

### **ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ В ФАЗОВО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ**

Глава посвящена решению научно-технических проблем, связанных с практической реализацией методов многопараметрической триангуляции для измерения геометрических параметров в условиях фазово-неоднородных сред.

Представлены результаты разработки и реализации программного комплекса для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред на основе многопараметрической триангуляции с использованием структурированного освещения. Разработано программное обеспечение, отличающееся высокой производительностью за счет использования вычислительных мощностей графических процессоров и позволяющее выполнять регрессионный анализ экспериментальных данных, обеспечивающий требуемый уровень точности измерений.

Решение научно-технических проблем, связанных с практической реализацией оптико-электронного измерительного комплекса основанного на методах многопараметрической синхронной дифференциальной облачной триангуляции для измерения толщины листового горячего проката непосредственно на прокатном стане, входит в круг вопросов, рассмотренных в третьей главе. Представлены решения проблем, связанных с особенностями реализации аппаратного и программного обеспечения измерительного комплекса, обеспечившие малую погрешность измерений в условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды, характерной для горячей металлургии.

#### **3.1. Практическая реализация измерителя трехмерной геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхности**

Задача измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов бесконтактными методами крайне актуальна для большого числа практических приложений в области строительства, тяжелого машиностроения, металлургии и других отраслей промышленности. Как правило, существующие на рынке технические решения адаптированы под узкий класс задач и достаточно плохо работают при произвольных светорассеивающих свойствах поверхности объекта [Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.] . Более того, многие из технических решений крайне чувствительны к фазовым неоднородностям присутствующим в атмосфере, что отрицательно влияет на метрологические характеристики измерителей в условиях, отличных от лабораторных. В результате, область применения таких измерительных систем ограничена.

В рамках диссертационной работы выполнена практическая реализация измерительного комплекса на основе многопараметрической триангуляции с применением пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Применение разработанных методов в составе измерительного комплекса позволило создать экспериментальный образец на доступной и недорогой элементной базе, позволяющий выполнять прецизионные измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхности объекта в условиях термоградиентной фазово-неоднородной среды промышленного цеха.

### **3.1.1. Программное обеспечение оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения**

В разделе представлены решения научных и технических проблем, связанных с созданием прототипа оптоэлектронной системы для измерения

3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения и вопросы, связанные с особенностями реализации программного обеспечения системы.

Работа прототипа оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов основана на пространственно-временной модуляции оптического излучения и описанных в предыдущих разделах методах измерения трехмерной геометрии объектов (рис. 3.1). В созданной системе в качестве источника оптического излучения и пространственного модулятора интенсивности освещения использован цифровой проектор NEC VT570, позволяющий управлять пространственной модуляцией интенсивности излучения с разрешением 1024x768 точек с помощью компьютера. В качестве приемника оптического излучения применена цифровая CCD камера КС-383С, позволяющая получать изображение размером 640x480 пикселей. В качестве цифрового электронного блока и блока регистрации результатов использован стандартный компьютер. Цифровой проектор подключен к компьютеру 1, управляющему пространственным распределением интенсивности оптического излучения, проецируемым на контролируемый объект. Цифровая камера подключена к компьютеру 2. Компьютер 1 и компьютер 2 связаны между собой. Компьютер 2 выполняет функции диспетчера и синхронизатора всех компонентов системы в процессе сбора изображений контролируемого объекта, а также производит все вычисления для получения 3-х мерной геометрической модели объекта.

Основное требование к камере, использованной в измерительном комплексе, выражается в возможности отключения аппаратных автоматов, осуществляющих автоматический баланс яркости, экспозиции, а так же в наличии интерфейса подключения камеры к компьютеру. Основное требование к LCD проектору – возможность подключения к компьютеру.

Цель создания измерительного комплекса на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения -

экспериментальная проверка работоспособности предложенных научных идей и методов измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов, а также реализация и оптимизация соответствующего программного обеспечения.



Рис.3.1. Схема прототипа оптоэлектронной координатно-измерительной системы.

Программное обеспечение измерительного комплекса должно реализовывать интерфейс взаимодействия с приемником пространственно модулированного оптического излучения, обеспечивать управление и формировать нужную модуляцию источника оптического излучения, обеспечивать накопление данных приемника оптического излучения, обрабатывать данные, сохранять и визуализировать результаты обработки.

Внутренняя архитектура программного обеспечения измерительного комплекса (рис. 3.2) предусматривает разделение на следующие компоненты [Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Диспетчер, выполняющий накопление изображений структурированной подсветки, полученной с помощью CCD камеры. Модуль управления камеры, который реализует интерфейс взаимодействия с камерой, с помощью библиотеки DirectShow. Модуль управления проектором,

обеспечивающий управление пространственным распределением интенсивности оптического излучения. Модуль удаленного управления проектором, реализующий интерфейс взаимодействия с модулем управления проектором на базе Ethernet соединения.

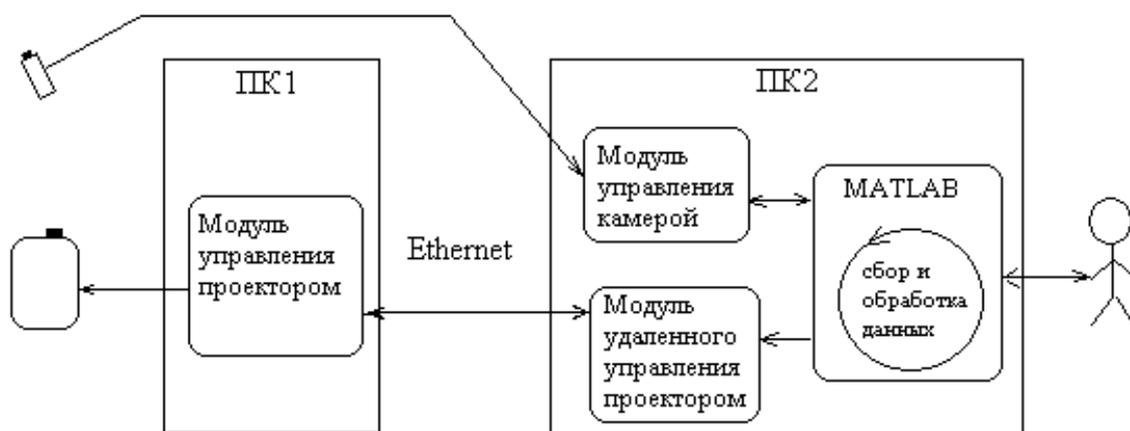


Рис. 3.2. Внутренняя архитектура программного обеспечения измерительного комплекса.

Диспетчер реализован в виде исполняющего скрипта в программной системе MATLAB. Модуль управления камерой реализован в виде COM сервера, реализующего интерфейс IDispatch, обеспечивающий взаимодействие системы MATLAB и COM сервера. Модуль удаленного управления проектором также реализован в виде COM сервера. Модуль управления проектором реализован в виде стандартного приложения Windows.

Основная функция модуля управления проектором – формирование структурированной засветки с заданным распределением интенсивности. Управление реализовано с помощью протокола взаимодействия, реализованного на основе протокола TCP/IP. Протокол предусматривает получение команд от управляющего приложения и отправку подтверждения после обновления распределения интенсивности, излучаемого проектором.

Модуль управления проектором реализован в виде windows-приложения со специальными настройками, обеспечивающими расположение графического окна этого приложения поверх остальных приложений, запущенных на компьютере.

Реализована машина состояний, предусматривающая 10 состояний:

- STAT\_WAIT\_CMD – запрос идентификатора команды;
- STAT\_WAIT\_BWFRINGE\_PERIOD – запрос периода проецируемой синусоиды;
- STAT\_WAIT\_BWFRINGE\_DELTA – запрос смещения начальной фазы проецируемой синусоиды;
- STAT\_WAIT\_BWFRINGE\_ZEROLEVEL – запрос интенсивности освещения, соответствующей нулевому уровню синуса;
- STAT\_WAIT\_BWFRINGE\_AMPLITUDE – запрос амплитуды проецируемой синусоиды;
- STAT\_WAIT\_FILLRECT\_X0 – запрос левой X (горизонтальной) координаты прямоугольника, внутри которого будет равномерное распределение интенсивности;
- STAT\_WAIT\_FILLRECT\_Y0 – запрос верхней Y (вертикальной) координаты прямоугольника, внутри которого будет равномерное распределение интенсивности;
- STAT\_WAIT\_FILLRECT\_X1 – запрос правой X (горизонтальной) координаты прямоугольника, внутри которого будет равномерное распределение интенсивности;
- STAT\_WAIT\_FILLRECT\_Y1 – запрос нижней Y (вертикальной) координаты прямоугольника, внутри которого будет равномерное распределение интенсивности;
- STAT\_WAIT\_FILLRECT\_BRIGHT – запрос значения интенсивности, которое будет сформировано внутри прямоугольной области.

Созданная машина состояний обрабатывает 2 команды: равномерное распределение интенсивности внутри прямоугольника, ограниченного

координатами проектора и распределение интенсивности в виде параллельных полутоновых синусоидальных полос.

На рис. 3.3 представлена диаграмма состояний описанной машины состояний, демонстрирующая последовательность состояний.

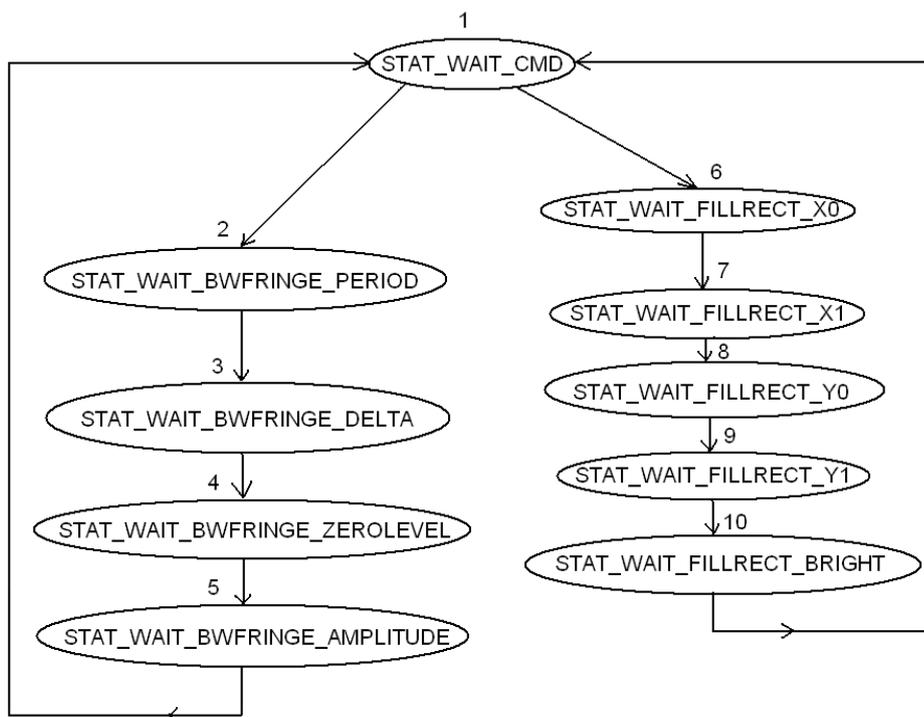


Рис. 3.3. Диаграмма состояний модуля управления проектором.

Из данной диаграммы видно, что состояние 1 выполняет функцию ветвления и определения типа присланной команды. Состояния 2-5 определяют параметры изображения в виде параллельных синусоидальных полутоновых полос. Состояния 6-10 определяют параметры изображения в виде равномерно засвеченного прямоугольника.

Диаграмма классов приложения показана на рис.3.4.

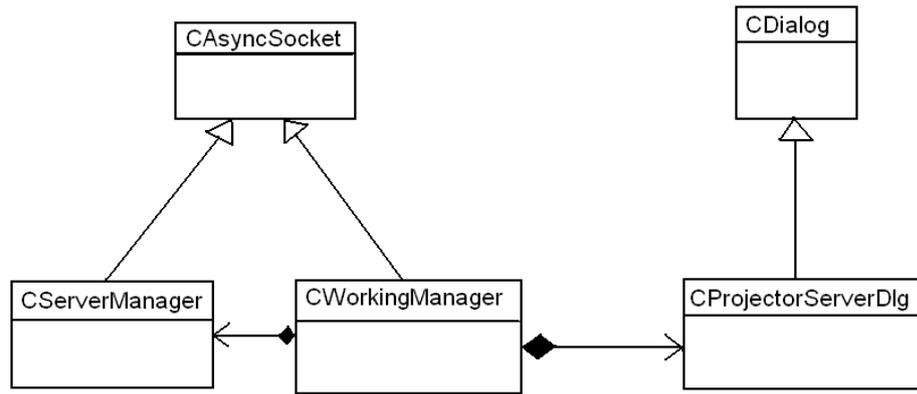


Рис.3.4. Диаграмма классов модуля управления проектором.

Класс CServerManager и CWorkingManager являются наследниками класса CAsyncSocket. Класс CAsyncSocket реализует функциональность протокола TCP/IP. Класс CServerManager реализует интерфейс сервера соединения TCP/IP. После установки соединения с клиентом (приложение, осуществляющее удаленное управление проектором) экземпляр класса CWorkingManager осуществляет непосредственный обмен данными с управляющим клиент-приложением и реализует машину состояний. Класс CDialog реализует графического окна и обеспечивает взаимодействие с очередью сообщений Windows. Класс CProjectorServerDlg обеспечивает формирование структурированной засветки.



Рис. 3.5. Диаграмма последовательностей модуля управления проектором.

Диаграмма последовательности показана на рис. 3.5. На ней показаны 3 операции, выполняемые приложением: установка соединения с управляющим приложением, формирование синусоидальной засветки и формирование равномерной засветки.

Модуль удаленного управления проектором выполняет функцию передачи команд от управляющего модуля сбора и обработки данных модулю управления проектором. Приложение выполнено в виде COM сервера для взаимодействия с системой MATLAB.

Реализованный COM сервер предоставляет COM объект, реализующий интерфейс IProjectorManager (рис. 3.6), наследованный от интерфейса IDispatch, что позволяет интегрировать данный интерфейс в скриптовые системы, такие как MATLAB, за счет технологии OLE Automation.

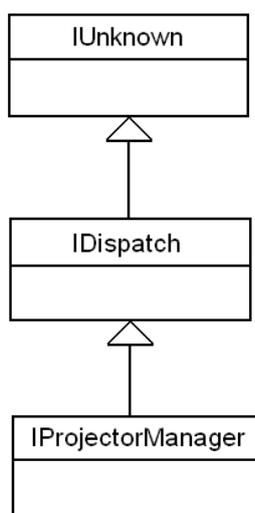


Рис. 3.6. Интерфейс модуля удаленного управления проектором на базе технологии OLE Automation.

Интерфейс IProjectorManager имеет следующие методы:

- Init(BSTR ProjAddr);
- Deinit();
- FillRect(int x0, int y0, int x1, int y1, int bright);

- ShowBWFrige(double Period, double Delta, int ZeroLevel, double Amplitude);

Метод Init() осуществляет TCP/IP соединение с модулем управления проектором. Метод Deinit() закрывает это соединение. Метод FillRect() осуществляет равномерное распределение интенсивности излучения bright внутри прямоугольника с координатами (x0,y0),(x1,y1). Метод ShowBWFrige() формирует засветку в виде синусоидальных вертикальных полутонных полос с периодом Period, начальным смещением фазы Delta, нулевым уровнем ZeroLevel и амплитудой Amplitude.

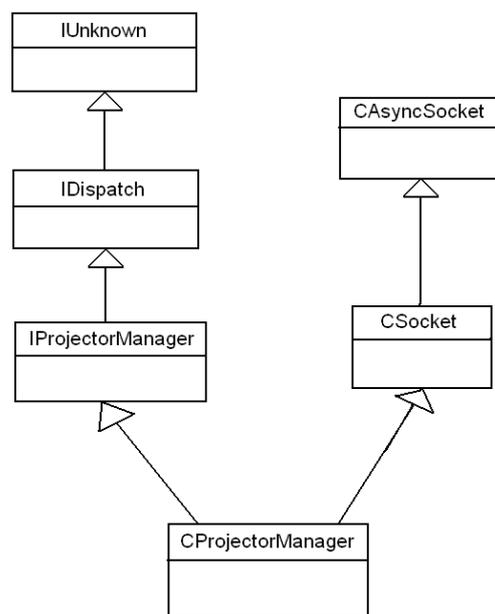


Рис.3.7. Диаграмма классов модуля удаленного управления проектором.

Класс CProjectorManager, реализующий данную функциональность наследован от интерфейса IProjectorManager и от класса CSocket (рис. 3.7). Класс CSocket реализует функционал для синхронной передачи данных по TCP протоколу и обеспечивает взаимодействие с модулем управления проектором.

Модуль управления камерой обеспечивает передачу растровых изображений с камеры модулю сбора и обработки данных. Приложение выполнено в виде COM сервера для взаимодействия с системой MATLAB.

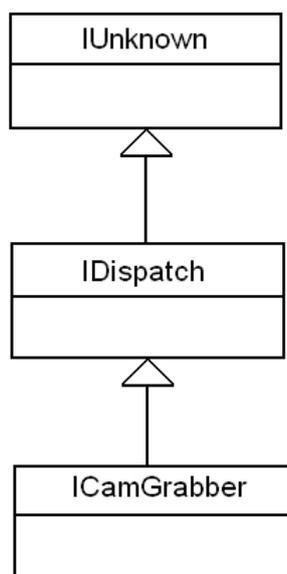


Рис. 3.8. Интерфейс модуля управления камерой на базе технологии OLE Automation.

Аналогично модулю удаленного управления проектором, модуль управления камерой реализован в виде COM сервера (рис. 3.8). Для взаимодействия со скриптовой системой MATLAB также применена технология OLE Automation. Предоставляемый сервером COM объект реализует интерфейс ICamGrabber, наследованный от интерфейса IDispatch.

Интерфейс ICamGrabber реализует следующие методы:

- InitId(ULONG id, ULONG X, ULONG Y);
- GetData([out,retval] VARIANT\* data).

Функция InitId() инициализирует интерфейс взаимодействия с камерой. Размер изображений, получаемых от камеры, определяется параметрами X,Y. Устройство, реализующее интерфейс камеры идентифицируется параметром id.

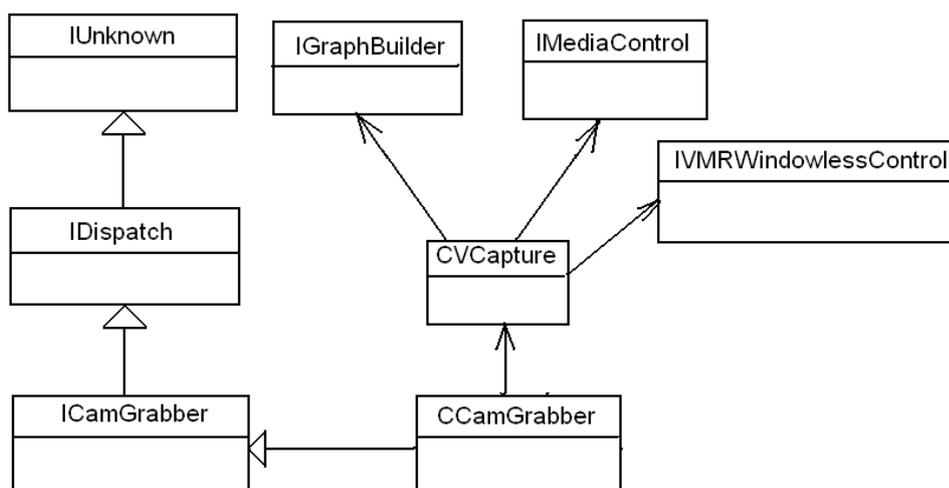


Рис. 3.9. Диаграмма классов модуля управления камерой.

Для реализации взаимодействия модуля управления камерой и цифровой камеры использован интерфейс, реализованный в библиотеке DirectShow. Создан класс CVCapture (рис. 3.9), принимающий растровые изображения. Класс CVCapture использует интерфейсы DirectShow: IGraphBuilder, IMediaControl, IVMRWindowlessControl и др.

Модуль сбора и обработки данных управляет структурированной засветкой проектора с помощью модуля удаленного управления камерой, принимает изображения структурированной засветки с помощью модуля управления камерой, определяет сдвиг фазы синусоиды на принятых изображениях с помощью устойчивого метода определения фазового сдвига и определяет координаты точек контролируемого объекта в декартовой системе координат в лабораторной системе отсчета. Кроме того, модуль обеспечивает функции для визуализации и редактирования измеренных результатов. Использование скриптовой системы MATLAB в качестве платформы для реализации модуля сбора данных позволяет эффективно применять встроенные возможности для редактирования и визуализации результатов измерения.

Алгоритм процесса измерения можно разбить на следующие этапы (рис.3.10):

- формирование структурированной засветки на поверхности контролируемого объекта и получение изображений этой засветки;
- компенсация нелинейности приемно-передаточного тракта;
- определение фазового сдвига зондирующей синусоиды для каждой точки на изображении контролируемого объекта;
- определение декартовых координат каждой точки изображения контролируемого объекта.

Формирование структурированной засветки на поверхности контролируемого объекта и получение изображений этой засветки выполняется в 2 этапа. Сначала отправляется команда модулю удаленного управления проектором. Затем принимается изображение контролируемого объекта. Этап формирования структурированной засветки на поверхности контролируемого объекта и получения изображений этой засветки можно разбить на 2 шага.

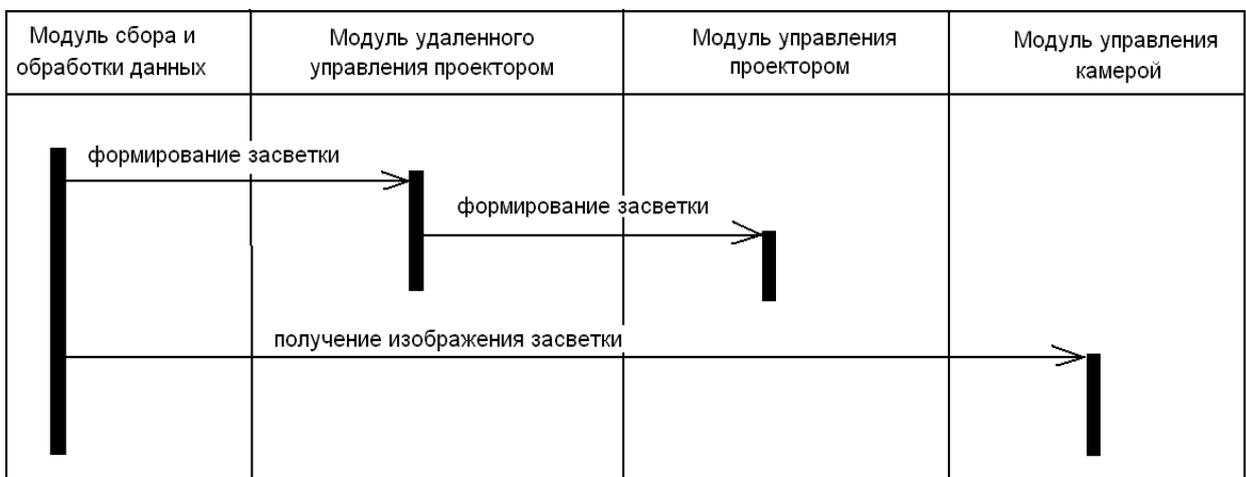


Рис. 3.10. Диаграмма последовательностей взаимодействия всех модулей программного обеспечения измерительной системы.

На первом шаге формируется набор изображений структурированной засветки в виде равномерного распределения яркости с линейно меняющейся интенсивностью освещения. Полученные изображения используются для компенсации нелинейности приемно-передаточного тракта.

На втором шаге формируется набор изображений структурированной засветки в виде параллельных синусоидальных полутоновых вертикальных полос с одинаковым периодом, но с различным сдвигом начальной фазы. Полученные изображения используются для определения фазового изображения – изображения, на котором для каждого пикселя будет определен начальный сдвиг фазы зондирующей синусоиды. Фазовая картина в последующем этапе обработке позволит определить декартовы координаты точек на изображении объекта.

Алгоритм вычисления поля фазы из фазовой картины представлен на рис. 3.11. Алгоритм основан на двойном вложенном цикле, внутри которого выполняют пороговую фильтрацию исходных данных и вычисление фазы. Вычисление фазы выполняют, используя формулы 1.31-1.36.

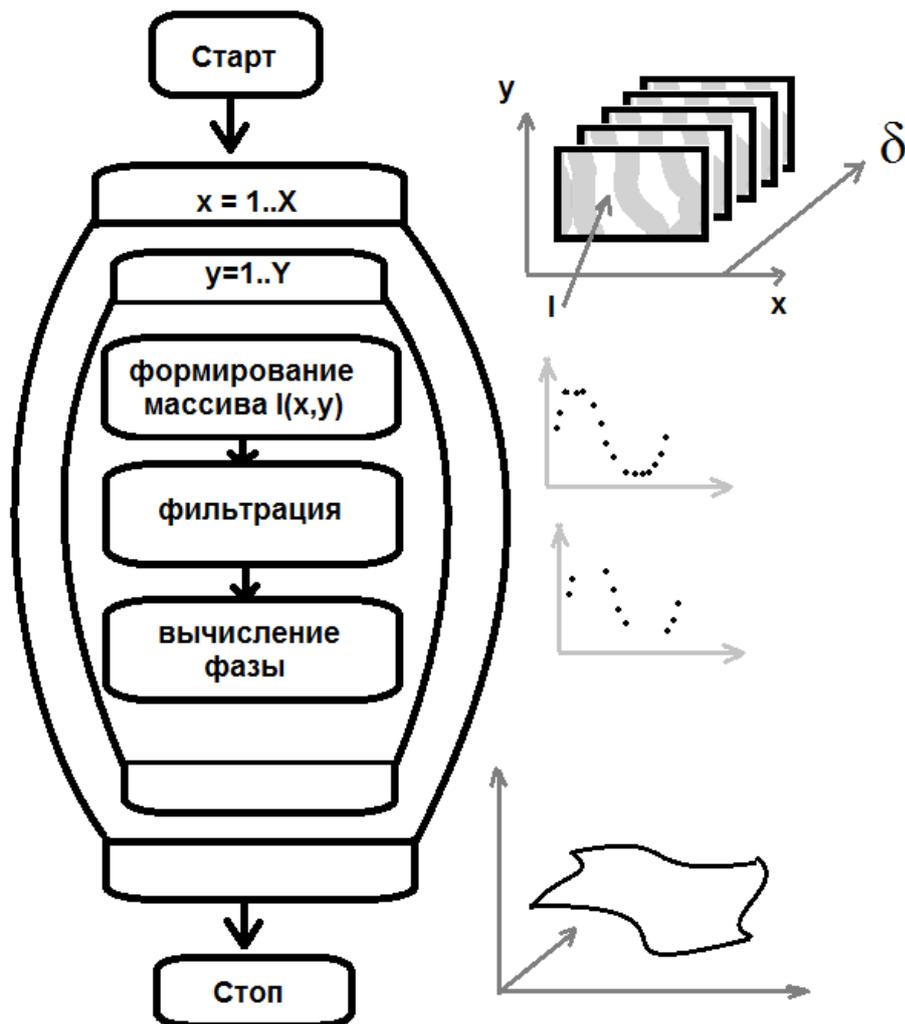


Рис. 3.11. Алгоритм вычисления поля фазы из фазовой картины.

На последнем этапе обработки для каждой точки на изображениях контролируемого объекта, используя данные калибровки, координаты пикселя на изображении и значение фазового сдвига, определяются декартовы координаты точки.

В результате получают набор точек в лабораторной системе координат, образующих измеренную поверхность контролируемого объекта.

Таким образом, разработано и реализовано программное обеспечение оптоэлектронной системы измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения, обеспечившее требуемую функциональность, точную работу алгоритмов и комплекс необходимых интерфейсов.

### **3.1.2. Обработка структурированных изображений с использованием параллельного программирования**

Для эффективной реализации параллельной обработки фазовых изображений можно применять классические многопроцессорные системы и многомашинные вычислительные комплексы. Однако построение подобных вычислительных систем требует немалых финансовых затрат. Другой путь решения состоит в использовании других, более доступных многопроцессорных систем. Это видеокарты различных производителей, например фирм Nvidia и AMD.

В настоящее время активно развиваются технологии повышения скорости обработки данных с помощью параллельных вычислений на основе графических процессоров, используемые во многих областях науки и техники [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В частности, активно развивают методы обработки изображений для повышения производительности вычислительных методов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Известны работы, посвященные обработке фазовых изображений и интерферограмм на графических процессорах, которые могут быть

применены для обработки изображений трехмерных сцен в методах фазовой триангуляции [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Упомянутые исследования и разработки ориентированы на решение ограниченного класса задач и не могут эффективно работать в методах фазовых шагов в условиях ограниченного по энергии динамического диапазона приемника оптического излучения, большого количества изображений и неравномерных светорассеивающих свойств поверхности объекта. Тем не менее, встречаются работы, посвященные обработке фазовых изображений метода фазовых шагов для восстановления трехмерной геометрии с использованием графических вычислительных процессоров [Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Однако в указанных работах использован подход с применением 3 фазовых изображений для определения фазы, что сильно ограничивает достижимый уровень точности измерений и область применения данных методов.

В диссертационной работе разработан и реализован высокопроизводительный алгоритм расшифровки фазовых изображений с произвольным пошаговым сдвигом. Метод основан на технологии CUDA и устойчивом методе расшифровке фазовых изображений. Основные этапы выполнения программы, использующей CUDA (рис.3.12):

- 1) выделение памяти на GPU;
- 2) копирование данных из памяти CPU в выделенную память GPU;
- 3) выполнение параллельных вычислений на GPU;
- 4) копирование результатов вычислений в память CPU;
- 5) освобождение выделенной памяти GPU.

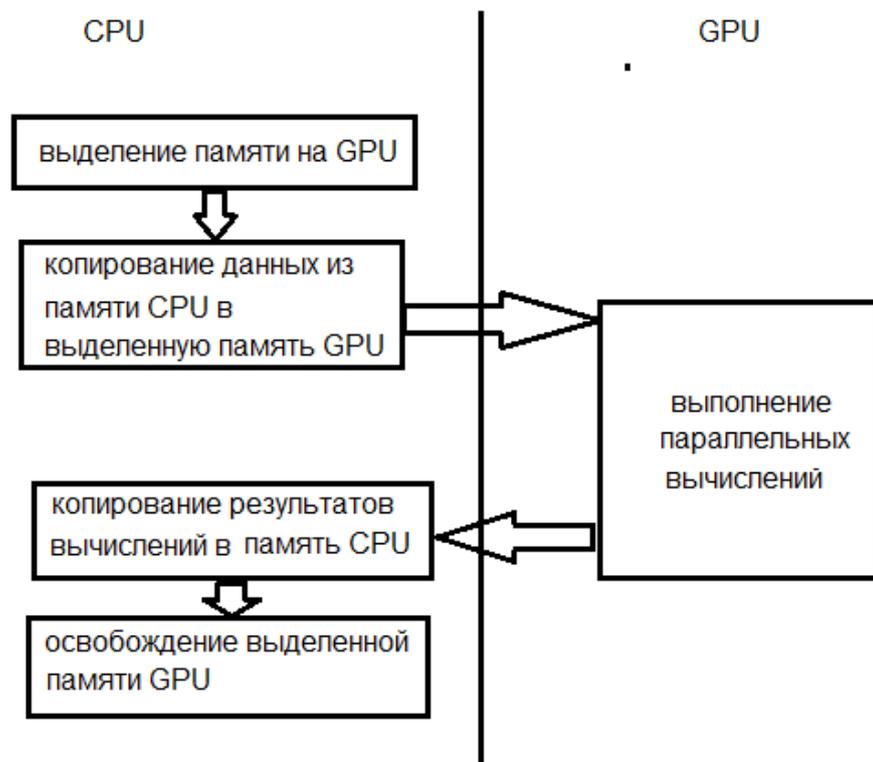


Рис.3.12. Выполнение программы, использующей CUDA.

Для эффективного использования параллельных вычислений необходимо минимизировать либо совсем исключить одновременный доступ разных нитей к одним и тем же данным, поскольку коллизии доступа между потоками дадут очень сильный отрицательный эффект по отношению к производительности.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рис. 3.13.

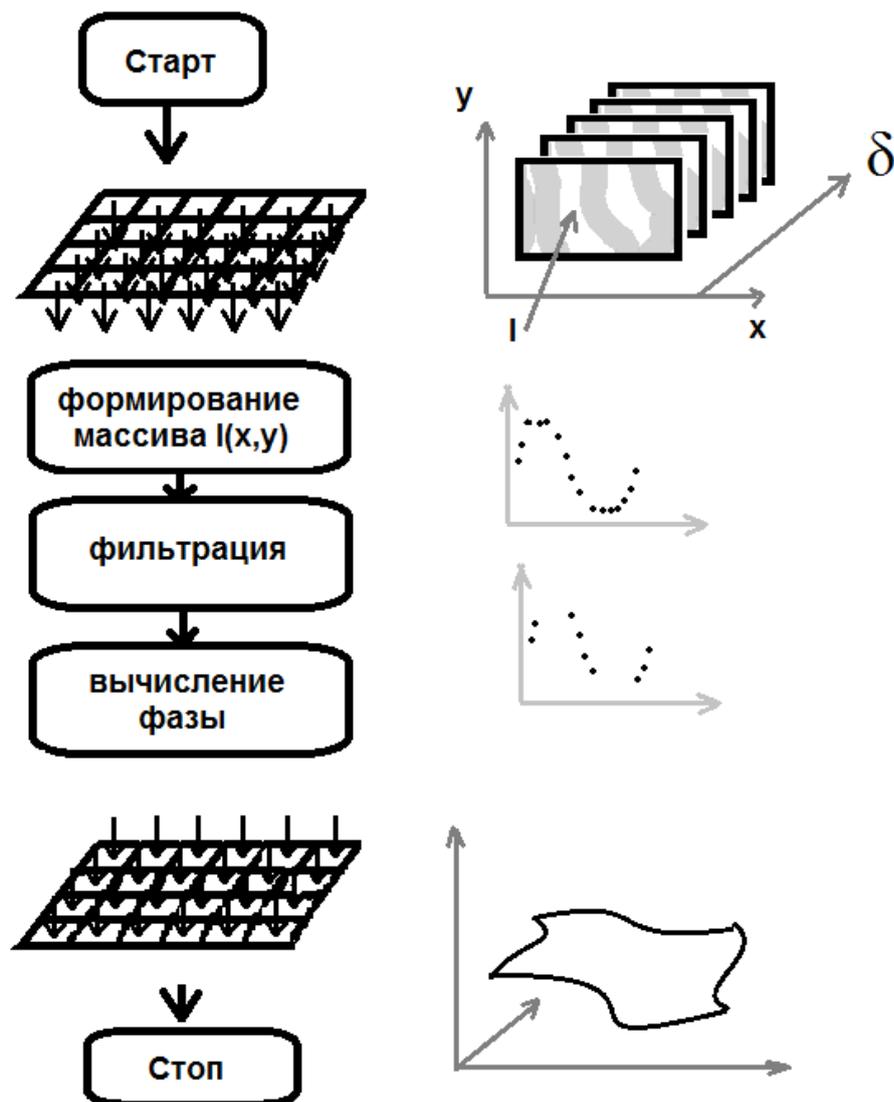


Рис.3.13. Блок-схема алгоритма вычисления поля фазы по фазовым картинам, адаптированным для вычислений на GPU.

В результате применение принципов параллельных вычислений с использованием технологии CUDA позволили снизить время вычислений фазовой картины в 8 раз по сравнению с вычислениями на центральном процессоре.

Применение принципов параллельных вычислений с использованием технологии CUDA, предложенное в диссертационной работе, позволило снизить время вычислений фазовой картины в 8 раз по сравнению с вычислениями на центральном процессоре.

Выполнена оценка производительности алгоритма на основе устойчивого метода обработки фазовых изображений и произвольным пошаговым сдвигом, реализованного на центральном процессоре и реализованного с применением параллельных вычислений на основе технологии CUDA.

Для анализа работы алгоритма был применен компьютер с центральным процессором Intel Core i7-4790K 4 GHz, оперативной памятью 16 GB, графическим процессором NVIDIA GeForce GTX 970.

Проведены эксперименты для оценки времени выполнения алгоритма на GPU в зависимости от параметров запуска GPU вычислений. На рис. 3.14 представлена длительность обработки данных в зависимости от количества блоков. Различные кривые соответствуют различному количеству использованных потоков: 32, 64, 128, 256, 512, 1024.

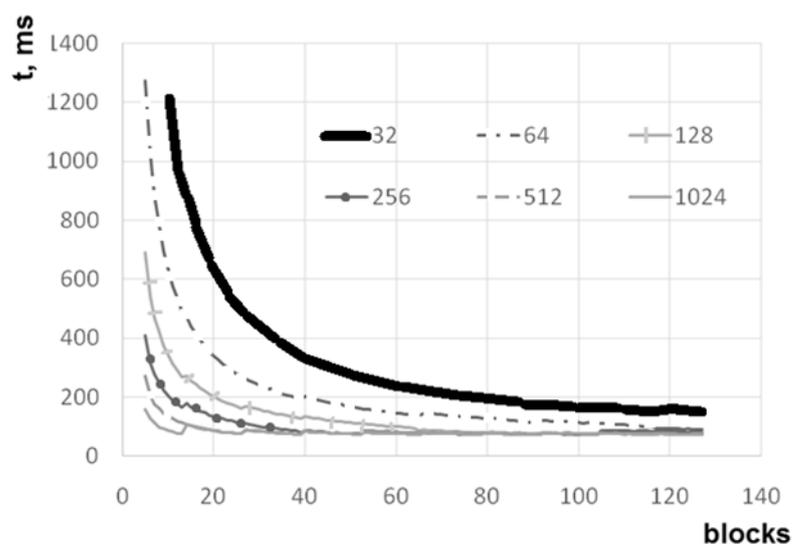


Рис. 3.14. Зависимость времени выполнения алгоритма на GPU в зависимости от количества используемых блоков. Различные кривые показывают различное количество используемых потоков в каждом блоке (32,64,128,256,512,1024).

График показывает, что для снижения времени обработки необходимо увеличивать количество используемых блоков и потоков.

На рис. 3.15 представлена зависимость времени выполнения алгоритма на GPU в зависимости от количества используемых блоков для большего

количества блоков. Здесь представлена конфигурация с количеством потоков, равным 1024 в каждом блоке.

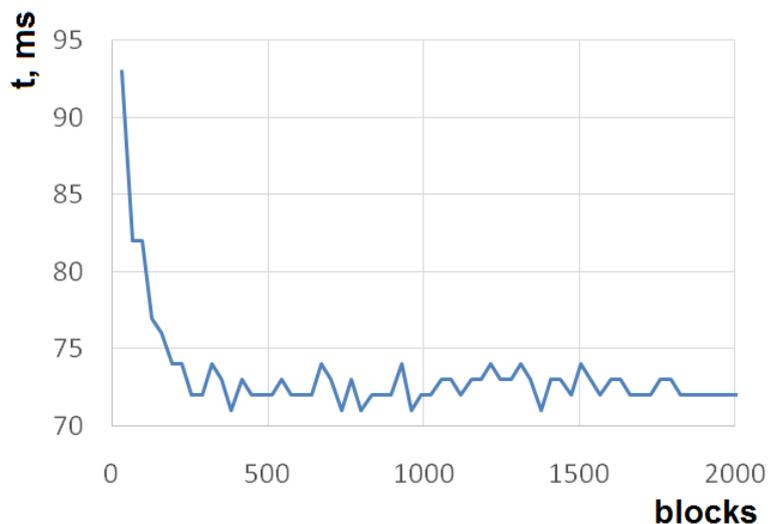


Рис. 3.15. Зависимость времени выполнения алгоритма на GPU в зависимости от количества используемых блоков.

Данный график демонстрирует, что при выборе количества блоков больше 512 время обработки данных не меняется.

На рис. 3.16 представлен график зависимости времени обработки данных в зависимости от количества используемых потоков. Различные кривые показывают данную зависимость при различном количестве использованных блоков: 32, 64, 128, 256, 512, 1024.

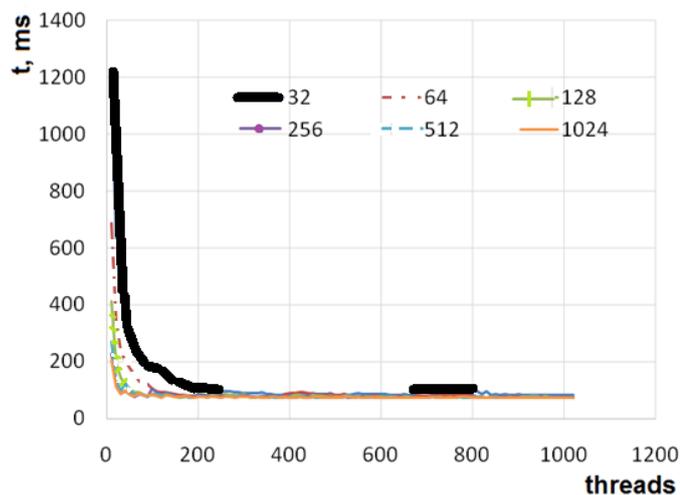


Рис. 3.16. Зависимость времени выполнения алгоритма на GPU в зависимости от количества используемых потоков в каждом блоке. Различные кривые показывают различное количество используемых блоков (32,64,128,256,512,1024).

В результате выполненных исследований показано, что эффективным является применение количества потоков более 400.

На рис. 3.17 представлена зависимость времени обработки данных на CPU и GPU в зависимости от линейного размера изображения. Используются изображения квадратного размера. Количество анализируемых изображений  $N=200$ . Обработка на CUDA выполнялась с использованием 512 блоков и 1024 потоков в каждом блоке.

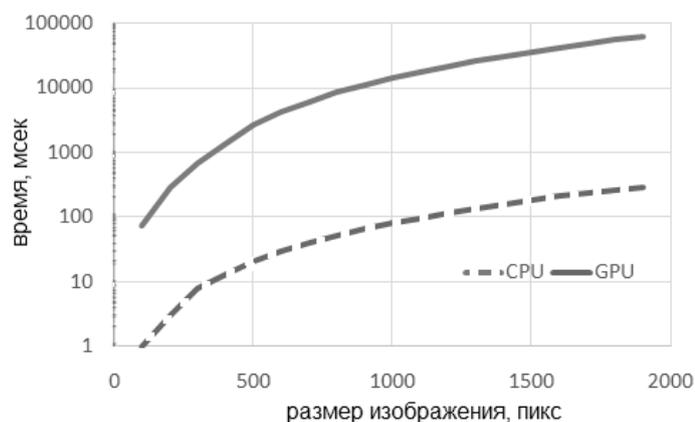


Рис. 3.17. Сравнение времени обработки данных на CPU и GPU в зависимости от линейного размера фазовых изображений.

В результате проведенных исследований установлено, что время обработки на GPU более чем в 100 раз меньше, чем время обработки на CPU. Таким образом, экспериментально доказана эффективность применения параллельных вычислений в методе структурированного освещения для обработки фазовых изображений с произвольными пошаговыми сдвигами.

### **3.2. Практическая реализация методов измерения толщины на основе точечной синхронной дифференциальной триангуляции**

Измерения толщины проката методом лазерной триангуляции основаны на дифференциальном принципе [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В работе создан экспериментальный образец измерителя толщины, использующий 3 лазерных точечных триангулятора (рис. 3.18). Цель данного раздела работы – провести экспериментальные исследования влияния фазово-неоднородной среды на погрешность измерения толщины методом дифференциальной лазерной точечной триангуляции.

Для измерения толщины проката 1 применены два точечных триангулятора 2 и 3, измеряющих расстояние до поверхности проката и расположенные с противоположных сторон исследуемого объекта.

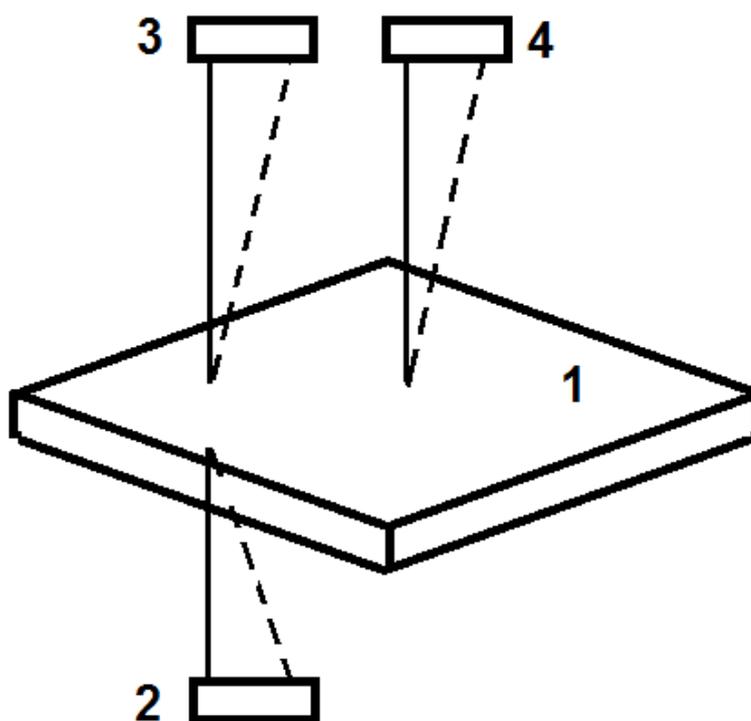


Рис.3.18. Принцип измерения толщины проката методом лазерной триангуляции.

Для учета наклона измеряемого проката требуется использование, как минимум, еще одного триангулятора 4. Анализ показаний триангуляторов 3 и 4, расположенных с одной и той же стороны объекта позволяет оценивать наклон проката 1 в процессе измерения и вводить соответствующую угловую поправку.

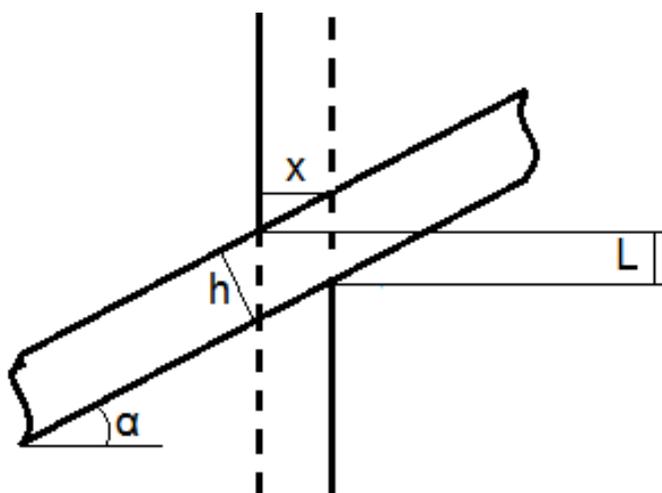


Рис. 3.19. Юстировка верхнего и нижнего триангулятора измерительного комплекса.

При юстировке измерительного комплекса, измеряющего толщину проката методом триангуляции, идеально совместить оптические плоскости верхнего и нижнего триангуляторов крайне сложно. Пусть измеряемый лист 1 имеет толщину  $h$ , а датчики 2 и 3 имеют расхождение лазерных пучков в горизонтальной плоскости измерения  $x$  (рис. 3.19). Для оценки бюджета погрешности измерения толщины проката триангуляционным методом рассмотрим «плоский» случай: пусть оптические оси всех триангуляторов лежат в одной плоскости, а прокат в процессе измерения может колебаться только относительно нормали к этой плоскости. Тогда толщина проката будет равна:

$$h = L \cdot \cos(\alpha) + x \cdot \sin(\alpha), \quad (3.1)$$

где  $L$  – «видимая» толщина проката без учета наклона:

$$L = B - (T_2 + T_3), \quad (3.2)$$

где  $B$  – расстояние между верхним и нижним триангулятором,  $T_2$  и  $T_3$  – расстояния, измеренные триангуляторами 2 и 3 до поверхности измеряемого листа.

Угол наклона проката  $\alpha$  можно вычислить исходя из геометрии измерителя:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{T_3 - T_4}{D} \right), \quad (3.3)$$

где  $D$  – расстояние между лазерными лучами триангуляторов 3 и 4 в плоскости, перпендикулярной этим лучам,  $T_3$  и  $T_4$  – расстояния, измеренные триангуляторами 3 и 4 до поверхности измеряемого листа.

Используя соотношения тригонометрических функций, получим формулу для вычисления толщины проката по показаниям триангуляторов  $T_2, T_3, T_4$ :

$$h = \frac{\frac{(B - (T_2 + T_3)) \cdot (T_3 - T_4)}{D} + x}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_3 - T_4}{D}\right)^2}}. \quad (3.4)$$

Таким образом, определить толщину проката методом лазерной триангуляции можно, используя показания триангуляторов 2, 3, 4 и выражение (3.4).

Для теоретического расчета погрешности измерения толщины методом лазерной триангуляции, определим значение  $R = T_3 - T_4$ . Тогда выражение (3.4) можно записать в виде:

$$h(L, R) = \frac{L \cdot R + D \cdot x}{\sqrt{D^2 + R^2}}, \quad (3.4)$$

Среднеквадратичное отклонение измеряемой величины  $h$ , зависящей от измеренных величин  $L$  и  $R$  согласно [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$\sigma_h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial R}\right)^2 \sigma_R^2}, \quad (3.5)$$

где  $\sigma_L$  – среднеквадратичное отклонение измеренной величины  $L$ ,  $\sigma_R$  – среднеквадратичное отклонение измеренной величины  $R$ . Из выражений (3.4) и (3.5) получим:

$$\sigma_h^2 = \frac{R^2}{D^2 + R^2} \sigma_L^2 + \frac{(LD^2 - DxR)^2}{(D^2 + R^2)^3} \sigma_R^2. \quad (3.6)$$

Выражение (3.6) показывает зависимость погрешности измерения толщины проката  $h$  от погрешности измерения величин  $L$  и  $R$ , а именно суммы показаний верхнего и нижнего триангулятора ( $T_2 + T_3$ ) и разности показаний триангуляционных датчиков 3 и 4 ( $T_3 - T_4$ ). Следовательно, для оценки погрешности измерения толщины горячего проката методом лазерной триангуляции, необходимо оценить влияние фазовых неоднородностей, вызванных наличием тепловых линз в среде распространения оптических сигналов, на показания триангуляторов, входящих в состав лазерного измерителя толщины горячего проката.

Для оценки влияния высокой температуры проката и тепловых линз в среде распространения оптического сигнала на погрешность триангуляторов предложено использовать статистический анализ показаний триангуляторов при измерении холодного и горячего проката.

В случае измерения статически лежащей плоской поверхности, сумму показаний верхнего и нижнего триангуляционного датчика 2 и 3 можно выразить:

$$T_2 + T_3 = B - \left( \frac{h}{\cos(\alpha)} - x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \right) + \delta_T, \quad (3.7)$$

где  $\delta_T$  - случайная величина, характеризующая случайные отклонения показаний триангуляционных датчиков,  $\alpha$  - угол наклона листа относительно горизонтальной плоскости.

При измерении случайно колеблющегося в измерительном объеме листа выражение (3.7) будет выглядеть иначе. В случае измерения холодного металлического листа, показания триангуляционных датчиков можно выразить следующим образом:

$$T_2 + T_3 = B - \left( \frac{h}{\cos(P_\alpha)} - x \cdot \operatorname{tg}(P_\alpha) \right) + \delta_T, \quad (3.8)$$

где  $T_2, T_3$ - показания верхнего и нижнего триангуляционных датчиков,  $P_\alpha$  – случайная величина, характеризующая изменение угла наклона листа.

Разность показаний триангуляционных датчиков 3 и 4 позволит оценить изменения угла наклона измеряемого объекта:

$$T_3 - T_4 = D \cdot \operatorname{tg}(P_\alpha) + \delta_T, \quad (3.9)$$

где  $T_3, T_4$  – показания двух триангуляторов, размещенных в верхней половине макета (рис. 3.20),  $D$  – расстояние между лазерными лучами триангуляторов в плоскости, перпендикулярной этим лучам.

При триангуляционных измерениях горячего проката в бюджет погрешности неизбежно добавляется погрешность, вызванная искажениями оптического сигнала термоградиентной фазово-неоднородной средой и воздушными тепловыми линзами в области распространения оптических сигналов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Эти фазовые неоднородности используются для целей диагностики в аэродинамике, например, в теневых

методах визуализации потоков [Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка!  
Источник ссылки не найден.].

В работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.] показано, что погрешность, обусловленная фазовыми неоднородностями среды распространения оптического сигнала, имеет характер гауссовой случайной величины. Сделать численный расчет среднеквадратичного отклонения результатов измерений, вызванных тепловыми линзами в области распространения оптических сигналов, очень сложно, поскольку оно зависит от большого числа параметров и имеет нестационарный характер. В случае измерения горячего проката, показания триангуляционных датчиков  $T_2 + T_3$  можно описать упрощенной моделью:

$$T_2 + T_3 = B - \left( \frac{P_h}{\cos(P_\alpha)} - x \cdot \operatorname{tg}(P_\alpha) \right) + \delta_T + \delta_{hot}, \quad (3.10)$$

где  $P_h$  - случайная величина, характеризующая изменения толщины проката,  $\delta_{hot}$  - отклонение показаний триангулятора, обусловленная высокой температурой проката и тепловыми линзами в атмосфере, вызванными перепадом температуры. Учитывая, что значение толщины проката изменяется незначительно (в диапазоне 0.1 мм при толщине листа 2 мм), величину  $P_h$  можно представить в виде

$$P_h = h_0 + \delta_h, \quad (3.11)$$

где  $h_0$  - средняя толщина проката,  $\delta_h$  - отклонение толщины от средней величины. Тогда:

$$T_2 + T_3 = B - \left( \frac{h_0}{\cos(P_\alpha)} - x \cdot \operatorname{tg}(P_\alpha) \right) + \frac{\delta_h}{\cos(P_\alpha)} + \delta_T + \delta_{hot}. \quad (3.12)$$

Аналогично, разность показаний триангуляционных датчиков  $T_3 - T_4$  можно оценить:

$$T_3 - T_4 = D \cdot tg(P_\alpha) + \delta_T + \delta_{hot} . \quad (3.13)$$

Таким образом, задача сводится к оценке параметров случайной величины  $\delta_{hot}$ . Поскольку величины  $\delta_T, P_\alpha, P_h$  подчиняются большому количеству слабо зависимых случайных параметров, то по центральной предельной теореме можно считать, что эти величины имеют характер нормального распределения. Так как в экспериментальном исследовании будут анализироваться распределения показаний триангуляторов  $T_3 - T_4$  и  $T_2 + T_3$ , главным параметром анализируемых случайных величин будем считать среднеквадратичное отклонение этих распределений.

Для оценки среднеквадратичного отклонения случайной величины  $\delta_T$  использованы данные измерения статически лежащего холодного листа:

$$СКО(\delta_T)^2 = 2 * (СКО(T_3^{static}))^2 , \quad (3.14)$$

здесь введен множитель «2», поскольку в формулах (3.7)-(3.10) величина  $\delta_T$  описывает отклонение показаний от суммы или разности двух триангуляционных датчиков. Исходя из выражений (3.12) и (3.8), и предполагая, что распределение  $P_\alpha$  имеет одинаковые характеристики в экспериментах с холодным листом и с горячим прокатом, среднеквадратичное отклонение величины  $\delta_{hot}$  можно оценить исходя из следующих выражений:

$$СКО(\delta_{hot}) = \sqrt{СКО((T_2 + T_3)^{hot})^2 - СКО((T_2 + T_3)^{cold})^2 - СКО\left(\frac{\delta_h}{\cos(P_\alpha)}\right)^2} \quad (3.15)$$

Таким образом, предложенным методом на основе статистического анализа показаний триангуляторов при измерении холодного и горячего проката возможно экспериментально оценивать погрешность измерения толщины горячего проката методом лазерной триангуляции.

Для экспериментальной оценки погрешности метода лазерной триангуляции создан макет измерителя толщины горячего проката (рис. 3.20). Несущая рама конструкции 1 выполнена из швеллеров с поперечным сечением 100 мм. Расстояние между верхним и нижним триангулятором – 2 метра. Применены промышленные триангуляционные датчики РФ603 с интерфейсом RS-485 с базовым расстоянием 1170 мм и диапазоном 300 мм [12].

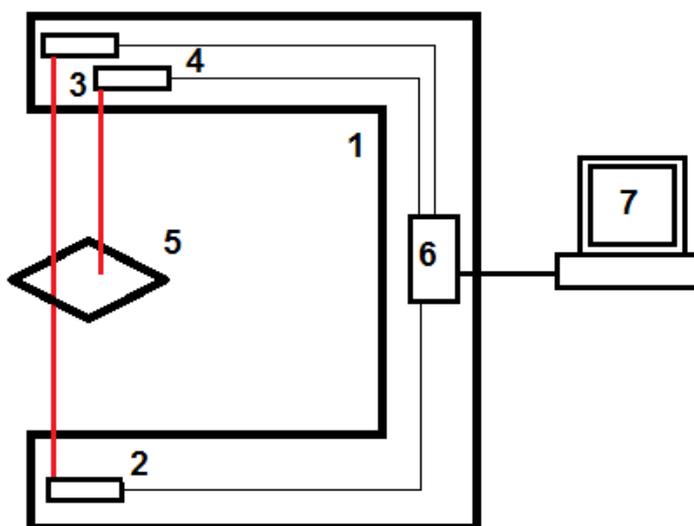


Рис.3.20. Макет измерителя толщины горячего проката.

При проведении экспериментальной оценки необходимо учитывать колебания горячего проката в процессе измерения. Прокат колеблется в измерительной зоне в пределах 100 мм по вертикали и изменяет наклон в пространстве в пределах  $\pm 30^\circ$ .

На макете размещены три триангуляционных датчика: триангулятор 2 расположен снизу, триангуляторы 3 и 4 – сверху относительно измеряемого объекта 5. Все датчики ориентированы так, чтобы лазерные лучи были

параллельны. Датчики 2 и 3 были юстированы таким образом, чтобы их лазерные лучи лежали на одной прямой. Датчик 4 размещен на расстоянии около 100 мм в направлении движения листа и служит для оценки угла наклона измеряемого листа проката. Синхронизатор 6 обеспечивает синхронизацию всех триангуляторов и взаимодействие с компьютером 7, выполняющим сбор данных всех триангуляторов. Синхронизатор необходим, поскольку макет предназначен для измерения динамического объекта, движущегося со скоростью до 7 м/сек.

Схема измерительного комплекса представлена на рис. 3.21. Триангуляционные измерители Т1,Т2,Т3 работают в синхронном режиме и выполняют измерение по синхроимпульсу, генерируемому синхронизатором СИНХ. Модуль обработки данных МОД взаимодействует с синхронизатором для настройки параметров синхронизации и принимает данные от триангуляционных измерителей по интерфейсу на основе RS-485. Результаты измерения передаются в компьютер ПК пользователю для архивации, обработки и визуализации.

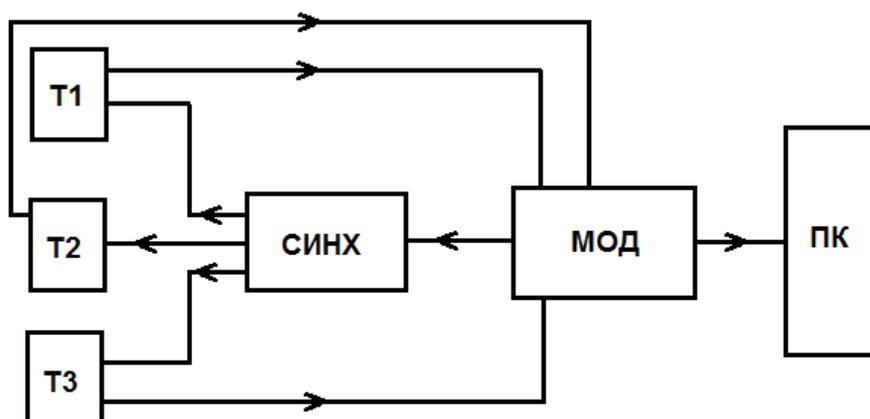


Рис. 3.21. Схема макета измерителя толщины горячего проката.



Рис. 3.22. Внешний вид макета измерителя толщины горячего проката перед отправкой на испытания.

Для анализа погрешности метода лазерной триангуляции для измерения толщины горячего проката, выполнено экспериментальное исследование среднеквадратичного отклонения величины  $\delta_{hot}$ , характеризующей отклонения показаний триангуляторов, вызванные

высокой температурой проката и термоградиентной фазово-неоднородной средой, в которой распространяются оптические сигналы.

Экспериментальные исследования проводилось в 3 этапа: измерение статически лежащего холодного листа; измерение холодного листа, случайно ориентированного в измерительном объеме с произвольным положением в пространстве и произвольным наклоном в непосредственной близости к прокатному стану в цехе горячего проката металлургического предприятия (для создания условий, максимально приближенных к натурным производственным условиям); измерение горячего проката в цехе горячего проката металлургического предприятия непосредственно за прокатным станом.

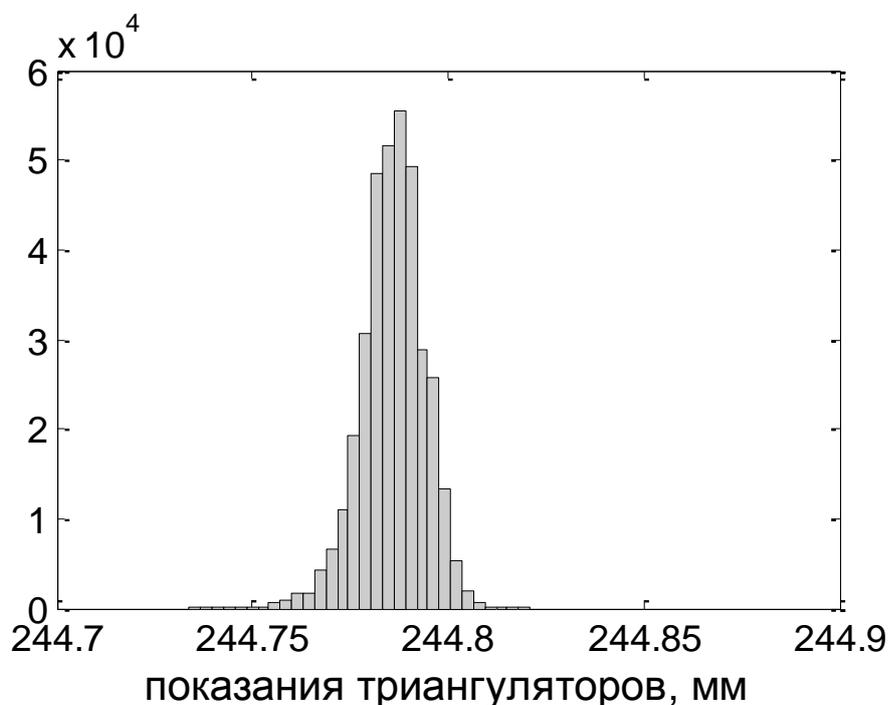


Рис. 3.23. Распределение показаний триангуляционного датчика №3 при измерении статически лежащего холодного листа толщиной 2 мм.

Измерения статично лежащего холодного листа позволили оценить среднеквадратичное отклонение случайной величины  $\delta_T$ , обусловленное оптической схемой и электронными комплектующими. Распределение показаний нижнего триангулятора показано на рис. 3.23. Измерения

производились в течение одного часа. Полученные результаты измерения имеют вид нормального распределения со среднеквадратичным отклонением на уровне 0,008 мм. Среднеквадратичное отклонение случайной величины  $\delta_T$  в выражениях (3.7)-(3.10) можно оценить как 0,012 мм.

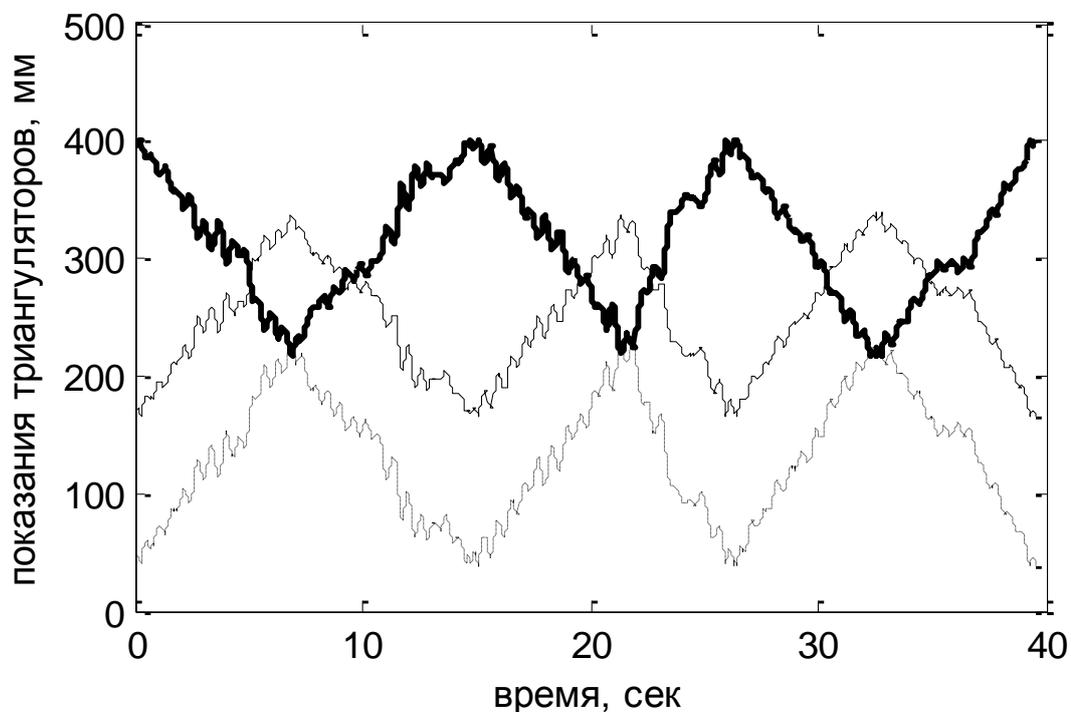


Рис. 3.24. Данные триангуляционных датчиков при измерении случайно ориентированного холодного листа: триангулятор №2 – сплошная линия, №3 – жирная линия, №4 – пунктирная линия.

Измерение произвольно ориентированного в измерительном объеме холодного листа проводились непосредственно перед работающим прокатным станом. В этой ситуации в тестах на искусственных объектах эффективно воспроизводится термоградиентная фазово-неоднородная среда, в которой будет работать действующий измеритель горячего проката. Макет измерительного комплекса при этом подвергался всем вибрационным помехам, таким же, как при реальных измерениях горячего проката.

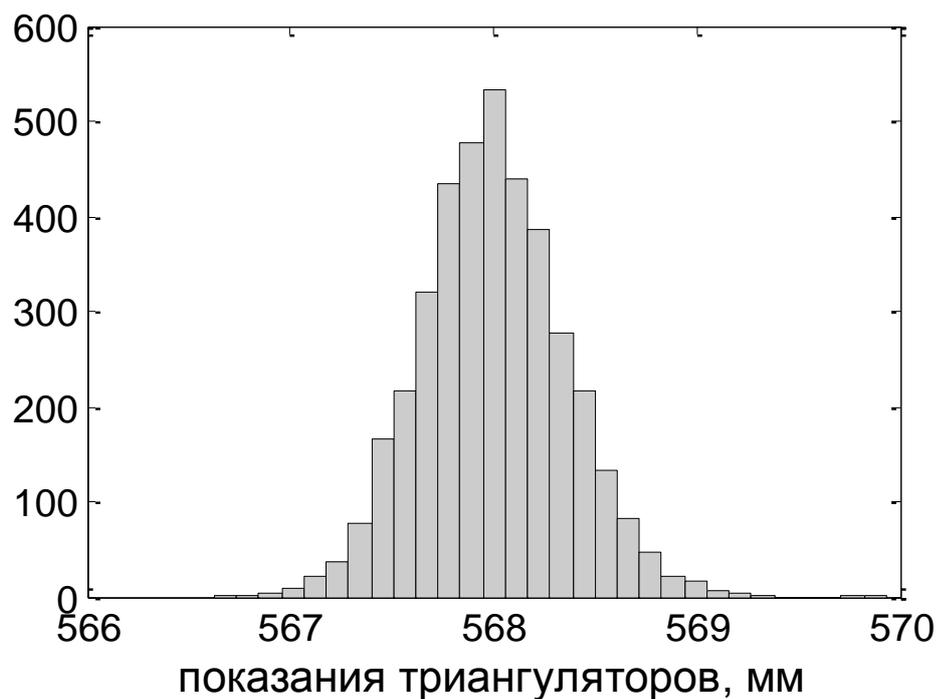


Рис. 3.25. Распределение суммы показаний верхнего и нижнего триангулятора при измерении случайно ориентированного холодного листа.

На рисунке 3.24 представлен график собранных данных, собранных с трех триангуляторов. Видно, что жирный график, соответствующий триангулятору №2 колеблется в противофазе двум другим. Это график расстояния до объекта от триангулятора расположенного снизу, а два других – от триангуляторов расположенных сверху.

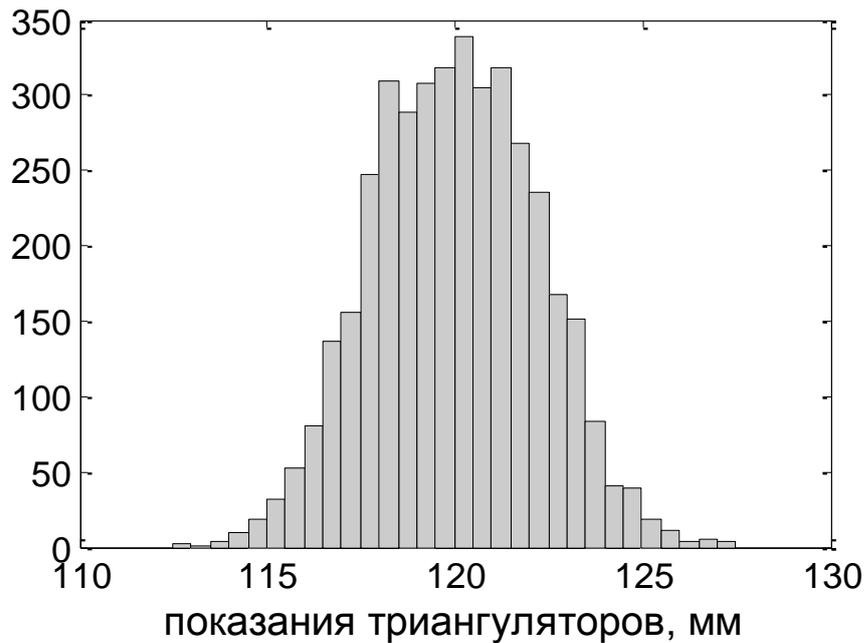


Рис. 3.26. Распределение разницы показаний триангуляторов 3 и 4 при измерении случайно ориентированного холодного листа.

Толщина измеряемого листа составляла 2.05 мм. На графике 3.25 показано распределение суммы показаний верхнего и нижнего триангулятора. Видно, что среднеквадратичное отклонение  $СКО((T_2 + T_3)^{cold}) = 0.35$  мм существенно больше, чем в случае измерения статично расположенного листа. Это связано с наклонами измеряемого листа.

Для оценки углов наклона листа проведен анализ разницы показаний триангуляторов 3 и 4. На рис. 3.26 показано полученное распределение. Видно, что оно также представляет собой гауссово распределение. Среднеквадратичное отклонение равно  $СКО((T_3 - T_4)^{cold}) = 2.2$  мм, то есть данные изменяются в диапазоне 13 мм. Видно, что вкладом величины  $\delta_T$  можно пренебречь, поскольку он ничтожно мал. Учитывая, что расстояние между зонами измерения триангуляторов D было около 10 мм, измеряемый лист в процессе измерения наклонялся в диапазоне углов  $\pm 33$  градуса. Такой

диапазон углов наклона был выбран в соответствии с технологическими параметрами прокатных станов.

На рис. 3.27 представлен график собранных с трех триангуляторов данных при измерениях горячего проката. Толщина проката была равна 1.95 мм. горячего проката. Толщина проката была равна 1.95 мм. Температура проката в месте измерения составлял около 850 градусов.

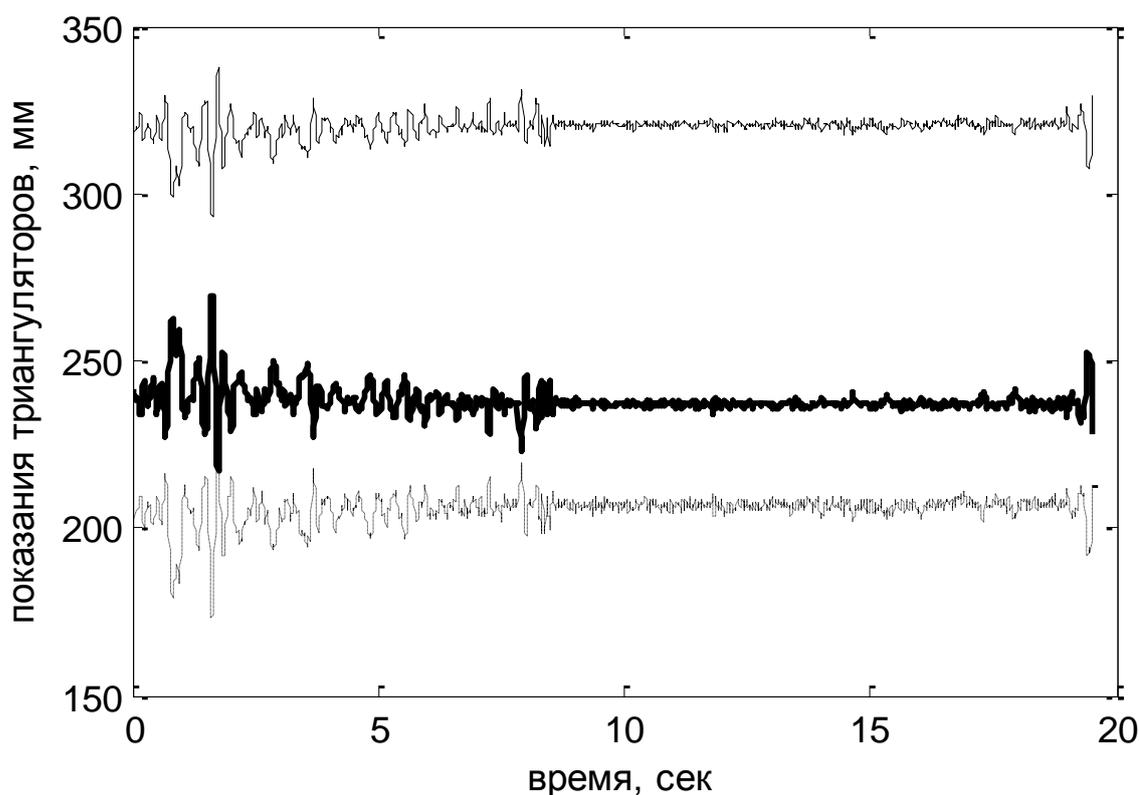


Рис. 3.27. Данные трех триангуляционных датчиков при измерении горячего проката: триангулятор №2 – сплошная линия, №3 – жирная линия, №4 – пунктирная линия.

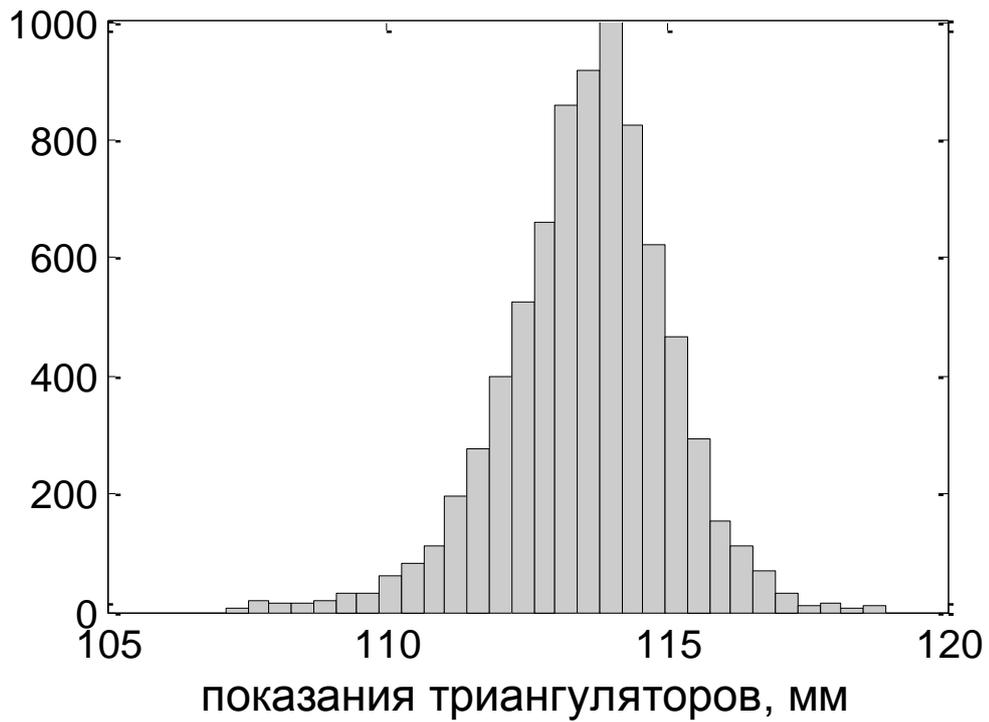


Рис.3.28. Распределение разницы показаний триангуляционных датчиков 3 и 4 при измерении горячего проката.

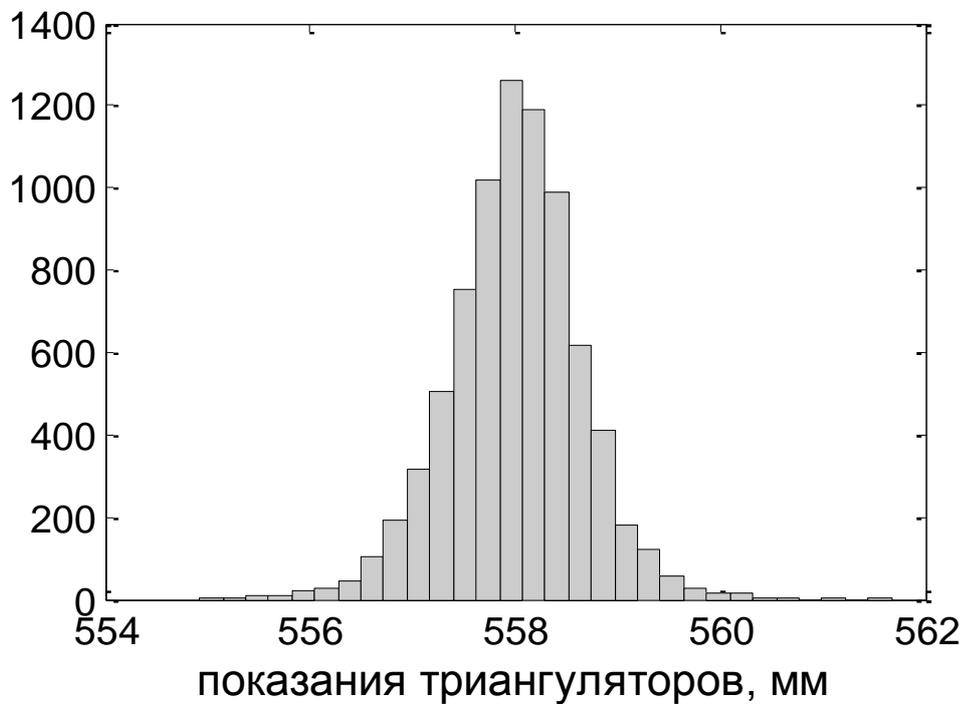


Рис. 3.29. Распределение суммы показаний триангуляционных датчиков 2 и 3 при измерении горячего проката.

Контроль температуры осуществлялся с помощью пирометра. Время измерения составляло около 20 секунд. На графике видно, что первые 8 секунд прокат колеблется в измерительной области в существенно большем диапазоне, чем потом, в установившемся режиме. Это связано с тем, что прокат при выходе из валков чистовой группы прокатного стана зажат только валами чистовой группы валов. Далее прокат поступает на участок смотки, где фиксируется направляющими валами, которые зажимают прокат и ограничивают его колебания.

Распределение величины разницы показаний 3 и 4 триангулятора показано на рис. 3.28. Среднеквадратичное отклонение составило  $СКО((T_3 - T_4)^{hot}) = 1.49$  мм, что соответствует диапазону наклона проката в измерительном объеме  $\pm 24$  градуса. Данное распределение показывает, что измерения холодного листа с произвольным наклоном выполнялись в том же диапазоне значений, что и горячего проката. Величину среднеквадратичного отклонения  $\delta_h / \cos(P_\alpha)$  можно оценить по максимальному значению, когда  $\cos(P_\alpha) = \cos(24) = 0.91$ , а величину среднеквадратичного отклонения случайной величины  $\delta_h$  можно оценить, как  $СКО(\delta_h) = 0.1$  мм. Тогда  $СКО\left(\frac{\delta_h}{\cos(P_\alpha)}\right) \approx 0.109$  мм.

На рис. 3.29 представлено распределение суммы показаний триангуляторов 2 и 3 от горячего проката толщиной 1.95 мм. Среднеквадратичное отклонение составило  $СКО((T_2 + T_3)^{hot}) = 0.64$  мм, что на 0.29 мм больше, чем в случае измерения холодного проката, произвольно ориентированного в измерительном объеме.

Процесс измерения холодного листа и горячего проката отличался только температурой проката и, как следствие, наличием или отсутствием термоградиентных фазовых неоднородностей в области распространения оптических сигналов. Тогда, согласно выражению (3.15),  $СКО(\delta_{hot}) = \sqrt{0.64^2 - 0.35^2 - 0.109^2} = 0.52$  мм. Следовательно, в данных условиях, термоградиентные фазовые неоднородности, образованные нагретым до

высокой температуры прокатом дают дополнительную погрешность измерения толщины величиной не менее 0.52 мм.

Указанная погрешность измерителя толщины на основе классических лазерных триангуляторов не может быть никак скомпенсирована или учтена, так как флуктуации и эволюцию термоградиентных фазовых неоднородностей в области измерения смоделировать практически невозможно. Таким образом, экспериментально установлено, что оптико-лазерный измерительный комплекс для измерения толщины горячего проката на основе стандартной лазерной триангуляции с погрешностью измерения толщины порядка 10 мкм и измерительной базой порядка 1 м реализовать практически невозможно из-за погрешности, обусловленной наличием стохастических термоградиентных фазовых неоднородностей в измерительной области, вызванных сильным температурным нагревом воздуха горячим прокатом.

В работе проведена экспериментальная оценка погрешности лазерных триангуляторов с измерительной базой порядка 1 метра для измерения толщины горячего листового металлопроката. Показано, что созданный экспериментальный макет лазерного измерителя толщины проката может обеспечивать измерение толщины холодного проката с погрешностью не превышающей 0,012 мм. Установлено, что среднеквадратичное отклонение показаний триангуляторов созданного экспериментального макета лазерного измерителя толщины проката, обусловленных влиянием термоградиентных фазовых неоднородностей в среде распространения оптических сигналов составило не менее 0,52 мм при измерении проката с температурой порядка 850 °С. Показано, что наличие тепловых линз, вызванных сильными температурными градиентами, вносят серьезные искажения в оптические сигналы лазерных триангуляторов, что в конечном итоге приводит к фатальному увеличению погрешности. Таким образом, измерительный комплекс для высокоточного измерения толщины металлопроката с погрешностью измерения порядка 10 мкм на основе классических точечных

триангуляторов, имеющих измерительную базу порядка 1 метра и погрешность измерения в лабораторных условиях менее 0,008 мм, может быть успешно реализован только для измерения холодного металлопроката. Измерительный комплекс для измерения толщины горячего проката необходимо создавать на основе новых методов, устойчивых к влиянию термоградиентных фазовых неоднородностей на погрешность измерения.

### **3.3. Практическая реализация метода облачной триангуляции**

Для измерения толщины горячего проката наиболее перспективным по совокупности точностных и функциональных свойств представляется использование предложенных в диссертации методов на основе синхронной дифференциальной облачной триангуляции. Методы предусматривают использование пространственно модулированного оптического излучения, которое рассеивается на поверхности измеряемого объекта и наблюдается на фотоприемнике в виде облака световых точек. Пространственный регрессионный анализ полученных распределений позволяет существенно снизить погрешность измерения.

Принцип облачной триангуляции основан на формировании пространственно-структурированной засветки источником излучения и анализе на принимаемом фотоприемнике изображении проекционных искажений. Метод позволяет определить не только расстояние до поверхности объекта, но и его пространственный наклон. Далее представлен анализ распространения излучения в методе облачной триангуляции в приближении геометрической оптики.

Пусть поверхность измеряемого объекта описывается в лабораторной системе координат уравнением

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (3.16)$$

Пусть луч  $K_i$ , выпущенный излучателем распространяется в пространстве по закону

$$\begin{cases} x = K_x^i t + x_0^i \\ y = K_y^i t + y_0^i, \quad t > 0. \\ z = K_z^i t + z_0^i \end{cases} \quad (3.17)$$

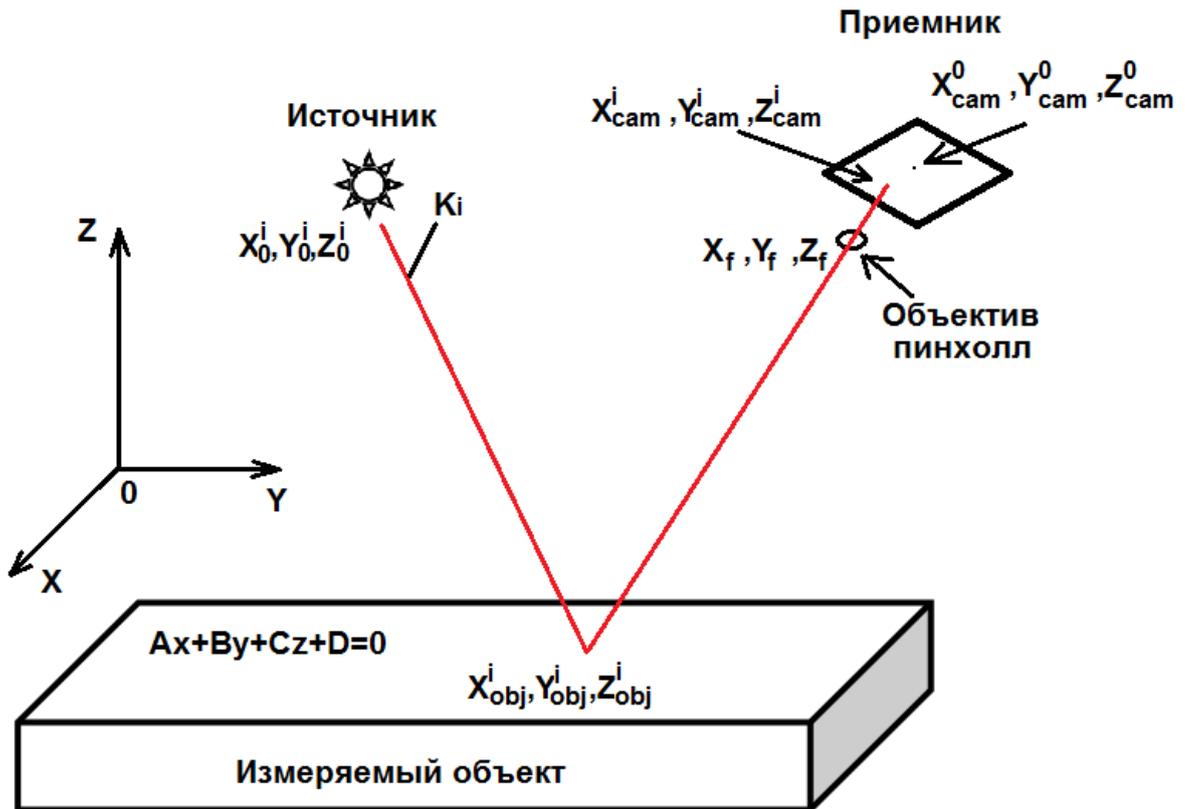


Рис. 3.30. Распространение луча в методе облачной триангуляции.

На поверхности измеряемого объекта луч  $K_i$  будет иметь координаты, исходя из решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\begin{cases} x + 0y + 0z - K_x^i t = x_0^i \\ 0x + y + 0z - K_y^i t = y_0^i \\ 0x + 0y + z - K_z^i t = z_0^i \\ Ax + By + Cz + 0t = -D \end{cases} \quad (3.18)$$

Решение можно найти методами матричной алгебры

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -K_x^i \\ 0 & 1 & 0 & -K_y^i \\ 0 & 0 & 1 & -K_z^i \\ A & B & C & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_{obj}^i \\ y_{obj}^i \\ z_{obj}^i \\ t \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_0^i \\ y_0^i \\ z_0^i \\ -D \end{vmatrix}, \quad (3.19)$$

$$x_{obj}^i = x_0^i - K_x^i \frac{D + Ax_0^i + By_0^i + Cz_0^i}{K_x^i A + K_y^i B + K_z^i C}, \quad (3.20)$$

$$y_{obj}^i = y_0^i - K_y^i \frac{D + Ax_0^i + By_0^i + Cz_0^i}{K_x^i A + K_y^i B + K_z^i C}, \quad (3.21)$$

$$z_{obj}^i = z_0^i - K_z^i \frac{D + Ax_0^i + By_0^i + Cz_0^i}{K_x^i A + K_y^i B + K_z^i C}. \quad (3.22)$$

Уравнение плоскости фотоприемника можно представить:

$$(x_{cam}^0 - x_f)(x - x_{cam}^0) + (y_{cam}^0 - y_f)(y - y_{cam}^0) + (z_{cam}^0 - z_f)(z - z_{cam}^0) = 0, \quad (3.23)$$

где  $(x_f, y_f, z_f)$  – координаты точечного объектива малой апертуры,  $(x_{cam}, y_{cam}, z_{cam})$  – координаты точки на поверхности фотоприемника, через которую вместе с точкой  $(x_f, y_f, z_f)$  можно провести нормаль к плоскости фотоприемника.

Координаты изображения светового пятна с координатами  $(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$  на поверхности фотоприемника можно вычислить из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = (x_f - x_{obj}^i)t + x_{obj}^i \\ y = (y_f - y_{obj}^i)t + y_{obj}^i \\ z = (z_f - z_{obj}^i)t + z_{obj}^i \\ (x_{cam}^0 - x_f)x + (y_{cam}^0 - y_f)y + (z_{cam}^0 - z_f)z = \\ = (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^0 + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^0 + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^0 \end{array} \right. , \quad (3.24)$$

или в матричном виде координаты  $(x_{cam}^i, y_{cam}^i, z_{cam}^i)$  будут вычисляться:

$$\begin{array}{l} \left| \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & -(x_f - x_{obj}^i) \\ 0 & 1 & 0 & -(y_f - y_{obj}^i) \\ 0 & 0 & 1 & -(z_f - z_{obj}^i) \\ (x_{cam}^0 - x_f)(y_{cam}^0 - y_f)(z_{cam}^0 - z_f) & & & 0 \end{array} \right| \cdot \begin{array}{l} x_{cam}^i \\ y_{cam}^i \\ z_{cam}^i \\ t \end{array} = \\ = \left| \begin{array}{c} x_{obj}^i \\ y_{obj}^i \\ z_{obj}^i \\ (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^0 + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^0 + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^0 \end{array} \right|. \end{array} \quad (3.25)$$

Угол наклона поверхности можно измерить следующим образом. Пусть на поверхность измеряемого объекта проецируется облако световых точек, симметрично расположенных относительно двух пересекающихся плоскостей, которые можно аналитически описать как

$$A_{il}^1 x + B_{il}^1 y + C_{il}^1 z + D_{il}^1 = 0 \quad (3.26)$$

$$A_{il}^2 x + B_{il}^2 y + C_{il}^2 z + D_{il}^2 = 0 \quad (3.27)$$

Оптическую ось источника оптического излучения будем представлять в виде

$$x_{il} = B_{il}^1 C_{il}^2 - B_{il}^2 C_{il}^1 \quad (3.28)$$

$$y_{il} = C_{il}^1 A_{il}^2 - C_{il}^2 A_{il}^1 \quad (3.29)$$

$$z_{il} = A_{il}^1 B_{il}^2 - A_{il}^2 B_{il}^1 \quad (3.30)$$

На поверхности измеряемого объекта они сформируют световые пятна, симметрично расположенные относительно центральных отрезков, которые лежат на прямых, определяемых системами уравнений

$$\begin{cases} A_{il}^1 x + B_{il}^1 y + C_{il}^1 z + D_{il}^1 = 0 \\ Ax + By + Cz + D = 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\begin{cases} A_{il}^2 x + B_{il}^2 y + C_{il}^2 z + D_{il}^2 = 0 \\ Ax + By + Cz + D = 0 \end{cases}, \quad (3.32)$$

Решениями этих систем уравнений будут параметрические уравнения прямых. Учитывая, что центральные световые плоскости облаков сформированы так, что обязательно пересекаются, определим точку пересечения двух центральных световых плоскостей и плоскости поверхности измеряемого объекта, как  $(x_{obj}^0, y_{obj}^0, z_{obj}^0)$ :

$$\begin{bmatrix} x_{obj}^0 \\ y_{obj}^0 \\ z_{obj}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{il}^1 & B_{il}^1 & C_{il}^1 \\ A_{il}^2 & B_{il}^2 & C_{il}^2 \\ A & B & C \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -D_{il}^1 \\ -D_{il}^2 \\ -D \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Тогда параметрические уравнения световых прямых, образованных рассеянием световых плоскостей на поверхности объекта будут иметь вид:

$$\begin{cases} x = W_x^1 t + x_{obj}^0 \\ y = W_y^1 t + y_{obj}^0 \\ z = W_z^1 t + z_{obj}^0 \end{cases} \quad (3.34)$$

$$W_x^1 = B_{il}^1 C - C_{il}^1 B \quad (3.35)$$

$$W_y^1 = C_{il}^1 A - A_{il}^1 C \quad (3.36)$$

$$W_z^1 = A_{il}^1 B - B_{il}^1 A \quad (3.37)$$

$$\begin{cases} x = W_x^2 t + x_{obj}^0 \\ y = W_y^2 t + y_{obj}^0 \\ z = W_z^2 t + z_{obj}^0 \end{cases} \quad (3.38)$$

$$W_x^2 = B_{il}^2 C - C_{il}^2 B \quad (3.39)$$

$$W_y^2 = C_{il}^2 A - A_{il}^2 C \quad (3.40)$$

$$W_z^2 = A_{il}^2 B - B_{il}^2 A \quad (3.41)$$

На фотоприемнике световые облака будут располагаться симметрично относительно прямых, образованных пересечением плоскости, образованной центральной прямой световых облаков на поверхности объекта, точкой  $(x_f, y_f, z_f)$  и плоскостью фотоприемника:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( W_y^1(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^1(y_{obj}^0 - y_f) \right) (x - x_f) + \\ + \left( W_z^1(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^1(z_{obj}^0 - z_f) \right) (y - y_f) + \\ + \left( W_x^1(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^1(x_{obj}^0 - x_f) \right) (z - z_f) = 0 \\ (x_{cam}^0 - x_f)x + (y_{cam}^0 - y_f)y + (z_{cam}^0 - z_f)z = \\ = (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^0 + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^0 + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^0 \end{array} \right. \quad (3.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( W_y^2(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^2(y_{obj}^0 - y_f) \right) (x - x_f) + \\ + \left( W_z^2(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^2(z_{obj}^0 - z_f) \right) (y - y_f) + \\ + \left( W_x^2(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^2(x_{obj}^0 - x_f) \right) (z - z_f) = 0 \\ (x_{cam}^0 - x_f)x + (y_{cam}^0 - y_f)y + (z_{cam}^0 - z_f)z = \\ = (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^0 + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^0 + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^0 \end{array} \right. \quad (3.43)$$

Направляющие векторы наблюдаемых на фотоприемнике прямых  $(R_x^1, R_y^1, R_z^1)$  и  $(R_x^2, R_y^2, R_z^2)$ :

$$R_x^1 = \left( W_z^1(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^1(z_{obj}^0 - z_f) \right) (y_{cam}^0 - y_f) - \left( W_x^1(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^1(x_{obj}^0 - x_f) \right) (z_{cam}^0 - z_f) \quad (3.44)$$

$$R_y^1 = \left( W_x^1(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^1(x_{obj}^0 - x_f) \right) (x_{cam}^0 - x_f) - \left( W_y^1(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^1(y_{obj}^0 - y_f) \right) (z_{cam}^0 - z_f) \quad (3.45)$$

$$R_z^1 = \left( W_y^1(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^1(y_{obj}^0 - y_f) \right) (y_{cam}^0 - y_f) - \left( W_z^1(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^1(z_{obj}^0 - z_f) \right) (x_{cam}^0 - x_f) \quad (3.46)$$

$$R_x^2 = \left( W_z^2(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^2(z_{obj}^0 - z_f) \right) (y_{cam}^0 - y_f) - \left( W_x^2(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^2(x_{obj}^0 - x_f) \right) (z_{cam}^0 - z_f) \quad (3.47)$$

$$R_y^2 = \left( W_x^2(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^2(x_{obj}^0 - x_f) \right) (x_{cam}^0 - x_f) - \left( W_y^2(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^2(y_{obj}^0 - y_f) \right) (z_{cam}^0 - z_f) \quad (3.48)$$

$$R_z^2 = \left( W_y^2(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^2(y_{obj}^0 - y_f) \right) (y_{cam}^0 - y_f) - \left( W_z^2(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^2(z_{obj}^0 - z_f) \right) (x_{cam}^0 - x_f) \quad (3.49)$$

Точка пересечения центральных линий световых облаков на фотоприемнике будет иметь координаты  $(x_{cam}^c, y_{cam}^c, z_{cam}^c)$ , вычисляемые из СЛАУ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( W_y^1(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^1(y_{obj}^0 - y_f) \right) (x_{cam}^c - x_f) + \\ + \left( W_z^1(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^1(z_{obj}^0 - z_f) \right) (y_{cam}^c - y_f) + \\ + \left( W_x^1(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^1(x_{obj}^0 - x_f) \right) (z_{cam}^c - z_f) = 0 \\ \left( W_y^2(z_{obj}^0 - z_f) - W_z^2(y_{obj}^0 - y_f) \right) (x_{cam}^c - x_f) + \\ + \left( W_z^2(x_{obj}^0 - x_f) - W_x^2(z_{obj}^0 - z_f) \right) (y_{cam}^c - y_f) + \\ + \left( W_x^2(y_{obj}^0 - y_f) - W_y^2(x_{obj}^0 - x_f) \right) (z_{cam}^c - z_f) = 0 \\ (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^c + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^c + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^c = \\ = (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^0 + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^0 + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^0 \end{array} \right. \quad (3.50)$$

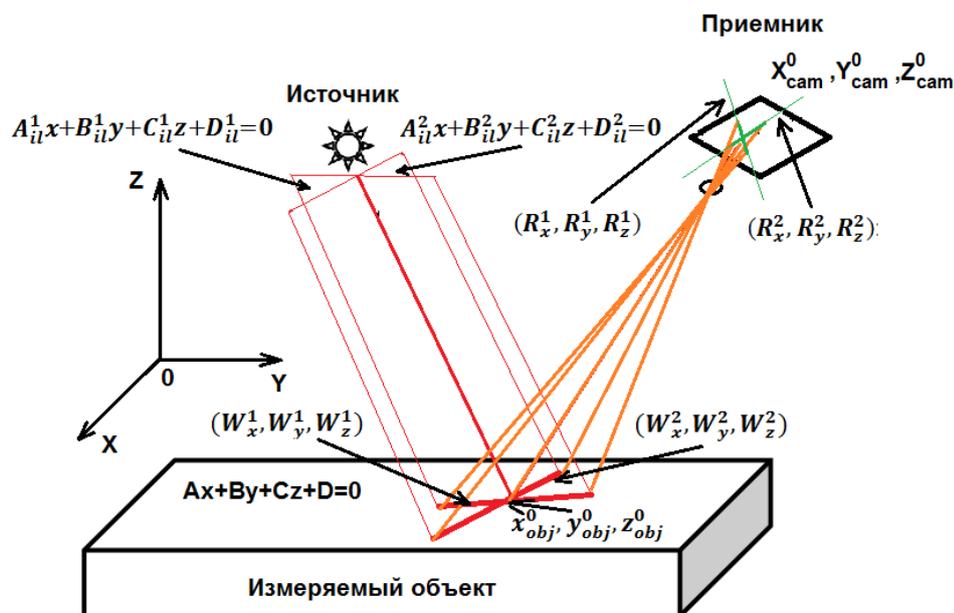


Рис. 3.31. Распространение пространственно модулированной засветки в методе облачной триангуляции.

Поскольку точка пересечения центральных линий световых облаков на фотоприемнике лежит в плоскости фотоприемника, то система уравнений является вырожденной. Точка пересечения центральных линий световых облаков в зависимости от положения измеряемой поверхности в пространстве может перемещаться только в одном направлении: в направлении прямой, образованной пересечением плоскости фотоприемника и плоскости триангуляции. Эта прямая определяется системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_{cam}^0 - x_f)x + (y_{cam}^0 - y_f)y + (z_{cam}^0 - z_f)z = \\ = (x_{cam}^0 - x_f)x_{cam}^0 + (y_{cam}^0 - y_f)y_{cam}^0 + (z_{cam}^0 - z_f)z_{cam}^0 \\ ((y_{cam}^0 - y_f)z_{il} - y_{il}(z_{cam}^0 - z_f))x + ((x_{cam}^0 - x_f)z_{il} - x_{il}(z_{cam}^0 - z_f))y + \\ + ((x_{cam}^0 - x)y_{il} - x_{il}(y_{cam}^0 - y_f))z = ((y_{cam}^0 - y_f)z_{il} - y_{il}(z_{cam}^0 - z_f))x_{cam}^0 + \\ ((x_{cam}^0 - x_f)z_{il} - x_{il}(z_{cam}^0 - z_f))y_{cam}^0 + ((x_{cam}^0 - x_f)y_{il} - x_{il}(y_{cam}^0 - y_f))z_{cam}^0 \end{array} \right. \quad (3.51)$$

Направляющая этой прямой  $(x_m, y_m, z_m)$  вычисляется из уравнений:

$$x_m = (y_{cam}^0 - y_f) \left( (x_{cam}^0 - x) y_{il} - x_{il} (y_{cam}^0 - y_f) \right) - (z_{cam}^0 - z_f) \left( (x_{cam}^0 - x_f) z_{il} - x_{il} (z_{cam}^0 - z_f) \right) \quad (3.52)$$

$$y_m = (x_{cam}^0 - x_f) \left( (x_{cam}^0 - x_f) y_{il} - x_{il} (y_{cam}^0 - y_f) \right) - (z_{cam}^0 - z_f) \left( (y_{cam}^0 - y_f) z_{il} - y_{il} (z_{cam}^0 - z_f) \right) \quad (3.53)$$

$$z_m = (x_{cam}^0 - x_f) \left( (x_{cam}^0 - x_f) z_{il} - x_{il} (z_{cam}^0 - z_f) \right) - (y_{cam}^0 - y_f) \left( (y_{cam}^0 - y_f) z_{il} - y_{il} (z_{cam}^0 - z_f) \right) \quad (3.54)$$

Тогда параметр  $l_m$ , характеризующий высоту, на которой расположена измеряемая поверхность можно определить, как скалярное произведение следующих векторов:

$$l_m = \frac{(x_m - x_{cam}^0, y_m - y_{cam}^0, z_m - z_{cam}^0)}{|(x_m - x_{cam}^0, y_m - y_{cam}^0, z_m - z_{cam}^0)|} \cdot (x_{cam}^c - x_{cam}^0, y_{cam}^c - y_{cam}^0, z_{cam}^c - z_{cam}^0) \quad (3.55)$$

Для построения взаимно-однозначного соответствия между положением измеряемого объекта в пространстве и параметрами наблюдаемого изображения объекта на фотоприемнике необходимо вычислить угла наклона центральных линий световых облаков на фотоприемнике относительно перпендикуляра к плоскости триангуляции.

Направляющая перпендикуляра к плоскости триангуляции  $(X_P, Y_P, Z_P)$ , образованной оптическими осями источника (пересечение центральных световых плоскостей) и приемника оптического излучения (нормаль к плоскости фотоприемника) можно вычислить:

$$x_P = (y_{cam}^0 - y_f)(A_{il}^1 B_{il}^2 - A_{il}^2 B_{il}^1) - (C_{il}^1 A_{il}^2 - C_{il}^2 A_{il}^1)(z_{cam}^0 - z_f) \quad (3.56)$$

$$y_P = (z_{cam}^0 - z_f)(B_{il}^1 C_{il}^2 - B_{il}^2 C_{il}^1) - (A_{il}^1 B_{il}^2 - A_{il}^2 B_{il}^1)(x_{cam}^0 - x_f) \quad (3.57)$$

$$z_P = (x_{cam}^0 - x_f)(C_{il}^1 A_{il}^2 - C_{il}^2 A_{il}^1) - (B_{il}^1 C_{il}^2 - B_{il}^2 C_{il}^1)(y_{cam}^0 - y_f) \quad (3.58)$$

Угол между вектором  $(x_P, y_P, z_P)$  и направляющими векторов центральных световых прямых на фотоприемнике:

$$\alpha_1 = \arccos \frac{x_P R_x^1 + y_P R_y^1 + z_P R_z^1}{\sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2} \cdot \sqrt{R_x^1{}^2 + R_y^1{}^2 + R_z^1{}^2}}, \quad (3.59)$$

$$\alpha_2 = \arccos \frac{x_P R_x^2 + y_P R_y^2 + z_P R_z^2}{\sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2} \cdot \sqrt{R_x^2{}^2 + R_y^2{}^2 + R_z^2{}^2}}. \quad (3.60)$$

Полученные выражения показывают взаимно-однозначное соответствие между положением поверхности измеряемого объекта в измерительной зоне, одной координаты точки пересечения центральных линий световых облаков на фотоприемнике и углов наклона этих линий:

$$F \cdot \begin{bmatrix} \frac{A}{D} \\ \frac{B}{D} \\ \frac{C}{D} \\ \frac{1}{D} \end{bmatrix} = G \cdot \begin{bmatrix} l_m \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}. \quad (3.61)$$

Данное выражение основано на предположении, что  $D > 0$ . Это легко можно обеспечить, если определить начало декартовой системы координат, например, в точке  $(x_f, y_f, z_f)$ . Предложенная реализация метода облачной триангуляции обеспечивает взаимно-однозначное соответствие между

пространственным положением поверхности измеряемого объекта в измерительной зоне с одной стороны и одной координаты точки пересечения центральных линий световых облаков на фотоприемнике и углов наклона этих линий с другой.

### **3.3.1. Обработка изображений в методе облачной триангуляции**

Обработка изображений в методе облачной триангуляции выполняется с целью определения регрессионных параметров изображения пространственно модулированной засветки. Регрессии позволяют по набору экспериментальных данных восстанавливать центральные линии световых облаков. Кроме того, алгоритм обработки данных должен обеспечивать обработку изображений в реальном времени, то есть время обработки должно быть меньше периода измерения. Данное требование накладывает необходимость оптимизации алгоритмов обработки изображений в методе облачной триангуляции.

Анализируемое изображение представляет собой распределение двух пересекающихся облаков световых точек. На основе анализа этих облаков в плоскости фотоприемника должны быть построены численные регрессионные функции, соответствующие центральным линиям световых облаков. Зная эти функции, можно определить положение искомой точки пересечения центральных линий световых облаков на обрабатываемом изображении, соответствующей координате поверхности объекта.

Таким образом, на выходе алгоритма обработки изображения должны быть координаты пересечения центральных линий и углы их наклона в области пересечения. Далее описан алгоритм обработки изображений для случая, когда регрессионные линии определяют с помощью линейных функций.

Наиболее очевидным методом обработки такого рода изображения является применение преобразования Радона [Ошибка! Источник ссылки не

найдено. -Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Данное преобразование является интегральным и обеспечивает минимизацию ошибки определения координат точки пересечения линий. Изображение приемника оптического излучения облачного триангулятора преобразуют по формуле:

$$R(s, \alpha) = \int I(s \cdot \cos(\alpha) - z \cdot \sin(\alpha), s \cdot \sin(\alpha) + z \cdot \cos(\alpha)) dz. \quad (3.62)$$

Далее определяют локальные максимумы на изображении. Они полностью характеризуют искомые линии.

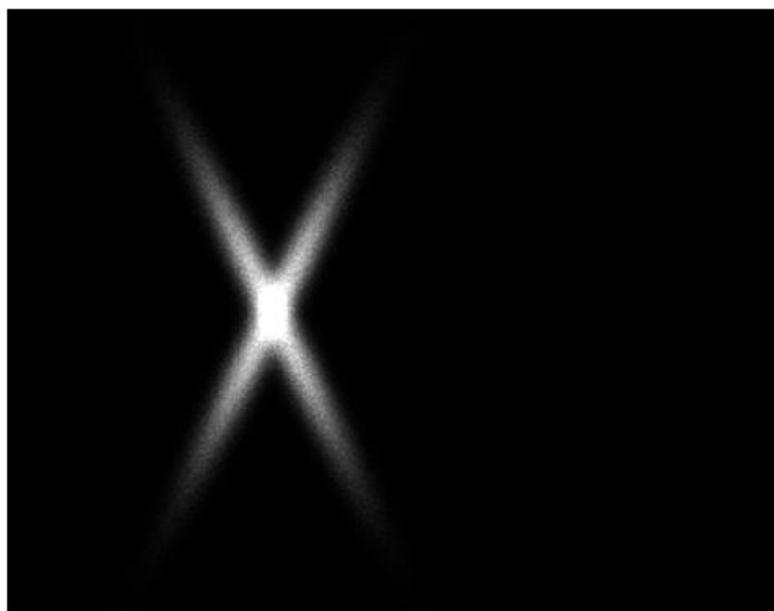


Рис. 3.32. Пример изображения на фотоприемнике облачного триангулятора в условиях очень малых шумов.

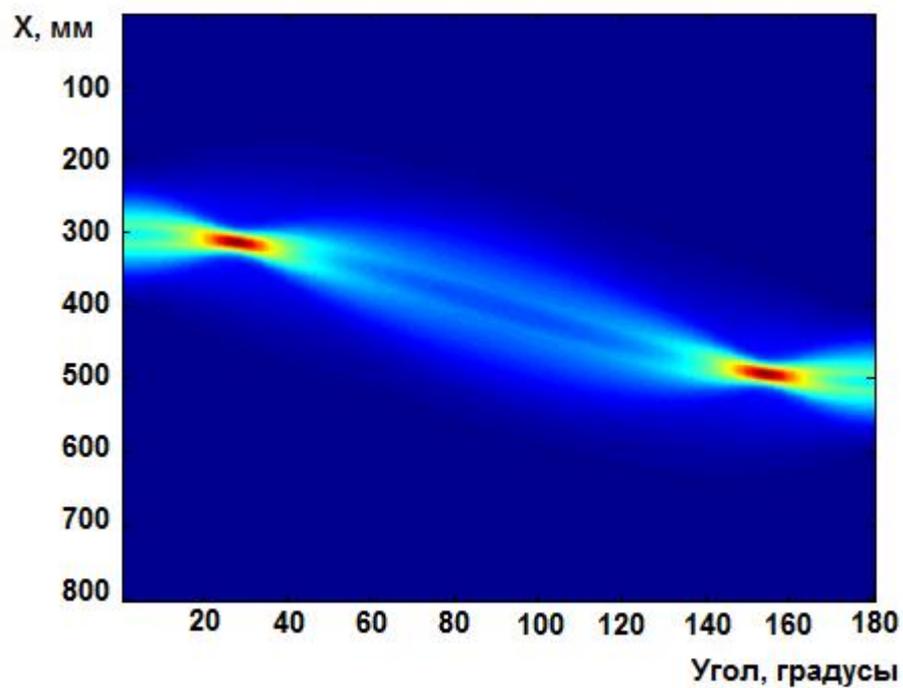


Рис. 3.33. Результат преобразования Радона изображения на фотоприемнике облачного триангулятора, представленного на рис. 3.32.

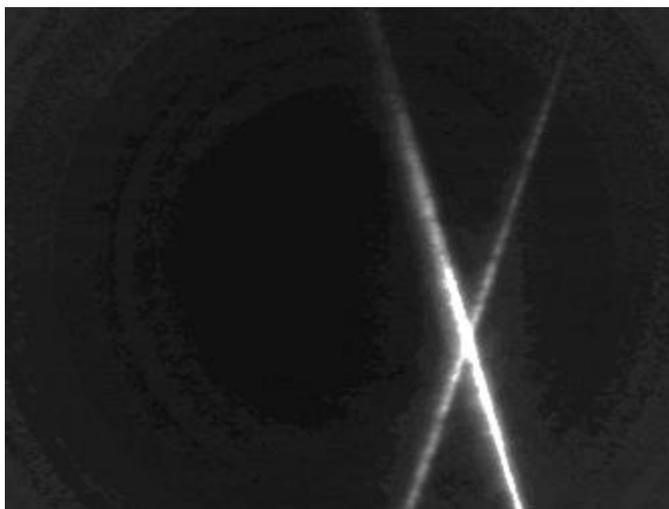


Рис. 3.34. Пример изображения на фотоприемнике облачного триангулятора в условиях измерения горячего проката.

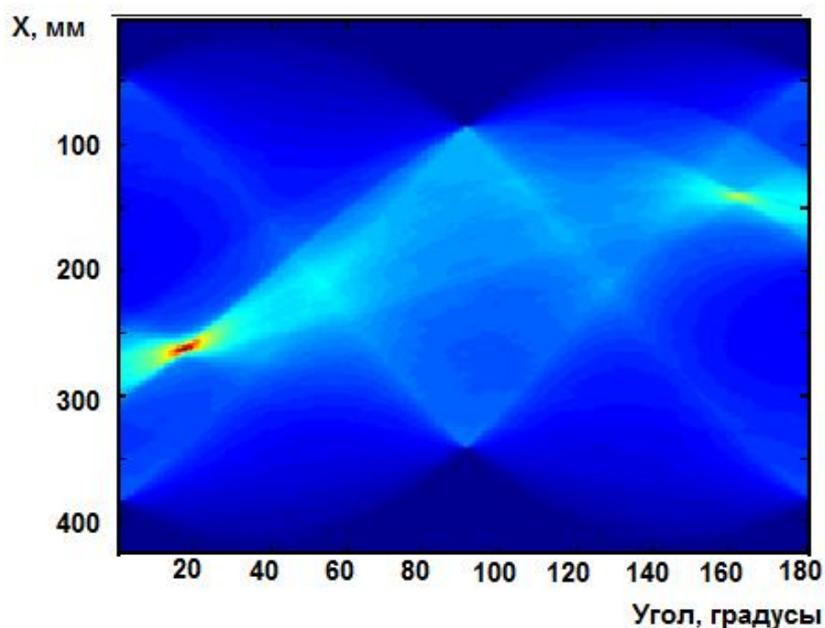


Рис. 3.35. Результат преобразования Радона изображения на фотоприемнике облачного триангулятора от поверхности горячего проката, представленного на рис. 3.34.

Однако из-за алгоритмической сложности реализации преобразования Радона было решено разработать более быстрый алгоритм.



Рис.3.36. Быстрый алгоритм обработки изображений облачного триангулятора.

Предложенный алгоритм основан на следующей последовательности операций: грубой оценке расположения облаков точек, образующих искомые эллипсы их границ; сегментации изображения методом наложения масок, определении уравнений регрессионных линий; определении точки их пересечения и углов наклона регрессионных линий.

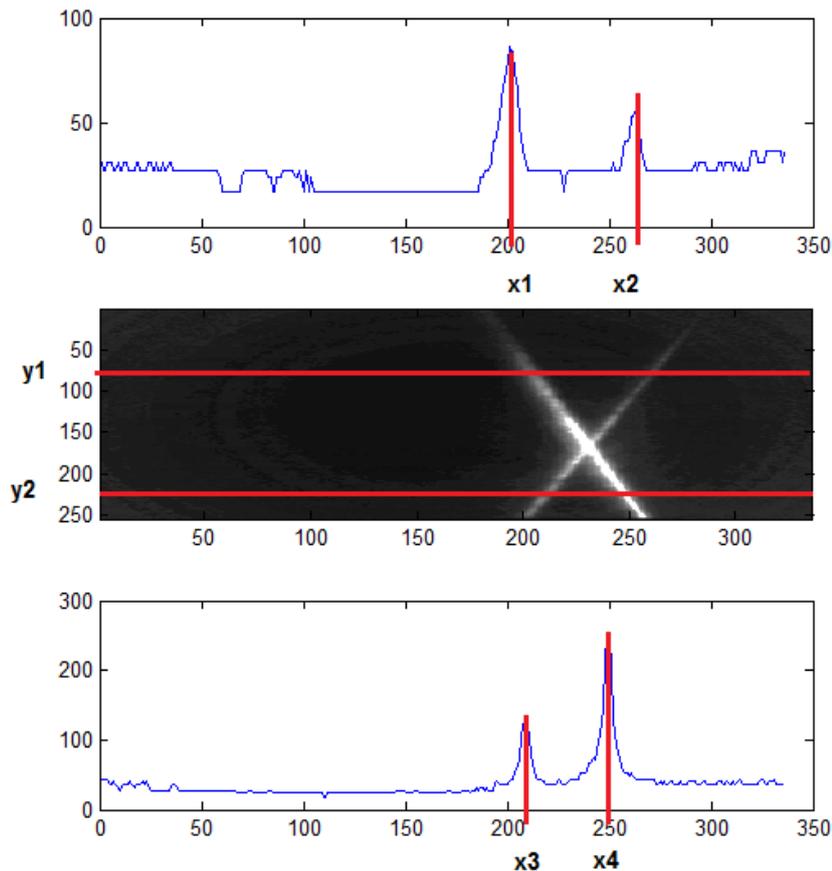


Рис. 3.37. Алгоритм грубой оценки расположения регрессионных линий.

Пространственная засветка модулирована таким образом, что на изображении облака световых точек выглядят расположенными симметрично относительно двух пересекающихся центральных линий L1 и L2. Тогда точки с координатами  $(x1, y1)$  и  $(x4, y2)$  принадлежат линии L1, а точки  $(x2, y1)$ ,  $(x3, y2)$  – L2. Отсюда определяем уравнения прямых по двум точкам, принадлежащим этим прямым:

$$L1: y = a1x + b1 \quad (3.62)$$

$$L2: y = a2x + b2 \quad (3.63)$$

$$a1 = \frac{y1-y2}{x1-x4}, b1 = \frac{x1y2-y1x4}{x1-x4}, \quad (3.64)$$

$$a2 = \frac{y1-y2}{x2-x3}, b1 = \frac{x2y2-y1x3}{x2-x3}. \quad (3.65)$$

В окрестности найденных линий формируем маски таким образом, чтобы расстояние до принадлежащей маске точки не превышало величину, характеризующую ширину облака точек, и превышало расстояние до второй линии:

$$M2 \{(x, y)\} = \left\{ \begin{array}{l} |(x, y), y = a1x + b1| < \varepsilon \\ |(x, y), y = a2x + b2| > \varepsilon \end{array} \right\} \quad (3.66)$$

$$M2 \{(x, y)\} = \left\{ \begin{array}{l} |(x, y), y = a1x + b1| > \varepsilon \\ |(x, y), y = a2x + b2| < \varepsilon \end{array} \right\} \quad (3.67)$$

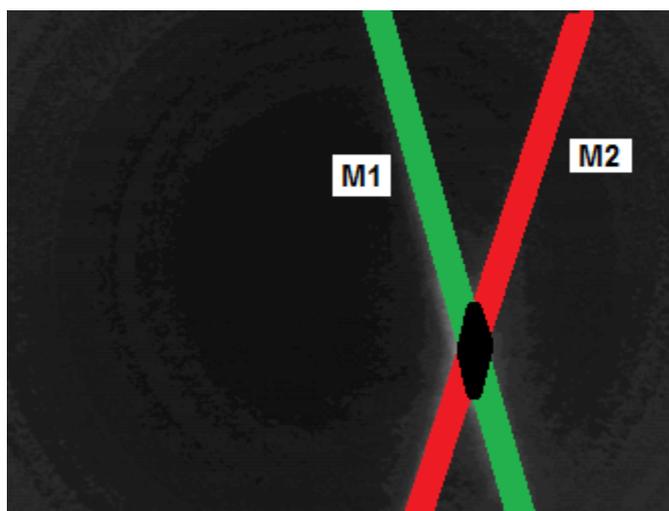


Рис. 3.37. Сегментация изображения облачного триангулятора.

Далее методом линейной регрессии определяют функции центральных прямых L1 и L2. Здесь N1 и N2 – количество точек в множествах M1 и M2 соответственно.

$$L1: y = a1'x + b1' \quad (3.68)$$

$$L2: y = a2'x + b2' \quad (3.69)$$

$$a1' = \frac{\frac{\Sigma_{M1}x^2}{N1} \cdot \frac{\Sigma_{M1}y}{N1} - \frac{\Sigma_{M1}xy}{N1} \cdot \frac{\Sigma_{M1}x}{N1}}{\frac{\Sigma_{M1}x^2}{N1} - \left(\frac{\Sigma_{M1}x}{N1}\right)^2} \quad (3.70)$$

$$b1' = \frac{\frac{\Sigma_{M1}xy}{N1} - \frac{\Sigma_{M1}x}{N1} \cdot \frac{\Sigma_{M1}y}{N1}}{\frac{\Sigma_{M1}x^2}{N1} - \left(\frac{\Sigma_{M1}x}{N1}\right)^2} \quad (3.71)$$

$$a2' = \frac{\frac{\Sigma_{M2}x^2}{N2} \cdot \frac{\Sigma_{M2}y}{N2} - \frac{\Sigma_{M2}xy}{N2} \cdot \frac{\Sigma_{M2}x}{N2}}{\frac{\Sigma_{M2}x^2}{N2} - \left(\frac{\Sigma_{M2}x}{N2}\right)^2} \quad (3.72)$$

$$b2' = \frac{\frac{\Sigma_{M2}xy}{N2} - \frac{\Sigma_{M2}x}{N2} \cdot \frac{\Sigma_{M2}y}{N2}}{\frac{\Sigma_{M2}x^2}{N2} - \left(\frac{\Sigma_{M2}x}{N2}\right)^2} \quad (3.73)$$

Последний шаг алгоритма – вычисление характеристических параметров X,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ :

$$X = \frac{b1' - b2'}{a2' - a1'} \quad (3.74)$$

$$\alpha_1 = \text{atan}(a1') \quad (3.75)$$

$$\alpha_2 = \text{atan}(a2') \quad (3.76)$$

Предложенный алгоритм обработки изображений облачного триангулятора работает гораздо быстрее преобразования Радона и позволяет выполнять измерения методом облачной триангуляции в реальном времени с частотой измерений до 100 Гц на обычных компьютерах.

### **3.3.2. Фильтрация сигналов в облачном триангуляторе**

Для минимизации погрешности измерений в облачном триангуляторе предложено применять многоуровневую пространственную, временную и спектральную фильтрацию информационных сигналов.

Синхронизация импульса излучения и экспозиции фотоприемника обеспечивает минимум фоновой засветки.

Пространственная амплитудно-модулированная засветка дает возможность проведения пространственно-регрессионного анализа на этапе цифровой обработки данных.

Оптическая спектральная фильтрация (УФ фильтрация, ИК фильтрация и узкополосная фильтрация интерференционными фильтрами) обеспечивает узкополосную регистрацию в диапазоне длины волны оптического излучения. В результате на фотоприемник попадает спектральная составляющая фонового сигнала, имеющего спектральный состав близкий к спектру излучения оптического источника.

Цифровой фильтрации подвергается сигнал фотоприемника. Амплитудная фильтрация и пороговая дискриминация позволяют эффективно устраняют влияние фоновой засветки и позволяют выполнять регрессионный анализ с наилучшей точностью.



Рис. 3.38. Фильтрация сигналов в облачном триангуляторе.

Таким образом, с помощью применения многоуровневой фильтрации информационных сигналов, обеспечено измерение геометрических параметров методом облачной триангуляции с рекордно малой погрешностью.

### **3.4. Практическая реализация метода синхронной дифференциальной облачной триангуляции**

Для проверки работоспособности предложенных научных идей выполнена практическая реализация методов синхронной дифференциальной облачной триангуляции для измерения толщины горячего проката

непосредственно на действующем прокатном стане. Принцип работы измерительной системы основан на синхронном измерении двумя облачными триангуляторами расстояния до верхней и нижней поверхности горячего проката. Данные дифференциально обрабатываются в модуле обработки, и специализированными алгоритмами вычисляется толщина проката.

В результате работы облачных триангуляторов будут получены коэффициенты  $(A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2)$ , определяющие положение и наклон верхней и нижней поверхностей измеряемого объекта. Уравнения верхней и нижней плоскостей можно записать в виде:

$$A_1x + B_1y + C_1z + 1 = 0 \quad (3.77)$$

$$A_2x + B_2y + C_2z + 1 = 0 \quad (3.78)$$

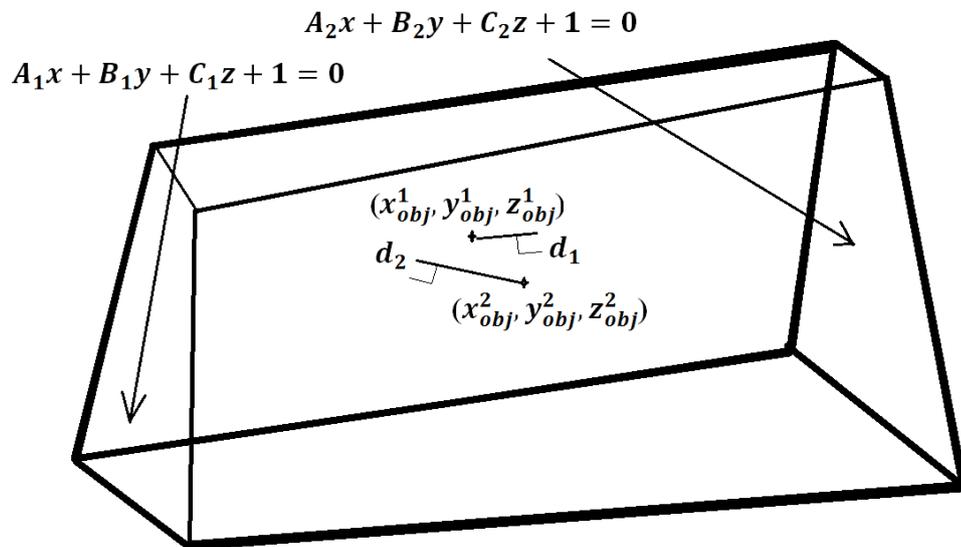


Рис. 3.39. Принцип измерения толщины методом синхронной дифференциальной облачной триангуляции.

В случае неплоской поверхности, наличия деформаций или существенной погрешности измерений, уравнения для верхней и нижней поверхностей будут соответствовать непараллельным плоскостям. Поэтому

оценивать толщину объекта прямым расчетом расстояния между двумя плоскостями нельзя.

Обозначенную проблему можно решить следующим образом. Расстояние от верхней измеренной поверхности до точки на нижней поверхности  $(x_{obj}^2, y_{obj}^2, z_{obj}^2)$ , в которой было сформировано пересечение световых облаков на поверхности проката, можно записать в виде:

$$d_1 = \frac{|A_1 x_{obj}^2 + B_1 y_{obj}^2 + C_1 z_{obj}^2 + 1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}. \quad (3.79)$$

Координаты точки  $(x_{obj}^2, y_{obj}^2, z_{obj}^2)$  определяют из матричного уравнения

$$\begin{pmatrix} x_{obj}^2 \\ y_{obj}^2 \\ z_{obj}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{il1}^1 & B_{il1}^1 & C_{il1}^1 \\ A_{il1}^2 & B_{il1}^2 & C_{il1}^2 \\ A_1 & B_1 & C_1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -D_{il1}^1 \\ -D_{il1}^2 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (3.80)$$

Аналогично вычисляют расстояние от нижней измеренной поверхности до точки на верхней поверхности  $(x_{obj}^1, y_{obj}^1, z_{obj}^1)$ , в которой было сформировано пересечение световых облаков на поверхности объекта:

$$\begin{pmatrix} x_{obj}^1 \\ y_{obj}^1 \\ z_{obj}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{il2}^1 & B_{il2}^1 & C_{il2}^1 \\ A_{il2}^2 & B_{il2}^2 & C_{il2}^2 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -D_{il2}^1 \\ -D_{il2}^2 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (3.81)$$

$$d_2 = \frac{|A_2 x_{obj}^1 + B_2 y_{obj}^1 + C_2 z_{obj}^1 + 1|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}. \quad (3.82)$$

Толщина будет оценена по формуле:

$$H = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (3.83)$$

Результаты измерений отображаются на информационных мониторах подсистемы визуализации в реальном времени и сохраняются в долгосрочных архивах на сервере.

Реализованные облачные триангуляторы адаптированы для работы в производственных условиях и защищены в корпусе оптоэлектронного измерительного модуля. Для надежного функционирования измеритель оснащен подсистемой защиты от инфракрасного излучения, подсистемой активной защиты от брызг, подсистемой термостабилизации и подсистемой самодиагностики.

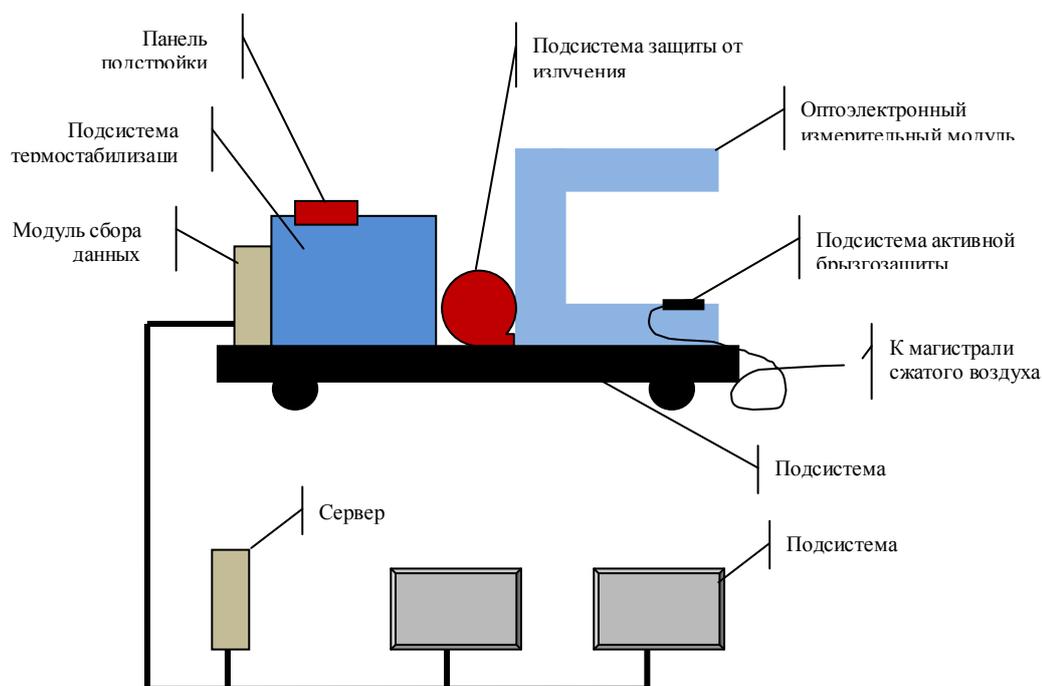


Рис.3.40. Компоненты измерительного комплекса ЛАД-0РЗ, реализующего принципы синхронной дифференциальной облачной триангуляции.

Схема опто-электронного модуля измерительного комплекса представлена на рис.3.41. Показаны: 1 – несущая рама, 2 – наружная часть защитного кожуха, 3 – приемный модуль оптического излучения, 4 – источник оптического излучения, 5 – основание триангулятора, 6 – блок питания электрических подсистем модуля, 7 – модуль синхронизации

источников и приемников оптического излучения, 8 – внутренняя часть защитного кожуха.

Конструкция оптоэлектронного измерительного модуля следующая. Несущим элементом является изотермическая П-образная рама из швеллеров шириной 200 мм и толщиной металла 8 мм. Рама расположена таким образом, что вертикальный участок находится сбоку от линии проката, а две горизонтальные части – сверху и снизу проката. На двух горизонтальных участках, на внутренних поверхностях швеллеров крепятся облачные триангуляционные дальномеры. Дальномеры отъюстированы при помощи пар болтов (стягивающий и толкающий) по углам рамы дальномера.

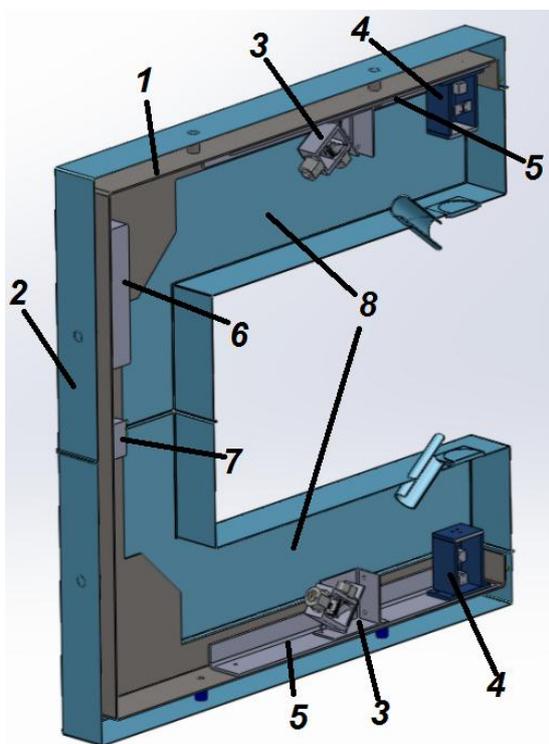


Рис.3.41. Устройство опико-электронного модуля измерительного комплекса.

На вертикальной части расположены основные элементы электроники: блоки питания, блок управления схемой диагностики, разъемы и кабели для датчиков диагностики.

На внешних боковых поверхностях рамы, вдоль вертикальной и горизонтальных частей прикреплены трубки двух жидкостных

термостатирующих контуров. Термостатирующий контур отводит тепло, выделяемое электроникой и обеспечивает изотермичность конструкции, минимизируя эффекты механических деформаций температурными градиентами. Контур заканчивается трубками, выведенными на заднюю стенку корпуса для соединения с термостатом.

К изотермической раме прикреплен составной корпус модуля. Корпус имеет теплоизолирующий слой для защиты электроники и оптики от тепла, передаваемого от горячего проката конвекцией и инфракрасным излучением. К корпусу прикрепляется составной кожух, осуществляющий первичную защиту от излучаемого тепла и брызг от охлаждения валков и гидросдува.

Со стороны прокатного стана оптоэлектронный модуль защищен специальной рамой от возможного механического воздействия горячего проката во время сбоев и нештатных ситуаций. К раме прикреплен также отражательный щит, защищающий от прямого воздействия инфракрасного излучения. Щит имеет отверстие для прохождения засветки и оптического сигнала в приемник.

Созданные облачные триангуляторы формируют пространственно-модулированную засветку на поверхности проката. Проецируемое излучение, рассеянное поверхностью проката, попадает на фотоприемник. Наблюдаемое двумерное проективное распределение пространственной модуляции излучения кодирует информацию о пространственном положении и угловой ориентации измеряемого объекта (рис. 3.34).

Расстояние от верхнего триангулятора до измеряемого проката составляет 1.5 м. Расстояние от нижнего триангулятора до проката - около 0.5 метров. Такие расстояния обусловлены конфигурацией прокатного стана, которая предполагает размещение толщиномера вместо рентгеновского. Кроме того, из-за высокой температуры проката (до 1000°C) и его высокой скорости (5-7 м/с) расположение триангуляторов ближе к прокату может привести к перегреву измерительного комплекса или выходу из строя в случае аварийной ситуации.

Для обеспечения защиты от высокой температуры был использован жидкостный контур охлаждения по всему периметру прибора. Данный контур дополнительно выполнял функцию термостатирования измерительного комплекса для получения стабильных результатов измерения, не зависящих от температуры окружающей среды. Кроме того, корпус измерительного модуля был теплоизолирован с помощью многослойного кожуха, препятствующего быстрому нагреву его поверхности.

В созданном измерительном комплексе облачные триангуляторы выполнены с использованием новейших полупроводниковых лазерных осветителей с длиной волны 445 нм и мощностью 1 Вт. Каждый триангуляционный модуль содержит 2 лазерных излучателя, обеспечивающих формирование пространственной засветки в виде двух пересекающихся световых облаков. Приемники оптического излучения выполнены на основе цифровых фотоприемников DMM 22BUC03-ML, имеющих аппаратный интерфейс синхронизации и позволяющий передавать принимаемые изображения в компьютер с помощью USB интерфейса. Синхронизация облачных триангуляторов выполнена на основе применения специализированного модуля синхронизации, управляемого с компьютера [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Юстировка оптико-электронного модуля измерительного комплекса выполнялась в несколько этапов:

1. Юстировка источников оптического излучения.

Источники оптического излучения состоят из лазерных модулей, которые размещаются в одном корпусе. Лазерные модули размещаются таким образом, чтобы световые пучки выходили из источника оптического излучения, пересекаясь под заданным углом в области перетяжек. Каждый лазерный модуль содержит коллиматор и цилиндрическую линзу. Коллиматор настраивается таким образом, чтобы разместить перетяжку лазерного пучка в области измерения.

Цилиндрическая линза выставляется таким образом, чтобы развернуть лазерный пучок в лазерный нож с нужной пространственной ориентацией.

## 2. Юстировка приемников оптического излучения.

Приемники оптического излучения состоят из цифрового фотоприемника оптического излучения, фокусирующей линзы и набора оптических фильтров, обеспечивающие узкополосную фильтрацию оптического излучения в спектральной области лазерного источника. Юстировка заключается в фокусировке в плоскости приемника оптического излучения изображения тестового объекта, расположенного на расстоянии, на котором будет размещен измеряемый объект.

## 3. Юстировка относительного положения приемника и источника оптического излучения при размещении на основании триангулятора.

Размещение источника и приемника оптического излучения на основании триангулятора осуществляют таким образом, чтобы приемник оптического излучения принимал сигнал от поверхности тестового объекта, расположенного на расстоянии, на котором будет размещен измеряемый объект.

## 4. Юстировка относительного положения триангуляторов при монтаже триангуляторов на несущую изотермическую раму измерительного комплекса.

Юстировка заключается в относительном размещении триангуляторов на несущей раме таким образом, чтобы источники оптического излучения накладывались друг на друга в области измерения. Это достигается предусмотренными юстировочными креплениями триангуляторов на несущей раме, что позволяет выставить оптические оси триангуляторов с необходимой точностью.

В результате юстировки измерительный комплекс настраивается для корректной работы. Для получения экспериментальных результатов измерения необходимо провести калибровку измерительного комплекса.

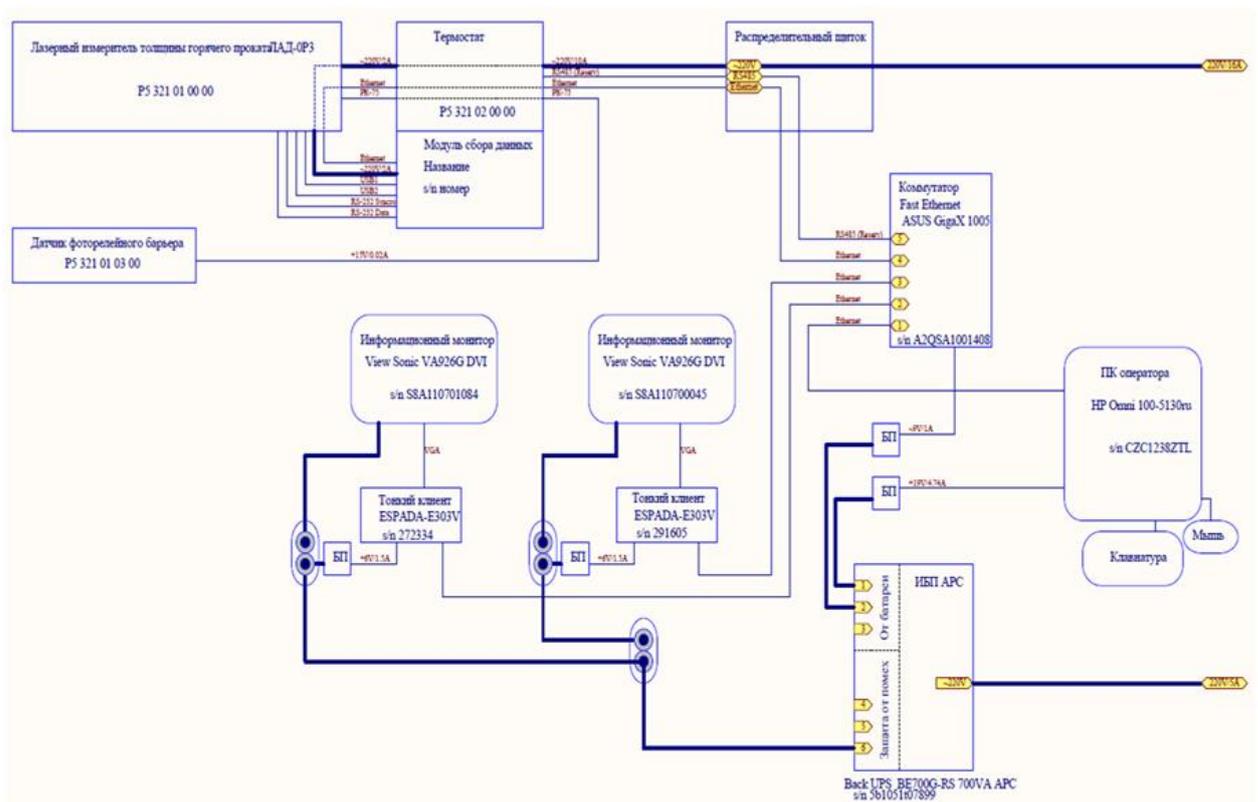


Рис. 3.42. Принципиальная схема электрических соединений опико-электронного измерительного модуля.

Электронная часть опико-электронного модуля включает в себя блок питания модуля, блок синхронизации лазерных источников и приемников оптического излучения, блок диагностики, блок измерения температуры проката, USB коммутаторы.

На рис. 3.42 показана схема электрических соединений опико-электронного измерительного модуля.

Модуль синхронизации генерирует сигналы для синхронизации лазерных источников и приемников оптического излучения и синхронизации верхнего и нижнего триангулятора между собой. Схема соединения модуля синхронизации с устройствами системы представлена на рис. 3.43.

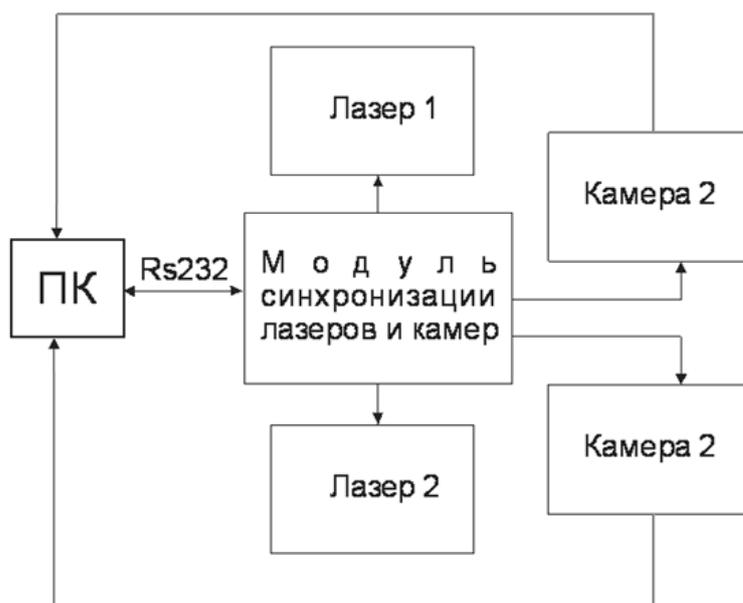


Рис. 3.43. Схема работы модуля синхронизации измерительного комплекса.

Модуль синхронизации формирует управляющие импульсы прямоугольной формы, по которым запускается экспозиция камер и включаются/выключаются лазеры. Для реализации модуля был использован микроконтроллер Atmega16 фирмы Atmel. Микроконтроллер ATmega16 – 8-битный контроллер на основе КМОП логики. Контроллер соединен с модулем обработки данных (ПК) аппаратным протоколом RS-232. На базе аппаратного протокола был написан интерфейс верхнего уровня, позволяющий программному комплексу, запущенному на персональном компьютере модуля обработки данных, задавать контроллеру значения параметры управляющих сигналов. Времена срабатывания управляющих сигналов отсчитывались с помощью встроенных в контроллер 16-битных аппаратных счетчиков в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Временная диаграмма следования импульсов показана на рисунке 3.44. Блок отсчитывает промежутки времени  $T$  и в течение этих промежутков формирует прямоугольные импульсы, в течение которых производят съемку камеры. В момент  $t_1$  открываются затворы камер, съемка ведется до момента времени  $t_1 + \Delta t_1$ . Также модуль формирует прямоугольные импульсы для

лазеров. Лазеры начинают излучать в момент времени  $t_2$  и заканчивают в момент времени  $t_2+\Delta t_2$ . Значения параметров  $t_1$ ,  $t_1+\Delta t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_2+\Delta t_2$  выбирались таким образом, чтобы съемка камер начиналась раньше работы лазеров и заканчивалась после того как лазеры перестанут излучать. В ходе работы лазер 2 пропускал несколько периодов и запускался в один раз из  $N$  периодов. Моменты, когда лазер 2 пропускает периоды указаны пунктирной линией на диаграмме. Значения параметров управляющих сигналов  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $T$  и  $N$  задаются программно с персонального компьютера по реализованному программному протоколу на основе протокола LIN.

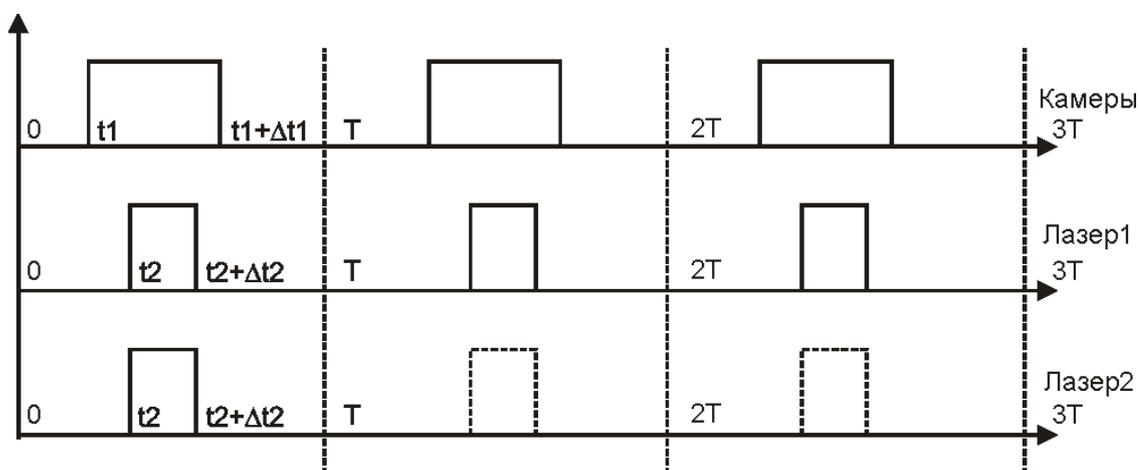


Рис. 3.44. Диаграмма импульсов модуля синхронизации.

Таким образом, функциональность модуля синхронизации позволяет реализовать аппаратную синхронизацию лазерных источников и приемников оптического излучения в широком диапазоне функциональных особенностей аппаратной реализации источников и приемников оптического излучения.

### 3.4.1. Метод оптической синхронизации приемников оптического излучения

Большое распространение получили цифровые КМОП и ПЗС матрицы, не имеющие режима внешней электрической синхронизации. При прочих равных параметрах, стоимость фотоприемника без внешней синхронизации

по сравнению с фотоприемником с внешней синхронизацией оказывается в десятки раз меньшей. Это связано с широким применением дешевых фотоприемников без внешней синхронизации в бытовых веб-камерах, мобильных телефонах и т.д., в отличие от фотоприемников с внешней синхронизацией, спрос на которые среди производителей цифровой и измерительной техники существенно ниже. В связи с этим, разработка метода синхронизации фотоприемников, не предусматривающего электронную синхронизацию крайне актуальна для снижения стоимости измерительных систем.

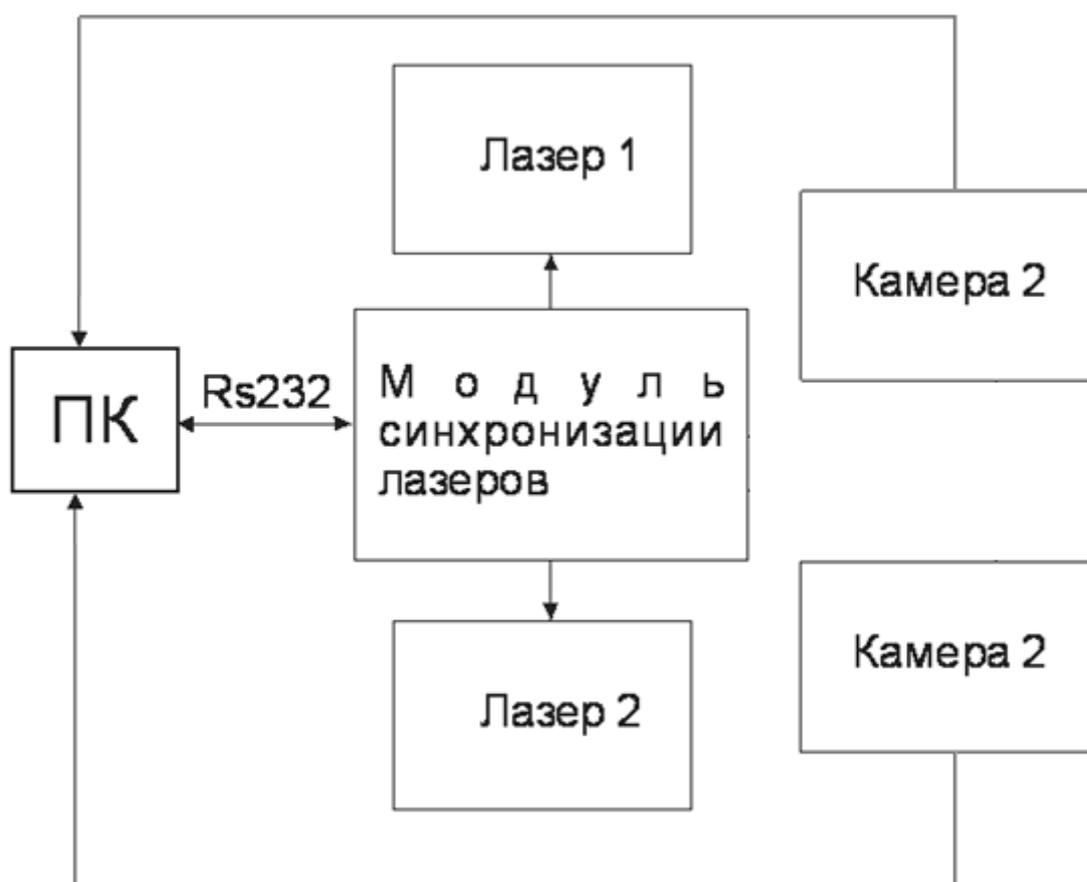


Рис.3.44. Схема работы модуля синхронизации при оптической синхронизации фотоприемников.

Принцип оптической синхронизации заключается в следующем. Фотоприемники имеют постоянно открытый электронный затвор: время

экспозиции равно межкадровому периоду. Модуль синхронизации управляет модулями излучения. Модули излучения работают в 2 режимах: в режиме измерения и в режиме синхронизации. Режим синхронизации необходим для корректной синхронизации фотоприемников.

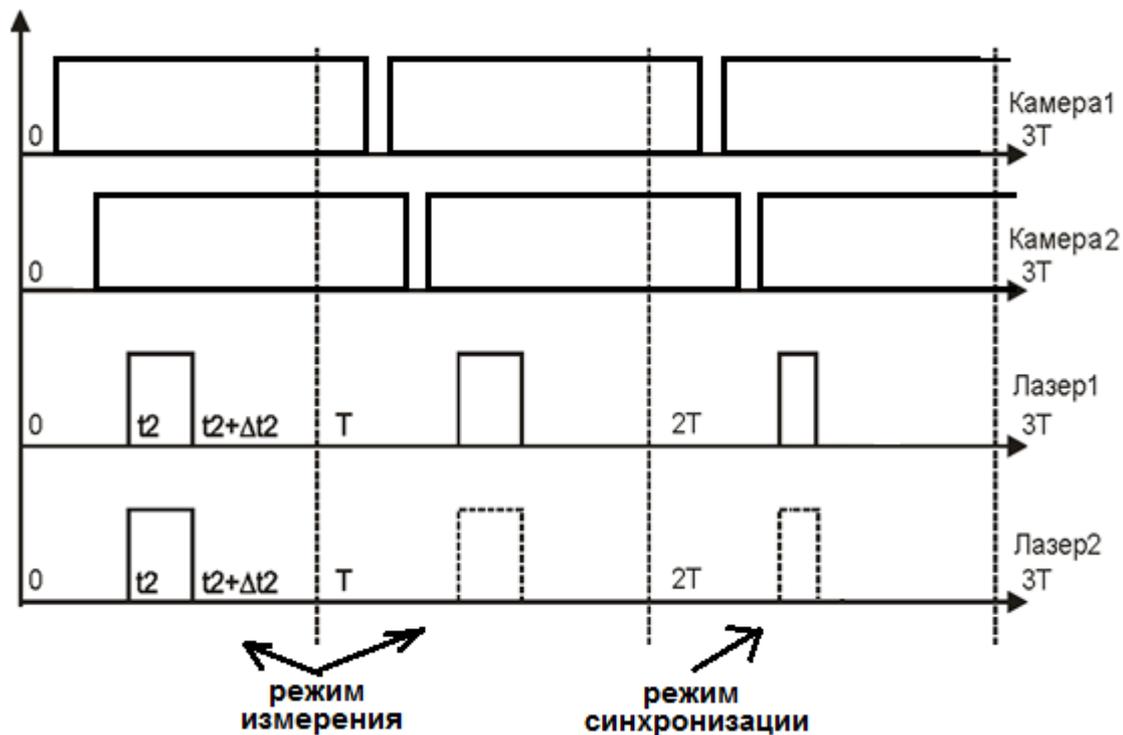


Рис. 3.45. Диаграмма импульсов при оптической синхронизации фотоприемников.

Очевидно, что для реализации предложенного метода необходимо применять фотоприемники, позволяющие уменьшить или совсем исключить эффект перекрытия затвора, который присутствует в фотоприемниках, работающих в режиме внешней синхронизации.

В бытовой технике и измерительных комплексах широко используют ПЗС-матрицы [Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.], представляющие собой специализированные аналогово-цифровые интегральные микросхемы, содержащие матрицы светочувствительных кремниевых фотодиодов. В основе ПЗС-матрицы лежит технология приборов с зарядовой связью, которая позволяет считывать электрический потенциал путем сдвига заряда от одного элемента к другому.

На сегодняшний день доступны несколько типов широко применяемых матриц: полнокадровые матрицы, матрицы с буферизацией кадра и матрицы с буферизацией столбцов.

Полнокадровые матрицы имеют наиболее простую архитектуру. Данные матрицы нуждаются в механическом затворе, перекрывающем световой поток после окончания экспонирования. Скорость считывания кадра в такой схеме ограничена скоростью работы как параллельного, так и последовательного регистров сдвига. Необходимо перекрывать световой поток, идущий с объектива, до завершения процесса считывания, поэтому интервал между экспонированием зависит от скорости считывания. Очевидно, что такие матрицы сложно применять в качестве фотоприемников при реализации оптической синхронизации дифференциального облачного триангулятора.

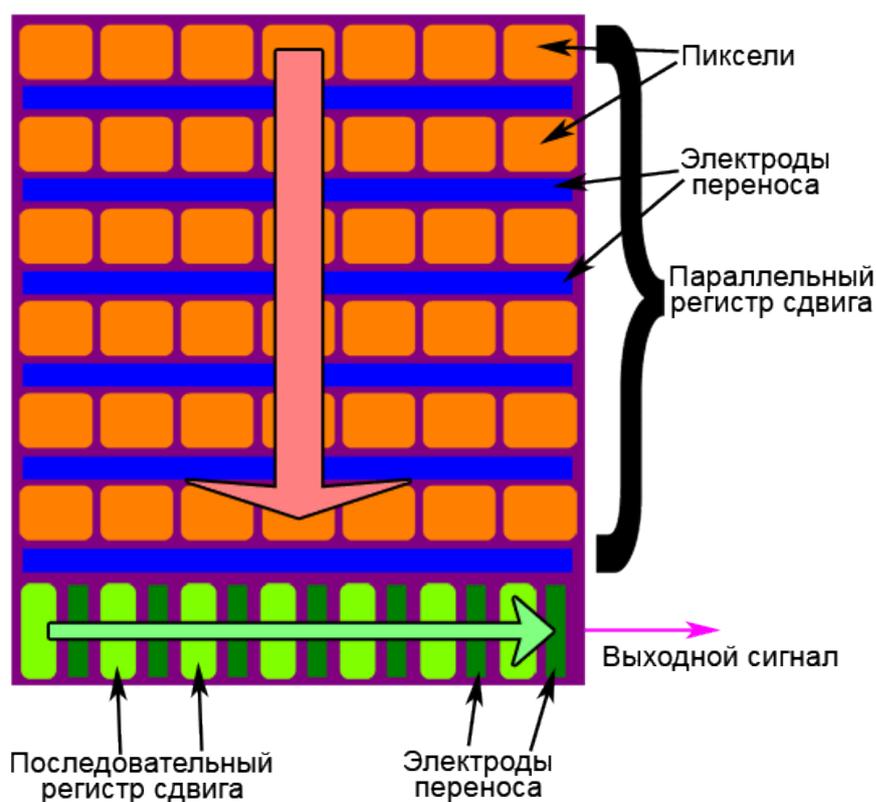


Рис. 3.46. Структура полнокадровой матрицы.

Матрицы с буферизацией кадра содержат буферный параллельный регистр рядом с фоточувствительным зарядовым регистром. Данный тип матрицы обладает существенно более быстрой скоростью считывания видеопотока. Тем не менее, данный тип матрицы, как и полнокадровые матрицы нуждается в механическом затворе, что не позволяет работать в режиме непрерывного видео, который необходим для реализации оптической синхронизации дифференциального облачного триангулятора.

Матрицы с буферизацией столбцов отличаются наличием последовательного регистра сдвига рядом с каждым столбцом. За один рабочий цикл светочувствительный параллельный регистр сдвига передает фототоки буферному параллельному регистру посредством «сдвига зарядов по горизонтали», после чего светочувствительная часть снова готова к экспонированию. Далее выполняется построчный «сдвиг зарядов по вертикали» буферного параллельного регистра, нижняя строка которого является входом последовательного регистра сдвига матрицы.

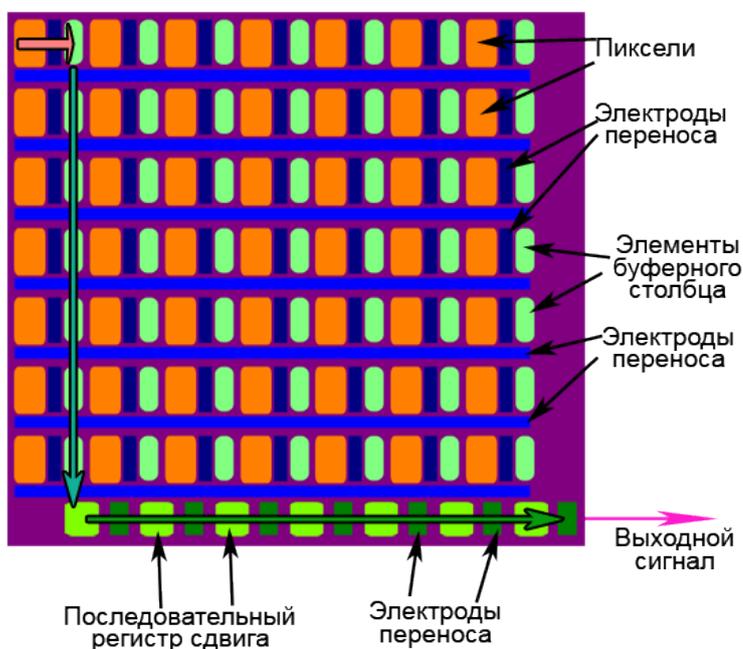


Рис. 3.47. Структура матрицы с буферизацией столбцов.

Перенос заряда матрицы в буферный параллельный регистр сдвига занимает малый интервал времени и перекрывать световой поток механическим затвором нет необходимости. С другой стороны, необходимое время экспонирования, как правило, сравнимо со временем считывания всего буферного параллельного регистра. Интервал между экспонированием доводят до минимума, в результате поток данных в современных фотоприемниках формируют с частотой от 30 кадров в секунду и выше. Данная архитектура ПЗС - матриц перспективна для реализации оптической синхронизации дифференциального облачного триангулятора, поскольку предусматривает возможность осуществления непрерывной экспозиции фотоприемника.

Не менее перспективными для реализации метода оптической синхронизации облачных триангуляторов являются КМОП-фотоприемники, в которых используют координатную адресацию к каждому элементу зарядового рельефа, полученного в результате фотогенерации.

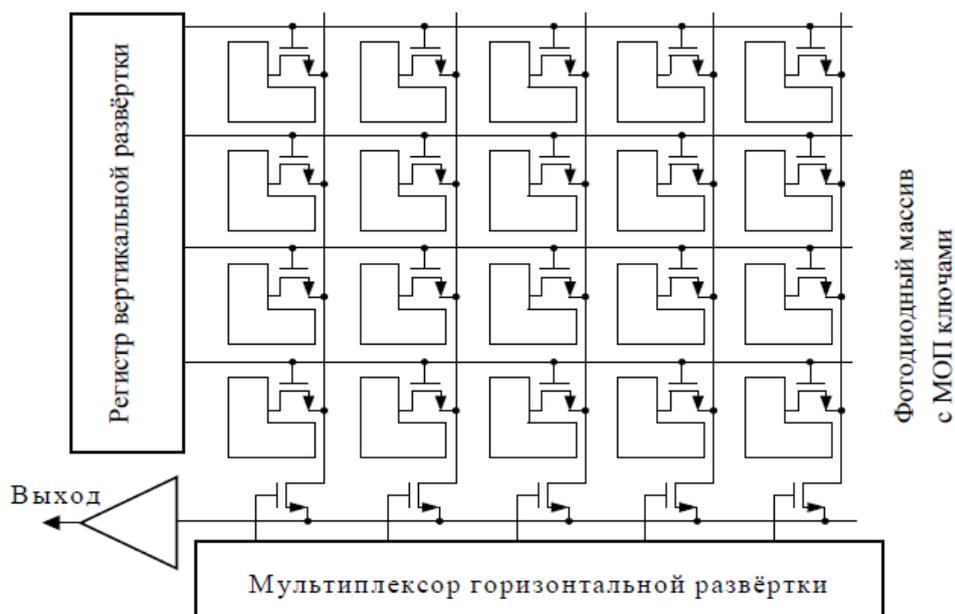


Рис. 3.48. Структурная схема КМОП-фотоприемника первого поколения.

Параллельное развитие технологий КПОМ и ПЗС - фотоприемников привело к достаточно похожим функциональным характеристикам данных фотоприемников в бытовой технике.

Таким образом, для реализации метода оптической синхронизации облачных триангуляторов перспективно использовать ПЗС матрицы с буферизацией столбцов и КПОМ - фотоприемники, поддерживающие прогрессивную развертку и непрерывный сбор видеoinформации.

Обработка данных измерителя толщины на основе облачной триангуляции с оптической синхронизацией фотоприемников во многом схожа с обработкой данных измерителя толщины с аппаратной синхронизацией фотоприемников и излучателей. Главное отличие заключается в предварительной обработке изображений и синхронизации кадров.

Специфика применения ПЗС матриц с буферизацией столбцов или КМОП фотоприемников, работающих в режиме непрерывного сбора видеoinформации при короткой длительности светового импульса заключается в том, что зарегистрированные кадры будут содержать два изображения. При наличии небольшого «темного» времени фотоприемника, соответствующего закрытому затвору, на изображении неизбежно будет присутствовать темный сектор, на котором отсутствует изображение рассеянного объектом излучения.

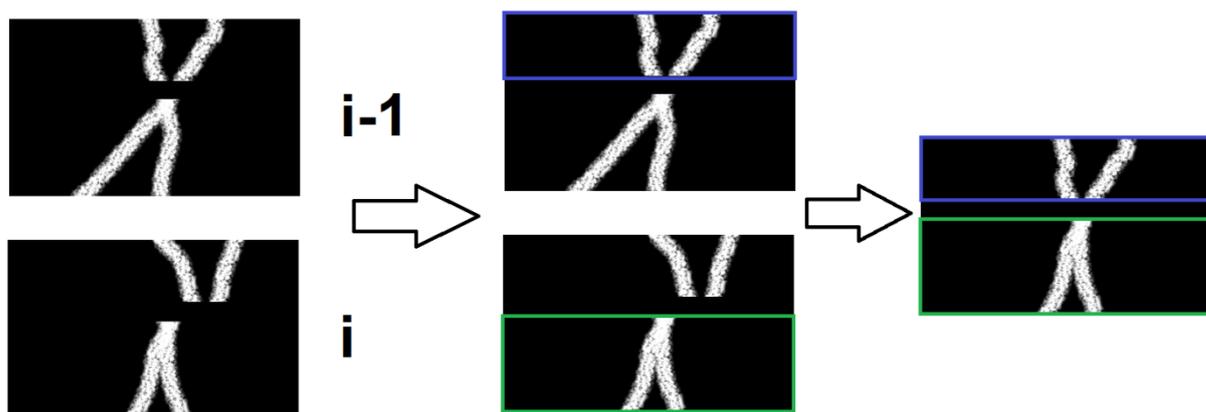


Рис. 3.49. Алгоритм предварительной обработки изображений на фотоприемниках при их оптической синхронизации.

Для формирования изображения облачного триангулятора, необходимо найти темную зону на изображении, которая разделяет текущий и предыдущий кадр. В случае отсутствия изображения засветки, рассеянной исследуемым объектом (например, когда объекта в зоне измерения нет), весь кадр будет восприниматься темной зоной и алгоритм обработки данных вернет состояние «отсутствие сигнала».

Синхронизация кадров выполняется с помощью формирования пространственно-модулированной засветки с особым пространственным распределением интенсивности.

В представленной работе применялась засветка в виде двух световых облаков в форме пересекающихся эллипсоидов, вытянутых по одному направлению. В качестве кадра синхронизации применялась засветка в виде трех эллипсоидов, пересекающихся в одной точке. В качестве фотоприемников применены фотоприемные модули бытовых веб-камер Logitech c910 Pro, обеспечивающих интерфейс взаимодействия с компьютеров на базе USB и программный интерфейс, реализующий интерфейс DirectShow.

На рис.3.50 представлено изображение, принимаемое с фотоприемника облачного триангулятора при измерении горячего движущегося проката. Кадр содержит две части двух разных кадров. Верхняя часть соответствует измерительному кадру, нижняя часть соответствует кадру синхронизации. После сведения кадров будут получены изображения, на которых изображение структурированной засветки соответствует одной экспозиции источника оптического излучения.

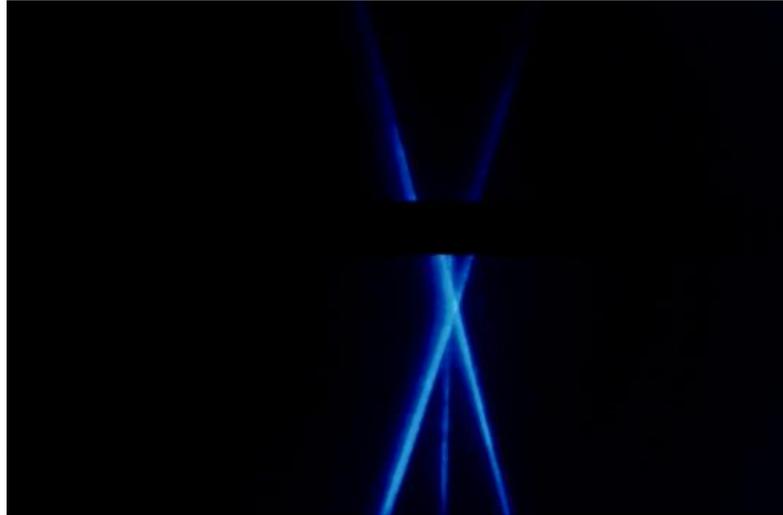


Рис. 3.50. Пример изображения на фотоприемнике при оптической синхронизации.

На рис. 3.51. представлено наблюдаемое изображение при измерительном кадре. На рисунке представлено наблюдаемое изображение при кадре синхронизации. В данном случае, алгоритм селекции по типу кадра выполняет поиск световых линий и по их количеству принимает решение о типе наблюдаемой засветки (2 линии – измерительный кадр, 3 линии – кадр синхронизации).



Рис. 3.51. Результат предварительной обработки изображений при оптической синхронизации. Пример изображения измерительного кадра.

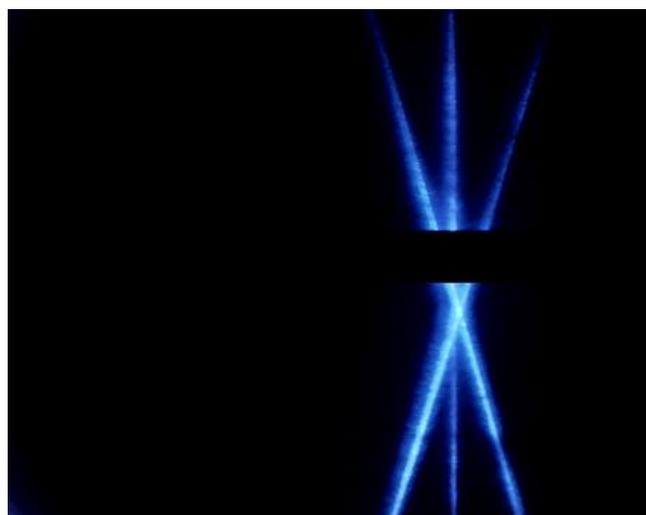


Рис. 3.52. Результат предварительной обработки изображений при оптической синхронизации. Пример изображения кадра синхронизации.

Изображение измерительного кадра, представленное на рисунке 3.52 обрабатывают алгоритмами, аналогичными алгоритмам обработки данных измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции с

аппаратной синхронизацией. Основное отличие обработки изображений в методе дифференциальной облачной триангуляции с оптической синхронизацией фотоприемников по сравнению с методом дифференциальной облачной триангуляции с аппаратной синхронизацией фотоприемников заключается в обязательном присутствии темной полосы, соответствующей «темному» времени на изображении. Причем положение этой полосы меняется от кадра к кадру. В результате постоянное смещение данной полосы отрицательно влияет на погрешность определения характеристических параметров наблюдаемого распределения интенсивности. Это связано с тем, что в итоговом множестве световых точек, по которым выполняют регрессионный анализ, отсутствуют различные сегменты анализируемого изображения.

### **3.5. Программное обеспечение измерительного комплекса**

В процессе работы измерительного комплекса программное обеспечение выполняется на двух компьютерах: компьютер модуля измерения 1 и сервер 4. В процессе работы измерительного комплекса программное обеспечение 2 модуля измерения принимает данные от приемников оптического излучения триангуляторов измерительного комплекса, значения температуры измерительного комплекса в нескольких критических точках, температуру проката, обрабатывает принимаемые данные в реальном времени, вычисляет толщину, сохраняет результаты измерения в архиве и формирует файл данных специализированного формата для визуализации результатов измерения.

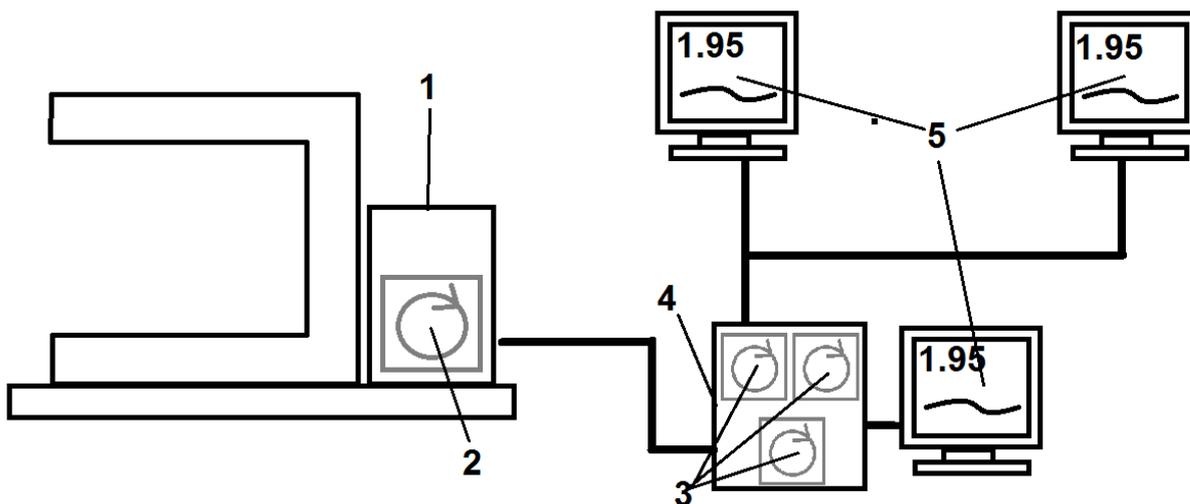


Рис. 3.53. Блок-схема программного обеспечения измерительного комплекса.

Программное обеспечение 3 сервера считывает данные из файла специализированного формата, формируемого программным обеспечением модуля измерения и визуализирует их на мониторе 5 в реальном времени. К серверу подключены три монитора (один подключен непосредственно к системному блоку сервера, два подключены через сетевой интерфейс на основе технологии «тонкий клиент»). Для каждого монитора на сервере работает сессия, в которой исполняется программное обеспечение.

### 3.5.1. Внутренняя архитектура программного обеспечения измерительного комплекса

Внутренняя архитектура программного обеспечения может быть разбита на следующие модули: обработки данных, взаимодействия с фотоприемником, сбора диагностических параметров, калибровки, модуль обработки изображений, конфигурационных параметров, визуализации, сохранения результатов и модуль сохранения диагностических параметров.

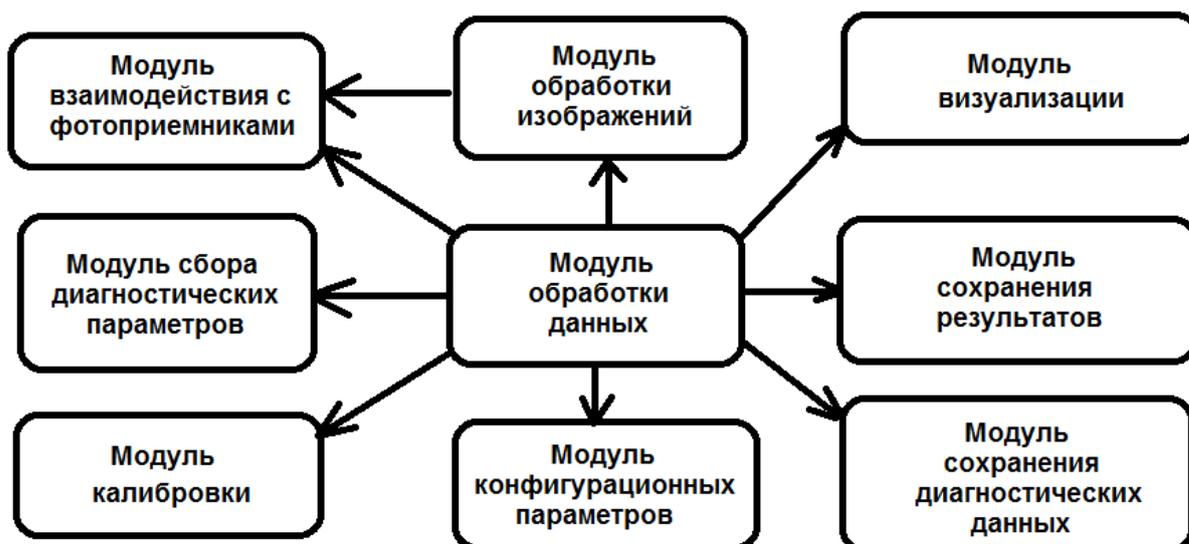


Рис. 3.54. Архитектура программного обеспечения измерительного комплекса.

Модуль взаимодействия с фотоприемником реализует интерфейс взаимодействия и обеспечивает синхронную регистрацию изображений от верхнего и нижнего облачного триангуляторов.

Модуль обработки изображений реализует быстрый алгоритм обработки данных облачного триангулятора. Он обеспечивает определение координат и пространственных искажений наблюдаемой пространственно-модулированной засветки.

Модуль сбора диагностической информации реализует интерфейс взаимодействия с блоком диагностики измерительного комплекса, который выполняет сбор диагностической информации о состоянии измерительного комплекса.

Модуль калибровки содержит калибровочные данные, позволяющие вычислять толщину на основе получаемых фотоприемниками данных.

Модуль конфигурационных параметров предоставляет доступ к конфигурационным данным измерительного комплекса

Модуль визуализации реализует интерфейс взаимодействия с подсистемой визуализации измерительного комплекса и передает

информацию об измеренной толщине в реальном времени и о внутреннем состоянии измерительного комплекса.

Модуль сохранения результатов измерения и диагностических данных обеспечивают сохранение информации для дальнейшего анализа.

### 3.5.2. Подсистема визуализации результатов измерений в реальном времени

Подсистема визуализации результатов измерений в реальном времени предназначена для отображения результатов измерения толщины горячего проката в реальном времени на различных участках технологической цепочки. Визуализация результатов осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения выводом графического изображения на мониторы.

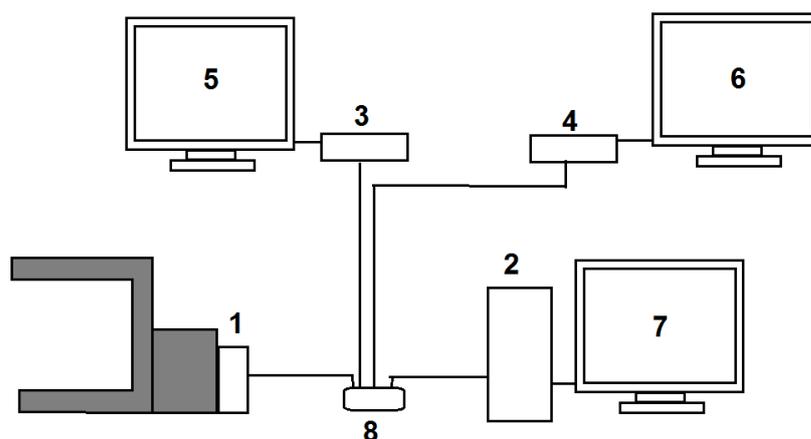


Рис. 3.55. Схема подсистемы визуализации результатов измерений.

Подсистема визуализации результатов измерений состоит из сервера 2, двух аппаратных тонких клиентов 3,4 (специализированное устройство, принципиально отличное от компьютера, аппаратный тонкий клиент не имеет жёсткого диска и использует специализированную локальную ОС, основная задача которой организация сессии с сервером для работы) и трех мониторов 5,6,7. К каждому тонкому клиенту и серверу подключен монитор, с помощью которого осуществляется визуализация результатов измерения.

Тонкие клиенты взаимодействуют с сервером и фактически передают на монитор, подключенный к тонкому клиенту, графическое окно запущенной на сервере программы.



Рис. 3.56. Внешний вид монитора визуализации результатов измерений.

Сервер 2 в реальном времени считывает результаты измерения из файлового хранилища модуля обработки данных 1. Результаты измерения обрабатываются и визуализируются для пользователей на мониторах 5,6,7.



Рис. 3.57. Визуализация результатов измерения толщиномером.

Взаимодействие тонких клиентов с сервером и сервера с модулем обработки данных 1 реализовано на основе компьютерной сети Ethernet, протокол IP4. Взаимодействие всех устройств осуществляется через коммутатор 8.

### **3.5.3. Модуль обработки данных**

Модуль обработки данных расположен в непосредственной близости к оптоэлектронному измерительному модулю и реализован с использованием промышленного компьютера и специализированного программного обеспечения.

Компьютер через протокол USB получает видеосигнал с цифровых камер триангуляторов и обрабатывает его при помощи программного обеспечения. Сначала информация видеопотока каждого дальномера преобразуется в данные расстояния от данного дальномера до ближайшей поверхности проката, затем данные о расстояниях с двух дальномеров преобразуются в информацию о толщине проката (см. Приложение И).

Результаты обработки отправляются через Ethernet-соединение с сервером приложения на информационные мониторы.

Кроме того, модуль сбора и обработки взаимодействует с табло подстройки, регистрируя и внося в вычисления поправки подстроечных коэффициентов.

Модуль сбора и обработки информации обменивается информацией с блоком управления диагностической схемой, получает, обрабатывает и архивирует данные о температурах в различных точках оптоэлектронного модуля, напряжениях питания внутренних схем, и данные со встроенного оптического пирометра о температуре горячего проката.

### 3.5.4. Телеметрическая сеть измерительного комплекса

Ниже представлена схема комплекса, отображающая взаимодействие модулей и подсистем комплекса в процессе измерения толщины горячего проката. Используемые сокращения на схеме:

И1 – лазерный источник верхнего триангулятора;

П1 – приемник оптического излучения верхнего триангулятора;

И2 – лазерный источник нижнего триангулятора;

П2 – приемник оптического излучения нижнего триангулятора;

СИНХ – блок синхронизации лазерных источников и приемников оптического излучения;

БДС – блок диагностики комплекса;

ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики температуры, расположенные в критических точках измерительного комплекса;

ПИР – блок измерения температуры, бесконтактно измеряющий температуру проката;

МОД – модуль обработки данных;

ОП – панель оператора;

ПК – сервер, выполняющий функции визуализации результатов измерения;

ТК1, ТК2 – аппаратные тонкие клиенты, выполняющие функции визуализации результатов измерения.

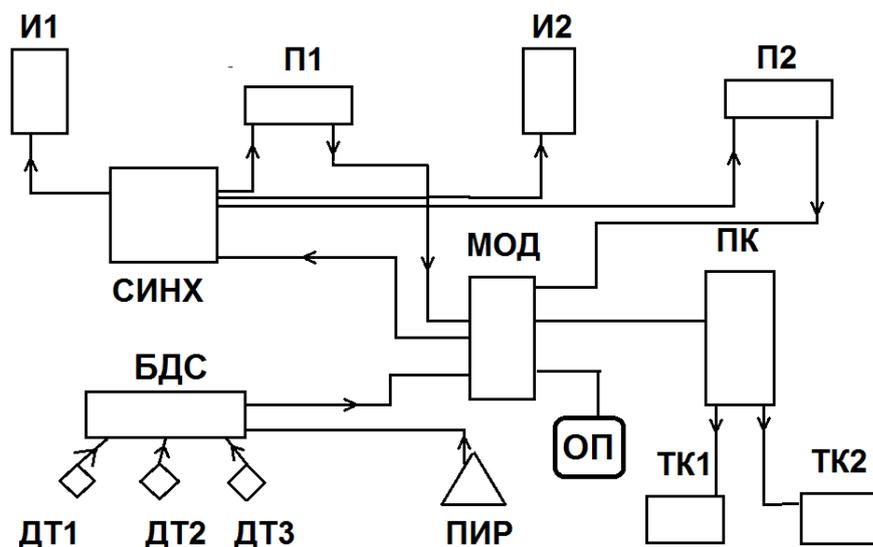


Рис. 3.58. Телеметрическая сеть измерительного комплекса.

Модуль обработки данных МОД управляет частотой синхросигналов, которые генерирует синхронизатор СИНХ. Синхросигнал подается на лазерные источники И1,И2 и приемники П1,П2. Лазерные источники инициируются и одновременно с ними приемники оптического излучения открывают цифровые фотозатворы. В результате верхний и нижний триангуляторы производят синхронные измерения.

Изображения, полученные приемниками оптического излучения, передаются модулю обработки данных. Параллельно с данными от триангуляторов на вход модуля обработки данных поступают пакетные данные от блока диагностики БДС. Блок диагностики проводит циклический опрос датчиков температуры ДТ1, ДТ2, ДТ3, расположенных на изотермической раме измерительного комплекса, и опрос данных пирометра ПИР, измеряющего температуру горячего проката.

Модуль обработки данных обрабатывает принимаемые данные, вычисляет толщину проката, сохраняет данные в хранилище и предоставляет результаты измерения серверу ПК. Сервер ПК считывает результаты измерения модуля обработки данных и визуализирует их на мониторе и аппаратных тонких клиентах ТК1 и ТК2 с помощью специального ПО.

Передача данных от блока диагностики к модулю обработки данных реализована с помощью интерфейса RS-485 на базе протокола MOD BUS. Управление синхронизатором реализовано с помощью интерфейса RS-232 на базе протокола LIN. Данные от приемников оптического излучения поступают в модуль обработки данных по шине USB по специализированному протоколу. Взаимодействие модуля обработки данных и сервера реализовано на основе сети Ethernet, протокол IPv4. Взаимодействие сервера и тонких клиентов реализовано на основе сети Ethernet, протокол IPv4.

Разработанная структура телеметрической сети измерительного комплекса отличается расширяемостью и позволяет достаточно эффективно контролировать и изменять структуру подсистем измерительного комплекса.

### **3.6. Термостатирование оптического измерительного модуля**

Измерительный комплекс для измерения толщины горячего проката предназначен для работы в условиях горячего металлургического производства. Условия работы измерительного комплекса осложнены крайне тяжелыми температурными воздействиями: перепады температуры воздуха в горячем цехе могут достигать 80 градусов в течение суток, а температура непосредственно в зоне измерения, где расположен измерительный комплекс изменяется на несколько сотен градусов в течение минуты.

Устойчивость работы триангуляционного измерителя зависит от расстояния между источником и приемником излучения. В случае температурных флуктуаций всего измерительного комплекса из-за температурного расширения будут изменяться расстояния между оптическими элементами триангуляционного датчика в соответствии с законом линейного теплового расширения:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T). \quad (3.84)$$

В результате будут наблюдаться флуктуации показаний измерительного комплекса. Таким образом, для прецизионной работы триангуляционных методов в условиях горячей металлургии необходимо обеспечить температурную стабильность измерительного комплекса на требуемом высоком уровне.

Для снижения погрешности измерений оптико-электронных систем применяют пассивные методы борьбы **[Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.]** с тепловыми воздействиями (алгоритмическая термокомпенсация, тепловое шунтирование элементов, усовершенствования конструкции и др.). Однако в самых тяжелых эксплуатационных условиях только пассивных способов недостаточно **[Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. В этих случаях применяют активные методы, заключающихся в создании одно- или многоконтурных реверсивных систем терморегулирования **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Для обеспечения требуемых метрологических характеристик измерительного комплекса была создана подсистема термостатирования, обеспечивающая стабилизацию температуры измерительного комплекса. Подсистема термостатирования включает в себя пассивный и активный модули, обеспечивающие снижение теплообмена между окружающей средой и триангуляционными модулями измерительного комплекса и стабилизацию температуры измерительного комплекса в процессе работы.

Пассивный модуль подсистемы термостатирования обеспечивает теплоизоляцию измерительного комплекса и снижает теплообмен между измерительными модулями и окружающей средой. Схема работы пассивного модуля приведена на рис. 3.59. Измерительный комплекс выполняет измерение толщины горячего проката (ГП) с помощью оптических модулей (ОМ), расположенных в верхней и нижней части измерительного комплекса. Он состоит из теплоизоляционного кожуха (ТК), защитного кожуха (ЗК), блока принудительной циркуляции воздуха (ПЦ). Теплоизоляционный кожух

обладает пониженной теплопроводностью и защищает оптические модули от радиационного и конвективного нагрева. Температуру оптических модулей и изотермического основания стабилизирует жидкостный термостат (ЖТ) активной подсистемы термостабилизации. Защитный кожух обеспечивает защиту измерительного комплекса от нагрева через излучение от поверхности проката. Принудительная циркуляция воздуха в канале между защитным и теплоизоляционным кожухами обеспечивает существенное снижение конвективного теплообмена между защитным и теплоизоляционным кожухами за счет циркуляции воздуха с температурой равной средней температуре в помещении.

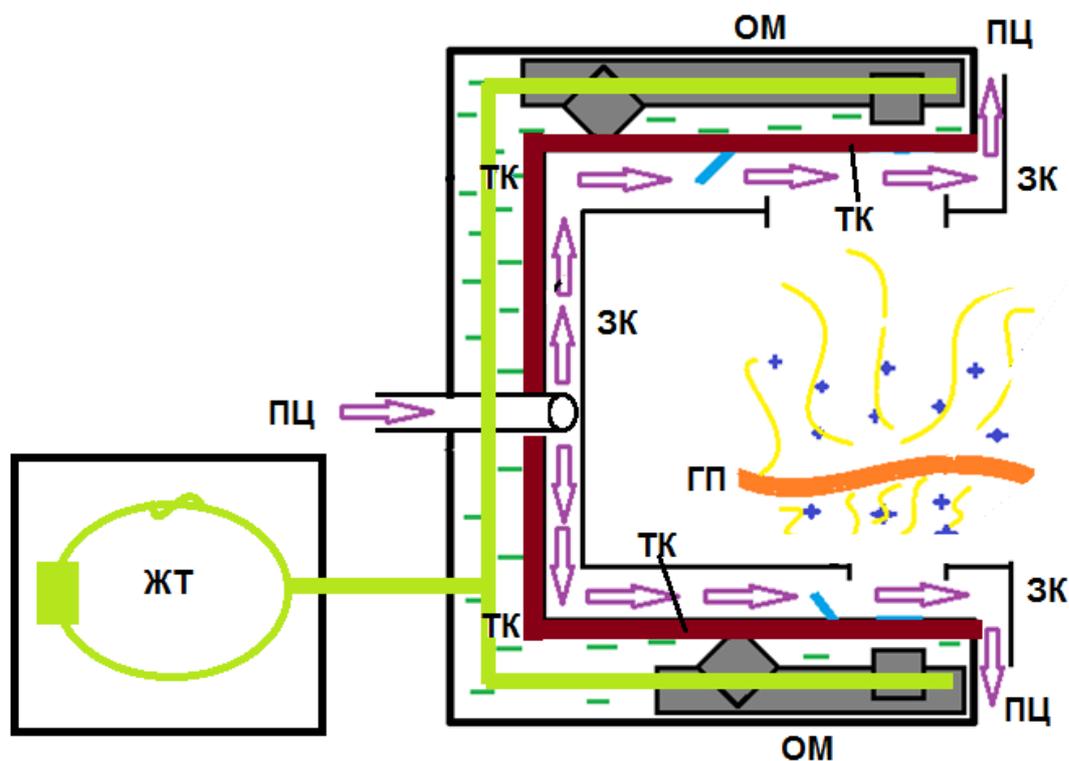


Рис.3.59. Функциональная схема подсистемы термостабилизации.

Основная функция активного модуля подсистемы термостабилизации измерительного комплекса – обеспечение постоянной температуры измерительного комплекса в процессе его работы. Основной функциональный блок - активный жидкостный термостат. Стабилизация

температуры достигается путем непрерывной циркуляции жидкого теплоносителя заданной температуры через контур теплообмена измерителя. Температура теплоносителя поддерживается на заданном уровне при помощи внешнего термостата, работающего по алгоритму пропорционально-интегрального-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора) [**Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**]. Уравнение работы ПИД-регулятора:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{K_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \left. \frac{de(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=t}, \quad (3.85)$$

где  $U(t)$  – регулирующее воздействие,  $e(t)$  – рассогласование (ошибка регулирования),  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – постоянные коэффициенты,  $t$  – время. Разностная схема для реализации уравнения (3.79) представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} U^k &= S_p^k + S_I^k + S_D^k \\ S_p^k &= K_p \cdot e^k \\ S_I^k &= S_I^{k-1} + \frac{e^k + e^{k-1}}{2} \cdot \frac{\Delta t}{K_I}, \\ S_D^k &= K_D \cdot \frac{e^k - e^{k-1}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.86)$$

где  $U^k$  - регулирующее воздействие на  $k$ -ом шаге,  $\Delta t$  - время между двумя последовательными шагами,  $e^k$  - рассогласование на  $k$ -ом шаге.  $S_p^k$ ,  $S_I^k$ ,  $S_D^k$  - пропорциональное, интегральное и дифференциальное слагаемые соответственно.

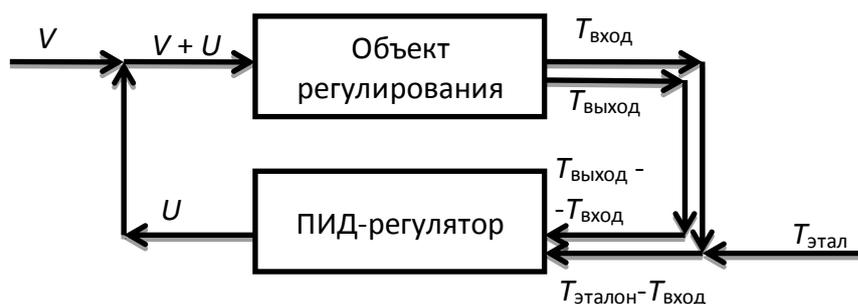


Рис. 3.60. Схема работы алгоритма регулирования.

Работа алгоритма реализуется по представленной на рис. 3.60 схеме. С объекта регулирования снимают показания датчиков температур  $T_{\text{вход}}$  и  $T_{\text{выход}}$ . Пользователем задается требуемая температура термостата  $T_{\text{эталон}}$ . На вход регулятора подаются значения  $\Delta T_1 = T_{\text{выход}} - T_{\text{вход}}$  и  $\Delta T_2 = T_{\text{эталон}} - T_{\text{вход}}$ , пространственный градиент внутри термостата и рассогласование текущей и заданной температур. Регулятор температуры, учитывая величину пространственного градиента (сравнивая его с допустимой погрешностью), вычисляет регулирующее воздействие по формуле (3.79). Таким образом, воздействие регулятора на объект сводится к тому, что  $\Delta T_1 \rightarrow 0$  и  $\Delta T_2 \rightarrow 0$ .

Схема размещения и подключения показана на рис. 3.61.

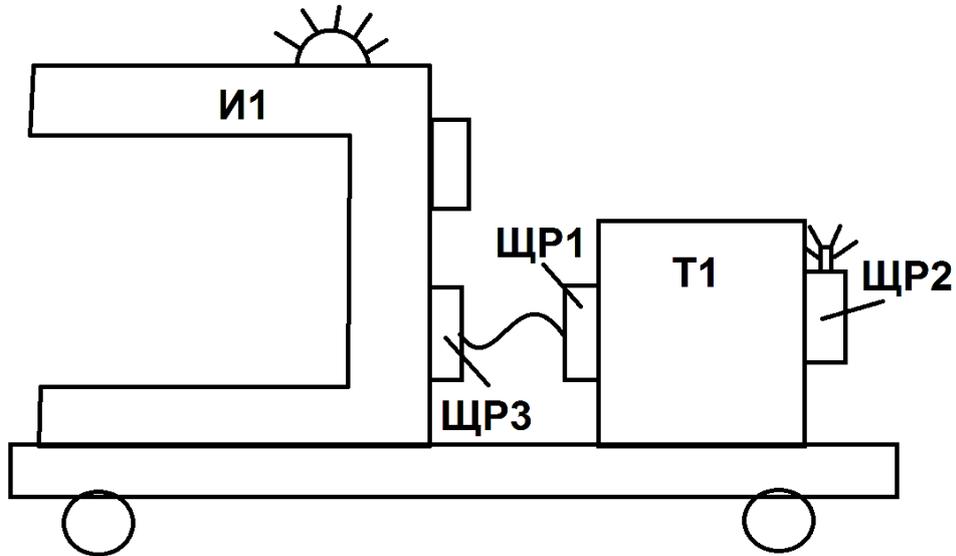


Рис. 3.61. Схема размещения и подключения термостата.

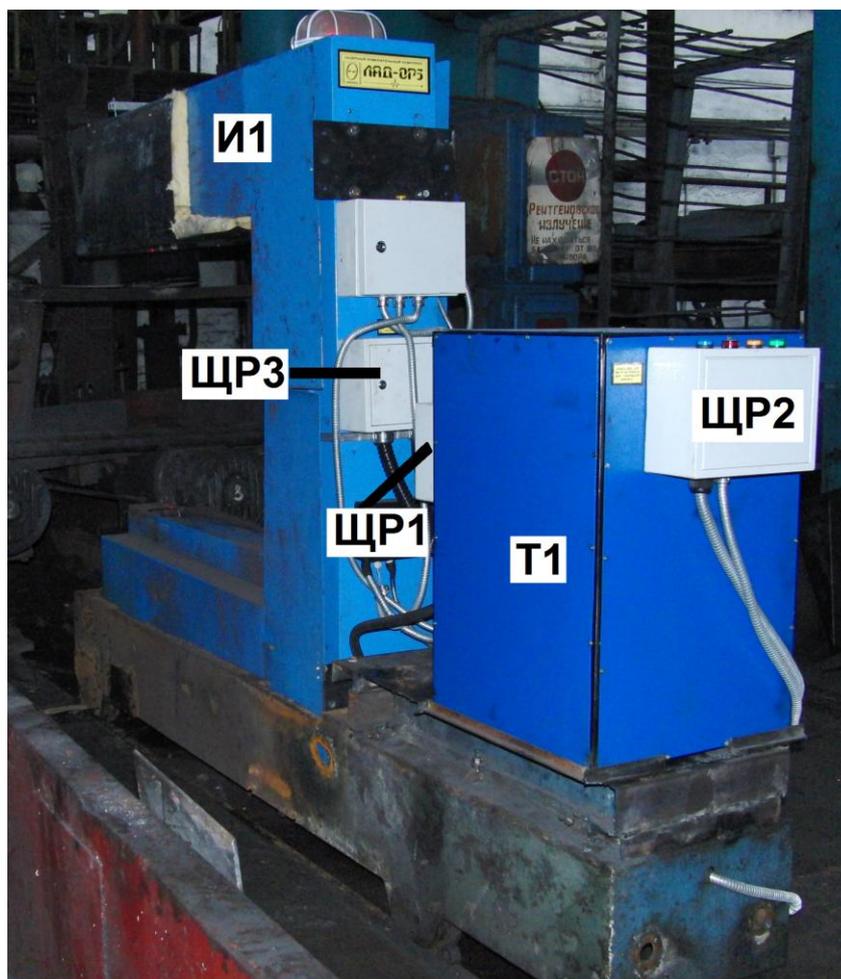


Рис. 3.62. Внешний вид термостата.

Термостат (Т1) и измеритель (И1) являются независимыми системами, которые связаны через контур циркуляции теплоносителя. Замыкание контура теплоносителя осуществляется гибкими шлангами через муфтовые разъемы размещенные в распределительных щитах (ЩР1) и (ЩР3). Элементы управления и индикации режимов работы термостата размещены в распределительном щите (ЩР2).

Термостат оснащен модулем нагрева и охлаждения циркулирующего теплоносителя. Нагрев теплоносителя осуществляется с использованием двояного термоэлемента общей мощностью 4 кВт. Охлаждение осуществляется с помощью изолированного проточного теплообменника холодной воды, встроенного в накопительный бак термостата. Гидравлическая схема термостата показана на рис. 3.64.

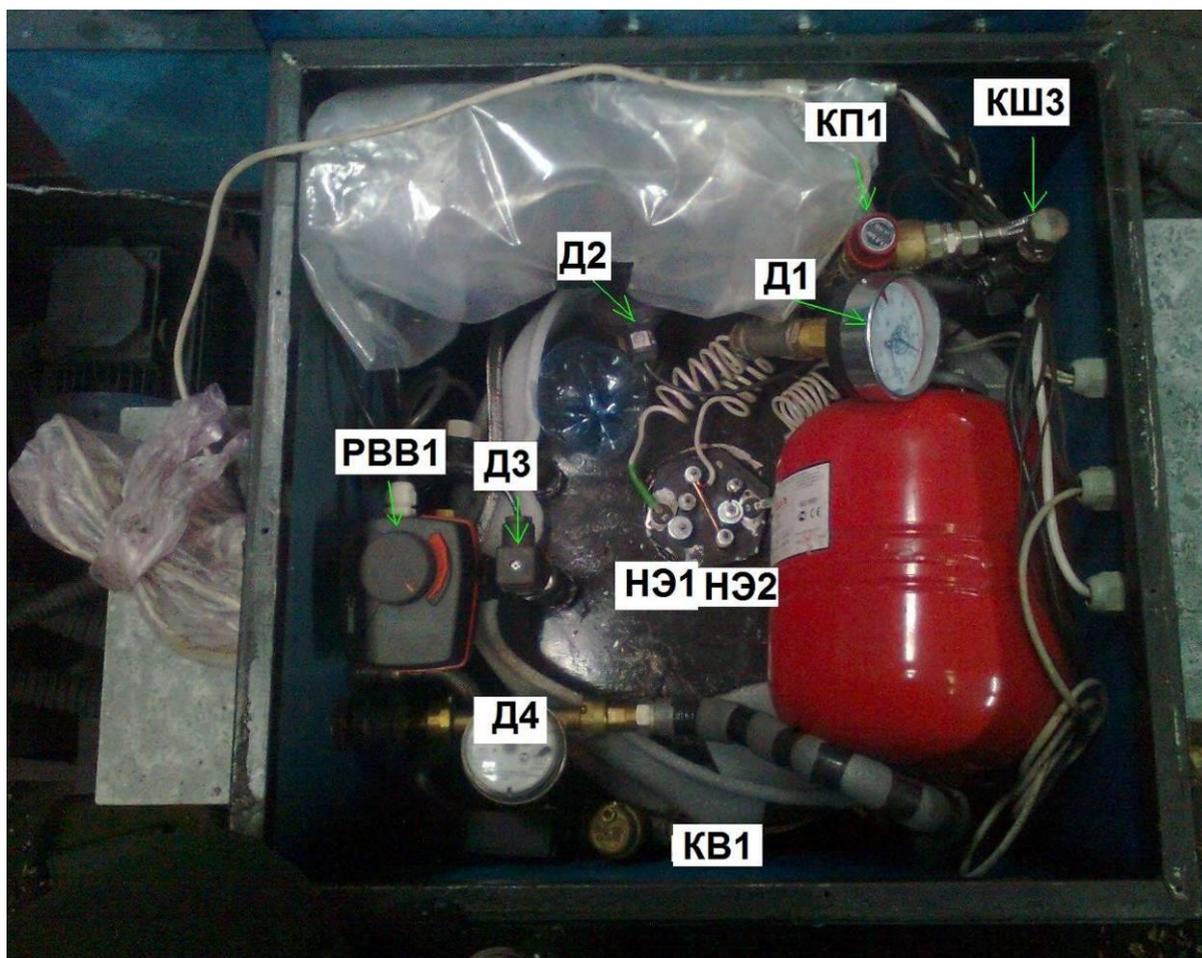


Рис. 3.63. Основные узлы термостата.

Управление режимами работы термостата осуществляется с использованием программируемого контроллера, размещенного внутри корпуса термостата. К контроллеру подключены следующие узлы термостата: насос циркуляционный (НЦ1), реле потока (РП1), датчик температуры теплоносителя (Д2), датчик температуры проточной холодной воды (Д3), контроллер расхода холодной воды (РРВ1), электрические нагреватели (НЭ1) и (НЭ2).

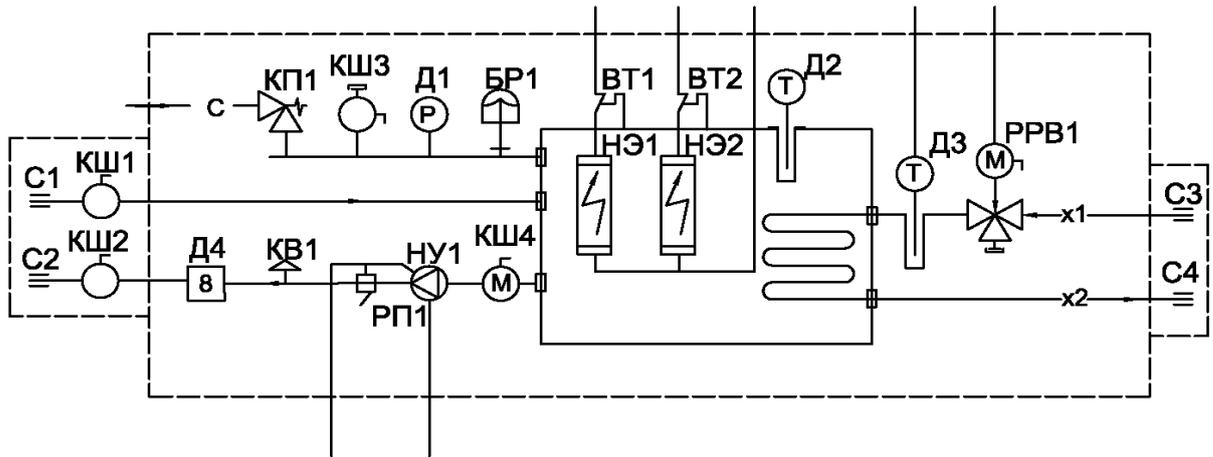


Рис. 3.64. Схема термостата гидравлическая.

Циркуляционный насос (НЦ1) поддерживает постоянную циркуляцию теплоносителя. Насос имеет встроенное реле потока (РП1), для защиты от неправильной эксплуатации.

Нагрев теплоносителя осуществляется при помощи электрических нагревателей (НЭ1) и (НЭ2), цепи которых подключены через защитные температурные выключатели. Выключатели защитные (ВТ1) и (ВТ2) предназначены для аварийного отключения нагревателей при перегреве корпуса накопительного бака выше температуры 80°C.

Охлаждение теплоносителя осуществляется проточной холодной водой, расход которой регулируется электронным управляемым контроллером (РРВ1). Подключение контура холодной воды производится через соединения (С3) и (С4), размещенных в щите (ЩР1).

Бак расширительный (БР1) и защитный клапан (КП1) осуществляют компенсацию и защиту при температурных расширениях теплоносителя и накопительного бака. Манометром (Д1) производится контроль избыточного давления. Пополнение накопительного бака осуществляется через вход запорного крана (КШ3). Регулировка уровня заполнения визуальная, по столбу жидкости в канале крана (КШ3). Краны запорные (КШ1), (КШ2),

(КШ4) нормально открыты, закрытое состояние используется при обслуживании термостата. Кран (КШ3) нормально закрыт, открытое состояние используется при обслуживании термостата.

Разработанный и реализованный термостат обеспечивает стабилизацию температуры оптических измерительных модулей в узком диапазоне температур. Тем не менее, полностью исключить флуктуации температур оптических модулей в условиях горячей металлургии крайне сложно.

Для решения обозначенной проблемы предложен метод активной компенсации показаний измерительного комплекса в зависимости от температуры триангуляционных измерительных модулей. В качестве компенсирующей функции была выбрана линейная зависимость. Поскольку температура триангуляционных модулей за счет применения активной термостабилизации будет изменяться в малом диапазоне значений (не более 5 градусов), то для компенсации можно использовать линейные функции. Результаты проверки подсистемы стабилизации представлены ниже.

### **3.6.1. Диагностика работы подсистемы термостабилизации измерительного комплекса**

Для контроля состояния измерительного комплекса в процессе работы на оптических измерительных модулях комплекса были установлены измерители температуры. На графиках 3.65 – 3.68 представлена динамика температур верхнего измерительного модуля и нижнего измерительного модуля в течение 16 суток. Данные получены в цехе горячего проката ОАО Новосибирского металлургического завода им. Кузьмина в период 13.11.2012 – 30.11.2012. Размещение температурных датчиков показано на рис.3.69.

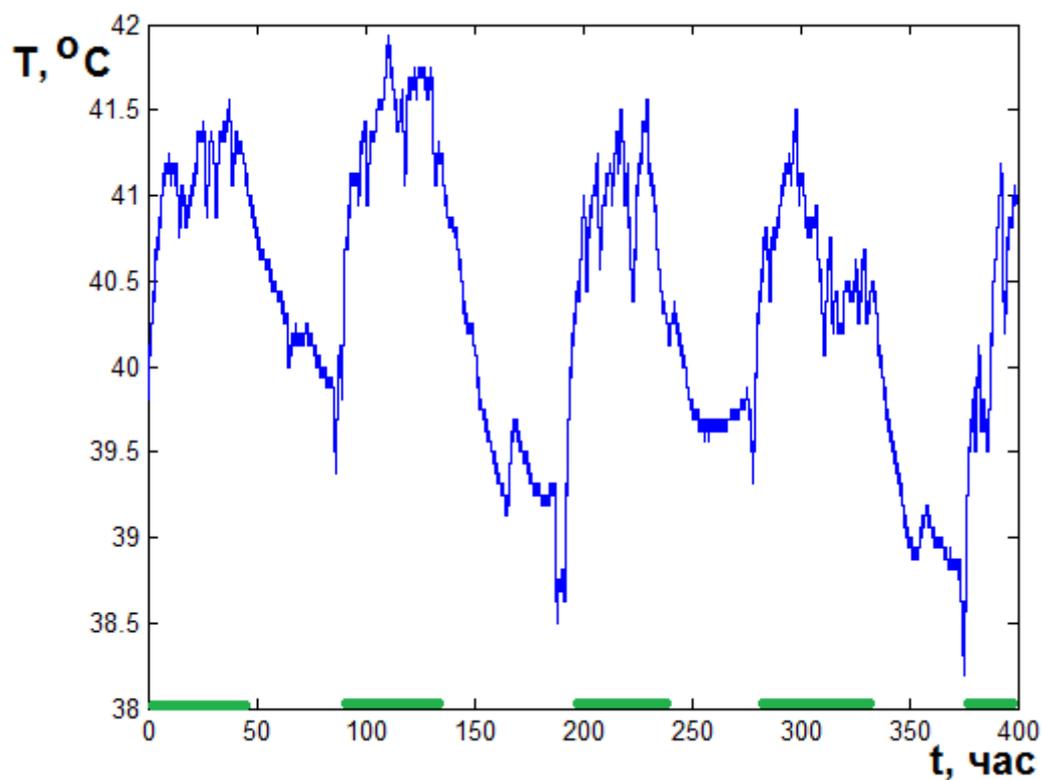


Рис. 3.65. Динамика температуры верхнего измерительного модуля на прокатном стане в цехе горячего проката в течение 16 суток (зеленые линии показывают время горячей смены).

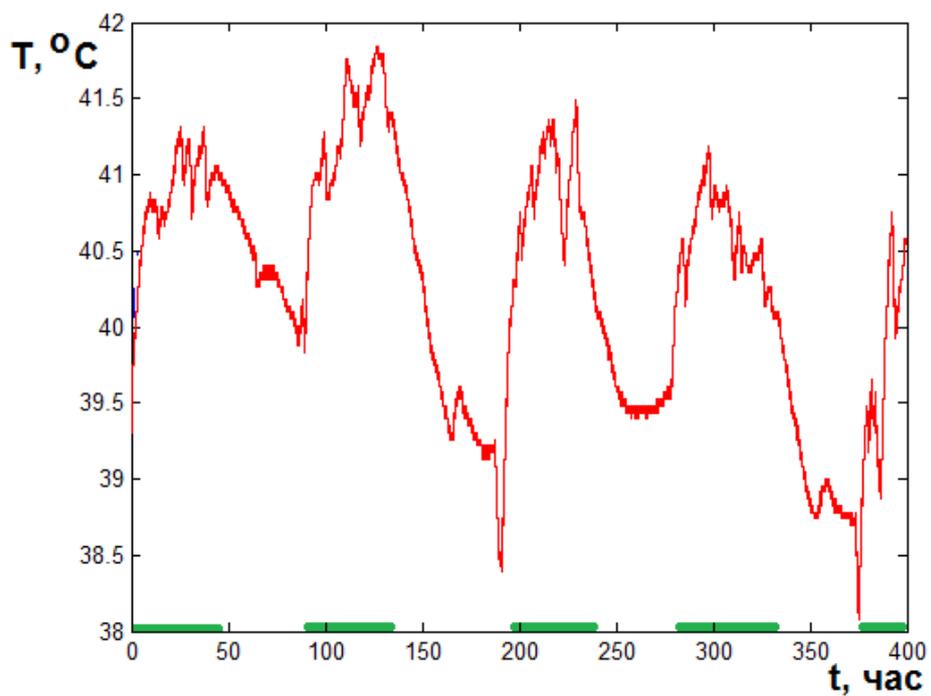


Рис. 3.66. Динамика температуры нижнего измерительного модуля на прокатном стане в цехе горячего проката в течение 16 суток (зеленые линии показывают время горячей смены).

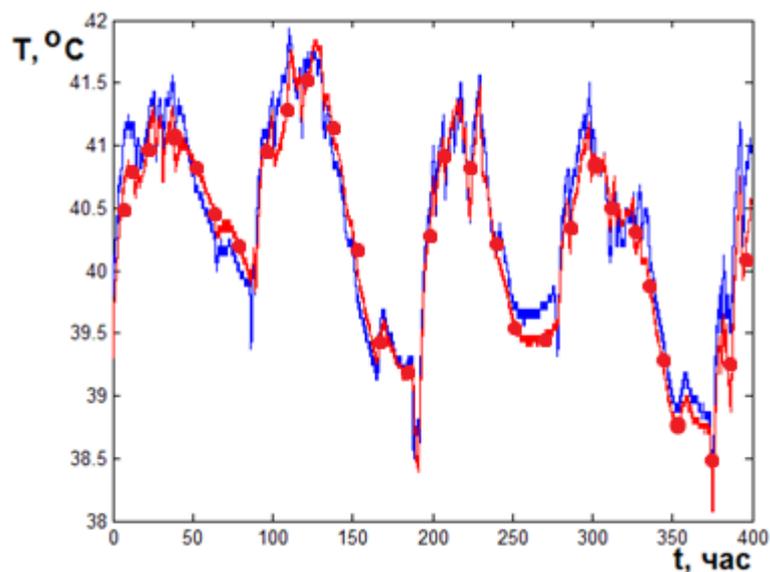


Рис. 3.67. Динамика температуры верхнего (сплошной) и нижнего (сплошной с маркерами) измерительного модуля на прокатном стане в цехе горячего проката в течение 16 суток.

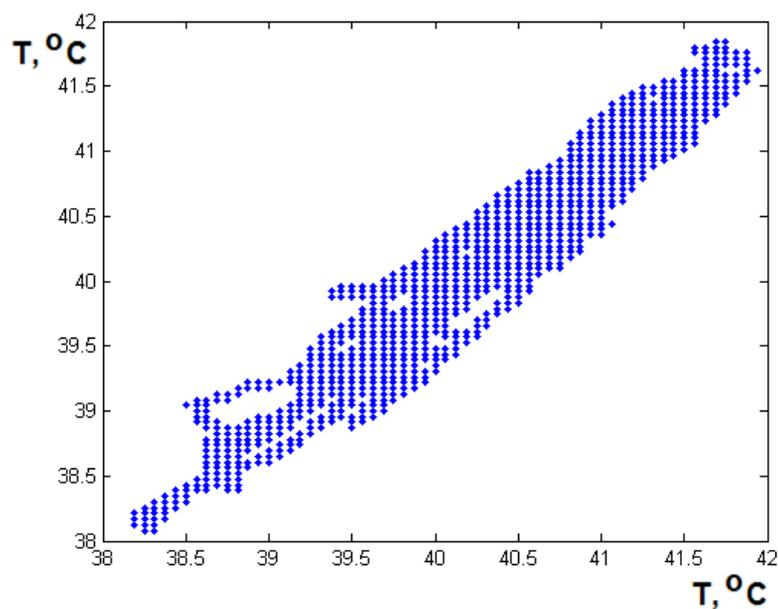


Рис. 3.68. Зависимость температуры верхнего измерительного модуля от температуры нижнего измерительного модуля на прокатном стане в цехе горячего проката в течение 16 суток.



Рис.3.69. Расположение датчиков температуры в измерительном комплексе.

Резкое снижение температуры на полградуса перед началом горячей смены, по-видимому, обусловлено выключением питания измерительного комплекса для полной перезагрузки оборудования перед началом горячей смены. Увеличенные фрагменты графика 2 представлены на рис. 3.70 и 3.71.

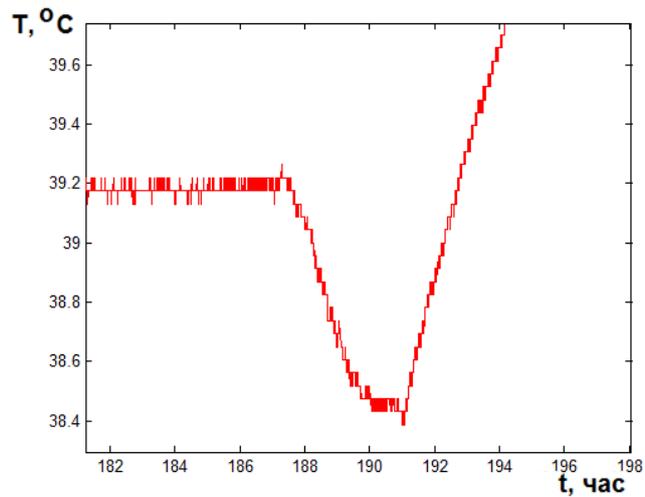


Рис. 3.70. Фрагмент графика температуры верхнего измерительного модуля с характерным понижением температуры перед началом горячей смены, обусловленный отключением питания измерительного комплекса на 3 часа.

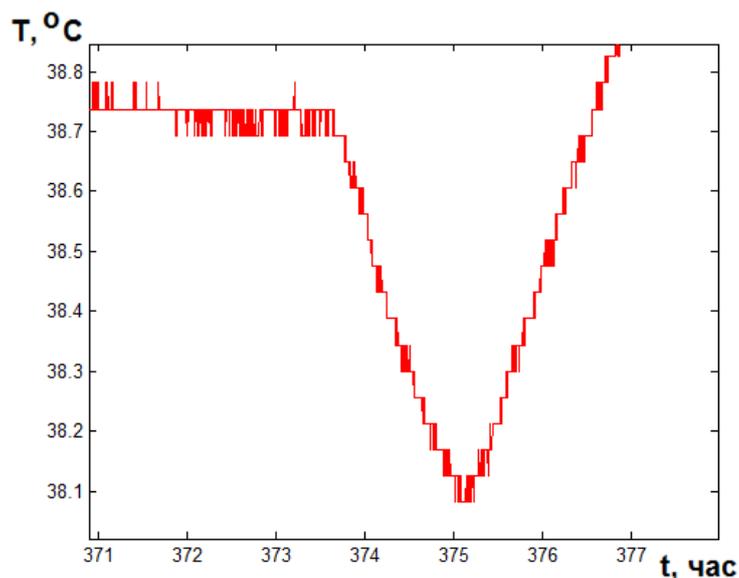


Рис. 3.71. Фрагмент графика температуры верхнего измерительного модуля с характерным понижением температуры перед началом горячей смены, обусловленный отключением питания измерительного комплекса на 1,5 часа.

Графики показывают, что термостат был отключен на рис. 3.70 на 3 часа, на рис. 3.71 на 1,5 часа. Полученные графики показывают, что термостат позволяет существенно уменьшить флуктуации температуры в процессе эксплуатации, однако уровень стабилизации недостаточен.

Результаты измерения толщины неподвижно лежащего калибровочного листа толщиной 3 мм и температура верхнего измерителя представлена на рис. 3.72 и 3.73. Измерения проводились в течение 15 часов 20.06.2012 г. после горячей смены.

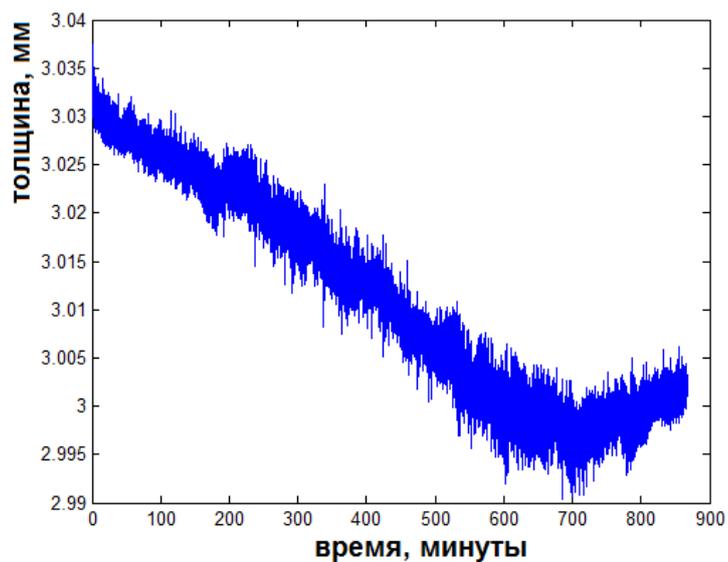


Рис. 3.72. Результат измерения толщины неподвижно лежащего калибровочного листа толщиной 3 мм.

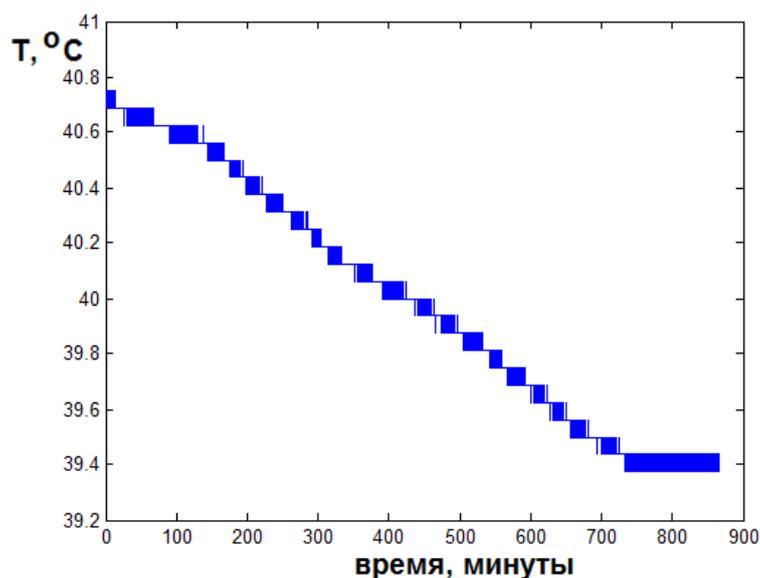


Рис. 3.73. Результат измерения температуры во время измерения толщины неподвижно лежащего калибровочного листа толщиной 3 мм, показанного на рис.3.72.

Графики демонстрируют достаточно хорошую корреляцию между показаниями температурного датчика и измеренной толщины. На рис. 3.74 представлен график зависимости измеренной толщины от температуры измерительного модуля.

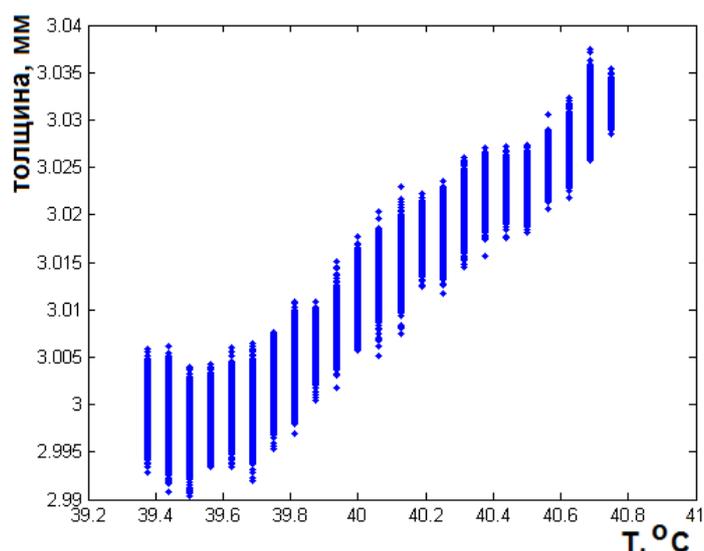


Рис. 3.74. Зависимость измеренной толщины неподвижно лежащего калибровочного листа толщиной 3 мм от температуры верхнего измерительного модуля.

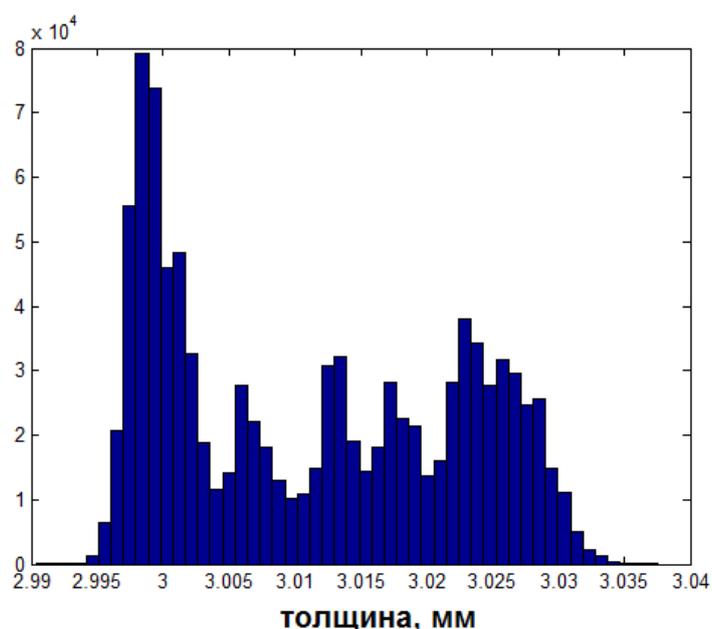


Рис. 3.75. Распределение измеренной толщины неподвижно лежащего калибровочного листа толщиной 3 мм.

Распределение измеренной толщины имеет разброс на уровне 40 мкм (рис. 3.75). Активная компенсация результатов измерения толщины в зависимости температуры измерительных модулей позволяет существенно уменьшить разброс измеренной толщины. После введения линейной

компенсирующей функции, соответствующей зависимости показаний толщины от температуры было получено распределение, показанное на рис. 3.76.

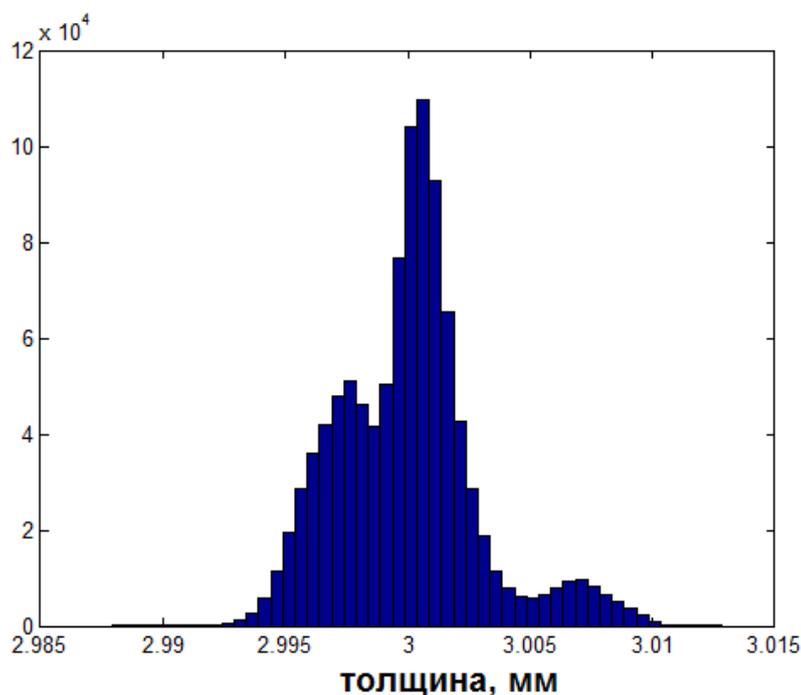


Рис. 3.76. Распределение измеренной толщины неподвижно лежащего калибровочного листа толщиной 3 мм с применением линейной компенсирующей поправки.

В результате метод активной компенсации температурной зависимости измерительного модуля обеспечил снижение погрешности измерений почти в 3 раза.

### **3.7. Управление фазово-неоднородной средой при измерении толщины горячего проката**

Для обеспечения низкой погрешности измерения толщины горячего проката методом облачной триангуляции необходимо обеспечить требуемые статистические характеристики фазово-неоднородной среды в области трасс оптических сигналов измерителя. Как показано в главе 1, метод облачной триангуляции эффективно работает в фазово-неоднородной среде, вносящей

случайные отклонения оптических лучей измерителя с нулевым математическим ожиданием.

Для обеспечения нужных статистических характеристик фазово-неоднородной среды измерительный комплекс включает 3 зоны с различными статистическими характеристиками фазовой неоднородности. Это зона с фазово-однородной средой 1, зона слабого градиента показателя преломления среды 2 и зона интенсивных флуктуаций показателя преломления 3. Зона 1 не содержит фазовых неоднородностей, поскольку весь объем термостатирован с помощью подсистемы термостатирования.

Зона 2 имеет температурный градиент между поверхностью защитного и теплоизоляционного кожуха. Принудительная циркуляция воздуха обеспечивает интенсивное перемешивание воздуха и охлаждение поверхности защитного кожуха. В результате в данной зоне фазовые неоднородности в воздухе находятся в интенсивном движении и имеют слабый градиент коэффициента преломления. В результате искажения оптических лучей, проходящих через зону 2 имеют очень слабые отклонения и нулевое математическое ожидание.

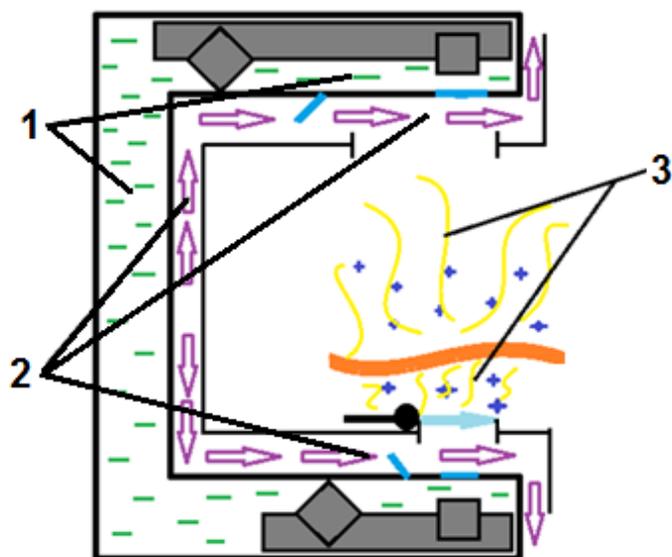


Рис. 3.77. Структурная схема зонной организации фазово-неоднородной среды в области измерения толщины горячего проката.

Зона интенсивных флуктуаций коэффициента преломления воздуха находится непосредственно вблизи поверхности проката. Поскольку прокат

имеет скорость порядка 10 м/с, конвективные потоки воздуха вблизи горячей поверхности проката подвержены интенсивному турбулентному перемешиванию и вихреобразованию. Конвективность восходящих потоков формирует систематический пространственный градиент температуры воздуха. Он эквивалентен горизонтально расположенной слабой цилиндрической линзе, возмущаемой вихрями и турбулентностью, возникающими при перемещении горячей поверхности проката. Рефракция оптических зондирующих и приемных лучей в подобной фазово-неоднородной структуре приводит к систематическому воздействию на показания оптических триангуляторов, существенно ограничивая возможность повышения точности за счет осреднения по большому ансамблю данных.

Решение обозначенной серьезной научной и технической проблемы в работе связано с организацией управления фазовой неоднородностью среды на участках распространения оптических сигналов. Для этого в трассы оптических сигналов вводится специально подготовленный воздушный поток с заданной перемежаемостью. Этот поток формируется вентилятором так, что размеры фазовых неоднородностей оказываются малыми по сравнению с пространственным масштабом оптических трасс, а структура за счет интенсивного перемешивания становится в среднем пространственно однородной, исключая систематические воздействия на световые лучи. Флуктуации показаний эффективно сглаживаются за счет усреднения по большому ансамблю данных, характерному для предложенного в работе метода облачной триангуляции. Отметим, что использованный прием имеет далекие аналоги в технике аналого-цифрового преобразования, называемые «раскачивающим шумом» [124].

Использованные идеи и приемы обеспечивают формирование управляемой фазовой структуры неоднородной среды с заданными оптическими свойствами в зоне 3. В результате вносимые фазово-

неоднородной средой в зоне 3 искажения оптических сигналов имеют случайный характер и нулевое математическое ожидание.

Таким образом, разработанный измерительный комплекс при измерении толщины движущегося горячего проката обеспечивает формирование фазово-неоднородной среды, которая вносит случайные отклонения трасс оптических сигналов с нулевым математическим ожиданием. В результате разработанный измерительный комплекс можно эффективно использовать для измерения толщины горячего проката методами облачной триангуляции.

### **3.8. Преобразование сигналов в методе дифференциальной облачной триангуляции при измерении толщины горячего проката**

Измерение толщины осуществляется двумя облачными триангуляторами, работающими в дифференциальной схеме. Процесс измерения инициирует формирующий синхроимпульс модуль синхронизации. По импульсу от модуля синхронизации фотоприемники открывают фотозатворы, а модули излучения генерируют световые импульсы, которые формируют пространственно-модулированную засветку, рассеиваемую на поверхности измеряемого объекта.

Часть оптического излучения, рассеянного на поверхности измеряемого объекта, проходит через набор оптических фильтров и попадает на матрицу фотоприемника.

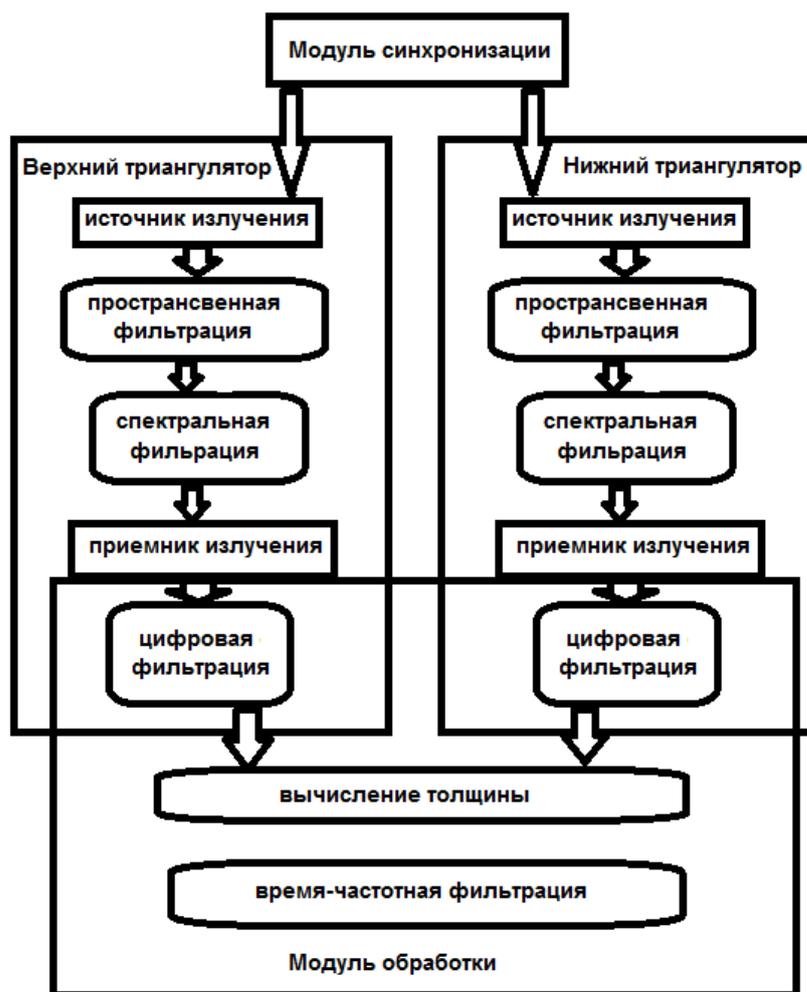


Рис. 3.78. Преобразование сигналов при измерении толщины горячего проката методами синхронной дифференциальной облачной триангуляции.

Сформированные изображения поступают в виде цифрового образа в модуль обработки данных. Модуль обработки данных обрабатывает изображения и вычисляет измеренную толщину. Полученное значение сохраняется в виде первичных результатов обработки. Далее к первичным результатам обработки применяют низкочастотную фильтрацию на основе КИХ-фильтра. Параметры фильтрации подбирают в соответствии с физическими свойствами измеряемого объекта.

Полученные результаты измерения толщины сохраняют в базу данных и выводят на информационные мониторы в реальном времени.

### 3.8.1. Фильтрация первичных результатов обработки

При наличии априорной информации о параметрах измеряемой величины актуальной становится возможность применять дополнительные методы фильтрации данных на основе их статистического анализа.

Например, в случае измерения толщины горячего проката непосредственно за прокатным станом можно успешно применять низкочастотную фильтрацию данных измеренной толщины горячего проката. Частоту среза НЧ-фильтра можно оценить по частоте вращения валов, которая составляет порядка 1 Гц.

Пусть первичные результаты измерения толщины представляют собой набор дискретных измерений  $x(t)$ . Наиболее распространенным НЧ-фильтром является фильтр скользящего среднего.

Отфильтрованные результаты измерения  $y(t)$  при использовании фильтра скользящего с размером окна  $N$  будут вычисляться:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N x(n - k). \quad (3.87)$$

Частотная характеристика фильтра скользящего среднего выражается функцией  $\sin(x)/x$ . Увеличение размера окна осреднения сужает основной лепесток, но существенно не уменьшает амплитуду боковых лепестков частотной характеристики. Естественно, такой фильтр не подходит в случае необходимости большого ослабления частотной характеристики в полосе задержания.

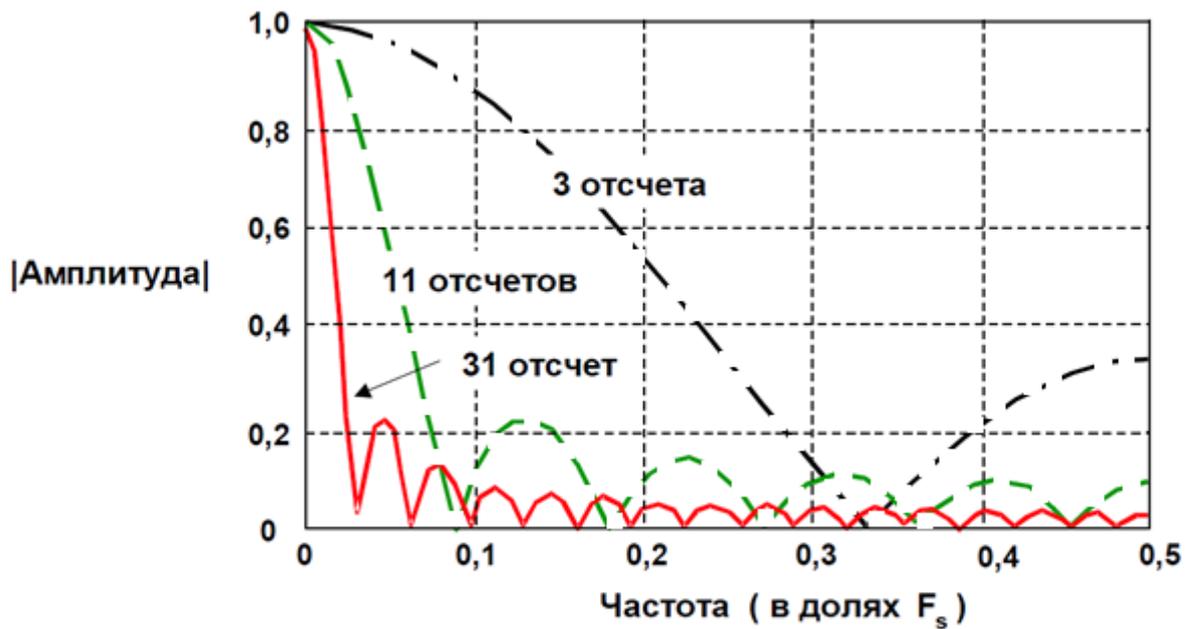


Рис. 3.79. Амплитудно-частотная характеристика фильтра скользящего среднего.

В качестве фильтра наиболее предпочтителен фильтр, обладающий гладкой АЧХ, например, фильтр Баттерворта.

$$G^2(\omega) = |H(j\omega)|^2 = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}, \quad (3.88)$$

где  $n$  — порядок фильтра,  $\omega_c$  — частота среза (частота на которой амплитуда равна  $-3\text{dB}$ ),  $G_0$  — коэффициент усиления по постоянной составляющей (усиление на нулевой частоте)

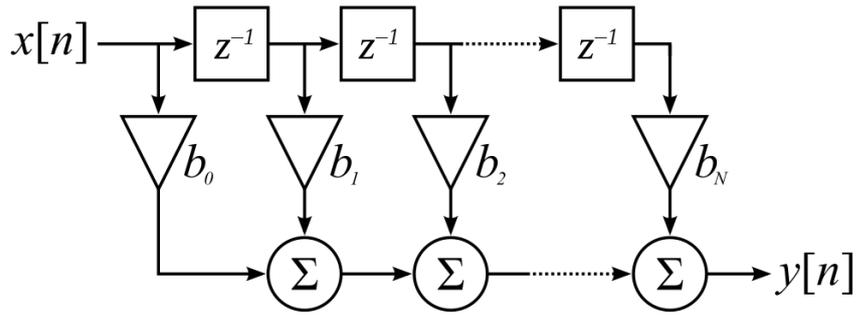


Рис. 3.80. Структурная схема фильтра Баттерворта.

Пусть применяемый КИХ фильтр имеет коэффициенты  $h(n)$ . Тогда конечный сигнал будет вычисляться как свертка исходного сигнала с коэффициентами фильтра:

$$y(n) = h(k) * x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cdot x(n - k). \quad (3.89)$$

В частотной области:

$$Y(w) = H(w) \cdot X(w), \quad (3.90)$$

где

$$Y(w) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk), \quad (3.91)$$

$$X(w) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk), \quad (3.92)$$

$$H(w) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk). \quad (3.93)$$

В случае, когда известна АЧХ КИХ фильтра, его коэффициенты можно вычислить, используя обратное ДПФ:

$$h(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) \exp \left( -j \frac{2\pi}{N} tk \right). \quad (3.94)$$

Таким образом, обладая априорной информацией о параметрах измеряемой величины, необходимо выполнить низкочастотную фильтрацию данных и снизить погрешность измерений с помощью низкочастотной фильтрации первичных результатов измерения.

Для фильтрации данных толщиномера горячего проката на основании статистических наблюдений за технологическим процессом рассчитан фильтр с частотой среза, равной 2 Гц. В результате прямых замеров прокатанных листов было установлено, что частота характерных флуктуаций толщины проката не превышает 1 Гц. Таким образом, выбранный фильтр не внесет существенных искажений в измеряемую величину.

На рис. 3.81 представлены АЧХ и значения коэффициентов примененного фильтра. На рис. 3.82 представлены 8 различных измеренных листов горячего проката. На каждом графике показаны первичные результаты измерения (синие точки) и результаты измерения после применения фильтрации данных (красный график).

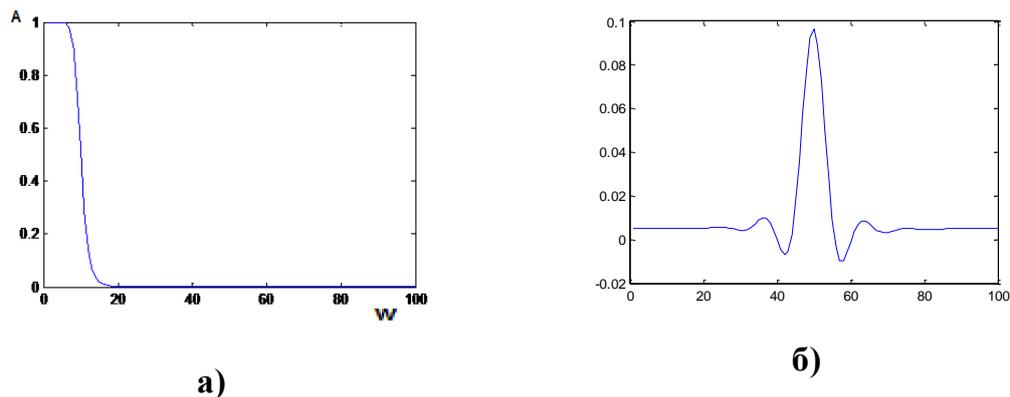
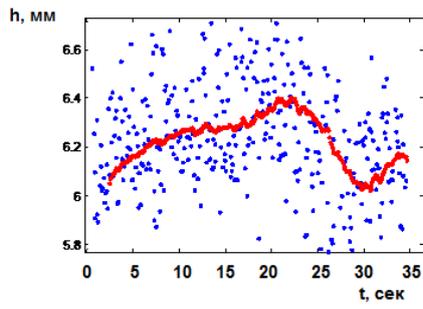
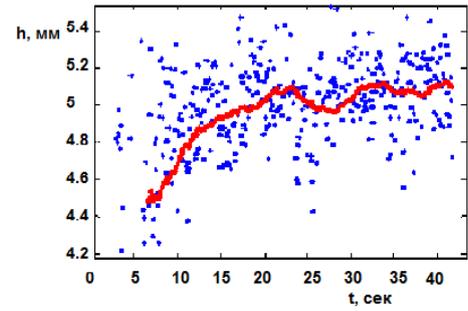


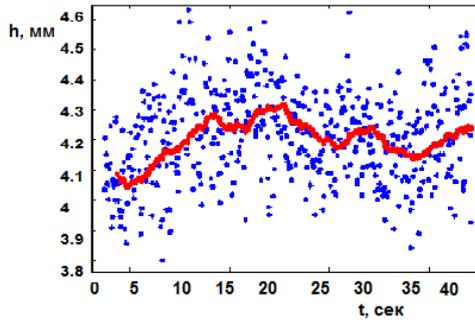
Рис. 3.81. Амплитудно-частотная характеристика примененного фильтра (а) и его коэффициента (б) для фильтрации первичных результатов измерений.



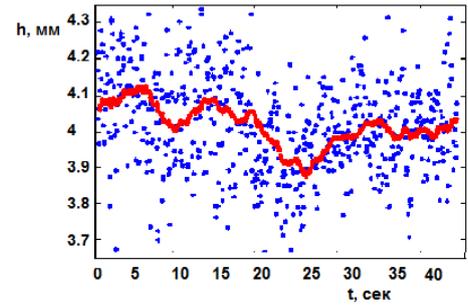
а) Реализация 1



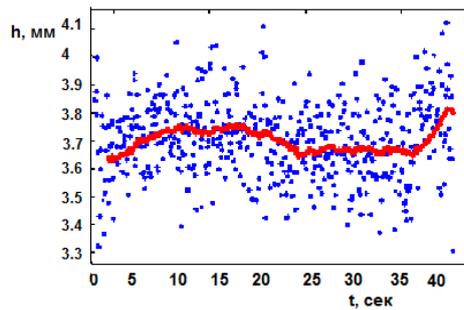
б) Реализация 2



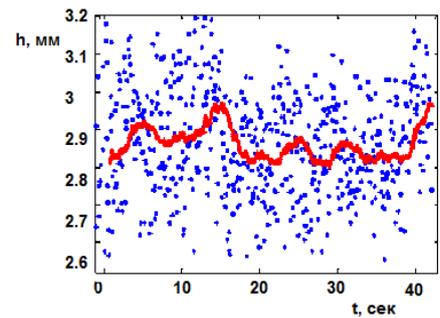
в) Реализация 3



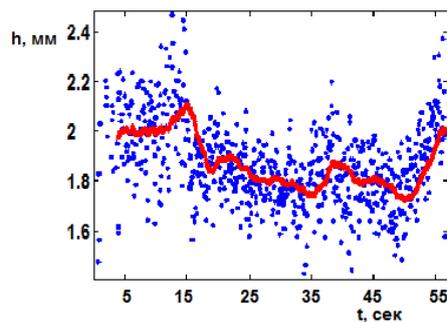
г) Реализация 4



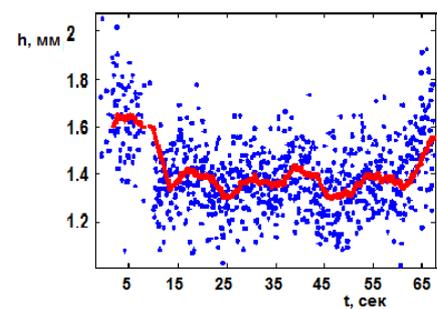
д) Реализация 5



е) Реализация 6



ж) Реализация 7



з) Реализация 8

Рис. 3.82. Первичные результаты измерения (точки) и результаты измерения после фильтрации (сплошная).

Примеры результатов измерения с фильтрацией и без нее для различных толщин проката представлены на рис. 3.82. Графики демонстрируют, что применение фильтрации позволяет уменьшить флуктуации результатов измерения и сохранить медленные изменения толщины листа, которые в большинстве случаев объясняются неравномерностью прогрева заготовок. Чтобы исключить эффект излишней фильтрации данных были выполнены сравнения показаний толщины листа с прямыми замера. В результате установлено, что примененная фильтрация не искажает общую картину флуктуаций толщины измеряемого проката.

### **Выводы по главе 3**

- Создан комплекс для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах на основе методов структурированного освещения. Показано, что в качестве источника и приемника оптического излучения могут быть применены доступные оптико-электронные приборы.
- Разработано программное обеспечение измерительного комплекса для измерения трехмерной геометрии в фазово-неоднородных средах, позволяющее выполнять прецизионные измерения крупногабаритных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами.
- Создан комплекс для измерения толщины динамичных объектов в термоградиентной фазово-неоднородной среде на основе синхронной дифференциальной облачной триангуляции.
- Разработаны и реализованы подсистемы защиты от инфракрасного излучения, водомасляных аэрозолей, виброзащиты и термостабилизации, сделавшие возможным применение комплекса для измерения толщины горячего листового проката непосредственно на прокатных станах.
- Разработано программное обеспечение комплекса для измерения толщины динамических объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах. Предложены и реализованы быстрые алгоритмы обработки данных облачных триангуляторов.
- В результате комплекса предложенных научных идей и технических решений достигнуто снижение погрешности измерений в 25 раз по сравнению с измерителями на основе синхронной дифференциальной точечной триангуляции.