

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

УДК 53.082.53+681.2

На правах рукописи



ДВОЙНИШНИКОВ
Сергей Владимирович

**МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ТРИАНГУЛЯЦИЯ ГЕОМЕТРИИ
ДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В ФАЗОВО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, профессор,
Меледин Владимир Генриевич

Новосибирск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Введение | 5 |
| Глава 1. Развитие методов многопараметрической триангуляции для измерений в фазово-неоднородных средах | 25 |
| 1.1. Распространение оптических сигналов триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах..... | 25 |
| 1.2. Триангуляционные измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах..... | 37 |
| 1.3. Триангуляционный метод с использованием структурированного освещения для измерения трехмерной геометрии в фазово-неоднородных средах..... | 52 |
| 1.4. Методы расшифровки структурированных изображений для измерения трехмерной геометрии статичных крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах..... | 59 |
| 1.5. Метод компенсации нелинейности тракта источник – приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения | 72 |
| 1.6. Сравнение методов расшифровки структурированных изображений в условиях нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения | 84 |
| 1.7. Методы расширения динамического диапазона при триангуляционных измерениях с использованием структурированного освещения..... | 98 |
| 1.8. Оценка погрешности метода измерения 3D геометрии на основе пространственно-временного модулирования источника оптического излучения | 103 |
| 1.9. Метод оценки оптимальной частоты пространственной модуляции | 109 |
| 1.10. Триангуляционные измерения геометрических параметров динамичных объектов в условиях фазово-неоднородных сред..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| 1.11.Триангуляционные измерения толщины динамичных объектов в условиях фазово-неоднородных сред..... | 123 |
| Выводы по главе 1..... | 141 |
| Глава 2. Методы многопараметрической калибровки триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах | 142 |
| 2.1. Анализ известных методов калибровки оптоэлектронных систем измерения 3D геометрии | 142 |
| 2.2. Калибровка триангуляционного измерителя с использованием калибровочных объектов | 149 |
| 2.3. Самообучающиеся алгоритмы калибровки оптоэлектронных систем измерения 3D геометрии | 155 |
| 2.4. Реализация калибровки оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов | 170 |
| 2.5. Метод калибровки измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции | 182 |
| 2.6. Экспериментальные результаты калибровки метода синхронной дифференциальной облачной триангуляции | 187 |
| Выводы по главе 2..... | 203 |
| Глава 3. Практическая реализация методов многопараметрической триангуляции геометрии объектов в фазово-неоднородной среде | 204 |
| 3.1. Практическая реализация измерителя трехмерной геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхности | 204 |
| 3.1.1. Программное обеспечение оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения | 205 |
| 3.1.2. Обработка структурированных изображений с использованием параллельного программирования | 218 |
| 3.2. Практическая реализация методов измерения толщины на основе точечной синхронной дифференциальной триангуляции | 224 |
| 3.3. Практическая реализация метода облачной триангуляции | 243 |

| | |
|---|-----|
| 3.4. Практическая реализация метода синхронной дифференциальной облачной триангуляции | 262 |
| 3.5. Программное обеспечение измерительного комплекса | 282 |
| 3.6. Термостатирование оптического измерительного модуля | 290 |
| 3.7. Управление фазово-неоднородной средой при измерении толщины горячего проката | 305 |
| 3.8. Преобразование сигналов в методе дифференциальной облачной триангуляции при измерении толщины горячего проката..... | 308 |
| Выводы по главе 3 | 316 |
| Глава 4. Лабораторные и промышленные испытания методов многопараметрической триангуляции геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах | 317 |
| 4.1. Лабораторные испытания оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов | 318 |
| 4.2. Полевые испытания оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов | 321 |
| 4.3. Промышленные испытания оптоэлектронной измерительной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов | 326 |
| 4.4. Промышленные испытания измерителя толщины горячего проката..... | 336 |
| Выводы по главе 4 | 356 |
| Заключение | 357 |
| Список использованных источников | 360 |
| Приложение. Справки об использовании результатов работы и протокол промышленных испытаний..... | 391 |

ВВЕДЕНИЕ

Развитие бесконтактных методов измерений геометрии статичных и динамично движущихся объектов в науке и в промышленных инновационных технологиях связано с возможностями оптики, электроники и современных систем обработки информации [1-13]. Среди оптико-электронных методов измерения геометрических параметров наиболее развиты интерференционный [14-17], времяпролетный [18-20] и триангуляционный [21-23] методы. Методы многопараметрической триангуляции в этом плане особенно перспективны, но требуют комплексного подхода. Широкий спектр научно-технических проблем возникающих в оптике, источниках излучения, фоторегистрации и обработке сигналов определяет многообразие способов их преодоления, отличающихся по функциональным возможностям и техническим решениям [24-32].

С появлением лазеров в 60-х годах методы оптической триангуляции получили существенное развитие. Сфера практического применения лазерных триангуляционных измерительных систем непрерывно расширялась от научных и специальных до промышленно-технологических и социальных. Число контролируемых параметров триангуляции непрерывно росло, а метрологические и технико-экономические характеристики измерителей при этом существенно улучшались.

К моменту начала работ над диссертацией отечественными и зарубежными специалистами были заложены основы многопараметрической триангуляции. Были созданы методы и оптико-электронные триангуляционные измерительные комплексы для измерения 1, 2 и 3-мерной геометрии, обладающие погрешностью на уровне 10^{-3} , и адаптированные под специальные классы задач. Тем не менее, научная проблема триангуляционных измерений геометрических параметров динамичных объектов в фазово-неоднородных средах к моменту начала работы в полной мере не была решена. Фазовые неоднородности вызывают флуктуации

параметров воздушной среды вдоль оптических трасс [33-36]. Пространственно-временные градиенты коэффициента преломления фазово-неоднородной среды динамично искажают структуры оптических полей в измерительных триангуляционных схемах и существенно увеличивают погрешность измерений. Решение обозначенной проблемы важно для науки и особенно актуально для многих промышленных технологий, остро нуждающихся в современном научном, приборном и программно-аппаратном метрологическом обеспечении.

Научно-техническая проблема бесконтактных динамических измерений геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред на момент начала работ оставалась нерешенной. Связано это с тем, что существующие методы и оптико-электронные измерители не в полной мере учитывали искажения оптических сигналов фазово-неоднородной средой и требовали адаптации под свойства измеряемых объектов. Кроме того, они были ориентированы на специалистов самой высокой квалификации, от которых требовалось умение не только профессионально обеспечивать необходимые режимы измерений, но и выявлять физический смысл полученных результатов.

К моменту начала работы над диссертацией научная проблема бесконтактных динамических измерений геометрии объектов в нестационарных термоградиентных фазово-неоднородных средах, характерных для современных промышленных технологий, и, особенно, для горячей металлургии [7,37-38], также не была решена. Существующие триангуляционные измерительные комплексы не обеспечивали требуемого класса точности из-за роста погрешности измерений в условиях нестационарной термоградиентной фазово-неоднородной среды, характерной для горячих технологических процессов.

Решение обозначенных актуальных научных и технических проблем в диссертационной работе связано с методами многопараметрической

триангуляции, развивающими известные триангуляционные методы, и основанными на многопараметрическом контроле и дополнительной пространственно-временной модуляции источника оптического излучения в сочетании с многомерным регрессионным анализом данных. . Разработка научных и технических решений, обеспечивающих принципиальное улучшение точности методов измерений и существенное расширение функциональных возможностей создаваемой новой техники, является предметом диссертационного исследования.

На момент начала работ распространению электромагнитных волн в фазово-неоднородных средах было посвящено множество исследований. Анализ распространения оптического излучения в фазово-неоднородных средах занимает важное место во многих отраслях науки: в медицине, материаловедении, астрономии [39-43]. Процессы распространения и рассеяния оптического излучения и особенности случайно неоднородных сред активно изучались, результаты исследований опубликованы в многочисленных научных статьях и ряде монографий [44-50]. При различных параметрах анизотропии исследуемой среды применялись различные численные методы [51-55]. Эти работы нацелены, главным образом, на исследования распространения электромагнитных волн на больших масштабах, от нескольких сотен метров до сотен километров. Большое количество работ посвящено исследованиям рефракционных искажений распространения лазерного излучения в турбулентной атмосфере [56-58]. Упомянутые работы затрагивают близкую область знаний. Однако непосредственное использование результатов этих исследований для анализа распространения оптического излучения вблизи горячих динамических объектов затруднено. Это связано со специфическими фазовыми и структурными параметрами турбулентных вихрей в воздухе вблизи движущихся нагретых поверхностей, характерными для горячих промышленных технологий.

Проведение статистического анализа распространения оптических сигналов триангуляционных измерителей в фазово-неоднородной среде [59] входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

В диссертационной работе уделено внимание анализу существующих оптико-электронных методов измерения трехмерной геометрии: интерференционным [60-63], времяпролетным [64], фазовым [65-68] и триангуляционным [69-81] методам. Отмечена перспективность разработки и развития триангуляционного метода структурированного освещения [82-92] с использованием паттерна структурированного освещения в виде параллельных полос с гармоническим изменением интенсивности [93-106]. Разработка этого достаточно перспективного метода для измерений трехмерной геометрии статичных крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородной среды представлена в соответствующих разделах диссертационного исследования.

К моменту начала работы над диссертацией существующие методы структурированного освещения сложно было применять для измерения геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхностей в фазово-неоднородных средах. Это обусловлено сложностью расшифровки структурированных изображений при светорассеянии на поверхности с произвольными светорассеивающими свойствами [107-110].

Существующие методы многопараметрической триангуляции, адаптированные для измерения поверхности с произвольными светорассеивающими свойствами, как правило, используют принцип итерационной адаптации параметров модуляции оптического источника [111-113], либо применяют дополнительные методы пространственной фильтрации данных для снижения уровня погрешности измерений [114-119], что может приводить к искажению измеряемых геометрических величин.

Измерительные системы, применяющие данные подходы, имеют достаточно ограниченный спектр научных и практических применений.

Развитие методов многопараметрической триангуляции для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородной среды входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе. Для решения обозначенной научной проблемы в диссертационной работе предлагается концепция нового устойчивого метода расшифровки структурированных изображений [120-123], основанного на фильтрации недостоверных измерений, формировании неэквидистантного набора экспериментальных данных и многопараметрическом регрессионном анализе. Разработка и всесторонний анализ устойчивого метода расшифровки структурированных изображений, способного успешно работать при произвольных светорассеивающих свойствах поверхности измеряемого объекта в условиях фазово-неоднородных сред является предметом диссертационного исследования.

Большинство устройств, используемых для формирования и ввода изображений, имеют энергетическую характеристику, соответствующую степенному закону [124-125]. Поэтому, в методах многопараметрической триангуляции, использующих принципы структурированного освещения, до применения методов расшифровки структурированных изображений необходимо компенсировать нелинейность тракта [126-128].

На момент начала работы над диссертацией было разработано множество методов компенсации нелинейностей, в том числе, основанных на последовательном или параллельном включении компенсирующей нелинейности, введении компенсирующей нелинейной обратной связи [120-135]. Однако существующие методы компенсации либо используют активную обратную связь, либо априорную информацию о внутренних параметрах источника и приемника оптического излучения. Поэтому их

сложно применять для компенсации нелинейности тракта при фазовых измерениях в условиях фазово-неоднородной среды.

Разработка метода компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения, не использующего априорную информацию о характере нелинейности, входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Проблема адаптации параметров пространственной модуляции оптического источника является очень важной, поскольку частота модуляции существенно влияет на итоговую погрешность измерений [136-137]. Из-за aberrаций, ограниченной глубины резкости и искажений фазово-неоднородной среды невозможно получить абсолютно резкое изображение на фотоприемнике [125,139]. Поэтому пространственный период регистрируемого сигнала должен превышать характерный размер, обусловленный функцией размытия точки оптической системы измерителя. На момент работы над диссертацией, для оценки функции размытия точки фотоприемника было разработано множество методов, основанных на априорных данных о внутренних параметрах фотоприемника, а также на использовании экспериментальных данных при наблюдении изображения с известной пространственной модуляцией интенсивности [140-149]. Непосредственное использование этих методов для задачи оценки функции размытия точки оптической системы с учетом свойств источника и приемника затруднено..

Разработка методов оценки оптимальной частоты пространственной модуляции для минимизации погрешности измерения трехмерной геометрии многопараметрическими методами входит в круг задач, решаемых в диссертационном исследовании.

На момент начала работы над диссертацией, задаче триангуляционных измерений динамических объектов в фазово-неоднородной среде было посвящено множество работ [150-154]. Тем не менее, существующие

триангуляционные измерители динамических объектов, работающие в условиях фазово-неоднородной среды, проектировали таким образом, чтобы снизить или совсем исключить степень искажений, вносимых фазово-неоднородной средой [155-160]. Однако подобные подходы неприменимы в ряде научно-технических приложений, особенно актуальных и значимых для развития современных бесконтактных промышленных технологий.

Развитие методов многопараметрической триангуляции для измерения геометрических параметров динамических объектов в фазово-неоднородной среде также входит в ряд задач, решаемых в диссертационной работе.

Другой, не менее актуальный класс научно-технических проблем связан с измерением толщин объектов и изделий в фазово-неоднородных средах при высоких требованиях к предельному уровню погрешности измерений и возможностям практической реализации, предусматривающим работу методов и приборов в самых тяжелых условиях окружающей среды. Для решения данной проблемы активно применяют рентгеновские методы измерения толщины [161-165], с которыми связано множество радиационных проблем. К моменту начала работы методы дифференциальной лазерной точечной триангуляции активно развивались [166-172]. Тем не менее, из-за неизбежных искажений оптических сигналов в фазово-неоднородной среде, методы дифференциальной триангуляции применялись для решения узкого класса задач, где влияние фазово-неоднородной среды на погрешность измерений было минимальным.

Разработка новых методов измерения толщины движущихся объектов в условиях фазово-неоднородных сред входит в круг проблем, решаемых в диссертационной работе.

Калибровка триангуляционного измерителя в условиях фазово-неоднородной среды в значительной степени определяет достигаемую точность. Для точного измерения геометрических параметров необходимо знать оптические параметры приемника и источника оптического излучения

в глобальной системе координат [82,150,173-175]. Задача пространственной калибровки методов структурированного освещения сводится к нахождению функционала, определяющего взаимно-однозначное соответствие между пространственными координатами точки на поверхности объекта, декартовой системой координат в области измерения и показаниями измерительной системы.

На момент начала работ над диссертацией для калибровки триангуляционных измерительных систем было разработано множество методов калибровки, нацеленных на уменьшение времени ее выполнения [176-178]. В частности, большое внимание уделялось независимой калибровке приемника оптического излучения [179-185], а так же оптимизации калибровочных процедур [186-194]. Тем не менее, известные методы затруднительно адаптировать для калибровки измерителя трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородной среды. Это связано либо со сложностью реализации крупногабаритных эталонных объектов с необходимым малым уровнем погрешности, либо с неизбежным увеличением погрешности измерений при масштабировании.

Разработка новых способов калибровок, ориентированных на многопараметрическую триангуляцию на основе структурированного освещения, и эффективных при измерениях крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред, также входит в круг научных проблем, решаемых в диссертации.

К моменту начала диссертационных исследований задача определения функционала, связывающего показания измерительной системы и пространственные координаты точки на измеряемой поверхности, решалась на основе приближений геометрической оптики, либо на основе использования регрессионных функций и нейронных сетей [195-204]. Сложность применения этих методов для задачи калибровки измерителей

трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред связана с достаточно жесткими ограничениями методов, адаптированных под используемые оптические приборы и под узкий диапазон измеряемых значений [205-209]. Кроме того, большинство рассмотренных методов калибровки были ориентированы на решения задачи интерполяции данных. Однако для решения ряда научных и технических проблем необходимо осуществлять экстраполяционное определение калибровочного функционала.

Разработка метода определения калибровочного функционала на основе многопараметрического регрессионного алгоритма, использующего искусственную нейронную сеть и полиномиальную регрессию, входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Задача калибровки измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции сводится к определению функционала связи между показаниями триангуляторов и толщиной измеряемого объекта. На момент начала работы для калибровки измерителей на основе методов дифференциальной триангуляции выполняли независимые калибровки триангуляционных датчиков, а толщину измеряемого объекта вычисляли исходя из пространственного расположения измерителей [170,210]. При этом типичная погрешность измерения классических триангуляционных измерителей редко бывает ниже уровня 10^{-3} . Калибровки измерителей толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции осложнены техническими требованиями к измерителям и технологическими ограничениями. Необходимо обеспечить погрешность измерений на уровне 20 мкм, при измерительной базе 2 м. Таким образом, необходимо обеспечить погрешность измерений на уровне менее 10^{-5} . Поскольку обеспечить позиционирование эталонного объекта с такой погрешностью затруднительно, требуется метод калибровки, обеспечивающий погрешность измерения меньшей уровня погрешности позиционирования эталонного объекта [211-213].

Разработка комплексного метода калибровки измерительной системы на основе дифференциальной облачной триангуляции, обеспечивающего уровень погрешности измерений меньше погрешности позиционирования калибровочного объекта, входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

На момент начала работ над диссертацией, методы измерения трехмерной геометрии на основе триангуляционного структурированного освещения были достаточно хорошо развиты [94-96,214-215]. Однако, их реализации, как правило, были адаптированы под узкие классы задач. В частности, они плохо работали в условиях произвольных светорассеивающих свойств поверхности измеряемого объекта. Многие из них использовали приближения геометрической оптики, и их было крайне сложно применить для высокоточных измерений крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах.

Решение проблем, связанных с практической реализацией методов многопараметрической триангуляции для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред, входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Неотъемлемой частью оптико-электронного измерительного комплекса является программное обеспечение, обеспечивающее функционирование измерителя. Проектирование [216-218], разработка и реализация программного обеспечения измерительного комплекса [219-230] на основе методов многопараметрической регрессии для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред, входит в круг задач решаемых в диссертационной работе. Отличительной особенностью создаваемого программного обеспечения является практическая реализация предложенных в диссертационной работе методов, обеспечивающих существенное снижение погрешности измерений.

Важнейшей характеристикой программного обеспечения, реализующего обработку многомерных данных при многопараметрических триангуляционных измерениях, является его производительность и скорость обработки данных. На момент начала работ над диссертацией активно развивались технологии повышения скорости обработки данных с помощью параллельных вычислений на основе графических процессоров [231-235]. В частности, активно развивались методы обработки изображений для повышения производительности вычислительных программно-аппаратных комплексов. Известны работы, посвященные обработке фазовых изображений методом фазовых шагов для восстановления трехмерной геометрии с использованием графических вычислительных процессоров. В указанных работах использованы алгоритмы обработки изображений, которые не могут обеспечить требуемый малый уровень погрешности. В рамках диссертационной работы впервые реализованы и экспериментально апробированы быстрые алгоритмы обработки структурированных изображений на основе параллельных вычислений на графических процессорах, обеспечивающие требуемый малый уровень погрешности измерений и быстроедействие.

К моменту начала работы над диссертацией, проблему измерения толщины движущихся объектов методами дифференциальной лазерной триангуляции решали исключительно в условиях пренебрежимо малого уровня фазовых неоднородностей среды в области распространения оптических сигналов [236-237]. Существует ряд научных работ, в которых использованы методы дифференциальной лазерной точечной триангуляции для измерения толщины горячего проката в условиях интенсивной фазово-неоднородной среды [238-239]. Практическая реализация метода синхронной дифференциальной лазерной точечной триангуляции и промышленные испытания для экспериментальной оценки погрешности измерения толщины горячего проката, на основе статистического анализа экспериментальных

результатов [240-241], входит в круг проблем, решаемых в диссертационной работе.

Для измерения толщины горячего проката наиболее перспективно применять впервые предложенные методы многопараметрической синхронной дифференциальной облачной триангуляции. Разработка программного обеспечения, реализующего методы синхронной дифференциальной облачной триангуляции входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе. Решение всего комплекса научных и технических проблем, связанных с практической реализацией оптико-электронного измерительного комплекса для измерения толщины листового горячего проката непосредственно на прокатном стане, входит в круг задач, решаемых в диссертации [242-247].

Процедуры обработки данных облачного триангулятора должны обеспечивать необходимый малый уровень погрешности измерений при достаточном быстродействии. Проблемы адаптации алгоритмов обработки данных облачных триангуляторов для минимизации погрешности измерений при работе в реальном времени, методы обработки данных облачных триангуляторов на основе преобразования Радона [248-249], а также на основе интегрального многопараметрического регрессионного анализа с линейной алгоритмической сложностью, проблемы оптической синхронизации фотоприемников, решение которых позволяет применять наиболее распространенные фотоприемники без внешней аппаратной синхронизации [250- 252] всесторонне рассматриваются и решаются в диссертации.

Для стабильной работы комплекса для измерения толщины горячего проката необходимо обеспечить стабильные метрологические характеристики, устойчивые к перепадам температуры и самым жестким условиям окружающей среды [253-259]. Разработка комплексной подсистемы термостабилизации измерительного комплекса, включающей

пассивную и активную температурную стабилизацию и активную компенсацию флуктуаций температуры опико-электронного модуля и оптических трактов [260-263], входит в круг проблем решаемых в диссертационной работе.

Научная и техническая проблема высокоточных измерений трехмерной геометрии лопастей гидротурбин в процессе их производства является крайне актуальной, поскольку обеспечивает снижение производственных издержек, позволяет увеличить КПД энергоустановки и повысить безопасность всего гидроэнергоагрегата [264-269]. На момент начала работы над диссертацией задачу измерения трехмерной геометрии лопастей гидротурбин решали контактными методами. Кроме того, активно развивались бесконтактные методы на основе трехмерных лазерных сканирующих систем на основе фазовой модуляции оптического источника. Применение этих измерителей в промышленных условиях достаточно ограничено. Связано это с необходимостью обеспечения лабораторных условий процедур измерения в фазово-однородной среде, отсутствия вибраций и перепадов температур, а также с необходимостью предварительного нанесения на поверхности измеряемого объекта матового светорассеивающего покрытия, что вносит фундаментальные ограничения на достижимый малый уровень погрешности измерений.

Выполнение промышленных испытаний впервые созданной оптоэлектронной измерительной системы на основе многопараметрической триангуляции с применением метода структурированного освещения для измерения геометрии лопастей гидротурбин со сложной интенсивно бликующей светорассеивающей структурой поверхности входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе. Важной и актуальной для практики ее частью является анализ и решение научных и технических проблем, связанных с подобными промышленными испытаниями, проводимыми без предварительного нанесения дополнительных светоотражающих покрытий

на измеряемую поверхность объекта в реальных условиях металлообрабатывающих цехов на предприятии тяжелого машиностроения.

Задача высокоточного измерения толщины горячего проката становится все более актуальной в связи с повышающимися требованиями к качеству и возможностью существенного снижения производственных издержек [270-276]. К моменту начала работы над диссертацией для измерения толщины горячего проката преимущественно применялись рентгеновские радиационно опасные толщиномеры. Работа рентгеновских измерителей связана с высокой погрешностью измерений, связанной с отсутствием учета пространственного наклона измеряемого листа и необходимостью корректировки показаний в зависимости от химического состава стали. Решение научно-технической проблемы измерения толщины горячего проката связано с разработкой толщиномера, обладающего абсолютной радиационной безопасностью, инвариантностью результатов измерений к химическому составу измеряемой стали, учитывающего пространственный наклон измеряемого объекта и обеспечивающего требуемый уровень точности.

Промышленные испытания измерителя толщины горячего проката на основе методе синхронной дифференциальной облачной триангуляции, экспериментальное обоснование эффективности и устойчивости предложенных методов в реальных условиях горячих металлургических цехов, входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Целью диссертационной работы является создание, развитие и реализация триангуляционных методов измерений геометрических параметров статичных и динамичных объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах для науки и современных промышленных технологий.

Задачи диссертационной работы:

1) исследование характера распространения и искажения оптических сигналов триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах со значительными температурными градиентами;

2) разработка комплексных методов многопараметрической триангуляции для измерения геометрических параметров статичных и динамичных объектов в фазово-неоднородных средах;

3) создание методов калибровки триангуляционных измерителей статичных и динамичных объектов для обеспечения требуемого малого уровня погрешности при работе в фазово-неоднородных средах;

4) разработка функциональных узлов и программного обеспечения, а также практическая реализация методов многопараметрической триангуляции, предназначенных для измерения геометрических параметров статичных и динамично движущихся объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах.

Научная новизна диссертации:

1) предложены и реализованы новые методы многопараметрической триангуляции с применением пространственной и временной модуляции оптического источника и статистического анализа структуры фазово-неоднородной среды, обеспечившие точные и устойчивые измерения геометрических параметров статичных и динамичных объектов в фазово-неоднородных средах;

2) впервые на основе методов многопараметрической триангуляции в фазово-неоднородных средах выполнены бесконтактные натурные измерения трехмерной геометрии лопастей рабочего колеса лопастно-поворотной турбины;

3) предложена, обоснована и апробирована радиационно-безопасная технология мониторинга толщины горячего металлопроката на основе многопараметрической синхронной дифференциальной облачной

триангуляции, с рекордно малым уровнем погрешности 10^{-6} в лабораторных и 10^{-5} в производственных условиях металлургического горячего цеха.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) метод облачной триангуляции, устойчивый к нестационарным искажениям в фазово-неоднородных средах, на основе модуляции оптического источника и многомерного регрессионного анализа пространственного и временного ансамблей экспериментальных данных;

2) устойчивый метод расшифровки триангуляционных структурированных изображений, основанный на пространственно-временной фильтрации данных, компенсирующем нелинейном преобразовании и многомерной регрессии, минимизирующий погрешность измерений с фотоприемником, динамический диапазон которого ограничен по энергии;

3) методы калибровки триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах, основанные на многопараметрическом регрессионном анализе калибровочных данных, обеспечивающие вклад процедур калибровки в погрешность измерительных комплексов меньше уровня погрешности позиционирования калибровочного объекта;

4) результаты разработки и практической реализации измерительных комплексов на основе многопараметрической триангуляции геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах, а также результаты натурных экспериментов и испытаний.

В работе использованы методы цифровой обработки сигналов и изображений, многопараметрической триангуляции, оптики и фотоники, искусственного интеллекта, многомерного регрессионного анализа, численного моделирования, аналитической геометрии, математической статистики, объектно-ориентированной декомпозиции программного обеспечения.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена аналитическими исследованиями, математическим моделированием, результатами экспериментальных исследований, длительными промышленными испытаниями и опытом промышленной эксплуатации предложенных и реализованных научных идей, методов и технических решений.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка задач исследования и научная проблематика разрабатывалась диссертантом как единолично, так и при участии научного консультанта д.т.н. В.Г. Меледина. Разработки измерительных систем на стадиях НИОКР, их практическая реализация и внедрения выполнялись сотрудниками научного коллектива под руководством и при непосредственном участии автора.

Практическая ценность и реализация результатов работы

На основе полученных результатов и выводов разработаны действующие прототипы аппаратно-программных оптоэлектронных систем для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе методов многопараметрической триангуляции. Они успешно использованы для впервые выполненных с применением пространственно-временной модуляции источника оптического излучения бесконтактных измерений 3D геометрии лопастей рабочих колес лопастно-поворотных турбин в процессе производства ОАО “Силовые машины-ЛМЗ”. Впервые создан действующий оптоэлектронный радиационно-безопасный измерительный комплекс для мониторинга толщины движущегося горячего проката, работа которого основана на методах многопараметрической синхронной дифференциальной облачной триангуляции. Предназначенный для работы в тяжелейших условиях горячего металлургического цеха, измерительный комплекс успешно прошел цикл промышленных испытаний, введен в промышленную

эксплуатацию в цехе горячего проката ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузмина» в 2013 году, и непрерывно работает, обеспечивая метрологию, технологический контроль и учет горячего проката. Результаты работы активно используются в лабораториях ОАО «Силовые машины-ЛМЗ», ОАО «ИОИТ» и ряда институтов СО РАН, а сфера их применения может быть расширена на другие области науки и промышленных технологий.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных мероприятиях: International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (Beijing, 2015), Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Ульяновск, 2015), Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные проблемы науки» (Уфа, 2015), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки» (Стерлитамак, 2015), Международная научно-практической конференция «Современное состояние и перспективы развития технических наук» (Уфа, 2015), Международная научно-практическая конференция “Фундаментальные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности” (Санкт-Петербург, 2006-2011, 2014), Международная научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития науки» (Уфа, 2014), Международная научно-практическая конференция «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (Новотроицк, 2014), Всероссийская научно-практическая конференция «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2013), Международная научная конференция «Информационные технологии XXI века» (Хабаровск, 2013), Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2013), International topical team workshop on Two-phase systems for ground and space application (Italy, 2011), Международная конференция "Тепломассообмен и

гидродинамика в закрученных потоках” (Новосибирск, 2011), Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва (2003, 2007), Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии» (Новосибирск, 2007), Всероссийская конференция молодых ученых «Физика-космосу» (Байконур, 2014), Всероссийская школа-конференция с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014), Международная молодежная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2012), Международная молодёжная конференция «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения» (Томск, 2012), Всероссийская молодежная научная конференция «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 2012), Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2008), Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2004, 2006, 2007), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Новосибирск, 2006), Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений» (Новосибирск, 2006), а также на различных научных семинарах и совещаниях.

Публикации. По результатам работы опубликовано 110 печатных работ, из них 15 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов докторских диссертаций, получено 11 патентов Российской Федерации, 14 статей индексируется международными базами научного цитирования WOS и SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 4 глав, введения, заключения. Содержит 399 страниц, 279 рисунков, 262 формулы. Список литературы включает 277 наименований.

Первая глава посвящена методам многопараметрической триангуляции для измерения геометрических параметров статичных и движущихся объектов в фазово-неоднородных средах.

Во второй главе представлены методы калибровки оптико-электронных измерительных комплексов, на основе методов многопараметрической триангуляции

Третья глава посвящена практической реализации методов многопараметрической триангуляции для измерения геометрических параметров в фазово-неоднородных средах

Четвертая глава посвящена промышленным испытаниям предложенных и реализованных измерительных комплексов на основе методов многопараметрической триангуляции.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ФАЗОВО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Глава посвящена развитию методов многопараметрической триангуляции для обеспечения прецизионных измерений геометрических параметров в фазово-неоднородных средах.

Рассмотрена научно-техническая проблема триангуляционных измерений в фазово-неоднородных средах. Приведены результаты анализа распространения оптических сигналов в триангуляционных измерительных схемах в фазово-неоднородной среде. Рассмотрен метод многопараметрической триангуляции на основе структурированного освещения для измерения трехмерной геометрии статичных объектов в нестационарных фазово-неоднородных средах. Предложены многопараметрические методы обработки структурированных изображений для снижения погрешности измерений.

Рассмотрена научная проблема триангуляционных измерений геометрических параметров движущихся объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах. Предложены методы облачной триангуляции, обеспечивающие устойчивость результатов измерения к нестационарным искажениям фазово-неоднородной среды в оптическом тракте. Показано, что метод синхронной дифференциальной облачной триангуляции может эффективно применяться для измерения толщины движущихся объектов в условиях термоградиентных фазово-неоднородных сред.

1.1. Распространение оптических сигналов триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах

Научная проблема применения триангуляционных методов в фазово-неоднородных средах связана с существенным ростом погрешности

измерений из-за искажений структуры оптических полей в измерительных триангуляционных схемах. Фазово-неоднородная среда характеризуется локальными неоднородностями коэффициента преломления, которые могут быть вызваны, например, нестационарными температурными флуктуациями среды. Для обеспечения прецизионности триангуляционных измерений в условиях фазово-неоднородных сред, необходимо в полной мере учитывать особенности распространения оптических сигналов в термоградиентной среде.

Исследованиям распространения оптического излучения в фазово-неоднородных средах посвящено много работ. Большой вклад в данной области связан с исследованиями оптических сигналов при их распространении на большие расстояния. Например, задача повышения разрешающей способности астрономических оптических приборов проанализирована в работе [1].

С другой стороны, исследования распространения излучения в случайно неоднородных средах занимают важное место в медицинской диагностике [40-41], материаловедении [42] и многих других областях науки и техники [43].

Процессы распространения и рассеяния оптического излучения, а также оптические особенности фазовых случайно-неоднородных сред активно изучались, результаты этих исследований опубликованы в многочисленных научных статьях и в ряде монографий [44-50].

Известны различные подходы к исследованию случайно-неоднородных сред, такие, как связанный с использованием аппарата квантовой теории поля метод диаграмм [51], метод уравнения переноса [52], метод интегралов по траекториям [53-54]. Каждый из этих подходов применим при определенных условиях. Основным критерием для классификации может служить параметр анизотропии среды. Для изотропных сред или сред с малым параметром анизотропии применимы методы диффузионного приближения, рассеяния на броуновских частицах и на потоках частиц (без модификации). Для

исследования сред с высоким параметром анизотропии используют иные методы: метод малоуглового приближения, модифицированные методы рассеяния на броуновских частицах и на потоках частиц. Все перечисленные выше методы не являются универсальными, поскольку они основаны на теоретических результатах, полученных при различных допущениях. Существует стохастический метод моделирования рассеяния в случайно-неоднородных средах (метод Монте-Карло [55]), который применим ко всем классам сред. Однако метод Монте-Карло обладает существенным недостатком: он существенно более трудоемок в вычислительном отношении по сравнению с аналитическими методами.

В данной работе проведен статистический анализ пространственных характеристик распространения сигналов оптических триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах. При проведении анализа применены элементы теории распространения волн в случайно-неоднородных средах [52], на которой построены многие аналитические работы, посвященные изучению распространения электромагнитных волн.

Принцип измерения расстояний триангуляционными методами заключается в освещении контролируемого объекта световым пучком и наблюдении рассеянного на поверхности объекта светового пятна с направления, отличного от направления освещения. Определение расстояния до объекта сводится к измерению координаты центра пятна на изображении объекта.

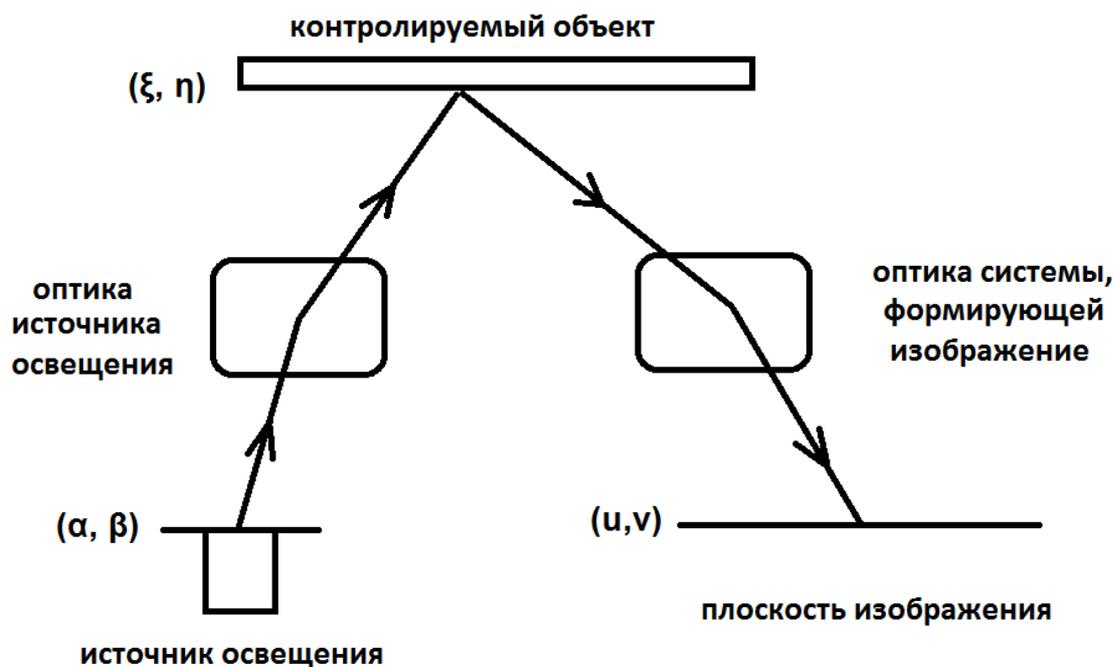


Рис.1.1. Принцип измерения расстояний
триангуляционными методами

Пусть источник освещения через осветительную оптику освещает поверхность объекта в плоскости (ξ, η) . Изображение объекта формируется с помощью оптической системы в плоскости (u, v) .

Обозначим $F(\xi, \eta, \alpha, \beta)$ и $K(u, v, \xi, \eta)$ функции размытия или импульсный отклик оптических систем освещения и изображения соответственно. Отдельная точка с координатами (α, β) на источнике испускает свет, который можно характеризовать зависящей от времени комплексной величиной $A_s(\alpha, \beta, t)$. Свет из этой точки достигает объекта, рассеивается на его поверхности и создает зависящую от времени волну $A_0(\xi, \eta, \alpha, \beta, t)$, которую можно представить в виде:

$$A_0(\xi, \eta; \alpha, \beta; t) = F(\xi, \eta; \alpha, \beta) t_0(\xi, \eta) A_s(\alpha, \beta; t - \delta_1), \quad (1.1)$$

где δ_1 – временная задержка, которая зависит от (ξ, η) и (α, β) , а $t_0(\xi, \eta)$ – амплитудный коэффициент отражения объекта, который не зависит от положения точки источника, обеспечивающего освещение. Зависящая от

времени световая волна, испускаемая точкой источника с координатами (α, β) и достигающая точки с координатами (u, v) на плоскости изображения, имеет вид:

$$A_i(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \alpha, \beta; t) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{K}(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \xi, \eta) t_0(\xi, \eta) \times \\ \times F(\xi, \eta; \alpha, \beta) A_s(\alpha, \beta; t - \delta_1 - \delta_2) d\xi d\eta, \quad (1.2)$$

где δ_2 – временная задержка, которая зависит от (u, v) и (ξ, η) .

Интенсивность света, испускаемого точкой источника (α, β) и достигающего точки с координатами изображения (u, v) , может быть вычислена следующим образом:

$$I_i(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \alpha, \beta) = \langle |A_i(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \alpha, \beta; t)|^2 \rangle = \\ = \int \int \int \int \mathbf{K}(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \xi_1, \eta_1) \mathbf{K}^*(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \xi_2, \eta_2) t_0(\xi_1, \eta_1) t_0^*(\xi_2, \eta_2) \times \\ \times F(\xi_1, \eta_1; \alpha, \beta) F^*(\xi_2, \eta_2; \alpha, \beta) \times \\ \times \langle A_s^*(\alpha, \beta; t - \delta_1 - \delta_2) A_s(\alpha, \beta; t - \delta_1' - \delta_2') \rangle d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 \quad (1.3)$$

Зависящая от времени часть в выражении (1.3) сводится к $I_s(\alpha, \beta)$ – интенсивность источника в точке с координатами (α, β) . Проинтегрировав парциальную интенсивность $I_i(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \alpha, \beta)$ по координатам источника (α, β) , мы получим:

$$I_i(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_s(\alpha, \beta) \int \int \int \int \mathbf{K}(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \xi_1, \eta_1) \mathbf{K}^*(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \xi_2, \eta_2) \times \times \\ F(\xi_1, \eta_1; \alpha, \beta) F^*(\xi_2, \eta_2; \alpha, \beta) \times \times t_0(\xi_1, \eta_1) t_0^*(\xi_2, \eta_2) d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 d\alpha d\beta \\ (1.4)$$

Следовательно, зная I_s , F , K , t_0 , можно вычислить распределение интенсивности изображения. Выражение (1.4) описывает в самом общем

виде зависимость интенсивности на изображении контролируемого объекта в зависимости от распределения интенсивности света источника излучения, параметров оптических систем источника освещения, системы, формирующей изображения и отражательных свойств поверхности контролируемого объекта. На практике часто параметр t_0 является очень сложным, он зависит не только от координат в плоскости объекта, но и от того, как объект расположен относительно источника освещения и его часто считают постоянным, как минимум в окрестности области освещения источником света. Для определения характера зависимости функций F и K , как правило, используют приближения тонкой линзы. Интенсивность источника освещения сводят к точечному источнику света, и в результате выражение (1.4) сводится к достаточно тривиальным формулам, которые позволяют получить аналитические зависимости координаты центра светового пятна на изображении от расстояния до контролируемого объекта [56].

Рассмотрим случай, когда в оптической среде, расположенной между источником излучения и объектом и между объектом и системой, формирующей изображение, расположен фазово-неоднородный слой, сформированный, например, тепловыми воздушными линзами, образованными движением слоев воздуха различной температуры. Коэффициент преломления света в фазовых градиентах оптической среды изменяется, и это приводит к искажениям оптических сигналов. В выражении (1.4) искажения, обусловленные фазово-неоднородной средой, будут находиться в функциях K , F и внесут дополнительную зависимость от времени. Отклонения, которые будет создавать дрейфующая фазово-неоднородная среда, будут иметь стохастический характер. Чтобы определить статистическое распределение этих дрейфов рассмотрим, как будет распространяться электромагнитная волна в условиях фазово-неоднородной среды.

Рассмотрим монохроматическую волну, имеющую временную зависимость типа $\exp(-j\omega t)$, распространяющуюся в заданном объеме. Показатель преломления воздуха в градиентной фазово-неоднородной среде может быть представлен в виде

$$\mathbf{n}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_1(\mathbf{r}, t) \quad (1.5)$$

Предполагаем, что показатель преломления имеет постоянное значение n_0 , которое можно с большой степенью достоверности считать равным единице, а поправка \mathbf{n}_1 , зависит от температурного градиента воздуха, положения и скорости перемещения градиентных областей. Исходя из предположения, что воздух в исследуемом объеме имеет постоянную диэлектрическую проницаемость, можно получить выражение из уравнений Максвелла:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \mathbf{E} + 2\nabla(\mathbf{E} \cdot \nabla \ln(\mathbf{n})) = \mathbf{0}, \quad (1.6)$$

где \mathbf{E} – вектор электрического поля электромагнитной волны. Последний член в этом уравнении описывает связь между тремя компонентами вектора \mathbf{E} и, следовательно, соответствуют деполяризационному члену. В работах [57] было экспериментально установлено, что для области видимого спектра этот член пренебрежимо мал и может быть положен равным нулю. С физической точки зрения деполяризационными эффектами можно пренебречь потому, что внутренний пространственный масштаб турбулентности среды намного больше длины волны λ . В результате волновое уравнение принимает вид

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \mathbf{E} = \mathbf{0}. \quad (1.7)$$

Данное уравнение отличается от типичного только тем, что величина n^2 является функцией радиус-вектора \mathbf{r} и времени t .

Поскольку все три компоненты электрического поля удовлетворяют одному и тому же волновому уравнению, векторное уравнение можно заменить скалярным:

$$\nabla^2 U + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} U = 0, \quad (1.8)$$

где U представляет E_x , F_y или E_z .

Это уравнение можно решить методом малых возмущений. Поскольку $|n_1| \ll n_0$, можно представить поле U в виде суммы U_0 , который был бы получен в случае, если бы воздух в оптическом объеме имел однородный показатель преломления n_0 , и малого поправочного члена U_1 , который учитывает влияние возмущений показателя преломления n_1 . В таком приближении волновое уравнение принимает вид

$$\nabla^2 (U_0 + U_1) + \frac{\omega^2 (n_0 + n_1)^2}{c^2} (U_0 + U_1) = 0. \quad (1.9)$$

Поскольку величина U_0 – невозмущенное решение, она должна удовлетворять уравнению

$$\nabla^2 U_0 + k_0^2 U_0 = 0, \quad (1.10)$$

$$k_0^2 = \frac{\omega^2 n_0^2}{c^2}. \quad (1.11)$$

Сохранение только тех членов, которые имеют первый порядок относительно U_1 и n_1 , означает, что величина U_1 должна удовлетворять уравнению

$$\nabla^2 U_1 + k_0^2 U_1 = -\frac{-2k_0^2 n_1 U_0}{n_0}. \quad (1.12)$$

В данном уравнении предполагается, что $n_0=1$, что является хорошим приближением в случае оптического сигнала.

В формуле (1.12) имеем неоднородное волновое уравнение для U_1 с членом $-2k_0^2 n_1$ в качестве источника. Его решение можно найти как свертку функции Грина для свободного пространства (импульсный отклик) $\exp(jk_0 |\mathbf{r}|) / |\mathbf{r}|$ с выражением для источника. В результате имеем

$$U_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{e^{jk_0 |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} k_0^2 n_1(\mathbf{r}') U_0(\mathbf{r}') d^3 \mathbf{r}', \quad (1.13)$$

где интегрирование ведется по всему рассеивающему объему V .

Данное выражение означает, что полевозмущение U_1 может быть найдено путем суммирования множества сферических волн, генерируемых в различных точках \mathbf{r}' внутри рассеивающего объема V . Амплитуда сферической волны, генерируемой в точке \mathbf{r}' , пропорциональна произведению амплитуды падающего невозмущенного излучения на возмущение показателя преломления в этой точке. Учитывая, что углы рассеяния, характерные для распространения видимого света в воздухе, довольно малы, так как турбулентные вихри в атмосфере, а равно и интересующие нас неоднородности, имеют величину порядка $l_0=2$ мм, типичная длина волны лазера имеет порядок $\lambda=0.6$ мкм, то углы рассеяния не превышают $l_0/\lambda \sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ рад. Следовательно, максимальное поперечное смещение, в пределах которого свет от рассеивателя попадает в заданную точку, намного меньше аксиального расстояния от рассеивателя до фотоприемника. Поэтому в выражении (1.13) может быть использовано приближение Френеля [58], что приводит к выражению:

$$\mathbf{U}_1(\mathbf{r}) = \frac{k_0^2}{2\pi} \iiint \frac{e^{jk_0\left((z-z') + \frac{|\rho-\rho'|^2}{2(z-z')}\right)}}{|z-z'|} \mathbf{n}_1(\mathbf{r}') U_0(\mathbf{r}') d^3\mathbf{r}', \quad (1.14)$$

где ρ и ρ' – поперечные смещения векторов \mathbf{r} и \mathbf{r}' от оси z .

Таким образом, полученное выражение дает полевое возмущение \mathbf{U}_1 , как суперпозицию множества независимых вкладов различных частей неоднородной среды. В соответствии с центральной предельной теоремой действительная и мнимая часть величины \mathbf{U}_1 подчиняются нормальному распределению. Распределение интенсивности полной волны зависит от дисперсии вещественной и мнимой частей величины \mathbf{U}_1 и от их корреляции. Если эти дисперсии равны, а коэффициент корреляции равен 0, то сумму величин U_0 и \mathbf{U}_1 можно представить в виде суммы постоянного комплексного значения (фазора) и случайного кругового комплексного гауссовского фазора.

Для вычисления характера распределения амплитуды сигнала на фотоприемнике, рассмотрим более подробно систему, состоящую из суммы постоянного фазора и случайного комплексного фазора.

Пусть значение постоянного фазора будет действительным и положительным (это предположение всегда может быть выполнено заданием нулевой начальной фазы постоянного фазора). Пусть k -й случайный фазор имеет длину α_k/\sqrt{N} и фазу φ_k . Тогда действительную (r) и мнимую (i) часть результирующего фазора можно представить в виде

$$\mathbf{r} = \mathbf{s} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \alpha_k \cos\varphi_k, \quad (1.15)$$

$$\mathbf{i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \alpha_k \sin\varphi_k. \quad (1.16)$$

Средние значения действительной и мнимой частей r и i вычисляются:

$$\bar{\mathbf{r}} = \mathbf{s} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \bar{\alpha}_k \overline{\cos \varphi_k} = \mathbf{s} + \sqrt{N} \bar{\alpha} \overline{\cos \varphi} \quad (1.17)$$

$$\bar{i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \bar{\alpha}_k \overline{\sin \varphi_k} = \sqrt{N} \bar{\alpha} \overline{\sin \varphi} \quad (1.18)$$

Будем считать, что случайная переменная φ равномерно распределена на интервале $(-\pi, \pi)$, то $\overline{\cos \varphi} = \overline{\sin \varphi} = 0$, следовательно $\bar{\mathbf{r}} = \mathbf{s}$, $\bar{i} = \mathbf{0}$.

Дисперсия случайной величины будет принимать следующие значения:

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N (\mathbf{r}_k - \bar{\mathbf{r}}) (\mathbf{r}_n - \bar{\mathbf{r}}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N \bar{\alpha}_k \bar{\alpha}_n \overline{\cos \varphi_k \cos \varphi_n} = \frac{\bar{\alpha}^2}{2}, \quad (1.19)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N \mathbf{i}_k \mathbf{i}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N \bar{\alpha}_k \bar{\alpha}_n \overline{\sin \varphi_k \sin \varphi_n} = \frac{\bar{\alpha}^2}{2}, \quad (1.20)$$

Учитывая, что $\bar{i} = \mathbf{0}$, взаимная корреляция величин r и i :

$$\bar{r}i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N (\mathbf{r}_k - \bar{\mathbf{r}}) \mathbf{i}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N \bar{\alpha}_k \bar{\alpha}_n \overline{\cos \varphi_k \sin \varphi_n} = \mathbf{0}, \quad (1.21)$$

следовательно, действительная и мнимая части результирующей комплексной случайной величины являются некоррелированными.

В пределе больших чисел N совместное распределение величин R и I остается гауссовым (центральная предельная теорема):

$$\rho_{RI}(\mathbf{r}, \mathbf{i}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(r-s)^2 + i^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.22)$$

Перейдем к полярной системе координат со случайными величинами a и θ , поскольку для нас наибольший интерес представляет маргинальное распределение амплитуды случайной комплексной величины. Учитывая, что

$$\mathbf{r} = \mathbf{a} \cos \theta, \quad (1.23)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{a} \sin \theta, \quad (1.24)$$

получим:

$$\rho_{A\theta}(\mathbf{a}, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(\alpha\cos\theta-s)^2+(\alpha\sin\theta)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.25)$$

Маргинальная плотность распределения случайной величины A:

$$\rho_A(\alpha) = \int_{-\pi}^{\pi} \rho_{A,\theta}(\alpha, \theta) d\theta = \frac{\alpha}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{a^2+s^2}{2\sigma^2}} \int_{-\pi}^{\pi} e^{\frac{as}{\sigma^2}\cos\theta} d\theta, \quad (1.26)$$

или

$$\rho_A(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2+s^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{as}{\sigma^2}\right), \text{ при } \mathbf{a} > \mathbf{0}, \quad (1.27)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Полученное распределение является райсовской плотностью распределения.

Поскольку отклонение вызванное неоднородностью показателя преломления существенно меньше амплитуды волны, то в большинстве случаев можно считать верным приближение $s \gg \sigma$. В этом случае, случайная величина A будет стремиться к гауссовой случайной величине

$$\rho_A(\alpha) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(a-s)^2}{2\sigma^2}}, \mathbf{s} \gg \sigma. \quad (1.28)$$

Следовательно, фазово-неоднородная среда дает случайные отклонения изображения пятна, имеющие стохастический характер и гауссово

распределение при большом времени накопления. Полученный вывод позволяет выполнять прецизионные измерения даже в условиях интенсивных температурных и фазовых искажений оптических сигналов. Для этого достаточно выполнить накопление экспериментальных данных в фазово-неоднородной среде, регрессионное осреднение которых обеспечит снижение итоговой погрешности измерений.

1.2. Триангуляционные измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах

Задача прецизионных измерений трехмерной геометрии статичных крупногабаритных объектов в фазово-неоднородной среде является важной для широкого спектра промышленных применений. Высокоточный контроль трехмерной геометрии сложнопрофильных изделий важен для нефтегазового и аэрокосмического комплексов, энергетики и атомной промышленности, всюду, где необходим размерный контроль точных крупногабаритных машиностроительных изделий со сложной 3D геометрией.

Существующие решения задачи измерения геометрических параметров оптическими методами можно разбить на несколько больших групп: интерференционные, времяпролетные, фазовые, триангуляционные и методы частотной модуляции.

Интерференционные методы измерения геометрических расстояний основаны на явлении интерференции волновых фронтов [60-63]. Данные методы обладают очень низкой абсолютной погрешностью, до нескольких микрон, однако имеют ограниченный диапазон измерения. Поэтому их сложно применять для задачи измерения крупногабаритных объектов. Кроме того, применение интерференционных методов в фазово-неоднородной среде достаточно сильно ограничено. Это связано с случайными сложнопрогнозируемыми искажениями волновых фронтов, что приведет к

существенному росту погрешности измерений даже при очень малом уровне вносимых искажений фазово-неоднородной средой.

К методам оптического сканирования относятся методы частотной модуляции, импульсные или времяпролетные методы, и фазовые методы. Работа импульсных методов сканирования основана на измерении времени прохождения сигнала от измерительного модуля до объекта и обратно [64]. Расстояние вычисляют по формуле:

$$L = vt/2, \quad (1.29)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны, t – время между моментом генерации импульса до момента приема отраженного сигнала. Фазовые методы измерения расстояний основаны на определении разности аз между посылаемым и принимаемым сигналом [65-66]. Расстояние вычисляют по формуле:

$$L = \frac{\varphi_{2R} \cdot v}{4\pi f}, \quad (1.30)$$

φ_{2R} - разность фаз между опорным и принимаемым сигналом, f – частота модуляции. Методы частотной модуляции основаны на линейной модуляции частоты оптического излучения [67-68]. В результате расстояние до объекта определяют по разности частот принимаемого и опорного излучения:

$$L = \frac{v \cdot \Delta F \cdot T_{\text{mod}}}{2\Delta f}. \quad (1.31)$$

Для сканирования трехмерной геометрии в методах оптического сканирования применяют развертку, обеспечивающую отклонения направления излучения. В процессе сканирования фиксируют направление

распространения излучения и измеряемое расстояние до поверхности объекта.

Основной недостаток методов оптического сканирования при измерениях в условиях фазово-неоднородной среды заключается в следующем. Пространственные трассы распространения оптического луча будут искажаться фазово-неоднородной средой. В результате при измерении расстояния в выбранном направлении, фактическое направление будет отличаться от направления, заданного модулем развертки, на случайную величину. Указанные эффекты приведут к существенному росту погрешности измерений. Кроме того, при выполнении измерений трехмерной геометрии методами оптического сканирования необходимо предварительно покрывать измеряемую поверхность специальным матовым покрытием, обеспечивающим равномерность светорассеивающих свойств поверхности. Данное требование вносит фундаментальные ограничения на достижимую погрешность измерений указанными методами.

Методы оптической триангуляции [69-75] основаны на определении расстояния по положению пятна рассеянного на поверхности пучка излучения на фотоприемнике.

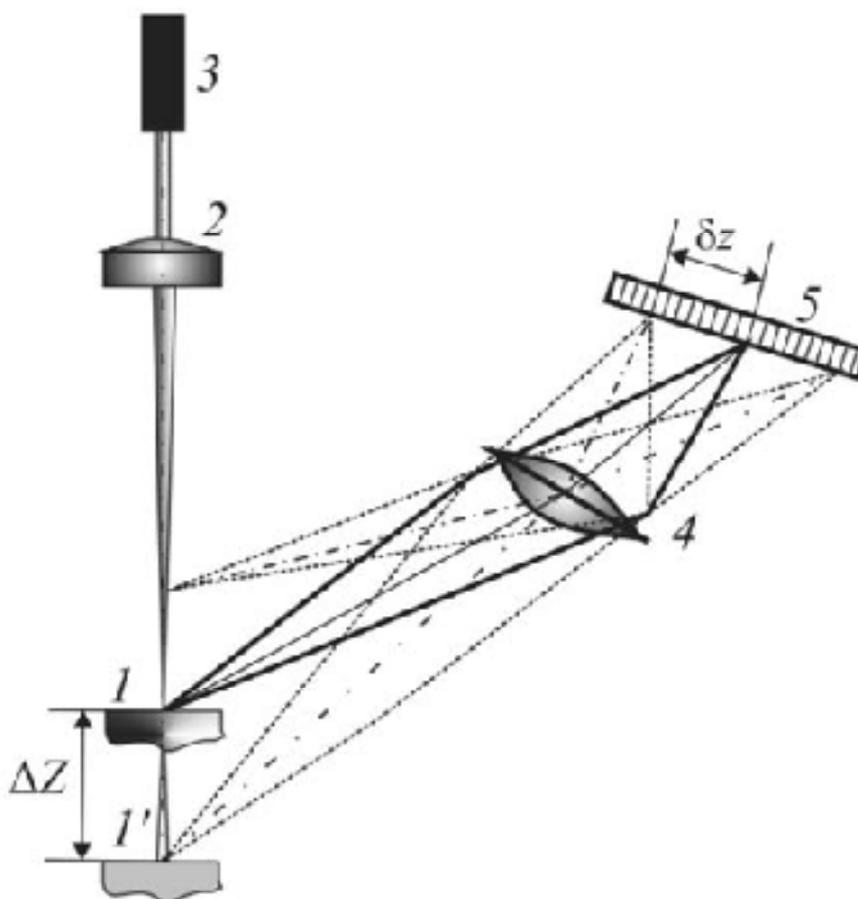


Рис.1.2. Принципиальная схема триангуляционного измерителя: 1,1' – контролируемая поверхность, 2 – коллиматор, 3 – оптический источник, 4 линза, 5 приёмник излучения.

Метод оптической триангуляции работает следующим образом. Излучательный канал формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности. Рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в приемный канал. В плоскости фотоприемника строится изображение освещенного участка контролируемой поверхности в форме светового пятна. При смещении контролируемой поверхности на величину ΔZ (рис. 1), световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину δz . Зависимость смещения контролируемой поверхности ΔZ от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника δz имеет следующий вид:

$$\Delta Z = r \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)}, \quad (1.32)$$

$$\varphi = \text{atan}\left(A \cdot \frac{\delta z}{1 + B \cdot \delta z}\right) \quad (1.33)$$

$$A = \sin \beta / r' \quad (1.34)$$

$$B = -\cos \beta / r' \quad (1.35)$$

где r и r' - расстояния от контролируемой поверхности до проецирующего объектива приемного канала и от проецирующего объектива до фотоприемника. Существует большое количество модификаций метода оптической триангуляции, нацеленных на улучшение метрологических характеристик в специфических условиях.

Одним из способов снижения влияния эффекта вторичного отражения на точность измерений является сужение угла обзора объектива в приемной системе триангуляционного измерителя. С этой целью в приемную систему триангуляционного измерителя вводят диафрагму с фиксированной или варьируемой апертурой, имеющей, например, круговую или прямоугольную форму [73]. В работе [74.] предложен метод триангуляции, в котором приемная система, включает две линзы. Между линзами размещена щелевая диафрагма и фотоприемник. Диафрагма располагают в фокусе первой, ближайшей к измеряемому объекту линзы и размер ее щели подбирают в соответствии с размером зондирующего пятна на поверхности объекта. Отраженное от поверхности объекта световое излучение фокусируют первой линзой в плоскость щели и сформированное таким образом промежуточное изображение затем фокусируется в плоскость объектива, который, в свою очередь, фокусирует световое пятно на фотоприемнике.

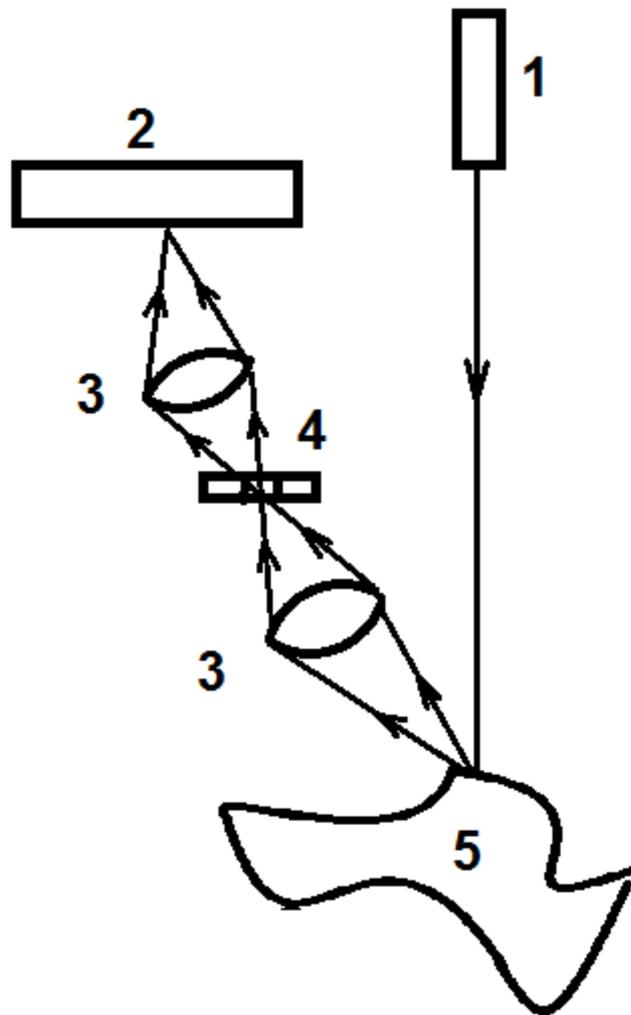


Рис.1.3. Схема работы метода триангуляции, в котором приемная система включает две линзы и диафрагму. 1 – источник излучения, 2 – приемник излучения, 3 – линзы, 4 – диафрагма, 5 – контролируемый объект.

Известен метод триангуляции [75], при котором источник излучения формирует на поверхности исследуемого объекта световое пятно, отражённое световое излучение фокусируется на объективе приёмника оптического излучения, при этом приёмная система содержит, по крайней мере, две апертурные диафрагмы, сужающие угол обзора объектива приёмника, расположенные между исследуемым объектом и объективом приёмника.

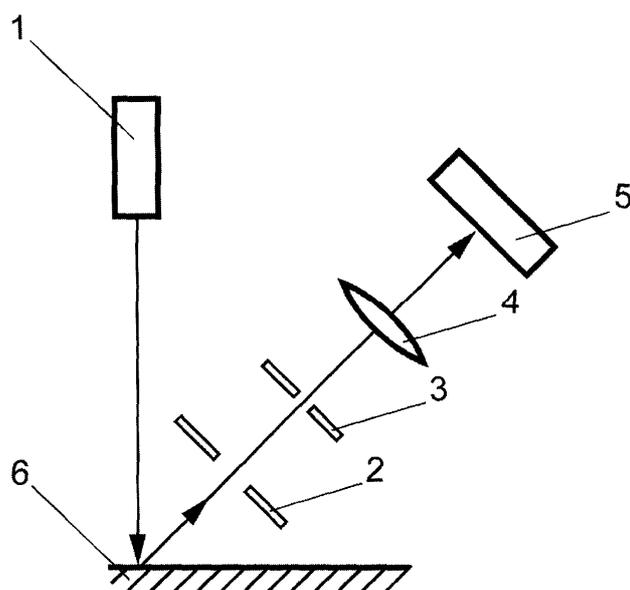


Рис.1.4. Схема работы метода триангуляции, в котором приемная система включает две апертурные диафрагмы. 1 – источник излучения, 2,3 – апертурные диафрагмы, 4 – линза, 5 – приемник, 6 – контролируемый объект

Упомянутые методы снижают эффекты переотражения от шероховатостей поверхности за счет пространственной фильтрации принимаемого излучения, однако не оказывают влияния на рост погрешности измерений в условиях фазово-неоднородных сред.

Наиболее часто используемой модификацией метода триангуляции является триангуляция с использованием пространственной модуляции оптического источника. Данный метод предполагает, что на поверхность контролируемого объекта проецируют не световой пучок, а пространственно модулированную засветку. На фотоприемнике анализируют наблюдаемое двумерное распределение рассеянного излучения.

Триангуляционные методы светового сечения [76] заключаются в формировании на поверхности объекта узкой световой полосы и наблюдении ее формы с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемые искажения полосы определяют геометрию поверхности в плоскости светового сечения. Данный метод широко применим в задачах, не требующих работы в тяжелых условиях окружающей среды [77-81]. Применение методов светового сечения, также как и точечных триангуляционных методов, в условиях фазово-неоднородных сред приводит к существенному росту погрешности измерений.

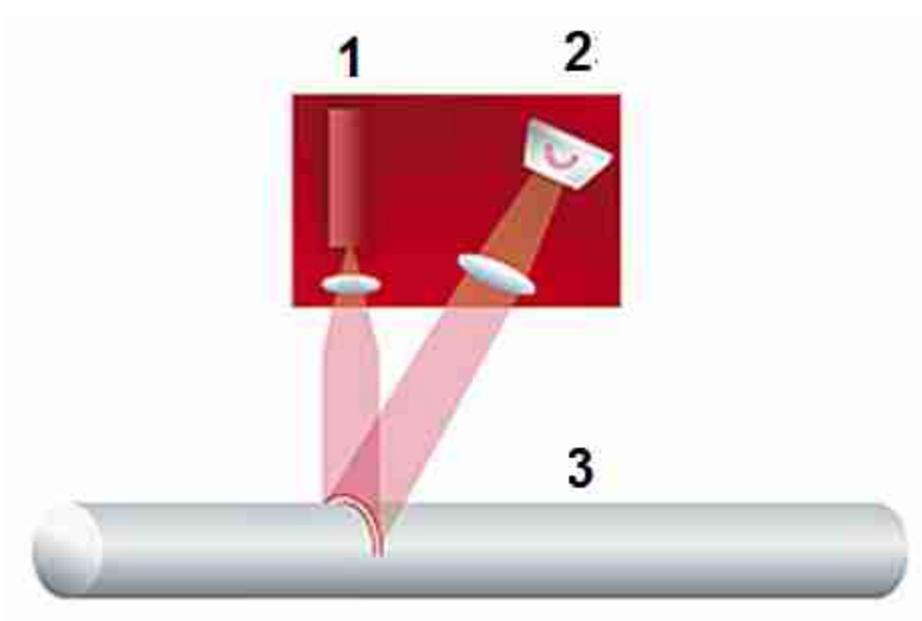


Рис.1.5. Схема работы триангуляционного метода светового сечения. 1 – источник излучения, 2 – приемник излучения, 3 – измеряемый объект.

Известен метод бесконтактного измерения полного трехмерного профиля поверхности, реализующий принцип сканирующей подсветки, который используется в трехмерной компьютерной анимации и некоторых других приложениях для регистрации формы поверхности [82]. Метод основан на том, что последовательно сканируют отдельные контуры поверхности светящейся полосой и судят о контролируемых размерах по

степени искажения изображения полосы и ее местоположению в декартовой системе координат (рис.1.1).

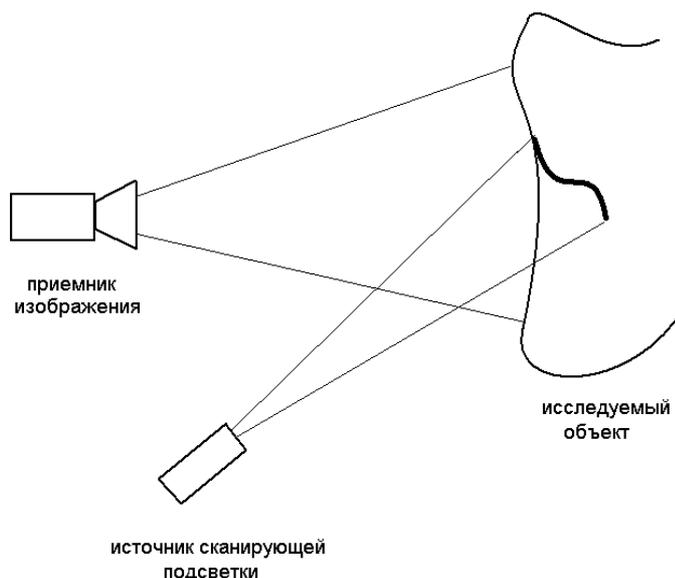


Рис.1.6. Принцип работы метода сканирующей подсветки

Недостатком метода является высокая погрешность и длительное время контроля, связанные с наличием операции последовательного сканирования.

Для получения полного трехмерного профиля используют триангуляционный метод с использованием пространственной модуляции в виде структурированной засветки [83-84]. Он основан на освещении структурированным светом и наблюдении исследуемого объекта с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемое 2D изображение, представляющее собой пространственное распределение интенсивности рассеянного объектом света, содержит искажения, кодирующие информацию о третьей координате [85-86]. Погрешность 3D измерений зависит от точности регистрации структурированного освещения и светорассеивающих свойств поверхности объекта [87]. Используемые алгоритмы восстановления профиля, как правило, адаптируют под определенный класс объектов с известными светорассеивающими свойствами поверхности [88].

Известен метод контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам [89]. Метод заключается в том, что на объект проецируется система разноцветных полос, создаваемая путем пространственной модуляции вдоль одной координаты интенсивности зондирующего оптического излучения. Система разноцветных полос носит периодический характер и создает структурированную засветку (рис 1.7). В результате в одном кадре регистрируется целиком вся попадающая в поле зрения фотоприемного устройства часть поверхности контролируемого объекта и наложенное на поверхность искаженное изображение структурированной подсветки. О контролируемых размерах судят по степени искажений изображения множества полос и местоположению полос в декартовой системе координат.

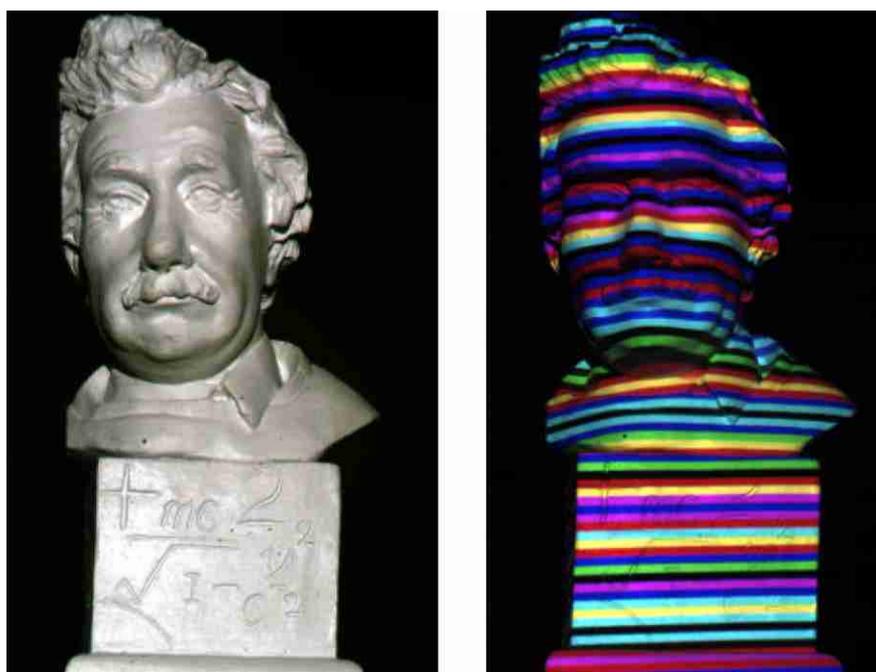


Рис.1.7. Измерение профиля бюста Эйнштейна методом проецирования разноцветных полос

Недостатком известного метода является высокая погрешность (выше 1%), связанная с невозможностью однозначно интерпретировать разрывы в изображении полос, искаженных либо рельефом поверхности контролируемого объекта, либо низким значением спектрального

коэффициента отражения, зависящего от материала и цвета какого-либо участка поверхности контролируемого объекта.

Известен метод контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам [90]. Метод заключается в том, что на объект проецируется система концентрических полос, создаваемая путем подсветки когерентным излучением, содержащим спекл-структуру либо в виде системы концентрических полос, либо в виде хаотично расположенных зон, форма которых единообразна. Искаженная рельефом поверхности структурированная подсветка регистрируется при изменении длины волны излучения, по меньшей мере, два раза. Полученная таким образом псевдоголограмма содержит систему интерференционных полос, расстояние между которыми в разных точках соответствует высоте рельефа. Соответствующая программная обработка на компьютере совокупности данных о величине вышеуказанных расстояний позволяет судить о рельефе поверхности контролируемого объекта.

Недостатком известного метода является низкая достоверность получаемых данных о контролируемой поверхности на участках поверхности, отражение которых резко отличается от диффузного.

Известен метод контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам [91]. Метод заключается в формировании на поверхности контролируемого объекта зондирующей структурированной подсветки путем освещения поверхности контролируемого объекта пучком оптического излучения, пространственно модулированного по интенсивности, регистрации изображения искаженной рельефом поверхности контролируемого объекта структуры зондирующей подсветки и определении высоты рельефа поверхности контролируемого объекта по величине искажений изображения структуры зондирующей подсветки, а двух других координат - по положению искажений структуры подсветки в зарегистрированном изображении.

Недостатками известного метода является высокая погрешность, обусловленная тем, что при направлении на поверхность контролируемого объекта модулированного по одной координате транспарантом с неизменной периодической структурой оптического излучения нельзя предусмотреть либо заранее учесть искажения картины, вызванные различными отражательными свойствами поверхности и глубокими впадинами, которые невозможно идентифицировать без априорной информации о макроструктуре поверхности контролируемого объекта.

Известен метод контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам [92]. Метод заключается в многократном формировании на поверхности контролируемого объекта зондирующей структурированной засветки, каждый раз с управлением пространственной модуляцией интенсивности пучка оптического излучения по одной координате, так, что на поверхности контролируемого объекта создается изображение структурированной подсветки в виде апериодической совокупности полос. Далее регистрируются изображения искаженной рельефом поверхности контролируемого объекта структуры зондирующей подсветки, которую производят путем накопления суммарного изображения, определяются положения искажений структуры подсветки в зарегистрированных изображениях по расстоянию вдоль полосы и номеру полосы, формируемому логическим суммированием двоичных чисел, кодирующих положение полос в каждой из реализаций апериодической совокупности полос так, что единица соответствует наличию полосы, а ноль - отсутствию полосы.

Недостатком известного метода является высокая погрешность определения линейных размеров, ограниченная погрешностью определения координат формируемой полосы на регистраторе изображения. Высокая погрешность определения координат полосы обусловлена сложностью детектирования полосы на участках объекта, имеющих различные

отражательные свойства. Кроме того, поперечный размер полосы на регистраторе, влияющий на погрешность определения координат, зависит от угла между нормалью к поверхности и осью излучения структурированной подсветки. Более того, при измерениях в условиях фазово-неоднородной среды в бюджет погрешности измерения будет добавлен член, обусловленный искажениями оптических сигналов за счет неравномерного показателя преломления среды.

В диссертационной работе предложен метод многопараметрической триангуляции, позволяющий выполнять прецизионные измерения трехмерной геометрии в условиях фазово-неоднородных сред. Метод заключается в следующем. На поверхность контролируемого объекта многократно проецируют пространственно-структурированную засветку. С направления, отличного от направления освещения регистрируют изображения контролируемого объекта. Изображения содержат искаженную рельефом поверхности контролируемого объекта структуру спроецированной подсветки. Для каждой точки на изображении контролируемого объекта определяют зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения. Для определения высоты рельефа поверхности контролируемого объекта определяют координаты точки в пространстве, в которой зависимость интенсивности освещения от номера изображения в наибольшей степени подобна зависимости в исследуемой точке контролируемого объекта. Данную процедуру удобно выполнять с помощью многопараметрической регрессии, а именно многомерной регрессионной функции, на вход которой подают 3 параметра: координаты точки на изображении поверхности контролируемого объекта и порядковый номер изображения, на выходе – трехмерные декартовы координаты точки на поверхности исследуемого объекта:

$$(X, Y, Z) = R(X_c, Y_c, N). \quad (1.36)$$

На рисунке 1.8 изображена схема устройства, реализующего предлагаемый метод. Устройство содержит источник оптического излучения 1, пространственный модулятор интенсивности 2, фоторегистратор 3, цифровой электронный блок 4, блок регистрации результатов 5. Вход цифрового электронного блока 4 соединен с выходом фоторегистратора 3, а выход соединен с управляющим входом модулятора 2.

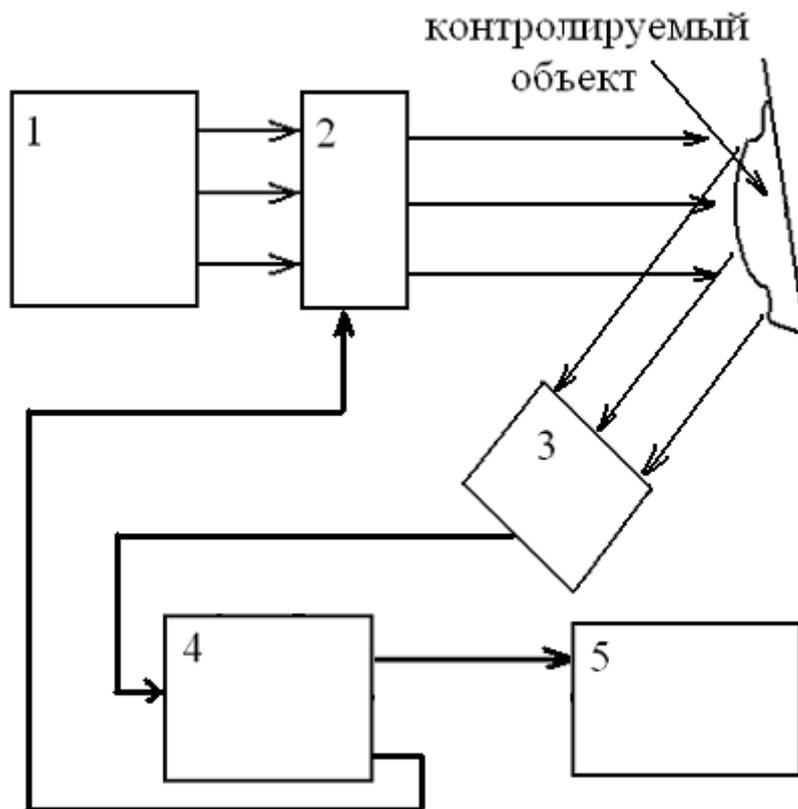


Рис.1.8. Схема устройства, реализующего метод измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов. Показаны: 1 – источник излучения, 2 – модулятор света, 3 – приемник излучения, 4 – электронный блок, 5 – запоминающее устройство.

Метод бесконтактного измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов работает следующим образом. Интенсивность оптического излучения, выходящего из источника 1, модулируется пространственным модулятором света 2. Созданная таким образом структурируемая подсветка проецируется на поверхность контролируемого объекта, рельеф которой

известным образом искажает изображение структурируемой подсветки. Фоторегистратор 3 регистрирует изображение контролируемого объекта и передает на вход электронного блока 4. Электронный блок 4 преобразует сигнал с выхода фоторегистратора 3 и записывает очередное изображение структурируемой подсветки во внутреннее запоминающее устройство. Одновременно в памяти электронного блока 4 записывается изображение структурированной подсветки, созданной пространственным модулятором 2. Перечисленная выше последовательность повторяется второй раз, но при этом по сигналу с выхода цифрового электронного блока 4 модулятор 2 формирует структурированную подсветку, соответствующую второй реализации. Число повторений вышеописанного цикла и количество реализаций структурированных подсветок устанавливаются в зависимости от требуемой погрешности определения линейных размеров контролируемого объекта и, практически, ничем не ограничены. Направления освещения и наблюдения устанавливаются различными. Профиль поверхности восстанавливается из величины искажений наблюдаемых изображений структурируемых подсветок. Если положения искажений наблюдаемых изображений структурированных подсветок определять из зависимости интенсивности в точке изображения от номера кадра и использовать функцию пространственной модуляции изображения, позволяющей расшифровывать наблюдаемые искажения, опираясь только на временную последовательность значения интенсивности в точке (например, гармоническую функцию), то метод позволяет измерять 3D геометрию крупногабаритных объектов с малой погрешностью, зависящей от количества проецируемых изображений и отношения сигнал/шум приемника оптического излучения. Если отражательные свойства измеряемого объекта будут обеспечивать попадание яркости наблюдаемых структурированных подсветок в динамический диапазон фотоприемника, то погрешность измерения не будет зависеть от отражательных свойств поверхности измеряемого объекта.

Преимущества предложенного метода многопараметрической триангуляции на основе структурированного освещения заключаются в возможности статистического накопления экспериментальных данных путем увеличения количества реализаций структурированных засветок. Используя соответствующую многопараметрическую регрессионную функцию, восстанавливают трехмерную геометрию с необходимым уровнем точности. Метод обладает регрессионной устойчивостью к нестационарным локальным искажениям и может эффективно быть применен для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах.

1.3. Триангуляционный метод с использованием структурированного освещения для измерения трехмерной геометрии в фазово-неоднородных средах

Среди триангуляционных методов с использованием структурированного освещения наиболее перспективен метод фазовой триангуляции [85,93-98]. Здесь в качестве структурированной засветки исследуемого объекта используется изображение в виде параллельных полутонных синусоидальных полос (рис. 1.9). Наблюдаемые искажения структурированной засветки на принимаемом изображении определяют через смещение фазы зондирующей синусоиды.



Рис.1.9. Изображение структурированной засветки в виде параллельных полутоновых синусоидальных полос

Дальность до объекта будет связана со смещением фазы на изображении таким выражением:

$$\frac{\Delta j(x, y)}{2p} = \frac{z(x, y)}{p / \tan(q)}, \quad (1.37)$$

где p – расстояние между камерой и проектором, q – угол, образованный оптическими осями камеры и проектора.

Так как получаемые изображения исследуемого объекта очень похожи на интерферограммы, то при обработке таких изображений применяют широкий спектр методов обработки интерферограмм. Интенсивность наблюдаемого структурированного изображения можно описать следующим выражением:

$$I(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y))), \quad (1.38)$$

где $I(x,y)$ - распределение интенсивности в фазовой картине; $A(x,y)$ – распределение фоновой интенсивности; $V(x,y)$ – средняя видность; $\varphi(x,y)$ - искомое распределение разности фаз волновых фронтов. Интенсивность освещения каждой точке структурированного изображения является функцией трех априори неизвестных параметров: фоновой интенсивности $A(x,y)$, средней видности $V(x,y)$ и разности фаз между волновыми фронтами $\varphi(x,y)$ (параметр, который мы хотим измерить). Очевидно, что точность определения смещения волновых фронтов ограничена. Для уменьшения погрешности измерения используют дополнительную обработку пространственного распределения интенсивности на зарегистрированном изображении. Преимущества метода фазовой триангуляции заключаются в устойчивости к расфокусировке оптической схемы излучающего и приемного устройств. Связано это с тем, что расфокусировка действует как низкочастотный пространственный фильтр. Регистрируемые фазовые картины устойчивы к низкочастотной фильтрации, особенно если пространственная частота полос попадает в полосу пропускания фильтра.

Для уменьшения погрешности измерения используют известный метод фазовых шагов [99-104]. Здесь дополнительную информацию для определения разности фаз получают, последовательно вводя известный сдвиг фаз между двумя проецируемыми изображениями синусоидальных полос и каждый раз записывая получающиеся изображения исследуемого объекта (рис 1.10). На основе полученных данных для каждой точки изображения вычисляют три неизвестных параметра: фоновую интенсивность, среднюю видность и искомое значение разности фаз волновых фронтов.

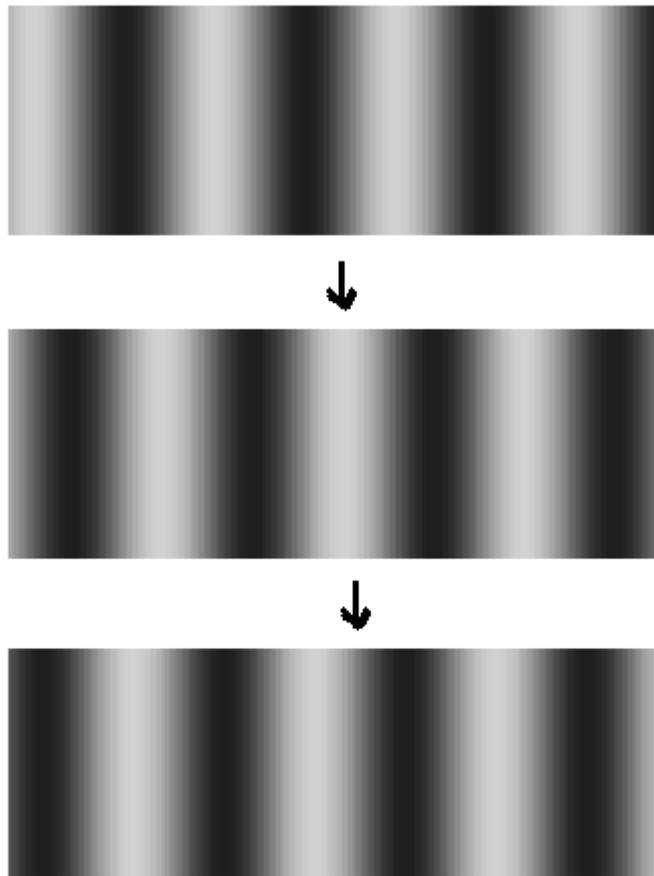


Рис.1.10. Серия структурированных засветок в методе фазовых шагов в виде синусоидальных полутоновых полос с последовательным смещением начальной фазы.

Задача определения разности фаз методом “фазового сдвига” сводится к решению системы трансцендентных уравнений вида:

$$I_i(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta_i)),$$

$$i \in 0 \dots N - 1, \quad (1.39)$$

где $I_i(x, y)$ - распределение интенсивности на i -м изображении контролируемого объекта; $A(x, y)$ – распределение фоновой интенсивности; $V(x, y)$ – средняя видность; $\varphi(x, y)$ – искомое распределение разности фаз, кодирующее информацию дальности объекта; δ_i – вносимый сдвиг фазы между соседними изображениями структурированной засветки; N – число сдвигов. Система уравнений (1.39) имеет решение, если имеется как

минимум 3 изображения с различными распределениями интенсивности $I_i(x, y)$. Далее для упрощения выражений обозначение (x, y) опустим, φ будем называть фазой изображения, а символом δ_i будем обозначать i -й сдвиг фазы.

В случае, когда $\delta_i = (i-1) \cdot 2\pi / N$, решение системы уравнений (1.39) можно найти разложением в ряд Фурье [58,105-106], либо с использованием ортогональных отношений тригонометрических функций:

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^N I_i \cos(i\delta_i)}{\sum_{i=1}^N I_i \sin(i\delta_i)}. \quad (1.40)$$

В результате значение фазы изображения в точке зависит только от зависимости интенсивности изображения в этой точке от номера кадра. Также несложно показать, что в условиях аддитивных шумов на фазовых картинах погрешность определения фазы изображения можно уменьшить, используя большее количество сдвигов в проецируемых изображениях.

Метод фазовых шагов перспективен для прецизионных измерений трехмерной геометрии в условиях фазово-неоднородных сред. Это связано с тем, что искажения, вносимые в процесс измерения фазово-неоднородной средой, имеют статистические характеристики подобные статистическим характеристикам аддитивных оптических и электронных шумов, в условиях которых данный метод работает особенно эффективно.

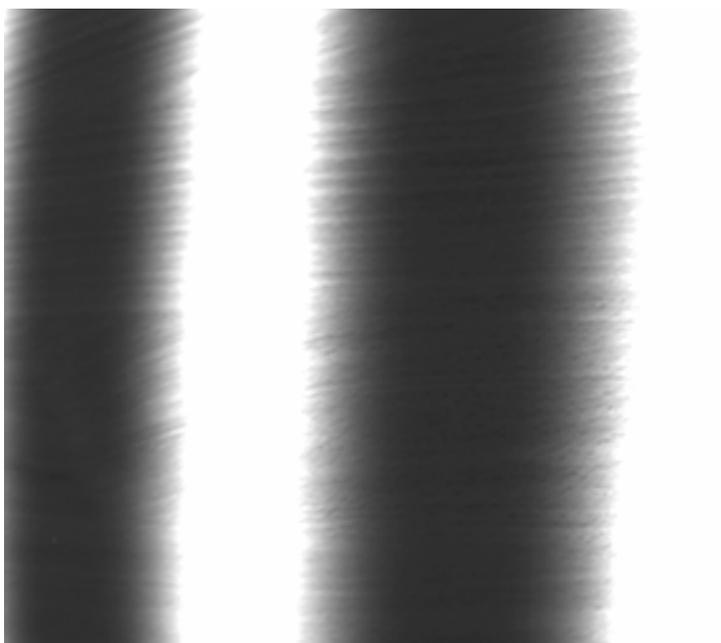


Рис.1.11. Фрагмент фазового изображения, имеющий области недостоверных точек, обусловленные ограниченным динамическим диапазоном камеры.

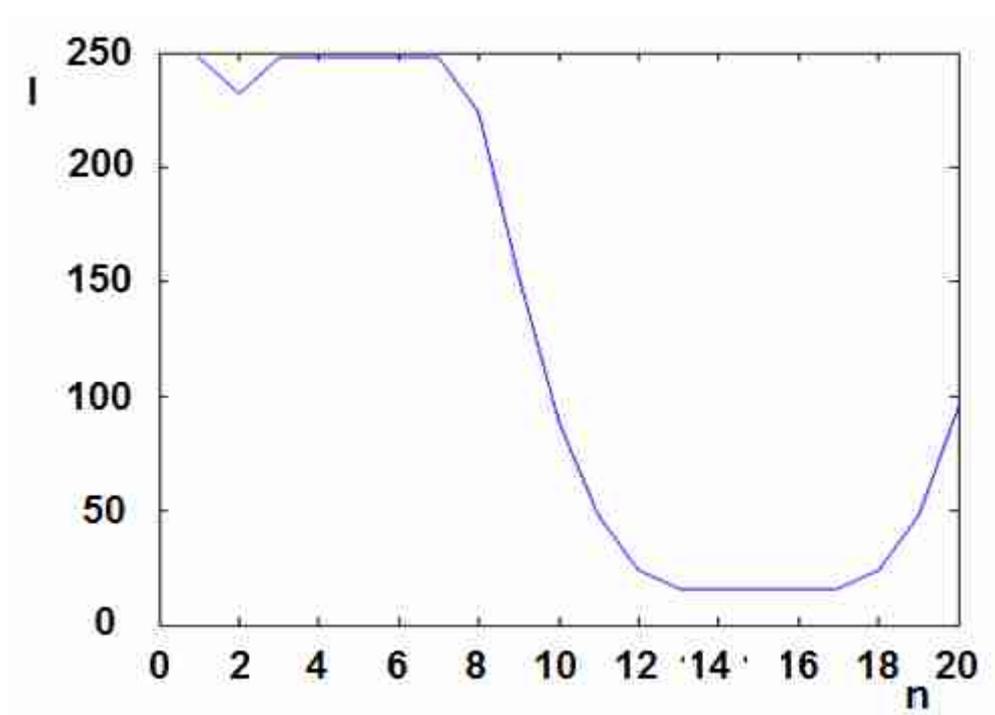


Рис.1.12. Фрагмент синусоиды на изображении “засвеченного” фазового изображения. Показаны: I – интенсивность пикселя в показаниях АЦП, n – порядковый номер пикселя.



Рис.1.13. Измерение трехмерной геометрии автомобильного кузова. Для снижения влияния неравномерных светорассеивающих свойств на поверхность автомобиля нанесено матовое покрытие.

Главный недостаток метода заключается в том, что он не работает при произвольных фазовых сдвигах. В условиях ограниченного динамического диапазона камеры по энергии необходимо жестко согласовывать яркость источника структурированного освещения и чувствительность принимающей камеры. При произвольных светорассеивающих свойствах поверхности измеряемого объекта это сделать крайне сложно (рис 1.11, 1.12). Поэтому часто на поверхность измеряемого объекта наносят специальное матовое покрытие (рис. 1.13), что ограничивает достижимую погрешность и функциональность измерений. В связи с этим, необходимо было разработать метод, позволяющий расшифровывать фазовые изображения с произвольными пошаговыми сдвигами в условиях наличия аддитивных шумов на фазовых изображениях, имеющих гауссово распределение и нулевое математическое ожидание.

1.4. Методы расшифровки структурированных изображений для измерения трехмерной геометрии статичных крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах

Для расшифровки фазовых изображений с произвольными пошаговыми сдвигами известны несколько подходов, основанных на решении системы трансцендентных уравнений [107-109]. Представим выражение (1.38) в векторной форме:

$$I = AR + (AV \cos f)C + (AV \sin f)S, \quad (1.41)$$

где $R = (1, \dots, 1)^T$, $C = (\cos d_0, \dots, \cos d_{N-1})^T$, $S = (\sin d_0, \dots, \sin d_{N-1})^T$, а размерность векторов определяется числом фазовых сдвигов. Несложно показать, что

$$AV \sin f = \frac{I \cdot C^\perp}{S \cdot C^\perp}, \quad (1.42)$$

$$AV \cos f = \frac{I \cdot S^\perp}{C \cdot S^\perp}, \quad (1.43)$$

где оператор $a \cdot b$ означает скалярное произведение векторов, а S^\perp и C^\perp - векторы, ортогональные векторам S, R и C, R соответственно. Учитывая свойства скалярного произведения, получим $S \cdot C^\perp = C \cdot S^\perp$. Тогда

$$f = \arctan \frac{I \cdot C^\perp}{I \cdot S^\perp} \quad (1.44)$$

или

$$f = \arctan \frac{I^\perp \cdot C}{I^\perp \cdot S} \quad (1.45)$$

В последнем случае требуется определить лишь один вектор I^\perp . Для этого удобно использовать матричный оператор $I^\perp = MI$. Матрица преобразования M должна удовлетворять следующим требованиям: $(MI)I=0$ и $MR=0$.

Например, при трех фазовых сдвигах этим условиям удовлетворяет кососимметричная матрица

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.46)$$

Тогда из (1.45) получим следующий алгоритм расшифровки:

$$f = \arctan \frac{(MI) \cdot C}{(MI) \cdot S} = \arctan \frac{(I_1 - I_2)c_0 + (I_2 - I_0)c_1 + (I_0 - I_1)c_2}{(I_1 - I_2)s_0 + (I_2 - I_0)s_1 + (I_0 - I_1)s_2}, \quad (1.47)$$

где $c_i = \cos d_i$ и $s_i = \sin d_i$ - соответствующие компоненты векторов C и S .

При нечетном числе фазовых сдвигов больше трех матрица M получается путем симметричного продолжения матрицы (1.46):

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & : & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & : & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & : & 1 & -1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 1 & -1 & : & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & : & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & : & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.47)$$

При четном количестве фазовых сдвигов матрицу M можно представить в виде

$$M = \begin{bmatrix} 0 & B \\ -B & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1 & 1 & : & -1 & 1 \\ 1 & -1 & : & 1 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 1 & : & -1 & 1 \\ 1 & -1 & : & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (1.48)$$

При четырех фазовых сдвигах получим следующий алгоритм:

$$f = \arctan \frac{(I_2 - I_3)(c_1 - c_0) + (I_1 - I_0)(c_2 - c_3)}{(I_2 - I_3)(s_1 - s_0) + (I_1 - I_0)(s_2 - s_3)}. \quad (1.49)$$

Описанный алгоритм расшифровки фазовых изображений с пошаговым сдвигом обеспечивает расшифровку фазовых изображений при произвольных фазовых сдвигах. Однако данный метод не в полной мере учитывает наличие аддитивных и мультипликативных шумов на фазовых картинах. Поэтому, этот метод не может обеспечить минимизацию ошибки определения фазы в присутствии шумов на анализируемых изображениях. Для практического применения данного метода авторы, как правило, используют предварительную фильтрацию исходных фазовых изображений, либо применяют данный метод для ограниченного класса задач.

Для решения научной и технической проблемы измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов триангуляционными методами структурированного освещения в условиях фазово-неоднородных сред, необходимо разработать устойчивые методы расшифровки структурированных изображений. Автором предложен новый метод

расшифровки фазовых изображений, обеспечивающий минимизацию ошибки определения фазы на структурированных изображениях.

Представим выражение (1.39) в виде:

$$I_i = A + B \cdot \sin(\delta_i) + C \cdot \cos(\delta_i), \quad (1.50)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{B}{C}\right), \quad (1.51)$$

$$V = \frac{\sqrt{B^2 + C^2}}{A}. \quad (1.52)$$

Коэффициенты A , B , C будем определять из условия минимизации функционала невязки между экспериментальными и теоретическими данными $S(A, B, C)$:

$$S(A, B, C) = \sum_{i=1}^N (I_i - A - B \cdot \sin(d_i) - C \cdot \cos(d_i))^2. \quad (1.53)$$

Условие минимизации $S(A, B, C)$ - равенство нулю всех частных производных:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \frac{\partial S}{\partial C} = 0. \quad (1.54)$$

В результате имеем систему из трех линейных уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cdot A + k_2 \cdot B + k_3 \cdot C = k_7 \\ k_2 \cdot A + k_4 \cdot B + k_5 \cdot C = k_8 \\ k_3 \cdot A + k_5 \cdot B + k_6 \cdot C = k_9 \end{cases}, \quad (1.55)$$

где $k_1 \dots k_9$, определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} k_1 &= N; \\ k_2 &= \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i); \\ k_3 &= \sum_{i=1}^N \sin(\delta_i); \\ k_4 &= \sum_{i=1}^N \cos^2(\delta_i); \\ k_5 &= \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i) \cdot \sin(\delta_i); \\ k_6 &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\delta_i); \\ k_7 &= \sum_{i=1}^N I_i; \\ k_8 &= \sum_{i=1}^N I_i \cdot \cos(\delta_i); \\ k_9 &= \sum_{i=1}^N I_i \cdot \sin(\delta_i); \end{aligned} \quad (1.56)$$

Решая систему линейных уравнений (1.55), получаем следующие выражения для А, В, С:

$$A = -\frac{k_5^2 \cdot k_7 - k_4 \cdot k_6 \cdot k_7 - k_3 \cdot k_5 \cdot k_8 + k_2 \cdot k_6 \cdot k_8 + k_3 \cdot k_4 \cdot k_9 - k_2 \cdot k_5 \cdot k_9}{-k_3^2 \cdot k_4 + 2 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5 - k_1 \cdot k_5^2 - k_2^2 \cdot k_6 + k_1 \cdot k_4 \cdot k_6}, \quad (1.57)$$

$$B = -\frac{k_3 \cdot k_5 \cdot k_7 - k_2 \cdot k_6 \cdot k_7 - k_3^2 \cdot k_8 + k_1 \cdot k_6 \cdot k_8 + k_2 \cdot k_3 \cdot k_9 - k_1 \cdot k_5 \cdot k_9}{k_3^2 \cdot k_4 - 2 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5 + k_1 \cdot k_5^2 + k_2^2 \cdot k_6 - k_1 \cdot k_4 \cdot k_6}, \quad (1.58)$$

$$C = -\frac{-k_3 \cdot k_4 \cdot k_7 - k_2 \cdot k_5 \cdot k_7 - k_2 \cdot k_3 \cdot k_8 + k_1 \cdot k_5 \cdot k_8 + k_2^2 \cdot k_9 - k_1 \cdot k_4 \cdot k_9}{k_3^2 \cdot k_4 - 2 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5 + k_1 \cdot k_5^2 + k_2^2 \cdot k_6 - k_1 \cdot k_4 \cdot k_6}. \quad (1.59)$$

Откуда φ вычисляется из выражения (1.51). Среднеквадратичное отклонение измеренной интенсивности $S(A,B,C)$ и среднеквадратичное отклонение фазы $\sigma(A,B,C)$ оцениваются следующими выражениями:

$$S(A, B, C) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i - A - B \cdot \sin(d_i) - C \cdot \cos(d_i))^2}, \quad (1.60)$$

$$\sigma(A, B, C) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\arccos(\frac{I_i - A}{\sqrt{A^2 + B^2}}) + \arctan(\frac{B}{C}) - d_i)^2}. \quad (1.61)$$

В основе представляемого метода определения фазового сдвига лежит классический метод гармонической регрессии [110]. Метод гармонической регрессии является разновидностью метода наименьших квадратов (МНК). В основе МНК лежит процедура минимизации функционала невязки между экспериментальными и теоретическими данными путем вариации искомых параметров в ограниченном объеме их возможных значений. Поэтому предлагаемый метод определения фазового сдвига дает устойчивое решение системы уравнений (1.39), то есть гарантирует минимизацию ошибки определения фазы. Так как в основе метода лежит МНК, то минимизация ошибки гарантирована при наличии шумов, имеющих нулевое математическое ожидание M и постоянную дисперсию D [120] в выборке, соответствующей определенным координатам (x,y) :

$$M(x, y) = M(\{I_i(x, y), i \in 1..N\}) = 0, \quad (1.62)$$

$$D(x, y) = D(\{I_i(x, y), i \in 1..N\}) = const. \quad (1.63)$$

Из выражения (1.51) следует, что фаза φ не зависит от распределения фоновой интенсивности A . Именно поэтому предложенный метод обеспечивает минимизацию ошибки определения φ при наличии шумов, имеющих постоянные математическое ожидание и дисперсию.

Необходимое и достаточное условие определения фазы φ – невырожденность системы линейных уравнений (1.55):

$$\text{rank} \begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i) & \sum_{i=1}^N \sin(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i) & \sum_{i=1}^N \cos^2(\delta_i) & \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i) \cdot \sin(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^N \sin(\delta_i) & \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i) \cdot \sin(\delta_i) & \sum_{i=1}^N \sin^2(\delta_i) \end{pmatrix} = 3. \quad (1.64)$$

Так как выражение (1.64) зависит только от δ_i и N , то оно определяет необходимые и достаточные условия нахождения решения системы уравнений (1.39) предложенным методом в зависимости от значений вносимых сдвигов δ_i и их количества N .

Алгоритмическая сложность предлагаемого метода определения фазового сдвига в зависимости от параметра N складывается из сложности всех шагов определения фазы. Учитывая, что имеется линейная зависимость от N в формулах определения коэффициентов $k_1 \dots k_9$, то сложность всего метода можно оценить как $O(N)$.

Выполним верификацию предложенного метода. Для этого сравним результат работы представленного метода определения фазового сдвига на основе гармонической регрессии и обобщенного алгоритма расшифровки фазовых изображений на основе векторного представления выражения (1.39) [96]. Оценивать результат работы будем по величине отклонения измеренной величины фазы от известной исходной:

$$\varepsilon = \Psi - \varphi, \quad (1.65)$$

где ε – величина отклонения измеренной величины фазы от исходной; ψ – величина фазы, полученная с применением соответствующего метода; φ – исходная фаза. Исходная фаза задается путем моделирования типичного распределения интенсивности на фазовых картинах. Так как сравниваемые методы могут работать при произвольных δ , то сдвиги при генерировании фазовых картин будем задавать в виде произвольного набора случайных величин с равномерным распределением на отрезке $[0, 2\pi)$. Фазовые картины сформируем с фоновой интенсивностью $A=10$ и видностью $V=0,5$. Распределение интенсивности в фазовых картинах зададим согласно уравнению (1.38) с добавлением аддитивного шума (рис. 1.14, 1.15). Шум представляет собой случайную величину с гауссовым распределением. Уровень шума будем характеризовать среднеквадратичным отклонением от величины фоновой интенсивности.

Проверим, зависит ли погрешность работы обоих методов от величины найденной фазы φ при постоянном шуме и одинаковом количестве фазовых картин N . Для этого построим зависимость величины отклонения ε измеренной величины фазы от исходной для различных значений фазы φ , заданной на интервале $[0, 2\pi)$. Количество фазовых картин $N=50$. СКО шума равно 1% от величины фоновой интенсивности A в выражении (1.38).

Для уменьшения стохастического характера графиков использовались 200 различных наборов фазовых картин и на графике фиксировались максимальные полученные отклонения измеренной фазы. Такая процедура применялась во всех далее описанных экспериментах.

На рис. 1.16 представлены полученные зависимости ε от φ . Видно, что предлагаемый устойчивый метод обеспечивает как минимум на порядок меньшее отклонение полученной фазы, не зависящее от измеряемой величины исходной фазы φ .

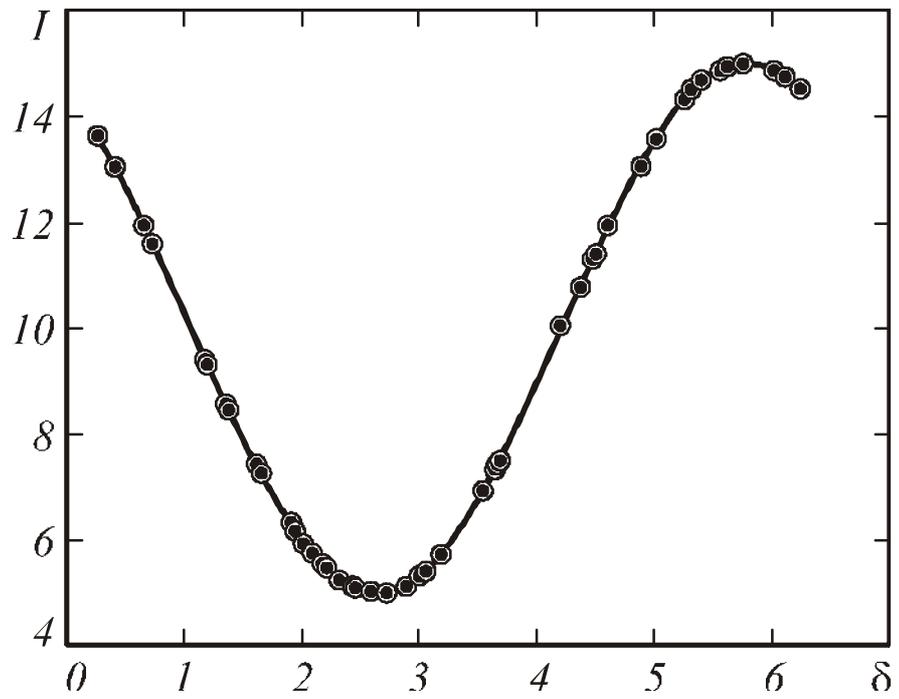


Рис.1.14. Зависимость интенсивности в фазовых картинах от фазового сдвига без добавления шума.

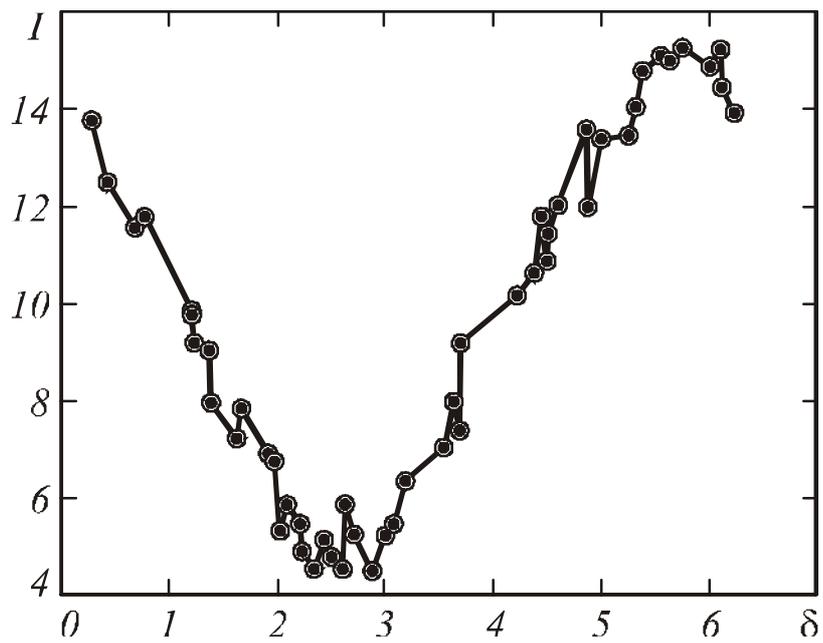


Рис.1.15. Зависимость интенсивности в фазовых картинах от фазового сдвига с добавлением аддитивного шума

На практике фазовые картины, как правило, содержат шумы аддитивного характера. Поэтому полезно оценить погрешность определения фазы в зависимости от уровня аддитивного шума на фазовых изображениях.

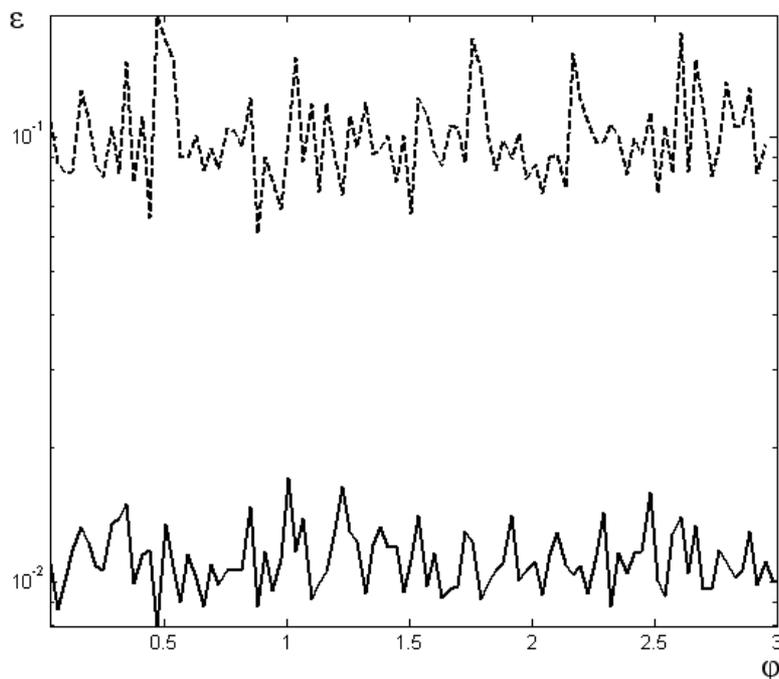


Рис.1.16. Отклонение фазы, измеренной методом обработки фазовых изображений на основе векторного представления системы уравнений (пунктирная линия) и устойчивым методом определения фазового сдвига на основе гармонической регрессии (сплошная линия) при различных значениях фазы φ .

Оценим отклонение измеренной величины фазы от исходной ε в зависимости от уровня шума, накладываемого на распределение интенсивности в фазовой картине при постоянном количестве сдвигов. Так как величина исходной фазы φ не влияет на ε , то она выбрана равной 0,5 радиан. Количество фазовых картин $N=50$. СКО шума H , накладываемого на распределение интенсивности, принимает значения в интервале 0-100% от фоновой интенсивности A (выражение (1.38)).

Полученная зависимость отклонения измеренной фазы в зависимости от уровня шума представлена на рис. 1.17. Для метода обработки фазовых

изображений на основе векторного представления системы уравнений (1.39) ошибка превышает 100% при дисперсии шума более 10%. Метод обработки фазовых картин на основе векторного представления системы уравнений (1.39) дает недостоверные результаты при дисперсии шума более 10% от величины фоновой интенсивности. Предложенный метод определения фазового сдвига на основе гармонической регрессии обеспечивает погрешность менее 50% при дисперсии шума менее 20%.

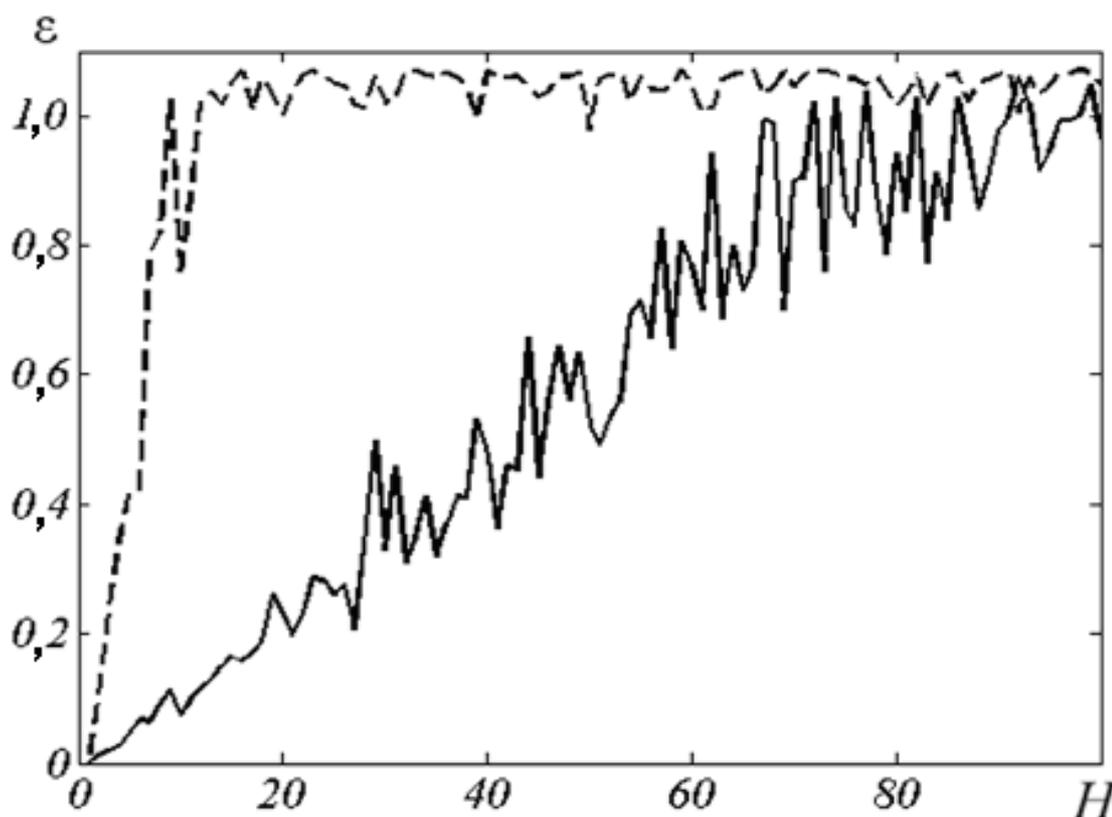


Рис.1.17. Отклонение измеренной фазы от уровня шума в распределении интенсивности. Метод обработки фазовых изображений на основе векторного представления системы уравнений (1.39) (пунктирная линия) и устойчивый метод определения фазового сдвига на основе гармонической регрессии (сплошная линия).

В эксперименте количество реализаций фазовых изображений N всегда ограничено. При этом важно знать оптимальное количество реализаций для расшифровки фазовых картин с заданной погрешностью. Проведем

сравнительный анализ методов в случае восстановления фазы по ограниченному набору N реализаций фазовых изображений. Будем анализировать погрешность определения фазы ψ в зависимости от количества N . Уровень аддитивного шума зададим постоянным, с СКО равным 5% от уровня фоновой интенсивности. Величина определяемой фазы неизменна и задана равной 0,5 радиан.

Результаты анализа методов представлены на рис. 1.18. С увеличением N ошибка определения фазы алгоритмом на основе векторного представления системы трансцендентных уравнений качественно не уменьшается.

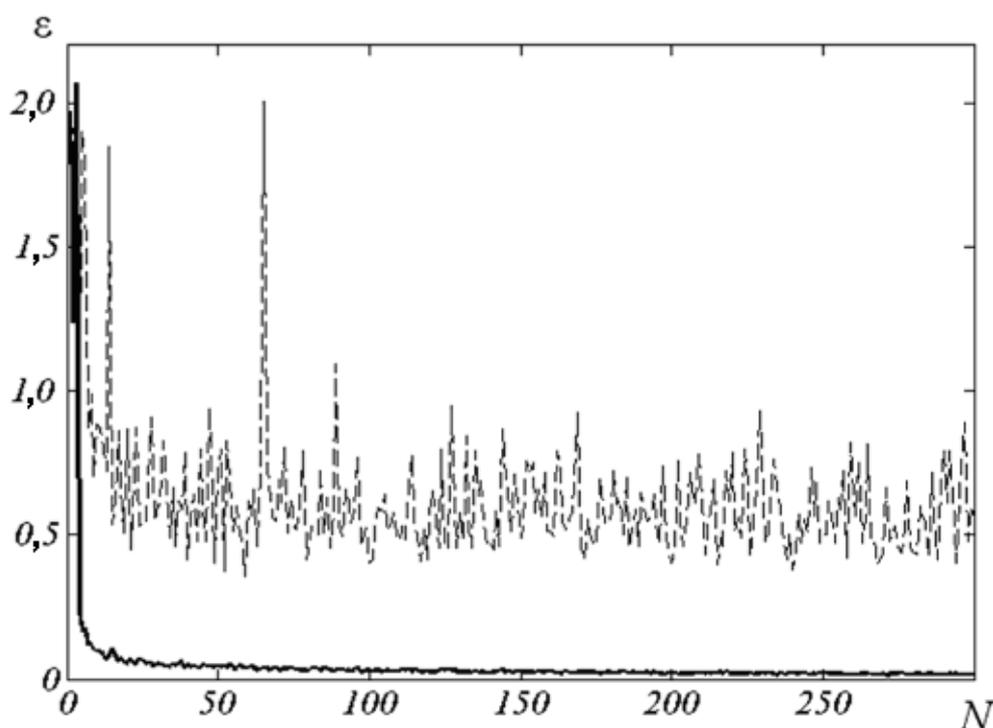


Рис.1.18. Отклонение измеренной фазы от числа сдвигов. Метод обработки фазовых картин на основе векторного представления системы уравнений (1.39) (пунктирная линия) и устойчивый метод определения фазового сдвига на основе гармонической регрессии (сплошная линия).

Даже при малых N (за исключением $N < 5$) погрешность метода расшифровки фазовых картин на основе векторного представления системы

уравнений (1.39) в несколько раз выше, чем у представленного метода на основе гармонической регрессии. Результаты моделирования в целом демонстрируют устойчивость предложенного метода к шумам, его малую погрешность при работе с ограниченным набором фазовых изображений и практическую ценность.

Таким образом, предложен устойчивый метод расшифровки структурированных изображений, обеспечивающий минимизацию погрешности измерения трехмерной геометрии при наличии шумов на анализируемых изображениях. Рассмотрен обобщенный алгоритм, позволяющий получать решение системы трансцендентных уравнений (1.39) при произвольных фазовых сдвигах зондирующего сигнала.

Показана устойчивость метода при наличии шумов в серии измерений интенсивности структурированных изображений в одной точке, имеющих постоянные дисперсию и математическое ожидание. Приведена оценка среднеквадратичного отклонения измеренного отклонения наблюдаемого изображения, позволяющая оценивать достоверность результатов. Показано необходимое и достаточное условие для решения задачи предложенным методом. Оценена сложность алгоритма в зависимости от количества изображений с различными структурированными изображениями. Проведен сравнительный анализ работы представленного в данной работе метода и обобщенного алгоритма расшифровки фазовых изображений на основе векторного представления системы трансцендентных уравнений [108]. Результаты анализа продемонстрировали в несколько раз более низкую погрешность измерения при работе с ограниченным набором изображений и практическую ценность.

Использование данного метода при обработке изображений пространственно модулированных засветок в методе фазовых шагов обеспечит минимизацию ошибки определения смещения начальной фазы зондирующей синусоиды, так как принимаемые изображения измеряемого объекта имеют вид фазовых изображений с пошаговым сдвигом начальной

фазы зондирующей синусоиды. Применение устойчивого метода расшифровки структурированных изображений позволит минимизировать погрешность измерения трехмерной геометрии методом многопараметрической триангуляции при произвольных светорассеивающих свойствах поверхности измеряемого объекта в условиях фазово-неоднородной среды.

1.5. Метод компенсации нелинейности тракта источник – приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения

Энергетическая характеристика многих устройств, используемых для ввода, печати или визуализации изображений, соответствует степенному закону

$$s = cr^g, \quad (1.66)$$

где c и g являются положительными константами. Часто уравнение (1.66) записывают в виде

$$s = c(r + e)^g, \quad (1.67)$$

для того, чтобы ввести смещение, т.е. начальную яркость, когда на вход фотоприемника поступает нулевой оптический сигнал. Приборы, применяемые автором в качестве источника и приемника оптического излучения, также обладают степенным видом энергетической характеристики. Графики зависимостей s от r при различных значениях g показаны на рис. 1.19.

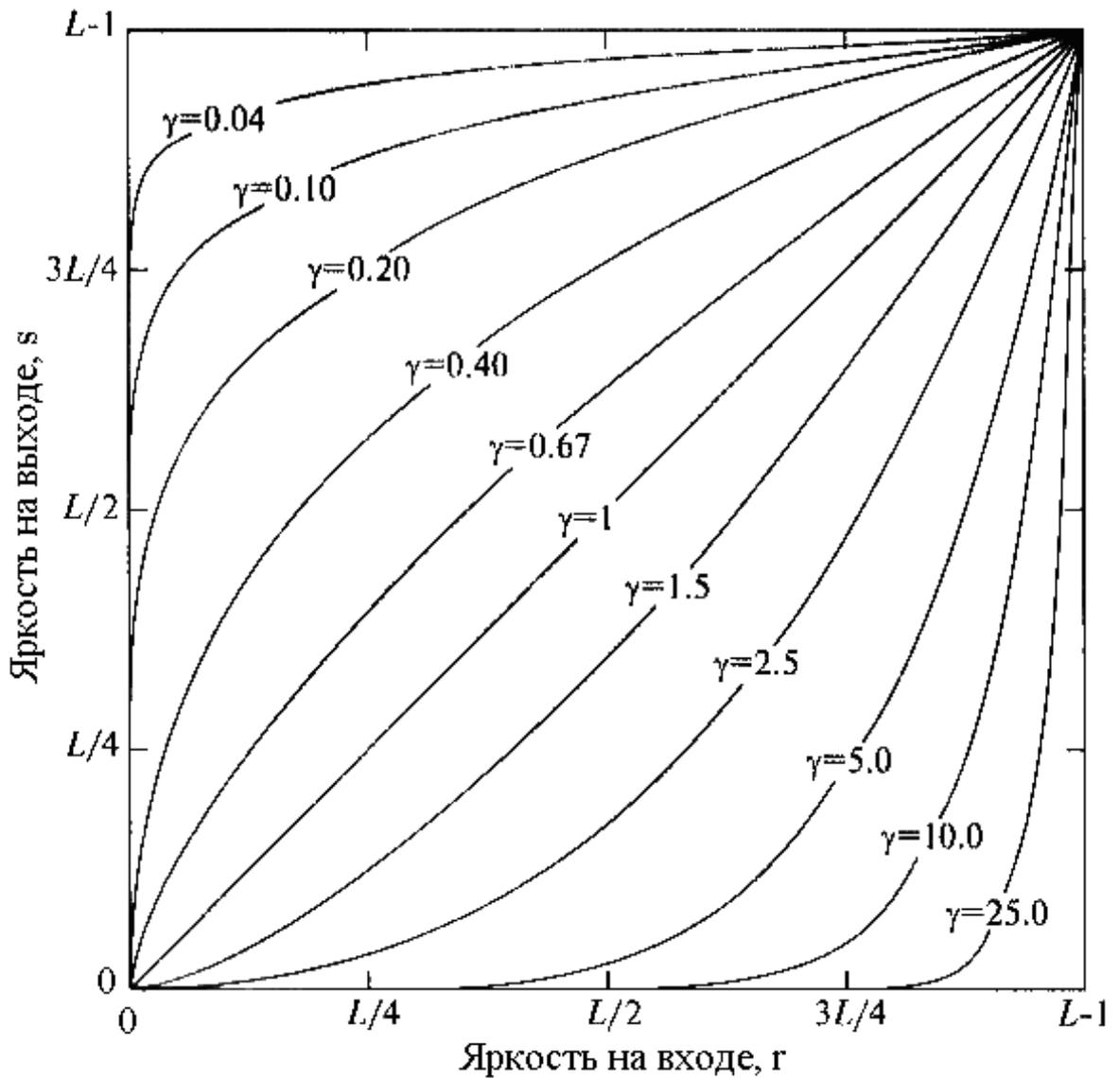


Рис.1.19. Графики уравнения $s = cr^g$, для различных значений g ($c=1$ во всех случаях).

Большинство современных устройств формирования изображений имеют степенную зависимость с показателем степени в районе от 1.8 до 2.5. Эта тенденция берет свое начало от мониторов с электронно-лучевыми трубками, у которых яркость свечения имела степенную зависимость от напряжения. На рис. 1.20 показано изображение линейного полутонового клина, которое подают на вход монитора. Изображение на экране монитора оказывается темнее, чем должно быть.

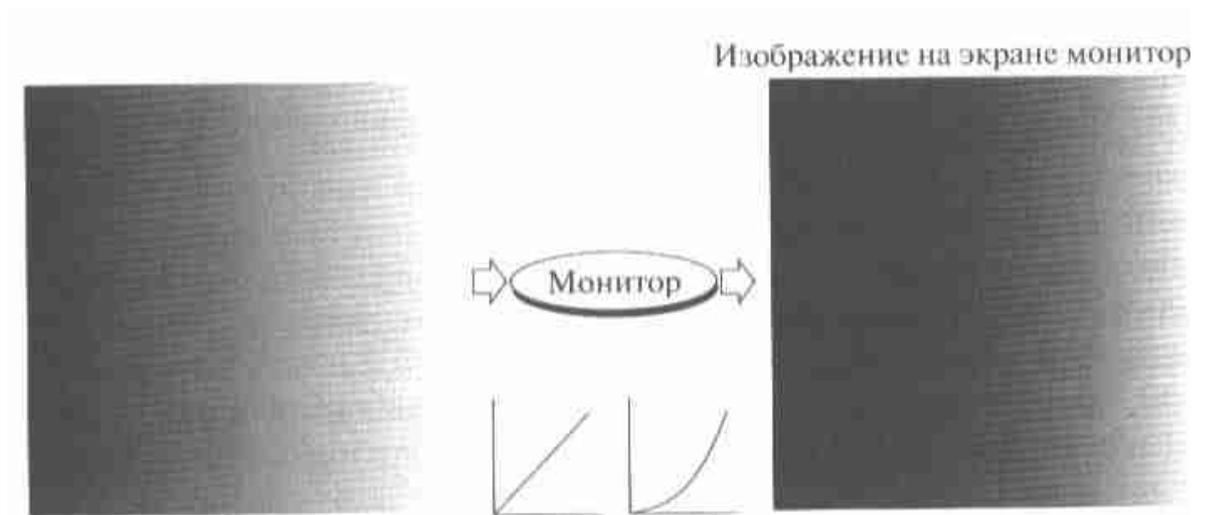


Рис.1.20. Полутоновое изображение с линейным клином (слева) и отклик монитора на линейный клин (справа).

Очевидно, что при использовании метода, основанного на методе фазовой триангуляции, необходимо контролировать линейность приемно-передаточного тракта между источником оптического излучения и приемником изображения. Наличие нелинейной приемно-передаточной характеристики тракта между источником и приемником пространственно модулированного освещения может вызвать сложно прогнозируемые систематические погрешности, которые будут зависеть от величины смещения фазы (рис. 1.21).

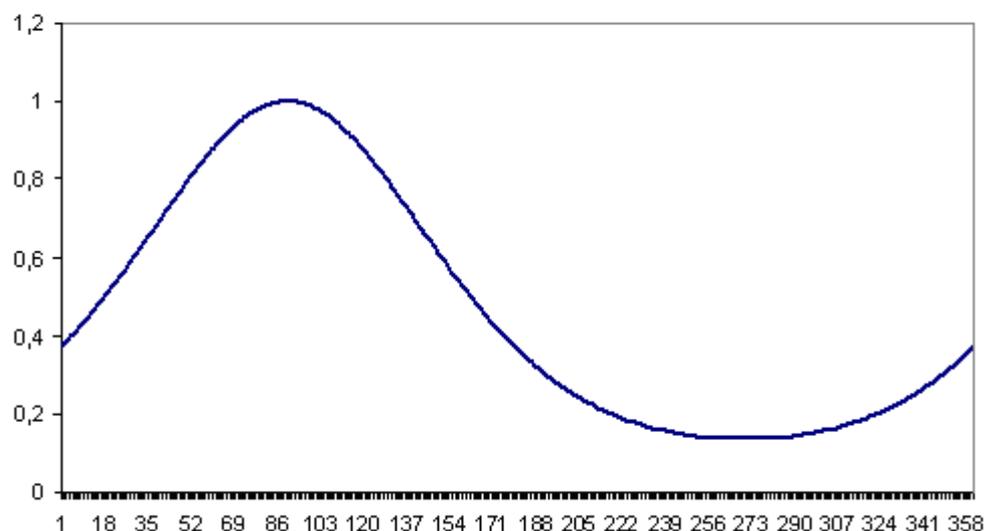


Рис.1.21. Вид синусоидального сигнала после степенного преобразования.

К настоящему времени разработаны [129-135] методы компенсации, основанные на последовательном или параллельном включении компенсирующей нелинейности, введении компенсирующей нелинейной обратной связи, введении линейных корректирующих устройств, синтезированных на основе теории инвариантности.

Преимущества метода компенсации нелинейности на основе последовательного или параллельного включения компенсирующей нелинейности заключаются в простоте реализации. Но этот метод предполагает наличие информации о нелинейности характеристики приемно-передаточного тракта, которая в нашем случае зависит от отражательных свойств измеряемого объекта, внешнего освещения и от внутренних параметров источника и приемника оптического излучения. Поэтому метод компенсации нелинейности на основе последовательного или параллельного включения компенсирующей нелинейности не применим в нашем случае.

Метод компенсации нелинейности, основанный на введении компенсирующей нелинейной обратной связи для нашей задачи также неприменим. Это связано с тем, что обратная связь подразумевает наличие информации о распределении структурированной засветки на принимаемых изображениях, определение которой является первостепенной задачей в методе оптической триангуляции.

Для компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции предложена модификация метода [120] путем дополнительной коррекции.

Пусть U – интенсивность пространственно модулированного света, излучаемая на малую область исследуемого объекта; I – интенсивность на том пикселе изображения, в который проецируется центр этой малой области. Зависимость наблюдаемой на изображении интенсивности от излучаемой источником света интенсивности можно представить некоторой нелинейной функцией K в виде

$$I = K(U). \quad (1.68)$$

Если светорассеивающие свойства объекта, параметры внешнего освещения и внутренние параметры модулятора структурированной засветки и приемника не изменяются в процессе измерения, то функция K идентична для каждого пиксела изображения. Если K является гладкой и непрерывной в диапазоне принимаемых значений, то можно вычислить обратную функцию K^{-1} .

Рассмотрим метод компенсации нелинейности тракта источник – приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции. Перед освещением измеряемого объекта серией параллельных полутонных синусоидальных полос для определения функции K проводят калибровку указанного тракта. Для этого последовательно освещают исследуемый объект, обеспечивая равномерную пространственную модуляцию источника излучения (интенсивность засветки равномерна по всей площади излучателя), и меняют интенсивность засветки по линейному закону

$$U^0(i) = U_0^0 + (i-1)dU^0, \quad (1.69)$$

где i – порядковый номер равномерной засветки, $i = 1 \dots KM$; U_0^0 – интенсивность первой реализации засветки; dU^0 – шаг приращения интенсивности засветки.

Затем для каждой точки на принятых изображениях строят зависимость интенсивности источника оптического излучения от наблюдаемой интенсивности на таком изображении

$$I(x, y) = K(x, y, U). \quad (1.70)$$

В результате получают функцию, характеризующую нелинейность тракта источник – приемник оптического излучения в целом. Далее строят обратную функцию K^{-1} , по которой восстанавливают истинное значение интенсивности излучения по значению зарегистрированной интенсивности изображения в точке:

$$U = K^{-1}(x, y, I(x, y)). \quad (1.71)$$

Следовательно, зная функцию K^{-1} , после получения изображений исследуемого объекта, освещенного параллельными синусоидальными полосами, можно восстанавливать интенсивность модулированного оптического излучения

$$Y(x, y) = K^{-1}(x, y, I(x, y)). \quad (1.72)$$

Здесь $Y(x, y)$ – распределение интенсивности света, которое проецируется на измеряемый объект. Использование функции $Y(x, y)$ вместо $I(x, y)$ в методе расшифровки фазовых изображений [120] при фазовой триангуляции позволяет исключать систематическую погрешность измерения фазы зондирующей синусоиды.

Выполним верификацию предложенного метода. Для этого сравним результаты, полученные устойчивым методом расшифровки фазовых изображений [120] без применения предложенного метода компенсации тракта источник–приемник оптического излучения и с его использованием. Оценим результаты по отклонению измеренной фазы от известной исходной

$$e = |y - j|, \quad (1.73)$$

где ψ – фаза, найденная при помощи метода компенсации.

Исходную фазу φ зададим с учетом типичного распределения интенсивности на интерференционных картинах. Так как сравниваемые методы могут работать при произвольных δ_r , сдвиги при генерировании интерференционных картин будут иметь вид произвольного набора случайных величин на отрезке $[0, 2\pi)$. Интерференционные картины сформируем с фоновой интенсивностью $A = 10$ и видимостью $V = 0,5$.

Распределение интенсивности в интерференционных картинах зададим согласно (1.66) с добавлением аддитивного шума. Шум представляет собой случайную величину с гауссовым распределением. Уровень шума будем характеризовать средним квадратическим отклонением (СКО) от фоновой интенсивности. Введем параметр T – окно, в пределах которого будем задавать различные фазовые сдвиги на интервале $(0, 2\pi]$. При $T = 2\pi$ фазовый сдвиг может принимать все возможные значения. Введение параметра T обусловлено ограниченным динамическим диапазоном фотоприемного устройства, который при наличии неотключаемых аппаратно-программных адаптационных автоматов может привести к недостоверным результатам измерения интенсивности в определенном диапазоне значений формируемых фазовых сдвигов (см. рис. 1.21).

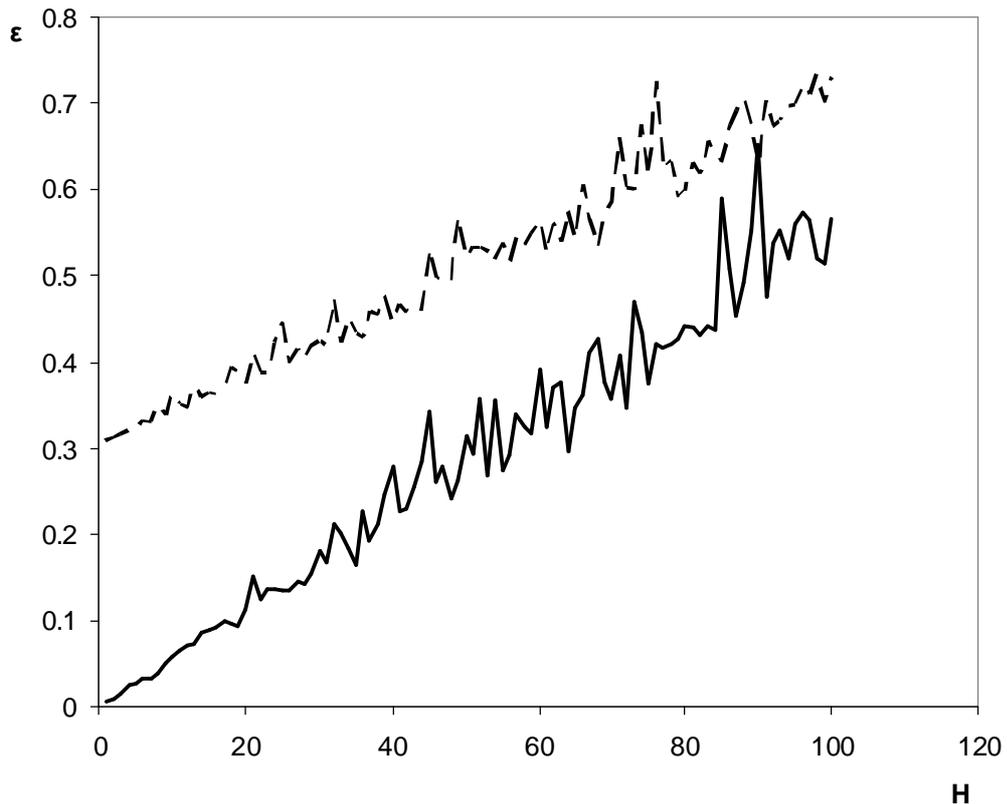


Рис.1.22. Отклонение измеренной фазы от уровня шума в распределении интенсивности. Метод расшифровки фазовых изображений без компенсации нелинейности тракта (пунктирная линия) и метод расшифровки фазовых изображений с применением метода компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения (сплошная линия).

На практике фазовые изображения, как правило, содержат шумы аддитивного характера, накладываемые регистрирующим фотоприемником и элементами приемного тракта. Поэтому полезно оценить точность определения фазы в зависимости от уровня аддитивного шума.

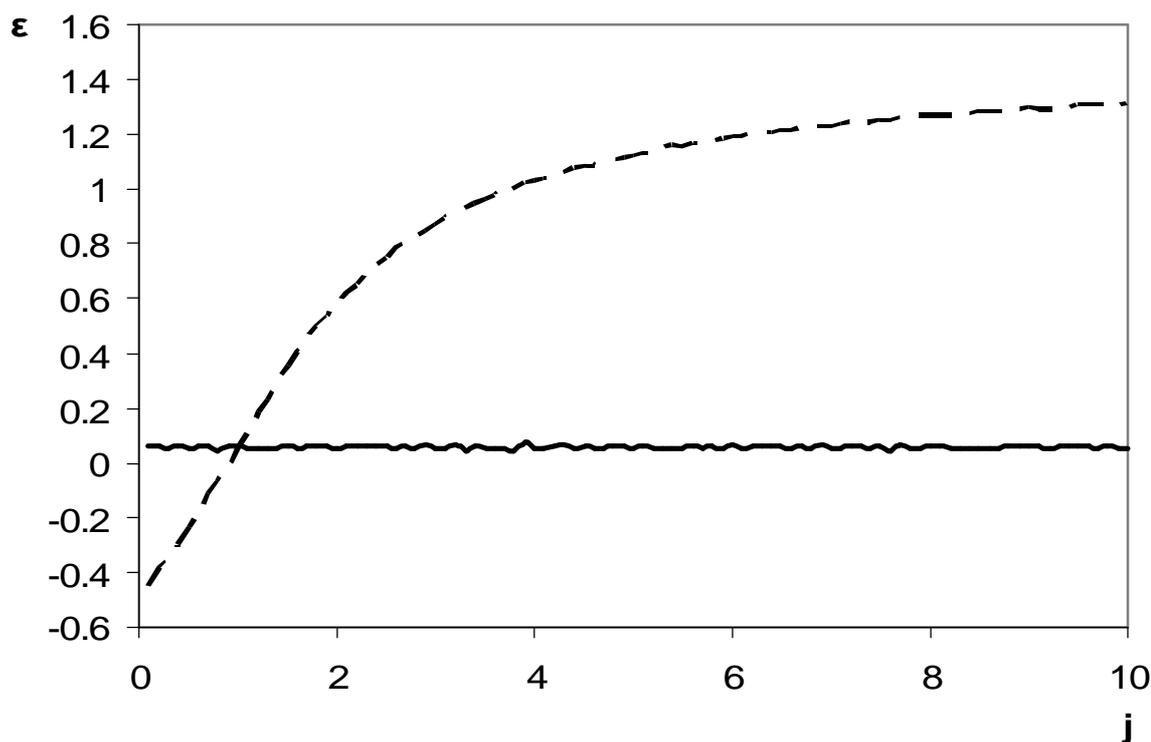


Рис. 1.23. Отклонение измеренной фазы от величины γ . Метод расшифровки фазовых изображений без компенсации нелинейности тракта (пунктирная линия) и метод расшифровки фазовых изображений с применением метода компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения (сплошная линия).

Найдем отклонение ε измеренной фазы от исходной в зависимости от уровня шума, накладываемого на распределение интенсивности в регистрируемой картине при постоянных количестве сдвигов и $T = 0,875\pi$. Количество регистрируемых фазовых картин $N = 50$; параметр $\gamma = 1,5$; СКО шума H , накладываемого на распределение интенсивности, составляет 0 ... 100 % фоновой интенсивности A . Для уменьшения стохастического характера графиков будем использовать 200 различных наборов регистрируемых фазовых картин, а на графике фиксировать максимальные полученные отклонения измеренной фазы. Такая процедура выполнена во всех описанных далее экспериментах.

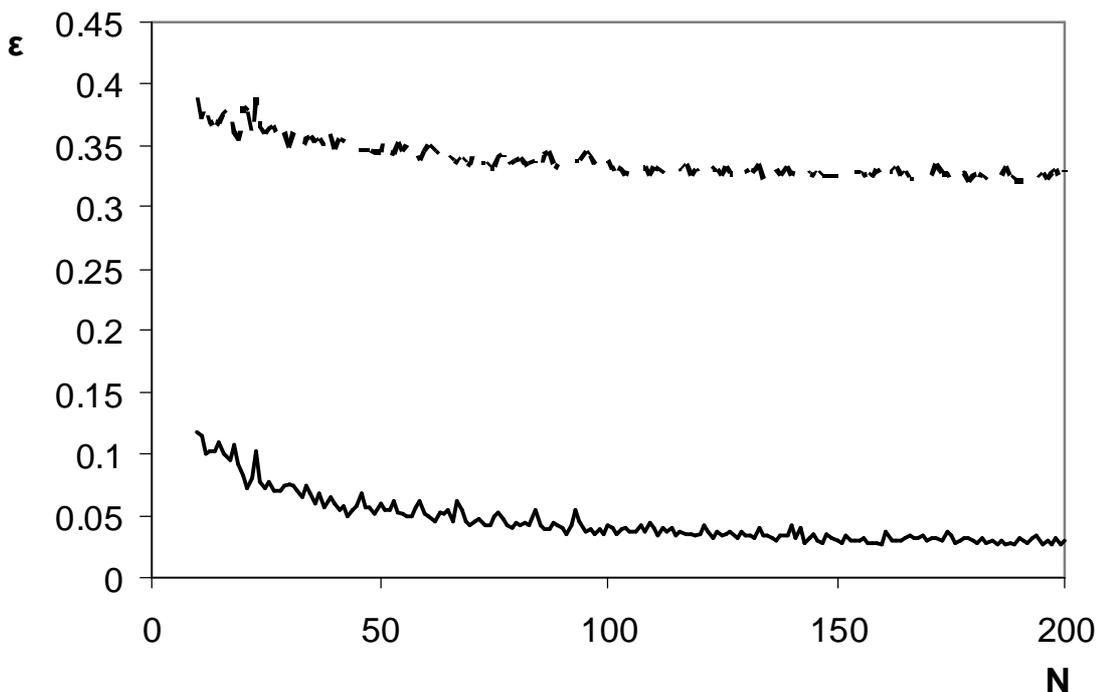


Рис. 1.24. Отклонение измеренной фазы для различного числа сдвигов. Метод расшифровки фазовых изображений без компенсации нелинейности тракта (пунктирная линия) и метод расшифровки фазовых изображений с применением метода компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения (сплошная линия).

Представленные на рис. 1.22 результаты демонстрируют, что в обоих случаях характер роста погрешности определения фазы в зависимости от уровня шума $\epsilon(N)$ на интерференционных картинах имеет линейный тренд. Но при малых значениях уровня шума эта погрешность с учетом компенсации нелинейности тракта стремится к нулю, в отличие от погрешности определения фазы без компенсации. Если не компенсировать нелинейность тракта источник–приемник оптического излучения, то при $T < 2\pi$ метод расшифровки фазовых изображений с произвольными пошаговыми сдвигами может давать недостоверные оценки.

Различные источники и приемники оптического излучения имеют неодинаковые показатели γ , определяющие энергетическую характеристику устройства согласно (1.66). Оценим отклонение ϵ в зависимости от уровня γ

при постоянных количестве сдвигов $N = 50$, уровне шума $H = 10\%$ и параметре $T = 0,875\pi$.

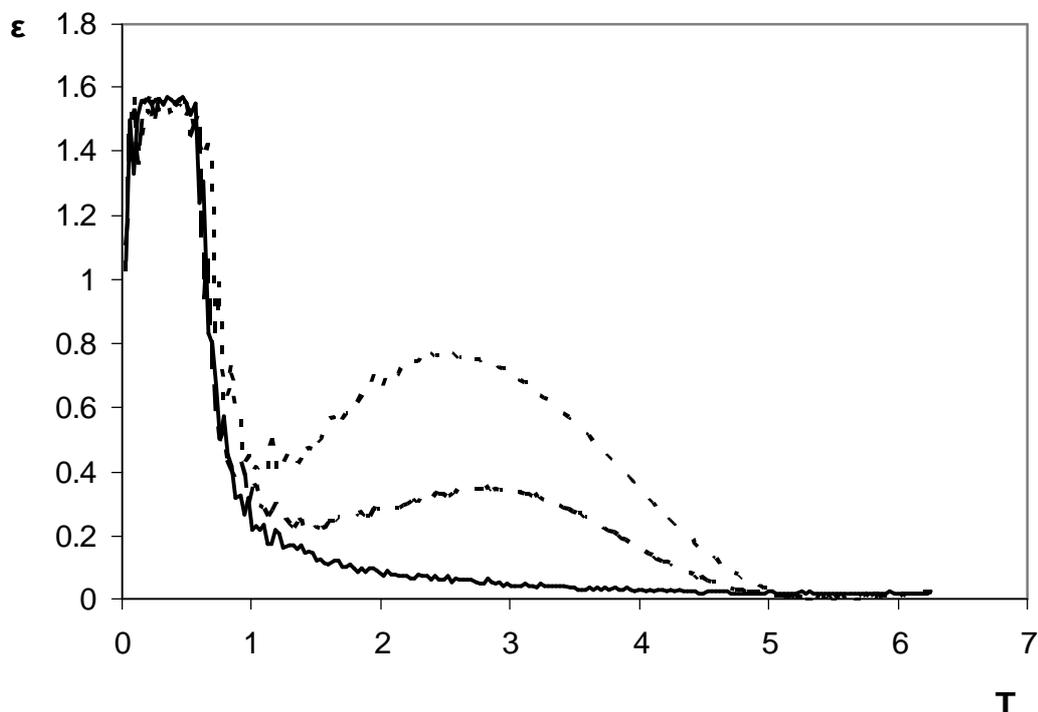


Рис. 1.25. Отклонение измеренной фазы при различных размерах окна T . Метод расшифровки фазовых изображений без компенсации нелинейности тракта $\gamma_1 = 1,5$ (крупный пунктир), $\gamma_2 = 2,5$ (мелкий пунктир) и метод расшифровки фазовых изображений с применением метода компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения (сплошная линия).

Зависимость $\epsilon(\gamma)$ (см. рис. 1.23) показывает, что применение метода компенсации нелинейности тракта позволяет получать достоверные значения измеренной фазы при любых γ . Кроме того, из рис. 1.23 следует, что в окрестности $\gamma = 1$ метод компенсации можно не применять, поскольку в этой окрестности вид сигнала после степенного преобразования остается неизменным.

В экспериментах количество N реализаций фазовых изображений всегда ограничено. При этом важно знать необходимое число N для расшифровки фазовых изображений с заданной точностью. Проведем сравнительный анализ методов в случае восстановления фазы по

ограниченному набору N фазовых изображений. Будем анализировать точность определения фазы в зависимости от N (рис. 1.24). Уровень аддитивного шума зададим постоянным с СКО, равным 10 % уровня фоновой интенсивности, фазовое окно $T = 0,875\pi$, параметр $\gamma = 1,5$. Из графиков на рис. 1.24 следует, что при использовании метода расшифровки фазовых изображений без компенсации нелинейности тракта источник – приемник оптического излучения погрешность измерения фазы (т. е. отклонение ε) уменьшается с увеличением N , но сходится к значению около 0,35 рад, что составляет более 10 % диапазона измерения. При компенсации нелинейности тракта ε сходится к значению примерно 0,05 рад, или 1,5 % диапазона измерения.

Оценим погрешность измерения фазы при различных размерах окна T и постоянных значениях $\gamma_1 = 1,5$; $\gamma_2 = 2,5$; $H = 10\%$, $N = 50$. Результаты представлены на рис. 1.24. При $T < 1$ рад ε стремится к 50 % диапазона измерения с учетом компенсации нелинейности и без нее. При заданных параметрах H , N и при $T < 1$ система (1.39) становится вырожденной и не имеет устойчивого решения. При $T > 4,8$ рад погрешность определения фазы с использованием метода компенсации и без него практически совпадают. При $2 < T < 5$ метод расшифровки фазовых изображений без компенсации нелинейности приводит к существенным систематическим погрешностям.

Таким образом, предложенный метод компенсации нелинейности тракта источник – приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции минимизирует погрешность определения фазы на фазовых изображениях с произвольными пошаговыми сдвигами при наличии шумов и степенной характеристике приемного и передающего устройств. Сравнение устойчивого метода расшифровки интерферограмм, описанного в [120], и предложенного метода показывает, что в диапазоне $2 < T < 5$ компенсация нелинейности улучшает точность фазовой триангуляции при произвольных фазовых сдвигах и наличии аддитивных шумов. Метод компенсации нелинейности в несколько раз уменьшает погрешность и

существенно увеличивает достоверность результатов 3D-измерений на основе фазовой триангуляции и позволяет использовать в качестве источников и приемников современные недорогие бытовые устройства, в том числе снабженные неотключаемыми аппаратно-программными адаптационными автоматами.

1.6. Сравнение методов расшифровки структурированных изображений в условиях нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения

При измерении 3D-профиля методом фазовой триангуляции на изображениях часто присутствуют аддитивные шумы. Кроме того, большинство современных устройств, используемых для формирования и ввода изображений, имеют амплитудную характеристику, соответствующую степенному закону, часто жаргонно называемому гамма-коррекцией [88] (1.66)

Для компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции применяется несколько подходов. Первый – использование согласованной пары источника и приемника оптического излучения, для которой нелинейность передаточной функции заведомо отсутствует, то есть $\gamma=1$ в (1.66). Такой подход встречается в специализированных оптоэлектронных устройствах, работающих с использованием однокадровой расшифровки трехмерной сцены [85].

Другой и более распространенный подход основан на применении 4 шагового метода фазовой триангуляции [120]. Метод работает следующим образом. На поверхность измеряемого объекта проецируют 4 засветки. Линейное смещение фазы соседними изображениями равно $\pi/2$. Без учета степенной передаточной функции получим:

$$I_n(x, y) = I_b(x, y) + I_m(x, y) \cdot \cos(\varphi(x, y) + (n - 1) \frac{\pi}{2}), n = 1, \dots, 4, \quad (1.74)$$

фазу $\varphi(x, y)$ можно вычислить по формуле:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (1.75)$$

Далее будем учитывать степенную передаточную функцию в виде многочлена второй степени:

$$I_n(x, y) = a_0 + a_1 S_n(x, y) + a_2 S_n^2(x, y) + \alpha, \quad (1.76)$$

где a_0, a_1, a_2, α – коэффициенты, S – принимаемая интенсивность фазового изображения, умеющая степенную коррекцию яркости в соответствии с выражением (1.66). Учитывая свойства тригонометрических функций, из выражений (1.74), (1.75), (1.76) можно получить [123]:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{S_4 - S_2}{S_1 - S_3}\right). \quad (1.77)$$

Данный метод устойчив к аддитивным шумам и позволяет автоматически компенсировать нелинейные искажения в результатах измерения. Недостаток метода заключается в необходимости попадания всех 4 измерений в динамический диапазон приемника оптического излучения, что не всегда возможно. Например, в случае измерения сложнопрофильных объектов имеющих произвольные светорассеивающие свойства в широком диапазоне значений, согласовать источник и приемник излучения практически невозможно. На практике часто применяют большее количество фазовых сдвигов, чем 4. В этом случае полученные фазовые изображения анализируют четверками, имеющими последовательные сдвиги друг

относительно друга на $\pi/2$, а результаты измеренной фазы усредняют. В результате получается достаточно точный и надежный метод измерения.

Третий подход является более универсальным. Он основан на использовании метода расшифровки фазовых изображений, который позволяет отбрасывать недостоверные измерения и выполнять восстановление фазы на изображениях при произвольном наборе фазовых сдвигов зондирующего фазового изображения [136]. Значение фазы $\phi(x, y)$ можно представить в виде

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + \delta(x, y), \quad (1.78)$$

$\delta(x, y)$ - сдвиг начальной фазы у формируемой пространственной засветки. Тогда выражение (1.38) можно представить

$$I(x, y) = I_b(x, y) + I_{\cos}(x, y) \cos \delta + I_{\sin}(x, y) \sin \delta, \quad (1.79)$$

$$\varphi(x, y) = -\arctan \left(\frac{I_{\sin}(x, y)}{I_{\cos}(x, y)} \right) \quad (1.80)$$

Значение фазы $\varphi(x, y)$ определяют из условия минимизации функционала невязки между теоретическими и экспериментальными данными:

$$S(I_b, I_{\sin}, I_{\cos}) = \sum_{i=1}^N I_i - I_b - I_{\cos} \cos \delta_i + I_{\sin} \sin \delta_i, \quad (1.81)$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_b} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial I_{\sin}} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial I_{\cos}} = 0. \quad (1.82)$$

Данный метод требует применения метода прямой компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения. В противном случае его применение приведет к систематическим отклонениям

измеренной фазы [137]. С помощью процедуры калибровки тракта источник-приемник оптического излучения устанавливают передаточную функцию в виде зависимости

$$Y(x, y) = K^{-1}(x, y, I(x, y)) , \quad (1.83)$$

здесь $Y(x, y)$ – распределение интенсивности света, которое проецируется на измеряемый объект. Использование функции $Y(x, y)$ вместо $I(x, y)$ в (10) позволяет исключать систематическую погрешность измерения фазы зондирующей синусоиды. Поскольку зависимость $Y(x, y)$ автоматически компенсирует фоновую засветку $I_b(x, y)$, выражения (1.81-1.82) сведутся к виду

$$S(I_{\sin}, I_{\cos}) = \sum_{i=1}^N (K^{-1}(x, y, I_i(x, y)) - I_{\cos}(x, y) \cos \delta_i + I_{\sin}(x, y) \sin \delta_i) , \quad (1.84)$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_{\sin}} = 0; \frac{\partial S}{\partial I_{\cos}} = 0. \quad (1.85)$$

Данный способ существенно более трудоемок, поскольку требует выполнять дополнительную процедуру калибровки тракта источник-приемник оптического излучения, однако более универсален и надежен по сравнению с четырехшаговым методом.

Для его обоснования требуется провести анализ погрешности определения фазы при расшифровке фазовых изображений на основе итерационного 4-шагового метода и устойчивого метода расшифровки фазовых изображений с компенсацией нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения.

Основные источники погрешности измерений метода фазовой триангуляции – шумы на фазовых изображениях и недостаточный

динамический диапазон приемника оптического излучения. Поскольку в случае не попадающей в динамический диапазон интенсивности излучения, зарегистрированная интенсивность на фазовом изображении недостоверна, то такие данные будут отбрасываться, а смещение фазы будет рассчитано по остальному набору достоверных измерений.

В работе [140] показано, что погрешность определения фазы можно оценить:

$$\theta = \frac{\Delta I}{\sqrt{N} \cdot I}, \quad (1.86)$$

где N – количество сдвигов фазы, $\Delta I / I$ – относительная погрешность измерения интенсивности приемником оптического излучения.

Ниже представлены результаты анализа погрешности измерения фазы при расшифровке фазовых изображений на основе итерационного 4-шагового метода и устойчивого метода расшифровки фазовых изображений с компенсацией нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения. Анализ выполнен при различном уровне шума на фазовых изображениях, различных значениях коэффициента гамма - коррекции, различных параметрах согласованности чувствительностей источника и приемника оптического излучения.

Пусть рассеиваемая на поверхности измеряемого объекта интенсивность источника излучения изменяется в диапазоне $[0..1]$ в относительных безразмерных единицах. Рабочий диапазон приемника оптического излучения $[a, b]$. Параметр a принимает значения $[-1..1]$, параметр b принимает значения $[0..2]$. На рис. 1.26. представлены примеры интенсивности источника (а) и наблюдаемой интенсивности приемника (б - г) при различных значениях параметров a, b и при уровне шума 5% на принимаемых изображениях. Изменения всех параметров позволит оценить погрешность измерения при различных светорассеивающих свойствах поверхности измеряемого объекта.

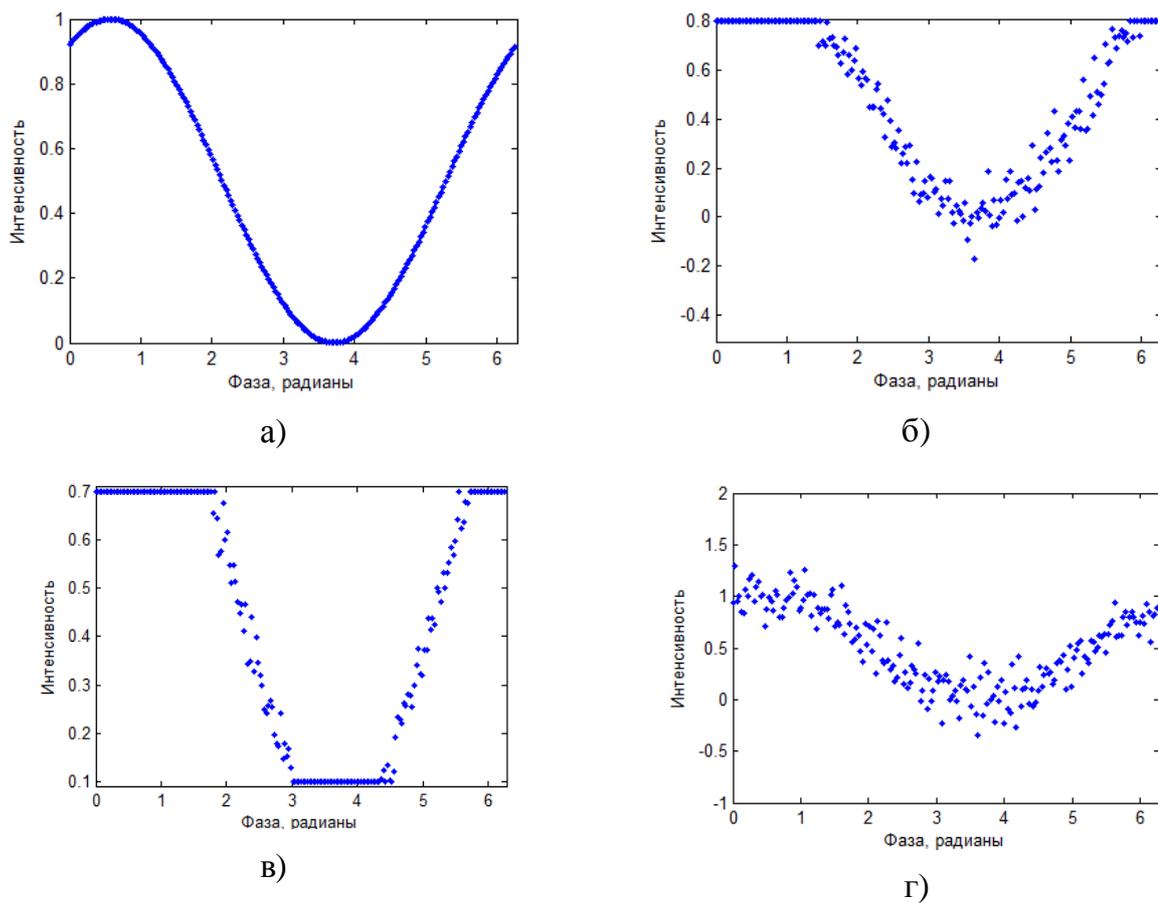


Рис.1.26. Примеры интенсивности источника (а) и наблюдаемая интенсивность приемника при различных значениях параметров a , b (б,в,г).

На рис. 1.27. представлена теоретическая погрешность измерения фазы при отсутствии шумов на фазовых изображениях. Очевидно, что в идеальных условиях погрешность измерения будет нулевой. Кроме того, график показывает, что в области, где выполняется неравенство $a > b$, измерения теряют физический смысл, поскольку динамический диапазон приемника излучения принимает некорректное значение.

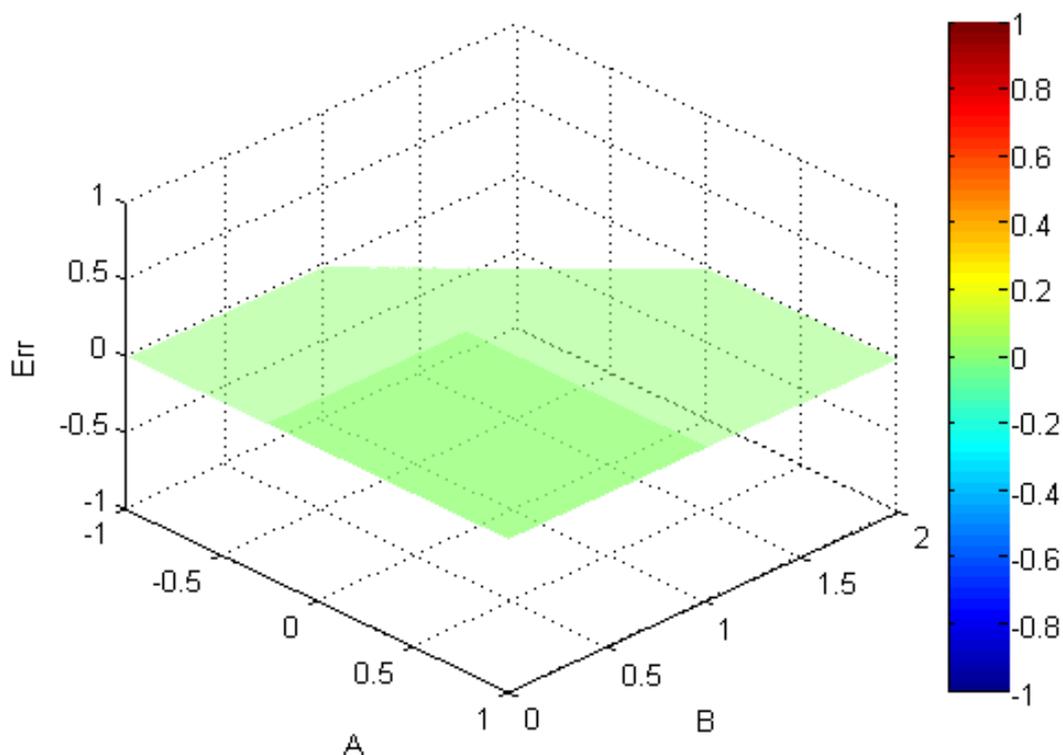


Рис. 1.27. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения А, В при отсутствии шумов на фазовых картинах.

На рис.1.28-1.31 показаны результаты оценки погрешности определения фазы при уровне шума на фазовых картинах 5%, на рис. 1.32-1.35 - при уровне шума 10%. На каждом графике показаны погрешности измерения 4-х шаговым методом (более темная поверхность) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (более светлая поверхность). Вертикальная ось и цвет поверхности отображает СКО измеренной фазы, горизонтальные оси показывают значения параметров А, В, отображающие характеристики согласованности источника и приемника оптического излучения в точке измерения. Показаны погрешности при параметре $\gamma=0,25$, $\gamma=0,5$, $\gamma=1$, $\gamma=2$. Результаты измерения показывают, что в области, где рабочий диапазон приемника оптического излучения согласован с диапазоном излучаемой интенсивности, погрешность методов примерно одинакова. При выходе из области согласованности погрешность 4-х

шагового метода увеличивается значительно быстрее, чем устойчивого метода расшифровки фазовых изображений.

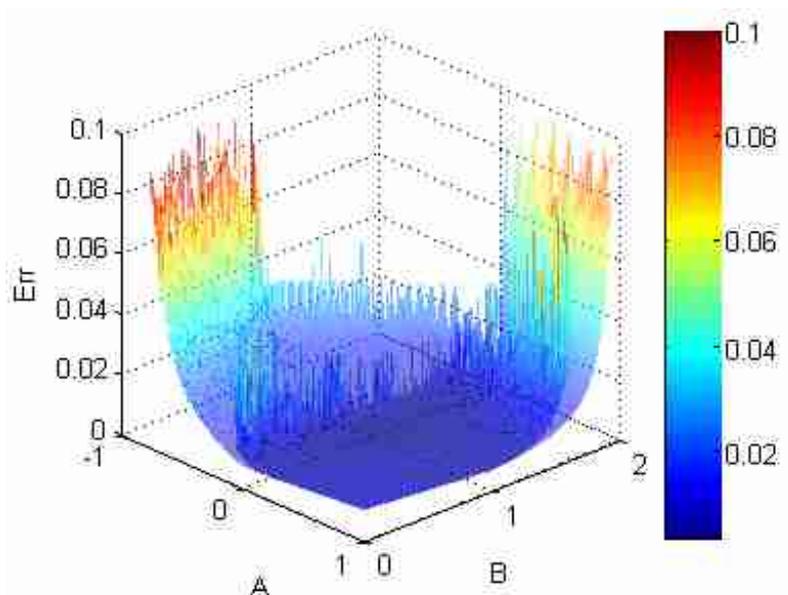


Рис. 1.28. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения А, В. Уровень шума на фазовых картинах 5%, $\gamma=0,25$.

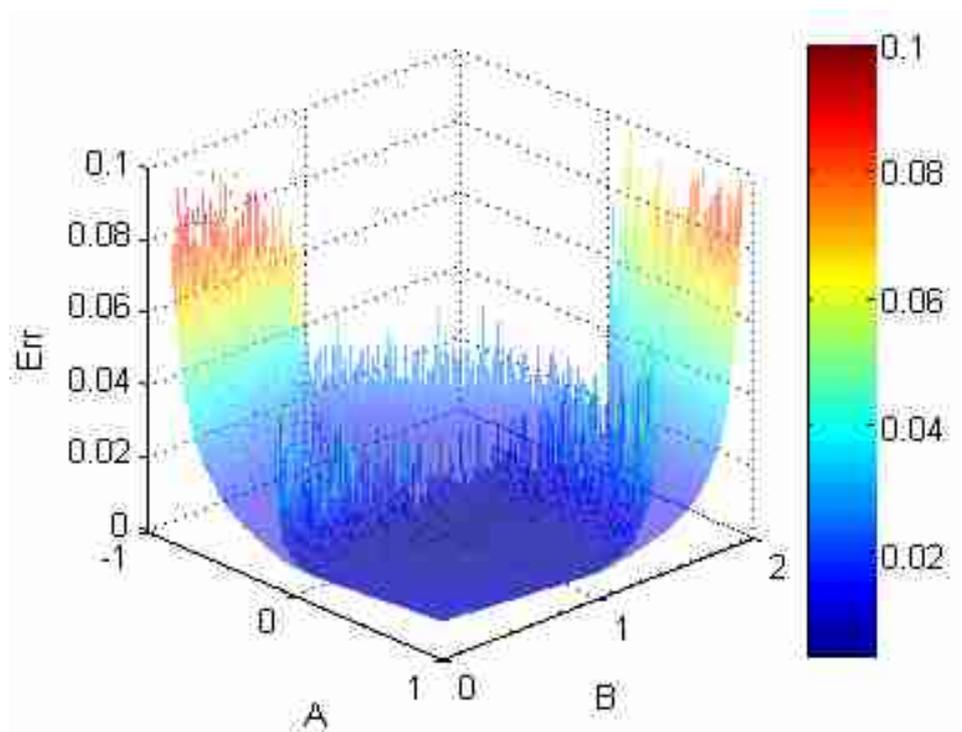


Рис. 1.29. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения А,В. Уровень шума на фазовых картинах 5%, $\gamma=0,5$.

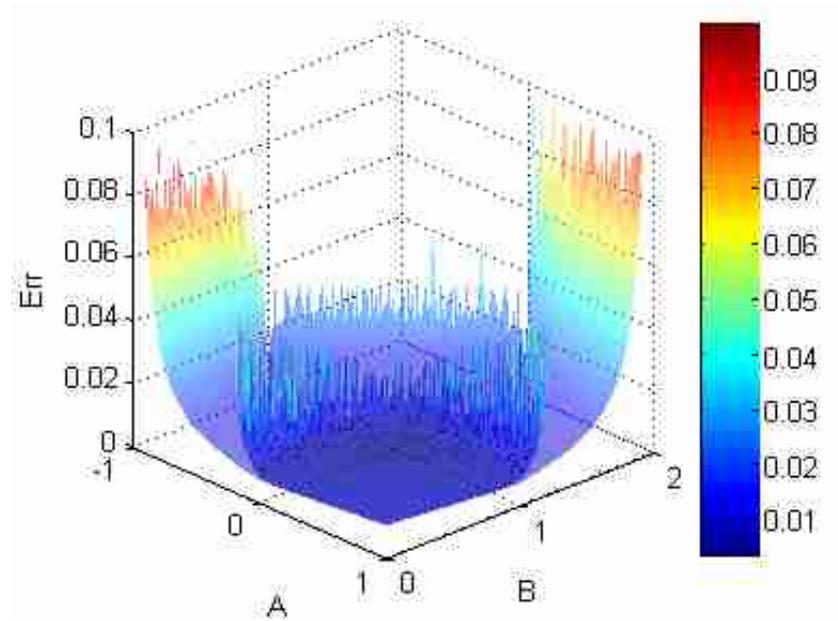


Рис. 1.30. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения A, B . Уровень шума на фазовых картинах 5%, $\gamma=1$.

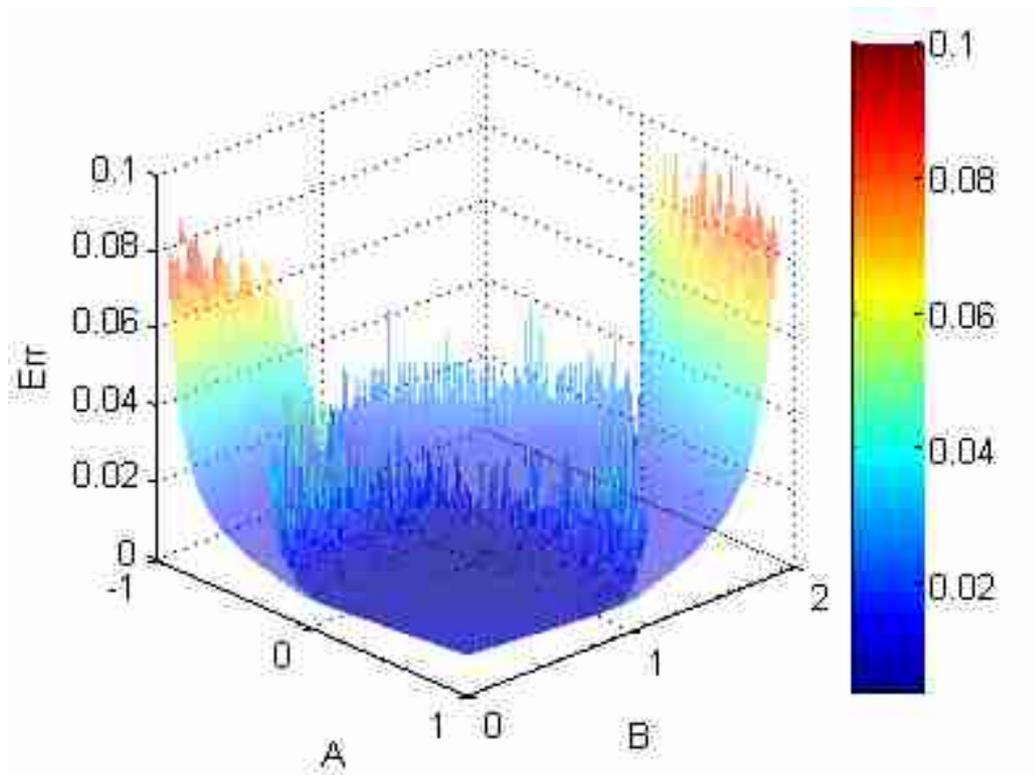


Рис. 1.31. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения A, B . Уровень шума на фазовых картинах 5%, $\gamma=2$.

На рис. 1.36-1.39 представлены срезы трехмерной поверхности (рис. 1.35) при $\gamma=2$ и уровне шума на фазовых картинах 10%. Результаты на графиках демонстрируют, что при всех значениях параметров согласованности приемника и источника излучения метод на основе устойчивого метода расшифровки фазовых изображений обеспечивает погрешность измерений, как минимум, не хуже, чем 4-шаговый метод.

На рис. 1.40-1.41 показана погрешность определения фазы 4-шаговым методом и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений при различных параметрах согласования источника и приемника оптического излучения a, b , при значениях уровня шума на фазовых изображениях 2% и 10%. Данные графики демонстрируют, что погрешность измеренной фазы зависит от уровня шума на фазовых картинах. Причем, в области согласованности оба метода имеют практически идентичный уровень погрешности. Это подтверждают графики на рис. 3 и 4.

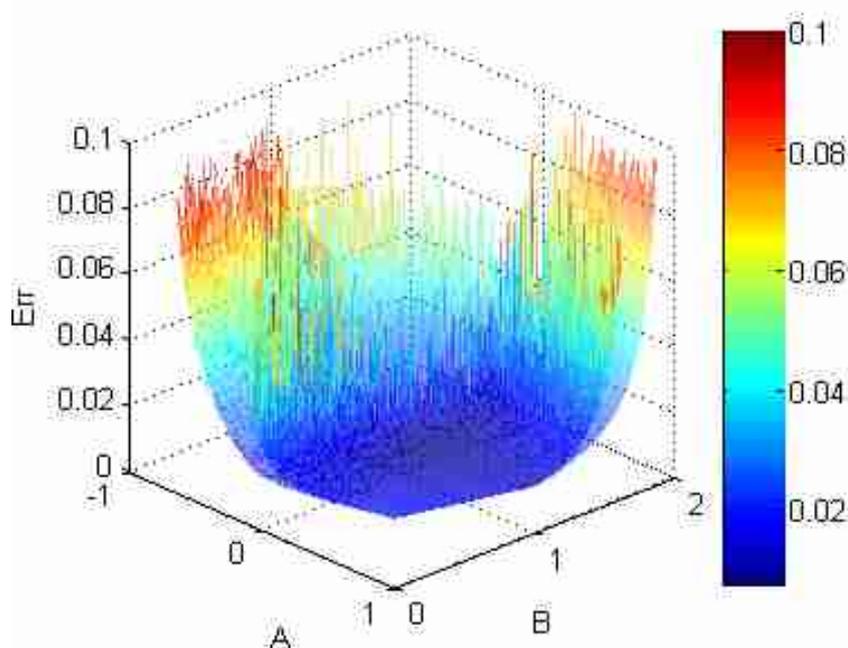


Рис. 1.32. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения A, B . Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=0,25$.

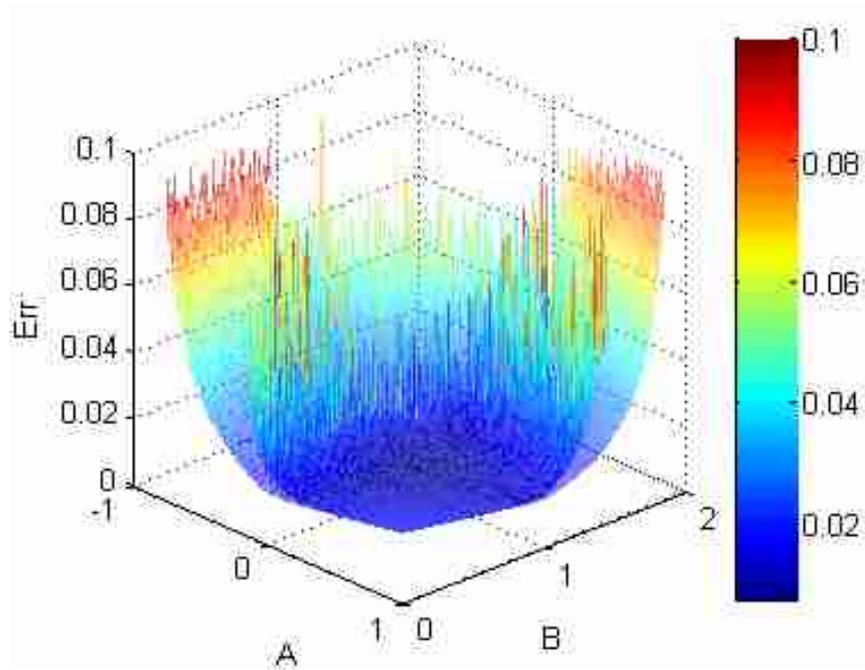


Рис. 1.33. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения A, B . Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=0,5$.

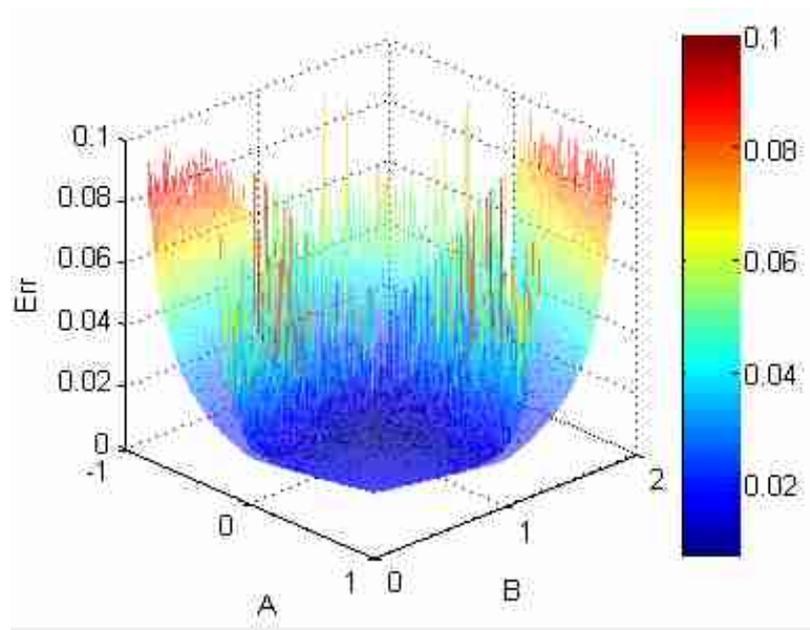


Рис. 1.34. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения A, B . Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=1$.

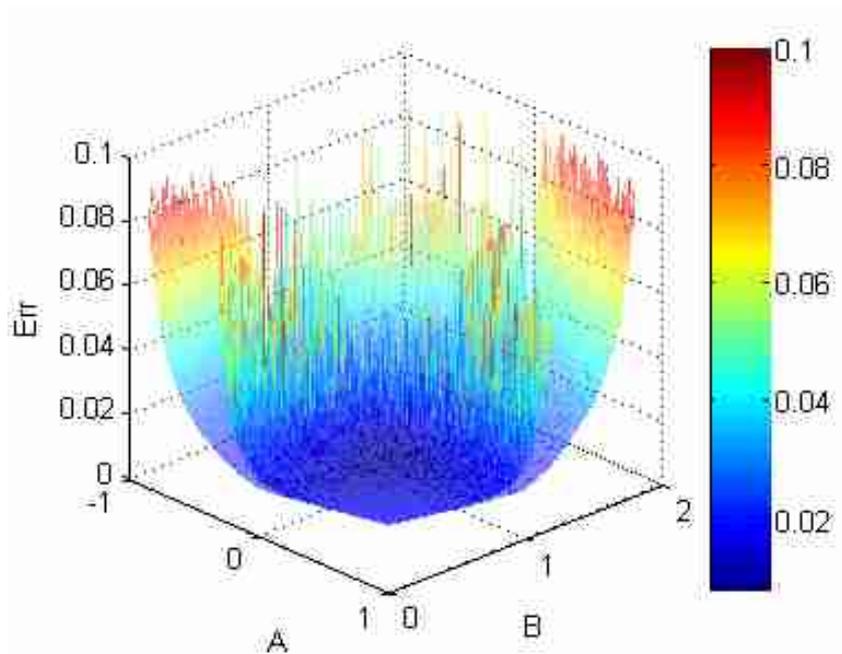


Рис. 1.35. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения А,В. Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=2$.

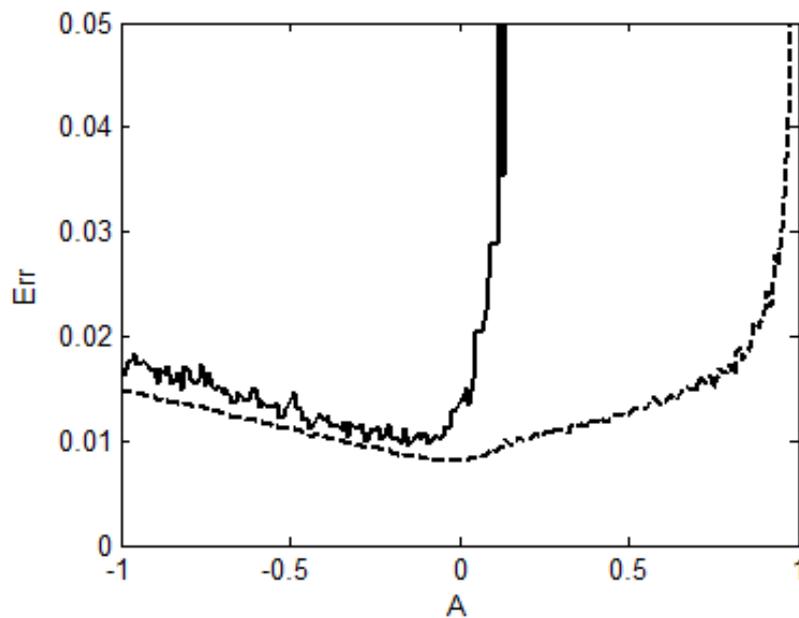


Рис. 1.36. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения четырехшаговым методом (сплошная линия) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (пунктирная линия).

Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=2$, $B = 1$.

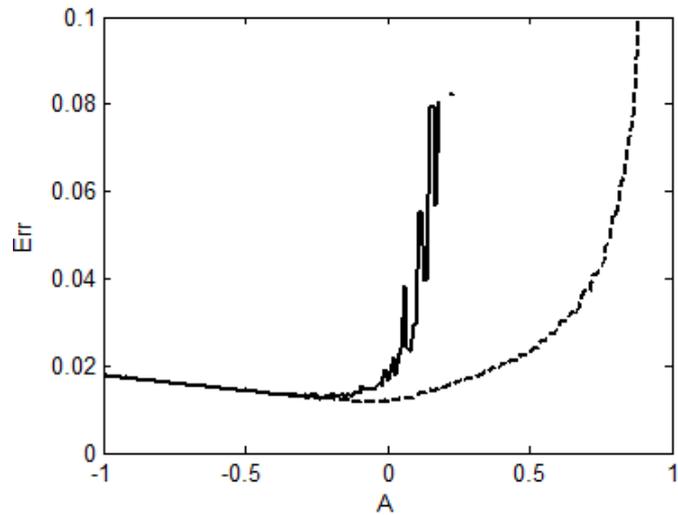


Рис. 1.37. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения четырехшаговым методом (сплошная линия) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (пунктирная линия).

Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=2$, $B=1,5$.

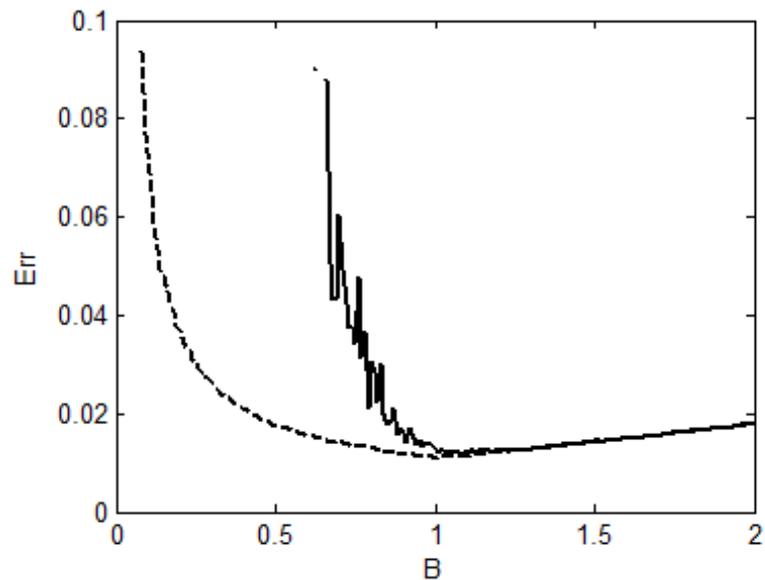


Рис. 1.38. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения четырехшаговым методом (сплошная линия) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (пунктирная линия).

Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=2$, $A=0$.

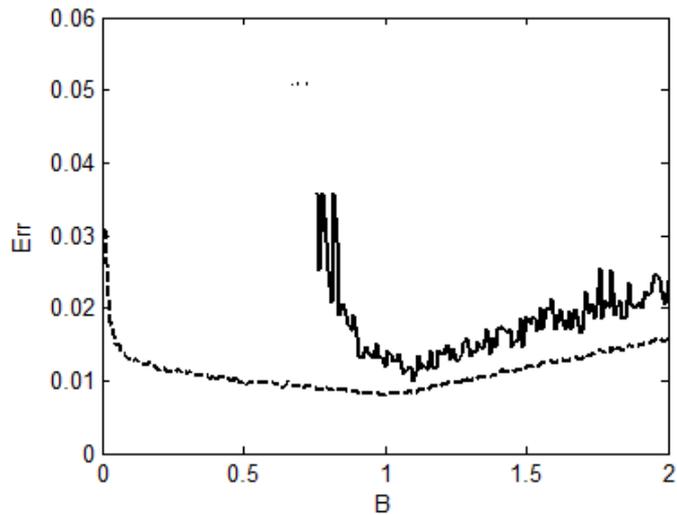


Рис. 1.39. Ошибка определения фазы от параметров согласованности источника и приемника оптического излучения четырехшаговым методом (сплошная линия) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (пунктирная линия).

Уровень шума на фазовых картинах 10%, $\gamma=2$, $A=-0,5$.

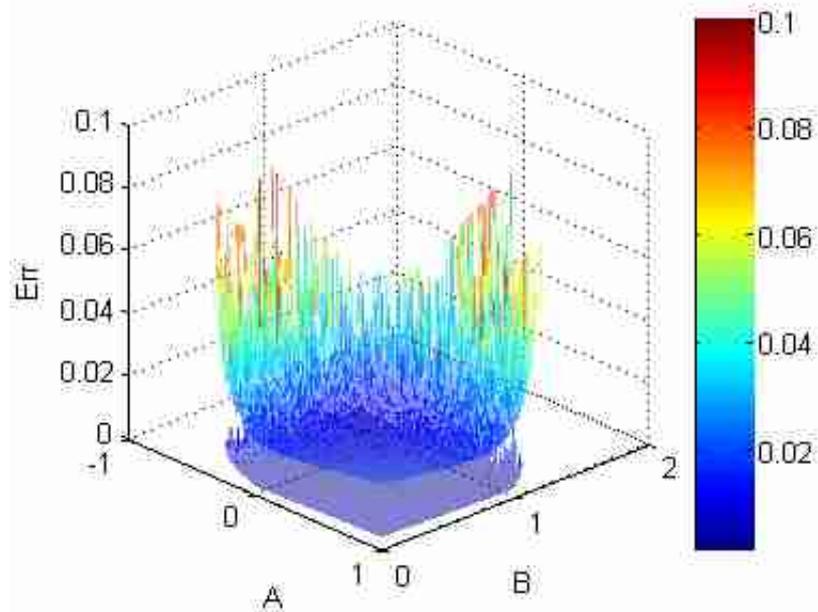


Рис. 1.40. Ошибка определения фазы 4-шаговым методом (а) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (б) от параметров согласования источника и приемника оптического излучения A, B при значениях уровня шума на фазовых изображениях 2%

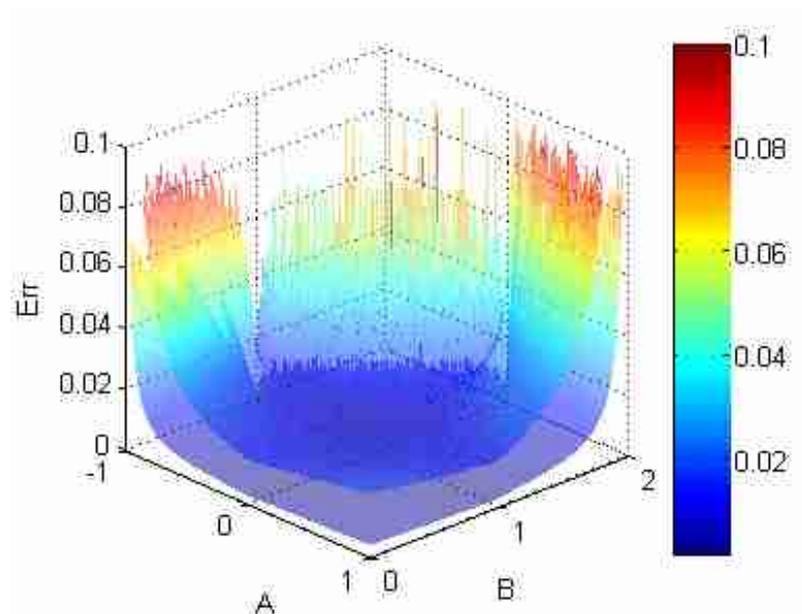


Рис. 1.41. Ошибка определения фазы 4-шаговым методом (а) и устойчивым методом расшифровки фазовых изображений (б) от параметров согласования источника и приемника оптического излучения A, B при значениях уровня шума на фазовых изображениях 10%.

На основе полученных результатов и проведенных экспериментов можно сделать следующий вывод. При измерениях методом фазовой триангуляции в условиях ограниченного динамического диапазона приемника и при произвольных светорассеивающих свойствах поверхности измеряемого объекта необходимо вычислять сдвиг начальной фазы только по набору достоверных измерений.

1.7. Методы расширения динамического диапазона при триангуляционных измерениях с использованием структурированного освещения

Одним из недостатков метода фазовых шагов является ограниченный диапазон измеряемых координат. Фазовые значения по изображению могут однозначно восстанавливаться только в пределах периода.

В настоящее время проблема фазовой неоднозначности окончательно не решена. Известно большое количество алгоритмов развертывания фазового поля [107,143-145], в которых для определения полной фазы, т.е. числа полных периодов, соответствующих разности хода волн, используются априорные данные об исследуемом фазовом поле, например:

- знак изменения фазы при переходе через период;
- приблизительные значения полной фазы, полученные из других источников измерений, вид измеряемого волнового фронта (плавность, непрерывность производных);
- изменение цвета полосы в интерферометрах с одинаковым ходом волн, изменение контраста полос и т.п.;
- разность фаз, полученных при нескольких измерениях одного объекта с измененной длиной волны.

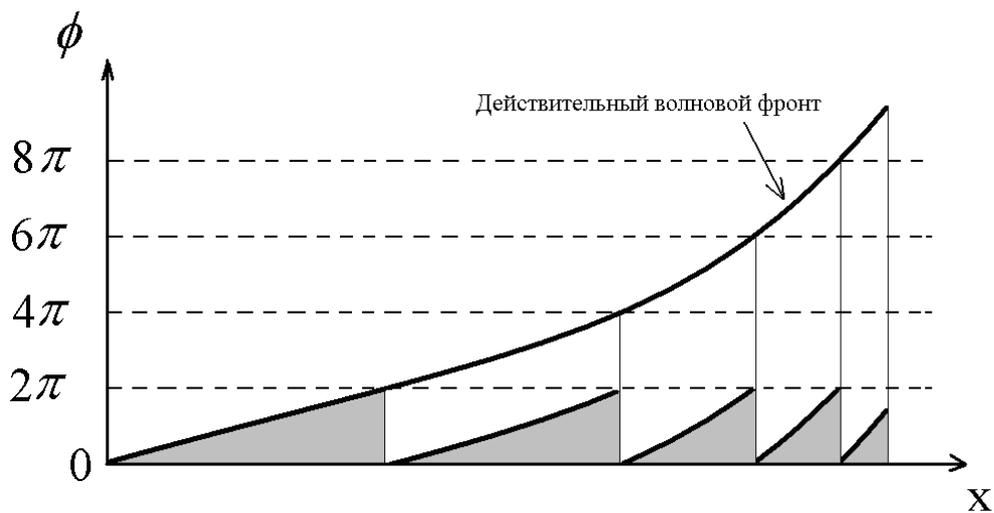


Рис.1.32. Волновой фронт, измеренный по модулю 2π .

Большая часть алгоритмов устранения фазовой неоднозначности основано на анализе пространственной структуры поля фаз. Полная фаза определяется ее развертыванием, т.е. последовательным добавлением или вычитанием 2π к значению фазы в соседней точке, если перепад между ними превышает некоторый порог (рис.1.32). Такая процедура основана на предположении, что резкие скачки (более периода) в точках перехода через период отсутствуют. Для прослеживания границы перехода необходимо,

чтобы число периодов было на порядок меньше, чем точек в массиве детектора. Это возможно только при анализе плавного фазового фронта. Процедура добавления $2p$ может рассматриваться как экстраполяционный процесс. При этом используется информация о предыдущих восстановленных точках для определения фазового сдвига в следующих точках. Гипотеза о существовании фазового перехода в некоторой точке фазового поля принимается в зависимости от результатов анализа ее окрестности.

Известен метод измерения фазового сдвига на интерферограммах с помощью эквивалентной длины волны. В качестве априорной используется информация о величине длин волн источников освещения.

Оптические разности хода волн (ОРХ) в любой точке поля (x,y) определяются из выражений

$$\Phi_a + 2pn = \frac{2p}{l_a} \hat{I} \Delta \tilde{O}, \quad (1.87)$$

при длине волны l_a и

$$\Phi_b + 2pn = \frac{2p}{l_b} \hat{I} \Delta \tilde{O}, \quad (1.88)$$

при длине волны l_b . Вычитая (1.88) из (1.87) и выделяя ОРХ, получим

$$\hat{I} \Delta \tilde{O} = \frac{\Phi_a - \Phi_b}{2p} l_{eq} + (n_a - n_b) l_{eq}, \quad (1.89)$$

где

$$l_{eq} = \frac{I_a I_b}{|I_a - I_b|}. \quad (1.90)$$

Таким образом можно определить фазовый фронт с периодом, равным эквивалентной длине волны l_{eq} .

Упомянутые выше методы увеличения диапазона измерения не подходят для задачи измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, так как отсутствует априорная информация о 3D геометрии измеряемого объекта.

Ниже рассмотрен метод восстановления полной фазы с помощью целочисленного анализа, не использующий априорную информацию об измеряемом объекте. Метод основан на использовании серии измерений при различных ценах интерференционных полос. Цена полосы определяется разностью оптического хода волн, при которой интерференционные полосы меняются на период. Цена полосы зависит от угла между интерферирующими пучками, коэффициента пропускания среды или длины волны источника освещения.

В настоящей работе использована модификация метода восстановления полной фазы с помощью целочисленного анализа.

Модификация заключается в том, что измеряемый объект последовательно освещается серией фазовых изображений с кратной величиной периода фазы. Фазовый переход ищем только в пределах одного периода. Тогда, при наличии набора фазовых изображений с кратными периодами и наличии изображений, фазовый сдвиг на которых не переходит через период (это определяется глубиной измерительной сцены), можно восстановить значение фазового сдвига на фазовых изображениях, имеющих наименьший период.

Пусть проведены измерения фазовых изображений и расшифрованы фазовые значения на 5 полях, имеющих кратные периоды $N_1..N_5$ зондирующей синусоиды:

$$N_2 = 2N_1, N_3 = 2N_2, N_4 = 2N_3, N_5 = 2N_4. \quad (1.91)$$

Пусть $j_1..j_5$ - фазовые значения в одной точке на пяти полях, соответствующих различным периодам зондирующей синусоиды $N_1..N_5$. Тогда значение результирующей фазы f_{res} можно вычислить следующим алгоритмом:

$$f_2 = j_2 + 2p \cdot INT\left(\frac{(2 \cdot j_1) - j_2}{2p}\right), \quad (1.92)$$

$$f_3 = j_3 + 2p \cdot INT\left(\frac{(2 \cdot f_2) - j_3}{2p}\right), \quad (1.93)$$

$$f_4 = j_4 + 2p \cdot INT\left(\frac{(2 \cdot f_3) - j_4}{2p}\right), \quad (1.94)$$

$$f_{res} = j_5 + 2p \cdot INT\left(\frac{(2 \cdot f_4) - j_5}{2p}\right), \quad (1.95)$$

где функция $INT(x)$ принимает следующие значения:

$$\begin{cases} INT(x) = 1, 0.5 \leq x < 1 \\ INT(x) = 0, -0.5 < x < 0.5 \\ INT(x) = 1, -0.5 > x \geq -1 \end{cases}. \quad (1.96)$$

Полученное таким образом фазовое поле f_{res} обеспечивает диапазон измерения, соответствующий периоду зондирующей синусоиды N_5 , а чувствительность, соответствующую периоду N_1 .

Предложенный метод расширения динамического диапазона фазовых измерений обеспечивает увеличение динамического диапазона до пределов, обусловленных разрешением источника и приемника пространственно модулированного оптического излучения.

1.8. Оценка погрешности метода измерения 3D геометрии на основе пространственно-временного модулирования источника оптического излучения

Оценка погрешностей полученных результатов является неотъемлемой и важнейшей частью экспериментальной работы.

Погрешность измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов методом фазовой триангуляции на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения будет состоять из погрешности определения фазы и погрешности калибровки:

$$Err = Err_{measure} + Err_{calibr}. \quad (1.97)$$

Для оценки погрешности определения фазы воспользуемся тем, что для заданного набора изображений с различными фазовыми сдвигами N погрешность определения фазы устойчивым методом расшифровки фазовых изображений будет не хуже, чем погрешность определения фазы методов фазового сдвига, при условии равномерного распределения фазовых сдвигов на интервале $[0, 2\pi]$. Значение фазы методом фазового сдвига определяется следующим выражением:

$$j = \arctan \frac{\sum_{s=1}^N I_s \sin j_s}{\sum_{s=1}^N I_s \cos j_s}, \quad (1.98)$$

где j – искомый сдвиг фазы в точке на изображении, I_s – значение интенсивности на изображении в точке, j_s – величина фазового сдвига на фазовых картинах.

Источником погрешности в определении фазового сдвига является погрешность измерения интенсивности на изображениях в точке I_s . Предположим, что относительная погрешность измерения интенсивности не превышает значения dI/I . Тогда

$$j + \Delta j = \arctan \frac{\sum_{s=1}^N I_s (1 + \frac{\Delta I}{I}) \sin j_s}{\sum_{s=1}^N I_s (1 + \frac{\Delta I}{I}) \cos j_s}, \quad (1.99)$$

используя закон сложения ошибок имеем:

$$j + \Delta j = \arctan \left(\left(1 + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \right) \cdot \frac{\sum_{s=1}^N I_s \sin j_s}{\sum_{s=1}^N I_s \cos j_s} \right), \quad (1.100)$$

$$\tan(j + \Delta j) = \frac{\sum_{s=1}^N I_s \sin j_s}{\sum_{s=1}^N I_s \cos j_s} + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \frac{\sum_{s=1}^N I_s \sin j_s}{\sum_{s=1}^N I_s \cos j_s}, \quad (1.101)$$

$$\tan(j + \Delta j) = \tan j + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan j. \quad (1.102)$$

Используя тригонометрические формулы получим:

$$\tan j + \tan \Delta j = \left(\tan j + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan j \right) \cdot (1 - \tan j \cdot \tan \Delta j), \quad (1.103)$$

$$\tan \Delta j = \frac{\frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan j}{1 + \tan^2 j + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan^2 j}, \quad (1.104)$$

$$\Delta j = \arctan\left(\frac{\frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan j}{1 + \tan^2 j + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan^2 j}\right). \quad (1.105)$$

Определим, при каком значении угла j , функция будет иметь максимальное значение. При значении угла j , стремящемся к 0, $\tan(j)$ тоже стремится к нулю. Тогда выражение (1.105) будет стремиться к $\arctan(0) = 0$. При угле $j = 90$, $\tan(j)$ будет стремиться к бесконечности, а выражение (1.105) будет стремиться к нулю. Т.к. \arctan - монотонно возрастающая функция, то выражение (1.105) будет достигать максимума, при максимуме следующего выражения:

$$M(j) = \frac{\frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan j}{1 + \tan^2 j + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \tan^2 j}. \quad (1.106)$$

Выражение (1.106) принимает максимальное значение при минимальном значении выражения:

$$K = \frac{1}{\tan j} + \tan j \left(1 + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I}\right). \quad (1.107)$$

Выражение (1.107) принимает минимальное значение, если $K(\tan(j))$ будет принимать минимальное значение. Из условия экстремума функции K имеем:

$$K'(\tan j) = 0 \quad (1.108)$$

$$-\frac{1}{\tan^2 j} + 1 + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} = 0. \quad (1.109)$$

Откуда получаем, что выражение (1.105) будет принимать максимум при значении $\tan(j)$:

$$\tan j = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I}}}. \quad (1.110)$$

Тогда Δj будет оцениваться выражением:

$$\Delta j = \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I}}}\right). \quad (1.111)$$

Следовательно, относительная погрешность измерения, основанная на измерении сдвига начальной фазы, будет выражаться:

$$q = \frac{\Delta j}{p} = \frac{\arctan\left(\frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I}}}\right)}{p}, \quad (1.112)$$

так как диапазон измеряемых значений фазы ограничен полупериодом синусоиды, то есть p .

Построим зависимость величины q от величины k :

$$k = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I}{I}, \quad (1.113)$$

тогда, при $k \rightarrow 0$

$$q = \frac{\arctan\left(k \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + 2k}}\right)}{p} \approx \frac{k}{p}, \quad (1.114)$$

или

$$q = \frac{\Delta I}{p \cdot \sqrt{N} \cdot I}. \quad (1.115)$$

Относительная погрешность измерения, обусловленная методом фазовых шагов будет оцениваться

$$q = \frac{\Delta I}{\sqrt{N} \cdot I}, \quad (1.116)$$

так как диапазон измерения аргумента функции \arctan равен p .

Полученная аналитическая оценка погрешности измерений методом фазовых шагов позволяет численно оценивать точность измерения трехмерной геометрии методами, использующими пространственно-временную модуляцию источника оптического излучения.

Оценим погрешность измерения 3D геометрии методом фазовых шагов, которую можно достичь, используя современные и доступные оптоэлектронные приборы. Относительную погрешность тракта источник – приемник оптического излучения можно оценить:

$$\frac{\Delta I}{I} = 2^{(1-b)}, \quad (1.117)$$

где b - количество бит, кодирующих глубину цвета источника оптического излучения. Современные цифровые видеокамеры обеспечивают глубину цвета 14 и более бит на канал (например, Leaf Digital Camera Black). LCD проекторы, которые можно использовать в качестве источника пространственно модулированного оптического излучения, обеспечивают глубину цвета 8 бит на канал.

Для оценки погрешности измерения, примем равным 8 значение b в выражении (1.117). Тогда относительную погрешность тракта источник – приемник оптического излучения можно оценить величиной 0,0078. Пусть в нашей реализации оптоэлектронной измерительной системы количество излучаемых засветок, имеющих различный сдвиг начальной фазы, $N = 1000$. Тогда относительная погрешность измерения 3D геометрии оптоэлектронным методом на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, обусловленная использованием метода фазовых шагов будет составлять 0,024%.

Таким образом, метод фазовых шагов можно применять для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов с использованием пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, в

качестве которого можно использовать массовые оптоэлектронные приборы. Погрешность измерения, обусловленная методом фазовых шагов, составит в этом случае не более 0,024% от диапазона измерения.

1.9. Метод оценки оптимальной частоты пространственной модуляции

В методе фазовой триангуляции погрешность определения фазы зависит от количества фазовых изображений N и относительной погрешности фотоприемника Δ/I (1.116). Погрешность измерения координаты Z (глубины сцены), согласно [105] можно оценить:

$$\Delta z = \frac{\Delta j \cdot p}{2p \cdot \tan q} = \frac{\Delta \cdot p}{2p \cdot I \cdot \sqrt{N} \cdot \tan q}, \quad (1.118)$$

где p – период пространственной модуляции излучения, q – угол триангуляции.

Из выражения (1.118) следует, что погрешность определения координаты z пропорциональна периоду пространственной модуляции излучения. Для минимизации погрешности измерения методом фазовой триангуляции необходимо минимизировать период пространственной модуляции оптического излучения.

Очевидно, что при уменьшении периода пространственной модуляции излучения уменьшается и диапазон измерения глубины сцены. По изображению фазовые значения могут однозначно восстанавливаться только в пределах периода. Для увеличения диапазона измерения методом фазовой триангуляции используют различные методы развертывания фазового поля, активно применяемые в интерферометрии. Известны алгоритмы развертывания фазового поля, в которых для определения полной фазы, т.е. числа полных периодов, используются априорные данные об исследуемом объекте [144]. Известны также алгоритмы восстановления полной фазы с

помощью целочисленного анализа при засветке объекта серией фазовых изображений с различными кратными периодами пространственной модуляции излучения [145]. Наиболее перспективными для триангуляционных измерений методом структурированного освещения являются методы расширения диапазона измерения с использованием фазовых шагов и метода бинарного кодирования пикселей [146-148]. Эти подходы обеспечивают наилучшую точность измерений при проецировании наименьшего количества структурированных засветок.

В реальности существуют ограничения на пространственное разрешение формируемого изображения оптической системой. Из-за абберационных искажений оптических элементов измерительной системы, ограниченной глубины резкости источника и приемника оптического излучения, невозможно получить абсолютно резкое изображение. Частоту пространственной модуляции оптического излучения необходимо подбирать, исходя из следующих соображений. С одной стороны, максимальная пространственная частота в регистрируемом изображении должна быть меньше, чем частота эквивалентного низкочастотного фильтра, которым является оптическая система измерителя. С другой стороны, частота должна быть максимально большой для обеспечения минимальной погрешности измерения.

В работе предложен метод оценки оптимальной частоты пространственной модуляции излучения для 3D измерений на основе фазовой триангуляции, обеспечивающий наименьшую погрешность измерения заданной глубины сцены z .

Зависимость изображения на фотоприемнике от распределения формируемого на поверхности объекта источником излучения интенсивности можно представить в виде свертки функции импульсного отклика системы и функции распределения интенсивности изображения, формируемого на поверхности измеряемого объекта источником излучения [149]:

$$g(x, y) = \iint h(x - x_1, y - y_1) f(x_1, y_1) dx_1 dy_1 + n(x, y), \quad (1.119)$$

где g - сформированное на фотоприемнике изображение, h – импульсный отклик оптической системы или функция рассеяния точечного источника, f – функция распределения интенсивности изображения, формируемого на поверхности измеряемого объекта источником излучения, а n – шум на изображении. В функцию шума n на изображении помимо шумов фотоприемника входит фоновое распределение яркости измеряемого объекта. Поскольку интенсивность формируемой засветки существенно выше, чем фоновая яркость измеряемого объекта и, тем более, чем шумы фотоприемника, то выполняется неравенство:

$$\iiint h(x - x_1, y - y_1) f(x_1, y_1) dx_1 dy_1 dx dy \gg \iint n(x, y) dx dy, \quad (1.120)$$

где интегрирование ведется по всему изображению. В частотном пространстве выражение (1.119) примет вид:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v). \quad (1.121)$$

Поскольку формируемая структурированная засветка имеет выраженное направление модуляции (интенсивность излучения модулируется вдоль выделенной, как правило, горизонтальной координаты), то далее мы ограничимся рассмотрением одномерного случая.

Для экспериментального определения функции импульсного отклика оптической системы можно использовать стандартный подход. На поверхность объекта проецируют пространственную низкочастотную бинарную сетку в виде нескольких широких белых световых линий. Фотоприемник регистрирует распределение яркости $G_0(u)$. Функция $F_0(u)$

характеризует распределение интенсивности на поверхности измеряемого объекта в условии отсутствия шумов и любых оптических искажений. Значение функции $F_0(u)$ получается из априорной информации о формируемой на поверхности измеряемого объекта засветке с использованием полученной функции $G_0(u)$.

Например, функция $F_0(u)$ может быть получена следующим образом:

$$F_0(u) = \text{sign}(f_{Low}(G_0(u))), \quad (1.122)$$

где функция sign возвращает 1, если значение положительно, и -1 – если оно не положительно. Функция f_{Low} - линейный низкочастотный фильтр, частота среза которого заведомо выше, чем пространственная частота наблюдаемой бинарной сетки, проецируемой на поверхность измеряемого объекта.

Тогда функцию H можно определить:

$$H(u) = \frac{G_0(u) - N(u)}{F_0(u)}. \quad (1.123)$$

Согласно выражению (1.118), оптимальный пространственный период модуляции излучения будет при минимальном значении величины (p/I) или $(1/wI)$, где w – частота пространственной модуляции излучения, I – амплитуда сигнала на принимаемых изображениях. Так как идеальный бесконечный гармонический сигнал в частотном представлении выражается дельта-функцией, то

$$G_w(u) = H(u)d_w(u) = H(w), \quad (1.124)$$

$d_w(u)$ - дельта функция, равная 1 в точке w , $G_w(u)$ - зависимость интенсивности, сформированная на фотоприемнике при засветке в виде гармонического сигнала с частотой w . Тогда амплитуда гармонического сигнала с частотой w , наблюдаемая на изображениях, будет пропорциональна величине $N(w)$. Задача определения оптимальной пространственной частоты модуляции излучения сводится к определению частоты w , при которой $N(w) \cdot w \rightarrow \max$.

Так как частотное распределение шума $N(w)$ неизвестно, вычислить функцию $N(w)$, используя выражение (1.123), невозможно. Пренебречь шумом в данном случае нельзя, потому что высокочастотные составляющие неизбежно усилятся при делении на высокочастотную составляющую «идеального» сигнала $F_0(u)$.

Для оценки функции $N(w)$ использован следующий подход. Функция размытия точки, которую описывает зависимость $N(w)$, должна достаточно точно повторять нормальное распределение:

$$N(u) = Ae^{-\frac{u^2}{s^2}}. \quad (1.125)$$

Тогда выражение $N(w) \cdot w \rightarrow \max$ при

$$w = \frac{s}{\sqrt{2}}. \quad (1.126)$$

Из выражения (1.123) получим:

$$\frac{G_0(u)}{F_0(u)} = Ae^{-\frac{u^2}{s^2}} + \frac{N(u)}{F_0(u)}. \quad (1.127)$$

Далее предполагаем, что распределение шума $N(u)$ имеет существенно меньшую амплитуду по сравнению с $H(u)$. Тогда выражение $\frac{N(u)}{F_0(u)}$ в низкочастотной области будет существенно меньше, чем $H(u)$. Следовательно, в низкочастотной области для оценки $H(u)$ можно использовать функцию $\frac{G_0(u)}{F_0(u)}$.

Исходя из предположения, что параметр A в выражении (1.125) будет равен $H(0)$ и, воспользовавшись методом наименьших квадратов, можно получить:

$$S = \frac{\int \sqrt{\log\left(\frac{G_0(0)}{F_0(0)}\right) - \log\left(\frac{G_0(u)}{F_0(u)}\right)} \cdot du}{\int u \cdot du} \quad (1.128)$$

Здесь интегрирование осуществляется только по низкочастотной части спектра. На основе выражений (1.126) и (1.128) можно получить оценку оптимальной частоты гармонического сигнала.

Практическая реализация и проверка предложенного метода адаптивной фазовой триангуляции для 3D измерений на основе структурированного освещения выполнена экспериментально. В качестве источника пространственно модулированного излучения использован цифровой проектор NEC VT570 с пространственным разрешением 1024x768. В качестве приемника оптического излучения использовалась цифровая камера Logitech C910, разрешение которой составляло 1920x1080. Проектор формировал на поверхности измеряемого объекта засветку в виде набора из нескольких эквидистантных на плоской поверхности световых линий. Цель эксперимента заключалась в определении оптимальной пространственной частоты проецируемого сигнала для данной измерительной схемы на основе метода адаптивной фазовой триангуляции.

В результате анализа зарегистрированных изображений на поверхности измеряемого объекта получена функция $G(u)/F(u)$ и найдена функция размытия точки системы $H(u)$ (рис. 1.33). Найден оптимальный период зондирующего сигнала для данной измерительной конфигурации, в наших экспериментах он составлял 38 пикселей.

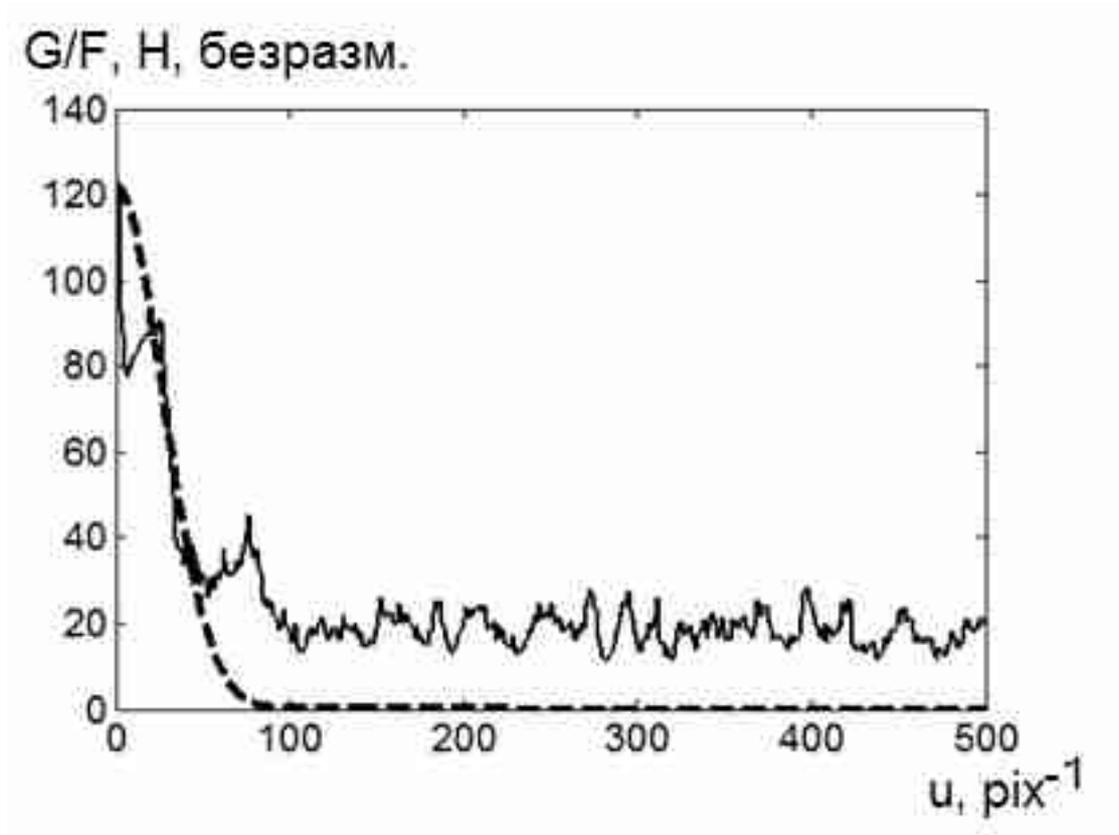


Рис.1.33. Зависимость $G(u)/F(u)$ в частотном представлении (сплошная линия) и найденная функция размытия точки системы (пунктирная линия).

Далее был проведен аналогичный эксперимент, но резкость оптической регистрирующей системы была специально ухудшена. Анализируемые сигналы в первом и втором экспериментах представлены на рис.1.34. Видно, что фронты сигнала яркости вдоль горизонтального направления на изображениях во втором эксперименте существенно завалены. Оптимальный период гармонического сигнала для данной конфигурации оптической измерительной схемы должен быть существенно больше, чем в первом случае.

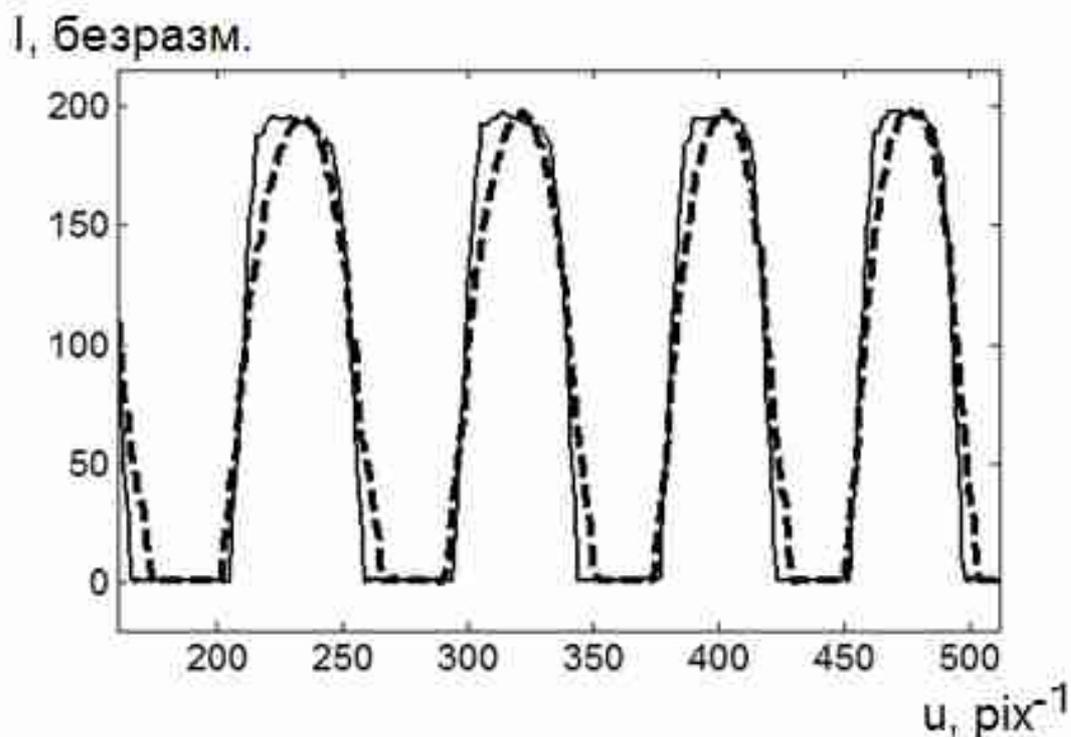


Рис.1.34. Фрагменты анализируемых зависимостей интенсивности в случае хорошо сфокусированной системы (сплошная линия) и в случае расфокусированной системы (пунктирная линия).

Полученная функция $G(u)/F(u)$ и найденная функция размытия точки системы $H(u)$ представлены на рис. 1.35. Оптимальный период гармонического сигнала, наблюдаемый фотоприемником, для данной конфигурации оптической системы составил 105 пикселей.

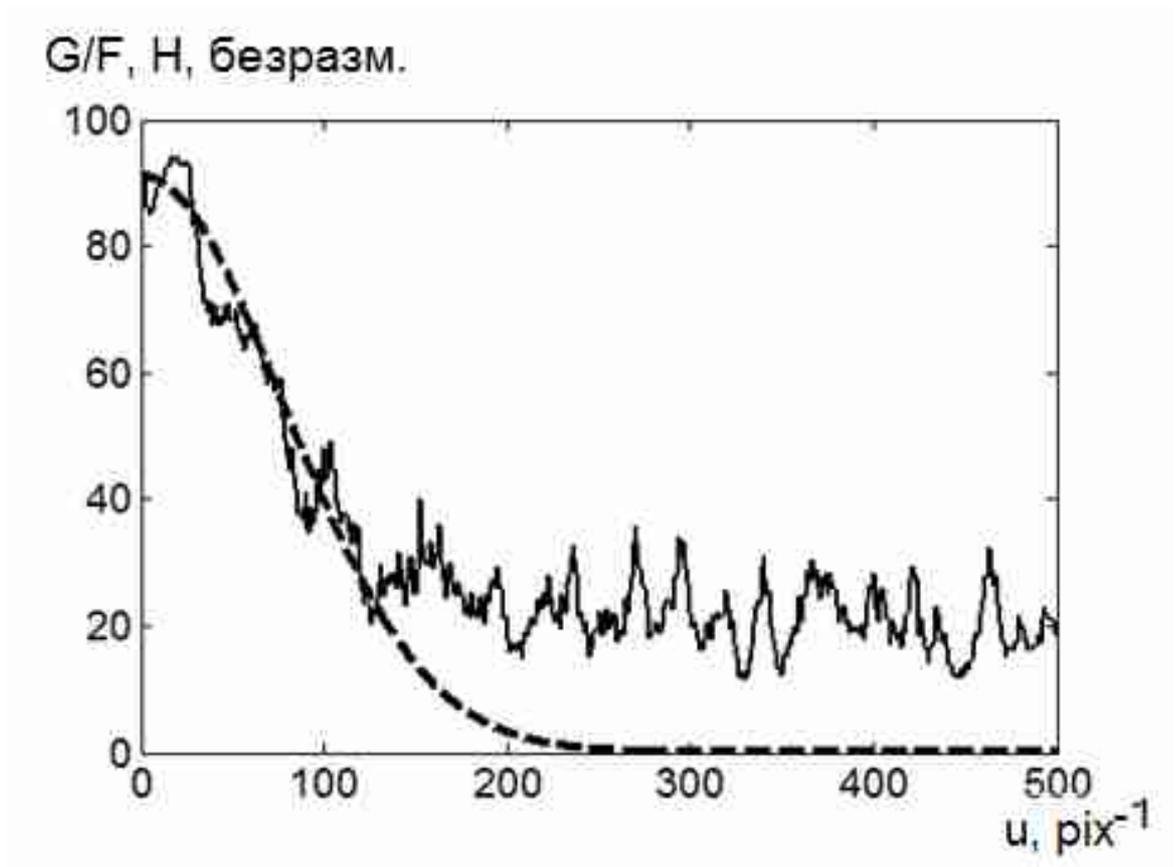


Рис.1.35. Зависимость $G(u)/F(u)$ в частотном представлении (сплошная линия) и найденная функция размытия точки системы (пунктирная линия) для случая расфокусированной оптической системы.

Полученные результаты показывают полезность предложенного метода оценки оптимальной частоты пространственной модуляции излучения для 3D измерений на основе фазовой триангуляции. Показано, что в случае расфокусированной измерительной системы, частота оптимальной пространственной модуляции зондирующего излучения будет существенно меньшей, чем для хорошо согласованной сфокусированной оптической системы.

1.10. Триангуляционные измерения геометрических параметров динамических объектов в условиях фазово-неоднородных сред

Триангуляционные методы измерения геометрических параметров в промышленности активно развиваются и исследуются. Одной из

востребованных, но недостаточно развитых для практического использования областей являются триангуляционные измерения геометрических параметров динамично движущихся объектов в условиях интенсивных фазовых неоднородностей. Существующие в данной области технические решения [152-153] работают либо в адаптированных под пренебрежимо малые уровни фазовых неоднородностей среды условиях, либо работают при характерном времени измеряемого процесса существенно превышающем характерные времена конвективного движения воздушных масс [154]. Ниже представлен анализ известных технических решений, основанных на многопараметрическом развитии триангуляционных методов измерения, которые нацелены на повышение метрологических характеристик измерительных систем. Цель анализа – выявить технические решения, перспективные для разработки измерительных систем, эффективно работающих в условиях фазово-неоднородных сред, существенно влияющих на метрологические параметры измерителя.

Известен способ триангуляционного измерения объектов [155], при котором источник излучения формирует на поверхности исследуемого объекта световое пятно, отражённое световое излучение фокусируется на объективе приёмника оптического излучения, при этом приёмная система также содержит, по крайней мере, две апертурные диафрагмы, сужающие угол обзора объектива приёмника, расположенные между исследуемым объектом и объективом приёмника.

Известен триангуляционный способ измерения [156], при котором источник излучения формирует на поверхности исследуемого объекта световое пятно, отражённое световое излучение фокусируется на объективе приёмника оптического излучения, при этом приёмная система содержит две линзы, между которыми размещена щелевая диафрагма. Диафрагма располагается в фокусе первой, ближайшей к измеряемому объекту линзы и размер ее щели подбирается в соответствии с размером зондирующего пятна на поверхности объекта. Отраженное от поверхности объекта световое

излучение фокусируется первой линзой в плоскость щели и сформированное таким образом промежуточное изображение, затем фокусируется в плоскость объектива, который, в свою очередь, фокусирует световое пятно на приёмнике оптического излучения.

Известен электронно-оптический способ измерения [157], при котором источник излучения формирует на поверхности исследуемого объекта световое пятно, отражённое световое излучение фокусируется на объективе приёмника оптического излучения, при этом величину отклонения объекта определяют по смещению центра изображения точки с учетом средневзвешенного значения координаты пятна.

Общими недостатками всех перечисленных методов являются:

1. Низкая точность определения внешних смещений центра полученного изображения вследствие того, что помимо его смещения, связанного с отклонением исследуемой точки объекта, происходит еще дополнительное случайное смещение, связанное с изменением формы самого светового пятна (например, вследствие перепада рельефа или попадания в область пятна мельчайших песчинок, капель масла и пр.), а так же из-за наличия неравномерного коэффициента преломления воздуха в оптическом пути источника и приемника излучения, который может быть вызван температурным градиентом воздуха.
2. Данный способ измерений не позволяет определить ориентацию поверхности исследуемого объекта в пространстве.

Более того, прецизионные триангуляционные методы измерения геометрических параметров в условиях фазово-неоднородных сред в настоящее время работают либо в пренебрежимо малых уровнях фазовых неоднородностей [152], либо при характерном времени измеряемого процесса существенно больше, характерного времени конвективных искажений [153-154]. В разделе представлен метод облачной триангуляции и

обосновано его использование для измерения координат и углов поверхности динамического объекта в условиях фазово-неоднородной среды.

Пусть на поверхности измеряемого объекта сформировано световое пятно малого радиуса с центром в точке с координатами K . Из-за неоднородного показателя преломления оптической среды вдоль трассы распространения светового луча, координаты точки K будут описываться случайной величиной, имеющей нормальное распределение:

$$K(t)=F(t,K_0). \quad (1.129)$$

Координата K_0 соответствует начальному положению, ориентации и заданным внутренним параметрам излучающей системы. При достаточно большом времени накопления, координаты точки K , характеризующие положение светового пятна, сойдутся к некоторой величине

$$\langle K \rangle = \frac{1}{T} \int F(t, K_0) dt.. \quad (1.130)$$

При измерениях горячих динамических объектов возможность долгого накопления данных отсутствует. Но в условиях действия центральной предельной теоремы усреднение по временному или пространственному ансамблю является единственным методом повышения точности несмещенной оценки. Опираясь на экспериментально подтвержденную нами эргодичность процесса [158], мы использовали усреднение по пространственному ансамблю. На описанном подходе основан предложенный метод облачной триангуляции, позволяющий в условиях значительных оптических искажений точно и быстро измерять расстояние до движущейся поверхности с некоторым рельефом, например, в частном случае, до плоской светорассеивающей поверхности.

В качестве источника используется пространственно структурированная засветка в виде набора световых лучей. На поверхности

объекта такая засветка рассеивается в виде множества световых пятен $\{K_i\}$, образующих пространственно структурированное световое облако в небольшой окрестности точки с координатами $\langle K \rangle$. Излучатели, генерирующие лучи этой структурированной засветки, находятся на малом расстоянии друг от друга по сравнению с геометрическими размерами измеряемого объекта. Тогда световые лучи, соответствующие точкам K_i при прохождении оптической фазово-неоднородной среды претерпевают случайные отклонения. Эти отклонения имеют такие же статистические характеристики, как и для точки K . Следовательно, зависимость координат K_i от времени имеет схожую зависимость с точкой K :

$$K_i(t) = F(t, K_i^0). \quad (1.131)$$

Пусть световые точки на фотоприемнике образуют известную пространственную зависимость интенсивности $Y(c1..ck)$, где $(c1..ck)$ – параметры распределения Y , характеризующие расстояние до объекта. Поскольку функции K_i подчиняются нормальному распределению, параметры $(c1..ck)$ можно найти методом наименьших квадратов. Здесь неявно предположено, что распределения F имеют случайные гауссовы отклонения в зависимости от времени и пространственной локализации светового пучка. Такое приближение вполне допустимо, исходя из принятой нами гипотезы эргодичности данной динамической системы [158]. Здесь предположено, что искажения оптического сигнала фазово-неоднородной средой имеют случайное распределение возмущений показателя преломления оптической среды во времени и пространстве.

Согласно методу наименьших квадратов [159] параметры $(c1..ck)$ можно найти, исходя из условия минимизации отклонения мгновенных величин K_i от теоретического значения величины $Y(c1..ck)$:

$$\frac{\partial(\sqrt{\sum(K_i - Y(x,y))^2})}{\partial c_j} = 0 \quad (1.132)$$

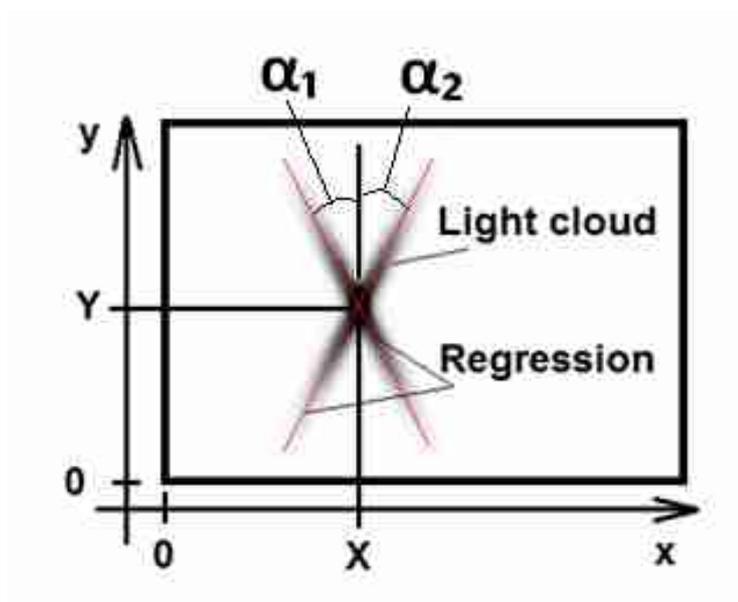


Рис. 1.36. Распределение облака световых точек на поверхности объекта в методе облачной триангуляции.

В методе облачной триангуляции [160] измеряемую поверхность зондируют набором световых лучей с заданным пространственным распределением интенсивности (два пересекающиеся световых облака). На светорассеивающей поверхности объекта формируются облака световых точек в виде двух пересекающихся сильно растянутых по одной их осей эллипсов. Приемная оптическая система регистрирует рассеянное излучение в виде пространственно искаженного двухмерного проективного распределения образа облака точек (рис.1.36). Регрессионный пространственный анализ этих облаков на зарегистрированном изображении позволяет определить расстояние до поверхности объекта (координата X пересечения линий регрессии) и его наклон в пространстве (углы наклона регрессионных линий α_1, α_2).

За счет использования большого набора данных в каждом зарегистрированном изображении и регрессионной устойчивости к выбросам предложенный метод облачной триангуляции хорошо работает в условиях сильных фазовых искажений оптических сигналов при измерениях расстояния до поверхности горячего динамического объекта и ее угла наклона.

1.11. Триангуляционные измерения толщины динамичных объектов в условиях фазово-неоднородных сред

Задача измерения толщины динамично движущихся объектов в условиях фазово-неоднородных сред наиболее востребована в металлургии. При производстве листового металлопроката методом горячей прокатки, необходимо обеспечивать высокоточный контроль толщины. Это связано с высокими требованиями к качеству листового проката, допускающими отклонение толщины листа менее, чем на 50 мкм. В настоящее время наиболее широкое распространение получили радиационно-опасные методы измерения толщины на основе эффекта ослабления проникающего сквозь исследуемый объект гамма-излучения [161-165].

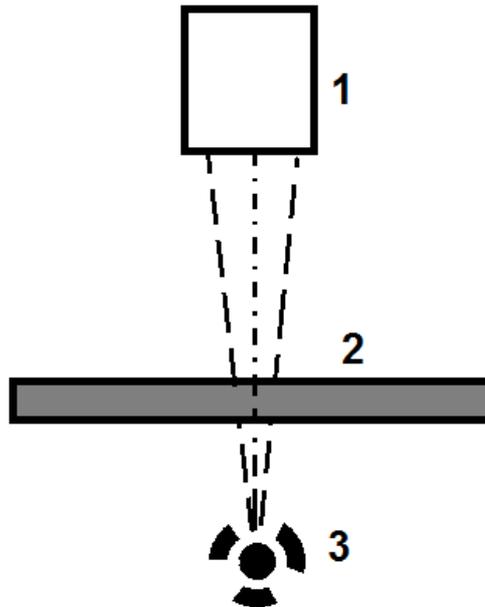


Рис. 1.37. Принцип работы рентгеновских толщиномеров (1-приемник; 2-объект измерения; 3-источник излучения).

Измерение выполняют следующим образом. Узкий пучок лучей известной интенсивности проникает через изделие, испытывая при этом ослабление до определенной величины в соответствии с законом поглощения (рис. 1.37):

$$I_k = I_0 e^{-\alpha r}. \quad (1.133)$$

Основной недостаток рентгеновских толщиномеров, кроме их радиационной опасности и чувствительности к химическому составу материалов, заключается в том, что метод поглощения рентгеновского излучения не учитывает пространственный наклон измеряемого листа в зоне измерения. Это приводит к фундаментальным ограничениям точности метода.

Для решения данной проблемы активно развивают оптические триангуляционные методы измерения. Известно большое количество

методов на основе дифференциальной триангуляции, позволяющих выполнять измерения толщины динамично движущихся объектов с достаточно малой погрешностью.

Известен способ триангуляционного измерения толщины изделий [166], заключающийся в том, что осуществляют подачу изделия в зону измерений, направляют на изделие с двух противоположных сторон с помощью источников излучения оптических систем лежащие на одной прямой зондирующие пучки излучения, принимают на позиционно-чувствительные фотоприемники оптических систем отраженные от изделия излучения и путем измерения координат световых пятен на позиционно-чувствительных фотоприемниках оптических систем определяют расстояния от центров соответствующих оптических систем до поверхности изделия, а толщину изделия вычисляют по формуле $h = T - A - B$, где T - расстояние между центрами первой и второй оптических систем (величина постоянная, задается конструктивно), A и B - соответственно расстояния от центров первой и второй оптических систем до поверхности изделия.

Измерение толщины изделия по такому способу осуществляется без учета его наклона, что снижает точность измерений.

Известен также способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий с учетом наклона [167], заключающийся в том, что осуществляют подачу листового изделия в зону измерений, направляют на листовое изделие с двух противоположных сторон с помощью источников излучения оптических систем лежащие на одной прямой опорные зондирующие пучки излучения, кроме того, направляют с одной из сторон на листовое изделие дополнительный зондирующий пучок излучения, ориентированный параллельно опорным пучкам и отстоящий от них на заданном расстоянии, принимают на позиционно-чувствительные фотоприемники оптических систем отраженные от листового изделия

опорные и дополнительный пучки излучения и путем измерения координат световых пятен на позиционно-чувствительных фотоприемниках оптических систем определяют расстояния от центров соответствующих оптических систем до листового изделия, а толщину листового изделия вычисляют из показаний соответствующих оптических систем и геометрического расположения оптических систем в пространстве.

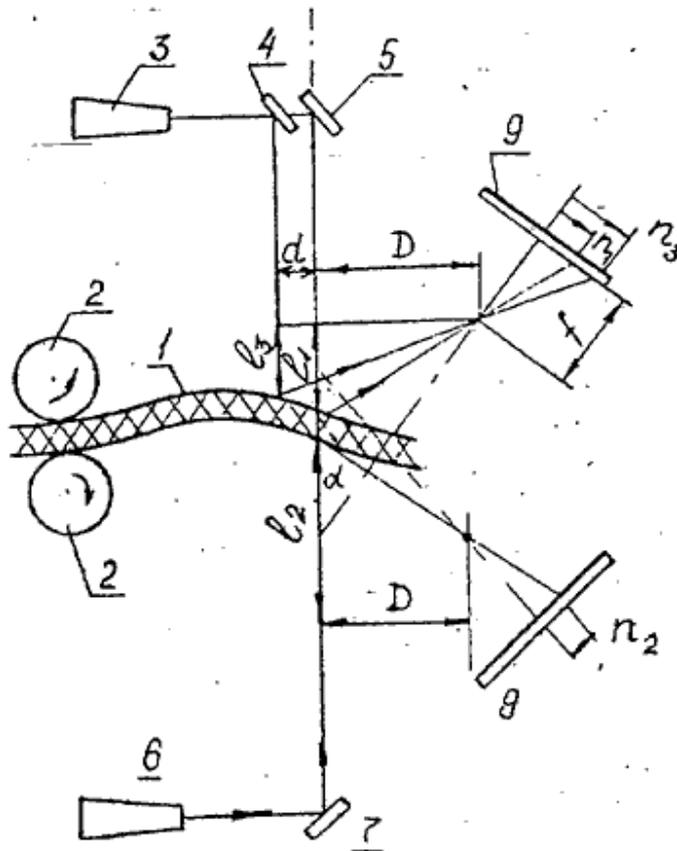


Рисунок 1.38. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий согласно изобретению [167]. Показаны: 1 – измеряемый прокат, 2 – направляющие валы, 3,6 – излучатели, 4,5,7 – поворотные зеркала, 8,9 – приемники излучения.

Недостатком такого способа является низкая точность измерений, так как при измерениях учитывается наклон листового изделия только в одном (продольном) направлении (направлении подачи изделия) и не учитывается

его наклон в поперечном направлении (направлении, перпендикулярном направлению подачи изделия).

Известен способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий с учетом наклона в продольном и поперечном направлениях [168] (рис. 1.39). Он заключается в том, что осуществляют подачу листового изделия в зону измерений, направляют на листовое изделие с двух противоположных сторон с помощью источников излучения оптических систем лежащие на одной прямой опорные зондирующие пучки излучения, кроме того, направляют с одной из сторон на листовое изделие два дополнительных зондирующих пучка излучения, ориентированные параллельно опорным пучкам и не лежащие все четыре вместе на одной плоскости, принимают на позиционно-чувствительные фотоприемники оптических систем отраженные от листового изделия опорные и дополнительные пучки излучения, измеряют координаты световых пятен на позиционно-чувствительных фотоприемниках оптических систем, а толщину листового изделия вычисляют из показаний соответствующих оптических систем и геометрического расположения оптических систем в пространстве.

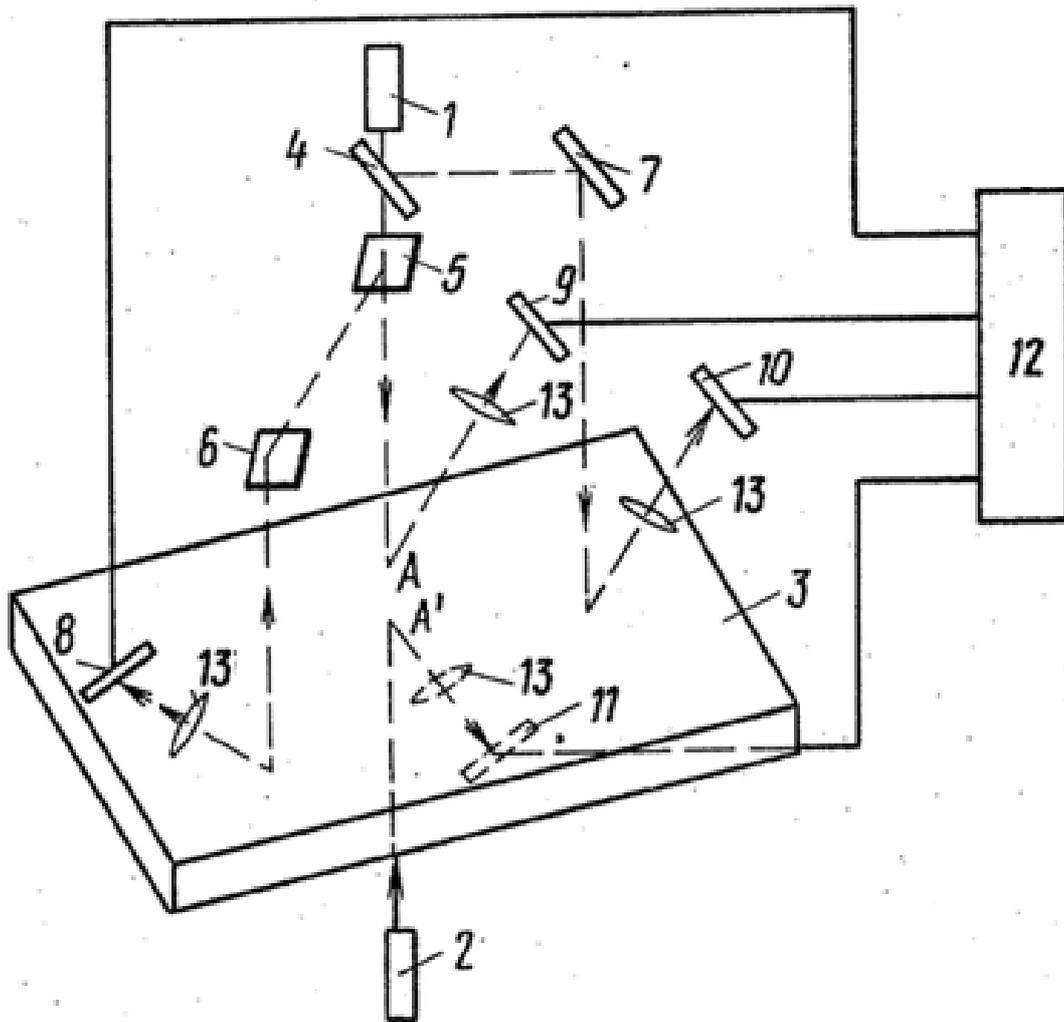


Рис.1.39. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий с учетом наклона в продольном и поперечном направлениях. 1,2 – излучатели, 3 – измеряемый объект, 4,5,6,7 – поворотные зеркала, 8,9,10,11 – фотоприемники, 12 – вычислительный модуль, 13 – линзы.

Основным недостатком метода является то, что наклон листового изделия определяется лишь по наклону одной (верхней) поверхности изделия, не учитывая при этом возможно иной наклон другой (нижней) поверхности, вызванный изменением толщины изделия или его искривлением. Указанное приводит к снижению точности измерения толщины изделия.

Недостатком метода является необходимость использования для его реализации сложных оптических систем, содержащих непрозрачные и полупрозрачные зеркала, критичные к настройке и юстировке.

Известен способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий [169] учитывающий наклон изделия как в продольном, так и в поперечном направлениях (рис. 1.40).

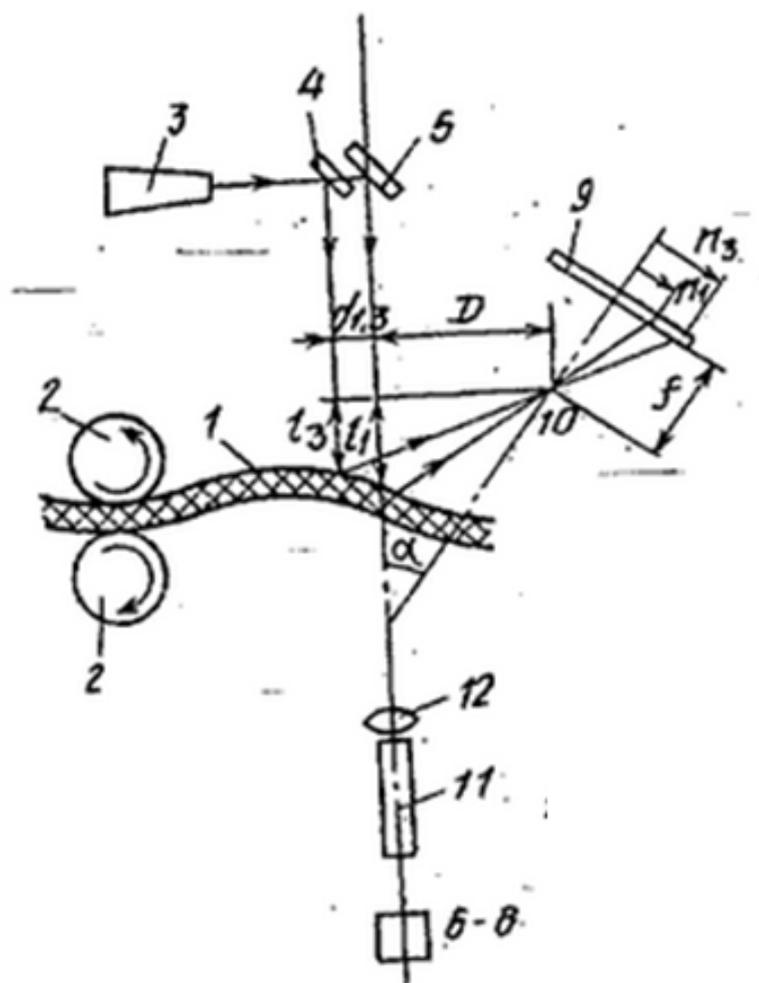


Рис.1.40. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий с учетом наклона в продольном и поперечном направлениях. Вид спереди. Показаны: 1 – измеряемый объект, 2 – направляющие валы, 3,6 – излучатель, 4,5,7,8 – поворотные зеркала, 9,11 – фотоприемники, 10,12 – линзы.

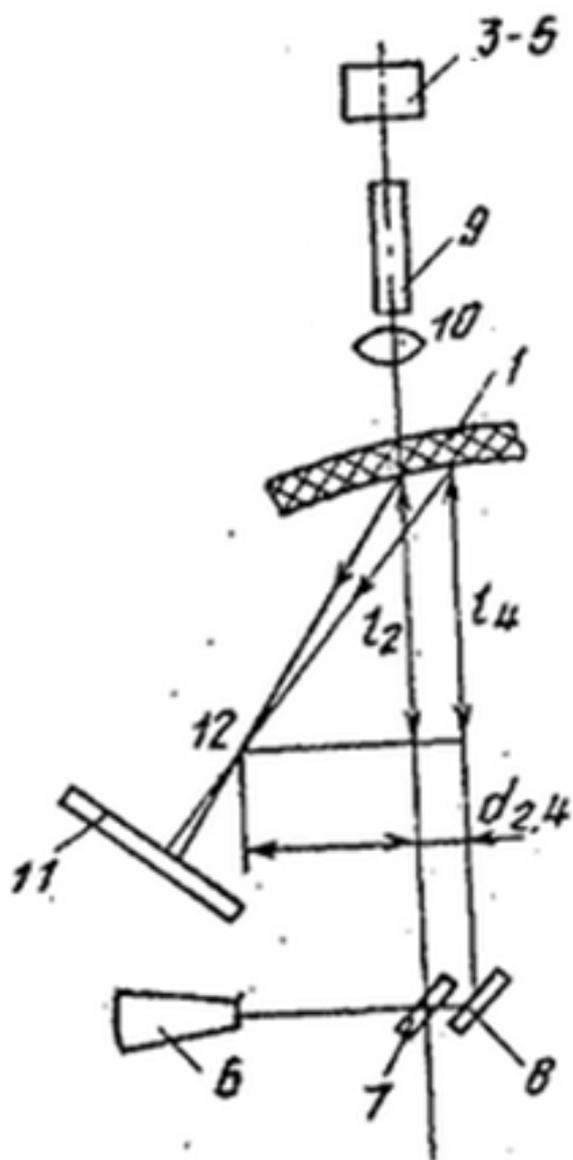


Рис.1.41. - Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий с учетом наклона в продольном и поперечном направлениях. Вид сбоку. Показаны:

1 – измеряемый объект, 2 – направляющие валы, 3,6 – излучатель, 4,5,7,8 – поворотные зеркала, 9,11 – фотоприемники, 10,12 – линзы.

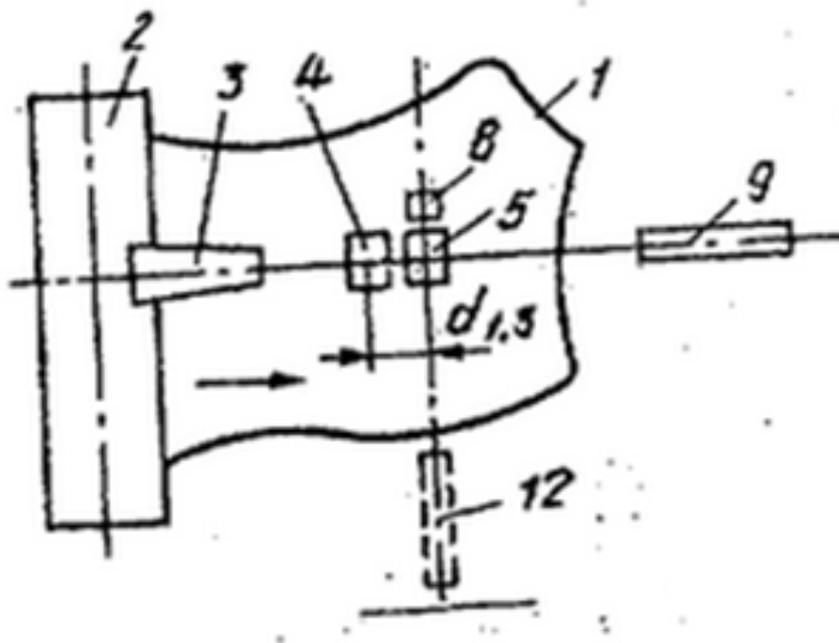


Рис.1.42. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий с учетом наклона в продольном и поперечном направлениях. Вид сверху. Показаны: 1 – измеряемый объект, 2 – направляющие валы, 3,6 – излучатель, 4,5,7,8 – поворотные зеркала, 9,11 – фотоприемники, 10,12 – линзы.

Согласно данному способу осуществляют подачу листового изделия в зону измерений, направляют на листовое изделие с двух противоположных сторон с помощью источников излучения оптических систем лежащие на одной прямой опорные зондирующие пучки излучения, кроме того, направляют с обеих сторон на листовое изделие ориентированные параллельно опорным пучкам дополнительные зондирующие пучки излучения, отстоящие от них на заданных расстояниях и лежащие с ними во взаимно перпендикулярных плоскостях, принимают на позиционно-чувствительные фотоприемники оптических систем отраженные от листового изделия основные и дополнительные пучки излучения и путем измерения координат световых пятен на позиционно-чувствительных фотоприемниках оптических систем определяют расстояния от центров

соответствующих оптических систем до листового изделия, а толщину листового изделия вычисляют из показаний соответствующих оптических систем и геометрического расположения оптических систем в пространстве.

Точность измерения толщины листового изделия существенным образом зависит от того, насколько точно в соответствующей формуле ее расчета учитывается информация о геометрических параметрах изделия.

В реальности имеет место одновременное изменение толщины и наклона (коробления) листового изделия по двум координатам, в результате чего на отдельных его участках нижняя и верхняя поверхности могут быть непараллельными друг другу и иметь разный наклон, что не учитывается в данном техническом решении. В методе наклон локального участка листового изделия оценивается лишь по наклону одной из его поверхностей. При этом, однако, не учитывается наклон другой его поверхности.

Для триангуляционного измерения толщины листовых изделий в условиях пренебрежимо малых фазовых неоднородностей среды предложен метод дифференциальной триангуляции, являющийся развитием существующих методов. Целью является повышение точности определения толщины листового изделия за счет учета наклона нижней и верхней его поверхностей.

Поставленная задача решается тем, что в способе триангуляционного измерения толщины листовых изделий [170], при котором осуществляют подачу листового изделия в зону измерений, на изделие с двух противоположных сторон с помощью источников излучения оптических систем направляют зондирующие пучки излучения, отражённое от изделия излучение фокусируют на фотоприемники оптических систем и путём измерения координат световых пятен на фотоприёмниках определяют расстояние от центров оптических систем до поверхности изделия, при этом толщину листового изделия вычисляют из показаний соответствующих

оптических систем и геометрического расположения оптических систем в пространстве, согласно изобретению, зондирующих пучков излучения как минимум три с каждой стороны, причем источники излучения оптических систем ориентированы таким образом, что зондирующие пучки на противоположных сторонах листового изделия образуют вершины пересекающихся выпуклых многоугольников, при этом толщину изделия вычисляют как расстояние между многоугольниками на противоположных сторонах листа в области их пересечения.

Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий представлен на рис. 1.41. На изделие 1 с помощью источников излучения оптических систем 2, 3, 4 направляют зондирующие пучки излучения 2', 3', 4' с одной стороны и с помощью источников излучения оптических систем 5,6,7 направляют зондирующие пучки излучения 5', 6', 7' с другой стороны. Отраженное от изделия излучение фокусируют на фотоприёмники оптических систем 8 и 9, которые могут состоять, например, из фоточувствительной матрицы и фокусирующей линзы.

На рис. 1.42 представлена схема расположения пучков излучения на поверхностях изделия. Пучки излучения, расположенные с одной стороны изделия 5',6',7', образуют многоугольник (в частности треугольник) М1. Пучки излучения, расположенные с противоположной стороны изделия 2',3',4', образуют многоугольник (в частности треугольник) М2. Многоугольник М3 образован пересечением многоугольников М1 и М2. Вершины многоугольника М3 лежат в точках к1, к2, к3, к4, к5, к6.

Способ осуществляется следующим образом. На изделие 1 с одной стороны с помощью источников излучения оптических систем 2, 3, 4 направляют зондирующие пучки излучения 2', 3', 4', отражённое от изделия излучение фокусируют на фотоприёмнике оптической системы 8. С другой стороны помощью источников излучения оптических систем 5,6,7 направляют зондирующие пучки излучения 5', 6', 7', отраженное от изделия излучение фокусируют на фотоприёмнике оптической системы 9.

Поскольку геометрическое положение источников излучения оптических систем 2,3,4, направление излучения и положение оптической системы 8, принимающей отражённое от изделия излучение неподвижны в пространстве, то по координатам световых пятен на фотоприёмнике оптической системы 8 можно однозначно определить пространственные координаты зондирующих пучков излучения 2', 3', 4' на поверхности изделия. Аналогично определяются пространственные координаты зондирующих пучков 5', 6', 7' на противоположной поверхности изделия 1. Координаты пучков излучения вычисляются с помощью процедуры калибровки, реализация которой представлена ниже.

После определения пространственных координат зондирующих пучков излучения 2', 3', 4', 5', 6', 7' на поверхности изделия 1 вычисляется толщина изделия по следующему алгоритму:

1. Вычисляются пространственные координаты многоугольника M1 - ортогональной проекции многоугольника, образованного пучками излучения 5',6',7' на плоскость, образованную многоугольником 2',3',4' (многоугольник M2).

2. Вычисляются пространственные координаты вершин многоугольника M3, образованного пересечением многоугольников M1 и M2.

3. Вычисляются пространственные координаты центра масс многоугольника M3, например, следующим образом:

- a. Многоугольник M3 разбивается на треугольники $k_1k_2k_6$, $k_2k_3k_6$, $k_3k_4k_6$, $k_4k_5k_6$.

- b. Вычисляются координаты центра масс (x_i, y_i, z_i) и площадь полученных треугольников (S_i) , используя стандартные геометрические формулы.

- c. Вычисляются координаты центра масс многоугольника M3 по формулам

$$x_c = \frac{\sum x_i S_i}{\sum S_i}, \quad (1.134)$$

$$y_c = \frac{\sum y_i S_i}{\sum S_i}, \quad (1.135)$$

$$z_c = \frac{\sum z_i S_i}{\sum S_i}, \quad (1.136)$$

где x_i, y_i, z_i – пространственные координаты i -й вершины многоугольника МЗ, N – количество вершин многоугольника МЗ.

Калибровка осуществляется следующим образом. Независимо калибруются источники излучения, чтобы по положению их изображения на фотоприемнике можно определить пространственное положение пучка излучения на контролируемом объекте. Калибровка может выполняться либо по геометрическому расположению и направлению излучения источников и расположению приемников излучения, либо с использованием эталонной плоской калибровочной поверхности, смещаемой на известное расстояние перпендикулярно плоскости поверхности.

В результате калибровки для каждого источника излучения будут получены зависимости:

$$x = K_x(m, n), \quad (1.137)$$

$$y = K_y(m, n), \quad (1.138)$$

$$z = K_z(m, n), \quad (1.139)$$

где m, n – координаты изображения пучка излучения на фотоприемнике, K_x, K_y, K_z – функции зависимости соответствующих пространственных координат от координат изображения пучка на фотоприемнике. Функции K_x, K_y, K_z представляют собой монотонные функции, близкие к линейным.

Предложенный метод триангуляционного измерения толщины листовых изделий позволяет измерять толщину листового изделия при его произвольной ориентации в измерительном объеме. Поскольку метод основан на применении детерминированного набора точечных триангуляционных измерителей, его можно эффективно применять для измерения толщины в условиях пренебрежимо малых фазовых неоднородностей в области измерения. Техническое решение может применяться, например, в металлургической промышленности для измерения толщины холодного металлопроката.

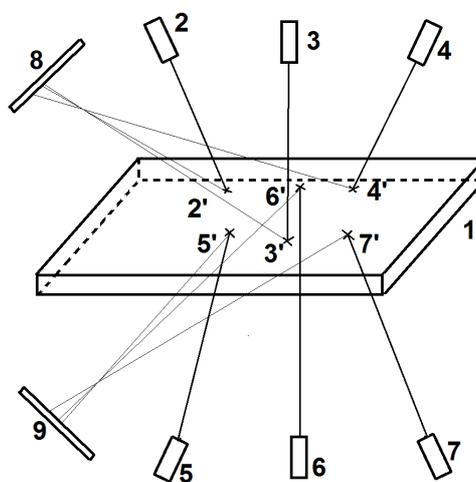


Рис.1.41. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий. Показаны: 1 – измеряемый объект, 2-7 – излучатели, 8-9 – фотоприемники, 2'-7' – области рассеяния излучения.

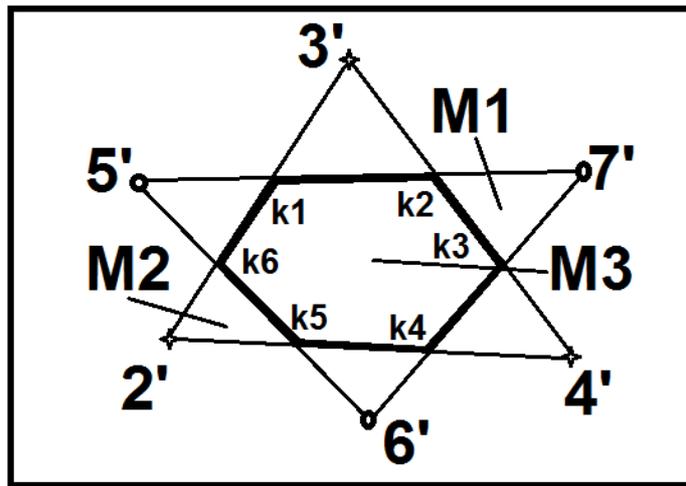


Рис.1.42. Схема расположения пучков излучения на поверхностях изделия в методе триангуляционного измерения толщины.

Сложность применения методов дифференциальной точечной триангуляции в условиях интенсивных фазовых неоднородностей обусловлена искажениями, вносимыми в структуру оптических сигналов триангуляторов. На рис. 1.43 представлены показания триангуляторов при измерении расстояния до неподвижной сильно нагретой поверхности (около 800 градусов вблизи которой возникают конвективные потоки, создающие градиентную фазово-неоднородную среду и показания триангулятора, измеряющего расстояние до поверхности, имеющей температуру окружающего воздуха. Измерения выполнены триангуляционным измерителем РИФТЕК RF600 [172] в цехе горячего проката ОАО «Новосибирский металлургический завод им.Кузьмина». Экспериментальный график показывает, что при измерениях в условиях фазово-неоднородной среды ошибка показаний триангуляционного измерителя увеличивается более, чем в 40 раз.

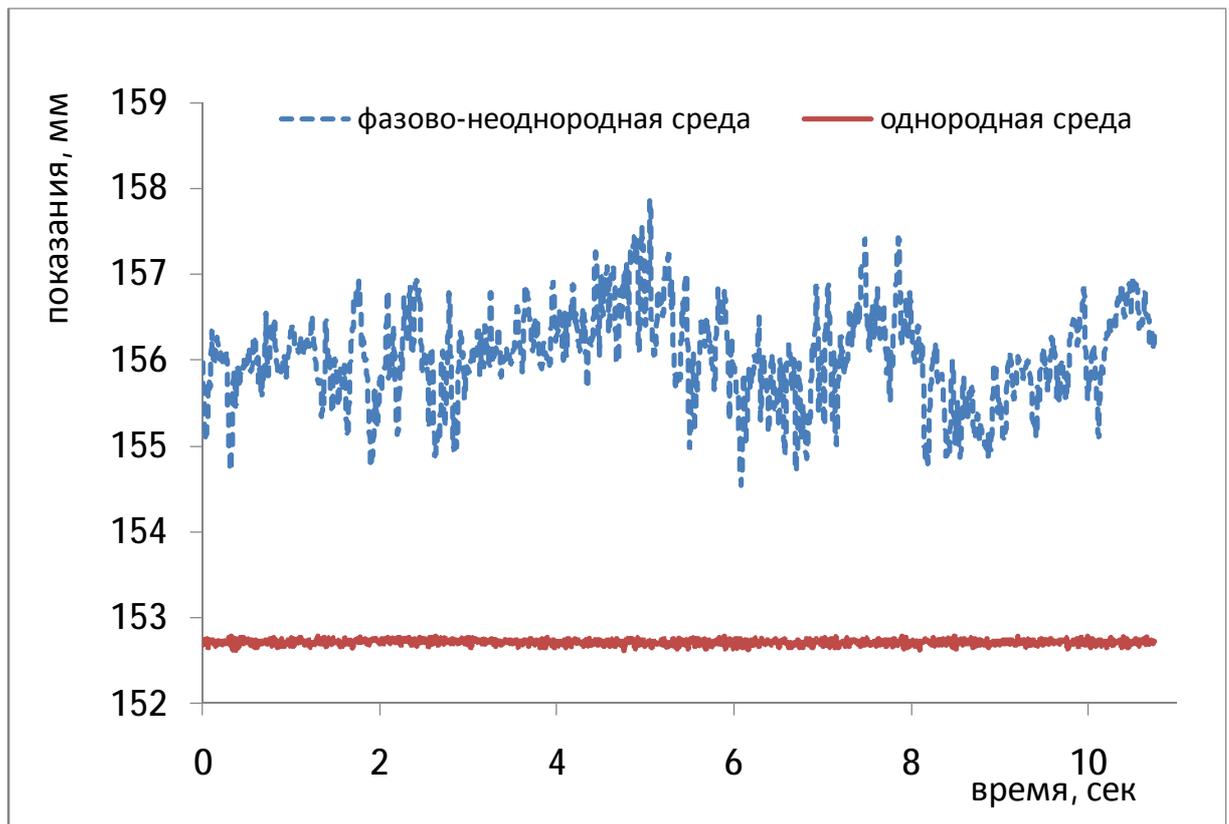


Рис. 1.43. – измерение расстояния до неподвижной поверхности в условиях фазово-неоднородной (пунктирный маркер) и однородной (сплошной маркер) среды.

Для измерения толщины динамических объектов в условиях термоградиентных фазовых неоднородностей, перспективно использовать методы дифференциальной облачной триангуляции. Принцип измерения заключается в следующем. Измерительные модули, реализующие метод облачной триангуляции неподвижно располагают с двух противоположных сторон относительно проката и ориентируют так, чтобы они проводили измерения в одной точке (рис. 1.44). Облачные триангуляторы позволяют проводить синхронные измерения расстояния и положения поверхности проката в пространстве. Далее, используя калибровочные данные, вычисляют толщину проката в точке.

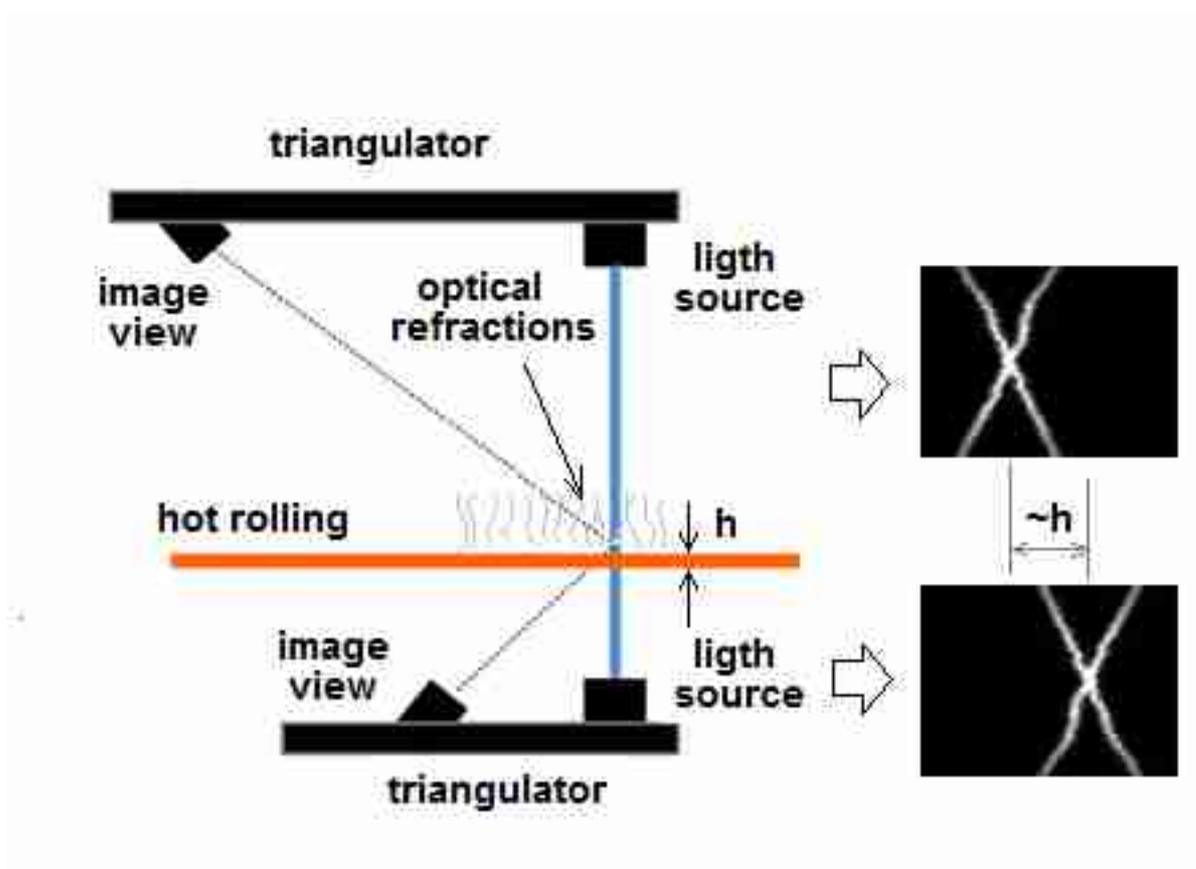


Рис. 1.44. Принцип измерения толщины методом дифференциальной облачной триангуляции.

Расстояние до исследуемого объекта от источника излучения определяют по формуле, аналогично классическому точечному триангулятору [170]:

$$z = Z_0 + \frac{\Delta X \cdot P}{f \cdot \sin(\theta)}, \quad (1.140)$$

где ΔX – характеристический параметр функции пространственного распределения интенсивности излучения, наблюдаемого приемником оптического излучения, Z_0 – параметр, определяющий начальное положение измеряемого листа, P – расстояния от фокуса приемной оптической системы до поверхности измеряемого объекта, f – фокусное расстояние приемной

оптической системы, θ – угол триангуляции. Толщину листа можно вычислять из следующего выражения:

$$h = L - Z_1 - Z_2 - q(\alpha_1, \alpha_2), \quad (1.141)$$

где L – расстояние между верхним и нижним триангулятором, Z_1, Z_2 – расстояния до верхней и нижней поверхности измеряемого листа, измеренные верхним и нижним триангулятором, q – компенсирующая поправка, определенная в процессе калибровки, нацеленная на компенсацию искажений, вносимых пространственным наклоном измеряемого листа, α_1, α_2 – углы наклона регрессионных кривых на изображении облачного триангулятора.

Представленный метод измерения толщины горячего проката на основе синхронной дифференциальной облачной триангуляции промышленно применим и реализуем. Алгоритм калибровки измерителя, работающего на основе реализации предложенного метода, достаточно нетривиален. Он описан в следующем разделе.

Выводы по главе 1

- Выполнены исследования распространения оптических сигналов триангуляционных измерителей в термоградиентных фазово-неоднородных средах. Показано, что флуктуации координат центров зондирующих световых пучков имеют характер нормального распределения на интервалах времени, больших характерных временных параметров конвективных и вихревых процессов.
- Развита триангуляционная методика с использованием структурированного освещения для прецизионных измерений трехмерной геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами в условиях фазово-неоднородных сред.
- Впервые предложен метод облачной триангуляции для прецизионного измерения геометрии динамично движущихся объектов в фазово-неоднородных средах. Обеспечена устойчивость показаний к нестационарным искажениям фазово-неоднородной среды в оптическом тракте.
- Предложен метод синхронной дифференциальной облачной триангуляции для измерения толщины динамично движущихся объектов. Показано, что метод устойчив к нестационарным искажениям в оптическом тракте и обеспечивает удаленное измерение толщины в условиях термоградиентных фазово-неоднородных сред.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ В ФАЗОВО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Глава посвящена научно-технической проблеме калибровки многопараметрических триангуляционных измерителей, в значительной степени определяющей достигаемую точность. Для точного измерения геометрических параметров необходимо знать оптические параметры приемника и источника оптического излучения в глобальной системе координат. Задача калибровки методов структурированного освещения сводится к определению функционала, определяющего взаимно-однозначное соответствие между пространственными координатами точки на поверхности объекта декартовой системой координат в области измерения и показаниями измерительной системы.

В главе представлены методы калибровки триангуляционных измерителей для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов и для измерения толщины динамических объектов в условиях фазово-неоднородной среды. Выполнена практическая реализация предложенных методов и приведены экспериментальные оценки вклада процедуры калибровки в итоговую погрешность измерения.

2.1 Анализ известных методов калибровки оптоэлектронных систем измерения 3D геометрии

Калибровка оптоэлектронных систем для измерения 3D геометрии заключается в определении набора параметров, описывающих отображение 2D координат пространственного модулятора оптического источника на пространственные 3D координаты, в которых расположен измеряемый объект (мировые координаты). И отображение мировых 3D координат, в которых расположен измеряемый объект, на 2D координаты изображения приемника оптического излучения (рис.2.1). Получив координаты точки

измеряемого объекта на изображении приемника и зная соответствующие координаты в плоскости модулятора излучения, мы можем определить трехмерные координаты точки в мировой системе координат. В отличие от калибровки роботизированных рук или автоматизированных тележек [82,150,173,174], предложенные и использованные в работе методы калибровки являются статическими. Калибровка производится один раз и после этого будет достоверной, пока относительная позиция камеры и проектора остаются неизменными.

В измерительных схемах, использующих пространственно модулированные источники оптического излучения, калибровка является крайне важной задачей. Восстановление полной информации о геометрии поверхности возможно, если известны оптические параметры приемника и источника оптического излучения в глобальной системе координат. Как правило, методы калибровки систем технического зрения активного типа являются более сложными, по сравнению с методами калибровки систем пассивного типа, например систем стереовидения.

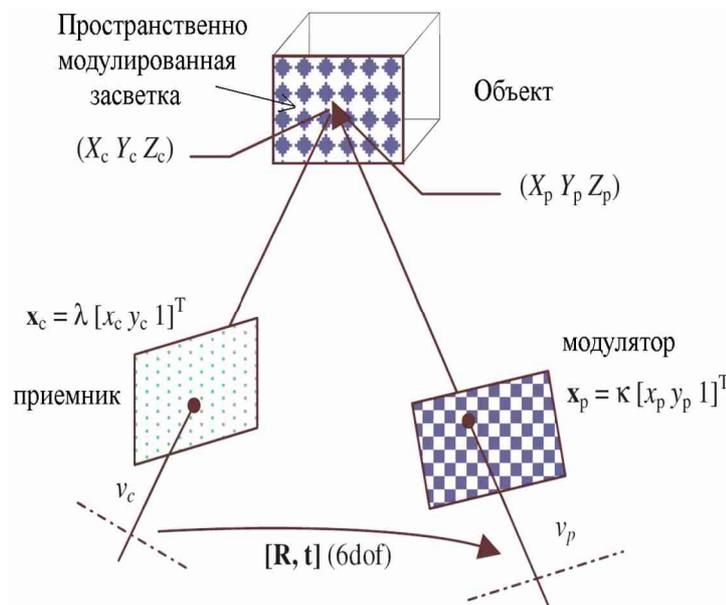


Рис.2.1. Связь между мировой системой координат, системой координат приемника и системой координат источника оптического излучения.

Стандартное техническое решение, являющееся основой многих методов калибровок [175-178] связано с исполнением 3-х шаговой процедуры. Это - определение внутренних параметров приемника излучения, определение внутренних параметров источника излучения и определение геометрических параметров Евклидова преобразования, связанных с источником и приемником оптического излучения.

Как правило, оптические элементы источника и приемника предполагают линейными, то есть исключают эффекты, вызванные нелинейными искажениями оптических элементов. Преобразование из 3-х мировых декартовых координат в координаты изображения на приемнике структурированной засветки описывают с помощью перспективной матрицы преобразований размерностью 3x4. Преобразование, описываемое перспективной матрицей размерностью 2x4, преобразует мировые координаты в координаты линии на источнике пространственно модулированного освещения.

Определим мировую систему координат X_w , в которой определены координаты объекта. Пусть X_c - система координат приемника, в которой определены координаты пикселя на изображении объекта, а X_p - система координат источника, в которой определен начальных фазовых сдвиг зондирующей синусоиды. Преобразование из мировых координат в координаты камеры описывается соотношением:

$$X_c = C_c X_w, \quad (2.1)$$

где C_c – перспективная матрица камеры, имеющая вид:

$$C_c = a \begin{bmatrix} f_x & kf_y & x_c^0 \\ 0 & f_y & y_c^0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R_c \quad t_c]. \quad (2.2)$$

Матрица поворота R_c и вектор линейного перемещения t_c определяют преобразование между мировой системой координат X_w и координат на центральной плоскости приемника оптического излучения. Параметры f_x и f_y являются фокусным расстоянием приемника, масштабированным в размерность изображения. x_c^0 и y_c^0 – начало координат в плоскости изображения приемника излучения. Параметр a – коэффициент пропорциональности и k – сдвиг системы координат приемника изображения.

Аналогично, преобразование из мировых координат в координаты источника оптического излучения:

$$X_p = C_p X_w, \quad (2.3)$$

где C_p – перспективная матрица источника, имеющая вид:

$$C_p = a \begin{bmatrix} f_p & 0 & x_p^0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R_p \quad t_p]. \quad (2.4)$$

Матрица поворота R_p и вектор линейного перемещения t_p определяют преобразование между мировой системой координат X_w и координатами на центральной плоскости источника. Параметр f_p – фокусное расстояние источника, масштабированным в размерность пространственного модулятора, x_p^0 – начало координат в плоскости изображения модулятора, которое физически является координатой x точки пересечения оптической оси источника излучения и плоскости пространственного модулятора.

Уравнения 2.1-2.4 определяют преобразование

$$T : X_w \rightarrow (X_c, X_p), \quad (2.5)$$

которое по координатам точки в мировой системе координат определяет координаты точки на изображении и начальный сдвиг зондирующей синусоиды. Определим преобразование T , как прямое преобразование.

В нашей задаче мировые координаты объекта неизвестны и их требуется определить, имея координаты точки на изображении объекта x_c и значение начального сдвига фазы зондирующей синусоиды x_p . Определим преобразование вида

$$T^{-1} : (X_c, X_p) \rightarrow X_w, \quad (2.6)$$

как обратное преобразование. Таким образом, процесс калибровки измерительной системы сводится к определению обратного преобразования T^{-1} .

В большинстве работ при определении внутренних параметров источника и приемника оптического излучения авторы пользуются приближениями геометрической оптики, которые не учитывают искажения, вызванные дефектами и абберациями оптических элементов. При использовании измерителей в лабораторных условиях и применении высококачественной малоапертурной оптики ошибки, связанные с оптическими абберациями будут пренебрежимо малы, но при многопараметрической триангуляции динамических объектов в фазово-неоднородных средах их необходимо учитывать

В литературе большое внимание уделено задаче калибровки приемника оптического излучения [179-185]. Это связано с широким применением приемников оптического излучения в системах технического зрения.

Известен метод калибровки приемника изображения структурированной засветки с помощью высокоточной калибровочной

плоскости с нанесенными координатными метками (рис 2.2). Для определения параметров приемника необходимо калибровочную поверхность расположить на различных точно известных расстояниях от приемника изображения.

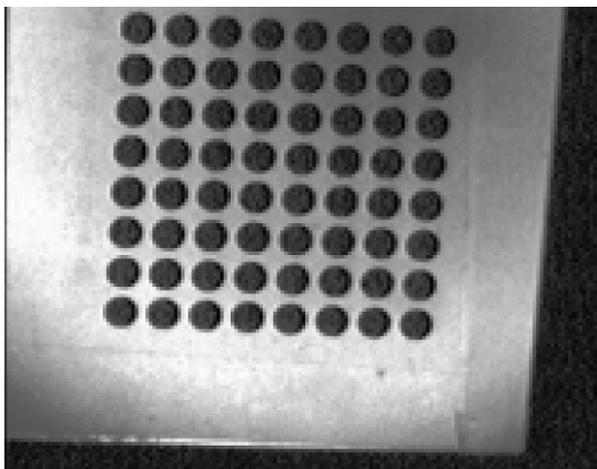


Рис.2.2. Калибровочная плоскость для определения внутренних параметров приемника оптического излучения.

Известны методы частичной калибровки систем технического зрения [185-191]. Они нацелены на корректировку калибровки, вызванную изменением взаимного расположения приемника и источника структурированной засветки, при условии сохранения внутренних параметров этих устройств. Эти методы основаны на использовании различных калибровочных объектов, благодаря которым вычисляют параметры, определяющие взаимное положение устройств.

Подобные методы частичной калибровки пришли из систем технического зрения пассивного типа – систем стереовидения, систем, определяющих третью компоненту по движению. Учитывая, что в системах, использующих структурированную засветку, как правило, процесс измерения подразумевает статичное расположение источника и приемника структурированной засветки, то большинство предложенных методов частичной калибровки в диссертационной работе не могли быть

использованы, так как отсутствует возможность наблюдения калибровочного объекта с различных позиций.

Известны методы частичной калибровки систем, использующих структурированное освещение, в основе которых заложены некоторые ограничения на возможные свойства оптического источника или приемника. В работе [192-193] предложен метод частичной калибровки, исходя из предположения, что структурированная засветка в виде квадрата формирует изображение в виде параллелограмма на любой плоской поверхности. Это предположение предъявляет дополнительные требования к источнику структурированной засветки, которые не всегда могут быть удовлетворены. В другой работе [194] предложен метод частичной калибровки, требующий измерений калибровочного объекта, смещаемого в пространстве на известные расстояния. Сложность точного перемещения калибровочного объекта для задачи частичной калибровки сравнима с процедурой полной комплексной калибровки системы. Поэтому использовать данные известные методы в нашей задаче оказалось нецелесообразным.

При выполнении калибровки измерительного комплекса в условиях фазово-неоднородной среды необходимо учитывать случайные статистические искажения, вносимые средой в процесс измерения. Таким образом, было необходимо разработать соответствующие методы калибровки, обеспечивающие устойчивость к оптическим искажениям фазово-неоднородных сред.

Для компенсации всех нелинейных искажений, вызванных оптическими элементами источника и приемника оптического излучения, а также для обеспечения устойчивости методов к случайным искажениям термоградиентных фазово-неоднородных сред, необходимо проводить комплексную калибровку всей измерительной системы, отличающуюся возможностью статистического накопления экспериментальных данных для снижения калибровочной погрешности.

Предложены методы комплексной калибровки измерительных систем на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, обеспечивающие компенсацию оптических aberrаций и определение трехмерной геометрии измеряемого объекта в декартовой системе координат в условиях термоградиентных фазово-неоднородных сред.

Калибровка с использованием параллельных калибровочных плоскостей предполагает наличие эталонной плоской поверхности, которая является калибрующим объектом. Метод позволяет с высокой точностью компенсировать нелинейности оптических элементов, но довольно сложен в реализации. Особенно это проявляется при калибровках систем для измерения крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Основные трудности связаны с созданием плоской эталонной высокоточной поверхности и со сложностью ее прецизионного перемещения в пространстве.

Другой метод предусматривает использование калибровочной мишени в качестве калибрующего объекта. Реализация метода отличается относительной простотой, подобные методы калибровки достаточно перспективны при измерениях геометрии крупногабаритных объектов.

2.2 Калибровка триангуляционного измерителя с использованием калибровочных объектов

Ниже представлена калибровка оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения, основанная на использовании плоской калибровочной поверхности. Калибровка заключается в проведении цикла измерений калибровочной поверхности (рис. 2.3), в результате которого во внутреннем

запоминающем устройстве компьютера 4 (рис.1.8) формируется набор изображений поверхности. Далее проводится серия аналогичных измерений для калибровочной поверхности, параллельно смещаемой по направлению от источника освещения на некоторые интервалы с сохранением результатов в электронном блоке 4. Самая удаленная поверхность определяется как базовая.

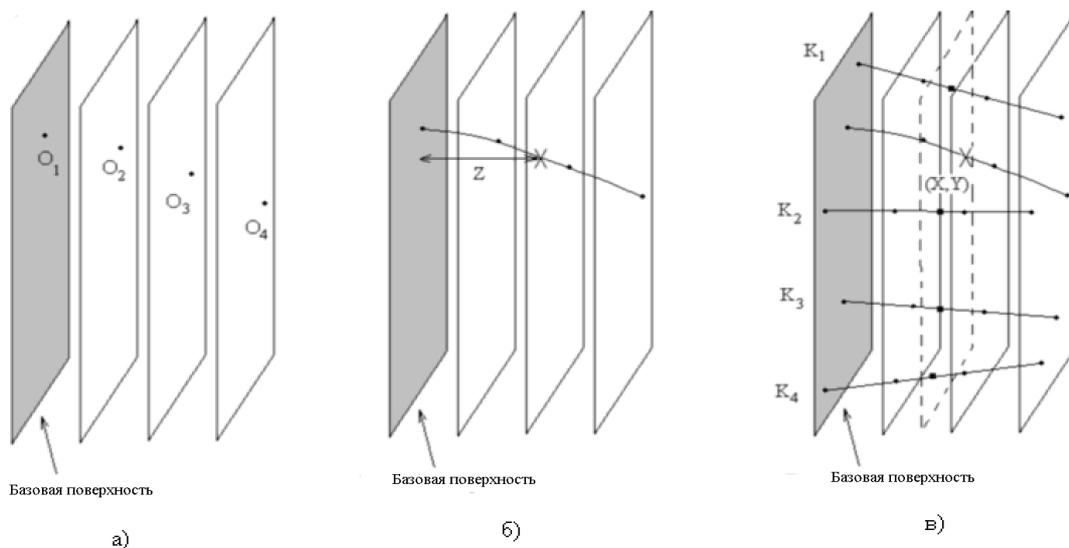


Рис.2.3. Определение декартовых координат точки.

(а – определение “опорных” точек на изображениях плоской поверхности, б – определение Z-координаты, в – определение X, Y координат).

Поскольку зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения однозначно определяет высоту рельефа поверхности контролируемого объекта, а две другие координаты определяются по положению искажений структуры подсветки в зарегистрированных изображениях, то для каждой точки измеренной поверхности определяется точка на базовой поверхности, в которой зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения была аналогичной.

После получения изображений контролируемого объекта для каждой точки на изображениях контролируемого объекта определяются точки на изображениях калибровочной поверхности, соответствующие различным

расстояниям от измеряемой поверхности до базовой, в которых была обнаружена аналогичная зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения (рис. 2.3). С помощью интерполяции определяется расстояние от базовой поверхности до поверхности, на которой в исследуемой точке зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения в наибольшей степени подобна зависимости интенсивности от номера изображения в исследуемой точке контролируемого объекта. По координатам исследуемой точки с помощью координатных меток, нанесенных на калибровочную поверхность, определяются координаты точки в двумерном пространстве, определенном калибровочной поверхностью. С помощью линейного преобразования определяются 2 декартовы координаты в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения калибровочной поверхности. Таким образом, для каждой исследуемой точки изображения определяются 3 декартовы координаты: одна в направлении перемещения калибровочной поверхности и 2 в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения калибровочной поверхности. Использование функции зависимости интенсивности освещения от номера изображения, устойчивой к ошибкам определения интенсивности, обеспечивает устойчивость метода определения поля координат контролируемого объекта в целом.

Недостаток метода калибровки оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии, основанного на использовании калибровочной поверхности, заключается в том, что стоимость плоской поверхности класса точности выше 0,1% с линейными размерами 5x5 метров и инфраструктура для ее перемещения в пространстве будет превышать стоимость всего измерительного комплекса.

Для решения обозначенной научно-технической проблемы предложен метод калибровки оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии, использующий калибровочный объект, представляющий собой вертикальную рейку на подставке, устойчивую в вертикальном положении (рис. 2.4). На

рейке расположены калибровочные мишени в виде окружностей. Рейку перемещают в горизонтальной плоскости и запоминают зависимость координат мишеней на изображениях, величину фазового сдвига зондирующей синусоиды и декартовы координаты мишеней в глобальной системе координат.

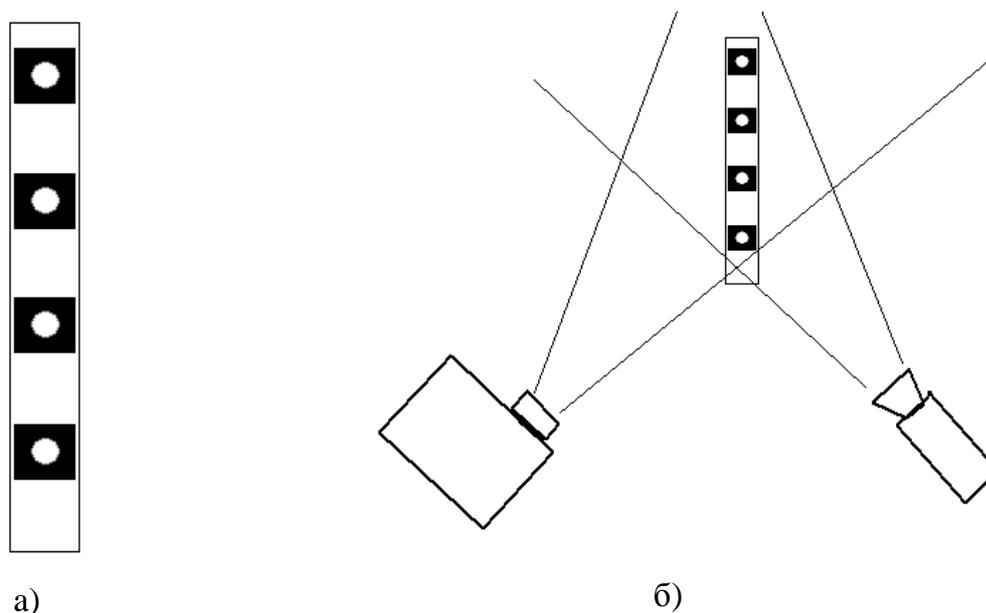


Рис.2.4. Схема калибровочной мишени (а) и принцип проведения калибровки системы (б).

Проведя измерения и запомнив необходимое количество точек в пространстве, на основе полученных данных строят регрессионную функцию зависимости 3 декартовых координат в глобальной системе отчета от величины фазового сдвига и координат точки на изображении

$$(X, Y, Z) = F(X_c, Y_c, P_p). \quad (2.7)$$

После этого проводят измерение контролируемого объекта, измеряют величину фазового сдвига для каждой точки на изображении контролируемого объекта и, используя полученную регрессионную

функцию калибровки, определяют декартовые координаты в глобальной системе координат для каждой точки изображения контролируемого объекта.

Относительную погрешность измерения, обусловленную погрешностью калибровки при использовании процедуры калибровки можно оценить как

$$\Omega = \frac{d}{\sqrt{M}}, \quad (2.8)$$

где d – погрешность измерения декартовых координат калибровочного объекта, M – количество измерений калибровочного объекта с различными декартовыми координатами, X_c – разрешение горизонтальной компоненты приемника оптического излучения, Y_c – разрешение вертикальной компоненты приемника оптического излучения.

Общую относительную погрешность измерения декартовых координат можно оценить сверху как сумму q , Ω и дополнительной погрешности, обусловленной разрешением изображения, получаемым используемым приемником оптического излучения:

$$\Omega = \frac{\Delta I}{\sqrt{N} \cdot I} + \frac{d}{\sqrt{M}} + \frac{1}{X_c}, \quad (2.9)$$

где X_c – линейное разрешение горизонтальной компоненты приемника оптического излучения.

Полученная аналитическая оценка погрешности позволяет оценить относительную погрешность измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов триангуляционными методами с использованием структурированного освещения. Пусть относительная погрешность измерения яркости излучения в тракте источник – приемник оптического излучения не превышает 0.0078 (такая погрешность обусловлена

использованием LCD проектора, глубина кодирования цвета которого составляет 8 бит). Пусть в нашей реализации оптоэлектронной измерительной системы количество излучаемых засветок, имеющих различный сдвиг начальной фазы, $N = 1000$. Пусть относительная погрешность измерения декартовых координат точки в процессе калибровки $d=0.1\%$. Количество точек калибровочного объекта, участвующих в калибровке $M=200$. Пусть разрешение изображений, получаемых приемником оптического излучения равно 3000×2000 точек (такое разрешение обеспечивают стандартные современные цифровые фотокамеры). Тогда общая относительная погрешность измерения 3D геометрии методов на основе многопараметрической триангуляции с использованием структурированного излучения можно оценить сверху как

$$\Omega = 0.00024 + 0.00007 + 0.0005 = 0.00081 = 0.081\%. \quad (2.10)$$

Предложены методы калибровки оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе многопараметрической триангуляции с использованием структурированного освещения. Метод на основе использования плоской калибровочной поверхности обладает потенциально более высокой точностью за счет большого количества калибровочных данных, но реализация оказывается достаточно затратной, особенно при измерениях крупногабаритных объектов с линейным размером более 2 метров. Метод на основе использования калибровочной мишени обладает более простой реализацией при измерениях 3D геометрии крупногабаритных объектов. Получена аналитическая оценка погрешности измерений, обусловленная методом фазовых шагов и калибровки системы, она составила 0.081% от диапазона измеряемых значений при реализации на стандартной недорогой элементной базе.

2.3 Самообучающиеся алгоритмы калибровки оптоэлектронных систем измерения 3D геометрии

Задача калибровки оптоэлектронных систем для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения, сводится к задаче определения взаимно однозначного соответствия между 3-мя параметрами. С одной стороны, это 3 декартовы координаты точки в измеряемом пространстве (X, Y, Z) , а с другой - 2 координаты точки на изображении приемника (X_c, Y_c) и значение горизонтальной координаты пространственного модулятора структурированной засветки P_p , формирующего световой пучок в этой точке. Согласно (2.6) это преобразование определяется, как T^{-1} . Таким образом, задача заключается в нахождении непрерывного взаимно однозначного соответствия 3-мерного пространства координат приемника и горизонтальной координаты модулятора засветки и трехмерного декартова пространства, в котором расположен измеряемый объект:

$$(x_c, y_c, p) \leftrightarrow (X, Y, Z). \quad (2.10)$$

Так как вид зависимости регрессионной функции должен учитывать не только линейные преобразования геометрической оптики, но и нелинейные искажения, вызванные неидеальностью оптических элементов, то использовать регрессионную функцию, определенную с помощью перспективных матриц и аналитической геометрии, нельзя, если мы хотим максимально компенсировать все искажения.

Для решения обозначенной научной и технической проблемы наиболее перспективным является использование самообучающихся алгоритмов

определения регрессионных функций, не имеющих аналитического представления, либо неизвестного на этапе определения регрессионной функции. Для построения регрессионной функции нескольких переменных, зависимость которой в общем случае неизвестна, перспективным представляется применение алгоритмов регрессии, основанных на нейронных сетях.

Главной особенностью нейросетевых методов определения регрессионных функций при калибровке оптоэлектронных систем на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения, является использование большого числа простейших нелинейных вычислительных элементов (называемых нейронами), которые организованы в виде сетей, напоминающих предположительный способ соединения нейронов в мозге человека. Эти сети используются в качестве среды, в которой осуществляется адаптивная настройка параметров калибровочных регрессионных функций путем последовательного предъявления обучающих выборок данных, содержащих информацию о входных и выходных значениях.

Развитие нейронных сетей восходит к началу 40-х гг. В работах [195-196] авторы предложили модель нейрона в виде двоичного порогового устройства, а в качестве основы для моделирования нейронных систем – стохастические алгоритмы, в которых происходят случайные переходы нейронов из состояния 0 в состояние 1. В работе [197] на основе математических моделей была сделана попытка ухватить концепцию обучения посредством усиления или ослабления связи.

В течение 1970-х и 1980-х гг. появилось большое количество моделей нейронных сетей, имеющих практическое применение. Коонен (Kohonen, 1989) [198] постулировал ассоциативную память нейронных сетей. Хопфилд [199-201] предложил методы энергии для анализа автоматической ассоциативной памяти и сетей оптимизации. Румельхарт и его коллеги [202] заново открыли обратную связь при обучении нейронных сетей.

В настоящее время существует большое количество алгоритмов и подходов к обучению нейронных сетей. В основном, все методы обучения нейронных сетей можно разделить на два класса: обучение с учителем (контролируемое обучение) и обучение без учителя (неконтролируемое обучение). При обучении с учителем желаемый выход определяется обучающими образцами данных для каждого образца входа. Процесс обучения пытается минимизировать “дистанцию” между фактическими и желаемыми выходами нейронной сети. При обучении нейронной сети без учителя предусматривают несколько образцов входа. Работа алгоритма основана на предположении, что в процессе обучения нейронная сеть обнаруживает существенные особенности входов. В отличие от обучения с учителем здесь не существует априорного набора желаемых значений выхода. Нейронная сеть адаптивно подбирает оптимальные весовые коэффициенты без помощи учителя.

Существуют огромное количество видов структур нейронных сетей и соответствующих обучающих алгоритмов, адаптированных под узкий класс решаемых прикладных задач.

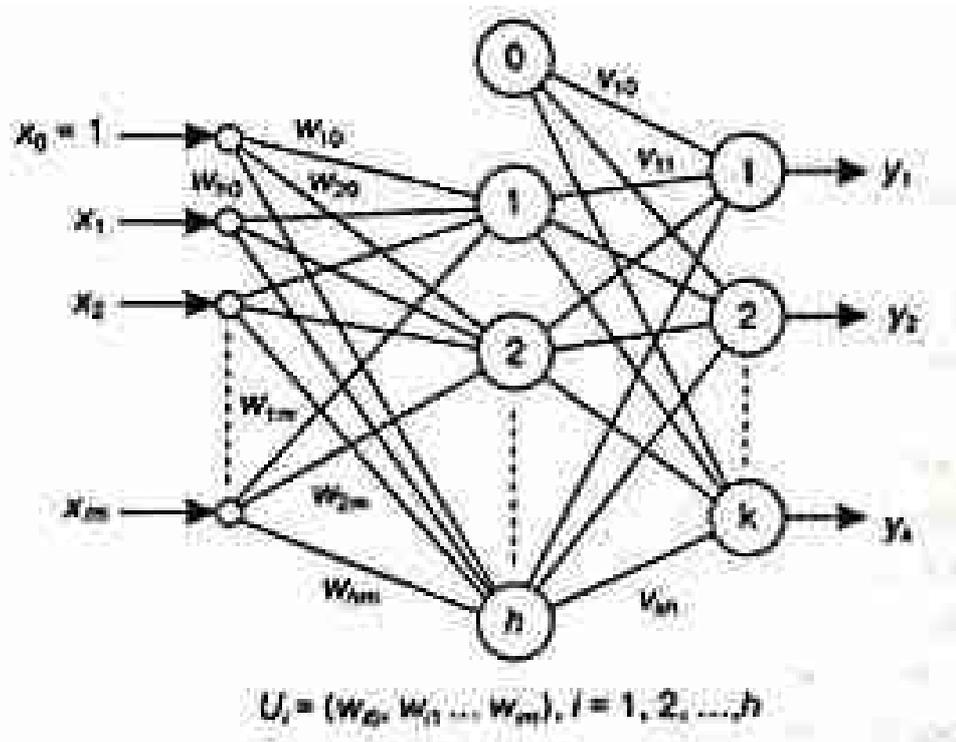


Рис.2.5. Топология нейронной сети с обратным распространением ошибок.

Одна из наиболее распространенных видов нейронных сетей — нейронная сеть с обратным распространением ошибок с критерием обучения - минимум среднеквадратической ошибки (BPLMS — back-propagation least mean square) [202]. Ее топология показана на рис.2.5. Ребра графа соединяют элементы обработки. Каждому соединению в нейронной сети соответствует вес, указывающий на силу связи.

Для обучения нейронной сети с обратным распространением ошибки известен алгоритм BPLMS - интегральный градиентный алгоритм, предназначенный для минимизации среднеквадратической ошибки между фактическим и желаемым выходами путем изменения весов сети [202]. Данный алгоритм обеспечивает регрессионное бесконечное приближение к любой непрерывной функции при использовании многослойной нейронной сети с одним промежуточным слоем [204], что делает его особенно перспективным для решения задачи калибровки оптико-электронной системы на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения.

При использовании алгоритма BPLMS каждый узел принимает значение сигмоидной логистической функции:

$$f(I) = \frac{1}{1 + e^{-(I-q)}}, \quad (2.11)$$

где I — это сумма взвешенных входов в узел; q — порог, который является произвольным числом, отличным от нуля. Нейронная сеть выполнит преобразование от вектора входа $X, X \in \Omega^n$ - до вектора выхода $Y, Y \in R^k$ - такое, что

$$Y = \Phi(X). \quad (2.12)$$

Используя обозначения, показанные на рис. 2.5, будем иметь

$$y_r = \left\{ \left[1 + \exp \left(- \left(u_{0r} + \sum_{i=1}^k u_{ir} (1 + \exp(-U_i X^r))^{-1} \right) \right) \right]^{-1} \right\}. \quad (2.13)$$

$(r = 1 \dots k)$

Алгоритм обучения нейронной сети для формирования калибровочного функционала оптико-электронной системы на основе триангуляционного метода с использованием структурированного освещения:

Шаг 0. Установить топологию нейронной сети с обратной связью при обучении, как показано на рис. 2.5. Каждый узел принимает значение сигмоидной логистической функции. Установить параметр обучения $\eta = \rho$, где $0 < \rho < 1$.

Шаг 1. Инициализировать все веса малыми (0-1) случайными значениями.

Шаг 2. Определить вектор входа x , который представляет собой точку обучающих данных в t -мерном пространстве, плюс порог. Определить желаемый выход y в соответствии с точкой обучающих данных.

Шаг 3. Вычислить фактический выход нейронной сети из выражения (2.13)

Шаг 4. Если $|y_{r-A} - y_{r-D}| < \epsilon$ при $1, \dots, k$, где ϵ — это заранее определенная малая положительная константа (например, 0,001), для всех точек данных обучения, то СТОП. В противном случае перейти к следующему шагу.

Шаг 5. Для узла выхода r вычислить $d_D = y_{r-A}(1 - y_{r-A})(y_{r-D} - y_{r-A})$. Изменить веса в соответствии с $u_{ir}(t+1) = u_{ir}(t) + \eta d_D g_{ir}$, где t — это время, g_{ir} — это выход скрытого узла i к узлу выхода r .

Для каждого скрытого узла i вычислить

$$d_{ir} = \sum_r g_{ir} (1 - g_{ir}) d_D u_{ir}. \quad (2.14)$$

Изменить веса

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + h d_{ij} g_j, \quad (2.15)$$

где w_{ij} — это вес связи от скрытого узла i до входа узла j во время t , а g_j - это компонент входа в нейронную сеть. Переход к шагу 2.

Для задачи определения калибровочного функционала подходит нейронная сеть, имеющая архитектуру вида 3-х-3 (рис. 2.6), то есть имеющая 3 входа, 3 выхода и один промежуточный слой с произвольным числом персептронов.

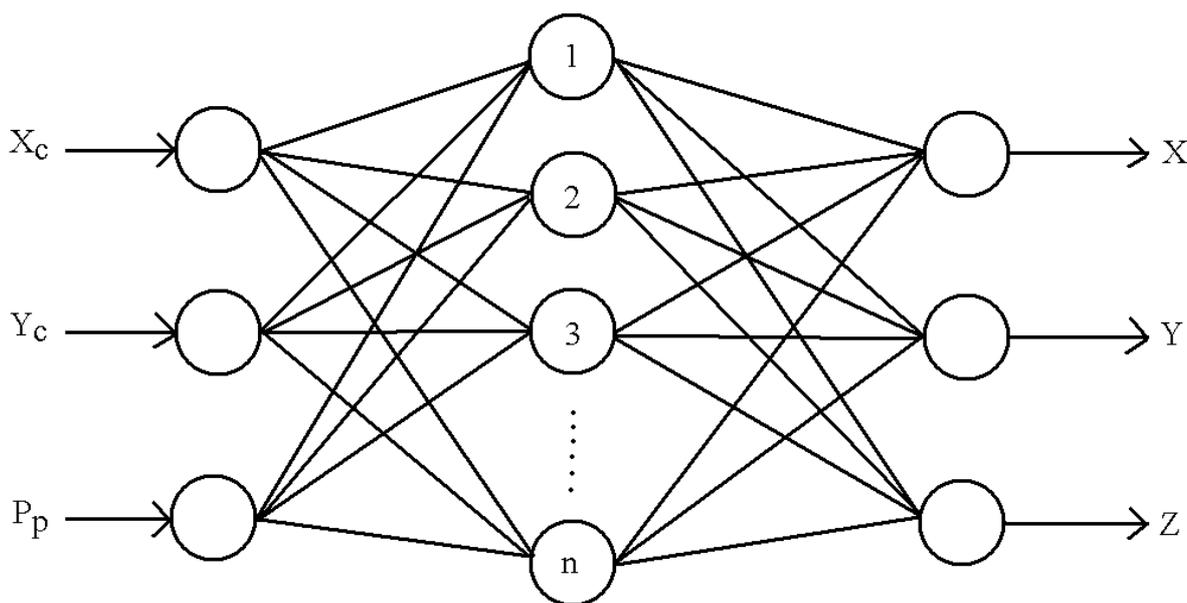


Рис.2.6. Топология нейронной сети для задачи калибровки измерительной системы.

Обучение нейронной сети заключается в построении нейронной сети, которая дает оптимальный результат преобразования исходных данных. Решается проблема в два этапа. На первом определяют структуру сети, на

втором определяют синаптические веса нейронов сети таким образом, чтобы сеть решала поставленную задачу оптимальным образом. Эффективность построенной сети определяем по функции невязки между экспериментальными данными и показаниями нейронной сети при известных входных параметрах.

В задачах построения преобразований с помощью нейронных сетей наблюдается следующая тенденция: при приведении функции ошибки к малым значениям значительно увеличивается погрешность преобразования. Исключение составляют ряды простейшего вида, которые поддаются точному статистическому анализу. Поэтому при решении нейронной сетью задач регрессии, ошибка, получаемая на тестовой выборке, является не просто важной, но и во многом определяющей. Поэтому рационально добавить к стандартной функции вычисления ошибки нейронной сети взвешенную ошибку на тестовой выборке (рис. 2.7).

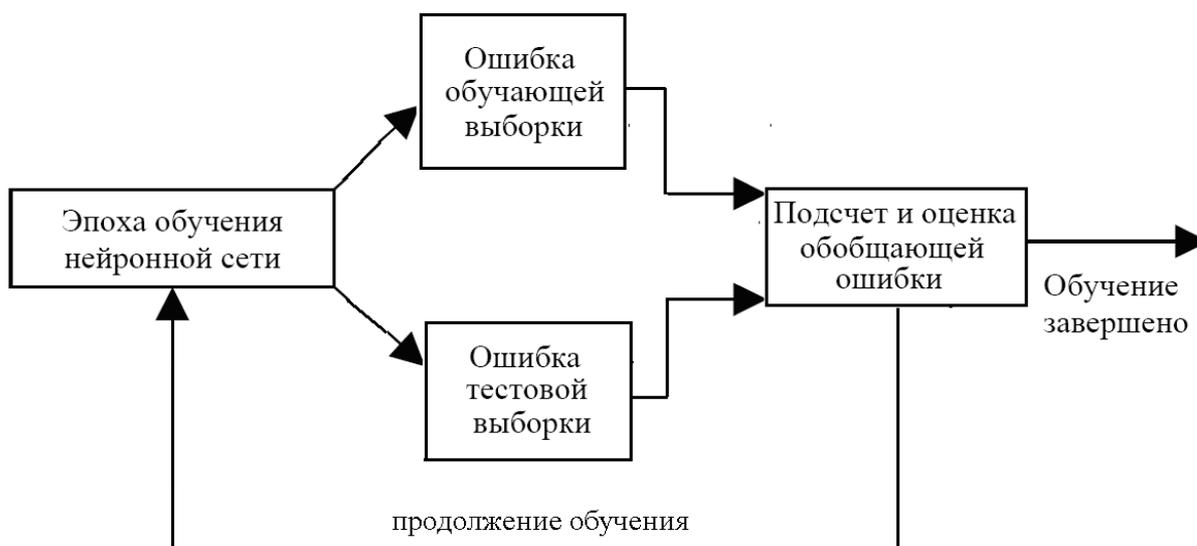


Рис. 2.7. Модифицированный цикл обучения нейронной сети.

Обучение нейронной сети будет осуществляться на основе алгоритма обратного распространения ошибки. Известно, что слабое место регрессионной функции, построенной на нейронных сетях – экстраполяция данных. В случае, если необходимо получить регрессионную функцию,

предполагающую экстраполяцию данных за пределы калибровочного объема, то использовать нейронные сети нельзя.

Для решения этой задачи можно использовать регрессионную функцию в виде многочлена 2-й степени от 3-х переменных. Тогда функции для определения координат точки измеряемого объекта в мировой системе координат будут выглядеть следующим образом:

$$X = a_{000} + a_{100} X_c + a_{010} Y_c + a_{001} p + a_{110} X_c Y_c + a_{101} X_c p + a_{011} Y_c p + a_{200} X_c^2 + a_{020} Y_c^2 + a_{002} p^2, \quad (2.16)$$

$$Y = b_{000} + b_{100} X_c + b_{010} Y_c + b_{001} p + b_{110} X_c Y_c + b_{101} X_c p + b_{011} Y_c p + b_{200} X_c^2 + b_{020} Y_c^2 + b_{002} p^2, \quad (2.17)$$

$$Z = c_{000} + c_{100} X_c + c_{010} Y_c + c_{001} p + c_{110} X_c Y_c + c_{101} X_c p + c_{011} Y_c p + c_{200} X_c^2 + c_{020} Y_c^2 + c_{002} p^2. \quad (2.18)$$

При этом, нужно учитывать, что данная регрессионная функция плохо компенсирует нелинейные aberrации оптических элементов. С другой стороны, метод, основанный на определении оптимальной регрессионной функции, автоматически будет обеспечивать уменьшение ошибки с увеличением статических данных.

Для оценки ошибки определения декартовых координат измеряемого объекта было проведено экспериментальное исследование ошибки калибровки в зависимости от количества измерений калибровочной мишени в различных местах измеряемого пространства.

На входе эксперимента имеются 45 измерений калибровочной мишени, расположенной в различных координатах плоскости ХУ мировых координат. Калибровочная мишень представляет собой вертикальный шест с нанесенными координатными метками. В зависимости от размещения шеста в горизонтальной плоскости ХУ, получается измерить от 4-х до 6-ти меток. Для каждой метки определяем координаты метки в мировых декартовых координатах, координаты метки на изображении камеры и начальный сдвиг фазы зондирующей синусоиды, проецируемой на эту метку.

1. Регрессионная функция на основе нейронных сетей

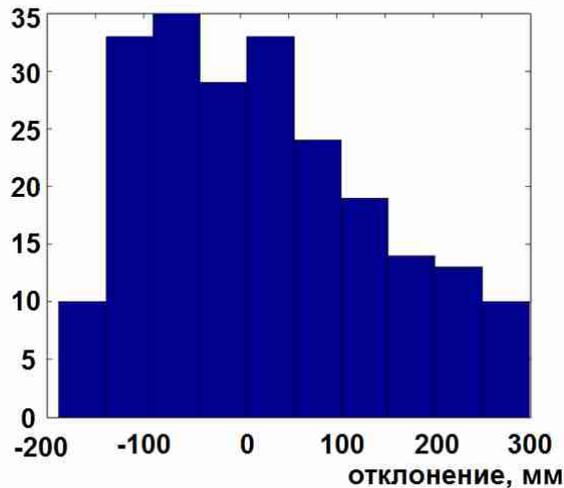


Рис.2.8. Распределение ошибки определения координат для выборки $N = 5$ для X компоненты для регрессии нейронной сетью.

На рис. 2.8 показана гистограмма распределения ошибки определения координат для выборки $N = 5$ для X компоненты при регрессии нейронной сетью. Видно, что распределение имеет большой диапазон принимаемых значений, что показывает, что системе недостаточно входных параметров для определения регрессионной функции калибровки.

На рис. 2.9 показана гистограмма распределения ошибки определения координат для выборки $N = 8$ для X компоненты для регрессии нейронной сетью. Видно, что распределение имеет существенно меньший диапазон в сравнении с выборкой $T=5$, что показывает, что при $N=8$ системе достаточно входных параметров для определения регрессионной функции калибровки.

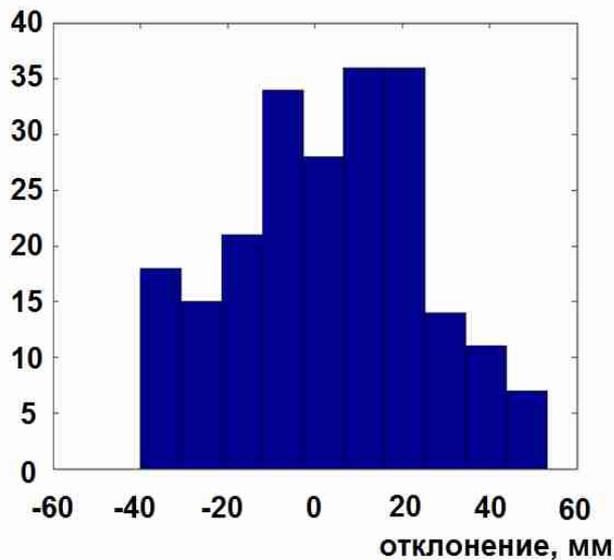


Рис. 2.9. Распределение ошибки определения координат для выборки $N = 8$ для X компоненты для регрессии нейронной сетью.

На рис. 2.10 показана зависимость среднеквадратичного отклонения определения координат X, Y, Z мировых координат с помощью регрессионной функции, построенной алгоритмом нейронных сетей.

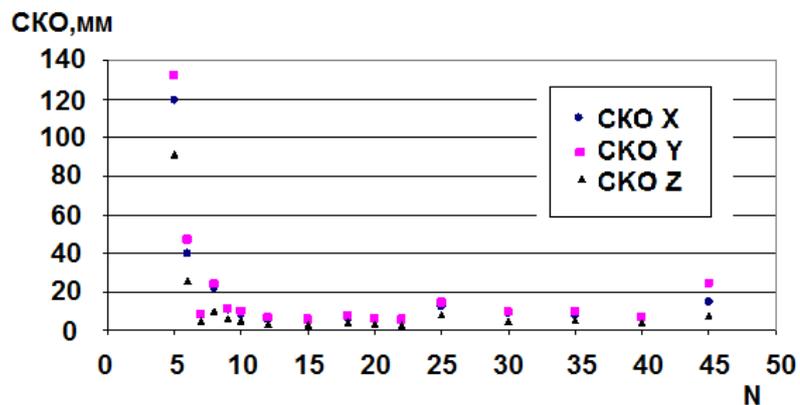


Рис. 2.10. Средне квадратичное отклонение координат X, Y, Z мировых координат, вычисленных с помощью регрессионной функции, построенной алгоритмом нейронных сетей, от количества измерений калибровочной мишени в обучающей выборке.

Из графика видно, что при $N > 8$ СКО лежит в пределах 5 мм. Таким образом, можно оценить минимальное количество измерений калибровочной мишени, при котором функция определения координат точек измеряемого

объекта обладает сходимостью и СКО измеренных координат менее 5 мм. Случайные выбросы при больших N обусловлены выбором неоптимальной нейронной сети. Топология нейронной сети выбиралась с помощью последовательного перебора сетей с различной топологией вида 3-х-3, выбиралась сеть, обладающая наилучшим коэффициентом обучения. На рис. 2.11 показана зависимость количества нейронов в промежуточном слое нейронной сети от количества измерений калибровочной мишени, используемых в обучении этой сети.

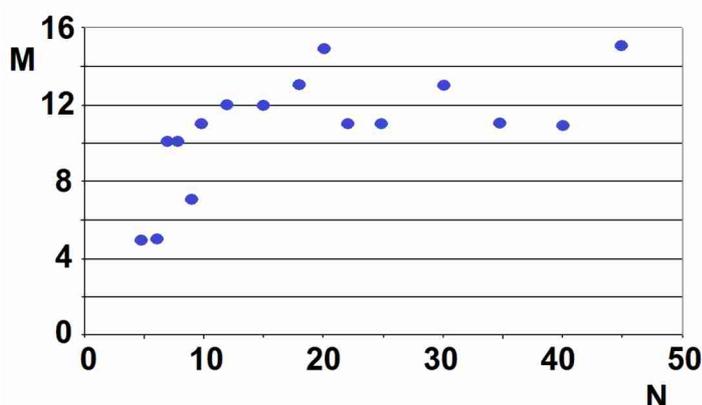


Рис. 2.11. Зависимость количества нейронов в промежуточном слое нейронной сети от количества измерений калибровочной мишени, используемых в обучении.

Из графика видно, что зависимость имеет случайный характер. Проведем анализ влияния количества нейронов в промежуточном слое нейронной сети на среднеквадратичное отклонение координат точек измеряемого объекта, вычисленных с помощью нейронной сети.

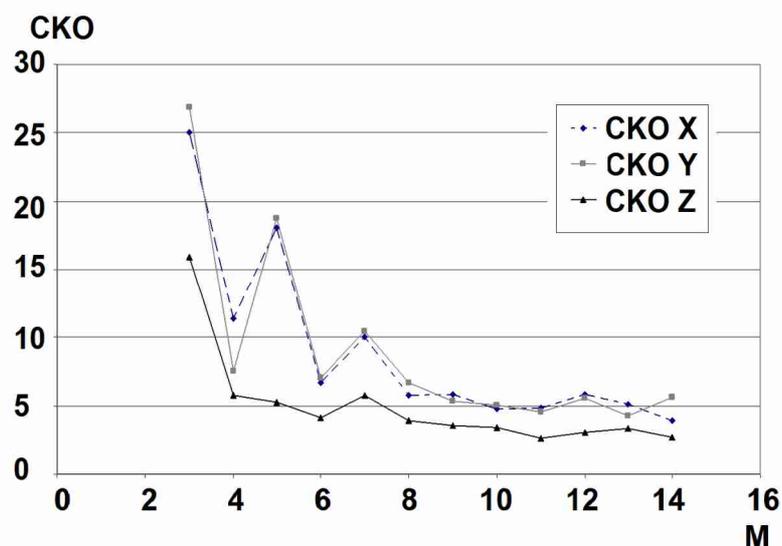


Рис. 2.12. Зависимость среднеквадратичного отклонения вычисленного значения декартовых координат в мировой системе координат от измеренного в зависимости от количества персептронов в промежуточном слое сети.

На рис. 2.12 представлена полученная зависимость среднеквадратичного отклонения вычисленного значения декартовых координат в мировой системе координат от измеренного. В обучающей выборке были данные, полученные от 45 измерений калибровочной мишени.

Из графика видно, что оптимально использовать 10-11 персептронов в промежуточном слое. Если их меньше, то сети не хватает размерности, чтобы адаптироваться под входные данные. Если их больше, то появляются эффекты переобучения – избыточное количество персептронов дают дополнительные степени свободы при обучении сети, из-за чего возникают сбои. Эти сбои ведут к увеличению общей ошибки работы нейронной сети.

Таким образом, установлено, что для задачи калибровки измерительной системы оптимальным является использование нейронной сети, имеющей архитектуру 3-10-3. При использовании меньшего количества нейронов в промежуточном слое наблюдаются эффекта недостаточной гибкости нейронной сети. При использовании большего количества нейронов – эффекты переобучения.

Проведем аналогичный анализ для полиномиальной регрессии второго порядка.

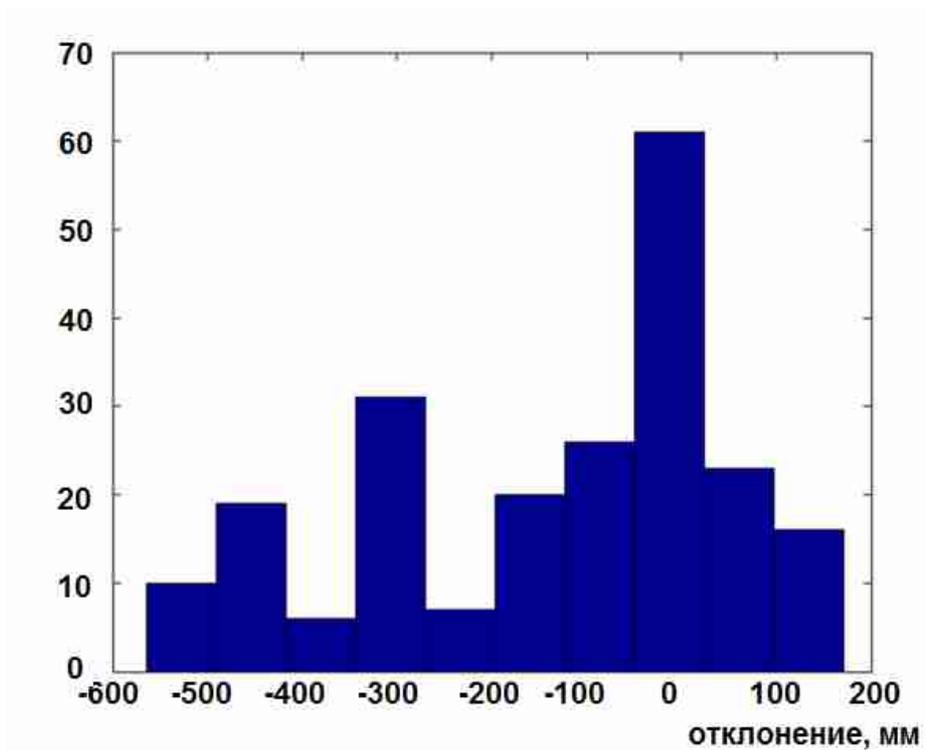


Рис. 2.13. Распределение ошибки определения координат для выборки $N = 5$ Z компоненты для полиномиальной регрессии 2-го порядка.

На рис. 2.13 показана гистограмма распределения ошибки определения координат для выборки $N = 5$ для Z компоненты для полиномиальной регрессии. Видно, что распределение имеет большой диапазон принимаемых значений, что показывает, что системе недостаточно входных параметров для определения регрессионной функции калибровки.

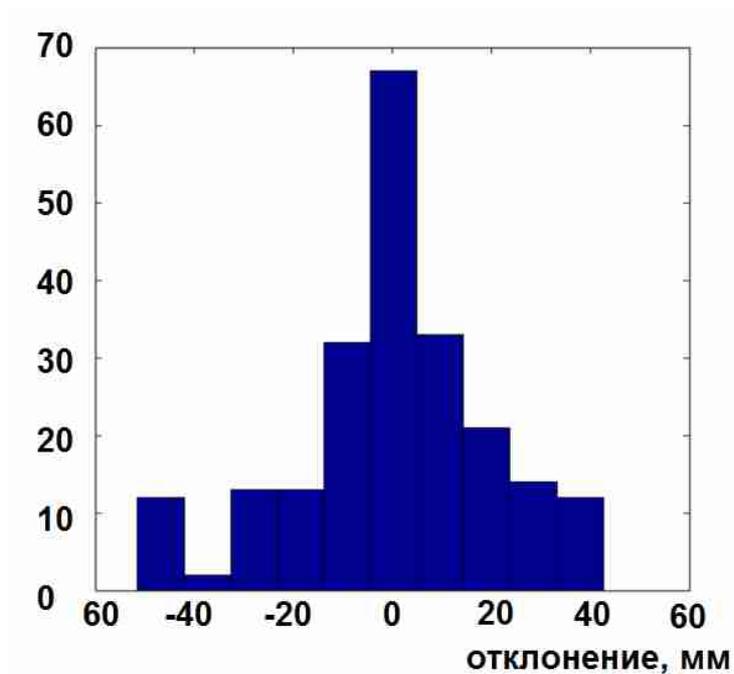


Рис. 2.14. Распределение ошибки определения координат для выборки $N = 6$ X компоненты для полиномиальной регрессии 2-го порядка.

На рис. 2.14 показана гистограмма распределения ошибки определения координат для выборки $N = 6$ для X компоненты. Видно, что распределение имеет существенно меньший диапазон в сравнении с выборкой $N=5$, что означает, что при $N=6$ системе достаточно входных параметров для определения регрессионной функции калибровки

На рис. 2.15 показана зависимость среднеквадратичного отклонения определения координат X, Y, Z мировых координат с помощью регрессионной функции, построенной полиномиальной регрессией второго порядка.

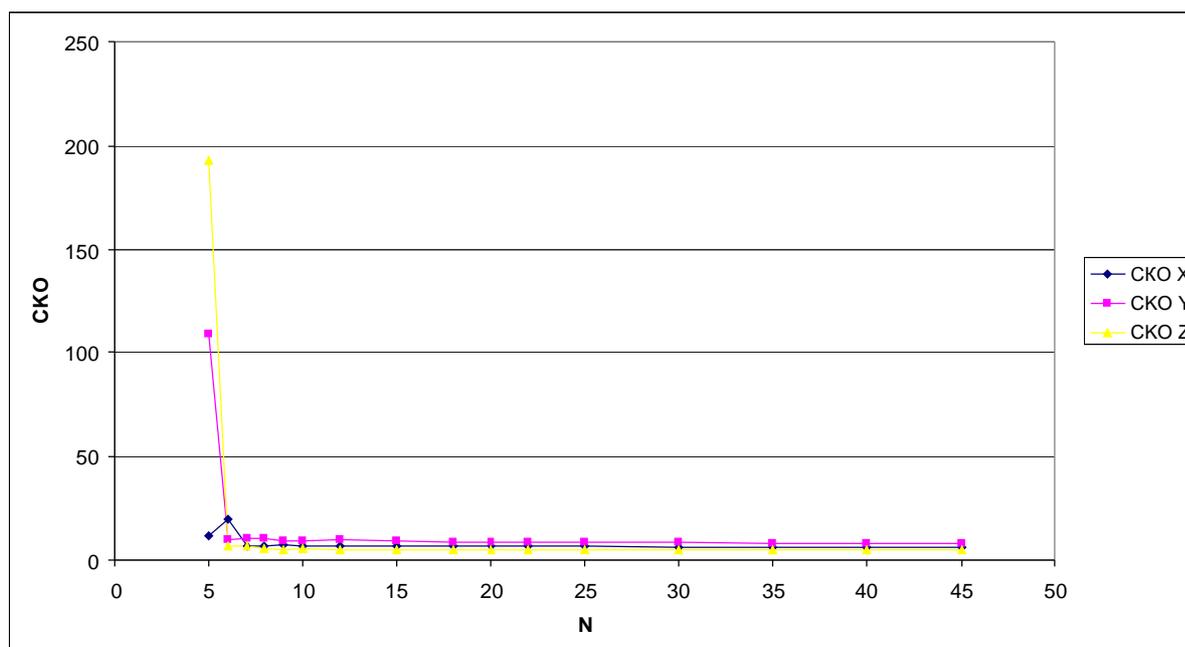


Рис. 2.15. Среднеквадратичное отклонение координат X, Y, Z мировых координат, полученных с помощью регрессионной функции, построенной полиномиальной регрессией второго порядка.

Из графика видно, что при $N > 8$ СКО не превышает 5 мм и наблюдается дальнейшее уменьшение. При $N = 45$ СКО по всем каналам меньше 4 мм.

Таким образом, доказана возможность использования самообучающихся алгоритмов определения регрессионной функции для решения задач калибровки и определения декартовых координат измеряемого объекта триангуляционным оптоэлектронным методом с использованием структурированного освещения. Протестированы методы на основе нейронных сетей и на основе полиномиальной регрессии второго порядка. Показано, что для использования алгоритмов на основе нейронных сетей оптимально использовать сеть, имеющую топологию вида 3-10-3. Для получения достоверных результатов измерения (имеющих СКО менее 5 мм) триангуляционным методом с использованием структурированного освещения, необходимо, как минимум 8 измерений калибровочной мишени в различных точках измеряемого пространства.

2.4. Реализация калибровки оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов

Рассмотрены две реализации методов калибровки прототипа оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе триангуляции с применением структурированного освещения: калибровка с использованием калибровочной плоской поверхности и калибровка с использованием калибровочной мишени.

Стенд для калибровки с использованием плоской калибровочной поверхности состоит из следующих объектов (рис. 2.16):

- цифровой проектор 1 в качестве источника и пространственного модулятора оптического излучения;
- цифровая камера 2 в качестве приемника оптического излучения;
- плоская калибровочная поверхность 3;
- устройство для прецизионного перемещения калибровочной поверхности 4;
- компьютер 5 для управления проектором;
- компьютер 6 для проведения измерений.

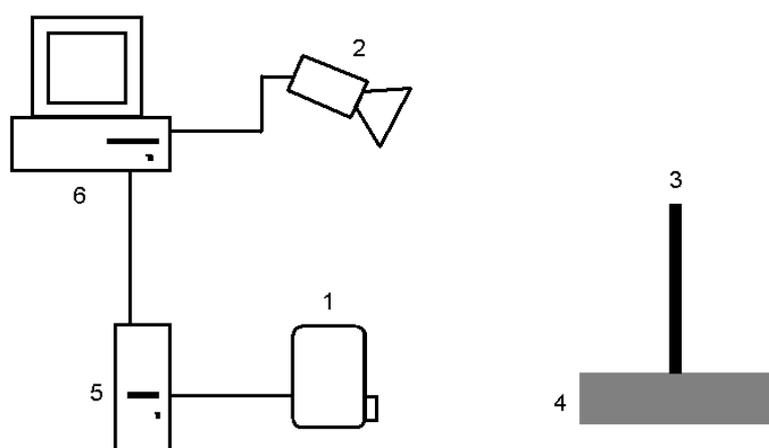


Рис. 2.16. Стенд для калибровки измерительной системы с помощью плоской калибровочной поверхности.

В качестве плоской калибровочной поверхности использовался плоский штампованный лист оргстекла с наклеенной матовой бумагой для минимизации бликов (рис 2.17). Размер калибровочной поверхности 30x40 см. На калибровочной плоскости расположены 4 калибровочные метки для определения параметров камеры.

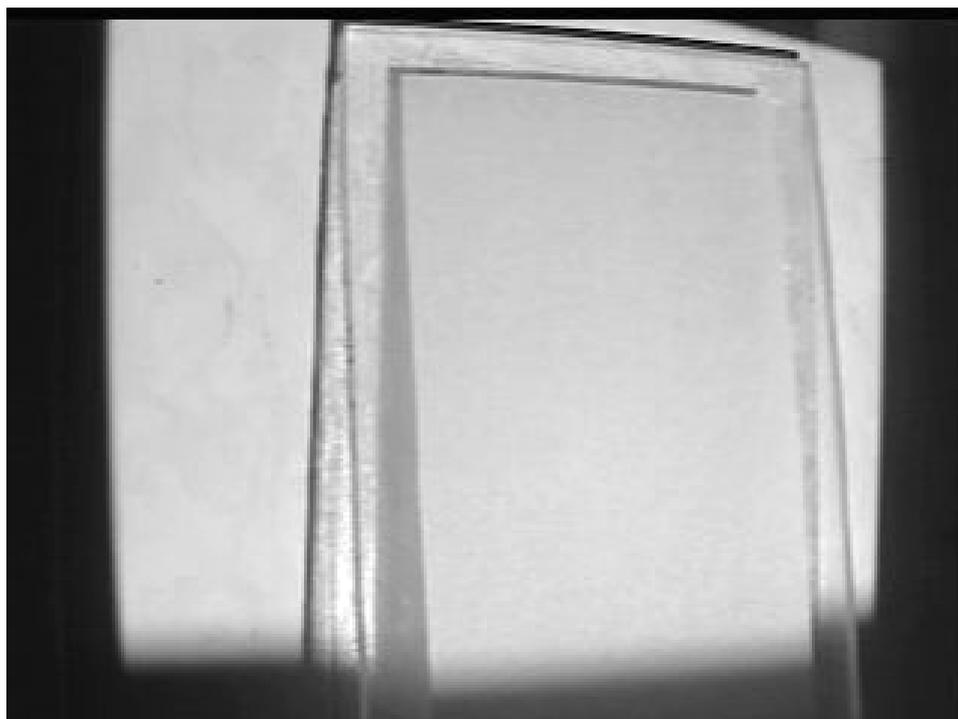


Рис. 2.17. Калибровочная поверхность, используемая при проведении калибровки.

В качестве устройства для прецизионного перемещения калибровочной поверхности использовался узел прецизионного оптического координатного устройства, обеспечивающий перемещение калибровочной поверхности в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности.

Согласно методу калибровки с использованием калибровочной поверхности проводят цикл измерений калибровочной поверхности, в результате которого во внутреннем запоминающем устройстве компьютера формируются набор изображений поверхности.

Далее осуществляют серию аналогичных измерений для калибровочной поверхности, параллельно смещаемой по направлению от

источника освещения на заданные интервалы с сохранением результатов в электронном блоке 4. Самую удаленную калибровочную поверхность считают базовой.

Для определения погрешности калибровки проводят измерение плоской поверхности при произвольном удалении от источника структурированного освещения. После получения изображений плоской поверхности для каждой точки на изображениях этой поверхности определяют точки на изображениях калибровочной поверхности, соответствующие различным расстояниям от измеряемой поверхности до базовой, в которых была аналогичная зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения. Так как для определения координат точки в плоскости изображения проектора использован метод фазовой триангуляции, то зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения в точке на изображениях характеризуется величиной начального фазового сдвига зондирующей синусоиды.

С помощью интерполяции определяют расстояние от базовой поверхности до поверхности, на которой в исследуемой точке зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения в наибольшей степени подобна зависимости интенсивности от номера изображения в исследуемой точке контролируемого объекта. В качестве интерполяционной функции используют многочлен второй степени. По координатам исследуемой точки с помощью координатных меток, нанесенных на калибровочную поверхность, вычисляют координаты точки в двумерном пространстве, определенном калибровочной поверхностью. С помощью линейного преобразования определяют 2 декартовы координаты в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения калибровочной поверхности. Таким образом, для каждой исследуемой точки изображения определяют 3 декартовы координаты: одну в направлении перемещения

калибровочной поверхности и две в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения калибровочной поверхности.

Для оценки погрешности измерений проведен эксперимент по измерению плоской поверхности с линейными размерами 200x200 мм. В эксперименте разрешение камеры 320x240 пикселей, разрешение проектора 1024x768 пикселей, количество изображений в измерении $N=200$. Период зондирующей синусоиды зависит от геометрического расположения источника и приемника оптического излучения и глубины области измерения. В данном эксперименте период синусоиды составлял 150 пикселей проектора.

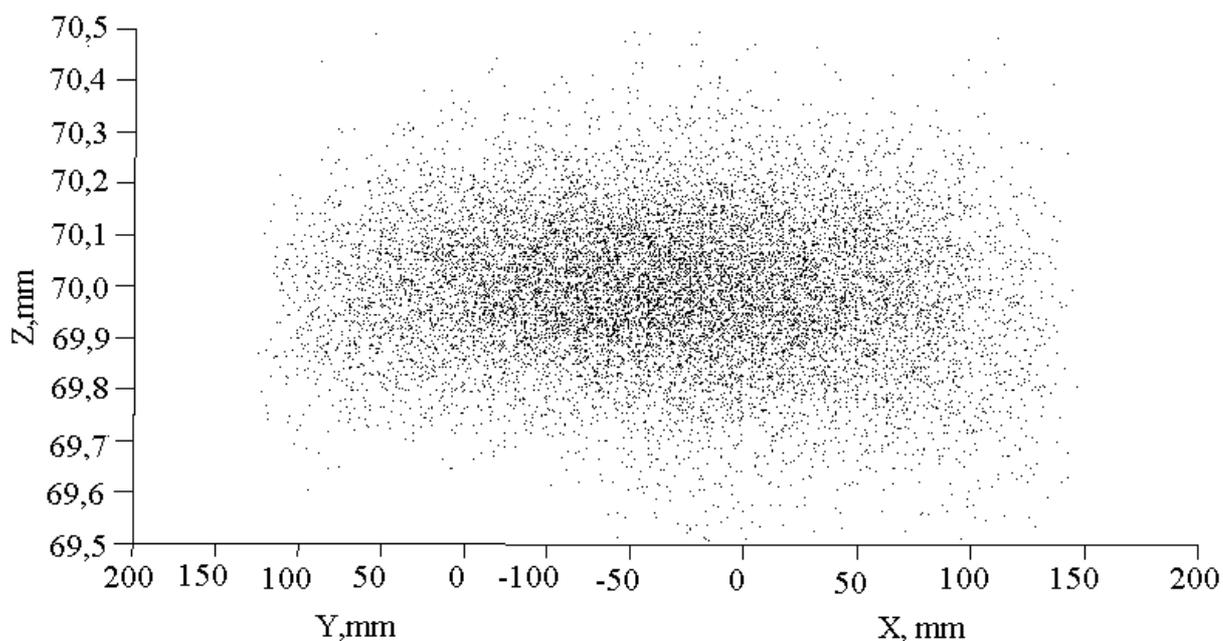


Рис.2.18. Результаты измерения плоскости, расположенной на уровне $z=70$ мм. СКО не превышает 100 мкм.

Результат измерения плоской поверхности показан на рис. 2.18. Измерена плоскость $z = 70$ мм. Среднеквадратичное отклонение по всей измерительной плоскости составляет около 100 мкм. Учитывая, что калибровка проводилась в диапазоне 100 мм, то относительную погрешность измерения можно оценить как не превышающую 0,1 %. Из формулы (2.9) получена оценка относительной погрешности измерения декартовых

координат $\Omega=0,6$ % от диапазона измерения. Такая грубая оценка обусловлена тем, что выражение (2.9) определяет погрешность измерения по наихудшему показателю. В нашей реализации измерительной системы наибольшей погрешностью измерения обладают координаты, находящиеся в плоскости камеры (X и Y), а значительная ошибка измерения вызвана крайне низким разрешением использованной камеры.

Для проведения калибровки системы методом, предусматривающим использование калибровочной мишени, необходимо определять 3 декартовы координаты мишени в измерительном объеме.

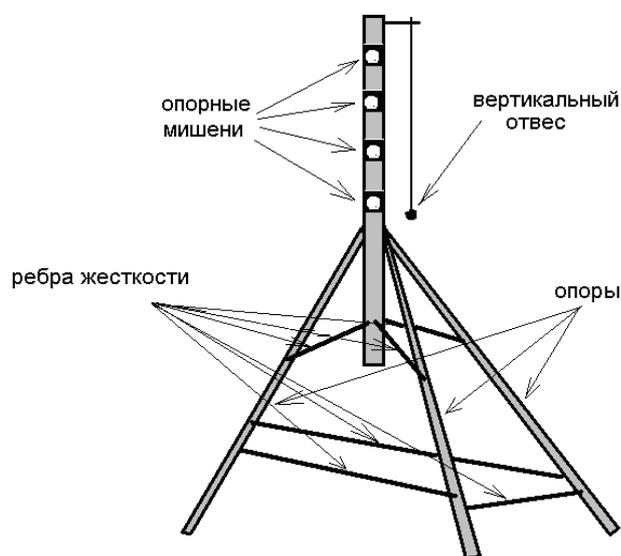


Рис. 2.19. Калибровочная мишень.

Калибровочная мишень представляет собой вертикальную рейку с расположенными на ней опорными метками (рис 2.19, 2.20). В результате проведения калибровки формируется набор точек в пространстве, соответствующий опорным меткам, попавшим в сектор зрения камеры и освещенный источником пространственно модулированного оптического излучения.

Для устойчивого расположения координатной мишени, она устанавливается на 3 опоры. Дополнительные ребра жесткости,

соединяющие опоры между собой и вертикальной рейкой обеспечивают дополнительную жесткость конструкции.



а)



б)

Рис. 2.20. Калибровочная мишень, примененная для процедуры калибровки. Вид спереди (а) и вид сбоку (б).

Для контроля вертикального положения калибровочной мишени использован вертикальный отвес, с помощью которого контролируется вертикальное положение рейки.

Для упрощения задачи определения 3 декартовых координат опорных меток предполагается, что ось OZ расположена вертикально, а оси OX и OY горизонтально и ортогонально друг другу.

Для решения задачи определения декартовых координат опорных меток в мировой системе координат рейка устанавливается вертикально, с помощью вертикального отвеса, расположенного на калибровочной мишени. После этого проводится замер расстояния от опорных мишеней до точки пересечения вертикальной рейки калибровочной мишени и плоскости $Z=0$. Так определяются координаты Z в мировой системе координат для опорных меток (так как ось рейки расположена параллельно оси OZ). После этого необходимо вычислить декартовые координаты вертикальной рейки

калибровочной мишени в горизонтальной плоскости XU . Для решения этой задачи проводятся замеры расстояний в плоскости XU .

Для определения плоскости XU использован лазерный уровень УЛ-5, обеспечивающий перемещение лазерного луча в горизонтальной плоскости с погрешностью менее 1 мм на расстоянии 1 м. Пусть плоскость $Z=0$ совпадает с плоскостью, формируемой лазерным лучом. С помощью лазерного уровня определялась точка пересечения вертикальной рейки калибровочной мишени с плоскостью $Z=0$.

В качестве реперных точек, относительно которых можно определять координаты X и Y в плоскости $Z=0$, использованы 3 опорные калибровочные цели, представляющие собой небольшую рейку с опорами (рис 2.21) и размещенной на этой рейке одной метке – точке пересечения рейки с плоскостью $Z=0$. Расположение метки на рейке определяем один раз с помощью лазерного уровня.



Рис. 2.21. Опорная калибровочная цель, используемая в процедуре калибровки.

Созданный стенд для калибровки состоит из следующих объектов (рис. 2.22):

- цифровой проектор 1 в качестве источника структурированной засветки;
- цифровая камера 2 в качестве приемника структурированной засветки;

- калибровочная мишень 3;
- опорные калибровочные цели 4;
- компьютер 5 для управления проектором;
- компьютер 6 для проведения измерений;
- лазерный уровень 7.

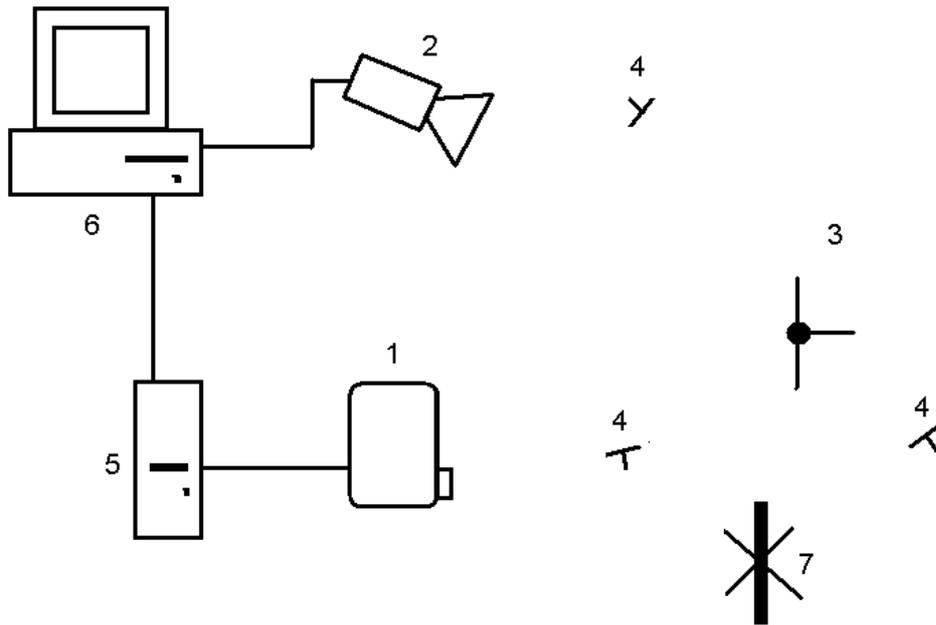


Рис. 2.22. Стенд для калибровки измерительной системы с помощью калибровочной мишени.

Перед проведением калибровки опорные калибровочные цели устанавливаются таким образом, чтобы одна из мишеней была расположена в начале координат, а две другие на осях X и Y соответственно. Этого можно достичь, контролируя расстояние между тремя опорными целями и добиваясь выполнения теоремы Пифагора:

$$L_0^2 = L_1^2 + L_2^2, \quad (2.19)$$

где L_0, L_1, L_2 - расстояния между опорными мишенями.

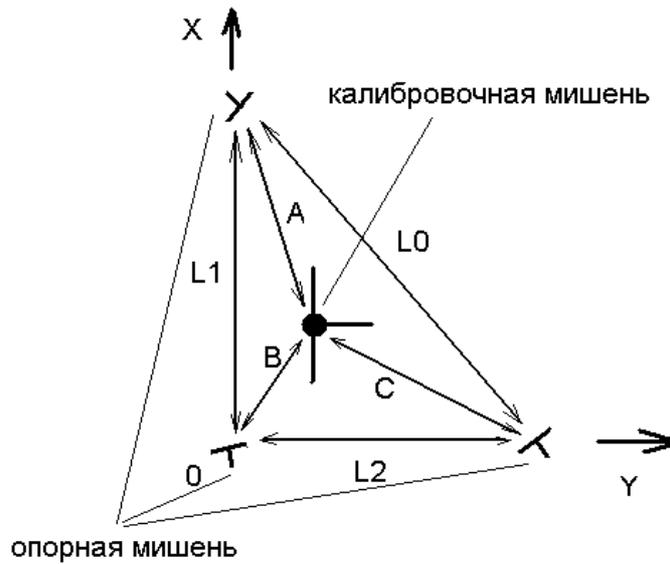


Рис. 2.23. Определение декартовых координат X и Y калибровочной мишени.

С помощью вертикального уровня рейка с опорными мишенями устанавливается вертикально. С помощью лазерного уровня определяется точка пересечения рейки и оси OZ. Далее, измеряется расстояние от опорных целей и калибровочной мишени в плоскости XY. Пусть эти расстояния равны A, B и C (рис 2.23). Из теоремы косинусов и тригонометрических уравнений вычисляются координаты x, y рейки калибровочной мишени:

$$x = \frac{2L_2}{B^2 + L_2^2 - C^2}, \quad (2.20)$$

$$y = \frac{2L_1}{B^2 + L_1^2 - A^2}. \quad (2.21)$$

Расположение компонентов измерительной системы, при проведении калибровки показано на рис. 2.24. Показана проекция на плоскость XY. Сектор, который захватывают камера и проектор показан в виде заштрихованной области. Эта область является измерительной, и в ней производится калибровка.

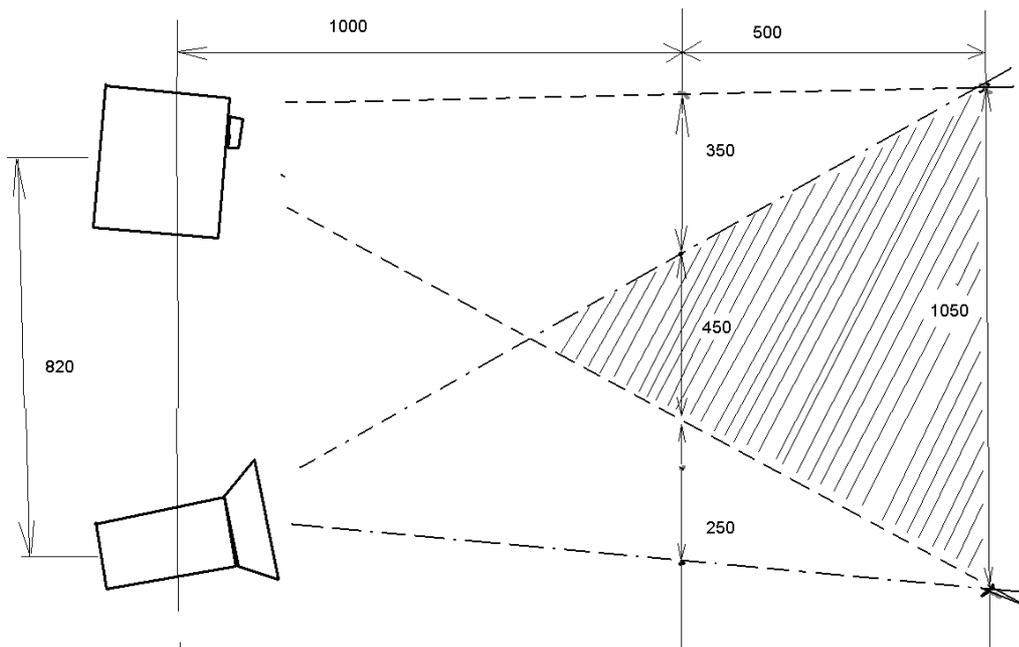


Рис. 2.24. Расположение компонентов измерительной системы в пространстве при проведении калибровки.

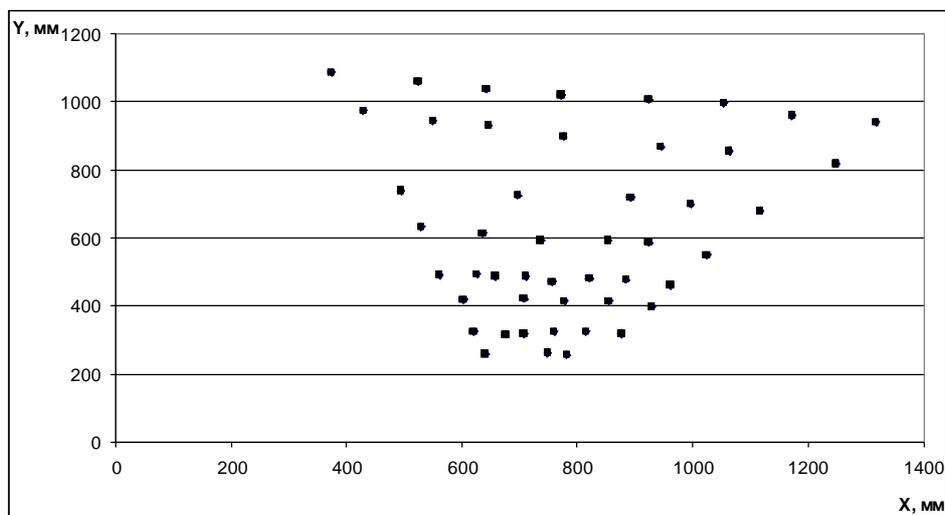


Рис. 2.25. Координаты точек, в которых было проведено измерение калибровочной мишени.

По результатам 45 измерений калибровочной мишени (рис. 2.25), было установлено, что среднеквадратичная ошибка определения координат X, Y, Z составляет около 5 мм. Линейный размер измерительного объема составлял 1 метр, относительная погрешность около 0.5%. Погрешность определялась

сравнением координат, измеренных вручную экспериментатором и измеренных системой. Эта погрешность характеризует общую ошибку определения координат калибровочной мишени при калибровке.

Для оценки точности измерений трехмерной геометрии системой проведен эксперимент по измерению 3D геометрии плоской поверхности стены комнаты. На рис. 2.26 в белой рамке показан измеренный фрагмент стены.

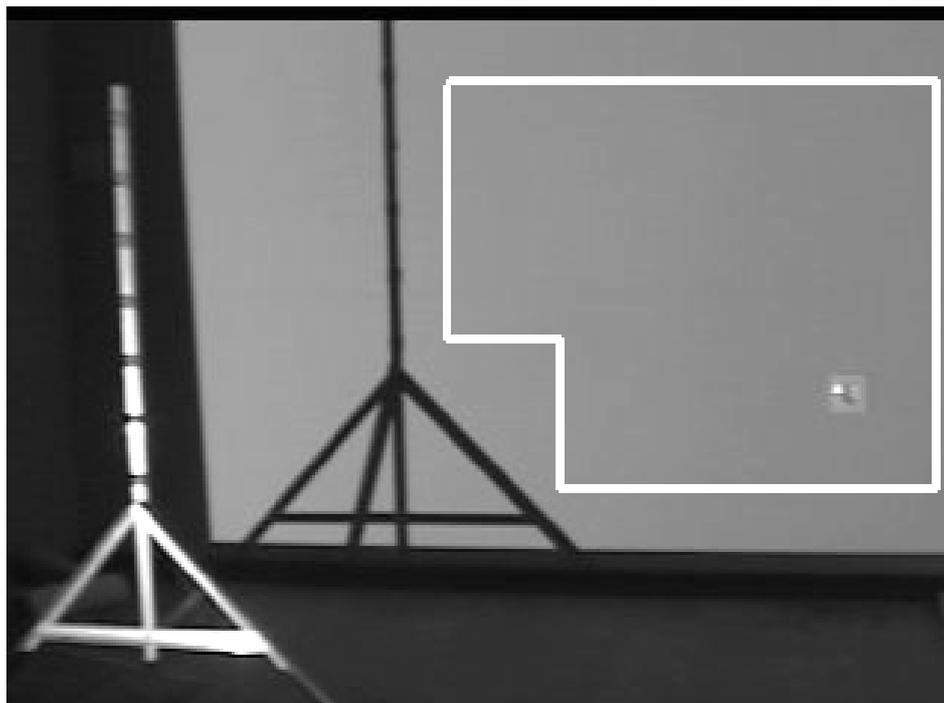


Рис. 2.26. Измеренный фрагмент стены
(обведен белой рамкой).

На рис. 2.27 представлен измеренная 3D геометрия стены. На графиках рельефа хорошо видна электрическая розетка в нижнем правом углу фрагмента стены.

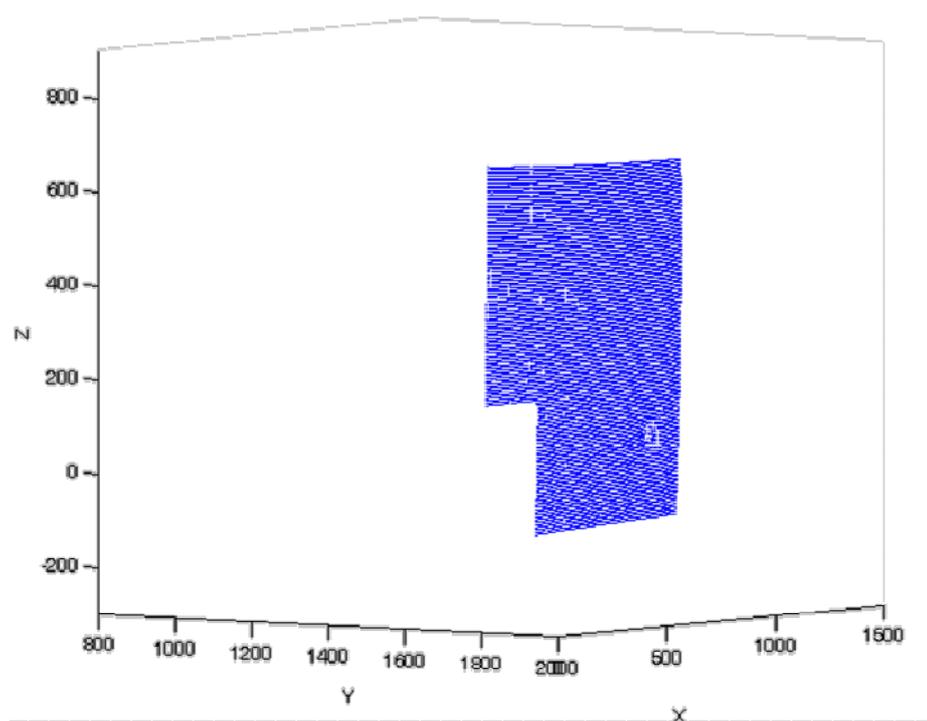


Рис. 2.27. Измеренная 3D геометрия фрагмента стены.

На рисунке 3.28 представлен срез $Z=400$ мм измеренной 3D геометрии фрагмента стены.

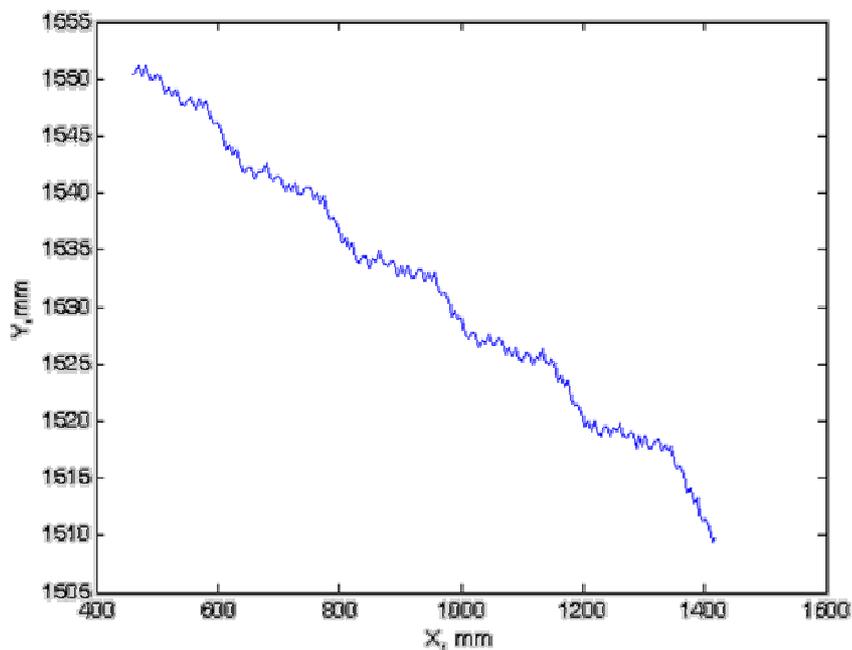


Рис. 2.28. Срез $Z=400$ мм измеренной 3D геометрии фрагмента стены.

На рис. 2.29 показан профиль среза по линии $Z=400$ мм измеренной 3D геометрии фрагмента штукатуреной стены от прямой линии.

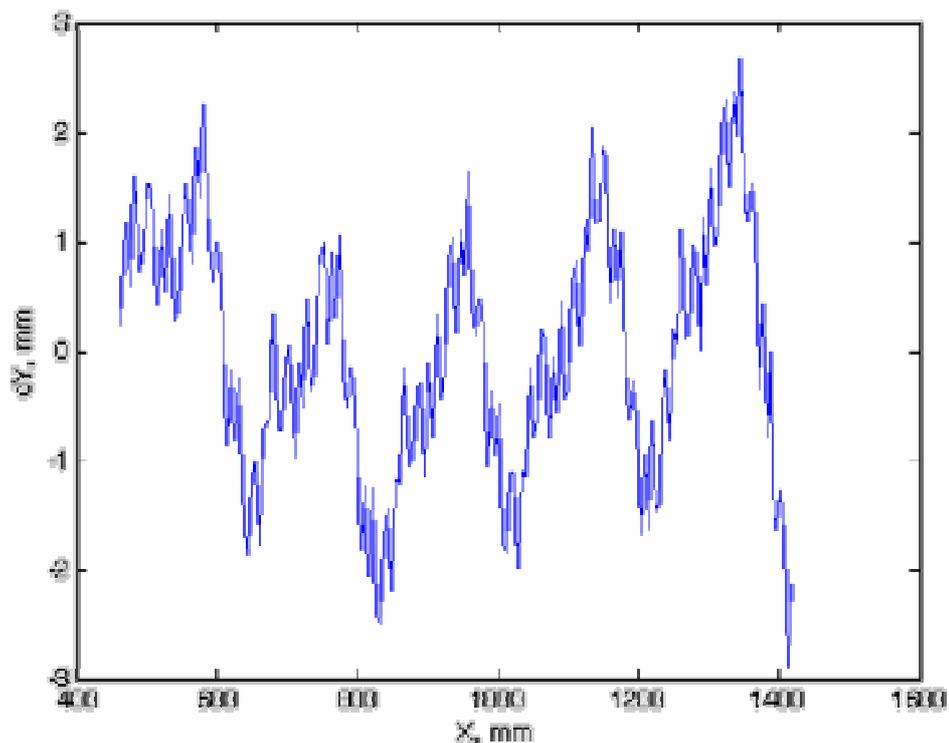


Рис. 2.29. Отклонение среза $Z=400$ мм измеренной 3D геометрии фрагмента штукатуренной стены от прямой линии.

Среднеквадратичное отклонение кривой, представленной на рис. 2.29 составляет 1.14 мм. Это значит, что относительная погрешность измерения заведомо не превышает уровня 0,057 %.

2.5. Метод калибровки измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции

Задача калибровки измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции сводится к определению функционала, связывающего показания триангуляторов и поле толщин измеряемого объекта. Известны методы калибровки триангуляционных измерителей на основе независимой калибровки триангуляционных датчиков, при этом толщину измеряемого объекта рассчитывали по информации о

пространственном расположении измерителей. Типичная погрешность классических триангуляционных измерителей координат имеет значение 10^{-3} .

Калибровка измерителей толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции существенно осложняется специальными техническими требованиями к измерителю, способному работать в условиях горячего металлургического цеха. Необходимо обеспечить погрешность измерений на уровне 20 мкм, при измерительной базе 2 м в условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды. Иными словами, необходимо обеспечить погрешность измерений на уровне 10^{-5} . Очевидно, что погрешность калибровки должна быть существенно меньше указанного значения. Создание и позиционирование эталонного объекта требуемых размеров с подобной погрешностью является крайне серьезной научно-технической проблемой. Поэтому одной из задач диссертационной работы было создание специального метода калибровки, работающего в условиях термоградиентной фазово-неоднородной и обеспечивающего погрешность измерения меньшую, чем погрешность метода дифференциальной облачной триангуляции.

Решить обозначенную научно-техническую проблему возможно на основе использования статистических подходов и регрессионного анализа. Предложенные решения позволяют снизить погрешность калибровки при нулевом математическом ожидании случайной ошибки измерения.

Калибровку измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции целесообразно выполнять в два этапа по следующему алгоритму. На первом этапе определяют параметры из выражения (1.139) для каждого из облачных триангуляторов. Данную процедуру проще всего реализовать позиционированием калибровочного плоского листа в нескольких позициях с известными пространственными координатами и фиксированием характеристических параметров распределения интенсивности излучения на принимаемых изображениях. В

результате будут получены зависимости $F1$ и $F2$, которые позволяют определить значение $Z1$ и $Z2$ в выражении (1.140):

$$Z_1 = F1(X), Z_2 = F2(X) \quad (2.22)$$

На втором этапе калибровки нужно экспериментально определить функцию q . Для этого можно применить калибровочный лист известной толщины, который необходимо произвольно перемещать в измерительном объеме. При этом в компьютере необходимо фиксировать набор измеренных значений $Z1$, $Z2$ и параметры распределения интенсивности излучения на принимаемых изображениях, характеризующих пространственную ориентацию листа в области измерения. В результате будет построена зависимость q в соответствии с выражением:

$$q(\alpha_1, \alpha_2) = L - Z_1 - Z_2 - H_0, \quad (2.23)$$

где H_0 - толщина калибровочного листа.

Предложенный метод калибровки дает возможность проводить прецизионные оптические измерения толщины горячего проката методом синхронной дифференциальной облачной триангуляции и может работать в термоградиентных фазово-неоднородных средах.

Практическая реализация предложенного метода калибровки была выполнена следующим образом. Калибровка выполнялась на отъюстированном измерительном комплексе. Первый этап калибровки выполнялся одновременно для обоих измерительных модулей (рис 2.30).

В измерительном объеме между верхним (1) и нижним (2) триангуляционными измерителями были размещены 3 опорные оси с нарезанной резьбой (3). По этой резьбе перемещаются калибровочные фиксаторы (4), которые размещаются на заданном расстоянии от

триангуляторов. На фиксаторах закрепляется калибровочный объект (5), расположенный непосредственно в измерительном объеме.

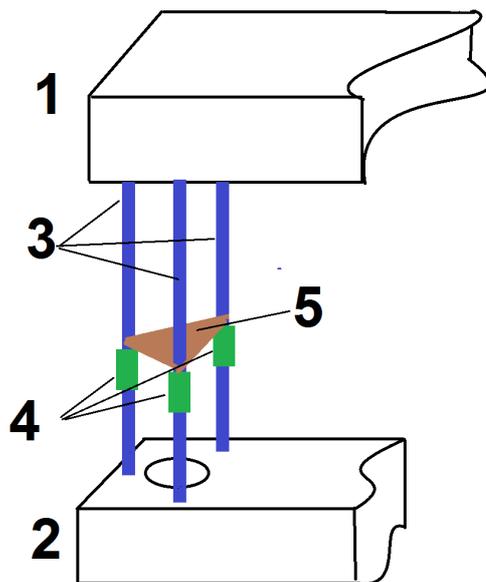


Рис. 2.30. Схема первого этапа калибровки измерительного комплекса на основе дифференциальной облачной триангуляции.

Пусть калибровочные фиксаторы обеспечивают позиционирование на опорной оси с погрешностью $\sigma_{\text{фиксатор}}$. Пусть калибровочные фиксаторы расположены соответственно на высоте h_1 , h_2 , h_3 относительно нижнего триангулятора (рис. 2.31).

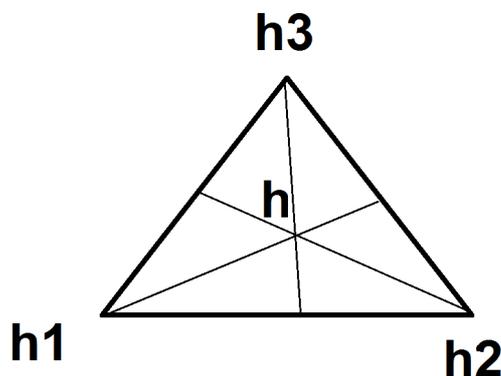


Рис. 2.31. Расположение калибровочного объекта в зоне измерения.

Положение точки пересечения медиан треугольника, образованного калибровочными фиксаторами, будет расположено на высоте

$$h = \frac{h_1+h_2+h_3}{3}. \quad (2.24)$$

Среднеквадратичное отклонение величины h :

$$\sigma_h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial h_1}\right)^2 \sigma_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial h_2}\right)^2 \sigma_{h_2}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial h_3}\right)^2 \sigma_{h_3}^2}. \quad (2.25)$$

Откуда получено:

$$\sigma_h = \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)^2 \sigma_{h_1}^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \sigma_{h_2}^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \sigma_{h_3}^2} = \frac{\sigma_{\text{фиксатор}}}{\sqrt{3}}. \quad (2.26)$$

Пусть для восстановления калибровочной зависимости F_1 и F_2 достаточно K заведомо известных значений функции F_1 и F_2 при различных h . Тогда при проведении N измерений калибровочного объекта при различных параметрах величины h , погрешность калибровки можно оценить исходя из выражения:

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{\text{фиксатор}}}{\sqrt{\frac{nN}{K}}}, \quad (2.27)$$

где n – количество опорных осей, на каждой из которых погрешность позиционирования составляет $\sigma_{\text{фиксатор}}$, N – количество измерений калибровочного объекта на различных высотах. Данное выражение предполагает, что при произвольном количестве опорных осей n , они образуют равнобедренный выпуклый многоугольник, а измерения калибровочного объекта выполняются в центре этого многоугольника.

Погрешность позиционирования калибровочных фиксаторов составляла в экспериментах около 100 мкм. Поскольку измерение калибровочного объекта выполнялось приблизительно в точке пересечения

медиан треугольника, образованного калибровочными фиксаторами, то погрешность позиционирования этой точки на калибровочной поверхности можно оценить как $100/\sqrt{3}$ мкм. Калибровочные зависимости F1 и F2 вычислялись путем регрессионного анализа полученного набора результатов измерения. Всего было выполнено 300 измерений при различном положении калибровочного объекта в измерительном объеме. Калибровочные зависимости имеют гладкий нелинейный характер. В приближении пренебрежимо малой погрешности позиционирования калибровочного объекта для определения характера калибровочных зависимостей достаточно 4 измерений. Следовательно, выполнение 300 измерений обеспечивает снижение погрешности калибровки в $\sqrt{300/4}$ раз. Таким образом, общую погрешность калибровки в выполненных экспериментах можно оценить как меньшую 6 мкм.

2.6. Экспериментальные результаты калибровки метода синхронной дифференциальной облачной триангуляции

Перед проведением промышленных испытаний выполнялась калибровка измерительного комплекса в целом. На первом этапе калибровки получались функции F1 и F2 из (2.21). Данная процедура была реализована позиционированием плоского калибровочного листа в нескольких положениях с известными пространственными координатами и фиксированием характеристических параметров распределения интенсивности излучения на принимаемых изображениях. В результате были экспериментально определены функции F1 и F2 (рис.2.32).

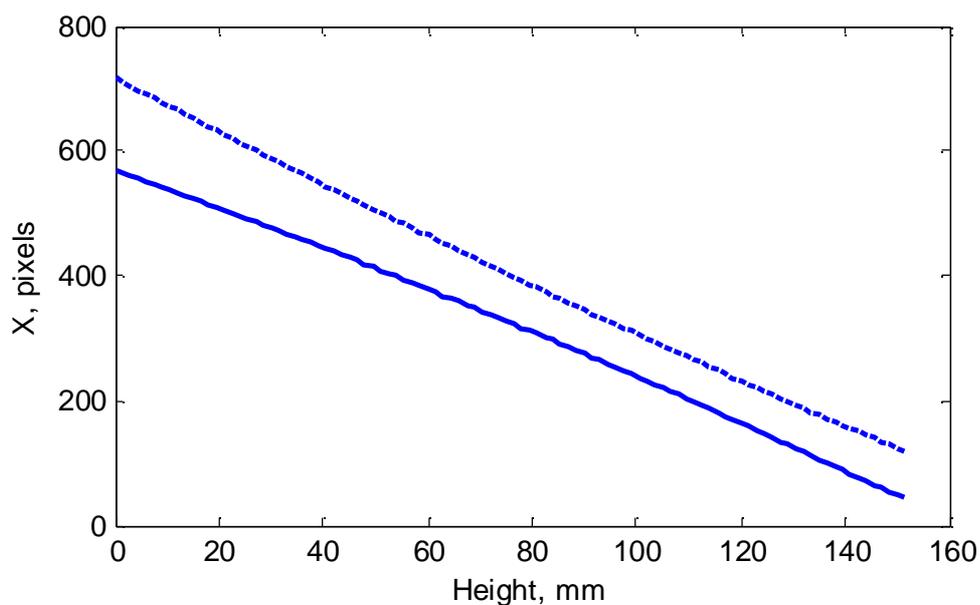
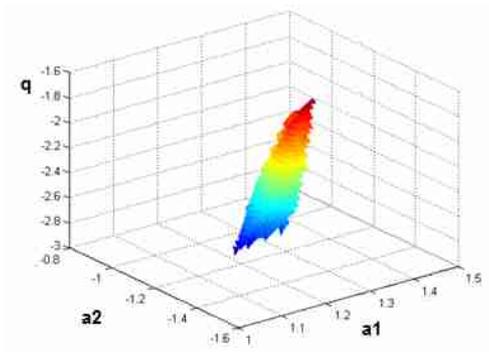


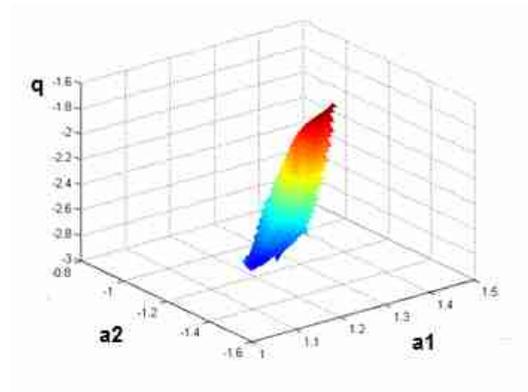
Рис. 2.32. Калибровочные функции верхнего (сплошная линия) и нижнего (пунктирная линия) триангуляторов.

На втором этапе калибровки была определена функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа (рис. 2.33). Функция получена путем прямого замера калибровочного листа, произвольно ориентированного в пространстве согласно (2.22). В качестве параметров, характеризующих пространственный наклон измеряемого листа, использованы углы наклона регрессионных линий в плоскости изображения облачного триангулятора.

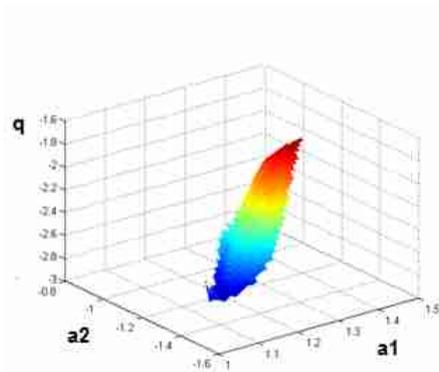
На рисунках 2.33 – 2.34 представлены фрагменты функции q , компенсирующей искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа, для различных срезов при постоянном параметре I .



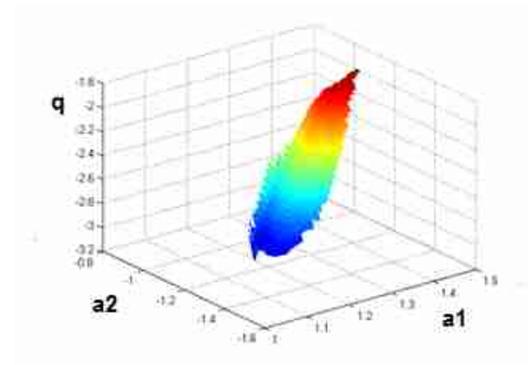
а) $I=160$



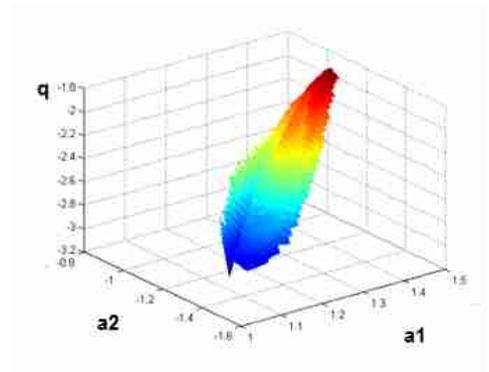
б) $I=170$



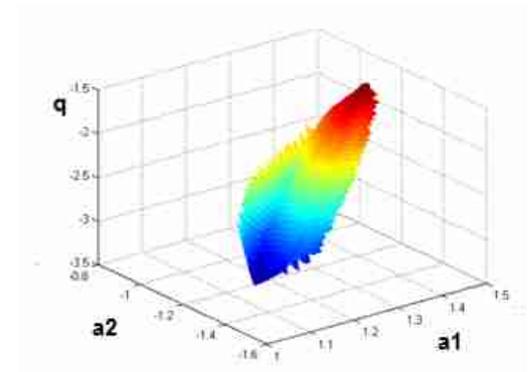
в) $I=190$



г) $I=220$

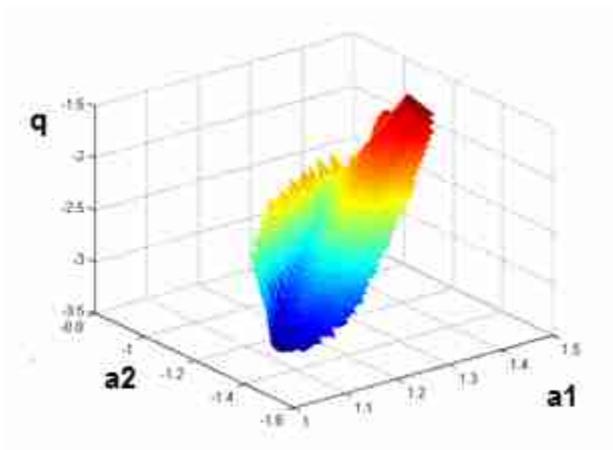


д) $I=250$

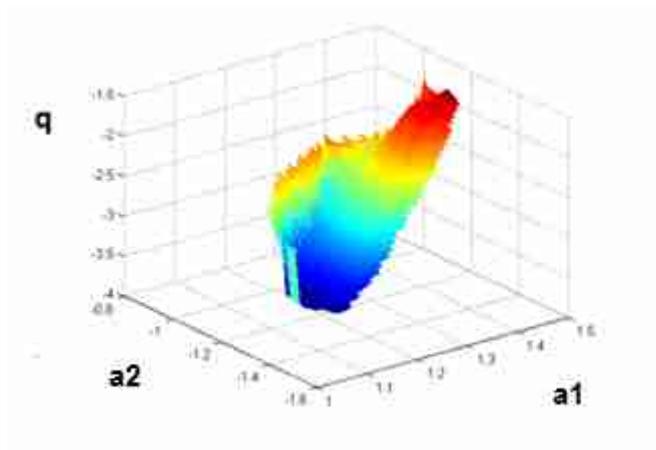


е) $I=280$

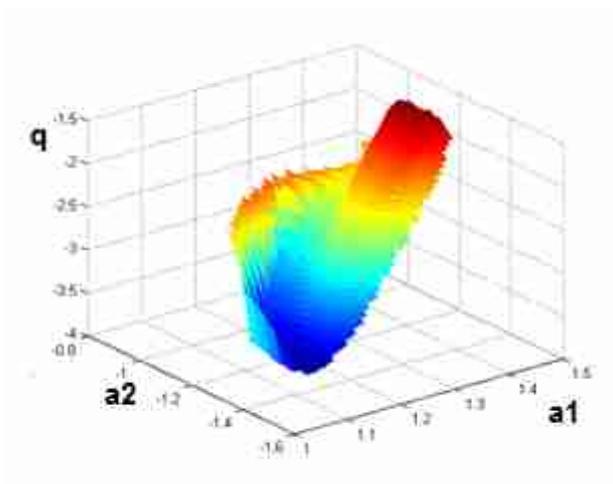
Рис. 2.33. Функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа при различных I .



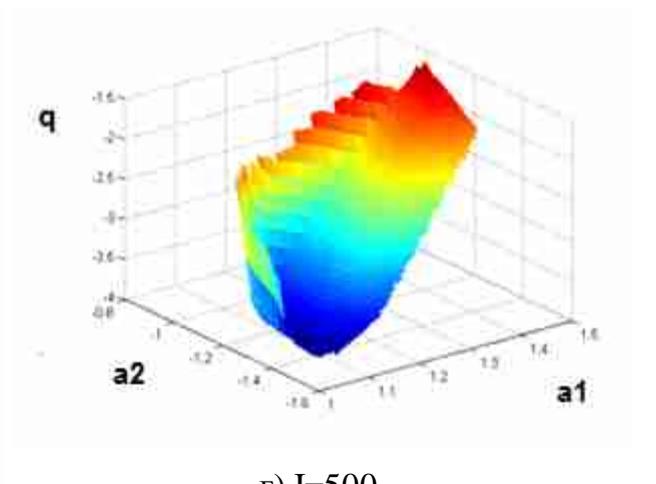
а) $I=310$



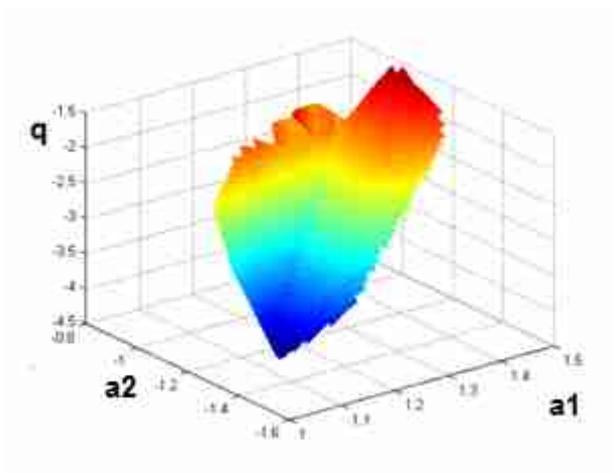
б) $I=340$



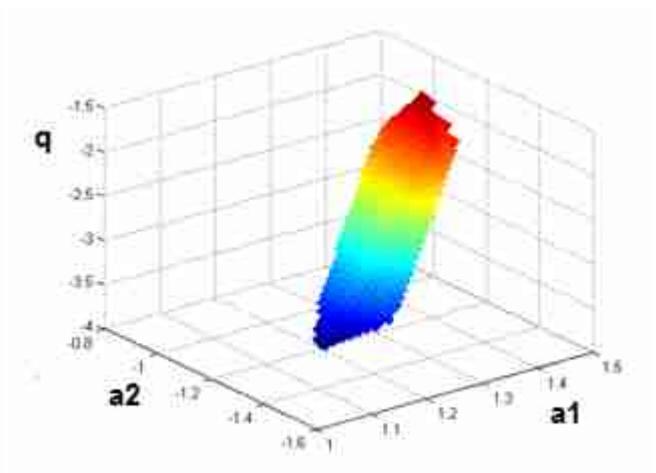
в) $I=400$



г) $I=500$



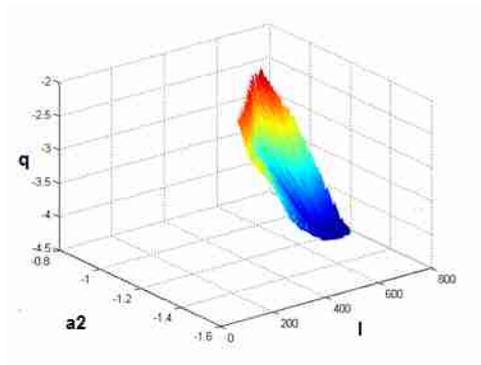
д) $I=600$



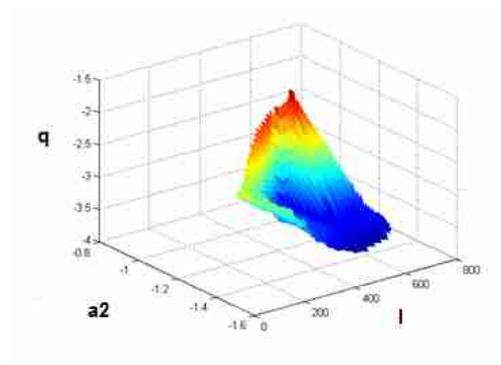
е) $I=700$

Рис. 2.34. Функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа при различных I .

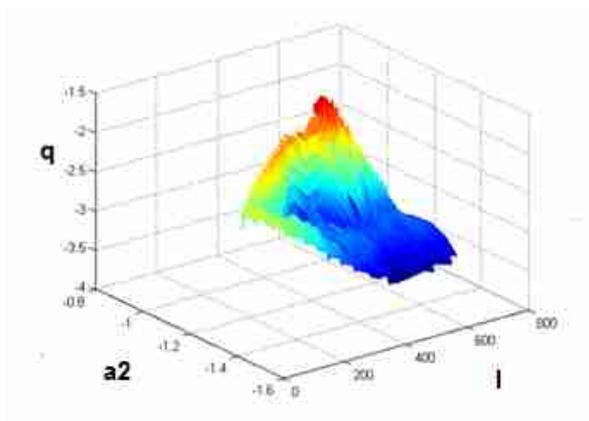
На рисунках 2.35 – 2.36 представлены фрагменты функции q , компенсирующей искажения вносимые пространственным наклоном измеряемого листа, для различных срезов при постоянном параметре a_1 .



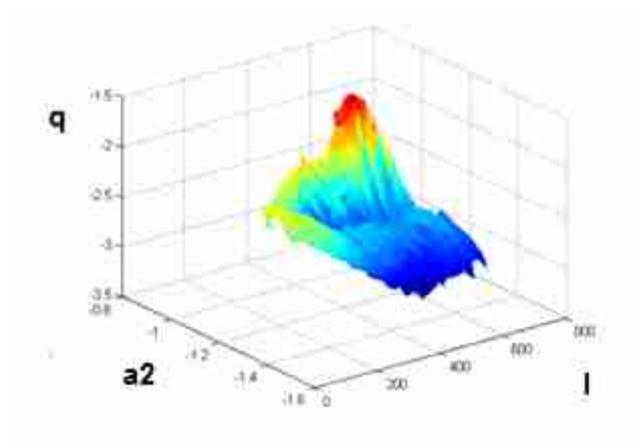
а) $a_1=1.08$



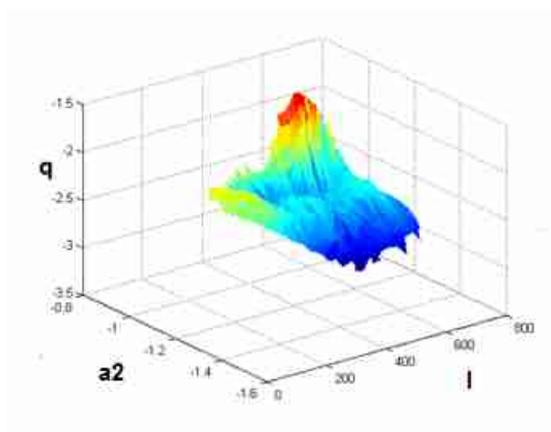
б) $a_1=1.14$



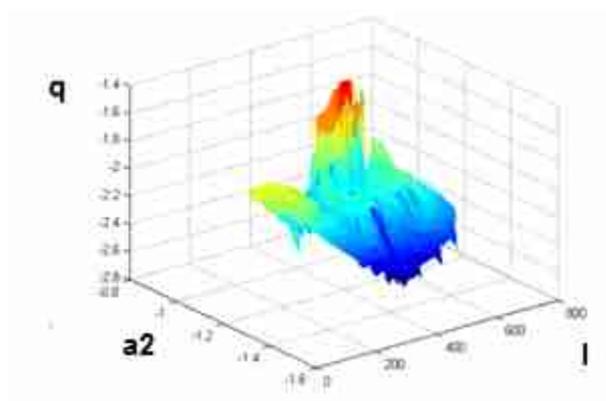
в) $a_1=1.20$



г) $a_1=1.26$

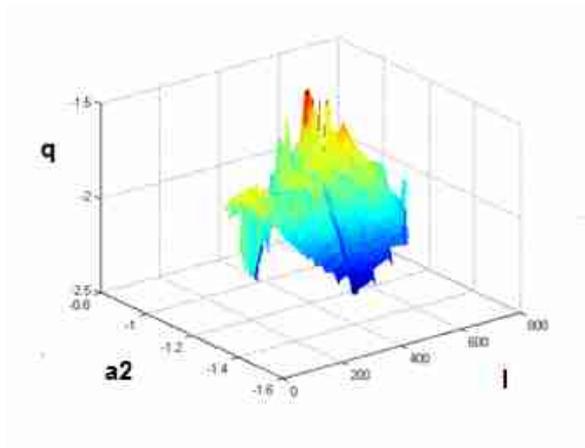


д) $a_1=1.32$

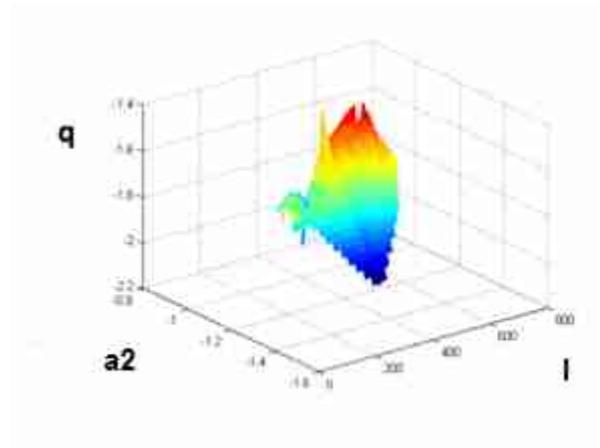


е) $a_1=1.38$

Рис. 2.35. Функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа при различных a_1 .



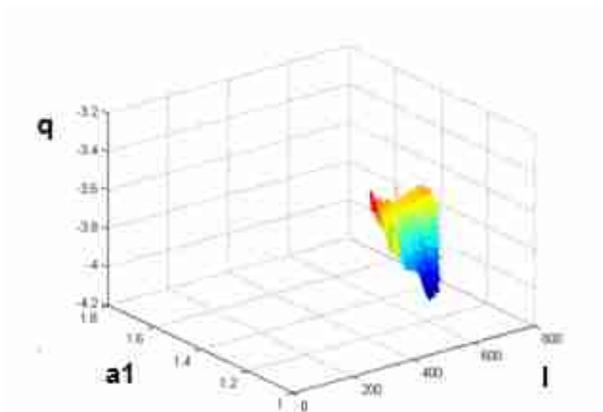
д) $a_1=1.44$



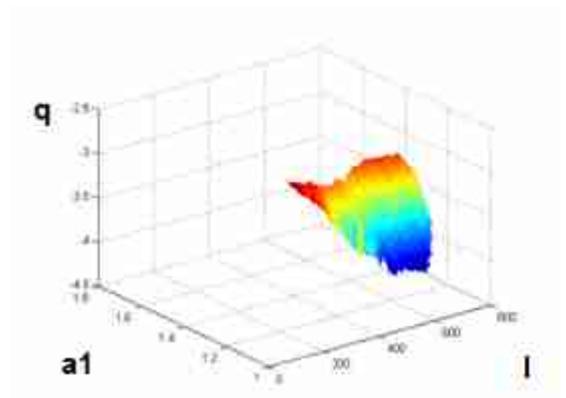
е) $a_1=1.50$

Рис. 2.36. Функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа при различных a_1 .

На рис. 2.37 – 2.38 представлены фрагменты функции q , компенсирующей искажения вносимые пространственным наклоном измеряемого листа, для различных срезов при постоянном параметре a_2 .

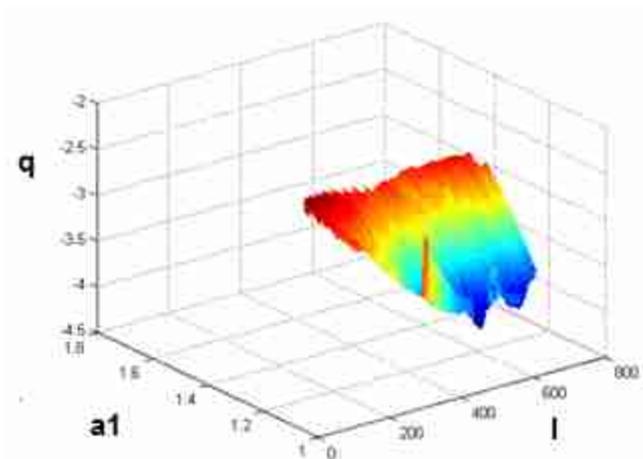


д) $a_2=-1.45$

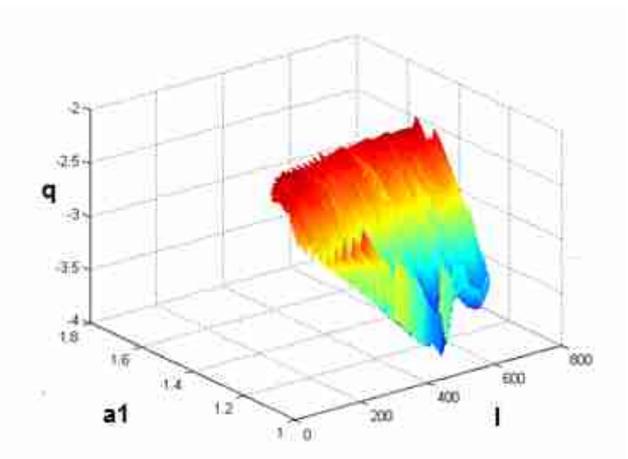


е) $a_2=-1.39$

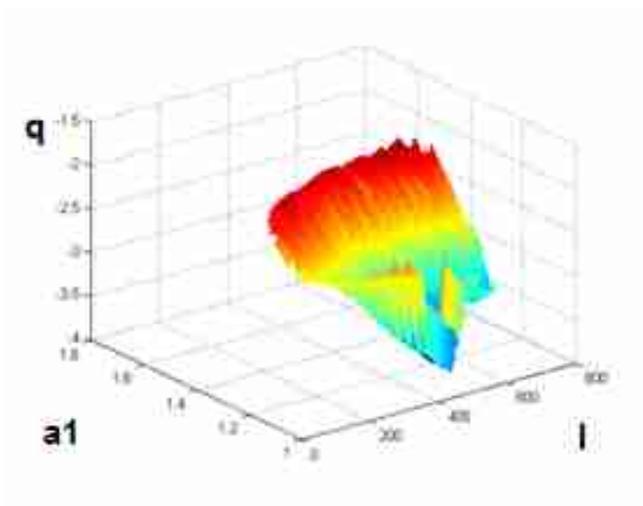
Рис. 2.37. Функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа для различных a_2 .



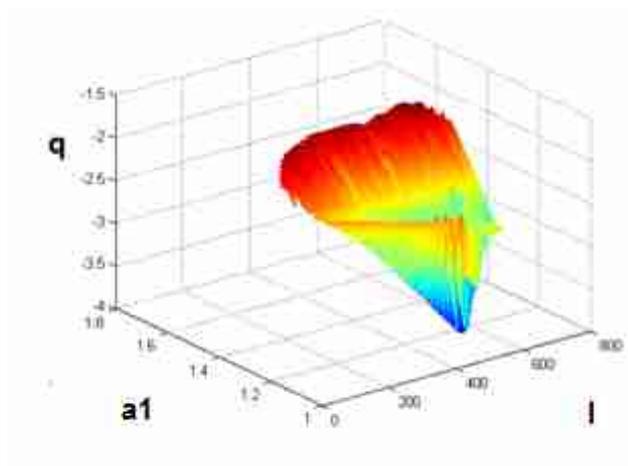
а) $a_2 = -1.33$



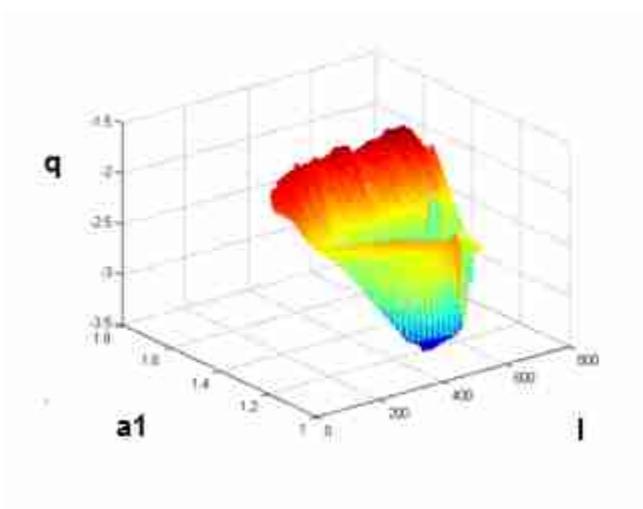
б) $a_2 = -1.27$



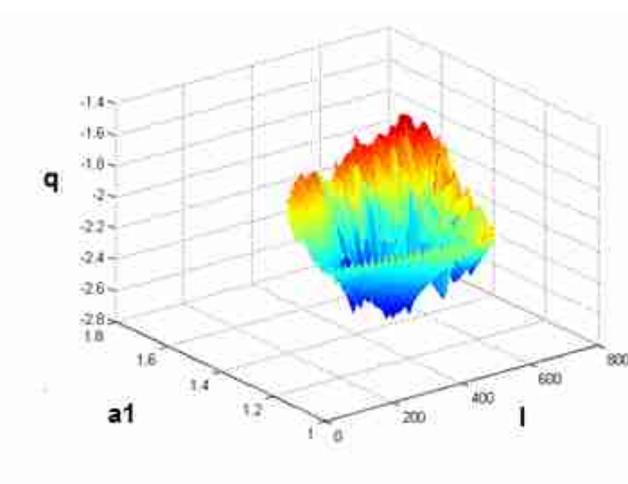
в) $a_2 = -1.21$



г) $a_2 = -1.15$



д) $a_2 = -1.09$



е) $a_2 = -1.03$

Рис. 2.38. Функция q , компенсирующая искажения, вносимые пространственным наклоном измеряемого листа для различных a_2 .

При формировании набора экспериментальных данных для численного расчета функции q необходимо обеспечить достаточную плотность экспериментальных данных. Поскольку функция q зависит от 3 независимых переменных, которые однозначно определяются из пространственного положения измеряемого листа, то функция q представляет собой поверхность в четырехмерном пространстве. Следовательно, при сборе данных для построения функции q необходимо контролировать плотность экспериментальных данных и диапазон принимаемых значений в четырехмерном пространстве.

Для каждого триангулятора отдельно построено множество точек в трехмерном пространстве, соответствующих измеренному положению пространственно-модулированной засветки лазерного излучения на фотоприемнике. Кроме того, определены линейные искажения, характеризующие пространственный наклон калибровочной поверхности в двух ортогональных плоскостях при выполнении второго этапа калибровки. На рис. 2.39-2.40 представлены главные проекции полученного трехмерного облака для верхнего триангулятора. Общее количество калибровочных измерений около 50000.

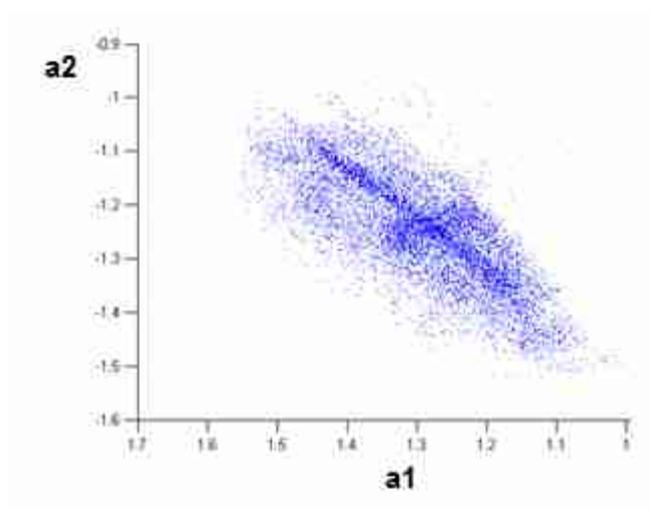
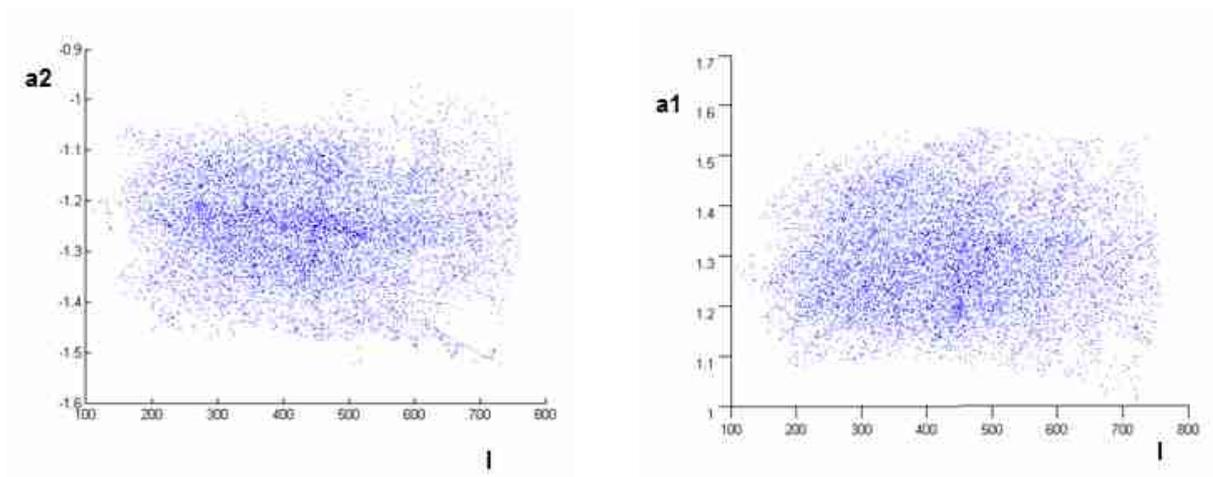


Рис. 2.39. Проекция полученного в результате калибровки трехмерного облака для верхнего триангулятора на ось X.

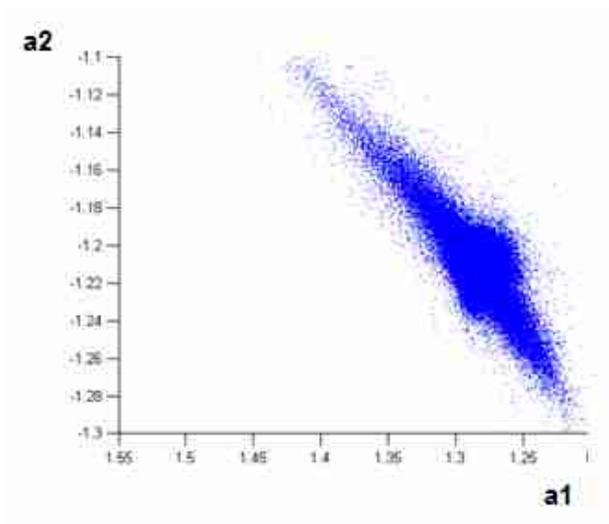


а)

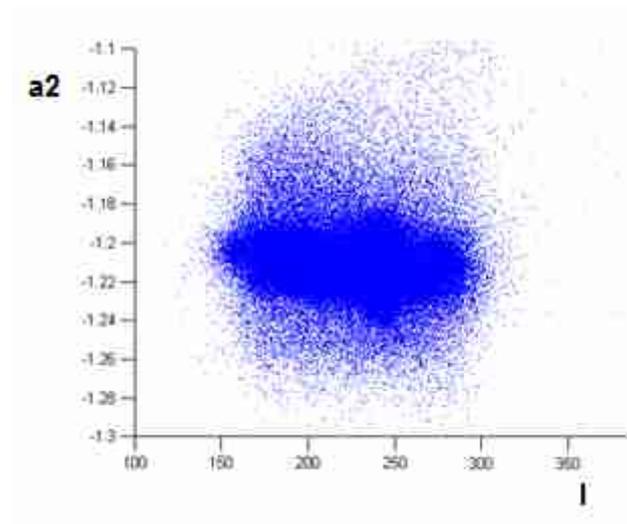
б)

Рис. 2.40. Проекция полученного в результате калибровки трехмерного облака для верхнего триангулятора на ось A1 (а) и A2 (б).

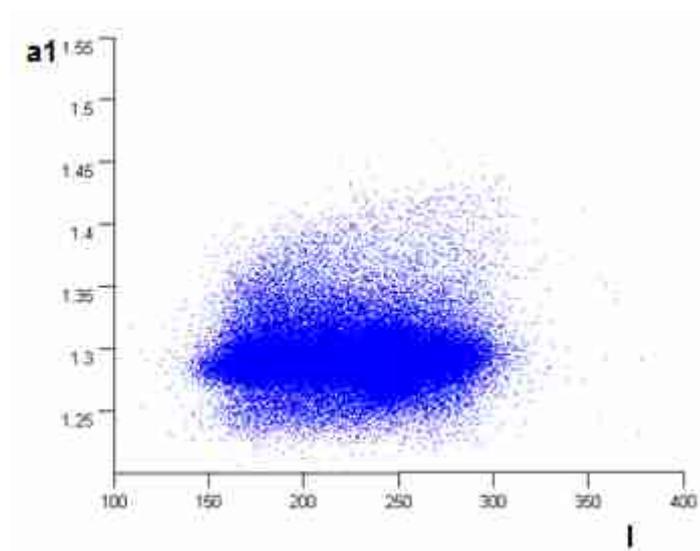
Для определения рабочего диапазона калибровок измерительного комплекса в термоградиентной фазово-неоднородной среде был выполнен сбор массива экспериментальных результатов по измерениям расстояний до поверхности горячего проката. Были использованы результаты измерения расстояния до горячего проката в реальных условиях горячего цеха Новосибирского металлургического завода в период 02.02.2012 по 10.02.2012. Количество результатов в базе, собранной за указанный период работы, составляет 900 000 измерений. Для каждого триангулятора зафиксировано множество точек в трехмерном пространстве, соответствующих измеренным положениям изображений светорассеивающих областей на фотоприемнике и данные, характеризующие пространственный наклон измеряемой поверхности в двух ортогональных плоскостях. На рис. 2.41 представлены главные проекции полученного трехмерного облака для верхнего триангулятора.



а)



б)



в)

Рис. 2.41. Проекции полученного в результате сбора данных от поверхности горячего проката трехмерного облака для верхнего триангулятора на оси X (а), A1 (б), A2 (в).

Аналогичные графики для нижнего триангулятора представлены на рис. 2.42.

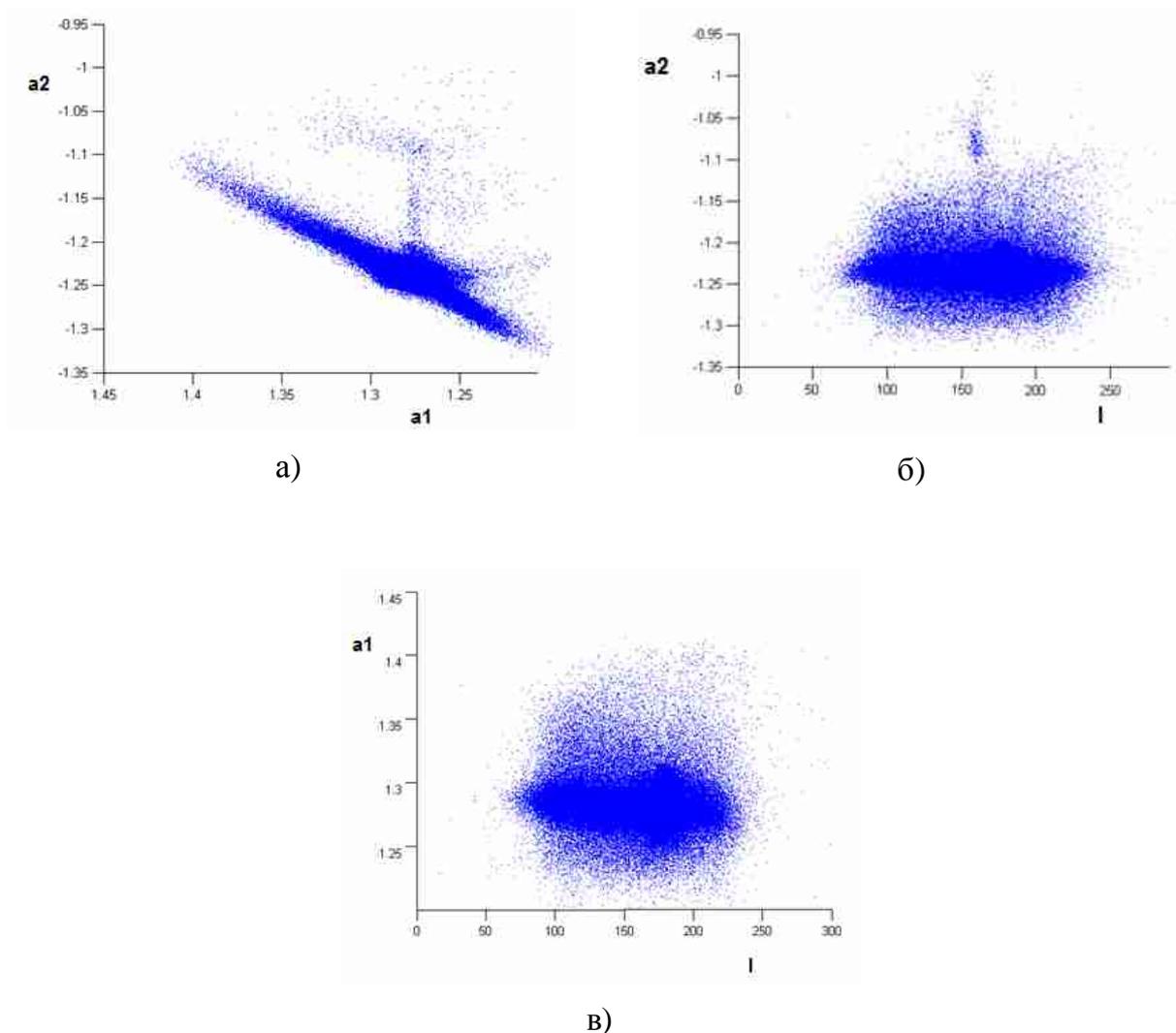


Рис. 2.42. Проекции полученного в результате сбора данных от поверхности горячего проката трехмерного облака для нижнего триангулятора на оси X (а), A1 (б), .A2 (в).

Сравнение полученных облаков точек показывает наличие дополнительных выбросов у нижнего триангулятора. Учитывая, что на верхнем триангуляторе данных в подобном диапазоне значений не наблюдалось, был сделан вывод, что они не достоверны. В противном случае полученный результат соответствовал бы крайне сильной деформации металла, что физически невозможно в исследуемом технологическом процессе. Наиболее вероятно, что данные точки появились из-за попадания воды или грязи на нижний иллюминатор, что и привело к некорректным показаниям.

На рис. 2.43 показаны облака точек, соответствующие калибровочным данным (серые точки) и результатам, полученным при измерении горячего проката (черные точки) верхним триангулятором.

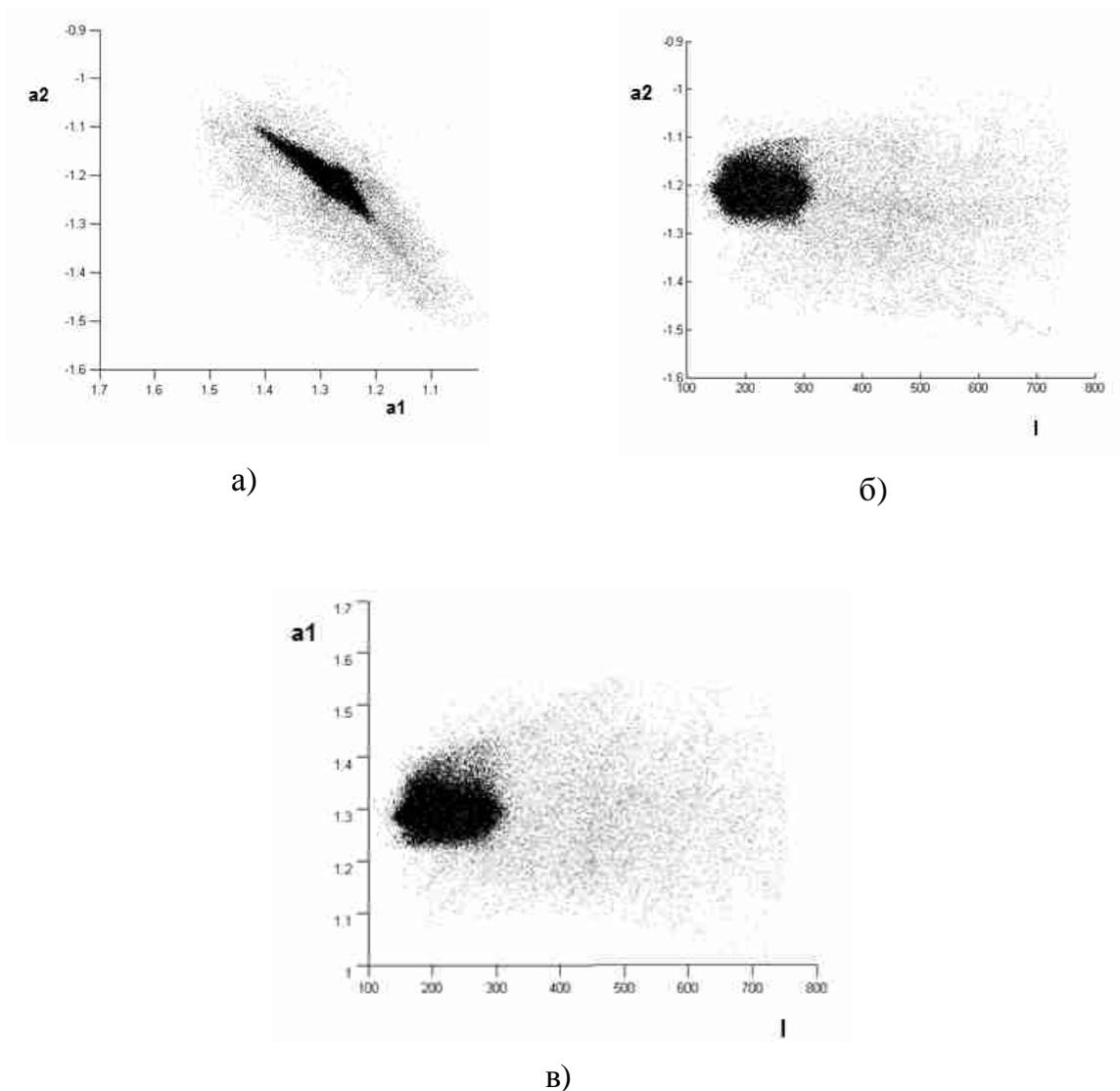


Рис. 2.43. Проекция полученного в результате сбора данных от поверхности горячего проката (черные точки) и калибровочных данных (серые точки) трехмерного облака для верхнего триангулятора на оси X (а), A1 (б), A2(в).

На рис. 2.44 показаны облака точек, соответствующие калибровочным данным (серые точки) и результатам, полученным при измерении горячего проката (черные точки) нижним триангулятором.

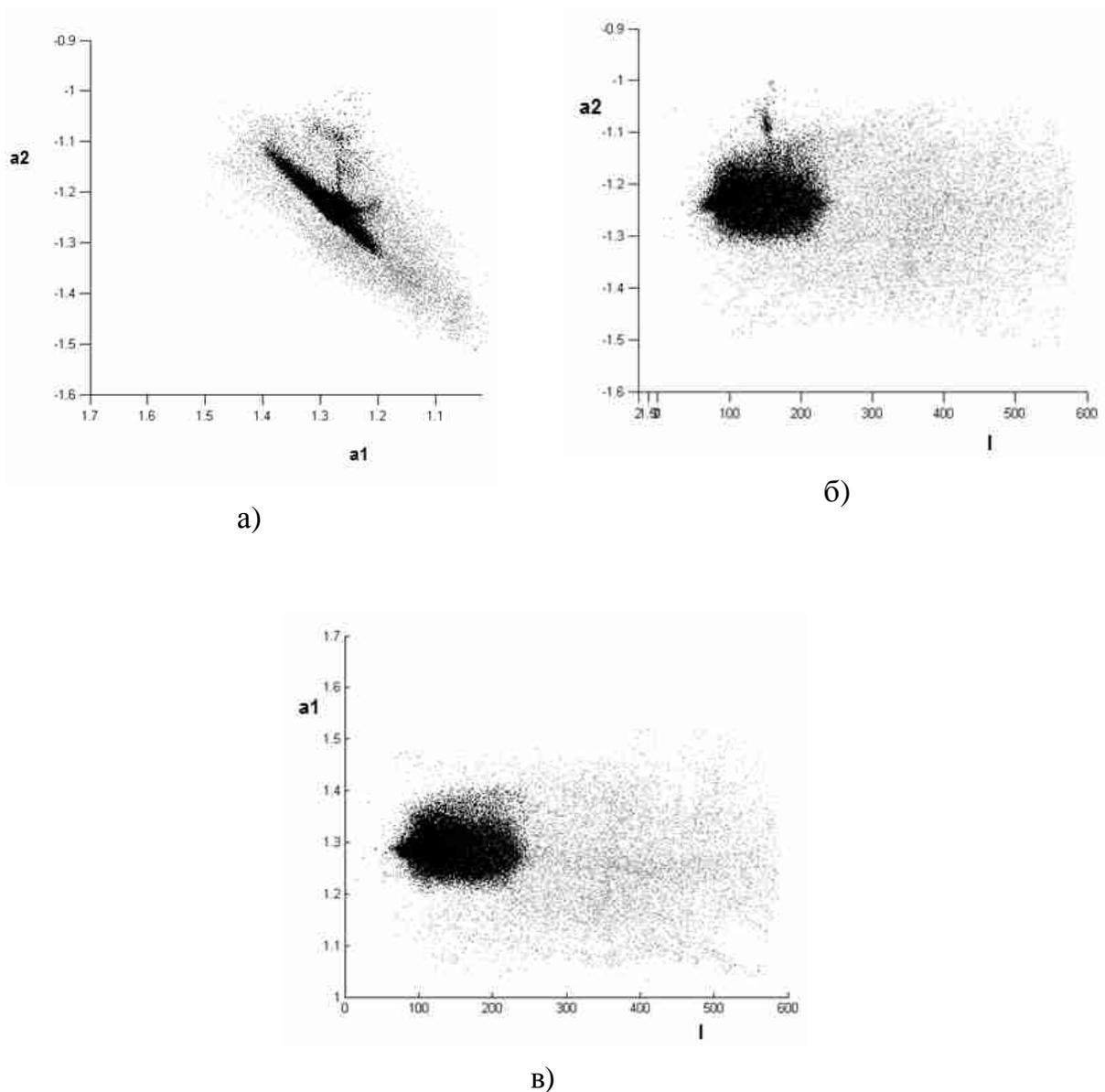


Рис. 2.44. Проекция полученного в результате сбора данных от поверхности горячего проката (черные точки) и калибровочных данных (серые точки) трехмерного облака для нижнего триангулятора на оси X (а), A1 (б), A2(в).

Результаты показывают, что при измерении толщины горячего проката в штатных режимах положения измеряемых поверхностей принимают существенно более узкие диапазоны значений, по сравнению с полным рабочим диапазоном измерительного комплекса. Подобный запас по диапазону существенно повышает надежность и устойчивость работы

измерительного комплекса, даже при нештатных изменениях его положения относительно прокатного стана.

Для оценки реальной погрешности измерения в лабораторных условиях были выполнены эксперименты по измерению толщины калибровочных плоских листов различной известной толщины.

В экспериментах по измерению толщины калибровочного плоского листа толщиной 1.5 мм средневзвешенное значение показаний толщиномера составило 1.502 мм, среднеквадратичное отклонение 0.0024 мм (рис. 2.45). В экспериментах по измерению толщины калибровочного плоского листа толщиной 2.0 мм средневзвешенное значение показаний толщиномера составило 2.0017 мм, среднеквадратичное отклонение 0.0021 мм (рис. 2.46). В экспериментах по измерению толщины калибровочного плоского листа толщиной 3.0 мм средневзвешенное значение показаний толщиномера составило 2.002 мм, среднеквадратичное отклонение 0.0024 мм (рис. 2.47). В экспериментах по измерению толщины калибровочного плоского листа толщиной 4.0 мм средневзвешенное значение показаний толщиномера составило 4.0036 мм, среднеквадратичное отклонение 0.0023 мм (рис. 2.48). Полученные данные соответствует экспериментальной относительной погрешности измерения толщины на уровне 10^{-6} .

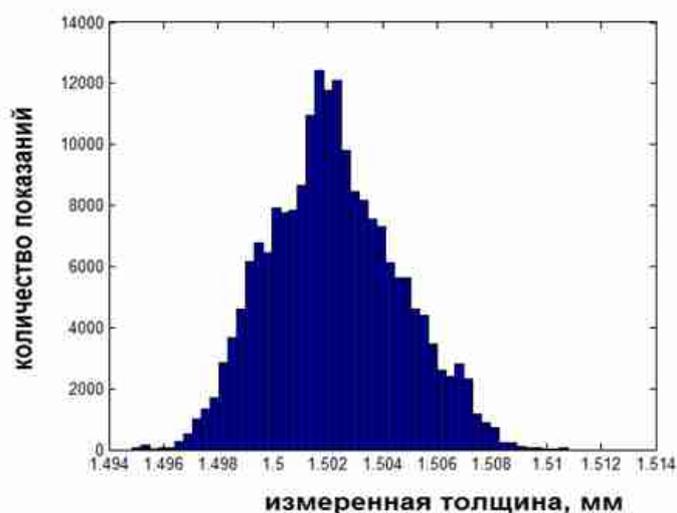


Рис. 2.45. Результат измерения калибровочного листа толщиной 1.5 мм.

Среднеквадратичное отклонение показаний составило 0,0024 мм.

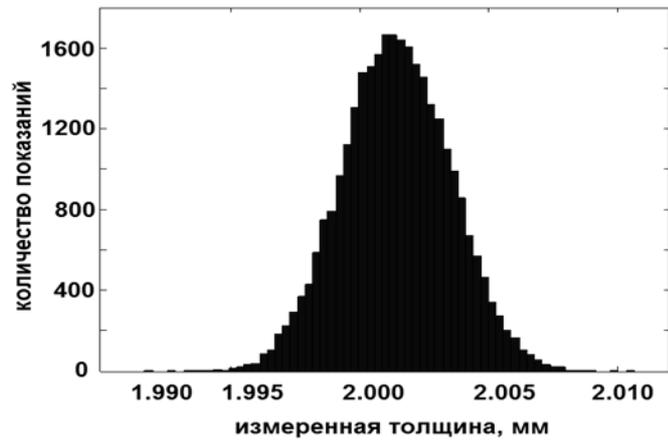


Рис. 2.46. Результат измерения калибровочного листа толщиной 2 мм.
Среднеквадратичное отклонение показаний составило 0,0021 мм.

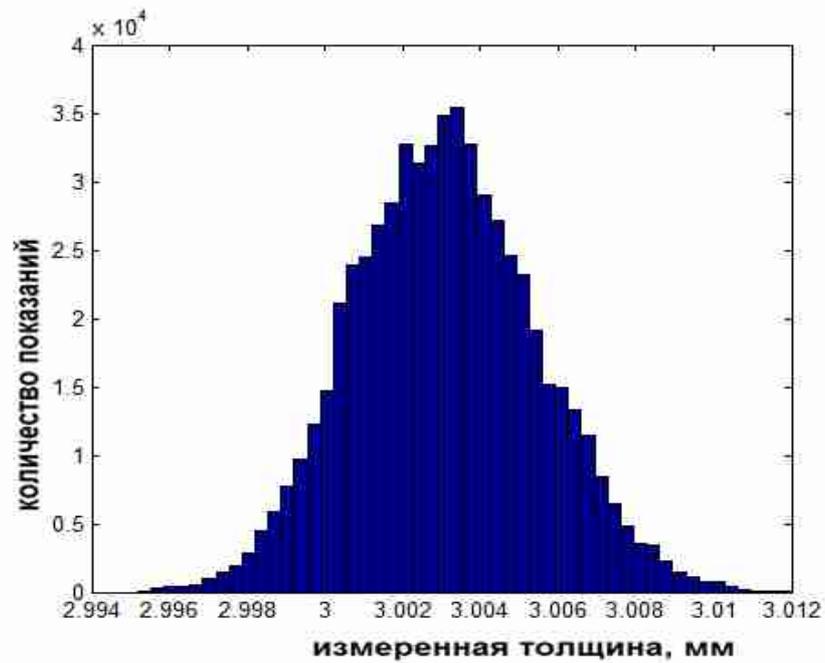


Рис. 2.47. Результат измерения калибровочного листа толщиной 3 мм.
Среднеквадратичное отклонение показаний составило 0,0024 мм.

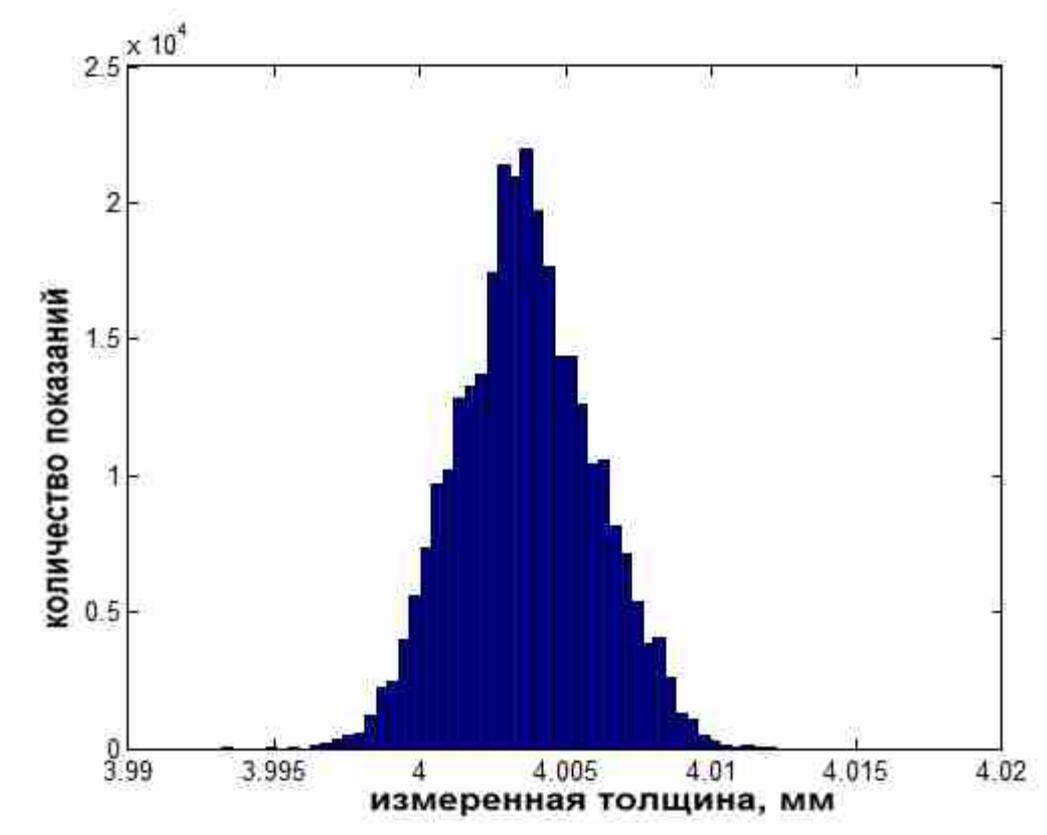


Рис. 2.48. Результат измерения калибровочного листа толщиной 4 мм.
Среднеквадратичное отклонение показаний составило 0,0023 мм.

Представленная погрешность измерения получена в идеальных условиях лаборатории при отсутствии рефракционных термоградиентных искажений оптических сигналов. Полученная экспериментальная оценка погрешности предложенного метода дифференциальной облачной триангуляции справедлива для измерений толщины холодных листовых изделий предложенным методом.

Выводы по главе 2

- Предложены методы калибровки систем на основе структурированного освещения для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов. Малый уровень погрешности калибровок обеспечен за счет адаптации регрессионных функций с помощью искусственных нейронных сетей и статистического накопления экспериментальных калибровочных данных.
- Выполнена практическая реализация предложенных методов калибровки системы на основе многопараметрической триангуляции с использованием структурированного освещения. Обеспечена погрешность калибровки на уровне 0,05% при калибровке системы, адаптированной для измерения различных диапазонов линейных размеров.
- Предложен и реализован метод калибровки измерительных систем на основе синхронной дифференциальной облачной триангуляции для измерения толщины динамических объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах с использованием статистического накопления калибровочных данных и многомерного регрессионного анализа.
- Проведен цикл лабораторных и промышленных испытаний для оценки погрешности измерения толщины методом синхронной дифференциальной облачной триангуляции. Показано, что предложенный метод калибровки позволяет выполнять измерения толщины динамических объектов с рекордно малой погрешностью (до 10^{-6}).