

На правах рукописи

***ДВОЙНИШНИКОВ***  
***Сергей Владимирович***

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

Специальность 05.13.18 -  
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

***АВТОРЕФЕРАТ***  
*диссертации на соискание ученой степени*  
*доктора технических наук*

Новосибирск  
2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант: Меледин Владимир Генриевич  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты: Чугуй Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, директор.

Спектор Александр Аншелевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Новосибирской государственной технической университет, заведующий кафедрой.

Мазуров Борис Тимофеевич, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, профессор

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматки и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м. н.

Ильичев Л.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** 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. 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.

С появлением лазеров в 60-х годах методы оптической триангуляции получили существенное развитие. Сфера практических применений 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. 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 фазовой неоднородности среды на момент начала работ оставалась нерешенной. Связано это с тем, что существующие методы и оптико-электронные измерители не в полной мере учитывали динамические искажения оптических сигналов фазово-неоднородной средой и требовали адаптации под свойства измеряемых объектов. Кроме того, системы 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 крайне важная для практики научная проблема бесконтактных динамических измерений геометрии объектов в нестационарных термоградиентных фазово-неоднородных средах, характерных для современных промышленных технологий, и, особенно, для горячей металлургии, 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.

**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) применение метода облачной триангуляции на основе модуляции оптического источника и многомерного регрессионного анализа пространственного и временного ансамблей экспериментальных данных обеспечивает прецизионный

контроль геометрических параметров динамических объектов в условиях нестационарной фазово-неоднородной среды с погрешностью  $10^{-5}$  в производственных условиях;

2) использование устойчивого метода расшифровки триангуляционных структурированных изображений, основанного на пространственно-временной фильтрации данных, компенсирующем нелинейном преобразовании и многомерной регрессии, позволяет минимизировать погрешность измерений трехмерной геометрии в условиях фазово-неоднородных сред при использовании фотоприемника, динамический диапазон которого ограничен по энергии;

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

4) созданные программно-аппаратные интерфейсы и программное обеспечение оптико-лазерных промышленных диагностических систем, реализующие методы многопараметрической триангуляции, позволяют формировать базы данных с технологической и учетной информацией о контролируемых геометрических параметрах в условиях фазово-неоднородных сред.

**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 внедрение 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. Кузьмина» 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, 2007, 2008, 2009, 2010, 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. Ин-

новации.» (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).

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 110 печатных работ, из них 15 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов докторских диссертаций, 11 патентов Российской Федерации, 14 статей, индексированных 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.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Во введении* дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* посвящена развитию методов многопараметрической триангуляции для измерения геометрических параметров статичных и движущихся объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах.

Проведен анализ известных работ, посвященных исследованию распространения электромагнитных волн в фазово-неоднородных средах. Установлено, что известные полученные результаты не в полной мере применимы для анализа распространения оптических лучей при многопараметрической триангуляции в термоградиентных фазово-неоднородных средах, характерных для промышленных условий. Это связано со специфическими фазовыми и структурными параметрами динамических конвективных потоков и турбулентных вихрей в воздухе вблизи движущихся горячих объектов, связанных с промышленными «горячими» технологиями.

На основе статистических подходов выполнен анализ распространения оптических лучей в фазово-неоднородной среде со значительными пространственно-временными температурными градиентами. Показатель преломления воздуха в фазово-неоднородной среде при анализе представлялся в виде суммы постоянного значения  $n_0$  и поправки  $n_1$ , обусловленной пространственно-временными температурными градиентами:

$$n(r, t) = n_0 + n_1(r, t). \quad (1)$$

В результате статистического анализа распространения электромагнитных волн на основе решения волнового уравнения методом малых возмущений было установлено, что полевое возмущение оптического луча в термоградиентной фазово-неоднородной среде может быть представлено в виде суперпозиции множества независимых вкладов различных областей фазово-неоднородной среды:

$$U_1(r) = \frac{k_0^2}{2\pi} \iiint e^{jk_0 \left( (z-z') + \frac{|\rho-\rho'|^2}{2(z-z')} \right)} \frac{n_1(r') U_0(r') d^3r'}{|z-z'|}. \quad (2)$$

В выражении (2)  $r$  – пространственный вектор, определяющий точку внутри объема, рассеивающего электромагнитную волну,  $\rho$  – поперечные смещения векторов  $r$  от оси  $z$ , характеризующей направление распространения волны,  $U_0$  – невозмущенное решение, соответствующее фазово-однородной среде.

В приближении центральной предельной теоремы, случайные отклонения точки светорассеяния пучка на анализируемой поверхности за счет действия тепловых градиентов оптической фазово-неоднородной среды подчиняются нормальному распределению:

$$\rho_A(\alpha) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\alpha-s)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где  $\rho_A(\alpha)$  – плотность распределения случайной величины  $A$ , определяющей длину вектора  $r$ , в полярной системе координат,  $s$  – длина вектора, характеризующего невозмущенную электромагнитную волну,  $\sigma$  – коэффициент, характеризующий величину отклонений электромагнитной волны фазово-неоднородной средой.

Статистическое накопление и усреднение способны существенно уменьшать погрешность измерений, но требуют формирования достаточного ансамбля данных. Решение проблемы измерения трехмерной геометрии статичных крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородной среды возможно на основе триангуляционного метода структурированного освещения с использованием паттерна структурированного освещения в виде параллельных полос с гармоническим пространственно-временным изменением интенсивности.

Существующие методы структурированного освещения сложно применять для измерения геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхности в фазово-неоднородных средах. Это связано с проблемами расшифровки структурированных изображений при рассеянии на поверхности с произвольными светорассеивающими свойствами в условиях ограниченного динамического диапазона по энергии фоторегистратора. В работе предложен устойчивый метод расшифровки структурированных изображений, обеспечивающий минимизацию погрешности измерений объектов с проблемными светорассеивающими поверхностями методом структурированного освещения в условиях фазово-неоднородной среды. Метод основан на фильтрации недостоверных измерений, формировании неравномерного временного ряда экспериментальных данных и многопараметрическом регрессионном анализе. Регрессионную функцию ищут в виде

$$f(x) = A + B \cdot \sin(x) + C \cdot \cos(x), \quad (4)$$

где  $x$  - номер структурированной засветки,  $A, B, C$  - параметры наблюдаемой последовательности изображений измеряемого объекта в данной точке. Функция среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma(A, B, C) = \sum_{i=1}^N (y_i - A - B \cdot \sin(x_i) - C \cdot \cos(x_i))^2. \quad (5)$$

Условие минимизации:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial A} = 0; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial B} = 0; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial C} = 0. \quad (6)$$

Предложенный устойчивый метод расшифровки структурированных изображений успешно функционирует при светорассеивающих свойствах поверхно-

сти измеряемого объекта, изменяющихся в широком диапазоне значений. Он устойчиво работает в условиях фазово-неоднородной среды и обеспечивает снижение погрешности измерений в 10 раз по сравнению с алгоритмом расшифровки структурированных изображений на основе векторного представления системы уравнений, описывающих структурированные засветки (рис. 1).

Решение проблемы адаптации пространственной модуляции оптического источника является крайне актуальным, поскольку период модуляции влияет на итоговую погрешность измерений:

$$\Delta z = \frac{\Delta I \cdot p}{2\pi \cdot I \cdot \sqrt{N} \cdot \tan \theta}, \quad (7)$$

где  $p$  – период пространственной модуляции излучения,  $\theta$  – угол триангуляции,  $\Delta I$  – погрешность измерения интенсивности на фотоприемнике,  $N$  – используемое количество структурированных засветок. Для минимизации погрешности измерения методом фазовой триангуляции необходимо минимизировать период пространственной модуляции оптического излучения. Из-за искажений фазово-неоднородной среды, апертурной дифракции, неидеальности оптических элементов и ограниченной глубины резкости невозможно получить абсолютно резкое изображение на фотоприемнике. Поэтому необходимо согласовывать период пространственной модуляции с эффективной импульсной характеристикой оптической системы измерителя в целом.

В частотном представлении наблюдаемое распределение интенсивности на фотоприемнике можно представить в виде суммы функции распределения шума на анализируемых изображениях и произведения функции импульсного отклика

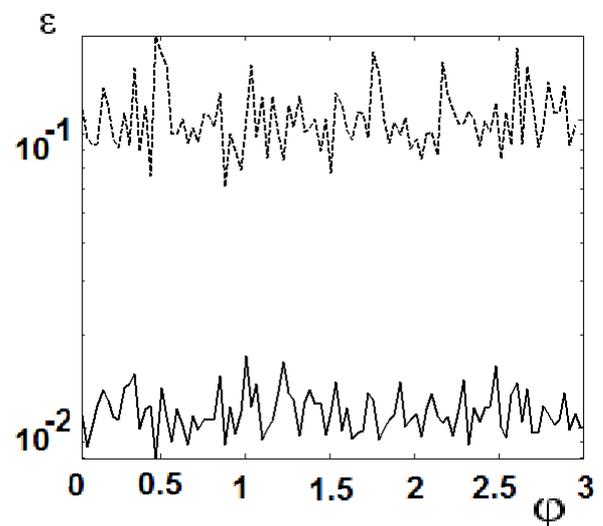


Рис. 1. Сравнение погрешности метода расшифровки структурированных изображений на основе векторного представления системы уравнений (пунктирная линия) и устойчивого метода расшифровки (сплошная линия) от значения начальной фазы

системы с функцией распределения интенсивности изображения, формируемого на поверхности измеряемого объекта источником излучения:

$$G(u, v) = N(u, v) + H(u, v)F(u, v) \quad (8)$$

В диссертационной работе предложен метод определения оптической импульсной характеристики в тракте источник-приемник измерительной системы. Метод основан на экспериментальной оценке функции импульсной характеристики оптической системы в частотном представлении. Поскольку формируемая структурированная засветка имеет выраженное направление модуляции (интенсивность излучения модулируется вдоль выделенной, как правило, горизонтальной координаты), то далее мы ограничимся рассмотрением одномерного случая. Импульсный отклик оптической системы ищем в виде нормального распределения:

$$H(u) = Ae^{-\frac{u^2}{\sigma^2}}, \quad (8)$$

В предположении, что распределение шума  $N(u)$  имеет существенно меньшую амплитуду, чем  $H(u)$ , получено:

$$\sigma = \frac{\int \sqrt{\log\left(\frac{G_0(0)}{F_0(0)}\right) - \log\left(\frac{G_0(u)}{F_0(u)}\right)} \cdot du}{\int u \cdot du} \quad (9)$$

Предложенный метод адаптации частоты пространственной модуляции обеспечил снижение погрешности измерений на 50% при измерении трехмерной геометрии с частотой модуляции в два раза меньшей оптимальной.

Энергетические характеристики многих устройств формирования и ввода изображений могут быть описаны степенными распределениями. В триангуляционных измерениях с применением структурированного освещения очень важно обеспечить линейность энергетической характеристики всего приемно-передаточного тракта. Научная проблема компенсации нелинейностей тракта источник-приемник излучения при реализациях триангуляционных методов структурированного освещения связана как с отсутствием исходной информации, так

и с необходимостью оценок нелинейностей непосредственно в процессе измерений.

Для решения обозначенной проблемы в работе предложен метод дополнительной коррекции на основе нелинейной функции, обладающей непрерывностью и гладкостью. Метод дополнительной коррекции на основе нелинейной функции в условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды обеспечил оптимальное согласование энергетических характеристик источника и приемника излучения. В результате достигнуто снижение погрешности измерений в 4 раза (рис. 2).

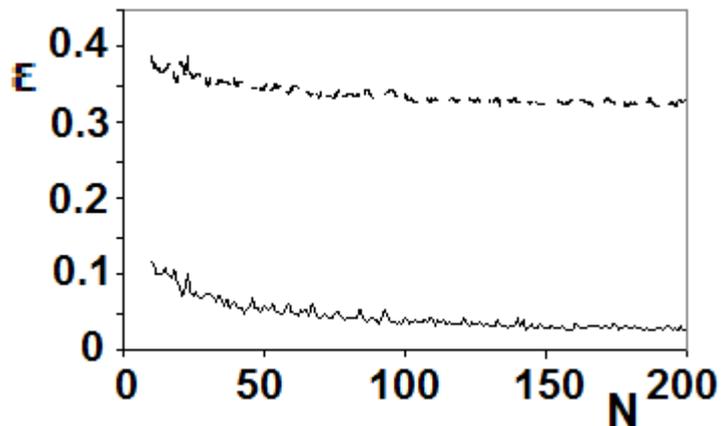


Рис. 2. Отклонение измеренной фазы для различного числа сдвигов. Метод расшифровки структурированных изображений без компенсации нелинейности тракта (пунктирная линия) и метод расшифровки структурированных изображений с применением метода компенсации нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения (сплошная линия)

На момент начала работы над диссертацией проблема триангуляционных измерений динамичных объектов в фазово-неоднородных средах была ограничено представлена в научной литературе. Известные методы оптической триангуляции динамических объектов устойчиво работают при малых уровнях температурных градиентов и фазовых неоднородностей, либо при характерном времени измеряемого процесса, существенно превышающем временные масштабы термоградиентных и фазовых искажений. Связано это с тем, что фазовые неоднородности воздуха искажают траектории световых лучей в измерительных схемах. Отклонения координат точки К на поверхности исследуемого объекта могут быть описаны случайной величиной, имеющей нормальное распределение:

$$K(t)=F(t,K_0), \quad (10)$$

Координата  $K_0$  соответствует начальному положению, ориентации и заданным внутренним параметрам излучающей системы. При достаточно большом

времени накопления  $T$ , координаты точки  $K$ , характеризующей положение светового пятна, сойдутся к некоторой величине

$$\langle K \rangle = \frac{1}{T} \int F(t, K_0) dt. \quad (11)$$

Для обеспечения требуемого уровня погрешности необходим статистически значимый ансамбль экспериментальных данных, накопить который при измерении динамических объектов традиционными методами в ряде случаев невозможно.

В диссертационной работе предложен метод облачной триангуляции, устойчиво работающий в термоградиентных фазово-неоднородных средах. Метод основан на формировании пространственно-структурированного оптического излучения, рассеиваемого поверхностью исследуемого объекта. Далее выполняют многопараметрический регрессионный анализ проективного двумерного распределения наблюдаемого на фотоприемнике облака световых точек  $\{K_i\}$ . По пространственному положению наблюдаемого светового облака  $Y(c1..ck)$  определяют расстояние до исследуемой поверхности, а по геометрическим искажениям - наклон поверхности. Снижение погрешности измерений связано с эффективным использованием гипотезы эргодичности процессов. Оптимальный взаимодополняющий регрессионный анализ выполняют как по пространственному, так и по временному ансамблю экспериментальных данных. Параметры  $(c1..ck)$  определяются, исходя из условия минимизации отклонения мгновенных величин  $K_i$  от теоретического значения величины  $Y(c1..ck)$ :

$$\frac{\partial(\sqrt{\sum(K_i - Y(x, y))^2})}{\partial c_j} = 0 \quad (12)$$

Высокая точность и быстрое действие при измерениях динамических объектов предложенным методом облачной триангуляции обеспечивается за счет регрессий больших ансамблей экспериментальных данных в каждом измерении. Кроме того, обеспечивается общая устойчивость метода облачной триангуляции к нестационарным искажениям термоградиентной фазово-неоднородной среды.

Не менее актуальный класс научных и практических задач, требующих своего решения – это измерение толщины динамических объектов в фазово-

неоднородных средах. Решение этих проблем связано с еще более высокими требованиями к точности и устойчивости методов и работе их реализаций в тяжелых условиях окружающей среды. На момент начала работы над диссертацией активно развивались методы дифференциальной лазерной точечной триангуляции. Тем не менее, из-за неизбежных искажений оптических трасс в фазово-неоднородных средах существующие методы дифференциальной лазерной триангуляции демонстрировали ограниченную точность. К примеру, экспериментально регистрируемая погрешность лазерного дифференциального точечного триангуляционного измерителя толщины при измерении толщины в термоградиентной фазово-неоднородной среде оказывалась в 40 раз больше, чем при измерении толщины в условиях достаточно малых фазовых неоднородностей (рис.3).

В работе предложен метод измерения толщины на основе синхронной дифференциальной облачной триангуляции. Метод основан на применении

двух облачных триангуляторов, работающих в дифференциальной схеме. Облачные триангуляторы определяют пространственное положение и ориентацию исследуемого объекта и позволяют вычислить его истинную толщину по формуле:

$$h = L - Z_1 - Z_2 - q(\alpha_1, \alpha_2), \quad (13)$$

где  $L$  – расстояние между облачными триангуляторами,  $Z_1$  и  $Z_2$  – расстояния до поверхности исследуемого объекта, измеренные верхним и нижним триангуляторами по пространственному положению наблюдаемой засветки на фотоприемнике,  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы наклона поверхности, измеренные по наблюдаемым искажениям структурированной засветки на одном из облачных триангуляторов,  $q(\alpha_1, \alpha_2)$  – поправочная функция, определенная на этапе комплексной калибровки.

Обеспечивается дистанционное измерение толщин динамических объектов в условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды. За счет возникающей

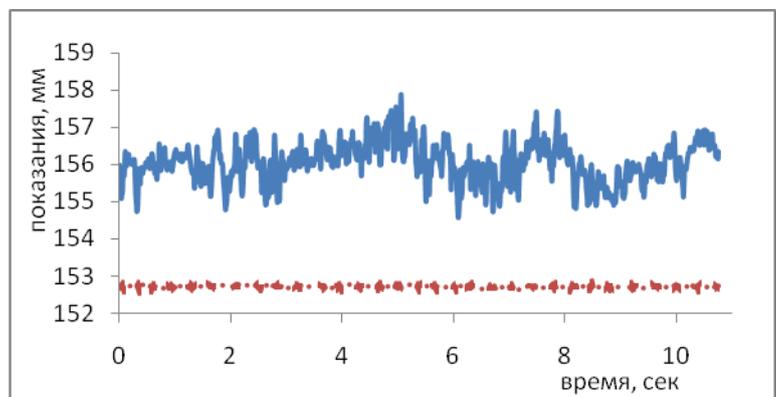


Рис. 3. Измерение расстояния до неподвижной поверхности в условиях фазово-неоднородной (сплошная линия) и однородной (пунктирная линия) среды

избыточности потока данных при измерениях объектов с компланарными границами реализована возможность эффективной верификации получаемых результатов и динамическая оценка погрешности измерений.

*Вторая глава* посвящена методам многопараметрической калибровки триангуляционных измерителей в фазово-неоднородных средах.

Калибровка триангуляционных измерителей для работы в условиях фазово-неоднородных сред крайне важна, и, в значительной степени, определяет достигаемую точность. Для точного измерения геометрических параметров необходимо знать оптические параметры приемника и источника оптического излучения в глобальной системе координат. Задача калибровки при использовании структурированного освещения сводится к нахождению функционала, определяющего взаимно-однозначное соответствие между пространственными координатами точки на поверхности объекта в декартовой системе координат в области измерения  $(X, Y, Z)$  и связанными показаниями измерительной системы

$$(x_c, y_c, p) \leftrightarrow (X, Y, Z), \quad (14)$$

где  $x_c, y_c$  – координаты наблюдаемой структурированной засветки на фотоприемнике,  $p$  – параметр наблюдаемой структурированной засветки, например начальный сдвиг фазы при использовании структурированной засветки в виде полутонных полос с гармоническим изменением интенсивности.

На момент начала работ над диссертацией для калибровок триангуляционных измерительных систем было разработано множество методов, нацеленных на упрощение калибровочных процедур и уменьшение времени их выполнения. Как правило, использовались трехмерные калибровочные объекты и априорная информация об оптических параметрах в приближении геометрической оптики. К сожалению, эти подходы не в полной мере оказались применимыми для калибровки измерителей трехмерной геометрии динамических крупногабаритных объектов, работающих в условиях фазово-неоднородной среды. Это связано со сложностью реализации крупногабаритных эталонных объектов с малым нормированным уровнем погрешности, ростом погрешностей калибровки при масшта-

бирования измерительного объема, а также с неизбежными искажениями оптических параметров, вносимыми фазово-неоднородной средой.

В работе предложен метод калибровки, предусматривающий формирование массива калибровочных данных путем фиксации показаний измерительной системы при измерении эталонной мишени, расположенной в заданных точках измерительного объема, и определении соответствующего калибровочного функционала. Предложенный метод калибровки прост в реализации, в том числе в промышленных условиях, и легко масштабируем. При этом он позволяет компенсировать абберации и нелинейные искажения оптических элементов и предусматривает статистическое накопление калибровочных данных для снижения погрешности измерений.

На момент начала работы над диссертацией, задача поиска функционала, связывающего показания измерительной системы и истинные пространственные координаты точки на измеряемой поверхности решалась на основе применения приближений геометрической оптики с последующим использованием регрессионных функций. Сложность реализации этих методов для задачи калибровки измерителя трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред связана с достаточно жесткими ограничениями. Большинство рассмотренных методов калибровки оптимизированы для решения задачи интерполяции данных, однако при измерениях крупногабаритных объектов часто необходимо осуществлять определение калибровочного функционала на основе экстраполяции.

Для решения обозначенной научной проблемы в диссертационной работе предложен метод определения калибровочного функционала на основе многопараметрического регрессионного алгоритма, использующего искусственную нейронную сеть и полиномиальную регрессию. В результате калибровочный функционал вычисляют исходя из пространственного положения измеряемого объекта. В случае решения задачи интерполяции калибровочных данных применяют регрессионный функционал на основе нейронных сетей:

$$\{X, Y, Z\} = \left\{ \left[ 1 + \exp \left( - \left( \nu_{0r} + \sum_{i=1}^k \nu_{ir} (1 + \exp(-U_i \{X_c, Y_c, P\}))^{-1} \right) \right) \right]^{-1} \right\} \\ (r = 1 \dots k), \quad (15)$$

где  $\nu_{ir}$  - весовой коэффициент связи  $i$ -го выходного узла и  $r$ -го промежуточного узла,  $U_i$  - вектор весовых коэффициентов связей  $i$ -го входного узла с промежуточными,  $\{X_c, Y_c, P\}$  - векторы входных значений,  $\{X, Y, Z\}$  - вектор выходных значений. В случае решения задачи экстраполяции использован регрессионный функционал на основе полиномиальной регрессии:

$$\{X, Y, Z\} = b_{000} + b_{100}X_c + b_{010}Y_c + b_{001}P + b_{110}X_c Y_c + b_{101}X_c P + b_{011}Y_c P + b_{200}X_c^2 + b_{020}Y_c^2 + b_{002}P^2, \quad (16)$$

где  $\{X_c, Y_c, P\}$  - векторы входных значений,  $b_i$  - соответствующий коэффициент регрессионной функции,  $\{X, Y, Z\}$  - вектор выходных значений.

Метод обеспечивает комбинированную настройку параметров регрессионных функций, эффективно работает при экстраполяции и интерполяции калибровочных данных, обеспечивает компенсацию aberrаций и нелинейных искажений оптических элементов. Повышенная точность обусловлена статистическим накоплением большого ансамбля калибровочных данных в реальных условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды.

Выполнена экспериментальная оценка погрешности предложенного метода калибровки. Показано, что метод калибровки обеспечивает относительную погрешность измерений на уровне менее 0,05 % при различных конфигурациях измерительного комплекса, предназначенных для измерения объектов с различными геометрическими размерами (рис. 4).

Задача калибровки измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции сводится к нахождению функционала, связывающего показания триангуляторов и толщину измеряемого объекта. На момент начала работы над диссертацией для калибровки измерителей на основе методов дифференциальной триангуляции выполняли независимую калибровку триангуляционных датчиков, а толщину измеряемого объекта вычисляли исходя из пространственного расположения измерителей. При этом реальная погрешность классических триангуляционных измерителей редко достигается ниже уровня  $10^{-3}$ .

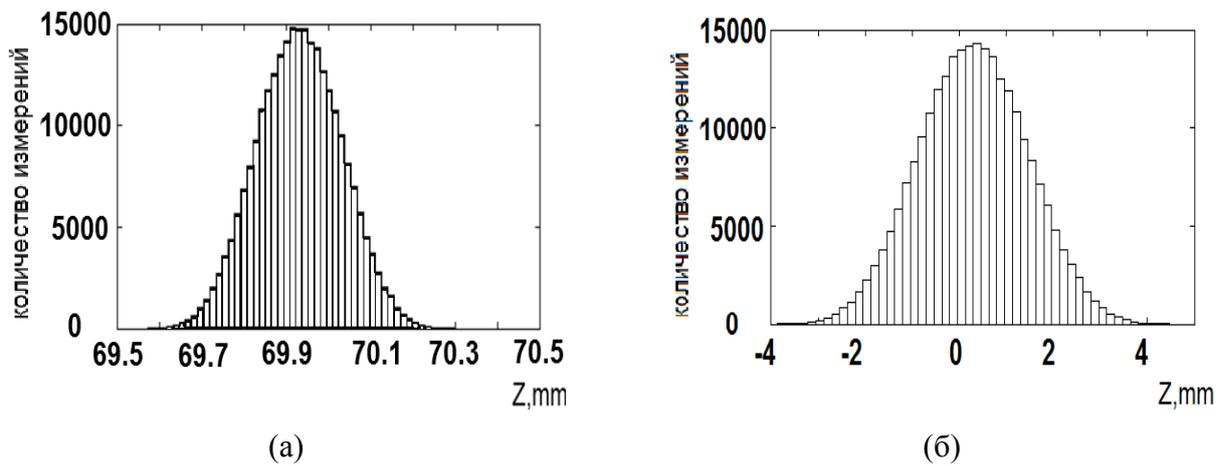


Рис. 4. Измерение плоской поверхности при различных конфигурациях измерительного комплекса: диапазон 200 мм (а), СКО 0,1 мм, погрешность 0,05%; диапазон 2000 мм (б), СКО 1,15 мм, погрешность 0,06%

Реализация метода калибровки измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции осложнена технологическими требованиями. Необходимо обеспечить погрешность измерений на уровне 20 мкм при измерительной базе в фазово-неоднородной среде (удаление измерителя от объекта) 2 м. Погрешность калибровок должна быть существенно меньше общей измерительной погрешности. Таким образом, необходимо обеспечить погрешность калибровок на уровне, не превышающем  $10^{-6}$  -  $10^{-5}$ . Обеспечить позиционирование эталонного объекта с подобной погрешностью в условиях действующего производства крайне проблематично.

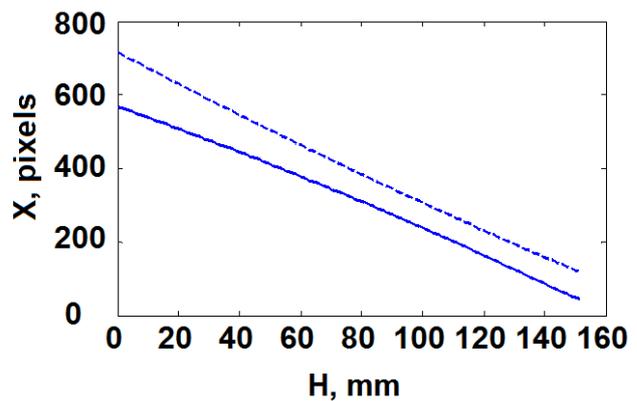


Рис. 5. Калибровочные функции верхнего (сплошная линия) и нижнего (пунктирная линия) триангуляторов

В диссертационной работе предложен устойчивый и реализуемый метод прецизионной калибровки, обеспечивающий погрешность измерения меньше, чем погрешность позиционирования эталонного объекта в реальных условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды. Метод предусматривает разделение на 3 этапа. На первом этапе выполняют независимую калибровку облачных триангуляторов путем перемещения калибровочного объекта и фиксации показаний триангуляторов при различных положениях калибровочного объекта в изме-

рительном объеме. Затем применяют регрессионную процедуру для полученных калибровочных зависимостей (рис.5):

$$Z_1 = F1(X), Z_2 = F2(X). \quad (17)$$

На втором этапе калибровки выполняют формирование массива калибровочных данных, учитывающих пространственный наклон измеряемого объекта путем фиксации показаний триангуляторов при многократных измерениях случайно ориентированного в измерительном объеме калибровочного объекта.

На третьем этапе формируют поправочную функцию в зависимости от пространственного наклона измеряемого листа путем построения многопараметрического интерполяционного функционала на основе результатов статистического анализа по ансамблю измеренных данных (рис.6):

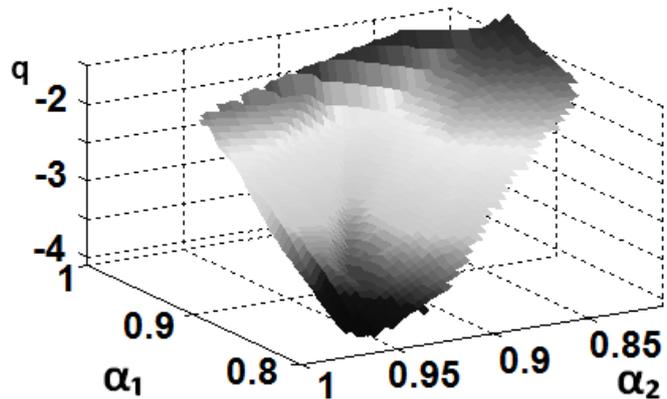


Рис. 6. Функция  $q$ , компенсирующая искажения, обусловленные наклоном измеряемого объекта

$$q(\alpha_1, \alpha_2) = L - Z_1 - Z_2 - H_0, \quad (18)$$

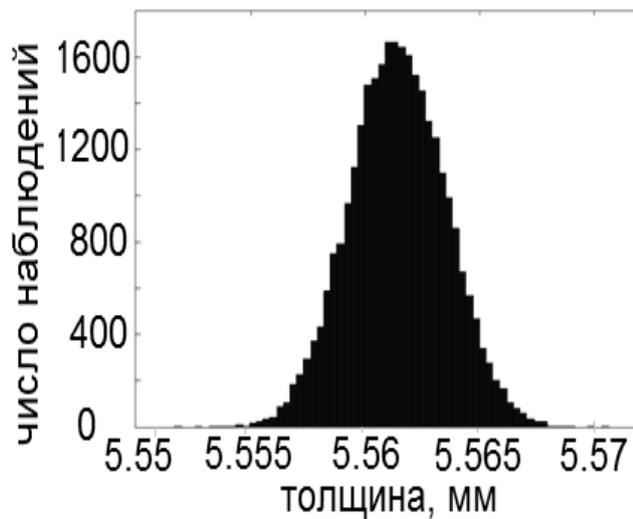
Этими процедурами и статистическим накоплением достигается минимальный вклад процедуры калибровки в полную погрешность измерительного комплекса на уровне, существенно меньшем уровня погрешности позиционирования калибровочного объекта.

Выполнена экспериментальная оценка реализуемого на практике уровня погрешности калибровки измерительного комплекса для измерения толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции. Достигнута рекордно малая погрешность измерений в лабораторных условиях на уровне  $10^{-6}$  (рис. 7), в промышленных условиях на уровне  $10^{-5}$  (рис. 8).

**Третья глава** посвящена практической реализации методов многопараметрической триангуляции для определения геометрии динамических объектов в фазово-неоднородных средах.



(а)



(б)

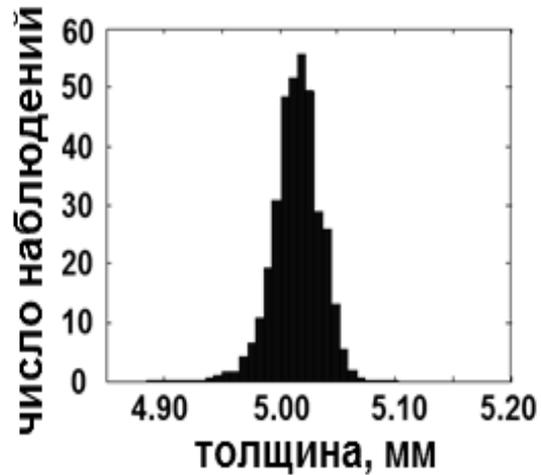
Рис. 7. Измерение толщины калибровочного листа в лабораторных условиях. Внешний вид измерителя (а) и полученное распределение измеренных величин (б). Дистанция между измерительными модулями - 2 м, СКО - 2,1 мкм, погрешность -  $0.95 \cdot 10^{-6}$

К моменту начала работ над диссертацией, методы измерения трехмерной геометрии на основе триангуляционного структурированного освещения были достаточно хорошо развиты. Однако существующие научно-технические решения были адаптированы под специфические классы объектов и плохо работали в условиях произвольно заданных светорассеивающих свойств измеряемых поверхностей. Многие из них использовали приближения геометрической оптики, их было сложно применить для высокоточных измерений крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах. Поэтому было необходимо создать и реализовать триангуляционные методы и технологии измерения геометрии крупногабаритных объектов на основе структурированного освещения в условиях термоградиентных фазово-неоднородных сред, работающие с объектами, имеющими произвольные светорассеивающие свойства поверхности, и эффективные в реальных промышленных условиях.

На основе предложенных методов создан измерительный комплекс, в основе которого лежит триангуляционный принцип структурированного освещения. Устойчивость и эффективность предложенных методов позволили выполнить их реализацию на обычной серийной оптико-электронной элементной базе. Более того, как показано в работе, реализация предложенных методов на основе бытовых камер и проекторов позволила получить метрологические характеристики



(а)



(б)

Рис. 8. Измерение толщины калибровочного листа в промышленных условиях (влияние фазово-неоднородной среды). Внешний вид измерителя (а) и полученное распределение измеренных величин (б). Дистанция между измерительными модулями - 2 м, СКО - 22 мкм, погрешность -  $1.1 \cdot 10^{-5}$

комплексов, соизмеримые с характеристиками крайне дорогостоящих специализированных приборов - лазерных тахеометров и т.д., что имеет важное значение в контексте импортозамещения. Разработанный метод калибровки обеспечил компенсацию aberrаций, нелинейных искажений и возможность адаптации для измерения трехмерной геометрии в широком диапазоне размеров. Методы расширения структурированных изображений обеспечили эффективную работу при измерениях трехмерной геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами в условиях фазово-неоднородных сред.

Неотъемлемой и важнейшей частью оптико-электронных измерительных комплексов является программное обеспечение, обеспечивающее реализацию алгоритмов и методов и устойчивое функционирование измерителя.

Разработанное программное обеспечение позволило выпол-

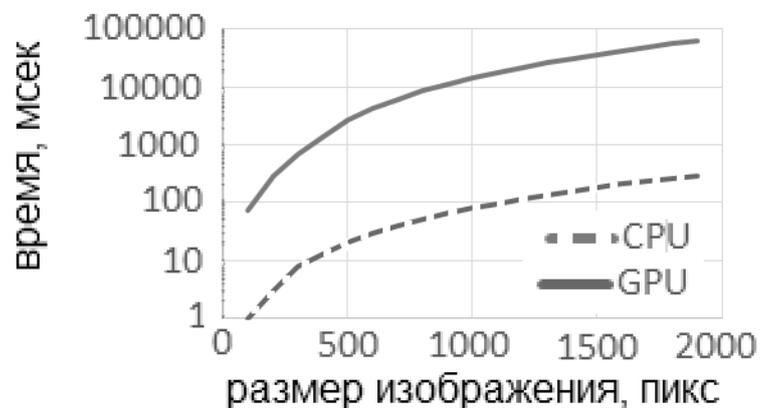


Рис. 9. Сравнение времени обработки данных на CPU и GPU в зависимости от линейного размера изображений

нить практическую реализацию предложенных методов многопараметрической

триангуляции для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов, имеющих произвольные светорассеивающие свойства поверхности в условиях фазово-неоднородной среды.

Созданное программное обеспечение реализует новый устойчивый метод расшифровки структурированных изображений с компенсацией нелинейности тракта источник-приемник оптического излучения и алгоритм адаптации частоты пространственной модуляции и обеспечивает все необходимые функциональные характеристики.

Важнейшим параметром программного обеспечения измерительных систем является время обработки данных. На момент начала работ над диссертацией для повышения вычислительной мощности активно применялись методы параллельных вычислений, в том числе с использованием вычислительных мощностей современных графических процессоров. Существующие решения для обработки структурированных изображений методами параллельного программирования реализуют алгоритм обработки, использующий три изображения. Такие алгоритмы неустойчиво работают в условиях значительных вариаций светорассеивающих свойств поверхностей объектов.

Для снижения времени обработки структурированных изображений в диссертационной работе предложен и программно реализован алгоритм устойчивого метода расшифровки фазовых изображений, выполняющийся на графических процессорах с использованием технологии CUDA. Достигнуто снижение времени обработки изображений на GPU более чем в 100 раз по сравнению со временем обработки на CPU (рис. 9).

На момент начала работ над диссертацией существовал ряд успешно функционирующих измерителей толщины динамических объектов на основе дифференциальной лазерной триангуляции. Для достижения малой абсолютной погрешности измерений существующие триангуляционные измерители настраивались для работы на минимально возможных базах и выполняли измерения в узком диапазоне пространственных координат измеряемого объекта. Использование малых баз и коротких оптических трасс обеспечивали измерения в условиях пренебрежимо малых фазовых неоднородностей среды.

Существует ряд актуальных научно-технических проблем, связанных с измерением толщины горячего проката. Тяжелейшие условия горячих металлургических цехов исключают размещение измерительных модулей ближе, чем на расстоянии 1 м от измеряемой поверхности. Известные триангуляционные методы измерения толщины динамических объектов оказываются непригодными для работы в подобных условиях.

В рамках диссертационной работы на основе предложенных научных идей и методов впервые созданы лазерные металлургические технологические измерительные комплексы для измерения толщины листового горячего проката непосредственно на прокатных станах. Механика подобного измерительного комплекса выполнена в виде охватывающей рольганг П-образной изотермической стабилизированной конструкции с размещенными на ней дифференциальными облачными триангуляторами (рис.10).

Принцип измерения основан на предложенных методах синхронной дифференциальной облачной триангуляции в условиях контролируемой фазово-неоднородной среды. Технические решения измерительного комплекса во многом связаны с экстремальными условиями его работы: температура измеряемого проката до 1200 °С, скорость проката до 30 м/с, пространственные флуктуации проката в зоне измерения – до 200 мм, угловые флуктуации – до 25 градусов, температура окружающего воздуха изменяется в течение дня от -20 до +45 °С, а требуемая абсолютная погрешность динамических измерений составляет менее 20 микрон при измерениях на расстоянии 2 м. Кроме того, в области измерения постоянно обильно присутствуют водяной и масляный аэрозоли

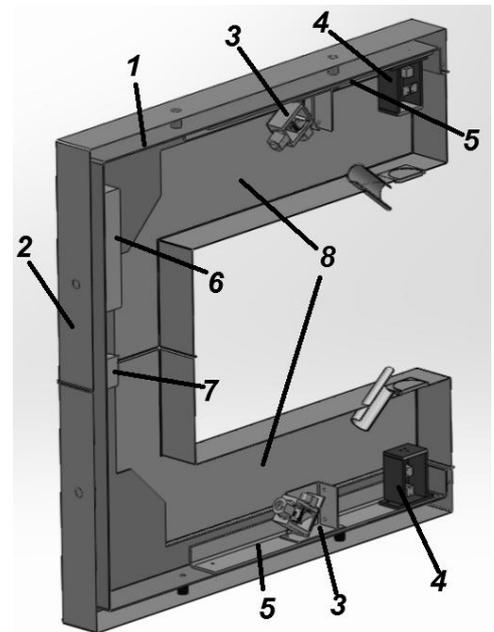


Рис. 10. Структура оптоэлектронного модуля измерительного комплекса для измерения толщины листового горячего проката. Показаны: 1 – силовая рама, 2, 8 – защитный корпус, 3 – фотоприемник, 4 – излучатель, 5 – основание облачного триангулятора, 6 – блок питания, 7 – блок комутации

и грязь, увлекаемые конвективными тепловыми аэродинамическими потоками, и присоединенные к горячей поверхности движущегося проката и срывающиеся с нее термоградиентные вихри.

Для устойчивой работы в подобных условиях лазерные измерительные комплексы оснащены многоуровневой подсистемой термостабилизации на основе жидкостного термостата, обеспечивающей функционирование измерительного комплекса при температурах от  $-20$  до  $+300$  °С. Разработана и успешно применена подсистема сверхзвуковой аэродинамической брызгозащиты на основе щелевой аэродинамической оптически прозрачной завесы, обеспечивающая надежную защиту критичных оптических поверхностей измерительного комплекса в процессе работы на прокатном стане (рис.11).

В рамках диссертационной работы разработано оригинальное программное обеспечение измерительного комплекса, реализующее предложенные методы, в том числе метод синхронной дифференциальной облачной триангуляции, и обеспечивающее необходимую функциональность. Программа управляет синхронизацией источников и



Рис. 11. Настройка подсистемы сверхзвуковой аэродинамической брызгозащиты лазерного комплекса для измерения толщины листового горячего проката

приемников оптического излучения облачных триангуляторов, выполняет многопараметрический регрессионный анализ принимаемых данных, вычисляет и верифицирует толщину измеряемого проката в реальном времени, визуализирует результаты измерения пользователям в реальном времени, а также обеспечивает сбор диагностической информации о состоянии измерительного комплекса и сохраняет результаты измерений в базу данных.

Организовано зонирование и управление структурой фазово-неоднородной среды в областях распространения оптических сигналов измерительного комплекса на основе принудительного нагнетания доминантного термоградиентного

аэродинамического потока с заданной перемежаемостью (рис.12). Обеспечено формирование фазово-неоднородной среды, имеющей достаточно большие градиенты показателя преломления, находящиеся в случайном интенсивном движении и обеспечивающих реализацию условий эргодичности оптических сигналов. В результате вносимые фазово-неоднородной средой искажения оптических сигналов вблизи поверхности проката имеют случайный характер и нулевое математическое ожидание, что делает использование метода облачной триангуляции особенно эффективным. Работоспособность предложенных научных идей и методов экспериментально подтверждена в ходе лабораторных и промышленных испытаний реализованного измерительного комплекса, а также его длительной промышленной эксплуатации.

Термостабилизация механики, оптики и электроники измерительного комплекса обеспечены пассивными и активными методами. Реализован малый теплообмен между измерительными модулями и окружающей средой.

Тем не менее, в условиях горячего металлургического цеха в процессе работы температура поверхностей оптических элементов измерительного комплекса изменяется на несколько градусов (рис.13). Для уменьшения зависимости показаний измерительных модулей от температуры реализована активная компенсация. В результате достигнута погрешность измерений толщины менее 7 мкм при измерении толщины статично позиционированного эталонного листа.

**Четвертая глава** посвящена промышленным испытаниям методов многопараметрической триангуляции геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах.

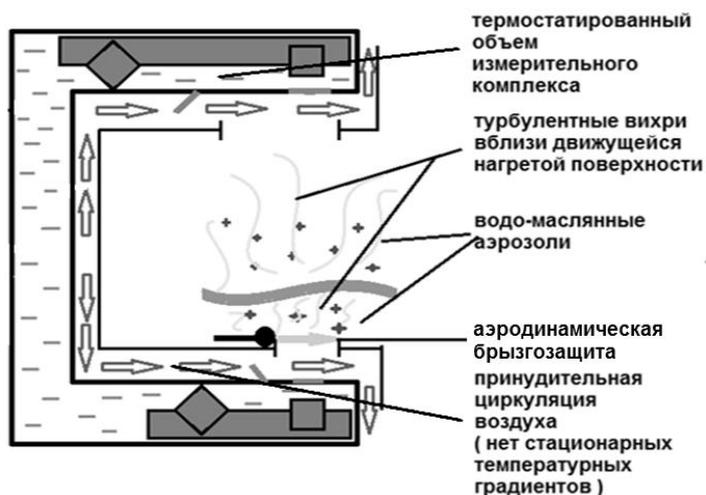


Рис. 12. Зонирование структуры фазово-неоднородной среды в областях распространения оптических сигналов измерительного комплекса

Проблема высокоточных измерений трехмерной геометрии лопастей гидротурбин в процессе их производства является актуальной, поскольку обеспечивает снижение производственных издержек, позволяет увеличить КПД энергоустановки в условиях борьбы за каждую десятую долю процента и повысить безопасность гидроэнергоагрегатов. На момент начала работы над диссертацией задачу измерения трехмерной геометрии лопастей гидротурбин решали в основном контактными методами. Кроме того, активно развивались бесконтактные трехмерные лазерные сканирующие системы на основе фазовой модуляции оптического источника. Применение этих измерителей в промышленных условиях достаточно ограничено. Связано это с необходимостью обеспечения лабораторных условий процедуры измерения в отсутствии фазово-неоднородной среды, малых вибраций и перепадов температур, а также с необходимостью предварительного покрытия поверхности измеряемого объекта матовым покрытием, что вносит фундаментальные ограничения на достижимую абсолютную погрешность измерений.

Решение обозначенной проблемы в диссертационной работе связано с применением предложенного триангуляционного измерителя трехмерной геометрии на основе структурированного освещения. Выполнены промышленные испытания, в ходе которых была измерена трехмерная геометрия лопастей и рабочего колеса лопастно-поворотной турбины Святогорской ГЭС в цехе ОАО «Силовые машины - ЛМЗ». Линейные размеры лопастей - 3х3х2 м. Поверхность лопастей характеризуется сложной интенсивно бликующей светорассеивающей структурой, обусловленной остаточными следами резцов металлообрабатывающего центра.

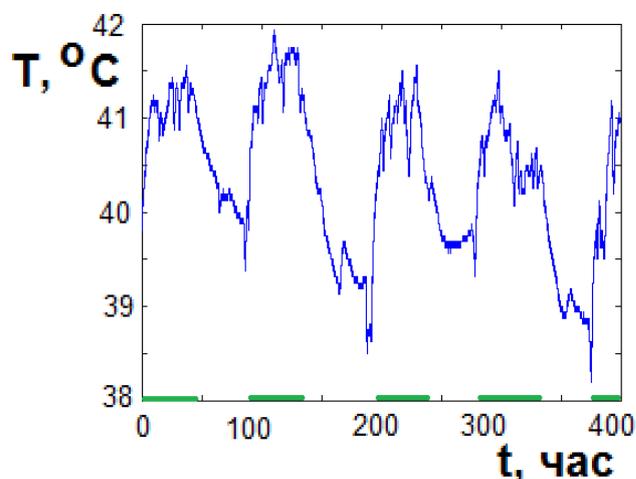
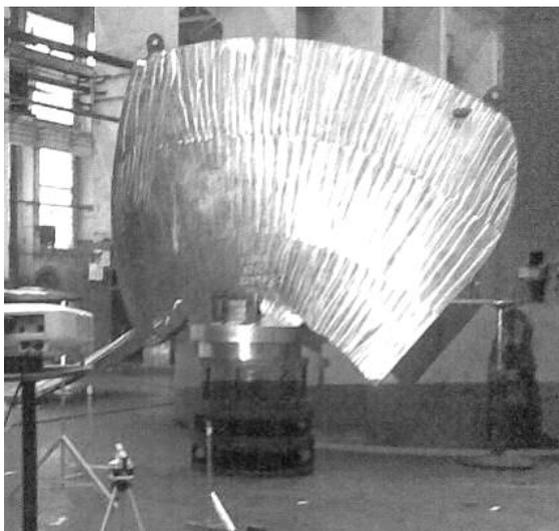
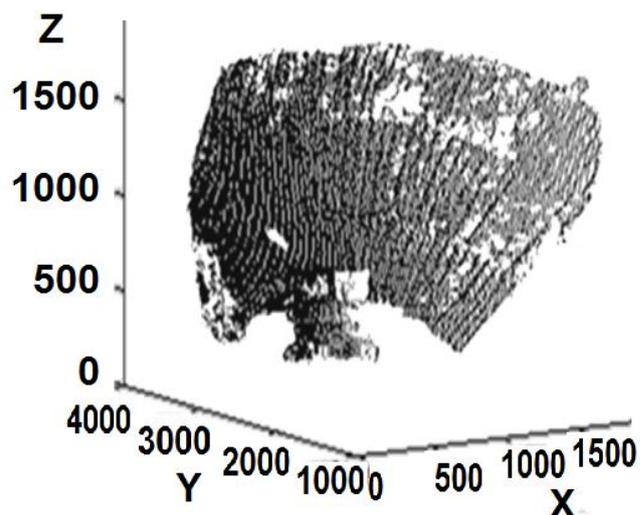


Рис. 13. Динамика температуры верхнего измерительного модуля на прокатном стане в цехе горячего проката в течение 16 суток



а)



б)

Рис. 14. Лопасть гидротурбины с характерными размерами 3000x3000x2000 мм (а) и 3D профиль ее поверхности, измеренный триангуляционным измерителем трехмерной геометрии на основе структурированного освещения (б)

Измерения успешно выполнены в условиях промышленного внешнего освещения, вносящего существенные дополнительные искажения в проецируемую структурированную засветку. Конфигурация измерительного комплекса была выбрана исходя из внутренних параметров используемых оптических модулей и технологических условий. Расстояние между источником и приемником излучения около 3 метров, расстояние до объекта – 6 метров.

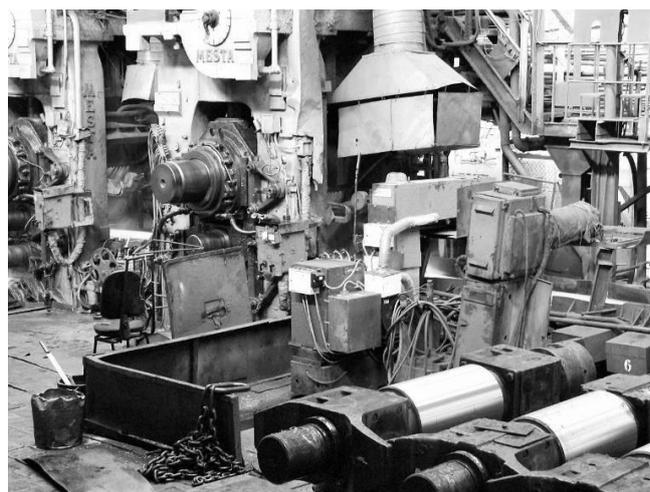


Рис. 15. Промышленные испытания измерителя толщины горячего проката ЛАД-0р3, реализующего метод синхронной дифференциальной облачной триангуляции

Измерены трехмерные геометрии лопастей гидротурбины в цехе ОАО Силовые машины ЛМЗ с линейными размерами 3x3x2 м с погрешностью менее 1,5 мм. В условиях действующего производства экспериментально подтверждена перспективность предложенного триангуляционного метода структурированного освещения, простота его реализации и высокие точностные характеристики. Показано, что для реализации предложенного метода могут быть использованы са-

мые доступные и даже бытовые оптико-электронные приборы. Исключена необходимость дополнительной обработки и окраски светорассеивающей поверхности. Прецизионные измерения в фазово-неоднородной среде выполнены при температурных градиентах воздуха около 20 °С.

Задача высокоточного измерения толщины горячего проката становится все более актуальной в связи с повышающимися требованиями к качеству проката и в связи с возможностью существенного снижения производственных издержек. На момент начала работ над диссертацией, для измерения толщины горячего проката преимущественно применялись рентгеновские толщиномеры. Эксплуатация рентгеновских измерителей связана с высокой погрешностью измерений, обусловленной отсутствием учета

пространственного наклона измеряемого листа, и необходимостью корректировки показаний в зависимости от химического состава стали. Кроме того, рентгеновское излучение крайне отрицательно влияет на здоровье персонала. Решение проблемы радиационно-безопасных измерений толщины

горячего проката связано с созданием и реализацией методов, не использующих ионизирующих излучений, обеспечивающих инвариантность результатов измерений к химическому составу металла, учитывающих пространственный наклон измеряемого объекта и обеспечивающих требуемый уровень точности измерений.

Всем этим требованиям удовлетворяют впервые созданные в рамках диссертационной работы радиационно-безопасные измерители толщины горячего проката ЛАД-0р3, работа которых основана на методе синхронной дифференциальной облачной триангуляции. Проведен полный цикл промышленных испытаний измерительного комплекса (рис. 15), в процессе которых измеритель работал на прокатном стане в цехе горячего проката в течение 6 месяцев (рис. 16). Перио-

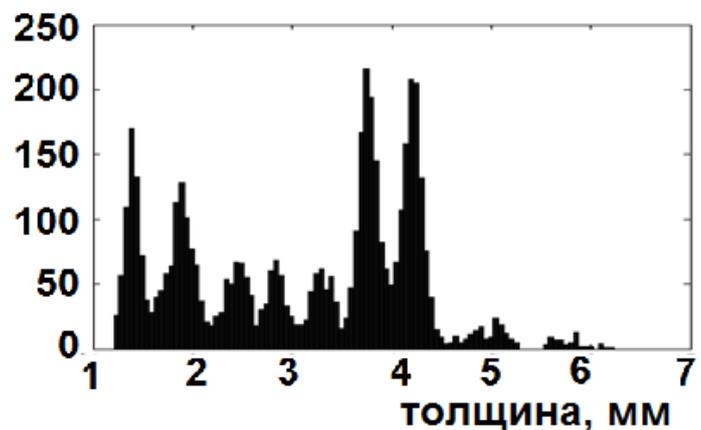


Рис. 16. Распределение измеренных толщин стального листа за период 01.02.2013-28.02.2013

дически выполнялись контрольные замеры для сравнения показаний измерительного комплекса с результатами измерения толщины контактным микрометром на остывшем листе в ходе последующей обработки листа (рис.17).

В ходе проведенных промышленных испытаний установлено, что измерительный комплекс обеспечил измерение толщины горячего проката с погрешностью менее 20 мкм на дистанции 2 м, что соответствует относительной погрешности измерений менее  $10^{-5}$  в условиях го-

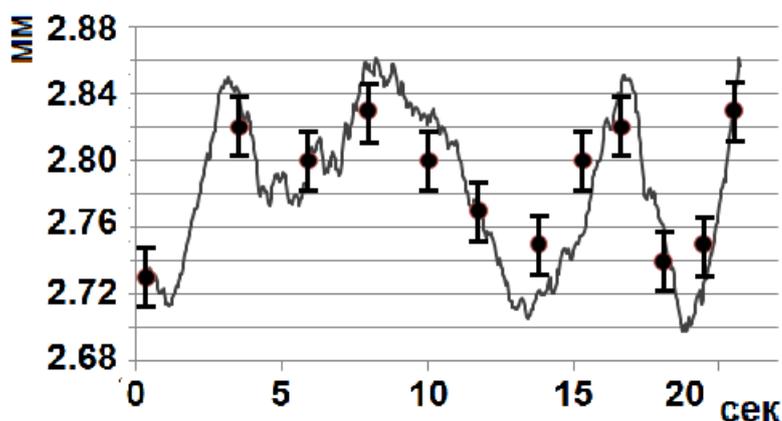


Рис. 17. Измеренная толщина проката (сплошная линия) и контрольные замеры толщины в различных точках (круглые маркеры)

рячего металлургического цеха при измерении толщины горячего проката в термоблагодатной фазово-неоднородной среде. По результатам проведенных промышленных испытаний измерительный комплекс, признанный лауреатом конкурса Лазерной ассоциации РФ, был принят в промышленную эксплуатацию ОАО «НМЗ Кузьмина» в мае 2013 года и непрерывно и успешно работает вплоть до настоящего времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Предложены и реализованы новые комплексные методы многопараметрической триангуляции на основе модуляции оптического источника и многомерного регрессионного анализа пространственного и временного ансамблей экспериментальных данных, обеспечившие измерение геометрических параметров статических и динамических объектов в фазово-неоднородных средах с рекордно малой погрешностью.
- Разработаны и реализованы комплексные методы калибровки сверхточных оптико-электронных триангуляционных измерителей геометрических параметров, основанные на многопараметрическом регрессионном анализе калибровочных данных, устойчивые к искажениям фазово-неоднородной среды, работоспособные как в лабораториях, так и в реальных производственных условиях.

- Разработаны программно-аппаратные интерфейсы и программное обеспечение оптико-лазерных промышленных диагностических систем, реализующие методы многопараметрической триангуляции, обеспечивающие формирование баз данных с технологической и учетной информацией о контролируемых геометрических параметрах.
- На основе проведенных исследований впервые создан ряд аппаратно-программных информационных диагностических систем и комплексов, реализующих методы многопараметрической триангуляции, адаптированных к характеристикам фазово-неоднородных сред, оптимально приспособленных к реальным условиям отечественного производства, успешно прошедших промышленные испытания и внедренных на металлургических и машиностроительных предприятиях России.

В диссертации поставлена, обоснована и решена крупная научно-техническая проблема разработки и реализации триангуляционных методов измерений геометрических параметров статичных и динамичных объектов в термодифференциальных фазово-неоднородных средах, а также создания аппаратно-программных комплексных измерительных систем, ориентированных на применение в научных экспериментах и в промышленных технологиях, обладающих расширенными функциональными возможностями и высокими точностными характеристиками. Внедрение новых научно обоснованных технических решений, изложенных в диссертации, способно внести значительный вклад в развитие отечественного приборостроения, машиностроения, гидротурбостроения и металлургии, существенно повысив эффективность и безопасность технологических процессов.

### *Список основных работ по теме диссертации*

1. Двойнишников С.В. Устойчивый метод расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Компьютерная оптика, Т. 31, №2, апрель-июнь 2007.- С. 21-25.
2. Dvoynishnikov S. Development methods of steam turbines 3D geometry optical control for effective heat power equipment quality improvement // European Physical Journal. -Vol. 76, 2014. – Pp. 1003-4.

3. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Павлов В.А., Рахманов В.В. Способ облачной триангуляции толщины горячего проката // Патент РФ № 2574864, приоритет 15.09.2014, зарегистрировано 15.01.2016.
4. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности трехмерных крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника №1, 2016. – С.13-17.
5. Двойнишников С.В. Устройство для создания двойных изображений // Патент РФ № 100955, приоритет 20.08.2010, зарегистрировано 10.01.2011.
6. Dvoynishnikov S., Meledin V., Pavlov V. Integrated Assessment Method of Impulse Response in Optical System of 3D Scanner with Phase Triangulation // 2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering, May 17-18, 2015, Beijing, China (CSEE2015) ISBN: 978-1-60595-240-6. - P. 527-531.
7. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника №5, 2015. – С.24-27.
8. Dvoynishnikov S., Rakhmanov V. Power installations geometrical parameters optical control method steady against thermal indignations // European Physical Journal.- Vol. 82, 2015. Pp. 01035-3.
9. Рахманов В.В., Кабардин И.К., Двойнишников С.В. Синхронная визуализация волнового пленочного течения на вращающемся диске // Международный научно-исследовательский журнал №11 (42), Часть 2. Декабрь 2015. – С.89-91.
10. Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий // Патент РФ № 2537522, приоритет 01.07.2013, зарегистрировано 10.01.2015.
11. Naumov I.V., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Tsoy M.A. Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections // Physics of Fluids. 2015, Vol. 27 (12). - P.124103.
12. Чубов А.С., Меледин В.Г., Кунин И.С., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Павлов В.А., Рахманов В.В. Неинвазивный способ лазерной нанодиагностики онкологических заболеваний // Патент РФ № 2542427, приоритет 12.03.2013, зарегистрировано 20.02.2015.
13. Dvoynishnikov S., Meledin V., Bakakin G., Kulikov D. Laser Cloudy Triangulation Method for Geometrical Measurements Under the Optical Refraction Conditions // 2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering, May 17-18, 2015, Beijing, China (CSEE2015) ISBN: 978-1-60595-240-6. - P.532-538.
14. Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К. Экспериментальная оценка применимости лазерных триангуляторов для измерений толщины горячего проката // Метрология №12, 2014. - С. 9 - 21.

15. Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Кротов С.В., Меледин В.Г., Садбаков О.Ю., Чубов А.С. Модуль синхронизации лазерного измерителя толщины горячего проката // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей Семнадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» 22-23 мая 2014, Санкт-Петербург, Россия / Научные редакторы А.П.Кудинов, М.А. Кудинов. – Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – С. 236-238.
16. Кабардин И.К., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Наумов И.В., Елисеев И.А., Рахманов В.В. Оптический способ измерения мгновенного поля толщины прозрачной пленки // Патент РФ № 2506537, приоритет 30.01.2012, зарегистрировано 10.02.2014.
17. Двойнишников С.В., Главный В.Г., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Разработка методов калибровки лазерного измерителя толщины горячего проката // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы третьей Международной научно-практической конференции (25 апреля 2014 г.) / отв. Ред. А.А. Веселовский. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 13-14.
18. Двойнишников С.В. Триангуляционные измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в фазово-неоднородной среде // Научные исследования и разработки в эпоху глобализации: сборник статей Международной научно-практической конференции ( 5.02.2016, г.Киров ). / Ч. 2 – Уфа: Аэтерна, 2016. - С. 30-31.
19. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В. Устройство для триангуляционного измерения толщины листовых изделий // Патент РФ № 139156, приоритет 27.11.2013, зарегистрировано 12.03.2014.
20. Meledin V., Chubov A., Kunin I., Dvoinishnikov S., Anikin Y., Bakakin G., Glavny V., Pavlov V., Rakhmanov V. Non-invasive method for laser nanodiagnostics of oncological diseases // PCT Patent /RU2014/000145. Classification (international): B82Y35/00; G01N21/49. - Priority numbers: RU20130111136 20130312. - Citing documents: WO2014142710 (A1). - 2014-09-18.
21. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Павлов В.А., Прибатурин Н.А. Прецизионная диагностика трехмерной геометрии лопастей турбин для гидроэнергетики // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8795](http://www.science-education.ru/108-8795).
22. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Меледин В.Г. Лазерная облачная триангуляция для прецизионного измерения расстояний до плоской поверхности // Информационные технологии XXI века: материалы международной научной конференции, Хабаровск, 20-24 мая 2013 г. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. Гос. ун-та, 2013. – С. 46-51.
23. Главный В.Г., Пененко А.В., Двойнишников С.В. О статистической оценке ошибки оператора СЛАУ в задаче калибровки лазерного измерителя толщины

горячего проката // Сибирские электронные математические известия – 2013 г.- часть I - С.16-27.

24. Бакакин Г.В., Аникин Ю.А., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Кротов С.В., Павлов В.А., Садбаков О.Ю., Чубов А.С. Спектральный оптико-лазерный квадратурный преобразователь сигналов лазерного доплеровского анемометра // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8794](http://www.science-education.ru/108-8794).
25. Двойнишников С.В. Влияние фазовых неоднородностей среды на погрешность лазерных триангуляционных методов // Фундаментальные и прикладные проблемы физики / под общ. ред. В. К. Свешникова ; Мордов. гос. пед. ин-т. – Саранск, 2013.– С. 37-41.
26. Меледин В.Г., Кротов С.В., Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Наумов И.В., Павлов В.А., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Лазерная доплеровская анемометрия горячего проката // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8812](http://www.science-education.ru/108-8812).
27. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В. Триангуляционный способ измерения отклонения объекта и определения его ориентации в пространстве // Заявка на патент РФ №2013121064/28, приоритет от 07.05.2013.
28. Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Рахманов В.В. Исследование структуры вихревого течения в топочной камере нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 31-35.
29. Куликов Д.В., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кротов С.В., Павлов В.А., Чубов А.С., Прибатурин Н.А. Метод лазерной диагностики динамической формы вращающихся объектов // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8793](http://www.science-education.ru/108-8793).
30. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения геометрии трехмерных объектов. Патент РФ № 2439489, приоритет 15.09.2010, зарегистрировано 10.01.2012.
31. Куликов Д.В., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Меледин В.Г., Наумов И.В., Кротов С.В., Главный В.Г., Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Павлов В.А., Шпольвинд К.В., Кабардин И.К., Чубов А.С. Лазерное устройство для измерения воздушного зазора электрической машины // Патент РФ №2469264, приоритет 08.07.2011, зарегистрировано 10.12.2012.
32. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Шпольвинд К.В. Метод компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции // Измерительная техника, 2012. - №2. - С. 12-16.
33. Кабардин И.К., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Елисеев И.А., Двойнишников С.В. Оптический метод измерения мгновенного поля толщины пленки жидко-

сти на основе полного внутреннего отражения // Теплофизика и аэромеханика, 2012. - Том 19. - С. 89-95.

34. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов // Патент РФ №2433372, приоритет 10.09.2009, зарегистрировано 10.11.11.
35. Двойнишников С.В., Кротов С.В., Павлов В.А. Оценка точности метода фазовой триангуляции при измерениях 3D геометрии крупногабаритных объектов // Высокие технологии, образование, промышленность. Т.3: сборник статей Одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 27-29 апреля 2011 года, Санкт-Петербург, Россия / под ред. А.П. Кудинова. СПб.: Изд-во Политехн. Университета, 2011. - С. 72-73.
36. Kabardin I., Meledin V., Dvoinishnikov S. The investigation of hydraulic jump disruption in liquid film flow on a surface of a rotating disk // 6-th international topical team workshop on Two-phase systems for ground and space application, books of abstracts.- Italy.- 2011.- P.98.
37. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Куликов Д.В. Самообучающийся алгоритм калибровки оптико-электронной системы измерения 3D геометрии на основе нейронных сетей // Высокие технологии, исследования, промышленность. Т. 1: сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. 22-23.04.2010, Санкт-Петербург, Россия / под ред. А.П. Кудинова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.– С. 140-141.
38. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Лазерная технология определения геометрии ротора под нагрузкой // Электрические станции, 2010. - №7. - С. 39-43.
39. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология № 4, 2010. – С. 15-27.
40. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Главный В.Г., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов // Патент РФ № 2334195, приоритет от 29.05.2006, зарегистрировано 20.09.2008.