелий-неоновый лазер.

В двумерном лазерном триангуляторе используются лазерные диоды. Их выходной пучок имеет, как известно, астигматизм.

Эксперимент показал, что в двумерном лазерном триангуляторе можно пренебречь этим астигматизмом, если лазерный диод излучает одномодовый пучок. К тому же в большинстве современных диодных лазеров астигматизм

лазерного диода скомпенсирован коллиматором. То есть, лазерный пучок, сфокусированный на контролируемой поверхности в нашей задаче, является аксиально-симметричным.

Таким образом, и коллимированный, и сфокусированный линзой пучок в этой оптической схеме можно считать аксиально-симметричным.

В процессе измерений этот сфокусированный пучок преобразуется контролируемой поверхностью, представляющей собой зеркало. Причем это зеркало имеет астигматическую форму.

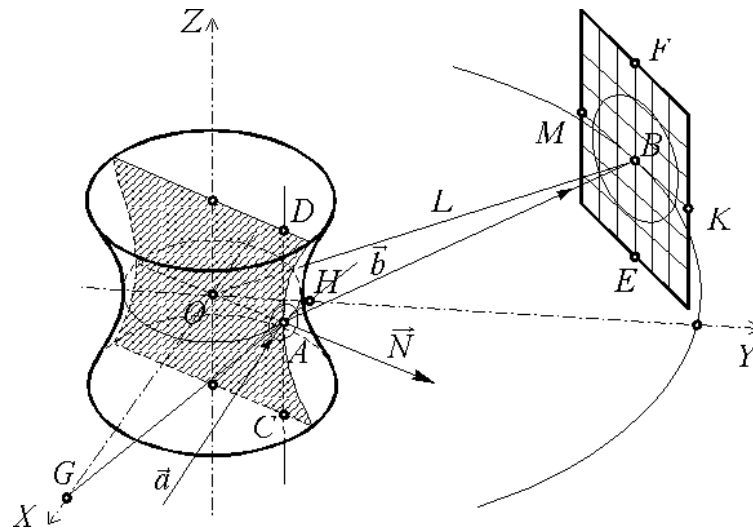
В дифференциальной геометрии доказано [21, с. 97], что любой локальный участок гладкой поверхности можно приближенно представить функцией двух переменных, описывающих астигматический, в общем случае, параболоид. При этом ось симметрии параболоида направлена по вектору нормали к локальному участку поверхности. По этому вектору нормали расположена главная оптическая ось участка поверхности. Главные сечения этого параболоида перпендикулярны друг другу. Плоскость главного сечения, по определению, проходит через главную оптическую ось.

В дифференциальной геометрии также доказано, что различие радиусов локальной кривизны между главными сечениями поверхности максимально. В других, не главных осевых сечениях поверхности радиус кривизны имеет промежуточное значение, по отношению к радиусу кривизны поверхности в главных сечениях.

Если мысленно поворачивать плоскость осевого сечения поверхности вокруг ее главной оптической оси от одного главного сечения к другому, то при этом, пройдя от одного главного сечения к другому, эта плоскость повернется вокруг главной оптической оси на 90 градусов. При этом радиус кривизны осевого сечения будет монотонно изменяться от минимума к максимуму, или наоборот, в зависимости от направления поворота. Предельные радиусы кривизны при этом могут быть как положительными, так и отрицательными.

В дифференциальной геометрии принято считать, что вогнутая поверхность имеет положительный радиус кривизны, а выпуклая – отрицательный. Кривизна плоской поверхности равна нулю. Кривизна есть величина, обратная радиусу кривизны.

Пусть освещенный локальный участок расположен на дне желоба внутреннего кольца шарикоподшипника (см. рисунок В.3).



плоскость  $XOY$  - радиальное сечение контролируемой поверхности и плоскость  $COD$  - ее осевое сечение (заштриховано), проходящие через точку  $A$ ; прямые  $GH$  и  $CD$  - касательные к главным сечениям контролируемой поверхности в точке  $A$ ; одно из главных оптических сечений отраженного пучка света лежит в плоскости  $XOY$  и проходит через точки  $G, O, H, K, B, M$ ; другое из его главных сечений параллельно прямой  $OZ$  и проходит через точки  $C, A, D, F, B, E$ ; эллипсы вокруг точек  $A$  и  $B$  показывают условные границы освещенной области; остальные обозначения см. в разделе 1 и приложении А

Рисунок В.3 – Пространственная конфигурация отраженного пучка света в оптической схеме двумерного лазерного триангулятора

Тогда главная оптическая ось освещенного участка поверхности лежит на пересечении радиальной и осевой плоскостей контролируемой

поверхности. По определению, она совпадает с локальной нормалью к этому участку поверхности.

Очевидно, в этом примере указанные плоскости являются главными сечениями поверхности в точке *A*. В радиальной плоскости радиус кривизны поверхности имеет минимальную величину и, например, для внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201, составляет минус 8,34 мм. В осевой плоскости радиус кривизны имеет максимальную величину и составляет, для деталей этого типа, 2,86 мм. Следует учесть, что в этом примере, если рассматривать величины по модулю, все получается наоборот.

Результаты экспериментов показали, что эта модель поверхности подходит для описания преобразования сфокусированного лазерного пучка в двумерном лазерном триангуляторе.

Преобразованный модельный лазерной пучок является астигматическим. Одно его главное осевое сечение пересекает поверхность в направлении вдоль желоба, а другое поперек желоба. На поверхности фотоприемника эти сечения образуют горизонтальную и вертикальную линии, соответственно. Это следует из законов геометрической оптики.

Ряд законов геометрической оптики применим и к гауссову пучку. Так, его волновой фронт в оптических элементах преобразуется по законам геометрической оптики. Так что все параметры волнового фронта (радиус кривизны, положение главной оптической оси, а также положение главных осевых сечений, если пучок астигматический) преобразуются по этим законам.

Поперечную ширину отраженного лазерного пучка на фотоприемнике можно рассчитывать по отдельности в двух главных осевых сечениях этого пучка, согласно (В.1) [22, с. 82].

При наклонном падении и, следовательно, отражении лазерного пучка от контролируемой поверхности, очевидно, имеют место отклонения от рассмотренной модели. Однако эксперимент показал, что они несущественны и описанной моделью можно пользоваться в расчетах.



В аксиально-симметричном гауссовом пучке, а также и в главных сечениях астигматического гауссова пучка величины  $z_0$  и  $w_0$  определяются по следующим формулам:

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta^2}, \quad (\text{B.6})$$

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta}, \quad (\text{B.7})$$

где  $\theta$  - половина угла расходимости гауссова пучка. Величина угла  $\theta$  определяется в поперечном сечении гауссова пучка с координатой  $z \square z_0$ . Для (B.6), (B.7) и всех других формул, приведенных в этом приложении, она определяется по уровню  $1/e^2$  от интенсивности в центре этого поперечного сечения. Во всех формулах этого приложения величины углов следует подставлять в радианах.

Величины  $z_0$  и  $w_0$  связаны между собой соотношением

$$z_0 = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}. \quad (\text{B.8})$$

Они характеризуют гауссов пучок в области фокуса. Так,  $2 \cdot w_0$  - это поперечная ширина пучка в его перетяжке, то есть, в самом узком его месте;  $2 \cdot z_0$  - это длина каустики пучка. Считается, что в пределах каустики гауссов пучок сфокусирован.

Зная поперечную ширину  $D_G = 2 \cdot w$  гауссова пучка и радиус кривизны его волнового фронта в заданном поперечном сечении, можно определить расстояние  $z$  от этого сечения до перетяжки пучка, а также полуширину  $w_0$  пучка в перетяжке по следующим формулам:

$$z = \frac{k^2 \cdot D_G^4}{4 \cdot R^2 + k^2 \cdot D_G^4} \cdot R, \quad (\text{B.9})$$

$$w_0^2 = \frac{D_G^2}{R^2 + \frac{k^2 \cdot D_G^4}{4}} \cdot R^2, \quad (\text{B.10})$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}, \quad (\text{B.11})$$

где  $k$  - так называемое «волновое число»;

$\lambda$  - длина волны света;

$R$  - радиус кривизны гауссова пучка в поперечном сечении  $z$ .

Формулы (B9) - (B.11) следует применять при анализе лазерного пучка вблизи его перетяжки, то есть, по крайней мере, при  $z/z_0 \leq 3$ . Вдали от нее можно использовать упрощенные формулы.

Так, в этой области считаем, что  $z = R$ , а  $w_0$  и  $z_0$  определяем из (B.6) и (B.7), вычисляя  $\theta$  в геометрооприческом приближении.

В параксиальном (иначе говоря, «приосевом») приближении, то есть, когда значения синуса и тангенса  $\theta$  можно заметить значением  $\theta$ , выраженным в радианах, можно считать, что, в соответствии с правилами геометрической оптики, параллельный лазерный пучок преобразуется фокусирующей линзой в сходящийся с параметром

$$\theta = \frac{D_G}{2 \cdot f}, \quad (\text{B.12})$$

где  $f$  - фокусное расстояние фокусирующей линзы в двумерном лазерном триангуляторе.

С учетом волновых свойств света, следует принимать, что лазерный пучок, падающий на фокусирующую линзу, имеет угловую расходимость, не превышающую дифракционный предел.

Примем, что знак  $f$  положительный, поскольку при рассмотрении преобразования лазерного пучка мы не пользовались правилом знаков. Нет также необходимости уточнять, какое это фокусное расстояние – переднее или заднее.

Подставим результат (В.12) в (В.6) и (В.7). Тогда получаем:

$$z_0 = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f^2}{\pi \cdot D_G^2}, \quad (\text{В.13})$$

$$w_0 = \frac{2 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D_G}. \quad (\text{В.14})$$

Лазерный пучок распространяется как гауссов, если он не ограничен в поперечном сечении диафрагмой. На практике это имеет место, если диаметр диафрагмы превосходит  $D_G$ , по меньшей мере, в полтора раза. Разумеется, лазерный пучок может быть ограничен и без диафрагмы – поперечными размерами оптических элементов (линз или зеркал).

В двумерном лазерном триангуляторе лазерный пучок сильно обрезается с боков и в апертуре фокусирующей линзы по своему распределению мощности близок к однородному, то есть, с постоянной интенсивностью по апертуре. Для инженерных расчетов этот случай гораздо более сложен, чем тот случай, когда на линзу падает гауссов пучок.

В классической теории дифракции известно распределение мощности света вблизи фокуса обычной собирающей линзы. Оно получено при условии, что плоская световая волна падает на линзу перпендикулярно, то есть, под углом к ней, равным нулю. Фактически при этом линзой фокусируется пучок света с равномерным распределением мощности и с диаметром, равным диаметру линзы. Предполагается также, что свет является пространственно когерентным в пределах апертуры линзы. То есть, это описание подходит для лазерного пучка.

Указанное распределение мощности описывается функциями Ломмеля, которые мы здесь не приводим. Для сведения приводим карту этого распределения мощности вблизи фокуса линзы (см. рисунок В.4) [2, с. 402] в нормализованных координатах, которые определены как

$$u = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left( \frac{D_U}{2 \cdot f} \right)^2 \cdot z, \quad (\text{В.15})$$

$$v = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left( \frac{D_U}{2 \cdot f} \right) \cdot r, \quad (\text{B.16})$$

где  $r$  - расстояние до главной оптической оси;

$D_U$  - поперечная ширина пучка равномерной интенсивности, она равна диаметру фокусирующей линзы, или же ограничивающей диафрагмы.

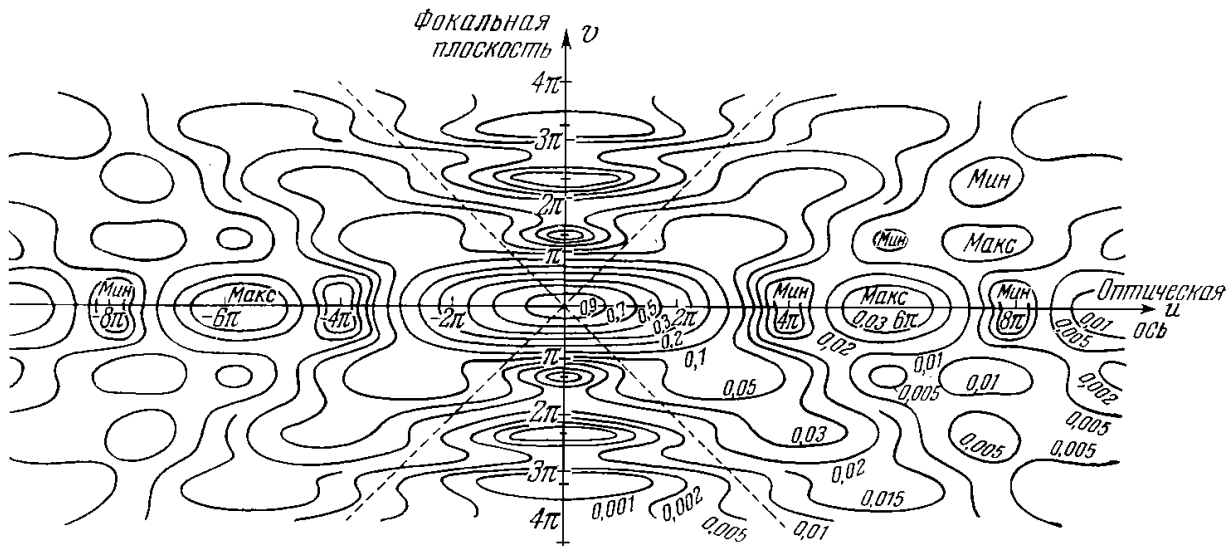


Рисунок В.4 – Распределение мощности лазерного пучка вблизи фокуса обычной линзы

На рисунке В.4 изображено осевое сечение поля интенсивности. Трехмерная картина получается его вращением вокруг оси  $u$ . Линии на этом рисунке – это так называемые «изофоты», то есть, линии равной интенсивности. Числовые значения интенсивности приведены в относительных единицах. Они показывают отношение к максимальной интенсивности. Этот максимум находится в центре. Пунктиром проведены линии границы геометрической тени. Для наглядности картина изображена сильно вытянутой в направлении поперек главной оптической оси.

На рисунке В.1, где изображен гауссов пучок, линии проведены при другом условии. Изофоты на нем были бы семейством эллипсов с центром в начале координат  $XOZ$ . Они были бы похожи на центральную часть картины, изображенной на рисунке В.4.

Зависимость интенсивности света в области каустики в точках на главной оптической оси определяется формулой

$$\frac{I}{I_{foc}} = \left[ \frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2, \quad (B.17)$$

где  $I_{foc}$  - интенсивность света в точке фокуса. Переменные  $u$ ,  $v$  определены в (B.15), (B.16).

Интенсивность света в фокальной плоскости, то есть, при  $u = 0$

$$\frac{I}{I_{foc}} = \left[ \frac{2 \cdot J_1(v)}{v} \right]^2, \quad (B.18)$$

где  $J_1$  - функция Бесселя 1-го рода. Значение функции (B.18) в нуле равно единице. Первый минимум (B.18) имеет место на расстоянии

$$r_{\min 1} = \frac{v_{\min 1}}{\pi} \cdot \frac{\lambda \cdot f}{D_U} = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot f}{D_U}, \quad (B.19)$$

где  $v_{\min 1} \cong 3,85$  - координата первого минимума функции.

Для упрощения расчетов в нашей задаче можно использовать формулы для гауссовых пучков, если подобрать такую ширину гауссова пучка, при котором параметры пучка в фокусе линзы были бы, по возможности, близкими к сфокусированному пучку однородной интенсивности.

Подберем такую поперечную ширину гауссова пучка, при которой главный пик профиля функции Эйри и гауссиан одинаковых амплитуд, равных единице, имели бы близкую ширину. Это имеет место, когда оба профиля пересекаются в точках, в которых аргумент функции Эйри  $v = \pm 0,5 \cdot v_{\min 1}$ . Округленное значение функции в этой точке равно 0,36455. В то же время  $e^{-1} \cong 0,36788$ . При этом выборе ширины гауссова пучка

$$w_0 \cong \frac{r_{\min 1}}{\sqrt{2}}. \quad (B.20)$$

Расчеты по приведенным выше формулам показали, что при этом

$$D_{G_{1/2}} \cong \frac{4 \cdot \sqrt{\ln 2}}{v_{\min 1}} \cdot D_U \cong 0,87 \cdot D_U, \quad (\text{B.21})$$

$$D_{G_{1/\sqrt{e}}} \cong \frac{4}{\sqrt{2} \cdot v_{\min 1}} \cong 0,74 \cdot D_U, \quad (\text{B.22})$$

$$D_{G_{1/e}} \cong \frac{4}{v_{\min 1}} \cong 1,04 \cdot D_U, \quad (\text{B.23})$$

$$D_{G_{1/e^2}} \cong \frac{4 \cdot \sqrt{2}}{v_{\min 1}} \cong 1,48 \cdot D_U, \quad (\text{B.24})$$

где символы «1/2», «1/√e» и др. означают относительный уровень интенсивности, по отношению к максимуму интенсивности лазерного пучка в данном поперечном сечении. По нему определяется условная боковая граница гауссова пучка. Формулы в данном приложении приведены для уровня 1/e<sup>2</sup>.

В литературных источниках встречаются все из приведенных здесь критериев ширины лазерного пучка. При работе с литературой инженеру важно знать контекст, в котором приведены эти сведения и всегда стараться точно выявить указанные критерии, чтобы избежать ошибки в расчетах. Для одного и того же лазерного пучка будут разные значения  $w_0$ ,  $w$  и  $\theta$ . Напротив, значение  $z_0$  будет одно и то же, если, конечно, критерий границы каустики будет такой же.

### **П р и м е р**

Порядок расчета диаметра фокусирующей линзы и ширины лазерного пучка, отраженного от контролируемой поверхности, на матричном фотоприемнике

В х о д н ы е д а н н ы е :

$\lambda = 0,405$  мкм - это фиолетовый цвет;  $f_{сж}$  10 ; контролируемый объект – желоб внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201;

контролируемые параметры – отклонение от круглости, огранка, гранность, волнистость.

#### Р а с ч е т

Согласно методике [5], спектральный диапазон контролируемых отклонений от круглости – от 2 до 500 волн на радиальный профиль. Обозначим максимальное значение этого диапазона как  $M$ . По теореме Шеннона, требуемое количество  $N$  дискретных отсчетов определяется как

$$N = 4 \cdot M . \quad (\text{B.25})$$

Определим предельную максимальную ширину  $d_s$  зондирующего лазерного пучка на контролируемой поверхности. Величину  $d_s$  определим в направлении радиального профиля этой поверхности. Определим ее из условия требуемого минимального шага  $(\Delta l)_{\min}$  дискретности сканирования.

Для простоты примем, что

$$d_s = (\Delta l)_{\min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_R}{N} , \quad (\text{B.26})$$

где  $R_R$  - радиус сканируемого радиального профиля контролируемой поверхности.

Если  $d_s$  увеличивать, то это приведет к уменьшению разрешающей способности прибора и, следовательно, к увеличению погрешности измерений мелкомасштабных отклонений от круглости. Очевидно, не следует увеличивать  $d_s$  больше, чем в два раза по отношению к величине, определенной из (B.26).

Требуемая поперечная ширина  $d_T$  зондирующего лазерного пучка на контролируемой поверхности определяется с учетом угла  $\phi$  падения этого пучка на нее:

$$d_T = d_s \cdot \cos \phi . \quad (\text{B.27})$$

Величину  $\phi$  находим, считая, для упрощения расчетов, что зависимость от координаты  $z$  в оптической схеме измерений отсутствует. Не следует путать

$z$  с обозначениями, введенными в этом приложении. При этом условии величина угла  $\phi$  равна угловой координате  $\varphi_c$  освещенного участка контролируемой поверхности в цилиндрической системе координат оптико-механического блока в нашей задаче. Она находится из (1.5). Итак, имеем

$$\phi = \arcsin\left(\frac{d}{R_T}\right), \quad (\text{B.28})$$

определение  $d$  см. в приложении А. Это совсем не то, что введенное нами  $d_s$  и  $d_T$ .

Для нахождения  $\phi$  следует задать величину параметра настройки  $d$  оптической схемы. При этом следует соблюдать ограничение

$$45^\circ < \psi_0 < 135^\circ, \quad (\text{B.29})$$

которое накладывает конструкция оптико-механического блока. Предпочтительнее выбирать значения этого параметра в диапазоне от  $90^\circ$  до  $100^\circ$ .

Для определения  $\psi_0$  понадобится также задать и второй параметр настройки оптической схемы – это  $L$ .

Ограничения на  $d$  и  $L$ , которые накладывает метод измерений:

$$0 < d < L, \quad (\text{B.30})$$

$$d < R_R. \quad (\text{B.31})$$

Ограничения на  $d$  и  $L$ , которые накладывает конструкция оптико-механического блока:

$$0 < d < 20 \text{ мм}, \quad (\text{B.32})$$

$$20 \text{ мм} < L < 150 \text{ мм}. \quad (\text{B.33})$$

Считаем, что зондирующий лазерный пучок падает на контролируемую поверхность точно в своем фокусе. Тогда, чтобы удовлетворить критерию Рэлея, должно выполняться следующее условие:

$$r_{\min 1} = 0,5 \cdot d_T. \quad (\text{B.34})$$



Из (В.16) и (В.34) находим  $D_U$  :

$$D_U = \frac{v_{\min 1}}{\pi} \cdot \frac{f \cdot \lambda}{r_{\min 1}} = 1,22 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{r_{\min 1}} . \quad (\text{В.35})$$

Таким образом, найдена требуемая поперечная ширина лазерного пучка равномерной интенсивности, который падает на фокусирующую линзу источника излучения опико-механического блок двумерного лазерного триангулятора.

Во второй части расчетов найдем размеры светового пятна на поверхности матричного фотоприемника при условиях, выполненных в первой части расчетов. Для этого используем формулы, описывающие гауссов пучок.

Для этого нам нужна поперечная ширина зондирующего лазерного пучка на контролируемой поверхности. Выражения для нее мы уже привели. Для согласования с формулами гауссовой оптики проведем эквивалентную замену, предложенную нами выше в (В.20).

Для расчетов преобразования радиуса кривизны контролируемой поверхностью используем формулы геометрооптического приближения. Они приведены в приложении Б.

Для упрощения расчетов полагаем, что угол падения зондирующего луча на контролируемую поверхность равен нулю. Результаты экспериментов оказались в удовлетворительной близости к результатам этих расчетов, поэтому сделанное допущение оправданно.

Чтобы воспользоваться формулами из приложения Б, контролируемую поверхность условно считаем астигматической линзой. В геометрооптическом приближении этот случай эквивалентен зеркалу, с точностью до смены знаков у параметров светового пучка после его преобразования в этом оптическом элементе.

Таким образом в результате сделанных нами двух допущений рассматриваемая задача сводится к случаю, рассмотренному в приложении Б.

Обозначим параметры зондирующего лазерного пучка индексом «1», а отраженного лазерного пучка - индексом «2». Нас интересуют два поперечных сечения отраженного пучка: одно – на контролируемой поверхности, и второе – на поверхности фотоприемника. Введем для них второй индекс – «1» и «2», соответственно.

В расчетах полагаем, что лазерный пучок падает на контролируемую поверхность в своей перетяжке. Следовательно, волновой фронт в точке падения плоский. Тогда, по законам геометрической оптики, радиус кривизны  $R_{21}$  отраженного лазерного пучка в своей начальной точке, то есть, на контролируемой поверхности, равен фокусному расстоянию этой поверхности. С учетом правил знаков для поверхности в дифференциальной геометрии, для геометрооптического пучка и для гауссова пучка в когерентной оптике получаем, что

$$R_{21} = -\frac{R_S}{2}, \quad (\text{B.36})$$

где  $R_S$  - радиус кривизны контролируемой поверхности на ее локальном участке, освещенном зондирующим лазерным пучком.

Согласно (B.1), определяем два радиуса кривизны отраженного лазерного пучка, в вертикальной и горизонтальной плоскости. Эти плоскости соответствуют пространственной конфигурации измерений в двумерном лазерном триангуляторе. Относящиеся к ним параметры обозначим третьим, буквенным индексом. Выберем для них буквы «V» и «H», соответственно. Получим из (B.36), что

$$R_{21H} = -\frac{R_{SH}}{2}, \quad (\text{B.37})$$

$$R_{21V} = -\frac{R_{SV}}{2}, \quad (\text{B.38})$$

где  $R_{SH}$ ,  $R_{SV}$  - радиус кривизны  $R_S$  в горизонтальной и вертикальной плоскости, соответственно;

$R_{21H}$ ,  $R_{21V}$  - радиус  $R_{21}$  кривизны отраженного лазерного пучка в своей начальной точке, то есть, на контролируемой поверхности, определенный в горизонтальной и вертикальной плоскости, соответственно.

Радиус  $R_R$  радиального сечения внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201 по дну желоба составляет 8,34 мм. Радиус  $R_T$  желоба этой детали составляет 2,86 мм. Тогда, с учетом формы детали (см. рисунок 8), имеем:

$$R_{SH} = -R_R, \quad (B.39)$$

$$R_{SV} = R_T. \quad (B.40)$$

Таким образом из (B.37) и (B.38) получаем, что в своей начальной точке отраженный лазерный пучок в горизонтальной плоскости расходящийся, а в вертикальной плоскости – сходящийся. Получается, что если поместить начало отсчета на главной оптической оси в начальную точку отраженного лазерного пучка, то в горизонтальном сечении координата перетяжки будет иметь отрицательный знак, а в вертикальном сечении – положительный знак.

Теперь определим координату этих перетяжек. Для этого сначала из (B.20) находим полуширину  $w_{10}$  эквивалентного гауссова пучка на контролируемой поверхности. Второй индекс «0» указывает, что на поверхности находится перетяжка зондирующего лазерного пучка. Напомним, что это есть поперечная полуширина, то есть, без учета угла падения  $\phi$ , согласно допущению, сделанному только что выше.

Из нее, пользуясь условием неразрывности любого лазерного пучка при оптических преобразованиях, определяем полуширину отраженного лазерного пучка в начале его пути:

$$w_{21H} = w_{21V} = w_{10}. \quad (B.41)$$

Используя величины, рассчитанные из (В.37), (В.38) и (В.41), и подставив их в (В.9), найдем координату  $z_{21H}$  и  $z_{21V}$  перетяжки отраженного лазерного пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно:

$$z_{21H} = f(D_G = w_{21H}, R = R_{21H}), \quad (\text{В.42})$$

$$z_{21V} = f(D_G = w_{21V}, R = R_{21V}), \quad (\text{В.43})$$

где  $f$  - функция, описанная в (В.9).

Из этих же величин, подставив их в (В.10), найдем и полуширину  $w_{20H}$  и  $w_{20V}$  перетяжки отраженного лазерного пучка в горизонтальной и вертикальной плоскости, соответственно:

$$w_{20H} = f(D_G = w_{21H}, R = R_{21H}), \quad (\text{В.44})$$

$$w_{20V} = f(D_G = w_{21V}, R = R_{21V}), \quad (\text{В.45})$$

где  $f$  - функция, описанная в (В.10).

Из (А.5) по уже заданным нами величинам  $d$  и  $L$  находим длину отраженного лазерного пучка от контролируемой поверхности до фотоприемника, обозначенную в приложении А как  $|\vec{b}|$ . При тех же допущениях, как и в (В.28), то есть, без зависимости  $\vec{b}$  по оси  $OZ$  в схеме измерений (см. рисунок В.3) получаем:

$$|\vec{b}| = B_0 \cdot L, \quad (\text{В.46})$$

$$B_0 = \sqrt{1 + A_0^2 - 2 \cdot A_0 \cdot \cos(\psi_0 - \phi)}, \quad (\text{В.47})$$

$$A_0 = \frac{R_T}{L}, \quad (\text{В.48})$$

$$\psi_0 = 2 \cdot \phi - \arcsin\left(\frac{d}{L}\right), \quad (\text{В.49})$$

где  $\phi$  находится из (В.28).

Используя результаты, полученные из (В.42), (В.43), (В.46) – (В.49), определяем расстояния  $z_{22H}$  и  $z_{22V}$  от перетяжек отраженного лазерного пучка до фотоприемника:

$$z_{22H} = -z_{21H} + |\vec{b}|, \quad (\text{В.50})$$

$$z_{22V} = -z_{21V} + |\vec{b}|. \quad (\text{В.51})$$

Результаты, полученные из (В.44) и (В.45) подставим в (В.8). Тем самым найдем  $z_{20H}$  и  $z_{20V}$ . Эти величины, а также величины, найденные из (В.50) и (В.51), подставим в (В.2) и (В.3). Таким образом найдем полуширину  $w_{22H}$  и  $w_{22V}$  лазерного пучка на фотоприемнике:

$$w_{22H} = f(w_{0x} = w_{21H}, z_{0x} = z_{20H}, z = z_{22H}), \quad (\text{В.52})$$

$$w_{22V} = f(w_{0x} = w_{21V}, z_{0x} = z_{20V}, z = z_{22V}), \quad (\text{В.53})$$

где  $f$  - формальное обозначение для функции, описанной в (В.2) или (В.3), соответственно формуле. При этом полагаем, что  $\Delta z = 0$ , поскольку астигматизм у нас учтен в (В.50), (В.51).

Наконец, находим размеры  $D_{2H}$  и  $D_{2V}$  пятна лазерного пучка на фотоприемнике:

$$D_{2H} = 2 \cdot w_{22H}, \quad (\text{В.54})$$

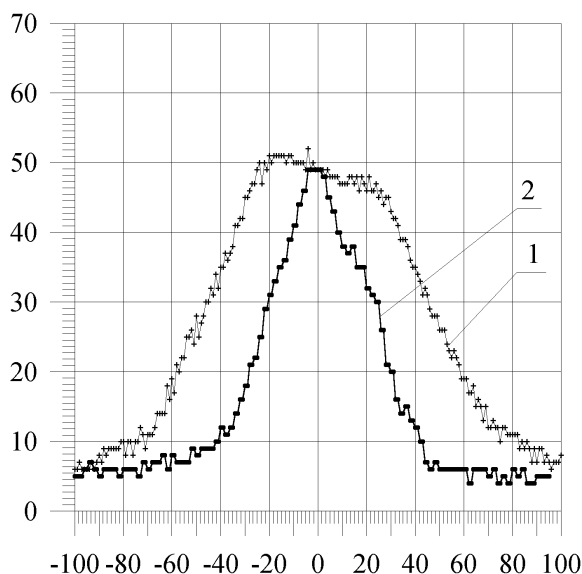
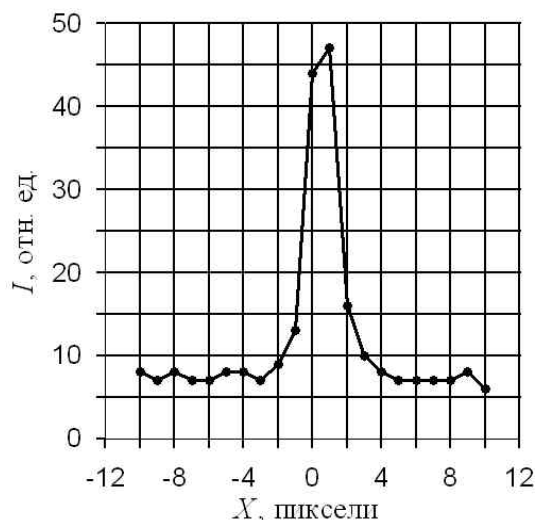
$$D_{2V} = 2 \cdot w_{22V}. \quad (\text{В.55})$$

Эти величины должны быть меньше, чем соответствующие размеры матричного фотоприемника. При этом следует даже оставить запас. Он нужен для учета смещения пятна отраженного лазерного пучка из-за кинематических погрешностей при повороте контролируемой поверхности в процессе сканирования. Максимальная величина этого запаса может быть определена равной максимальной из величин  $D_{2H}$  и  $D_{2V}$ .

## Результаты расчета

Пятно лазерного пучка на поверхности матричного фотоприемника меньше, чем область этого фотоприемника, данные с которой вводятся в компьютер.

Значит, результаты расчета удовлетворительные. Они подтверждены результатами экспериментов (рисунки В.5 и В.6). Использован фиолетовый лазер с длиной волны 405 нм. Шаг между пикселями 13 мкм.



пучок в фокусе, как он падает на контролируемую поверхность; размер оцифрованного участка ПЗС-матрицы – 256 на 256 пикселей

Рисунок В.6 – Профиль зондирующего лазерного пучка

профили 1 – в горизонтальной плоскости, 2 – в вертикальной плоскости, проведены через точку, где видеосигнал имеет максимальную амплитуду в кадре, что практически соответствует центру данного поперечного сечения пучка

Рисунок В.7 - Профили распределения мощности пучка света на ПЗС фотоприемнике

В заключение отметим, что расчеты в данном приложении хоть и несложные, но довольно громоздки. Поэтому целесообразно выполнять их в каком-нибудь математическом пакете программ, таком, как, например, MathCad. Рекомендуется студентам проделать это самостоятельно.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Программа численного расчета изменения величин информативных параметров двумерного лазерного триангулятора под влиянием электронных шумов

В качестве модельной функции взят одномерный гауссиан. Он моделирует распределение мощности лазерного пучка, отраженного контролируемой поверхностью, на позиционно-чувствительном фотоприемнике, то есть, величину входного сигнала в триангуляторе в один заданный момент времени. Эта величина может быть адекватно представлена как непрерывная скалярная функция двух переменных. Функцией одной переменной она моделируется для упрощения расчетов. Параметры этой функции одной переменной подбираются такими, чтобы они соответствовали распределению мощности рассматриваемого лазерного пучка по линии пересечения плоскости фотоприемника и плоскости осевого сечения этого пучка.

Пятно лазерного пучка на фотоприемнике в нашей задаче по форме может быть представлено как эллипс. Рассмотрим типичный случай, когда его большая ось параллельна азимутальной плоскости (на матрице фотоприемника это горизонтальная линия), а малая ось, как и у всех эллипсов, перпендикулярна большой оси (то есть, лежит по вертикальной линии на матрице).

Исходя из этого, для моделирования выбираем осевое сечение по горизонтальной линии.

Информативными параметрами в двумерном лазерном триангуляторе являются координаты центра лазерного пучка на фотоприемнике. Они, естественно, отсчитываются по осям матрицы фотоприемника - горизонтальной и вертикальной.

Из-за особенностей пространственной конфигурации оптической схемы двумерного лазерного триангулятора получается следующее. В этой программе мы рассмотрим наиболее распространенный случай: измерения по

радиальному сечению на дне желоба внутреннего кольца шарикоподшипника. При этом величина фактора, связанного с вертикальной координатой пучка на фотоприемнике, пренебрежимо мала. Поэтому погрешность расчетов определяется погрешностью определения только горизонтальной координаты.

Это обстоятельство сокращает количество расчетов по нашей программе в два раза.

Как было уже отмечено, оценку влияния шумов на этот один информативный параметр мы проводим здесь по одномерной функции.

То есть, используем только одно горизонтальное сечение светового пятна, а не все данные с этого пятна. По теории вероятности, это дает нам завышенную оценку. Кратность этого завышения может быть оценена как квадратный корень из отношения всех отсчетов распределения мощности в пятне к их количеству в выбранном сечении.

В нашей программе присутствуют два алгоритма расчета центра пятна.

По первому из них этот центр вычисляется как "центр тяжести", или, как говорят оптики, "энергетический центр". Он определяется как первый начальный момент модельной функции. Для статистической оценки искомой величины в программе задается количество повторений процедуры этого алгоритма. По выборочной дисперсии рассчитывается статистическая оценка  $S. K. O$ . Другие статистические параметры пользователь определяет самостоятельно.

По второму алгоритму искомый центр определяется как координата максимума аппроксимирующей функции. Аппроксимирующая функция в программе задана такого же вида, как и модельная. Это гауссиан с тремя искомыми параметрами. Это амплитуда, координата максимума и полуширина. Аппроксимация проводится по методу наименьших квадратов. Из-за значительно большего времени счета, по сравнению с первым алгоритмом, статистическая оценка в программе не проводится.



Дискретные отсчеты модельной функции сделаны с равномерным шагом.

Исходные данные:

$L$  - полуширина гауссиана, в дискретных отсчетах;

$a_0, b$  - параметры шума;

$K$  - количество реализаций зашумленного сигнала при статистической оценке погрешности определения искомой величины по первому алгоритму.

Данные промежуточных расчетов:

$2N+1$  - количество дискретных отсчетов модельной функции. Фактически определяется параметром  $L$ .

Выходные данные первого алгоритма:

$x_0$  - координата центра распределения мощности при влиянии шума, а также и отклонение его от центра незашумленного распределения мощности;

$X_0$  - оценка М. О. координаты центра распределения мощности при влиянии шума при  $K$  измерениях;

$\delta_0$  - оценка С. К. О. определения координаты центра распределения мощности при влиянии шума при единичном измерении.

Выходные данные второго алгоритма:

$x$  - координата рассчитанного центра распределения мощности при влиянии шума;

$\delta$  - отклонение центра распределения мощности при влиянии шума при единичном измерении, выраженное в единицах  $x$ .;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  - оценки абсолютной погрешности аппроксимации - модули разности рассчитанных параметров  $a_1, a_2, a_3$  аппроксимирующей функции, соответственно, на последнем и на предпоследнем шаге аппроксимации;

$a_1$  - амплитуда гауссиана;  
 $a_2$  - это параметр  $x$ ;  
 $a_3$  - полуширина гауссиана.

Модельная функция одного переменного без шума:

$$f_i(n) = \exp(-2 * x^2 / L^2);$$

где,  $L$  определяется по уровню  $\exp(-2)$  от максимальной интенсивности (которая в центре, то есть, при  $x=0$ ); амплитуда функции принимается нами равной единице, а координата максимума равной нулю (считаем, что общность рассмотрения задачи при этом не снижается).

Модельная функция одного переменного с добавлением шума:

$$F_i(n) = [1 - a_0/2 + a_0 * h_i] * f_i(n) - b * k_{si}.$$

Первое слагаемое моделирует мультипликативную составляющую шума (неоднородность чувствительности элементов ПЗС-фотоприемника), второе - аддитивную (погрешность амплитудно-цифрового преобразования);  $h_i$  и  $k_{si}$  - случайные величины с равномерным распределением в интервале значений больше нуля, но меньше единицы;  $k_{si}$  не зависит от  $h_i$ .

В этой программе заданы следующие величины встроенных переменных (см. меню "Формат\ Свойства"):

начальный индекс массивов             $ORIGIN=1$ ;  
допуск сходимости                         $TOL=0.001$ ;  
допуск ограничения                         $CTOL=0.001$ .

Начальная величина для случайных чисел            1.

Настройка PRN файла не важна, т. к. он не используется.

В этой программе задан следующий формат результата (см. меню "Формат\ Формат результата"):

точность отображения 15;

допуски:

порог экспоненты 8;

комплексный порог не важен, так как комплексные числа не используются;

нулевой порог 15.

В этой программе используются следующие стили отображения (см. меню "Формат\ Формат результата"):

система счисления - "десятичная";

мнимая величина не важна;

стиль матрицы - "матрица".

<----- конец заглавного комментария ----->

---

Задание параметров сигнала и шума

Типичные значения параметров сигнала :  $L=4$ ,  $N=9$

и шума:  $a_0=0.04$ ,  $b=0.005$ ,  $K=10$ .

$L := 4$

$a_0 := 0.04$

$b := 0.005$

---

$$f_i(i) := \exp\left(-\frac{2 \cdot i^2}{L^2}\right)$$

- задание модельной функции

=====

### Определение количества отсчетов модельной функции

При аппроксимации не учитываем отсчеты функции с малыми значениями, потому что, как мы выяснили, это приводит к недопустимо большой погрешности аппроксимации. Для этого используем следующую формулу:

$$N := \text{if}(b > 1 \cdot 10^{-4}, \text{floor}(1.52 \cdot L \cdot \sqrt{-\log(b)}), 2 \cdot L)$$

$$\text{floor}(1.52 \cdot L \cdot \sqrt{-\log(b)}) = 9$$

$$2 \cdot L = 8$$

$$N = 9$$

$$2 \cdot N + 1 = 19$$

Формула получена при целочисленном решении уравнения

$$\exp(-2 \cdot n^2 / L^2) = b.$$

При этом предполагалось, что  $FI(n) > 0$ .

=====

Randomise ■

- установление случайного стартового числа в ГСЧ

~~~~~

Задание случайных функций, используемых в обоих алгоритмах

$$hi(n) := \text{rnd}(1)$$

$$ksi(n) := \text{rnd}(1)$$

$$FI(n) := \left(1 - \frac{a0}{2} + a0 \cdot hi(n)\right) \cdot fi(n) - b \cdot ksi(n)$$

~~~~~

-----

Оценка погрешности первого алгоритма.

Рез-т определения координаты

максимума, а также и его абс. погрешности при однократном измерении:

K := 10

i := 1.. K

$$x0_i := \frac{\sum_{n=-N}^N FI(n) \cdot n}{\sum_{n=-N}^N FI(n)}$$

$$x0 = \begin{bmatrix} -0.010328021454549 \\ 0.003823718097664 \\ -0.004867901455201 \\ -0.022579293397763 \\ -0.014733108369996 \\ -0.004856599190031 \\ -0.010226805242807 \\ 0.016014689371322 \\ -0.014696550760882 \\ 0.002709759887558 \end{bmatrix}$$

$$X0 := \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^K x0_i$$

$$\text{delta0} := \sqrt{\frac{1}{K-1} \cdot \sum_{i=1}^K (x0_i - X0)^2}$$

Рез-т оценки мат. ожидания:

X0 = -0.005974011251468

Рез-т оценки С. К. О.:

delta0 = 0.011170208193789

Конец оценки погрешности расчетов, проведенных по первому алгоритму.

-----  
 .....

Задание табличной функции FI(n) для второго алгоритма

t := -N.. N

FI0<sub>t+N+1</sub> := FI(t)

FI(n) := FI0<sub>n+N+1</sub>

Проверка результата функции:

FI0<sub>10</sub> = 0.992299690600485    FI(0) = 0.992299690600485    FI(0) = 0.992299690600485

FI(1) = 0.870607734956855    FI(-1) = 0.895537190214928

FI(2) = 0.615547715398837    FI(-2) = 0.595748567421512

$$FI(3) = 0.318127011568241 \quad FI(-3) = 0.32736013530844$$

$$FI(4) = 0.13258726353539 \quad FI(-4) = 0.136198129810425$$

Конец задания табличной функции FI для второго алгоритма

.....

+++++

Модель работы второго алгоритма (при однократном измерении).

Для определения  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  необходимо решить систему уравнений

$$F1=0$$

$$F2=0 \quad (1)$$

$$F3=0$$

(см. следующие три уравнения).

$$F1(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right] \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right]$$

$$F2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right] \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \cdot n$$

$$F3(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right] \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \cdot n^2$$

Эта система решается методом Ньютона с первым приближением, выбранном в виде

$$a_1=q_{1,1}, a_2=q_{2,1}, a_3=q_{3,1} \quad (\text{см. ниже}).$$

$$\max(FI_0) = 0.992299690600485$$

$$q_{1,1} := \max(FI)$$

$$q_{2,1} := \frac{\sum_{n=-N}^N FI(n) \cdot n}{\sum_{n=-N}^N FI(n)} \quad q_{2,1} = -0.005847372242777$$

$$q_{3,1} := \frac{-4 \cdot \sum_{n=-N}^N FI(n) \cdot (n - q_{2,1})^2}{\sum_{n=-N}^N FI(n)} \quad q_{3,1} = -15.2794399434495$$

$$\sqrt{2 \cdot |q_{3,1}|} = 5.52800867283138$$

- это чтобы посмотреть третий параметр в единицах величины L.

Сделав замены

$$a_1 = a_1 + EPS_1, \quad a_2 = a_2 + EPS_2, \quad a_3 = a_3 + EPS_3, \quad (2)$$

от системы (1) переходим к системе

$$\begin{aligned} F1 + (dF1/da_1) \cdot EPS_1 + (dF1/da_2) \cdot EPS_2 + (dF1/da_3) \cdot EPS_3 &= 0 \\ F2 + (dF2/da_1) \cdot EPS_1 + (dF2/da_2) \cdot EPS_2 + (dF2/da_3) \cdot EPS_3 &= 0 \\ F3 + (dF3/da_1) \cdot EPS_1 + (dF3/da_2) \cdot EPS_2 + (dF3/da_3) \cdot EPS_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(см. выражения ниже в программе).

Итеративный процесс нахождения  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  состоит следующем: решив систему (3), определяем поправки EPS. Затем с поправленными  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  снова решаем систему (3).

Систему (3) решаем по методу Крамера. Получаем

$$\text{EPS}_1 = D1/D, \text{EPS}_2 = D2/D, \text{EPS}_3 = D3/D,$$

где  $D, D1, D2, D3$  - определители матрицы коэффициентов уравнения (3) (их вид см. ниже в программе). Идея такая: матрица  $D$  состоит из производных системы (3), а матрицы  $D1, D2, D3$  отличаются от матрицы  $D$  тем, что в них столбец, соответствующий порядковому номеру, заменен на минус  $F1$ , минус  $F2$ , минус  $F3$ .

$$dF1\_da1(a) := - \sum_{n=-N}^N \left[ \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right]^2$$

$$dF1\_da2\_1(a) := \sum_{n=-N}^N 2 \cdot \frac{(a_1) \cdot [n - (a_2)]}{a_3} \cdot \left[ \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right]^2$$

$$dF1\_da2\_2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right] \cdot 2 \cdot \frac{[n - (a_2)]}{a_3} \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right]$$

$$dF1\_da2(a) := dF1\_da2\_1(a) - dF1\_da2\_2(a)$$

$$dF1\_da3\_1(a) := \sum_{n=-N}^N (a_1) \cdot \frac{(a_1) \cdot [n - (a_2)]^2}{(a_3)^2} \cdot \left[ \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right]^2$$

$$dF1\_da3\_2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right] \cdot \frac{[n - (a_2)]^2}{(a_3)^2} \cdot \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right]$$

$$dF1\_da3(a) := dF1\_da3\_1(a) - dF1\_da3\_2(a)$$

$$dF2\_da1(a) := - \sum_{n=-N}^N \left[ \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right]^2 \cdot n$$

$$dF2\_da2\_1(a) := \sum_{n=-N}^N 2 \cdot \frac{(a_1) \cdot [n - (a_2)]}{a_3} \cdot \left[ \exp \left[ \frac{[n - (a_2)]^2}{a_3} \right] \right]^2 \cdot n$$



$$dF2\_da2\_2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right] \cdot 2 \cdot \frac{[n - (a_2)]}{a_3} \cdot n \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right]$$

$$dF2\_da2(a) := dF2\_da2\_1(a) - dF2\_da2\_2(a)$$

$$dF2\_da3\_1(a) := \sum_{n=-N}^N \frac{(a_1) \cdot [n - (a_2)]^2 \cdot n}{(a_3)^2} \cdot \left[ \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right]^2$$

$$dF2\_da3\_2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right] \cdot \frac{[n - (a_2)]^2 \cdot n}{(a_3)^2} \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right]$$

$$dF2\_da3(a) := dF2\_da3\_1(a) - dF2\_da3\_2(a)$$

$$dF3\_da1(a) := - \sum_{n=-N}^N \left[ \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right]^2 \cdot n^2$$

$$dF3\_da2\_1(a) := \sum_{n=-N}^N 2 \cdot \frac{(a_1) \cdot [n - (a_2)]}{a_3} \cdot \left[ \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right]^2 \cdot n^2$$

$$dF3\_da2\_2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right] \cdot 2 \cdot \frac{[n - (a_2)]}{a_3} \cdot n^2 \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right]$$

$$dF3\_da2(a) := dF3\_da2\_1(a) - dF3\_da2\_2(a)$$

$$dF3\_da3\_1(a) := \sum_{n=-N}^N \frac{(a_1) \cdot [n - (a_2)]^2 \cdot n^2}{(a_3)^2} \cdot \left[ \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right]^2$$

$$dF3\_da3\_2(a) := \sum_{n=-N}^N \left[ FI(n) - (a_1) \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right] \right] \cdot \frac{[n - (a_2)]^2 \cdot n^2}{(a_3)^2} \cdot \exp\left[\frac{[n - (a_2)]^2}{a_3}\right]$$

$$dF3\_da3(a) := dF3\_da3\_1(a) - dF3\_da3\_2(a)$$

$$D_1(a) := dF1\_da1(a) \cdot dF2\_da2(a) \cdot dF3\_da3(a)$$

$$D_2(a) := -dF1\_da1(a) \cdot dF2\_da3(a) \cdot dF3\_da2(a)$$

$$D_3(a) := dF1\_da2(a) \cdot dF2\_da3(a) \cdot dF3\_da1(a)$$

$$D_4(a) := -dF1_{da2}(a) \cdot dF2_{da1}(a) \cdot dF3_{da3}(a)$$

$$D_5(a) := dF1_{da3}(a) \cdot dF2_{da1}(a) \cdot dF3_{da2}(a)$$

$$D_6(a) := dF1_{da3}(a) \cdot dF2_{da2}(a) \cdot dF3_{da1}(a)$$

$$D_S(a) := \begin{bmatrix} D_1(a) \\ D_2(a) \\ D_3(a) \\ D_4(a) \\ D_5(a) \\ D_6(a) \end{bmatrix} \quad D(a) := \sum_{l=1}^6 D_S(a)_l$$

$$D1_1(a) := -F1(a) \cdot dF2_{da2}(a) \cdot dF3_{da3}(a)$$

$$D1_2(a) := F1(a) \cdot dF2_{da3}(a) \cdot dF3_{da3}(a)$$

$$D1_3(a) := -F3(a) \cdot dF1_{da2}(a) \cdot dF2_{da3}(a)$$

$$D1_4(a) := F2(a) \cdot dF1_{da2}(a) \cdot dF3_{da3}(a)$$

$$D1_5(a) := -F2(a) \cdot dF1_{da3}(a) \cdot dF3_{da2}(a)$$

$$D1_6(a) := F3(a) \cdot dF1_{da3}(a) \cdot dF2_{da2}(a)$$

$$D1_S(a) := \begin{bmatrix} D1_1(a) \\ D1_2(a) \\ D1_3(a) \\ D1_4(a) \\ D1_5(a) \\ D1_6(a) \end{bmatrix} \quad D1(a) := \sum_{l=1}^6 D1_S(a)_l$$

$$D2_1(a) := -F2(a) \cdot dF1_{da1}(a) \cdot dF3_{da3}(a)$$

$$D2_2(a) := F3(a) \cdot dF1_{da1}(a) \cdot dF2_{da3}(a)$$

$$D2_3(a) := -F1(a) \cdot dF2_{da3}(a) \cdot dF3_{da1}(a)$$

$$D2_4(a) := F1(a) \cdot dF2_{da1}(a) \cdot dF3_{da3}(a)$$

$$D2_5(a) := -F3(a) \cdot dF1_{da3}(a) \cdot dF2_{da1}(a)$$

$$D2_6(a) := F2(a) \cdot dF1_{da3}(a) \cdot dF3_{da1}(a)$$

$$D2_S(a) := \begin{bmatrix} D2_1(a) \\ D2_2(a) \\ D2_3(a) \\ D2_4(a) \\ D2_5(a) \\ D2_6(a) \end{bmatrix} \quad D2(a) := \sum_{l=1}^6 D2_S(a)_l$$

$$D3_1(a) := -F3(a) \cdot dF1\_da1(a) \cdot dF2\_da2(a)$$

$$D3_2(a) := F2(a) \cdot dF1\_da1(a) \cdot dF3\_da2(a)$$

$$D3_3(a) := -F2(a) \cdot dF1\_da2(a) \cdot dF3\_da1(a)$$

$$D3_4(a) := F3(a) \cdot dF1\_da2(a) \cdot dF2\_da1(a)$$

$$D3_5(a) := -F1(a) \cdot dF2\_da1(a) \cdot dF3\_da2(a)$$

$$D3_6(a) := F1(a) \cdot dF2\_da2(a) \cdot dF3\_da1(a)$$

$$D3_S(a) := \begin{bmatrix} D3_1(a) \\ D3_2(a) \\ D3_3(a) \\ D3_4(a) \\ D3_5(a) \\ D3_6(a) \end{bmatrix} \quad D3(a) := \sum_{l=1}^6 D3_S(a)_l$$

$$EPS_1(a) := \frac{D1(a)}{D(a)} \quad EPS_2(a) := \frac{D2(a)}{D(a)} \quad EPS_3(a) := \frac{D3(a)}{D(a)}$$

$$ERR_1 := 3 \cdot 10^{-2} \quad ERR_2 := 5 \cdot 10^{-4} \quad \text{deltaL} := 1 \cdot 10^{-1}$$

- это чтобы задавать допустимую погрешность третьего параметра в единицах L, для удобства.

$$ERR_3 := \sqrt{2 \cdot |q_{3,1}|} \cdot \text{deltaL} \quad ERR_3 = 0.552800867283138$$

$$J_{\max} := 15 \quad q_{3, J_{\max}} := 0 \quad j := 1.. J_{\max}$$

$$V001(a) := a_1 + EPS_1 \left[ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{array} \right] \qquad V002(a) := a_2 + EPS_2 \left[ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{array} \right]$$

$$V003(a) := a_3 + EPS_3 \left[ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{array} \right] \qquad V00(a) := \left[ \begin{array}{c} V001(a) \\ V002(a) \\ V003(a) \end{array} \right]$$

$$COND1(a) := \text{if} \left( \left| EPS_1(a) \right| > ERR_{1,1,0} \right)$$

$$COND2(a) := \text{if} \left( \left| EPS_2(a) \right| > ERR_{2,1,0} \right)$$

$$COND3(a) := \text{if} \left( \left| EPS_3(a) \right| > ERR_{3,1,0} \right)$$

$$COND(a) := \Phi((COND1(a) + COND2(a)) + COND3(a) - 0.5) - 0.5$$

$\Phi(x)$  – функция Хэвисайда, значение ее равно единице при  $x > 0$  и нулю при  $x \leq 0$ . Вычитание 0,5 а аргументе в нашем случае необязательно. Это нужно, если значения аргументов функции имеют вещественный тип числа – для надежности правильного действия функции.  $COND(a)$  – это логическая функция «ИЛИ», которой нет в Mathcad’е.

Логические условия определяют, что для остановки цикла итераций требуемая точность должна быть достигнута по всем трем параметрам.

$$\left[ \begin{array}{c} q_{1,j+1} \\ q_{2,j+1} \\ q_{3,j+1} \end{array} \right] := \text{until} \left[ \text{COND} \left[ \left[ \begin{array}{c} q_{1,j} \\ q_{2,j} \\ q_{3,j} \end{array} \right] \right], V00 \left[ \left[ \begin{array}{c} q_{1,j} \\ q_{2,j} \\ q_{3,j} \end{array} \right] \right] \right]$$

#####

Определение количества итераций  $J_{max2} - 1$ , сделанных программой

$$count_1 := 1$$

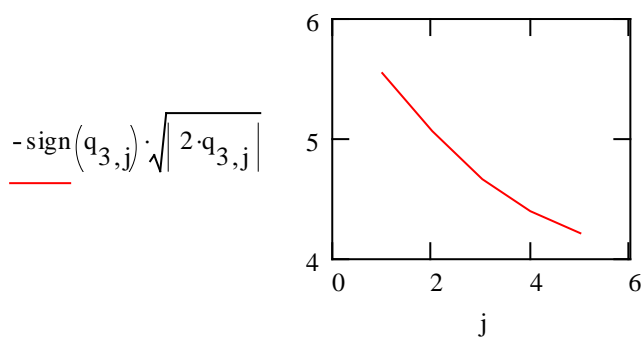
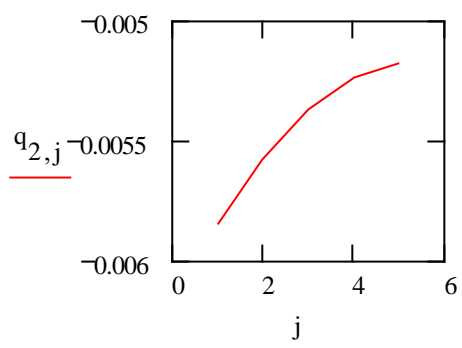
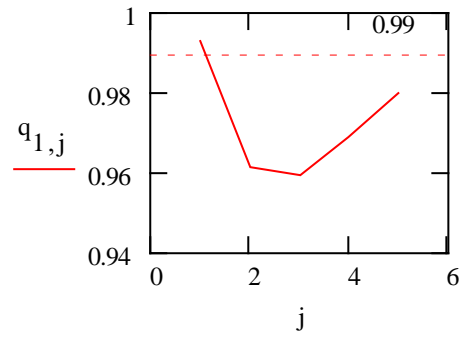
$$count_{j+1} := \text{until} \left( \left| q_{2,j} \right| - 1 \cdot 10^{-8}, count_j + 1 \right)$$

$$J_{max2} := \max(count) - 1 \qquad J_{max2} = 5$$

#####

$$j := 1.. J_{max2}$$

count =  $\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix}$







$x=-0.005762041563924$ ;  $\text{delta}=-0.005762041563924$ ;  
 $\text{delta}1=0.007762513035773$ ;  $\text{delta}2=0.000657878240668$ ;  
 $\text{delta}3=0.095227900657006$ ;  $J_{\max}2-1=5$ ;  $N=9$ ;

(рез-ты прогона программы с отключенным оператором randomise, при запуске приложения Mathcad и сразу после этого после первого запуске этой программы они должны повторяться)

$X0=-0.005974011251468$ ;  $\text{delta}0=0.011170208193789$ ;  
 $x=-0.005182679554685$ ;  $\text{delta}=-0.005182679554685$ ;  
 $\text{delta}1=0.01078355280853$ ;  $\text{delta}2=0.000056407963508$ ;  
 $\text{delta}3=0.172663541691769$ ;  $J_{\max}2-1=4$ ;  $N=9$ .

Из-за рандомизации перед вычислением в программе значения выходных данных будут отличаться. Однако статистическая величина  $\text{delta}0$  не должна значительно отличаться.

Время счета на компьютере Pentium MMX с тактовой частотой 200 МГц, оперативной памятью 40 Мб, операционной системой Windows 98 SE и программой Mathcad 8 SE составило 40 сек.

<----->

Программа составлена на Mathcad 8 SE, обновление №1, русская редакция.

Составил доц. Самарского государственного аэрокосмического ун-та  
О. А. Заякин, г. Самара, Самарский филиала Физического ин-та РАН,  
22 ноября 2009 г.

Пилотную версию пр-мы разраб. О. А. Заякин в СФ ФИАН в 1996 г.



**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**Примеры отчетов по лабораторным работам**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Факультет информатики

Кафедра информационных систем и технологий

Отчет по лабораторной работе №1  
по курсу  
«Автоматизация оптических измерений»

«Функциональные возможности двумерного лазерного триангулятора и его погрешности»

Выполнил: студент группы \_\_\_\_\_

Проверил: \_\_\_\_\_

(звание, должность, Ф. И. О.)

САМАРА 2013

**Цель работы:** ознакомление с функциями двумерного лазерного триангулятора, приобретение навыков работы с ним.

Задание 1 – Определение статистических параметров отклонений от круглости в единичном измерений

Измеряемые параметры: некруглость ( $N$  с 2 по 500 включительно), волнистость, ( $N$  с 16 по 500 включительно), гранность ( $N$  с 3 по 15 включительно), где  $N$  – номер пространственной гармоники радиального профиля при его разложении в ряд Фурье.. На рисунке 1 приведена схема контроля, на рисунке 2 – параметры отклонений от круглости, на рисунке 3 – Общий вид оптико-механического блока лазерного триангулятора.

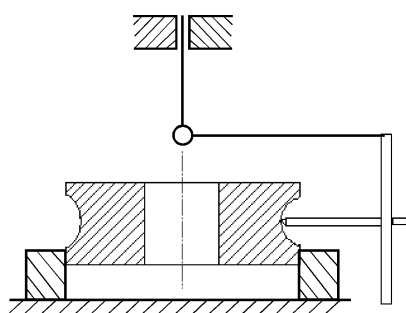
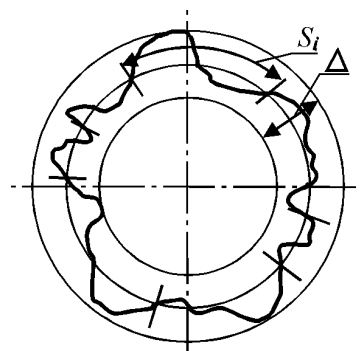


Рисунок 1 – Контроль отклонений от круглости



$S_i$  - длина волны;  $\Delta$  - некруглость; круглограмма показана с очень большим радиальным увеличением

Рисунок 2 – Параметры отклонений от круглости



Рисунок 3 – Общий вид оптико-механического блока

Для достижения требуемой дискретности использованы подвижки с редукторами. Линейная подвижка обеспечила шаг 2,5 мкм. Дискретность поворота каретки с фотоприемником 0,07°, датчика угла поворота – 0,038°. Редуктор на подвижке разворота контролируемой детали имеет передаточное отношение 1/15,62. Для обеспечения дискретности 2000 шагов на оборот в программе сбора данных использованы равномерно расположенные пропуски шага.

На рисунке 4 приведена типична груглограмма от кольца с дефектом волнистости с амплитудой  $W=0,7$  мкм и количеством волн радиального профиля 19.

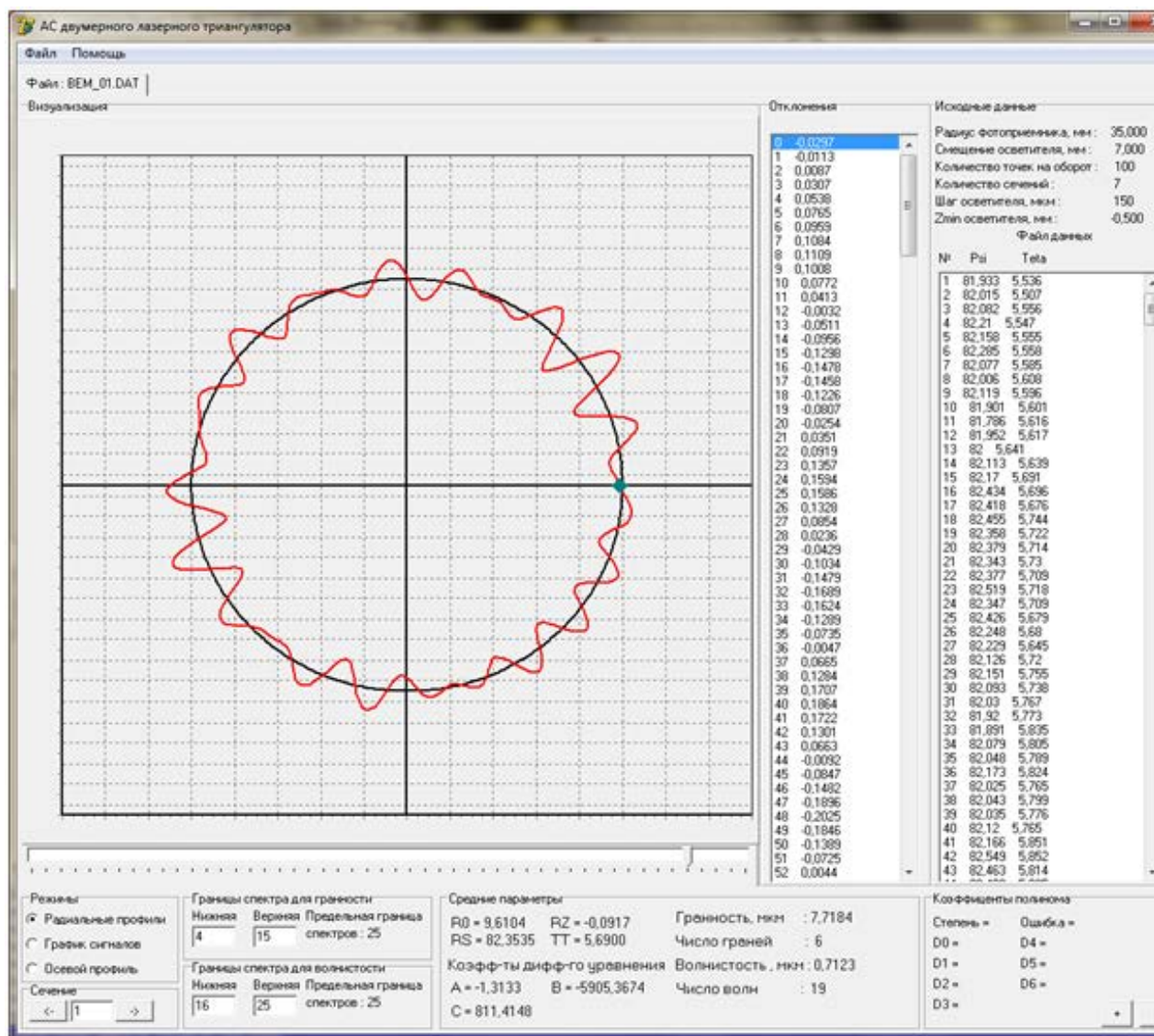
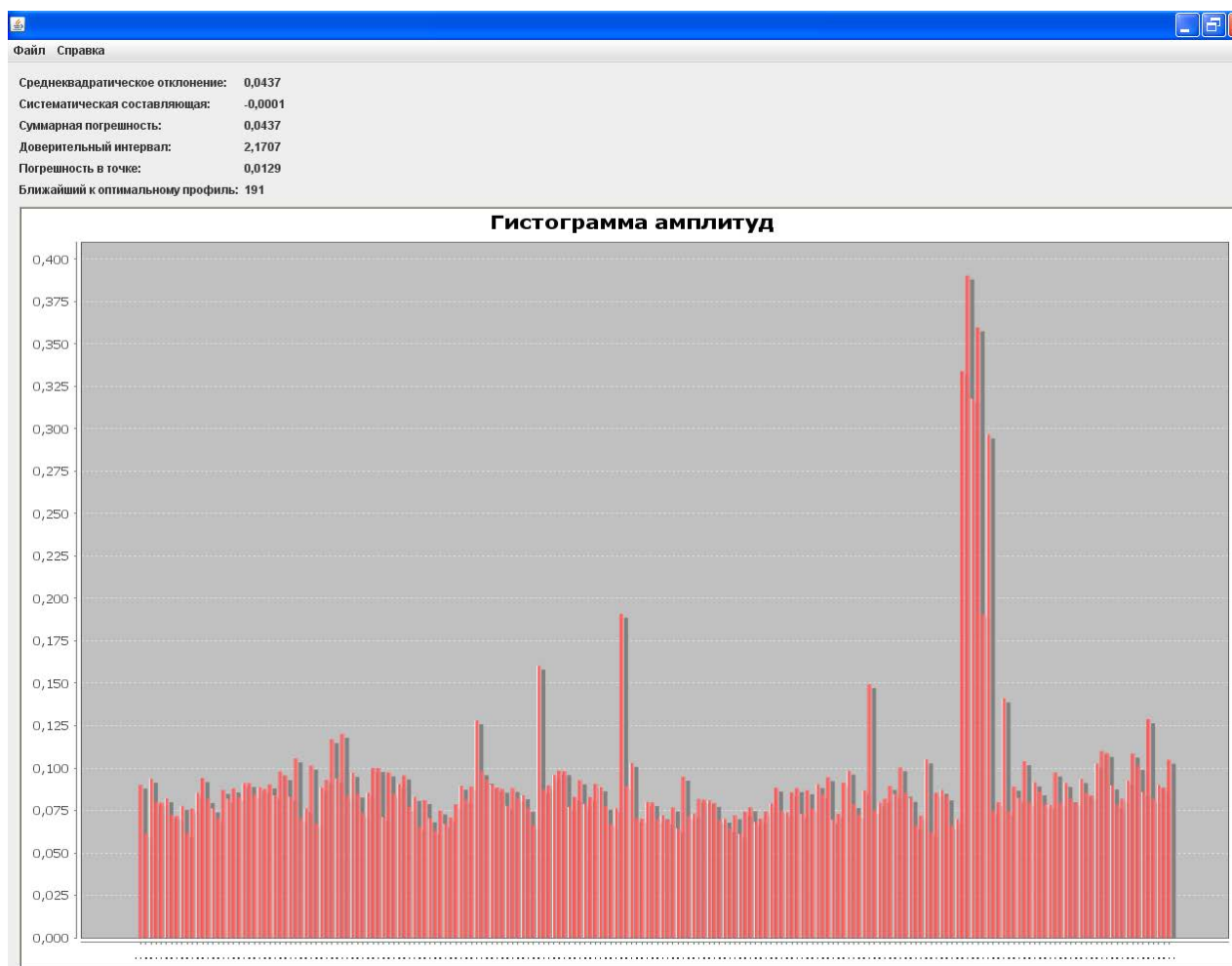


Рисунок 4 – Экранная форма программы обработки данных, основное окно программы

Задание 2 – Определение статистических параметров отклонений от круглости в серии измерений

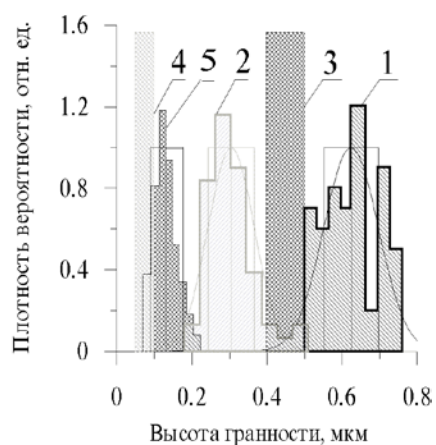
На рисунке 5 приведены результаты статистической обработки серии однотипных измерений. Измерения проведены с остановленного кольца, с целью оценки нижнего предела погрешности, без учета кинематики вращения контролируемой детали. Объем статистической выборки 300 измерений. Среднее интегральное значение гранности  $\Delta=0,075$  мкм. Это больше, чем пределы радиальной погрешности контактного кругломера 1 класса (0,05 мкм), но больше, чем эта же величина для кругломера 2-го класса (0,12 мкм).



амплитуда указана в мкм; по горизонтальной оси – порядковый номер в серии измерений

Рисунок 5 – Экранная форма программы статистического анализа результатов измерений

На рисунке 6 приведены гистограммы амплитуды гранности, измеренной в серии однотипных измерений. Результаты были аналогичными единичному измерению. Относительная погрешность статистической оценки С. К. О. составила 20%.



Результаты измерений лазерным триангулятором: 1 – кольцо с дефектом «гранность»; 2 – кольцо без дефекта «гранность»; 5 – измерений с остановленным кольцом; 3, 4 – результаты измерений контактным кругломером.

Рисунок 6 – Гистограммы амплитуд гранности в серии однотипных измерений

Выводы:

- изучены основные функции прибора;
- проведена статистическая оценка погрешности измерений прибора;
- результаты сравнимы с погрешностью эталонного контактного кругломера.

## Пример отчета по лабораторной работе № 2

### «Влияние дискретности сканирования на погрешность измерений АС»

**Цель работы:** изучение влияние дискретности сканирования на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора.

Задание – Определение статистических параметров отклонений от круглости в двух сериях измерений, отличающихся количеством шагов поворота контролируемой детали и сравнение их друг с другом

Измеряемые параметры: некруглость ( $N$  с 2 по 500 включительно), волнистость, ( $N$  с 16 по 500 включительно), гранность ( $N$  с 3 по 15 включительно), где  $N$  – номер пространственной гармоники радиального профиля при его разложении в ряд Фурье.. На рисунке 1 приведена схема контроля, на рисунке 2 – параметры отклонений от круглости, на рисунке 3 – Общий вид оптико-механического блока лазерного триангулятора.

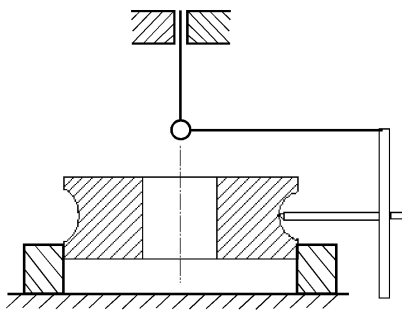
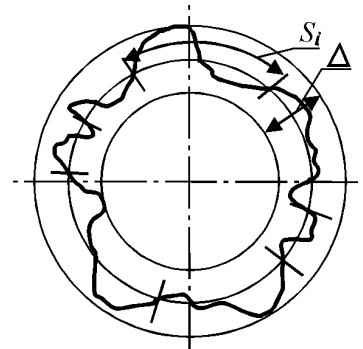


Рисунок 1 – Контроль отклонений от круглости



$S_i$  – длина волны;  $\Delta$  – некруглость; круглограмма показана с очень большим радиальным увеличением

Рисунок 2 – Параметры отклонений от круглости

Для достижения требуемой дискретности использованы подвижки с редукторами. Линейная подвижка обеспечила шаг 2,5 мкм. Дискретность поворота каретки с фотоприемником  $0,07^\circ$ , датчика угла поворота –  $0,038^\circ$ . Редуктор на подвижке разворота контролируемой детали имеет передаточное отношение 1/15,62. Для обеспечения дискретности 2000 шагов на оборот в программе сбора данных использованы равномерно расположенные пропуски шага.

Каждая из двух серий однотипных измерений имеет объем статистической выборки 300. В одной выборке кол-во шагов было 600 на оборот детали, в другой – 2000.

Результаты измерений гранности с остановленной контролируемой деталью показали, что в первой выборке  $\Delta = 0,075$  мкм, в другой выборке  $\Delta = 0,04$  мкм. При этом относительная погрешность оценки не превышала 20%. Аналогичные результаты были получены для волнистости и для некруглости. Таким образом, при уменьшении шага поворота контролируемой детали в 3,3 раза погрешность уменьшилась в 1,9 раза. При этом  $1,9 * 1,9 = 3,6$ . То есть, зависимость нелинейная, и в первом приближении близка к квадратичной. Это соответствует теоретическим положениям теории вероятности и



Рисунок 3 – Общий вид опико-механического блока

математической статистики.

Выводы:

- изучено влияние дискретности сканирования на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора;
- результаты показали, что погрешность с уменьшением шага дискретности уменьшается, при этом зависимость близка к таковой, полученной по теории вероятности.



### Пример отчета по лабораторной работе № 3

#### «Динамические характеристики АС»

**Цель работы:** изучение влияние скорости сканирования контролируемой детали на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора.

Задание – Определение статистических параметров отклонений от круглости в двух сериях измерений, отличающихся скоростью поворота контролируемой детали и сравнение их друг с другом

Измеряемые параметры: некруглость ( $N$  с 2 по 500 включительно), волнистость, ( $N$  с 16 по 500 включительно), гранность ( $N$  с 3 по 15 включительно), где  $N$  – номер пространственной гармоники радиального профиля при его разложении в ряд Фурье.. На рисунке 1 приведена схема контроля, на рисунке 2 – параметры отклонений от круглости, на рисунке 3 – Общий вид оптико-механического блока лазерного триангулятора.

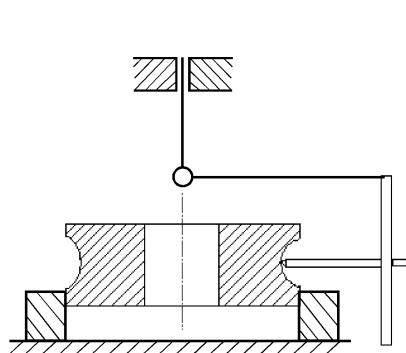
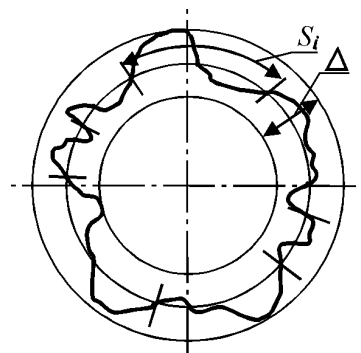


Рисунок 1 – Контроль отклонений от круглости



$S_i$  - длина волны;  $\Delta$  - некруглость; круглограмма показана с очень большим радиальным увеличением

Рисунок 2 – Параметры отклонений от круглости

Для достижения требуемой дискретности использованы подвижки с редукторами. Линейная подвижка обеспечила шаг 2,5 мкм. Дискретность поворота каретки с фотоприемником  $0,07^\circ$ , датчика угла поворота –  $0,038^\circ$ . Редуктор на подвижке разворота контролируемой детали имеет передаточное отношение 1/15,62. Для обеспечения дискретности 2000 шагов на оборот в программе сбора данных использованы равномерно расположенные пропуски шага.

Для изучения были взяты две серии измерений детали с дефектом «гранность». Одна имела номинальную величину задержки цифрового фотографирования после выдачи команды на поворот контролируемой детали 150 единиц, другая – ноль единиц.

В миллисекундах это пропорционально отношению тактовой частоты 12 МГц и тактовой частоты использованного нами компьютера Pentium MMX (200 МГц). Это отношение составило 0,06. Тогда время задержки в миллисекундах было у нас  $150 \times 0,06 = 90$  мс.

Результаты показали, что для первой серии амплитуда гранности составила



Рисунок 3 – Общий вид опико-механического блока

0,6 мкм, а во второй серии 0,65 мкм. При этом относительная стохастическая составляющая погрешности измерений не превышала 20%. Видно, что она существенно превышает разницу измеренных величин.

Выводы:

- изучено влияние скорости сканирования контролируемой детали на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора;
- получено, что стохастическая составляющая погрешности измерений слабо зависит от темпа измерений, однако прослеживается тенденция к ее увеличению, что выглядит вполне закономерно, поскольку с увеличением скорости вращения контролируемой детали усиливается влияние помех от вибраций опико-механического блока лазерного триангулятора, однако в широком диапазоне названной скорости исследуемый прибор не ухудшает существенно своих точностных характеристик.

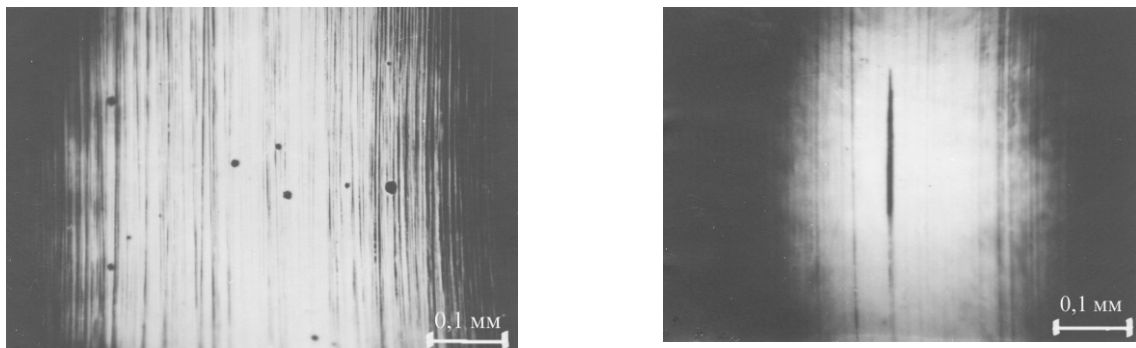
## Пример отчета по лабораторной работе № 4

### «Влияние адаптивной пороговой фильтрации входного сигнала на погрешность измерений АС»

**Цель работы:** изучение влияния уровня адаптивной пороговой фильтрации на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора.

Задание 1- Получить фотографии типичных локальных дефектов контролируемой поверхности, измерить их поперечные размеры; сравнить с поперечной шириной зондирующего пучка лазера в исследуемом триангуляторе.

На рисунке 1 приведены микрофотографии объекта и указан линейный масштаб. Из этих рисунков мы определили типичную поперечную ширину локальных дефектов. Минимальные размеры от 5 мкм. Максимальные размеры до 0,2 мм. Сравним с поперечными размерами зондирующего пучка света в нашем случае – 20 мкм. Очевидно, используемый метод триангуляции с использованием зеркально отраженного света не может быть использован для измерения формы этих локальных дефектов. Более того, они приводят к помехам. Форма поперечного профиля лазерного пучка (см. рисунок 2) искажается. Теряется его симметрия. Это приводит к ложным показаниям локального отклонения контролируемой поверхности.



а)

б)

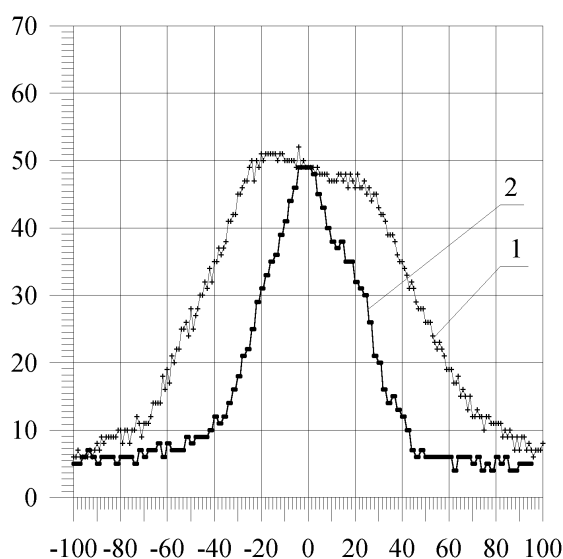
участки поверхности, имеющей типичные локальные микродефекты:

а) точечные, б) в виде короткой риски

Рисунок 1 - Увеличенные изображения участков контролируемой поверхности

Для статистической оценки влияния указанного фактора на погрешность измерений амплитуды отклонений от круглости возьмем две серии измерений. Одна серия снята при уровне пороговой фильтрации 90% от среднего уровня максимума интенсивности в пятне света, определенное по показаниям всех фотографий пучка, сделанных в пределах одного радиального профиля. Другая – по 50%. В обоих случаях была использована контролируемая деталь, не имевшая дефекта «гранность» с амплитудой

0,5 мкм, но имевшая на поверхности локальные дефекты числом более допустимого по их количеству и площади.



профили 1 – в горизонтальной плоскости, 2 – в вертикальной плоскости роведены через точку, где видеосигнал имеет максимальную амплитуду в кадре, что практически соответствует центру данного поперечного сечения пучка

Рисунок 2 - Профили распределения интенсивности пучка света на ПЗС фотоприемнике

Результаты показали следующее. Абсолютная величина стохастической составляющей погрешности первой серии измерений составила 0,15 мкм, а во второй серии – 0,3 мкм. Это говорит о том, что существует предельный уровень пороговой фильтрации оптического сигнала, при котором исследуемый триангулятор становится непригоден для решения задач контроля в данном практическом приложении.

На рисунке 3 показаны результаты обработки данных со второй серии измерений..

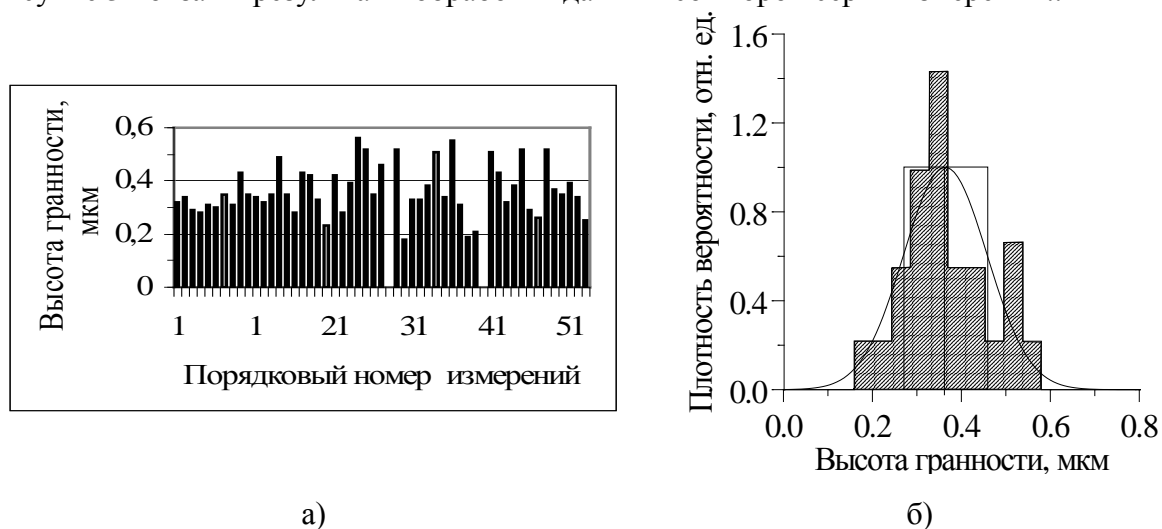


Рисунок 3- Значения высоты гранности, измеренные в во второй серии опытов, и их гистограмма

Выводы:

- изучено влияние уровня адаптивной пороговой фильтрации на погрешность измерений двумерного лазерного триангулятора;
- установлен сильно выраженный пороговый характер зависимости погрешности измерений исследуемого лазерного триангулятора от уровня пороговой фильтрации;
- определен оптимальный уровень пороговой фильтрации, который составил 90% от средней величины максимума распределения мощности лазерного пучка на фотоприемнике, определенной по всем фотографиям пучка, сделанным в пределах одного радиального профиля.
- требования к качеству шероховатость и локальный дефектам для исследуемого триангулятора довольно строги, что может ограничить область его применений; хотя, с другой стороны, контролируемая величина амплитуды отклонений от круглости довольно мала – до 1,5 мкм и, учитывая закономерный убывающий характер зависимости амплитуд пространственных гармоник спектра радиального профиля, прибор может быть пригоден для рассматриваемого применения.

## Пример отчета по лабораторной работе № 5 «Чувствительность двумерного лазерного триангулятора»

**Цель работы:** Изучение на компьютерной модели функции преобразования двумерного лазерного триангулятора.

Задание - С помощью компьютерной модели оценить основные характеристики функции преобразования двумерного лазерного триангулятора: чувствительность и нелинейность. Определить зависимость первой из них от параметров настройки оптической схемы АС.

Компьютерная модель, предлагаемая для использования в данной работе, численно воспроизводит процесс сбора данных, а также получение измерительной информации в двумерном лазерном триангуляторе. Она находится в файле `indif2.exe` в папке `lr2_1`.

На рисунке 1 приведена оптико-механическая схема координатных измерений с расшифровкой обозначений, которые используются нами при работе с программой моделирования сбора данных в исследуемом триангуляторе.

Функция преобразования получена, исходя из физического приближения лучевой оптики, в параксиальном приближении и без учета влияния на нее поперечной ширины пучка света [3], [4]. Это алгебраическая связь компоненты Фурье-спектра искомой круглограммы с компонентами Фурье-спектра той же пространственной частоты двух функций –  $\psi$  и  $\xi$ . Отсчеты этих функций производятся в той же полярной системе координат и имеют те же величины, что и получаемая круглограмма.

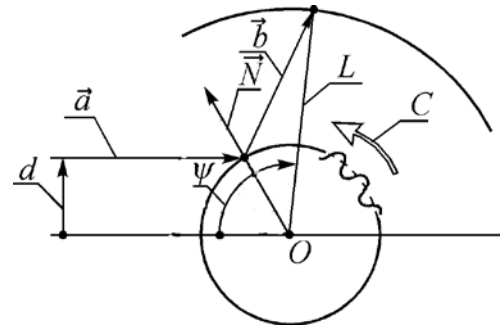
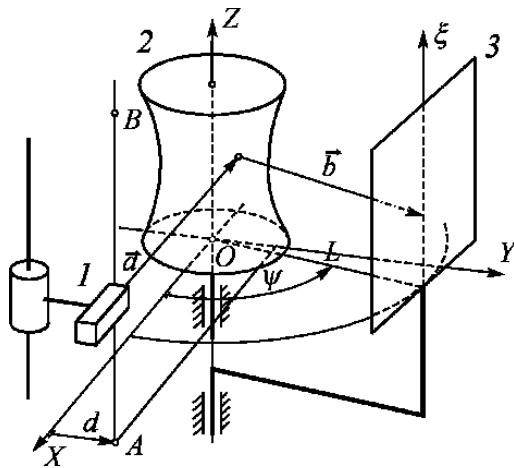
В данной модели описывается только одна из двух зависимостей информативных параметров – это  $\psi(\varphi)$  (см. приложение А). Для этого контролируемая поверхность представлена в модели зависимостью одной координаты, то есть как  $H(\varphi)$ .

Отклонения от круглости в данной компьютерной модели представлены синусоидой.

Значения параметры настройки для расчетов:  $d=7$  мм,  $L=35$  мм. Параметры модельной функции  $H(\varphi)$ , отвечающие этим экспериментам: амплитуда 0,2 мкм (от нуля до максимальной величины), частота 12 волн на профиль. Величину начальной фазы модельной синусоиды равна нулю.

На рисунке 2 приведено семейство расчетных градуировочных характеристик исследуемого лазерного триангулятора – зависимость среднего радиуса радиального профиля от величин параметров настройки оптической схемы. Из расчетов следует, что эти характеристики удобно представить, используя безразмерный параметр  $p$ :

$$p = d/L.$$

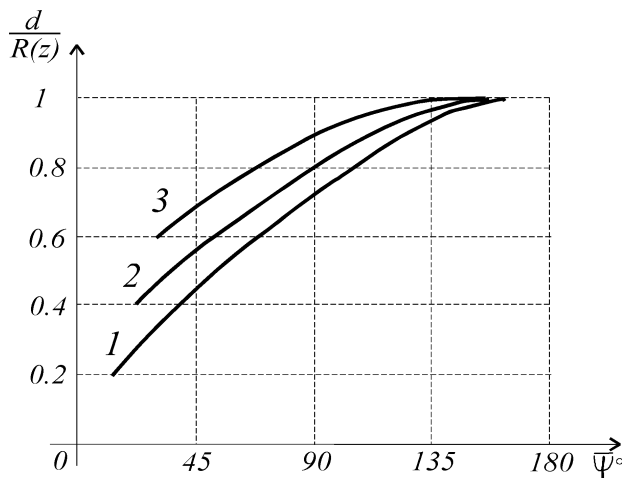


а)

б)

1 - источник излучения; 2 - контролируемая поверхность; 3 - видеокамера;  $AB$ ,  $C$  - направления сканирования;  $\vec{a}$ , - падающий и  $\vec{b}$  - отраженный лучи света;  $\psi$ ,  $\xi$  - координата точки падения отраженного луча на фотоприемнике;  $d$  - смещение источника излучения;  $L$  - радиус поворота каретки с видеокамерой.

Рисунок 1 - Оптико-механическая схема координатных измерений



значение параметра  $p$  равно: 1 - 0,2; 2 - 0,4; 3 - 0,6

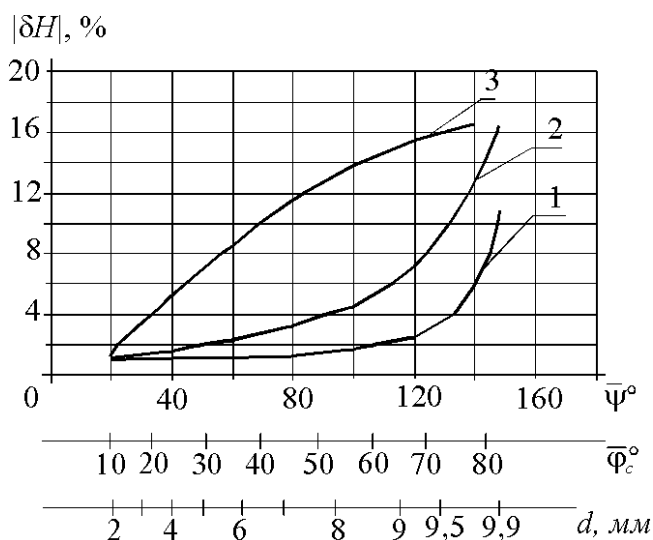
Рисунок 2- Семейство функций преобразования для определения среднего радиуса контролируемой поверхности, рассчитанных для одномерного случая

Среди этой составляющей погрешности можно выделить один преобладающий фактор. Он связан с неравномерностью шагов перемещения освещенной точки от зондирующего луча по неровной контролируемой поверхности в процессе ее сканирования. Максимальная погрешность, которую вносит этот фактор, приведенная к удвоенной амплитуде  $2 \cdot H_{\max n}$  гармонического сигнала:

$$\delta H_n \approx \frac{1}{2} \cdot n \cdot \frac{H_{\max n}}{R_0} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - угол падения лазерного пучка на контролируемую поверхность.

На рисунке 3 приведены расчетные зависимости алгоритмической составляющей приведенной погрешности  $|\delta H|$  восстановления профиля микрорельефа контролируемой поверхности от параметров настройки и конфигурации измерительного преобразователя.

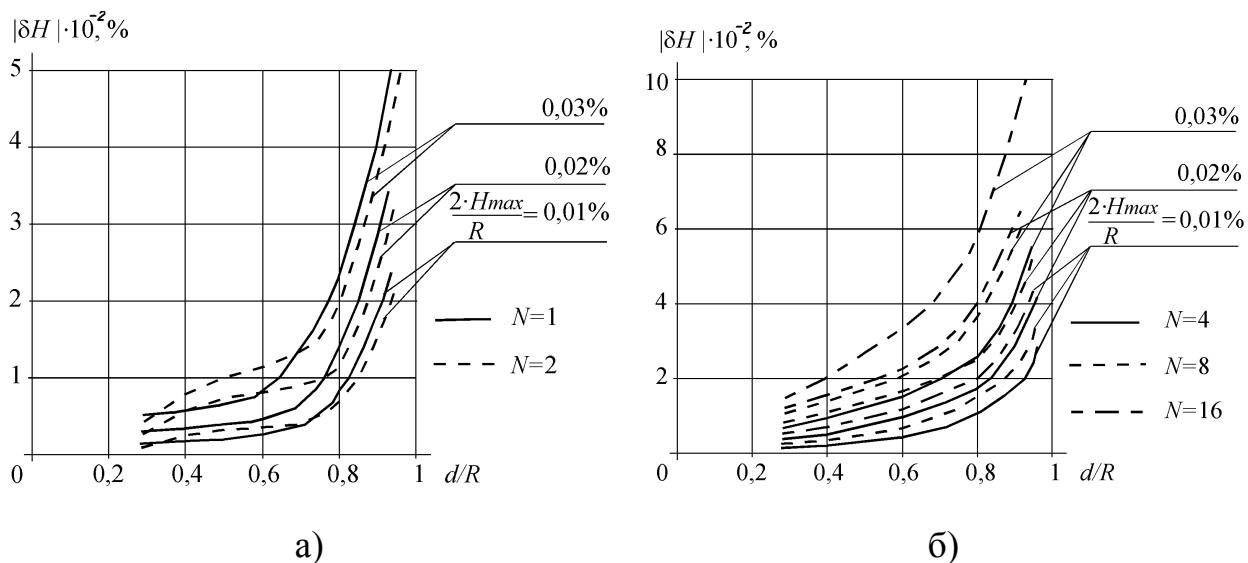


1, 3 - графики, полученные в результате численного моделирования, причем 3 - с учетом погрешности определения среднего радиуса; 2 - по формуле (1); параметры модельной синусоиды:  $2 \cdot H_{\max} / R = 0,01$ ;  $N = 12$ ; средний радиус поверхности  $R = 10$  мм; радиус поворота каретки с фотоприемником  $L = 35$  мм

Рисунок 3 - Расчетные зависимости алгоритмической составляющей приведенной погрешности  $|\delta H|$  восстановления профиля микрорельефа контролируемой поверхности от параметров настройки и конфигурации измерительного преобразователя

На рисунке 4 приведены результаты Графики алгоритмической составляющей приведенной погрешности  $|\delta H|$  восстановления микрорельефа поверхности, полученные в результате численного моделирования.





$N$  - число периодов синусоиды на один оборот поверхности,  $H_{\max}$  - ее амплитуда; средний радиус поверхности  $R=10$  мм; радиус поворота каретки с фотоприемником  $L=35$  мм

Рисунок 4 - Графики алгоритмической составляющей приведенной погрешности  $|\delta H|$  восстановления микрорельефа поверхности, полученные в результате численного моделирования

Итак, при типичной амплитуде гранности 1 мкм, что соответствует  $2 H_{\max} / R = 0,01\%$ , имеем  $|\delta H| = 0,02\%$ . При этом абсолютная погрешность  $\Delta H = 2 H_{\max} \delta H = 4 \times 10^{-4}$  мкм. С другой стороны, предел радиальной погрешности кругломера 1 класса составляет 0,05 мкм, что на два порядка больше рассчитанной нами величины алгоритмической составляющей погрешности метода. Поэтому ей можно пренебречь.

Выводы:

- алгоритмическая составляющая погрешности измерений отклонений от круглости, возникающая от погрешности нелинейности функции преобразования, мала по сравнению с требованиями контроля в задаче контроля некруглости рабочих поверхностей деталей подшипников, и ей можно пренебречь;

- в указанной составляющей погрешности можно выделить один преобладающий фактор. Он связан с неравномерностью шагов перемещения освещенной точки от зондирующего луча по неровной контролируемой поверхности в процессе ее сканирования.

Учебное издание

*Заякин Олег Александрович*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Учебное пособие*

Редактор  
Доверстка

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. .

Тираж экз. Заказ . Арт. С - /2011

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.