

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерного топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы Разработка алгоритма получения фазовой информации из рентгеновских интерферограмм

УДК 539.122.16:620.179.152.1:573

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Афанасьев Леонид Леонидович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Алейник А.Н.	к. ф.-м. н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заместитель директора по развитию	Гоголев А.С.	к. ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Общекультурные компетенции	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Профессиональные компетенции	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Бычков П.Н.

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Б	Афанасьев Леонид Леонидович

Тема работы:

Разработка алгоритма получения фазовой информации из рентгеновских интерферограмм	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	12.03.2019. №1862/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Рентгеновская трубка с напряжением до 160 кэВ и диаметром фокального пятна – 400 мкм/1мм. Набор рентгеновских дифракционных решеток. Плоскопанельный детектор РИ с высокой эффективностью регистрации до 100 кэВ и размером пикселя 50 мкм. Набор моторизованных платформ для позиционирования элементов интерферометра.
--------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Изучение научной литературы по теме исследования. 2. Освоение необходимого программного обеспечения для проведения работ. 3. Разработка алгоритма обработки рентгенограмм. 4. Изучение принципов работы интерферометра Тальбота-Лау. 5. Сборка и настройка томографа на основе интерферометра Тальбота-Лау Проведение эксперимента. 6. Обработка полученных рентгенограмм.
Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Латышева Елена Владимировна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	13.03.2019
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Алейник Александр Никонорович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Афанасьев Леонид Леонидович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла
 Период выполнения (весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.19	Составление и утверждение технического задания	7
05.03.19	Подбор и изучение материалов по теме	10
16.03.19	Выбор направления исследования	5
8.04.19	Проведение эксперимента	45
07.05.19	Анализ и описание результатов	30
20.05.19	Подготовка к защите ВКР	7

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Алейник Александр Никонович	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заместитель директора по развитию	Гоголев Алексей Сергеевич	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Б	Афанасьев Леонид Леонидович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Заработная плата устанавливается в соответствии с должностными окладами ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на промышленную электроэнергию в соответствии с нормативами Томской области
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Размер страховых взносов - 30%. Пониженная ставка - 27,1%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка конкурентоспособности технических решений. Матрица SWOT. График проведения и бюджет НИ. Диаграмма Ганта.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.ф.-м.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Афанасьев Леонид Леонидович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Б	Афанасьев Леонид Леонидович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – Радиационная безопасность; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		8.04.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Б	Афанасьев Л.Л.		8.04.2019

Реферат

Бакалаврская работа содержит 92 страниц, 39 рисунков, 12 таблиц, 40 источников и 53 формулы.

Ключевые слова: фазо-контрастная томография, рентгенография, интерферометр Тальбота-Лау, принцип Тальбота, метод главных компонент.

Объектом исследования являются получение фазо-контрастного изображения из рентгеновских интерферограмм.

Целью работы является написание алгоритма для обработки рентгенограмм, полученных на томографе, основанном на принципе интерферометра Тальбота-Лау.

Обработка экспериментальных данных с использованием предложенного алгоритма проводилась в программной среде Matlab.

В результате исследования было сделано заключение о работоспособности реализованного алгоритма при сравнении полученного фазо-контраста с образцом исследования.

На данный момент работа находится на стадии эксперимента, тем не менее, можно утверждать, что предмет исследования будет востребован в области медицинской диагностики и неразрушающего контроля.

Экономическая эффективность работы в настоящий момент не может быть установлена, поскольку предмет исследования находится на ранней стадии проработки.

Бакалаврская работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013 с применением пакета Microsoft Excel 2013, теоретические расчеты и работа с алгоритмом была проведена в Wolfram Mathematica и Matlab.

Содержание

Введение.....	13
1 Томограф на основе интерферометра Гальбота-Лау.....	14
2 Принцип работы томографа.....	19
3 Метод шаговых фазовых кривых	24
4 Настройка интерферометра. Муаровые полосы на детекторе	29
5 Экспериментальная установка.....	35
6 Программное обеспечение	41
7 Метод главных компонент (РСА).....	43
8 Применение РСА в фазово-контрастной томографии	46
9 Создание модели в Wolfram Mathematica.....	50
10 Полученные результаты	57
11 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 60	
11.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	61
11.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	61
11.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	62
11.1.3 SWOT-анализ	64
11.2 Планирование научно-исследовательских работ	66
11.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	66
11.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	67
11.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	68
11.3 Бюджет научно-технического исследования	71
11.3.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	71
11.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы	71
11.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые фонды).....	73
11.3.4 Накладные расходы	74
11.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	75
11.5 Вывод по разделу финансовый менеджмент	75

12 Социальная ответственность	76
12.1 Анализ опасных производственных факторов	77
12.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного воздействия и устранению их влияния при работе на ПК и микротроне	78
12.2.1 Организационные мероприятия	78
12.2.2 Организация рабочего места оператора ПК.....	78
12.2.3 Условия безопасной работы	81
12.3 Радиационная безопасность.....	83
12.4 Электробезопасность	85
12.5 Пожарная и взрывная безопасность.....	86
Заключение	88
Список использованной литературы.....	89

Введение

Рентгенография – первый метод, позволивший заглянуть в строение человека без хирургического вмешательства. Принцип большинства рентгеновских снимков заключается в процессе поглощения проходящего излучения тканями человека. Это является большим недостатком, так как мягкие ткани человека почти не поглощают рентгеновское излучение и имеют близкие плотности и коэффициенты поглощения. Это делает их диагностику сложной технической задачей.

Фазово-контрастная визуализация с использованием принципов интерференции Тальбота-Лау – это новаторский и многообещающий подход к созданию снимков высокого разрешения мягкой ткани в медицинской диагностике. В отличие от изображений на основе поглощения (абсорбции) с плохой контрастностью (что приводит к неудовлетворительному уровню выявления, например, опухолей), фазо-контрастные изображения являются гораздо чувствительней к плотностям тканей, вследствие чего повышается качество рентгенограмм. Также помимо медицины усовершенствованные рентгенаппараты востребованы в сфере неразрушающего контроля.

Сегодняшние исследования, проводимые в мире направлены на разработку новых компактных устройств с недорогим источником РИ. Особое внимание уделяется рентгеновской интерферометрии на решетках, так как помимо абсорбционного контраста добавляется возможности использования темнопольного и фазово-контрастного методов.

Однако появление новых способов диагностики требуется новых методов обрабатывания данных, что является нетривиальной проблемой. Для её решения были выполнены следующие задачи:

- Изучение математического аппарата обработки данных;
- Анализ и изучение требуемого программного обеспечения;
- Написание и отладка алгоритма;
- Обработка им фазо-контрастных рентгенограмм.

1 Томограф на основе интерферометра Тальбота-Лау

Суть фазово-контрастного изображения заключается в изменении фазы излучения при прохождении через вещество. Рассмотрим, почему данный метод более чувствительный по отношению к традиционному абсорбционному методу. Коэффициент преломления фотонов определяется следующим выражением:

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (1)$$

Где δ – характеризует сдвиг фазы, β – показатель затухания. Для рентгеновского излучения 10-100 кэВ в мягких тканях $\delta > 1000\beta$. Из чего видно, что изменение фазы гораздо чувствительней к изменению среды, чем изменение интенсивности.

Для получения фазово-контрастного изображения применяются различного вида томографы. Одним из наиболее развивающихся видов является томограф на основе интерферометра Тальбота-Лау.

В основу интерферометра Тальбота-Лау лежит одноимённый эффект. В 1836 году Тальбот обнаружил феномен самоизображения периодических структур (например, решеток) при их освещении когерентным, в его работе, видимым светом. Самоизображения обнаруживаются на определенных расстояниях (расстояние Тальбота) распространения излучения. Лорд Рейли аналитически показал, что эффект Тальбота является результатом дифракции Френеля (дифракция в области ближнего поля), а полное расстояние Тальбота определяется по формуле

$$d_T = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p_1^2}}}, \quad (2)$$

где λ - длина волны излучения, p_1 - период решетки. В случае рентгеновских лучей, λ лежит в диапазоне от 0,1 до 100 А, что значительно меньше периода дифракционных решеток, который, как правило, порядка нескольких микрон.

Таким образом, с учетом $\lambda \ll p$ и разложения в ряд Тейлора, уравнение 1 примет вид:

$$d_T = \frac{\lambda}{1 - \left(1 - \frac{\lambda^2}{2p_1^2}\right)} = \frac{2p_1^2}{\lambda}. \quad (3)$$

Основными компонентами установки являются источник рентгеновского излучения, пиксельный детектор и собственно интерферометр. Первая решетка интерферометра, которая расположена непосредственно за источником, называется решеткой источника (или решеткой когерентности) и обозначается как G_0 . G_0 является поглощающей решеткой с периодом p_0 .

Решетка G_0 действует как решетка ослабления и состоит из череды прозрачных и непрозрачных для рентгеновского излучения промежутков. По сути G_0 разбивает источник в массив источников микронных размеров, которые по отдельности когерентны, но взаимно некогерентны, по аналогии с опытом Юнга. Если пространственная когерентность пучка достаточно высока, что, как правило, происходит в случае малых размеров фокусного пятна или длинных расстояний источник-решетка, решетка G_0 не требуется. Интерферометры Тальбота, как правило, используются на синхротронах или с микрофокусными источниками, так как они обеспечивают достаточную пространственную когерентность. На рисунке 1.1 схематически показано устройство дифракционного интерферометра Тальбота-Лау.

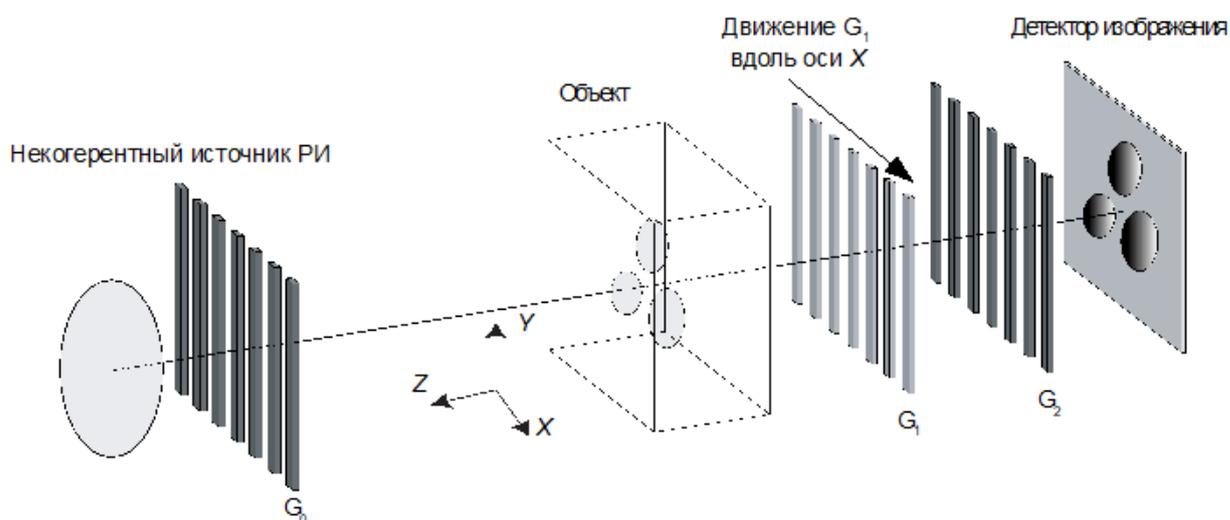


Рисунок 1.1 – схема дифракционного интерферометра Тальбота-Лау с решеткой когерентности (G_0 , поглощающая решетка), решетка делитель (G_1 , фазовая решетка) и решетка анализатор (G_2 , поглощающая решетка).

Как говорилось выше, решетка G_0 необходима, только если размер пятна источника является слишком большим, что приводит к недостаточной пространственной когерентности. G_1 создает интерференционную картину, которая появляется в виде периодических полос интенсивности. Образец перед решеткой G_1 изменяет среднюю интенсивность (сигнал поглощения), фазовый сдвиг (фаза сигнала) и амплитуду (рассеяния сигнала) этих полос. Так как период полос, как правило, слишком мал для считывания непосредственно детектором, используется решетка G_2 для измерения этих изменений.

Томографы на основе интерферометра Тальбота-Лау разделяются не только по типам источника РИ, но и по типу расположения элементов – традиционный, обратный и симметричный. На рисунке 1.2 приведены типы дифракционных интерферометров на решетках.

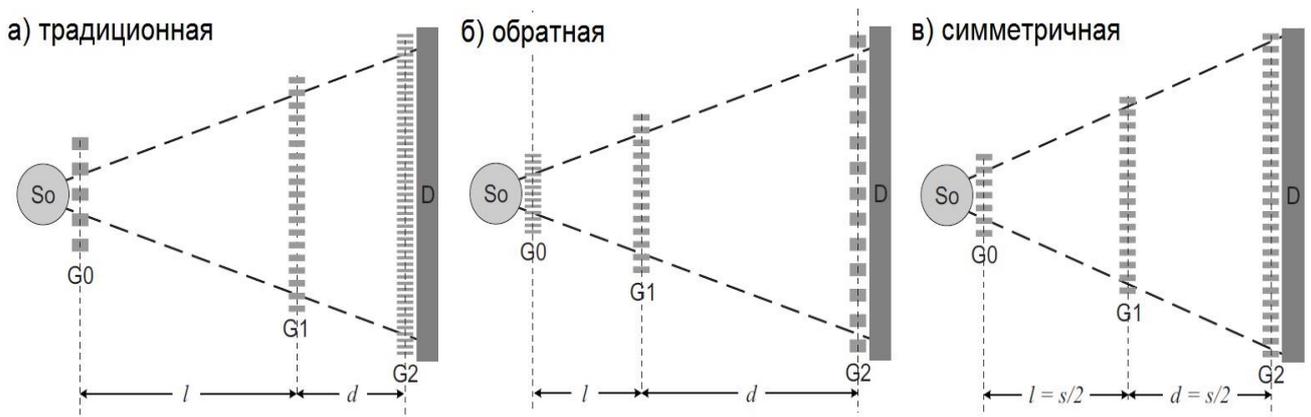


Рисунок 1.2 – типы дифракционных интерферометров

Фазовая решетка с периодом p_1 (Общая длина между G_0 и G_2 равна s).

а) традиционная геометрия с $l > d$ и $p_0 > p_1 > p_2$, б) обратной геометрии с $l < d$ и $p_0 < p_1 < p_2$, в) симметричная геометрия с $l = d$.

В случае сферической волны, расстояние Тальбота изменяется в соответствии с теоремой масштабирования Френеля как:

$$d_n = Md_T, \quad (4)$$

где M - геометрический фактор увеличения равный $(l + d)/l$, l - расстояние между источником (или решеткой G_0) и решеткой G_1 , d - расстояние между решетками G_1 и G_2 .

Для заданной полной длины интерферометра $s = l + d_n$ можем записать уравнение относительно l :

$$l^2 - sl + sd_T = 0, \quad (5)$$

Решение, которого:

$$l_{1,2} = \frac{s}{2} \pm \sqrt{\frac{s^2}{4} - sd_T}. \quad (6)$$

Таким образом, имеем три случая: $s < 4d_T$, дискриминант отрицательный и решение не имеет смысла; $s = 4d_T$, уравнение имеет одно решение, которое соответствует симметричному случаю с $l = d_n = s/2 = 2d_T$; $s > 4d_T$, имеем два решения, одно с $l < d_n$ (обратная геометрия) и с $l > d_n$ (традиционная геометрия).

При заданном периоде фазовой решетки p_1 , симметричная геометрия имеет наименьшую возможную общую длину $s = 4d_T$. Плюс к этому обе

поглощающие решетки G_0 и G_2 имеют один период $p_0 = p_2$, что позволяет минимизировать затраты на их изготовление. Как было указано выше, для π -сдвига $p_1 = p_2$, соответственно, имеем $p_0 = p_1 = p_2$.

Обратная геометрия с $l < d_n$ позволяет получить следующие практические преимущества по сравнению с традиционной геометрией в интерферометров:

1) Решетка с малым периодом, которая наиболее сложная с точки зрения технологии изготовления, является решетка G_0 и может иметь гораздо меньший общий размер, чем две другие.

2) Аналогично решетка с самой большой площадью и большим периодом структуры является G_2 , большой период предъявляет менее жесткие требования технологии изготовления, что в свою очередь удешевляет процесс производства. Также за счет увеличения размеров канавок можно использовать наполнитель с меньшим атомным числом. Что также уменьшает конечную стоимость.

3) Поскольку решетка G_1 перемещается ближе к источнику, ее размеры могут быть также уменьшены.

Помимо расположения решеток, есть возможность выбора позиции объекта в пределах интерферометра. Обычно объект размещают между источником и G_1 . Для обратной геометрии выгоднее размещать объект за G_1 . Однако следует иметь в виду, что в приложениях по микро-КТ с целью увеличения пространственного разрешения за счет геометрического увеличения объект необходимо располагать как можно ближе к источнику.

С точки зрения чувствительности и качества получения фазо-контрастных изображений традиционная схема интерферометра эквивалентна обратной. Но использование обратной геометрии более предпочтительно, за счет меньших требований к решеткам и их стоимости изготовления.

2 Принцип работы томографа

Рассмотрим более подробно принцип работы. Как говорилось ранее, интерферометр строится вокруг эффекта, возникающего на слабопоглощающей фазовой решетке G_1 . При падении на эту решетку пространственно-когерентного излучения, за решеткой формируется интерференционная картина, благодаря тому, что часть фронта волны сдвигается на $\pi/2$, а часть остается с неизменной фазой. На рисунке 2.1 показано распределение интенсивности поля за решеткой G_1 при облучении ее плоской волной при следующих параметрах:

- Длина волны $\lambda = 0,563 \text{ \AA}$ (22 кэВ)
- Период никелевой решетки $p_1 = 4,75 \text{ мкм}$ (толщина 3,9 мкм)
- Тип решетки – фазовая (сдвиг на $\pi/2$)

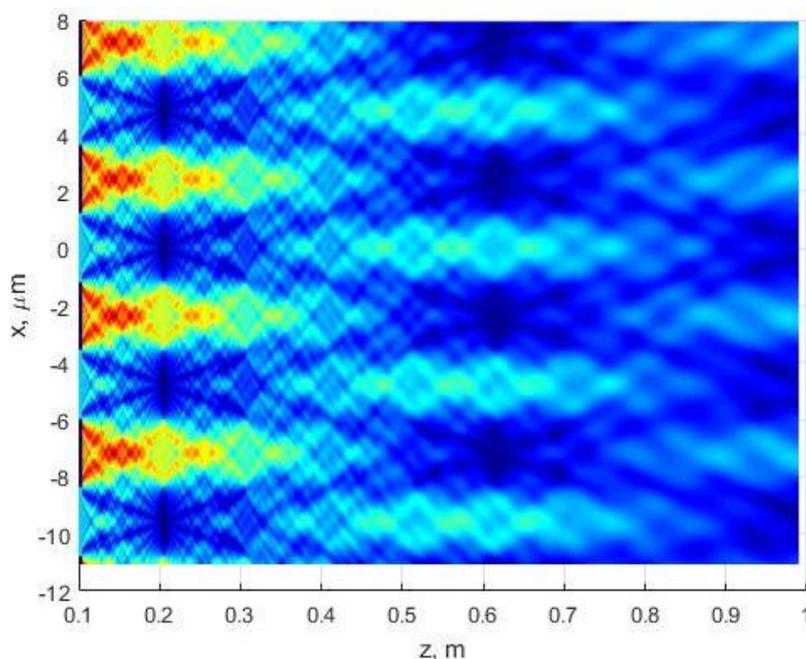


Рисунок 2.1 – моделирование интенсивности излучения за решеткой G_1

Рассчитаем, используя формулу (2), длину Тальбота:

$$d_T = \frac{p_1^2}{2\lambda} \approx 0,2 \text{ м}$$

Из рисунка видно, что периодическая структура повторяется на расстояниях, ориентировочно равном 0,2 м; 0,3 м; 0,4 м; 0,6 м. Что совпадает с теоретической оценкой. 0,3 м – это так называемый дробный период Тальбота.

Однако в действительности период Тальбота больше, это связано с тем, что формула (2) используется для плоского фронта волны. На практике же излучение от источника распространяется сферически.

Поэтому полученный период надо домножить на коэффициент увеличения M рассчитывается по формуле конуса:

$$M = (l + d)/l \quad (7)$$

Уточненный период Тальбо получается равным 0,25 м.

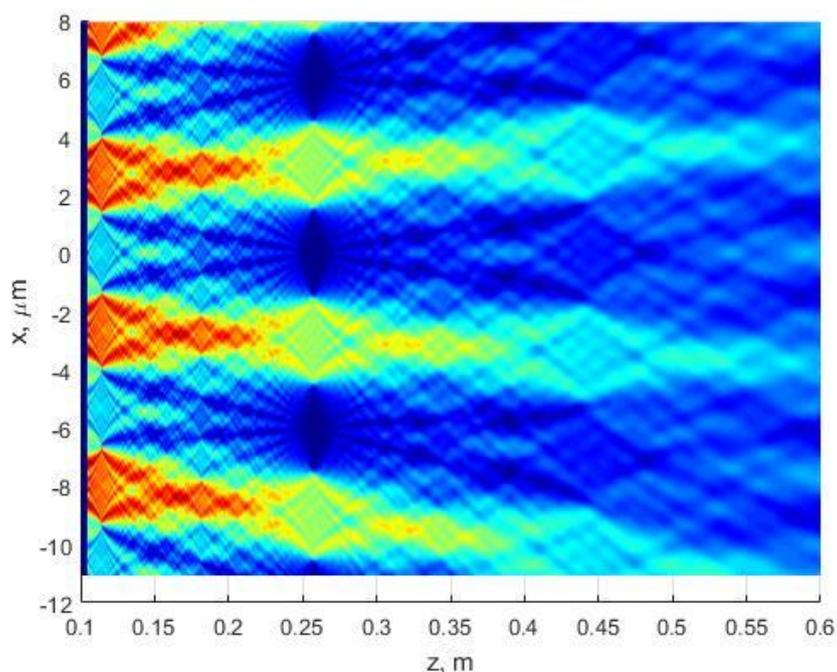


Рисунок 2.2 – распределение интенсивности интерференционной картины от точечного источника для длины

Из рисунка 2.2 видно, что благодаря сферическому фронту волны, падающему на решетку, интерференционная картина приобретает коническую форму.

Рассмотрим влияние фокального пятна источника на интерференционную картину.

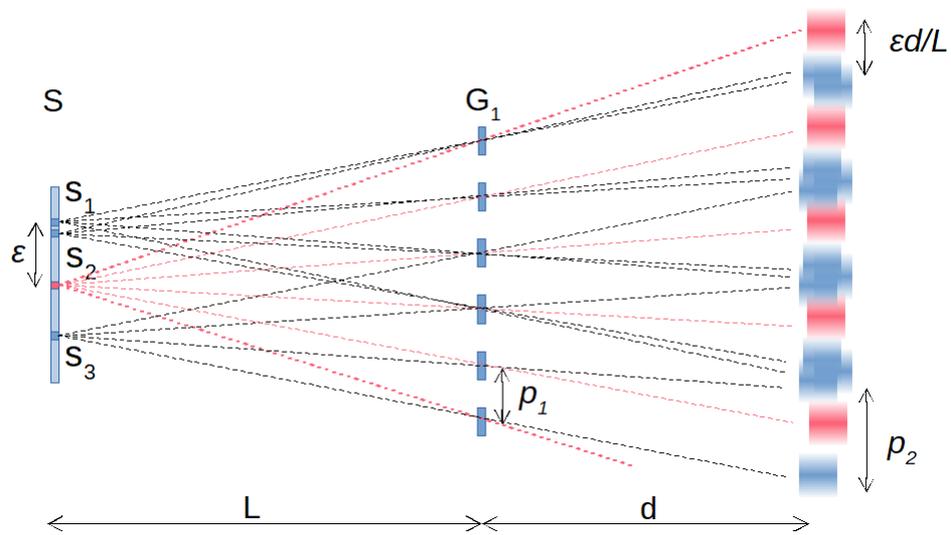


Рисунок 2.3 – точечные источники интерферируют на фазовой решетке G_1 , тем самым создавая отображение решетки на расстоянии d . Расстояние от источника до решетки $L = 96$ см, период решетки $p_1 = 4.7$ мкм, для $\lambda = 0,563 \text{ \AA}$ (22 кэВ) расстояние от решетки до интерференционной картины $d = 25$ см, период интерференционной картины $p_2 = 5.92$ мкм

Рассмотрим произвольный точечный источник S_1 , обеспечивающий интерференционную картину. Точечный источник S_2 , расположенный на некотором малом расстоянии ε , будет также давать интерференционную картину, которая будет смещена на $\varepsilon d/L$. При $\varepsilon d/L \geq p_2$ это приведёт к почти полному наложению картин, увеличению общей яркости и размытию интерференционных максимумов и минимумов. При дальнейшем увеличении ε , сдвиг интерференционной картины увеличится настолько, что максимумы от S_2 заполнят минимумы от S_1 и S_3 . Очевидно, что это произойдёт при $\varepsilon d/L = p_2/2$. Отсюда получаем условие на максимальный размер источника, при котором можно наблюдать интерференцию:

$$S = \frac{p_2 L}{2d} \quad (8)$$

Следует отметить, что в этом случае пространственно некогерентного источника не происходит вычитания или суммирования волн и соответственно взаимного гашения или усиления интенсивностей, так как S_1 , S_2 и S_3 не обладают временной когерентностью. В результате наложения интерференционных картин друг на друга в зоне интерференции

устанавливается средняя интенсивность электромагнитного поля и интерференцию наблюдать невозможно.

Для обеспечения пространственной когерентности перед источником S располагается решетка когерентности G_0 , с периодом решетки p_0 таким, чтобы исключить источники излучения, уменьшающие видимость интерференционной картины. Конструктивно G_0 является решеткой поглощения. Задача решетки G_0 разбиение источника на множество вторичных источников (дифракция Френеля). Полученные точечные источники пространственно когерентны в пределах одной щели. Каждая пропускающая полоса G_0 формирует интерференционную картину, за решеткой G_1 , и эти интерференционные полосы от каждой из полос G_0 некогерентно накладываются друг на друга, максимум на максимум, минимум на минимум, в чем и заключается эффект Лау. На рисунке 2.4 представлена схема интерферометра с решеткой когерентности и интерференционной картиной, которую она обеспечивает.

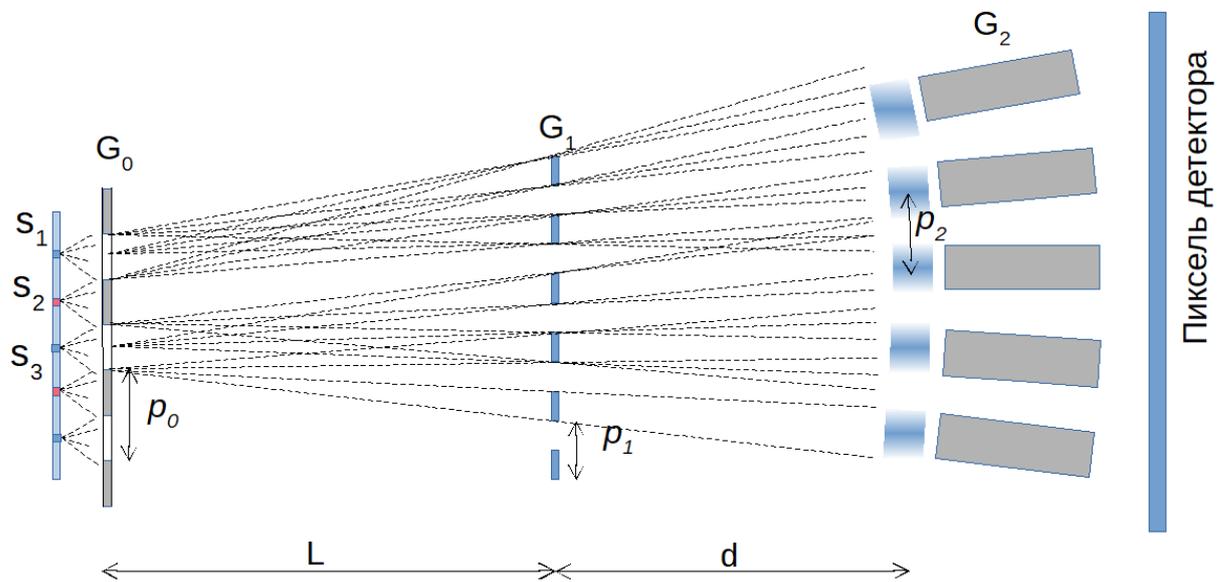


Рисунок 2.4 – интерферометр Тальбота – Лау. Решетка когерентности G_0 формирует ряд пространственно когерентных источников. Фазовая решетка G_1 формирует интерференционные полосы с периодом p_2 . Детекторная решетка G_2 с периодом p_2 и радиусом кривизны $R = L + d$, транслирует максимумы на детектор.

После того, как интерференционная картина создана, необходимо получить её изображение на детекторе. В интерферометре использовался детектор Teledyne DALSA Shad-o-box 3K HS. Разрешение детектора составит 2304×1300 пикселей, при размере пикселя 50 мкм. Очевидно, что при таком размере пикселя невозможно наблюдать интерференционную картину с периодом 6 мкм. Поэтому перед детектором, непосредственно в зону интерференции была установлена поглощающая решетка G_2 с периодом $p_2 = 6$ мкм. Для предотвращения затенения излучения по краям решетки, G_2 была изготовлена с кривизной радиуса 121 см в поперечной плоскости.

Главная идея решетки G_2 – транслировать на пиксели детектора только ту часть интерференционной картины, которая оказалась напротив пропускающих штрихов. Например, на рисунке 6 показан случай, когда поглощающие штрихи G_2 выставлены напротив минимумов по интенсивности, а пропускающие штрихи напротив максимумов и это приводит к тому, что на пикселе детектора будет регистрироваться максимум яркости интерференционной картины. Передвинув решетку G_1 на половину периода, можно сформировать интерференционную картину так, что напротив пропускающих штрихов G_2 будут находиться минимумы, что приведет к тому, что на пикселе детектора будет регистрироваться минимальная интенсивность.

Если в районе решетки G_1 поместить фазовый слабопоглощающий объект, то вследствие преломления он вызовет изменение хода лучей, формирующих интерференционную картину, что в свою очередь приведёт к смещению интерференционных полос. Перемещая фазовую решетку G_1 с шагом меньше чем период решетки как минимум в 3, а оптимально в 7-8 раз и регистрируя изменения интенсивности поля, попавшего на пиксель, можно сопоставить изменения интенсивности пикселя с отклонениями интерференционной полосы. Шаг выбирается в зависимости от заданной точности и метода обработки.

3 Метод шаговых фазовых кривых

Зависимость интенсивности пикселя детектора от шага детекторной решетки вдоль интерференционной картины принято называть шаговой фазовой кривой (ШФК). Рассмотрим более подробно механизм её измерения и проанализируем, какую информацию можно из неё получить.

В случае удаленного точечного монохроматического источника рентгеновского излучения, волновой фронт в плоскости интерферометра, и интерференционная картина на расстояниях Тальбота имеет периодическую структуру с прямоугольными элементарными распределениями (рисунок 3.7)

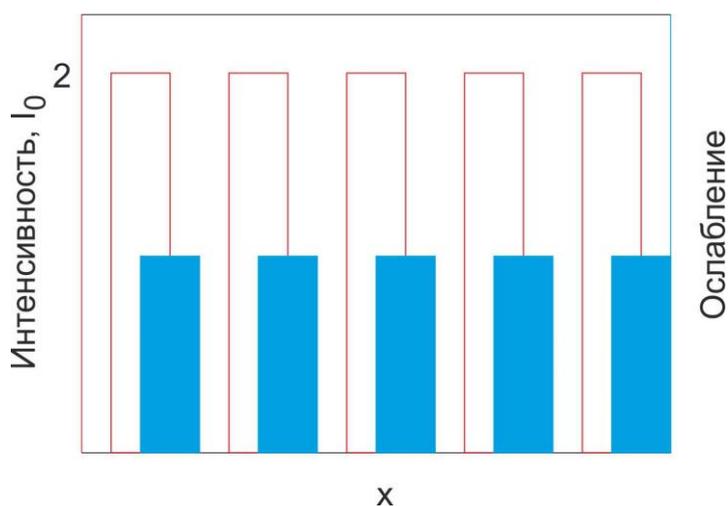


Рисунок 3.1 – периодические функции интенсивности интерференционной картины и ослабляющих элементов решетки G_2

В процессе построения шаговой фазовой кривой, когда решетка G_1 пошагово перемещается вдоль оси OX в пределах длины периода p_1 , интерференционная картина с каждым шагом также перемещается в пространстве вдоль решетки G_2 . Записанная на детектор зависимость интенсивности от шага, представляет собой свертку двух периодических функций, представленных на рисунке 3.1. Результирующая интенсивность на детекторе будет иметь вид периодической треугольной зависимости с периодом решетки p_2 (рисунок 3.2).

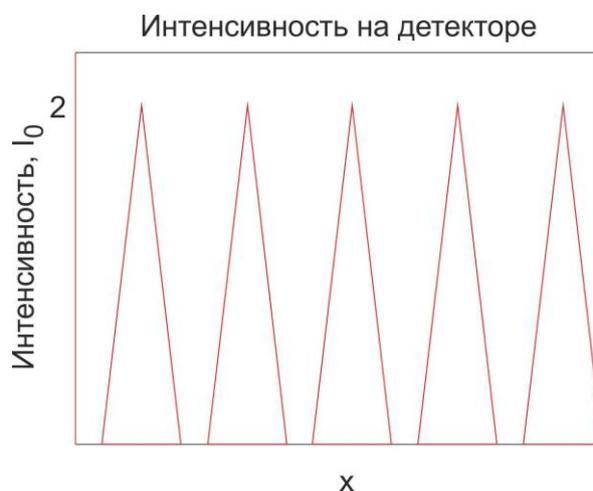


Рисунок 3.2 – распределение интенсивности на детекторе, как результат свертки периодических функций (рисунок 3.1)

Однако в случае полихроматического спектра излучения от неточечного источника вид и контрастность интерференционной картины представляют собой не прямоугольное распределение, а среднюю интенсивность излучения a_0 , промоделированную периодической функцией близкой к синусоидальной форме, которую можно представить в виде ряда Фурье:

$$I_{p_x, p_y}(x_g) = a_0(p_x, p_y) + \sum_{m=1}^{\infty} a_m(p_x, p_y) \cos\left(\frac{2\pi m x_g}{p_2} + \phi_m(p_x, p_y)\right) \quad (9)$$

Получаемая, при сканировании фазовой решеткой, интенсивность на детекторе соответственно будет сверткой прямоугольной функции ослабления детекторной решетки и функции (9). Что также будет являться периодической зависимостью с постоянной составляющей, которую обеспечивает излучение не участвующее в интерференции.

На рисунке 3.3 приведён вид типичной зависимости ФШК для одного из пикселей детектора. Кривые на рисунке 3.3 были построены путем перемещения фазовой решетки G_1 вдоль оси ОХ. Шаг был подобран таким образом, чтобы за 8 шагов решетка передвинулась в пространстве на полный период. Для иллюстрации и подтверждения того, что ФШК повторяет свою форму. В соответствии с периодичностью интерференционной картины сканирование было произведено на несколько периодов.

Очевидно, т.к. ШФК периодическая функция, то она хорошо представима в виде ряда Фурье. Также можно утверждать, что данная функция обладает высокой степенью синусоидальности. Для подтверждения этого ШФК была измерена многократно с частотой шага от 8 до 200 шагов на период. Везде была получена примерно одна зависимость – синусоида с постоянной составляющей. На рисунке 3.4 продемонстрированы данные одного из сканирований, выполненных на 6 периодов с ~60 шагами на период. Всё это позволяет утверждать, что ШФК хорошо аппроксимируется первой гармоникой ряда Фурье. Все остальные гармоники вносят незначительный вклад в вид кривой.

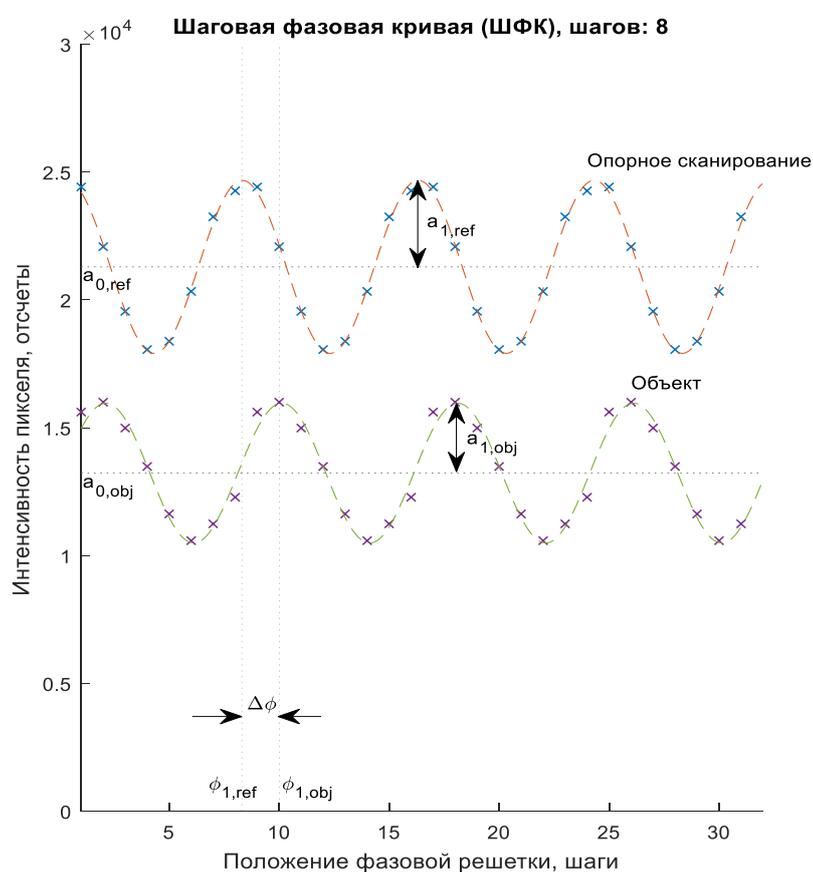


Рисунок 3.3 – ШФК для одного из пикселей. Точки x – экспериментальные данные, пунктирные линии – аппроксимация через ряд Фурье и его первую гармонику

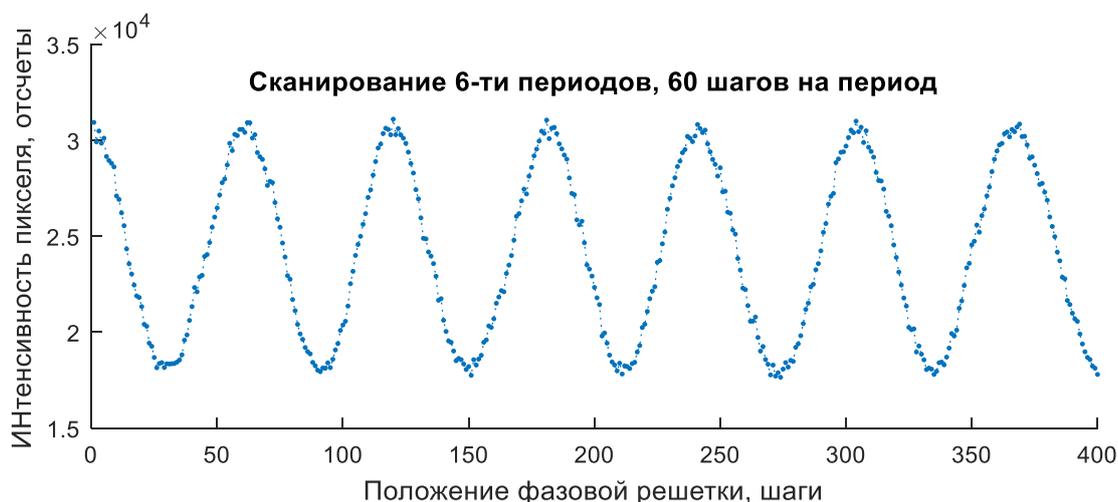


Рисунок 3.4 – сканирование ШФК с детализацией 60 шагов на период

Проведя Фурье анализ над экспериментальными точками ШФК можно получить значения амплитуд гармоник a_m , их частоту $\omega_m = 2\pi m/p_2$, сдвиг фаз φ_m и аналитически записать ШФК с точностью до первой гармоники:

$$I_{pix}(x_{g2}) = a_0 + a_1 \cos(\omega_1 x_{g2} + \varphi_1) \quad (10)$$

где x_{g2} - координаты перемещения интерференционной картины вдоль решетки G_2 .

Зная, что без объекта интерференционная картина перед пикселем была расположена так, что максимум интенсивности её приходился на сдвиг фазовой кривой $\varphi_{1,ref}$, а в случае сканирования с объектом на $\varphi_{1,obj}$ можно вычислить, на какое именно расстояние в поперечном направлении были перемещены интерференционные полосы благодаря воздействию объекта:

$$\Delta x(x) = \frac{\varphi(x)p_2}{2\pi} \quad (11)$$

Угол отклонения фронта волны в рентгеновском диапазоне очень мал, поэтому можно использовать следующие приближенные выражения для отклонения интерференционной картины, для случая, если объект стоит рядом с фазовой решеткой G_1 и преломляет волновой фронт на угол α :

$$\Delta x(x) = \alpha(x)d_T \quad (12)$$

где d_T – расстояние Тальбота, на котором регистрируется ШФК.

Угол преломления по определению есть дифференциал фазы волны в данной точке. Если фаза плоской волны в какой-то момент времени в

заданной плоскости равна $\Phi(x, y)$, тогда угловое отклонение волнового фронта вдоль оси ОХ определяется соотношением:

$$\alpha(x) = \tan\left(\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}\right) \approx \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x} \quad (13)$$

Подставляя (10) в (9) и (8) получаем, что

$$\varphi(x) = \frac{\lambda d_T}{p_2} \frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x} \quad (14)$$

Выражение (3.5) демонстрирует, что разность фаз опорной и объектной ШФК по сути является дифференциалом фазы волны в поперечном решеткам направлении. Благодаря этой особенности, метод и получил название дифференциальный фазо-контраст.

Используя данные опорной и объектной ШФК для каждого пикселя изображения, по следующим формулам могут быть получены контраст на поглощении, контраст на малоугловом рассеянии и дифференциальный фазо-контраст:

$$A = 1 - \frac{a_{0,obj}}{a_{0,ref}} \quad (15)$$

$$\varphi(x) = \varphi_{1,obj} - \varphi_{1,ref} \quad (16)$$

$$V = \frac{a_{1,obj} a_{0,ref}}{a_{0,obj} a_{1,ref}} = \frac{V_{obj}}{V_{ref}} \quad (17)$$

Произведя численное интегрирование (3.11) через суммирование значений дифференциального фазо-контраста $\varphi(x)$ от первого пикселя строки до искомого пикселя, вычисляется фазовый контраст отсканированного объекта:

$$\Phi(x, y) = \frac{p_2}{\lambda d_T} \int_0^x \varphi(x) dx = \frac{p_2}{\lambda d_T} \sum_{x=1}^x \varphi(x) \quad (18)$$

Как будет показано далее, фазо-контрастную картину можно получить, используя способ, пропускающим шаг получения дифференциального фазо-контраста.

4 Настройка интерферометра. Муаровые полосы на детекторе

Для того, чтобы создать четкое изображение необходимо выполнение ряда условий таких, как точно выставленные геометрические параметры системы, монохроматичность РИ и прочее. Однако существует явление муар (moiré), которое принципиально нельзя убрать. В основе этого эффекта лежит волновая природа РИ.

Суть moiré заключается в том, что РИ, проходя через решетку G_1 , взаимодействует с ней, вследствие чего на конечном изображении образуется интерференционная картина, которая мешает анализировать данные

Из-за чего для успешной регистрации ШФК необходимо точная настройка всех трех дифракционных решеток:

G_0 - убирает некогерентные относительно интерференционных полос источники;

G_1 – формирует интерференционную картину, в виде интерференционных полос параллельных штрихам решетки;

G_2 – производит сканирование интерференционной картины.

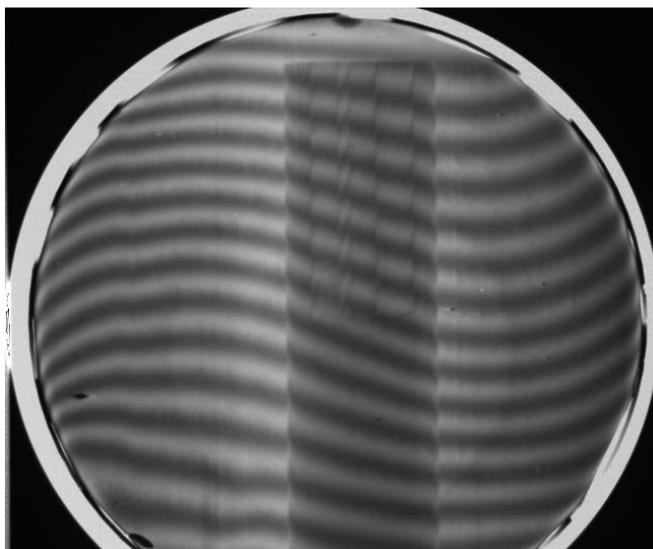


Рисунок 4.1 - Муаровый узор на детекторе. Решетки повернуты в плоскости XOY

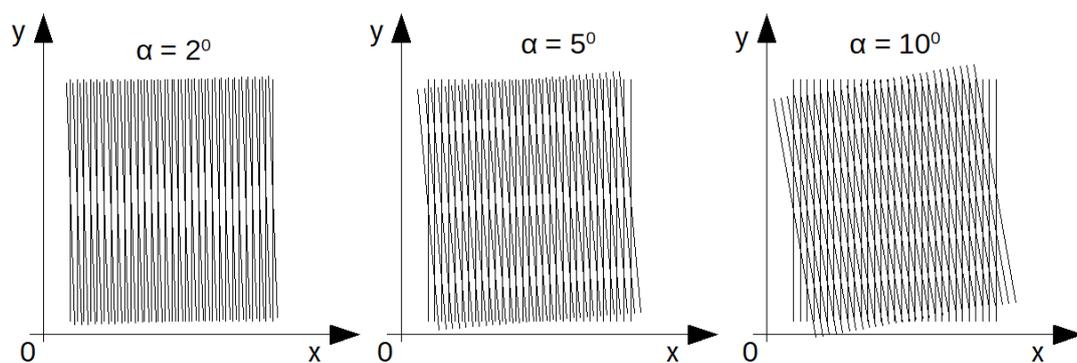


Рисунок 4.2 - модель муара - чем меньше угол поворота α , тем больше период муаровых полос

Из вышесказанного следует, что монтаж и настройка решеток в интерферометре подразумевает параллельность штрихов к интерференционной картине и соответственно параллельность друг к другу, а также согласование периода решеток с периодом интерференционной картины. В силу геометрии решеток (период ~ 10 мкм и протяженность штрихов ~ 7 см) любое незначительное пространственное рассогласование решеток и интерференционной картины приводит к появлению муарового узора на детекторе.

В интерферометре самой чувствительной плоскостью к параллельности решеток является вращение в плоскости $ХОУ$. При нарушении параллельности уже на $0,01$ градуса штрихи будут пересекаться друг с другом, что приведёт к появлению муара на детекторе. Вид муарового узора, связанного с непараллельностью штрихов в плоскости $ХОУ$ представлен на рисунке 4.1. Особенность этого муара в том, что его линии практически перпендикулярны штрихам решеток (решетки ориентированы вертикально).

Очевидно что, вращением одной из решеток относительно другой можно минимизировать этот тип муара исходя из принципа – чем больше период муаровых полос, тем лучше. Причем следует учесть, что наблюдаемые на детекторе муаровые полосы – это всегда муар только между интерференционной картиной и детекторной решеткой. Поэтому вращение G_0 относительно зафиксированных G_1 и G_2 будет приводить к ухудшению

контраста интерференционной картины вплоть до полного пропадания, но при этом угол и количество муаровых полос не будут меняться. Это связано с тем, что G_0 отвечает лишь за пространственную когерентность.

После того, как были установлены все три решетки, необходимо вращением решетки G_0 добиться максимального контраста муаровых полос. Тем самым мы максимально параллельно установим между собой решетки G_0 и G_1 . При этом будет максимально наблюдаться эффект Лау – точное наложение интерференционных полос друг на друга от пространственно когерентных источников на G_0 . В этом случае мы наблюдаем максимально контрастную интерференционную картину. В дальнейшем эти решетки больше не вращаются в плоскости XOY .

Второй вид муара связан с периодом решетки G_2 , который должен быть согласован с периодом интерференционной картины. Шаг регистрируемой интерференционной картины зависит от двух факторов связанных с увеличением по конусу:

- позиционирование G_1 относительно G_0
- позиционирование G_2 относительно G_1

В первом случае, расстояние от G_0 до G_1 задано условием пространственной когерентности. Поэтому, установив решетки на расчетные расстояния, мы первым делом должны добиться максимальной пространственной когерентности между G_0 и G_1 путем перемещения G_1 . В дальнейшем мы не можем менять положение G_1 на оси OZ .

Во втором случае, позиционированием G_2 вдоль OZ мы можем влиять на размер периода регистрируемой интерференционной картины. Из рисунка 2.4 видно, что благодаря протяженности интерференционной картины в пространстве, эффект масштабирования по конусу приводит к увеличению или уменьшению её периода при перемещении точки наблюдения вдоль OZ . Что можно использовать, подбирая оптимальное положение детекторной решетки так, чтобы её период максимально совпал с периодом интерференционной картины.

Рисунок 4.3 демонстрирует рентгенограмму с рассогласованием периода решетки G_2 и периода интерференционной картины. Муаровый узор при этом практически вертикален и параллелен штрихам решеток. Что означает, что G_2 максимально параллельна интерференционной картине. Из рисунка 3.12 видно, что в центре поля зрения период муара составил $p_m = 3$ мм (60 пикс. при ширине пикселя 50 мкм). Зная, что $p_2 = 6$ мкм, можно вычислить период интерференционной картины $\sim 6,004$ мкм. При расчётном $L = 1$ м, $d_T = 0,25$ м, наличие такого муара показывает реальную $L + d_T = 1,2566$ м. Ошибка в позиционировании G_2 была 660 мкм.

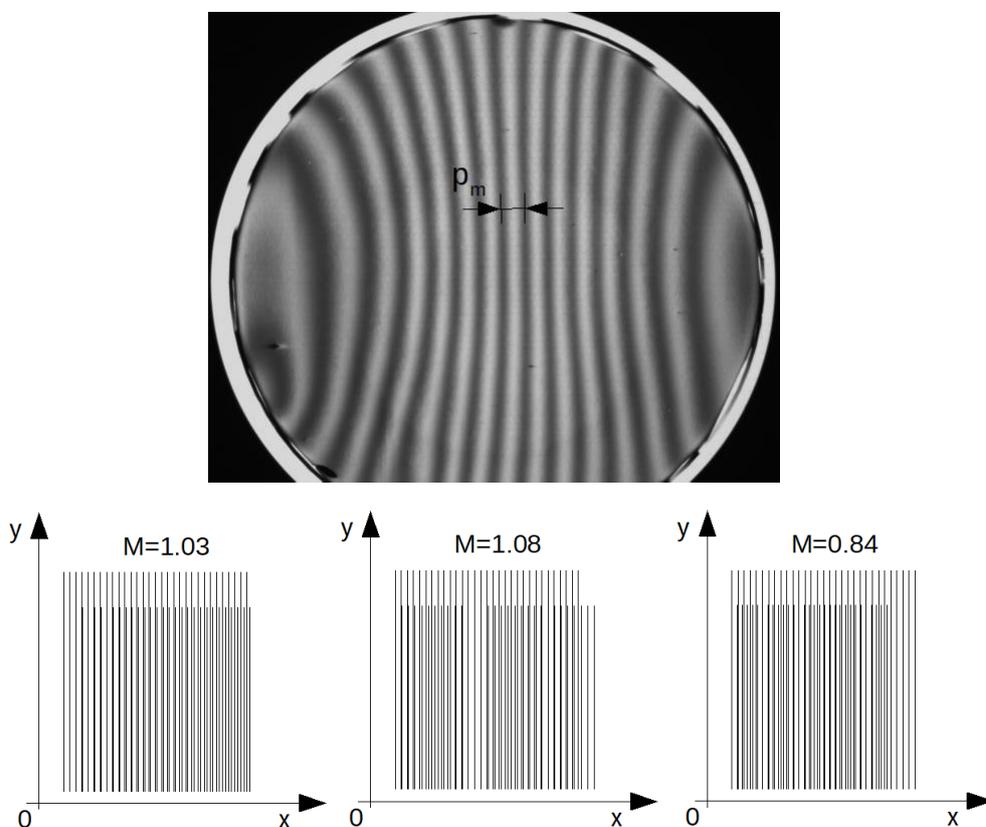


Рисунок 4.3 – муаровый узор на детекторе. Период интерференционной картины не совпадает с периодом G_2 . Внизу – модель муара, чем точнее совпадают периоды решеток, тем больше период муаровых полос

При настройке интерферометра, как правило, изначально присутствуют оба типа муара. На рисунке 4.4 с помощью модели, продемонстрирован алгоритм уменьшения муара. Вращением решетки G_2

добиваемся максимальной вертикальности полос, затем движением решетки вдоль OZ добиваемся максимально возможно широких полос муара.

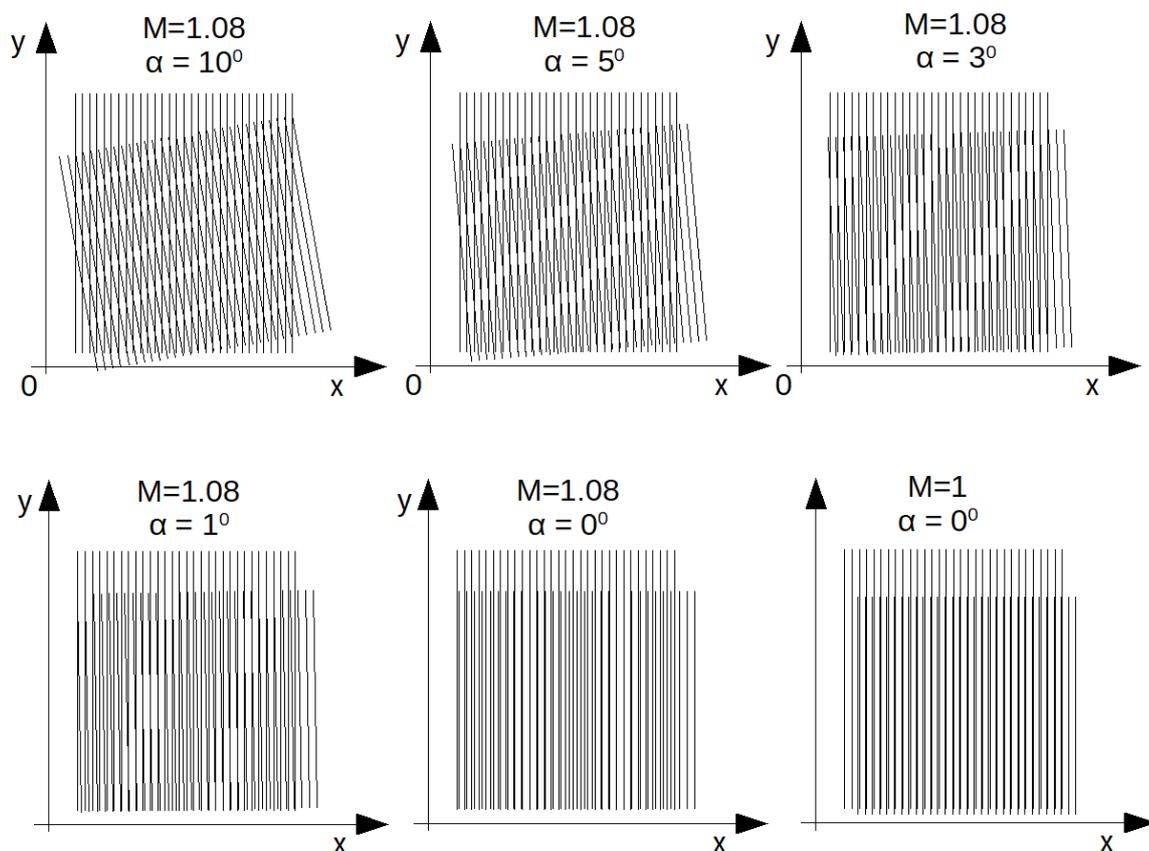


Рисунок 4.4 – Последовательность минимизации двух типов муара.

Вращением G_2 минимизируем угол α , затем перемещением G_2 вдоль OZ добиваемся максимально большого периода муаровых полос

Следует отметить, при полном совпадении штрихов G_2 с полосами интерференционной картины мы должны были бы наблюдать ровное поле интенсивности на всём детекторе. При движении фазовой решетки G_1 интенсивность бы менялась от минимальной интенсивности интерференционной картины к максимальной. Но на практике этого не происходит. Как бы мы не подбирали углы поворота и расстояния между решетками, но полностью избавиться от муара не получится. Максимум чего можно добиться – это широкие полосы муара, которые локально можно было бы рассматривать, как детектор без муаровых полос. Но тогда пришлось бы работать на очень ограниченном по размерам поле зрения детектора. На

рисунке 4.5 представлено несколько снимков детектора с вариантами максимально широких муаровых полос.

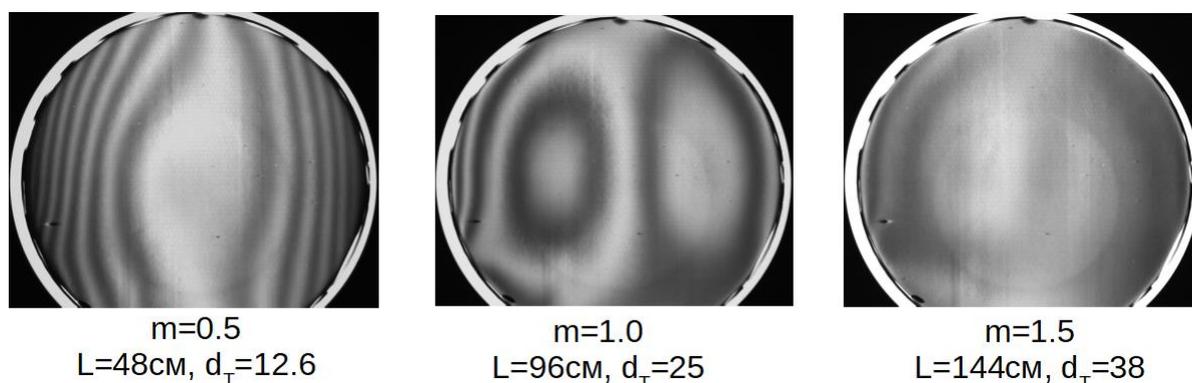


Рисунок 4.5 – максимально широкие муаровые полосы на детекторе.

Снимки сделаны для интерферометра, настроенного на различные порядки Тальбота для фотонов 22 кэВ

Основная причина невозможности полностью убрать муар – кривизна фронта волны и трудность в изготовлении решетки G_2 так, чтобы она идеально совпала с интерференцией. Несмотря на то, что G_2 при изготовлении была искривлена в поперечном направлении под радиус 120 см, тем не менее, сферичность фронта волны и неточности изготовления и позиционирования решеток всё равно вызывают муаровые полосы на детекторе. Причем их форма в зоне максимальной интерференции случайна, с изменяющимся по полю зрения периодом.

Природа муара – это постепенный сдвиг пропускающего штриха детекторной решетки относительно полосы интерференционной картины. Но при сканировании шаговой фазовой кривой, мы осуществляем то же самое – малыми шагами сдвигаем интерференционную картину относительно G_2 . Поэтому муар на детекторе по сути своей задаёт начальную фазу ШФК для каждого из пикселей.

5 Экспериментальная установка

В ходе работы был построен экспериментальный интерферометр Тальбо (традиционного типа $l > d$), представленный на рисунке ниже.

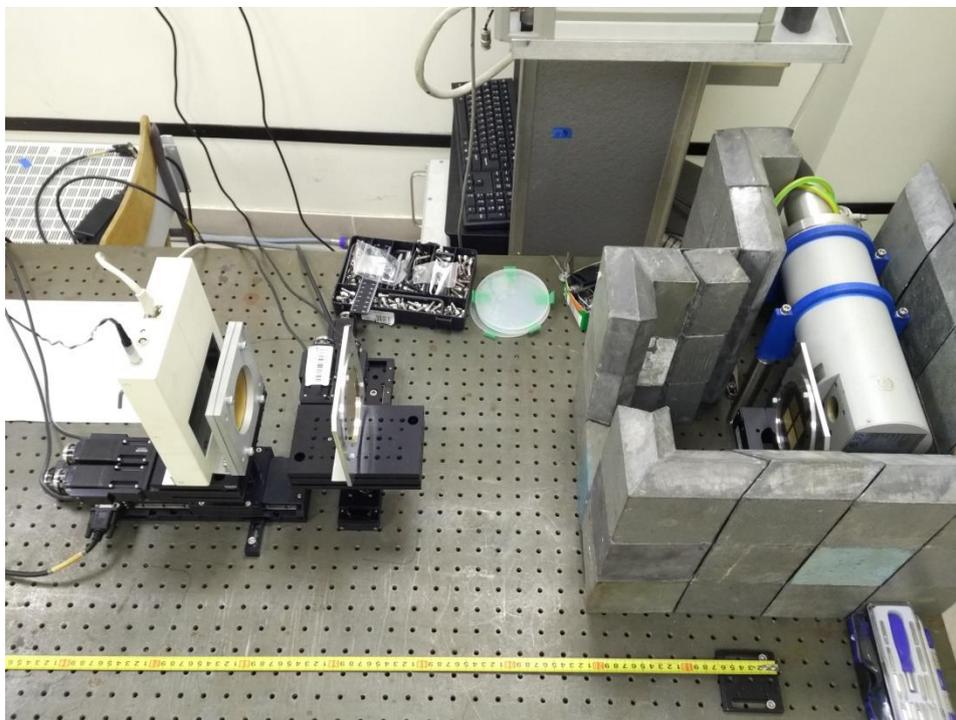


Рисунок 5.1 – экспериментальный интерферометр Тальбота

Рассмотрим компоненты системы. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка Spellman XRV 160 с изменяющимся диаметром фокального пятна – 1 мм/400 мкм. Источник такого размера не может обеспечить пространственную когерентность на расстояниях 1-2м. Поэтому непосредственно перед источником устанавливается решетка когерентности G_0 , которая разделяет протяженный источник на ряд источников, ширина которых равна ширине щели решетки G_0 . Для улучшения изображения абсорбционная решетка G_0 имеет следующие параметры:

- Период решетки 22,7 мкм
- Подложка из 0,2 мм из графита с золотым напылением 50 мкм
- Поперечный размер 4 дюйма

Далее идет фазовая решетка G_1 (для энергии 22 кэВ), сдвигающая фазу на $\pi/2$:

- Период решетки 4,75 мкм
- Подложка из 0,2 мм из кремния с золотым напылением 2,1 мкм
- Поперечный размер 4 дюйма

Перед детектором стоит решетка G_2 :

- Период решетки 6 мкм
- Подложка из 0,2 мм из графита с золотым напылением 50 мкм
- Поперечный размер 4 дюйма

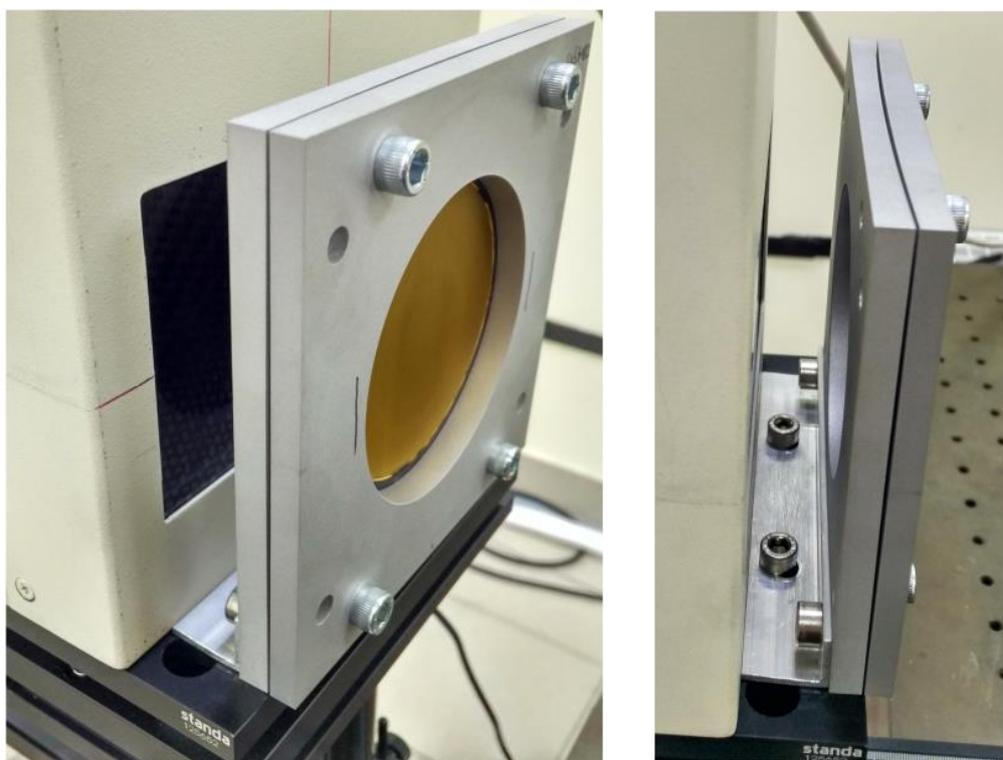


Рисунок 5.2 – решетка G_2

Рассмотрим более подробно детектор РИ. Датчик Shad-o-Box 3K HS сделан по CMOS технологии. Внутри камеры Shad-o-Box 3K HS находится сцинтиллятор Gd_2O_2S с прямым контактом. Сцинтиллятор преобразует рентгеновские фотоны в видимый свет, который воспринимается фотодиодами CMOS. Тонкая графитовая крышка защищает датчик от случайного повреждения, а также от внешнего освещения. Shad-o-Box 3K HS также содержит свинцовый и стальной экраны для защиты электроники

камеры от рентгеновского излучения. Камера чувствительны к энергии рентгеновского излучения от 15 кэВ до 225 кэВ.

В ходе работы были рассмотрены и рассчитаны основные параметры детектора. Это сделано для того, чтобы правильно интерпретировать полученные в дальнейшем результаты.

Для начала был рассчитан темновой сигнал. Темновой сигнал связан с темновым током, который протекает через полупроводниковый детектор даже при отсутствии поглощенных фотонов, в основном связан с тепловой генерацией пары электрон-дырка. Измерение темнового сигнала позволит откалибровать детектор для увеличения качества изображения.

Пример темнового сигнала представлен ниже.

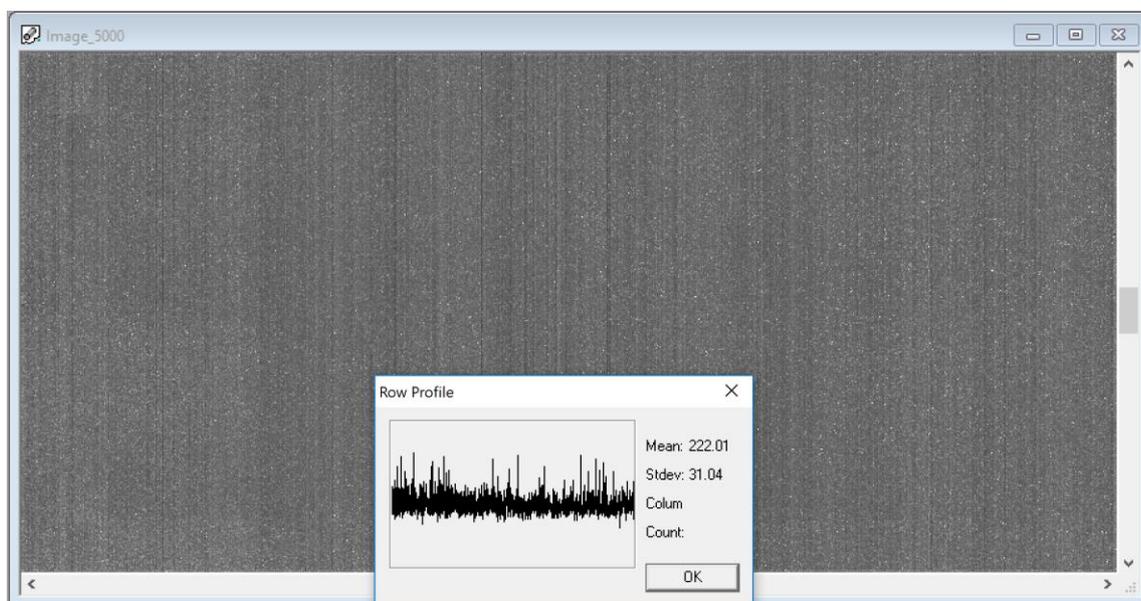


Рисунок 5.3 – распределение темнового сигнала в детекторе

Уровень сигнала, в данном случае, находится в диапазоне 190-250 цифровых отчетов и немного отличается для разных областей, которые представляют собой сенсоры Shad-o-Box 3K HS, из которых собран детектор. Калибровка выравнивает области между собой и приводит сигнал к минимальному значению, близкому к нулю.

Рассмотрим влияние времени экспозиции на размер темнового сигнала. Из рисунка 5.4 видно, что уровень темнового сигнала детектора растет пропорционально времени экспозиции. Это объясняется тем, что

увеличение времени выдержки приводит к увеличению температуры детектора, и, следовательно, к увеличению темнового тока. Однако по мере увеличения времени детектор приходит в тепловое равновесие со средой и больше не нагревается. Этим объясняется то, что после выдержки 8 с темновой сигнал выходит на плато и больше не растет.

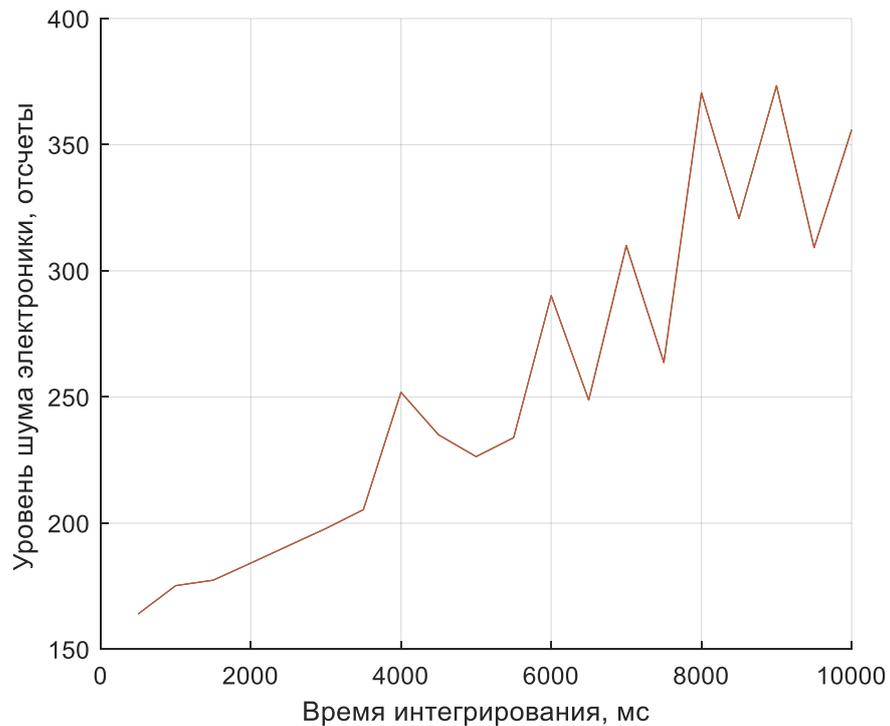


Рисунок 5.4 – зависимость темнового сигнала от времени экспозиции

Для количественной оценки шума используется безразмерная величина отношение «сигнал/шум» (*англ.* signal-to-noise ratio, SNR). В практике обработки изображений используется определение SNR в виде обратной величины коэффициента вариации, т.е., отношения среднего значения сигнала μ к его стандартному отклонению σ . [2]

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (19)$$

Так как статистическое рентгеновское излучение описывается распределением Пуассона, то для числа детектируемых квантов μ справедливо соотношение: [3]

$$SNR = \frac{\mu}{\sqrt{\mu}} = \sqrt{\mu} \quad (20)$$

Число детектируемых квантов прямо пропорционально дозе излучения, регистрируемого детектором. Из этого следует, что на практике значение SNR ограничено для отдельного снимка. В качестве ориентировочного значения SNR можно использовать рекомендации стандартов на цифровую радиографию. Согласно этому документу, для целей цифровой радиографии детекторы должны обеспечить SNR не менее 70.[4]

Как говорилось, ранее шум пропорционален поглощенной дозе. Поэтому выбор дозы важен для улучшения SNR. Величина дозы пропорционально напряжению и току трубки, а также времени и расстоянию до детектора, по следующей формуле.

$$D \approx \frac{IU^2}{S^2} \cdot t \quad (21)$$

Так как от напряжения зависит длина волны, а величину расстояния можно менять только в соответствии с геометрией Тальбота-Лау, то для регулировки дозы мы можем менять только ток и время экспозиции. Так как для диагностики требуется значительный поток фотонов, остается лишь время экспозиции для регулирования дозы, и, следовательно, SNR.

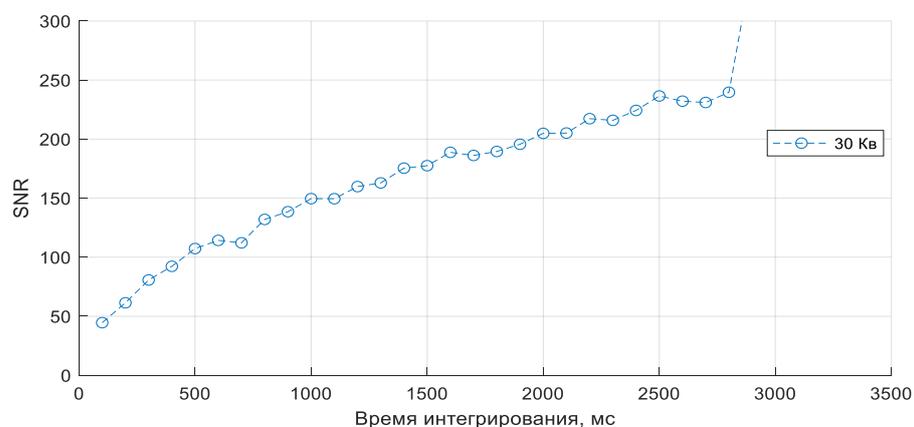
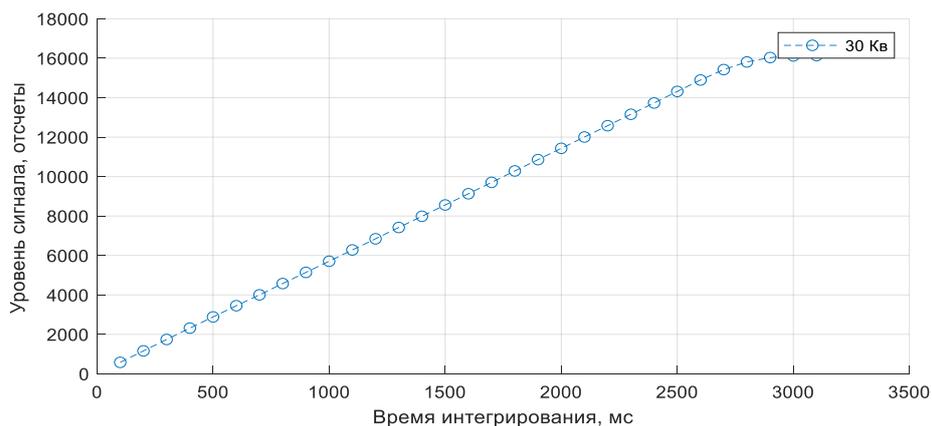


Рисунок 5.5 – Измерения сигнала и SNR детектора для режима работы интерферометра Тальбо-Лауэ на 22 кэВ. Ускоряющее напряжение 30 кВ, ток 1 мА, расстояние до детектора 1 м

Рассмотрим зависимость SNR от времени экспозиции. Измерение SNR для напряжения 30 кВ показало, что в диапазоне шкалы ниже 2000 SNR приближается к 70, что указывает нам о недопустимости выхода сигнала за этот порог значений.

6 Программное обеспечение

Как говорилось ранее, обрабатывание данных является сложной технической задачей требующей знаний различных специализированных пакетов.

Первым этапом стало знакомство я языком C++. Так как C++ является одним из самых популярных языков программирования. Область его применения включает создание операционных систем, разнообразных прикладных программ, драйверов устройств и прочее. Обучение шло в среде Qt. В течение семестра были усвоенные основы программирования, такие как работа с динамическими массивами циклами, функциями, динамическими массивами.

Следующим шагом стало изучение программы geant4.

Geant4 – инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через материю методами Монте-Карло. Он обладает широкой функциональностью, включающую трекинг, построение геометрии, физических моделей и т.д. Физические процессы затрагивают внушительное количество областей, в том числе электромагнитные, адронные и оптические процессы, огромное множество долгоживущих частиц, материалов и элементов в различных диапазонах энергии.

Данный инструментарий сочетает в себе многофункциональность и простоту в написании приложений благодаря объектно-ориентированному подходу, реализованному на языке программирования C++, что позволяет использовать его даже специалистам, которые не обладают глубокими познаниями в информационных технологиях и не владеют высокими профессиональными навыками программирования, в самых различных областях науки, таких как физика высоких энергий, исследование ядерных реакций, медицина, ускорители частиц и космические физические исследования.

Третьей программой стал MatLAB. MatLAB – это один из старейших пакетов прикладных программ для решения задач технических вычислений. Главные преимущества MatLAB, которые выгодно отличают его среди других существующих ныне математических систем и пакетов, состоят в следующем. □ Система MatLAB специально создана для проведения именно инженерных расчетов: математический аппарат, который используется в ней, предельно приближен к современному математическому аппарату инженера и ученого и опирается на вычисления с матрицами, векторами и комплексными числами; графическое представление функциональных зависимостей здесь организовано в форме, которую требует именно инженерная документация. Для нашей работы MatLAB представляется особый интерес, так как имеет встроенный графический пакет, позволяющий работать с изображениями.

Создание первоначальной модели и работа с математическими выкладками велась в пакете Wolfram Mathematica. Mathematica – это система компьютерной алгебры, широко используемая в научных, инженерных, математических и компьютерных областях. В систему заложены линейно-алгебраические возможности — работа с матрицами, поиск собственных значений, собственных векторов и т.п. Этот факт определил выбор данного пакета, так как описанный ниже метод полностью базируется на работе с матрицами данных.

7 Метод главных компонент (РСА)

Во многих практических задачах исследователя интересуют главным образом признаки, которые обнаруживают наибольшую изменчивость (разброс, дисперсию) при переходе от одного объекта к другому, при этом такие признаки часто невозможно наблюдать непосредственно на объектах. Например, при тестировании новых медикаментов на состояние пациента влияет большое число факторов: психологическое состояние, эффект плацебо, внушаемость и т.п. В большинстве случаев эти признаки коррелированы, поскольку являются результатами частных измерений некоторых интегральных характеристик. Часто оказывается, что эти интегральные характеристики описываются главными компонентами. Идея метода главных компонент состоит в том, чтобы заменить k -мерную случайную величину при наименьшей потере информативности на m -мерную ($m < k$).

Целью методов снижения размерности является исследование внутренней структуры изучаемой системы k случайных величин, «сжатие» этой системы без существенной потери содержащейся в ней информации, путем выявления небольшого числа факторов, объясняющих изменчивость и взаимосвязи исходных случайных величин.

Метод главных компонент выявляет k компонент — факторов, объясняющих всю дисперсию и корреляции исходных k случайных величин; при этом компоненты строятся в порядке убывания объясняемой ими доли суммарной дисперсии исходных величин, что позволяет зачастую ограничиться несколькими первыми компонентами.

Среди прикладных задач, решаемых указанными методами, отметим следующие:

— Поиск скрытых, но объективно существующих взаимосвязей между факторами системы. Проверка гипотез о взаимосвязях этих показателей, выявление природы различий между объектами;

— Описание изучаемой системы числом признаков, значительно меньшим числа исходных факторов, при этом выявленные факторы или главные компоненты содержат в среднем больше информации, чем непосредственно зафиксированные на объектах значения исходных факторов;

— Визуализация исходных многомерных наблюдений путем их проецирования на специально подобранную прямую, плоскость или трехмерное пространство;

— Сжатие исходной информации, значительное уменьшение объемов информации, хранимой в базах данных, без существенных потерь в информативности.

Рассмотрим PCA на двухмерном примере. В представленной выборке (рисунок 7.1) имеются два признака, сильно коррелирующие друг с другом. Используя алгоритм PCA, найдём признак-комбинацию и выразим оба этих признака одним новым.

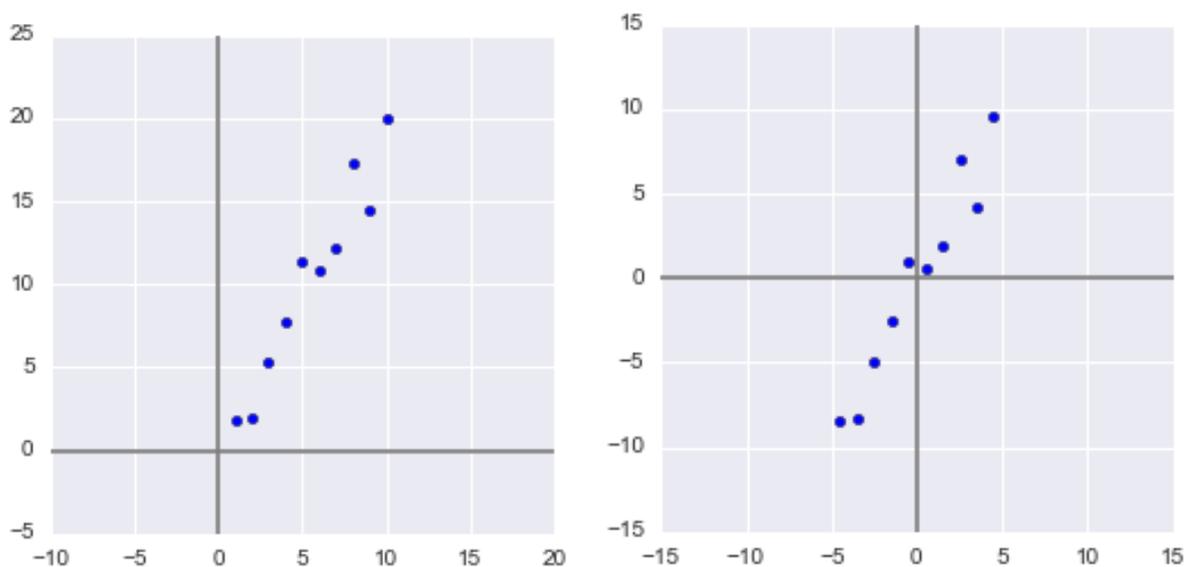


Рисунок 7.1 – первоначальный массив данных (слева),
отцентрированный массив (справа)

Зачастую для простоты данные центрируют, присвоив нулю координаты математического ожидания данных, однако алгоритм можно использовать и без этого шага.

Далее строится ковариационная матрица для данных. Ковариационная матрица случайного вектора — квадратная симметрическая неотрицательно определенная матрица, на диагонали которой располагаются дисперсии компонент вектора, а внедиагональные элементы — ковариации между компонентами. Ковариация определяется как:

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = E[(X_i - E(X_i))(X_j - E(X_j))] \quad (22)$$

Так как в данном случае $E(X_i) = E(X_j)$, то

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = E(X_i X_j) = \mathbf{X} \mathbf{X}^T \quad (23)$$

Ковариация обладает следующими замечательными свойствами: она симметричная; на ее диагонали находятся значения дисперсии данных; собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу, направлен вдоль максимального разброса данных.

Таким образом, мы можем построить новый базис, ось абсцисс направлен вдоль максимальной дисперсии, а ось ординат ему ортогональная.

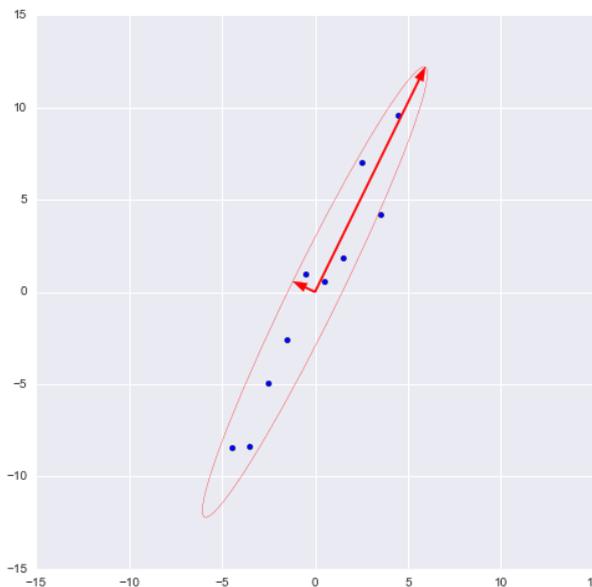


Рисунок 7.2 – вид нового базиса

Спроецировав на абсцисс наши данные мы уменьшим размерность до 1. Потерянная информация в процентах будет равна отношению дисперсии, соответствующей «выкинутой» оси к сумме дисперсий. То есть для нашего случая произойдет потеря информации не более 10%.

8 Применение PCA в фазово-контрастной томографии

Процесс получения изображений сводится к следующему. Объект устанавливается перед фазовой решеткой (смотреть разделы 1, 2), после чего снимают изображения при N положениях решетки. Как правило, сдвиг решетки подбирается так, чтобы фаза изменилась на 2π . В нашем эксперименте для каждой проекции было сделано 8 снимков.

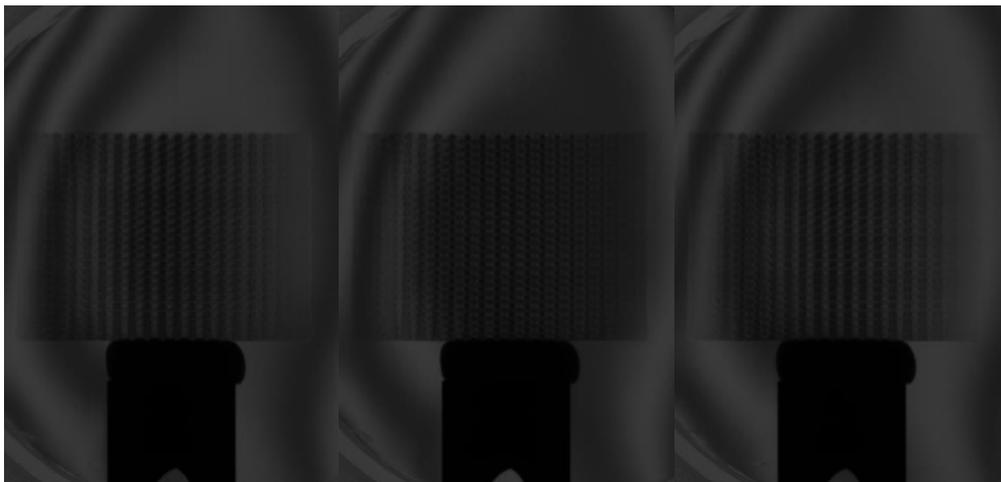


Рисунок 8.1 – проекции объекта при разном сдвиге решетки

Таким образом, мы можем записать значение интенсивности для каждого пикселя следующим образом.

$$I_n(x,y) = S(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(\Phi(x,y) + \delta_n) \quad (24)$$

Где $I_n(x,y)$ – интенсивность пикселя в n снимке; $S(x,y)$ – значение фона пикселя; $B(x,y)$ – карта контрастности пикселя; $\Phi(x,y)$ – фазовая модуляция; δ_n – n -ый фазовый сдвиг.

Для PCA нам понадобится преобразовать первоначальное изображение в вектор строку, то есть мы получим вектор x размерностью $M = x_{\max} \times y_{\max}$. В итоге у нас будет массив размерностью $N \times M$. Для примера N -ая строка массива будет представляться как x_n .

$$x_n = [S_1 + B_1 \cdot \cos(\Phi_1 + \delta_n) \dots S_m + B_m \cdot \cos(\Phi_m + \delta_n)] \quad (25)$$

Далее по аналогии с разделом 3 мы центруем данные, физический смысл этого процесса заключается в вычитании значений фона. Как говорилось ранее δ пробегает значение от 0 до 2π , следовательно

$$\sum_{i=1}^N \cos(\Phi_1 + \delta_n) = 0 \quad (26)$$

Тогда m_x получим следующим образом

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{n,k} \approx S_k \quad (27)$$

Получаем центрированный массив x'

$$x' = \begin{pmatrix} B_1 \cdot \cos(\Phi_1 + \delta_1) & \dots & B_m \cdot \cos(\Phi_m + \delta_1) \\ B_1 \cdot \cos(\Phi_1 + \delta_n) & \dots & B_m \cdot \cos(\Phi_m + \delta_n) \end{pmatrix} \quad (28)$$

Распишем k, n -ый элемент

$$B_k \cdot \cos(\Phi_k + \delta_n) = B_k \cdot \cos(\Phi_k) \cos(\delta_n) - B_k \cdot \sin(\Phi_k) \sin(\delta_n) = a_n u_k + b_n v_k$$

где $u_k = B_k \cdot \cos(\Phi_k)$; $a_n = \cos(\delta_n)$; $v_k = B_k \cdot \sin(\Phi_k)$; $b_n = \sin(\delta_n)$.

Тогда ковариационная матрица для нашего массива будет иметь вид

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^M (a_i u_k + b_i v_k)(a_j u_k + b_j v_k) \quad (29)$$

Раскроем скобки

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^M a_j a_i u_k u_k + 2a_i b_j u_k v_k + b_i b_j v_k v_k \quad (30)$$

Рассмотрим более подробно получившиеся элементы

$$\sum u_k u_k = \sum (B_k \cdot \cos(\Phi_k))^2$$

$$\sum v_k v_k = \sum (B_k \cdot \sin(\Phi_k))^2$$

$$\sum a_i b_j = \sum (B_k)^2 \cdot \cos(\Phi_k) \sin(\Phi_k)$$

Заметим что $\sum a_i b_j \ll \sum v_k v_k$ и $\sum a_i b_j \ll \sum u_k u_k$, так, как в сумме у нее стоит нечетная функция (синус на косину). В силу того, что Φ пробегает значения от 0 до 2π сумма будет близка к нулю в отличии $u_k u_k$ и $v_k v_k$, в которых суммируются квадраты функций (\sum всегда > 0). Поэтому можно пренебречь $a_i b_j$ в выражении 31. Следовательно, матрица ковариации может быть записана в следующем виде

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^M a_j a_i u_k u_k + b_i b_j v_k v_k \quad (31)$$

Или

$$C = \alpha A + \beta F \quad (32)$$

Где $\alpha = \sum u_k u_k$; $\beta = \sum v_k v_k$; а А и F ортогональные друг другу матрицы, это следует из того, что функции синуса и косинуса ортогональны.

Распишем матрицы А и F.

$$\begin{aligned} A &= [\cos(\delta_1) \dots \cos(\delta_n)]^T [\cos(\delta_1) \dots \cos(\delta_n)], \\ F &= [\sin(\delta_1) \dots \sin(\delta_n)]^T [\sin(\delta_1) \dots \sin(\delta_n)] \end{aligned} \quad (33)$$

Собственные числа и вектора этих матрицы равны

$$\begin{aligned} \lambda_A &= \sum \cos^2(\delta_n), \\ \lambda_F &= \sum \sin^2(\delta_n), \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \omega_A &= [\cos(\delta_1) \dots \cos(\delta_n)]^T / \lambda_A, \\ \omega_F &= [\sin(\delta_1) \dots \sin(\delta_n)]^T / \lambda_F, \end{aligned} \quad (35)$$

Вектора ω_A и ω_F ортогональны, так как δ пробегает значения от 0 до 2π , следовательно, $\sum \cos(\delta_n) \sin(\delta_n)$.

Отсюда получаем, что собственные вектора С тоже равны ω_A и ω_F . После нормировки этих векторов мы получим новый базис по аналогии с разделом 3, то есть базис $U = [\omega_A \ \omega_F]$.

Найдем матрицу x' в новом базисе. Из определения базиса x' преобразуется как $y = Ux'$

Получаем, что

$$\begin{aligned} y_{1,k} &= \sum B_k \cdot \cos(\Phi_k + \delta_n) \cos(\delta_n) \\ y_{2,k} &= \sum B_k \cdot \cos(\Phi_k + \delta_n) \sin(\delta_n) \end{aligned} \quad (36)$$

Расписав косинус суммы и придерживаясь выше описанных рассуждений, можно показать, что

$$\begin{aligned} y_{1,k} &\approx \sum B_k \cdot \cos(\Phi_k) \\ y_{2,k} &\approx \sum -B_k \cdot \sin(\Phi_k) \end{aligned} \quad (37)$$

В итоге найдем модуляцию фазы для каждого пикселя.

$$\Phi_k = \arctan\left(\frac{-y_{2,k}}{y_{1,k}}\right) \quad (38)$$

Таким образом, мы получили очень интересный результат, в нашем методе необязательно ювелирно настраивать сдвиг решетки, так как

конечная фаза от нее зависит слабо, это значительно упрощает техническую реализацию.

9 Создание модели в Wolfram Mathematica

Для рассмотрения и отладки алгоритма в Mathematica была создана модель фазового объекта (рисунок 9.1). Объект представляет собой пересечение усеченного параболоида и прямоугольного параллелепипеда, максимальная высота составила $4/3\pi$.

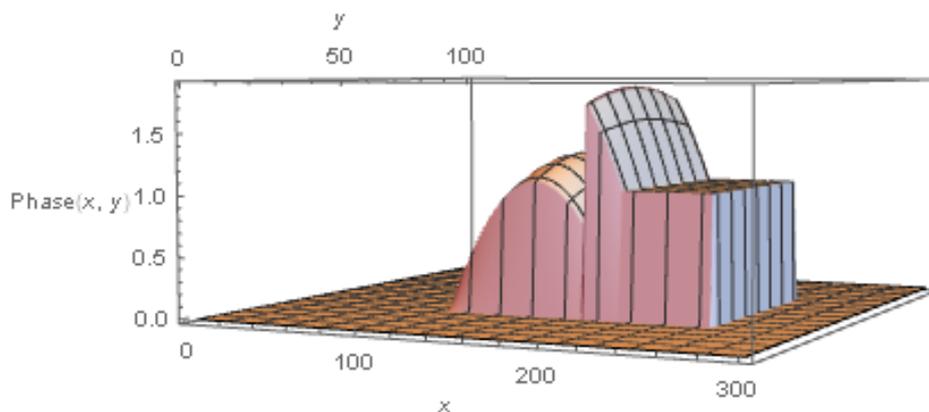


Рисунок 9.1 – фазовый объект

После описанного выше алгоритма была получена следующая фазовая картина (рисунок 9.2).

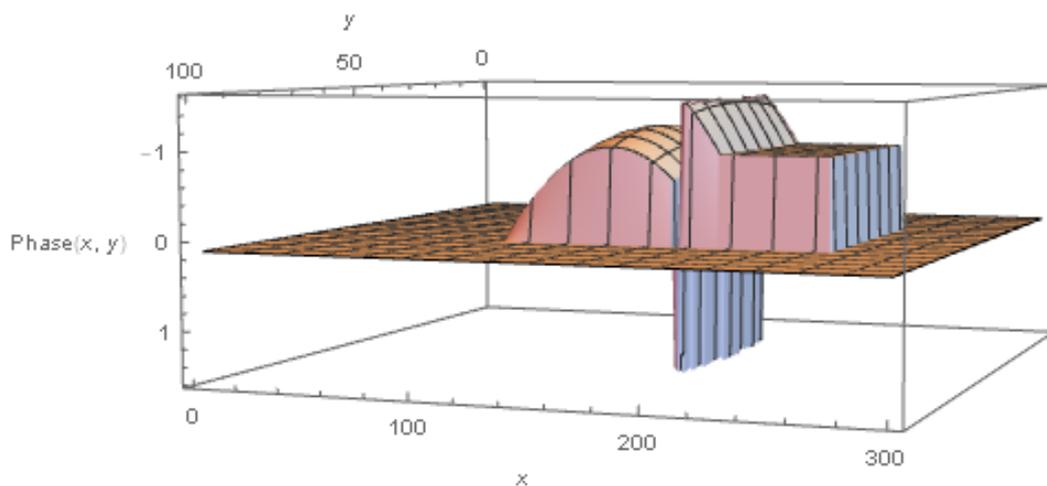


Рисунок 9.2 – восстановленный фазовый объект

Для наглядности построим сечение вдоль оси $y=50$ (центральная ось).

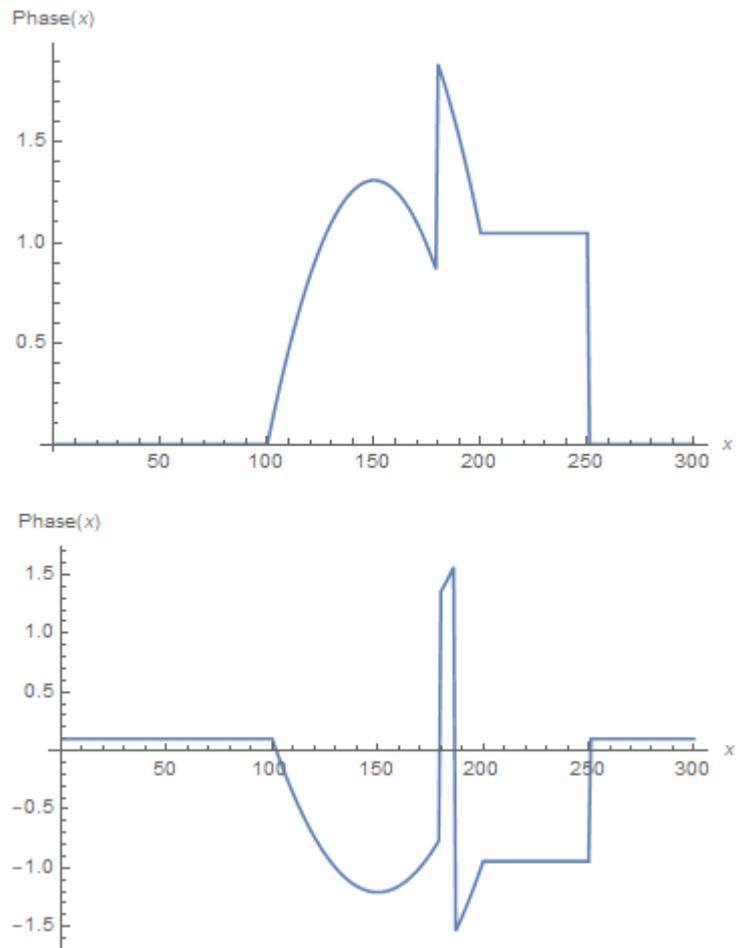


Рисунок 9.3 – сечение изначального фазового объекта (вверху);
сечение восстановленного фазового объекта (внизу).

Видно, что полученные графики довольно сильно различны по форме и амплитуде. Это объясняется тем, что функция арктангенса ограничена от 0, по которой и восстанавливается фаза. В то время как первоначальный объект ограничен от 0 до $4/3\pi$. Для удобства рассмотрим не фазовую картину, а карту интенсивности. Как говорилось ранее, интенсивность может быть представлена в виде $I_n(x,y) = V(x,y) \cdot \cos(\Phi(x,y))$ Поэтому для наглядности построим функцию косинус для этих распределений фаз.

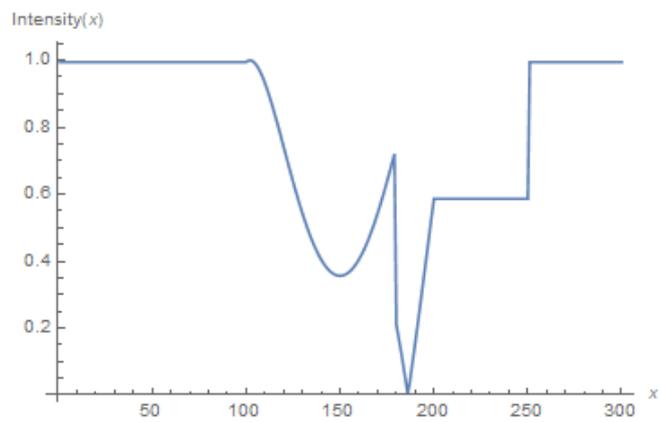
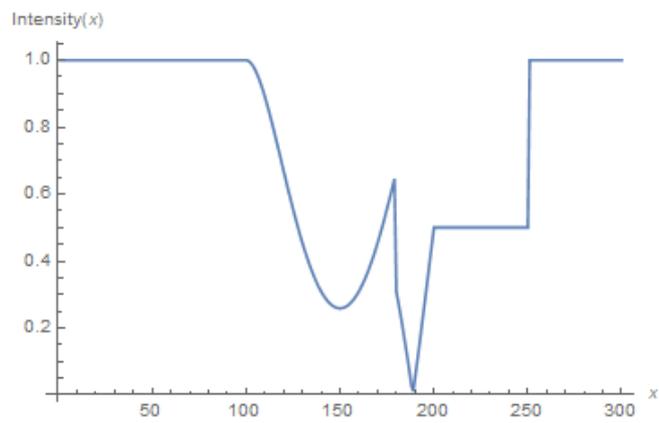
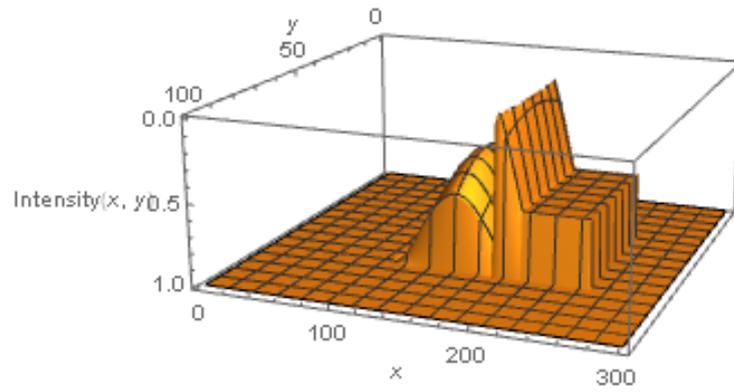
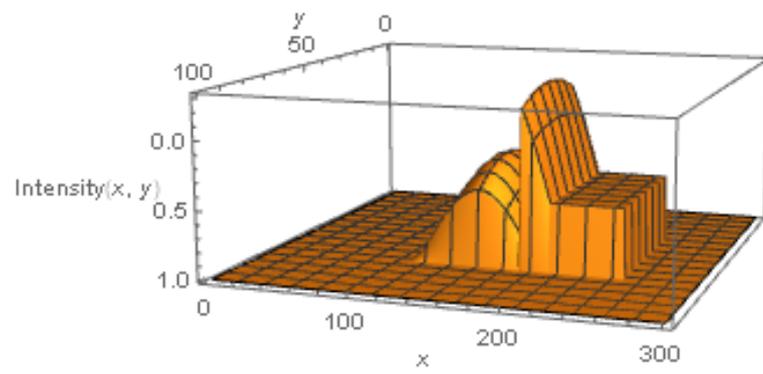


Рисунок 9.4 – косинус от полученной и итоговой фазы; их сечения вдоль центральной оси.

Из рисунка 9.4 видно, что поведение обоих косинусов одинаково. Для оценки в расходимости восстановленного и исходного графиков введем следующий параметр:

$$\sigma = \frac{(\int (F(x)-G(x))^2 dx)^{0.5}}{\int F(x) dx} \quad (39)$$

где $F(x)$ – функция, описывающая исходный график; $G(x)$ – функция, описывающая восстановленный график.

Данный коэффициент равен сумме квадратичных отклонений графиков друг другу, приведенной к площади исходного графика. При отсутствии муара σ_0 составил менее 0,3%, что говорит о высоком уровне соответствия этих двух графиков.

Рассмотрим работу алгоритма на реальном примере. Предметом исследования был выбран куб из слабопоглощающего полимера. Структура куба является пересечением плоскостей, состоящих из полимерных трубочек.



Рисунок 9.1 – полимерный куб

Первым шагом стало сканирование муара без объекта для того, чтобы получить фоновую интерференционную картину. Как говорилось ранее, сканирование происходило следующим образом. Для каждой проекции были получены изображения при 8 положениях решетки, сдвиг выбирался так, что $\delta_8 - \delta_1 \approx 2\pi$. Далее массив изображений подвергался обработки алгоритмом.

Для начала были получены интерферограммы для куба из слабопоглощающего полимера.

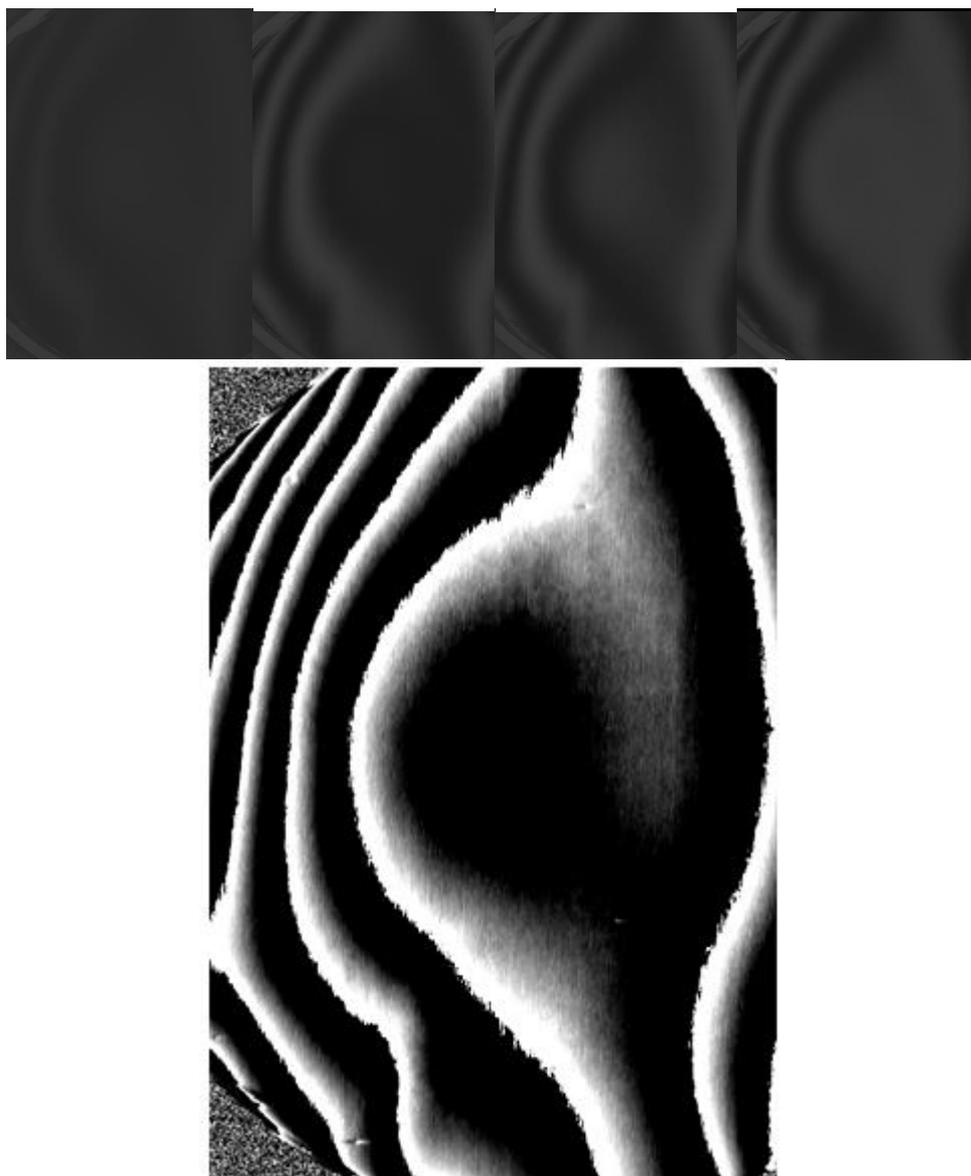


Рисунок 9.2 – пример интерферограмм фона (вверху);
дифференциальная фазо-контрастная карта фона (внизу)
По аналогии с процессом сканирования фона, сканируется объект.

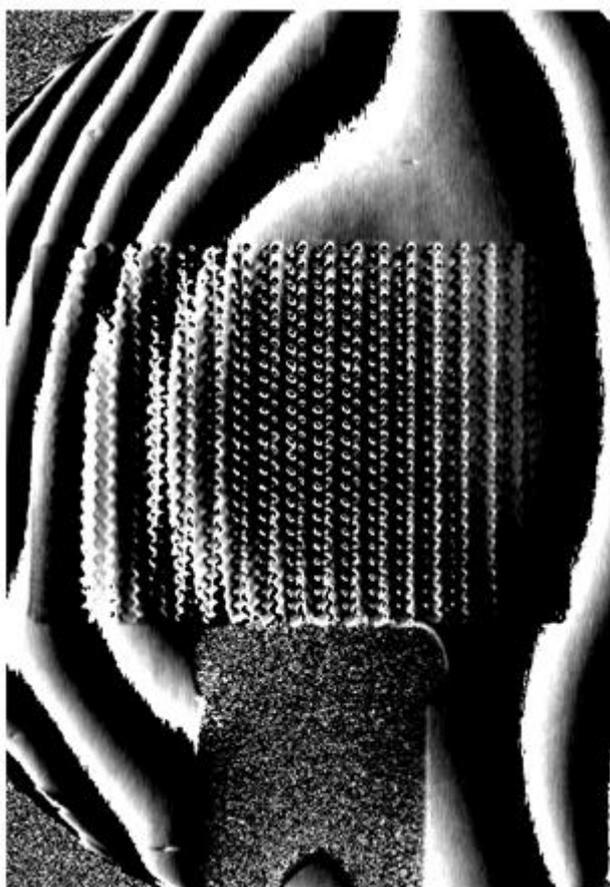
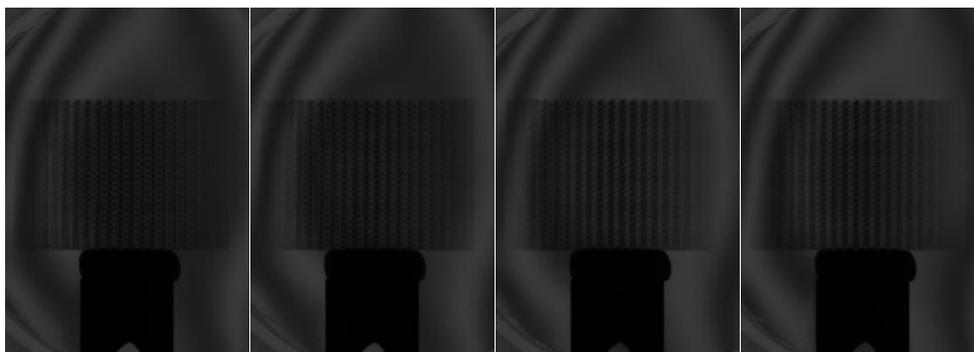


Рисунок 9.3 – пример интерферограмм объекта (вверху);
дифференциальная фазо-контрастная карта объекта (внизу)

Следуя выражению 16, то есть, вычтя эти два изображения, мы получим дифференциальное фазо-контрастное изображение.

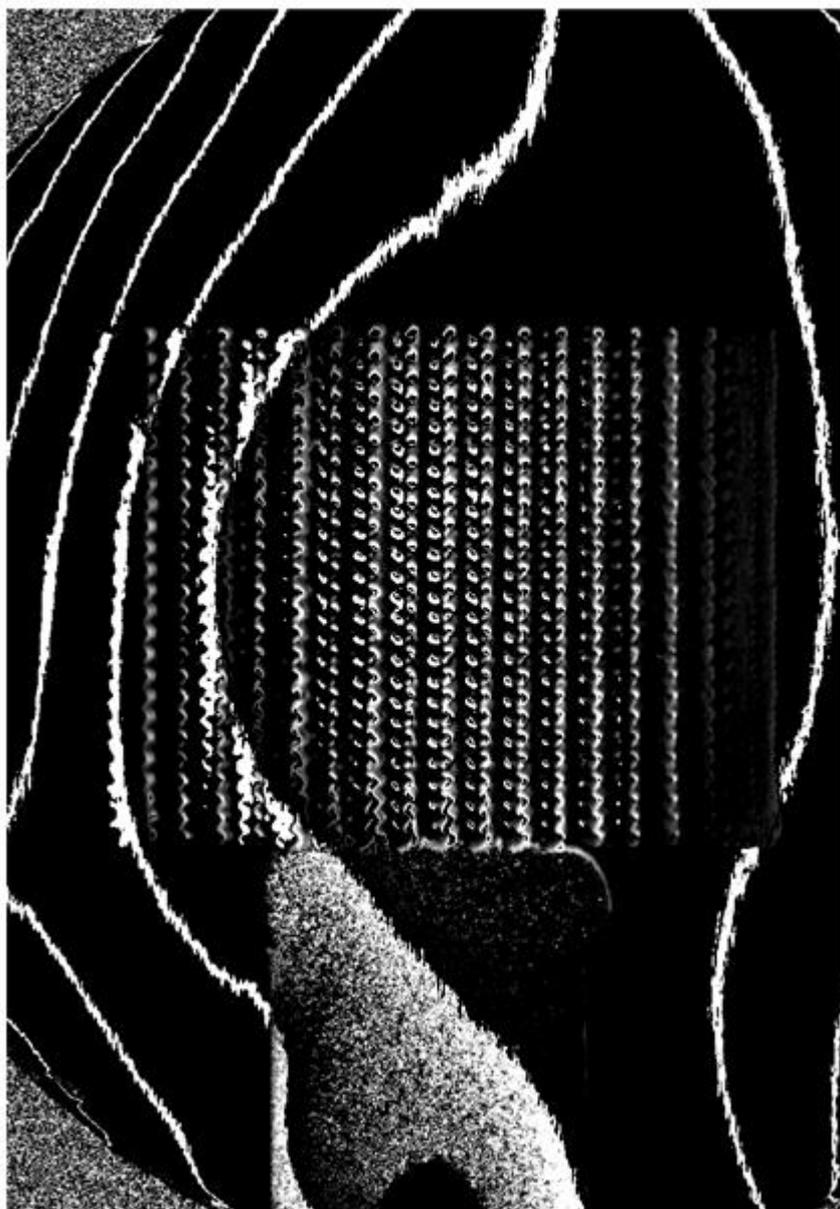


Рисунок 9.4 – дифференциальная фазо-контрастная карта объекта без фона

Из рисунка 9.4 видно, что, несмотря на вычитание фона, полностью избавиться от муара не получилось. Это объяснить это можно используя принципы дифракции Френеля. При внесении объекта интерференционная картина муара изменится, так как объект будет частично перекрывать интерференционную картину, по аналогии с опытами закрытия областей Френеля. Также вклад в интерференционную картину вносит преломленное излучение и прочие второстепенные факторы.

Это показывает важность настройки мура, и методов удаления его из конечных интерферограмм.

10 Полученные результаты

Следующим шагом стал перенос алгоритма в Matlab. Matlab имеет удобный графический интерфейс, поэтому предпочтение было отдано данному ПО. Также Matlab имеет большое количество встроенных фильтров и методов по улучшению изображению, что является важным аспектом, так как упрощаются процессы удаления муара и увеличения качества изображения.

Из рисунка 9.4 также видна ранее описанная проблема, заключающаяся в области определения арктангенса. Так как арктангенс определен от $-0,5\pi$ до $+0,5\pi$, то фаза восстанавливается не корректно. Для наглядности рассмотрим центральную область, где муар минимальный. Так как интерференционная картина описывается косинусом, то её фаза должна быть определена от 0 до π (область определения арккосинуса). Из-за этого несоответствия возникают скачки в итоговом фазо-контрасте. Это хорошо наблюдается если рассмотреть изменение фазы для одной строчки.

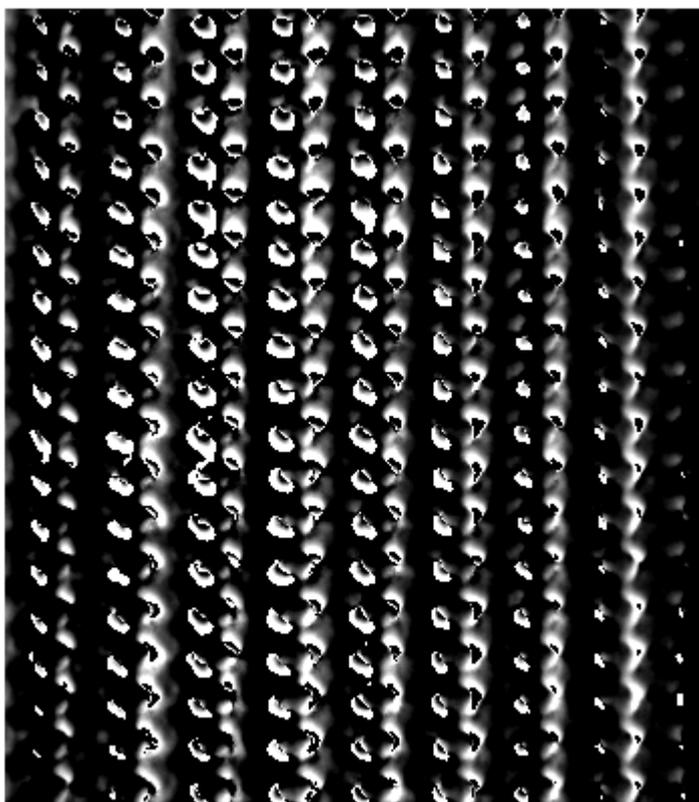


Рисунок 10.1 – центральная часть фазо-контраста куба

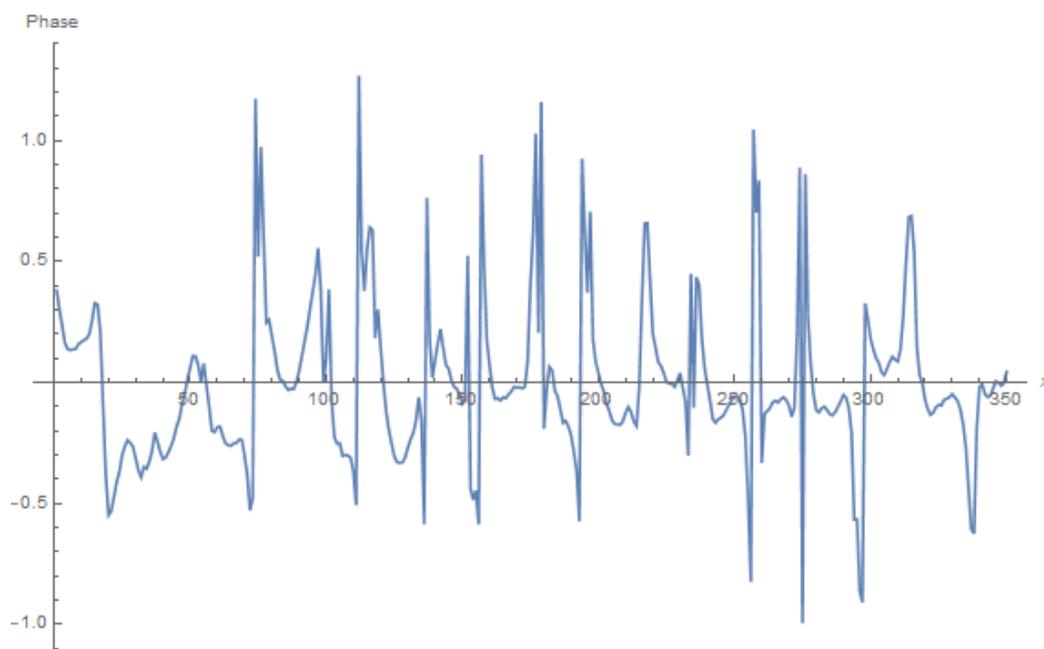


Рисунок 10.2 – изменение фазы вдоль одной строки

Произведя численное интегрирование через суммирование значений дифференциального фазо-контраста $\varphi(x)$ от первого пикселя строки до искомого пикселя, вычисляется фазовый контраст отсканированного объекта:

$$\Phi(x, y) = \frac{p_2}{\lambda d_T} \int_0^x \varphi(x) dx = \frac{p_2}{\lambda d_T} \sum_{x=1}^x \varphi(x)$$

Средствами Matlab вышеописанные проблемы были исправлены. Однако алгоритм на данном этапе алгоритм нуждается в доработки, так как не всегда способен корректно изменить значение фазы, из-за чего на итоговом изображении возникают различного рода артефакты.

Также для лучшей визуализации алгоритм можно доработать следующими путями:

- Научить распознавать контуры объекта. Это особенно актуально для неоднородных объектов таких, как хрящи и кости.
- Добавить удаление шумов с объектов.
- Реализовать темнопольной метод

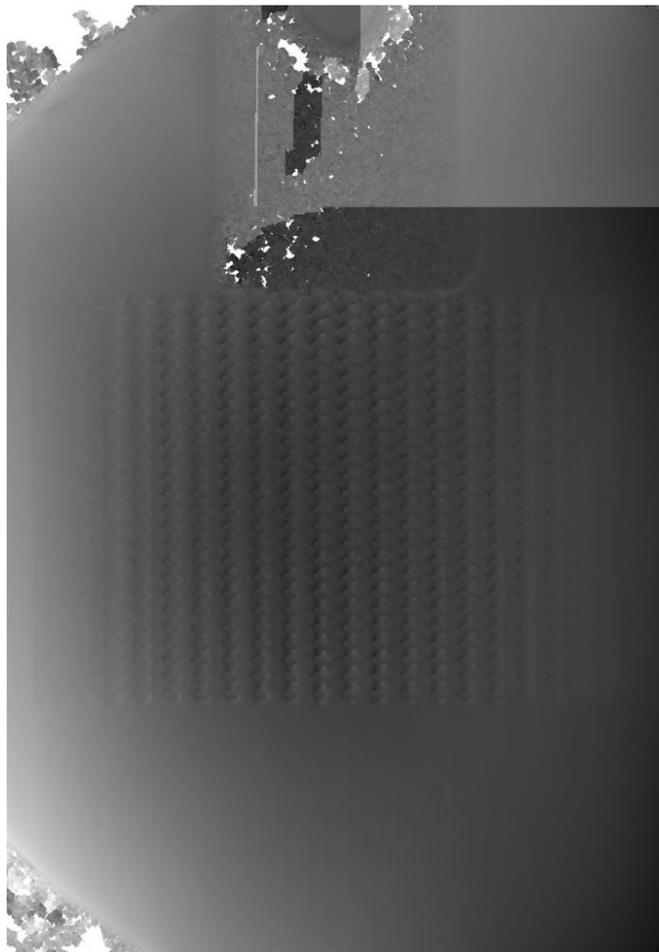


Рисунок 10.3 – обработанный снимок полимерного куба

Из рисунка 10.3 видно, что, не смотря на достаточно хорошо восстановленную фазо-контрастную карту, на снимке имеется явный след муара. Также возник сдвиг фазы (верхний правый угол), из-за некорректного восстановления дифференциальной фазы.

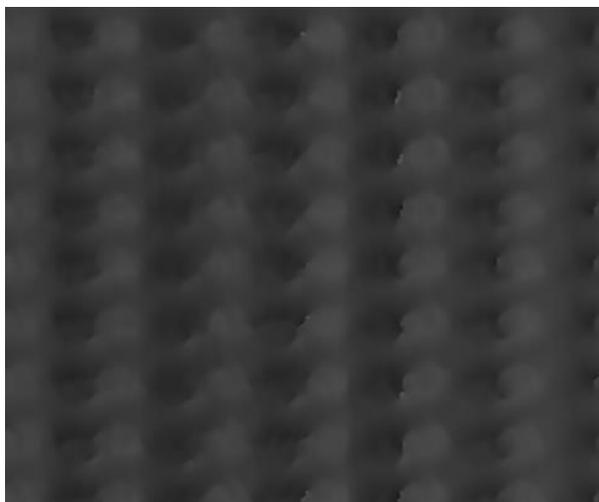


Рисунок 10.4 – увеличенное изображение объекта

11 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро

разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

11.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

11.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является создание и программная реализация алгоритма для обработки и анализа томограмм, полученных на интерферометре Тальбо-Лау. Разработка алгоритма и расчеты проводились в программной среде MATLAB. На данном этапе говорить о коммерческом потенциале данного исследования рано. Однако развитие фазо-контрастной томографии непременно приведет к востребованности новых методов обработки изображений. В качестве заинтересованной стороны могут

выступать организации, сфера деятельности которых затрагивает следующие области:

- медицинская томография (диагностические и научно исследовательские центры);
- неразрушающий контроль.

11.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Сегодня на практике для томографии применяется в основном абсорбционный метод (а). Такой вид томографии имеет ряд недостатков, связанных с самой физикой процесса. Из-за чего на нынешних томограммах плохая контрастность между мягкими тканями и слабопоглощающими материалами. Поэтому разработка фазо-контрастной является важным этапом для развития диагностической медицины и неразрушающего контроля.

Данный анализ проведен с помощью оценочной карты (таблица 1). Для этого сравнивается абсорбционная томография и фазо-контрастная томография. Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 1, подбирали исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица 11.1.2.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных разработок

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Ба	Кф	Ка
1	2	3	4	5	6

Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1.Помехоустойчивость	0,21	3	4	0,63	0,84
2.Контрастность изображения	0,23	5	3	1,15	0,69
3.Базы данных	0,02	2	5	0,04	0,1
4.Ремонтопригодность	0,1	3	3	0,3	0,3
5.Функциональная мощность	0,27	5	4	1,35	1,08
Экономические критерии оценки эффективности					
1.Цена компонент	0,1	3	4	0,3	0,4
2.Популярность использования метода	0,07	1	5	0,07	0,35
Итог	1			3,84	3,76

Позицию разработки и конкурентов оценивали по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum Vi \cdot Bi \quad (41)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;
 Vi – вес показателя (в долях единицы); Bi – балл i -го показателя.

Данный анализ позволяет говорить о том, что исследование является эффективным, так как обеспечивает приемлемое качество результатов. Дальнейшее инвестирование данной разработки можно считать целесообразными. Однако видны слабые стороны проекта – малые размеры базы данных и низкая распространённость метода. Первая проблема решится, как только разработка перейдет стадию прототипа. Так как в настоящее время большое количество специалистов, работающих в сфере обработки данных. Также сегодня в алгоритмах будут применяться новые методы, например нейронные сети. Пока фазо-контраст применяется только в прототипах, но выход в производство решит и вторую проблему, как и бывает с любым новшеством.

11.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ внутренних и внешних факторов научноисследовательского проекта, направленный на оценку рисков и конкурентоспособности проекта на рынке.

SWOT-анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице 2.

Таблица 11.1.3.1 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1: Алгоритм работает при плохой настройке интерферометра С2: Алгоритм включает методы удаления артефактов из томограмм; С3: Согласованность получаемых результатов с теоретическими расчетами; С4: Отсутствует необходимость высокого уровня знаний языков программирования. С5: Низкие требования к ЭВМ	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1: Неполная универсальность предложенного алгоритма; Сл2: Необходимость наличия математического пакета MATLAB.
Возможности: В1: Доработка алгоритма до стадии автономной работы; В2: Использование годовой подписки университета на программный пакет MATLAB; В3: Использование другого математического пакета	1. Возможность использования усовершенствованного алгоритма для обработки результатов будущих прототипах фазо-контрастного томографа; 2. При возникновении проблем с математическим пакетом MATLAB, весь алгоритм можно реализовать в другой среде.	1. Для увеличения вычислительной мощности можно использовать ЭВМ университета; 2. Достижение универсальности алгоритма за счет реализации новых идей.
Угрозы: У1: Сбой в алгоритме; У2: Ограниченный диапазон возможностей применения предложенного алгоритма; У3: Отсутствие коммерческого интереса к работе.	Возможность тестирования алгоритма на большом количестве результатов экспериментов, в ходе которых можно выявить, и устранить последние неисправности.	1. Возможность изменения структуры алгоритма для обработки результатов аналогичных экспериментов; 2. Ликвидацию сбоев в алгоритме можно осуществлять во время расчетов.

Для более подробного рассмотрения перспектив разработки в таблице 3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон проекта с его возможностями.

Таблица 11.1.3.2 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	V1	-	+	+	0	+
	V2	-	+	-	+	+
	V3	-	+	+	0	+

Из таблицы видно, что сильные стороны 2,3 и 5 почти полностью реализуется при нынешних возможностях. Это позволит реализовать улучшения прототипа.

11.2 Планирование научно-исследовательских работ

11.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и инженеры, техники и лаборанты, при этом численность групп может варьироваться. В рамках данной научно-исследовательской работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- научный руководитель;
- студент.

Порядок следования этапов и работ, а также распределение обязанностей по данным видам работ, приведен в таблице 4.

Таблица 11.2.1.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Выбор направления исследования	Научный руководитель
	3	Разработка методики проведения исследования	Научный руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме исследования	Научный руководитель
Теоретические исследования	5	Подбор и изучении литературы по теме исследования	Студент
	6	Освоение программного обеспечения	Студент
	7	Создание и программная реализация алгоритма обработки данных	Студент
Выполнение расчетов	8	Тестирование алгоритма	Студент
	9	Расчет спектров излучения	Студент
	10	Построение графических зависимостей	Студент
Обработка результатов и оформление отчета	11	Проверка и анализ полученных зависимостей	Научный руководитель Студент
	12	Оформление расчетов	Студент
	13	Составление пояснительной записки	Студент
	14	Подготовка работы к защите	Студент

11.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

В большинстве случаев, трудовые затраты образуют основную часть стоимости проекта, поэтому важно определить трудоемкость работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования выражается в человеко-днях, и носит вероятностный характер. Ожидаемое значение трудоемкости $t_{ожи}$ вычисляется по формуле:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} \quad (42)$$

где $t_{ожи}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, (чел.-дн.);
 t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы

(оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.); t_{\max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн).

Из $t_{\text{ож}i}$ определяются продолжительность каждой из работ в рабочих днях, учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{ч} \quad (43)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, (раб. дн.); $ч$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, (чел.). В ходе данной работы количество человек, выполнявших каждую из работ на каждом из этапов, равняется одному.

11.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Затем был разработан календарный план работ. В ходе данной работы был построен ленточный графика проведения НИР в форме диаграмм Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле 44:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k \quad (44)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, (кален. дн.); k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Расчёт коэффициента календарности производится по следующей формуле:

$$k = \frac{T_{\text{кг}}}{T_{\text{кг}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}} \quad (45)$$

где, $T_{\text{кг}}$ - количество календарных дней в году ($T_{\text{кг}} = 365$ дн.); $T_{\text{вд}}$ - количество выходных дней в году ($T_{\text{вд}} = 52$ дн.); $T_{\text{пд}}$ - количество праздничных дней в году, ($T_{\text{пд}} = 14$ дн.). Расчетная величина $T_{\text{кг}}$ продолжительности работ была округлена до целых чисел. Подставив данные получаем, что $k = 1,22$.

Таблица 11.2.3.1 – Продолжительность работ в рабочих днях

Название работы	Трудоемкость работ						$T_{\text{р, раб.}}$ днях		$T_{\text{к, раб.}}$ днях	
	t_{min} , чел.- дни		t_{max} , чел.- дни		$t_{\text{ож}}$, чел.- дни					
	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р
1. Составление и утверждение технического задания	-	1	-	3	-	1,8	-	2	-	2
2. Выбор направления исследования	2	1	3	2	2,4	1,4	1	1	2	1
3. Разработка методики проведения исследования	-	2	-	6	-	3,6	-	4	-	4
4. Календарное планирование работ по теме исследования	-	1	-	3	-	1,8	-	2	-	2
5. Подбор и изучении литературы по теме исследования	7	-	10	-	8,2	-	8	-	10	-
6. Освоение программного обеспечения	2	-	5	-	3,2	-	3	-	4	-
7. Создание и программная реализация алгоритма обработки данных	15	-	20	-	17	-	17	-	21	-
8. Тестирование алгоритма	3	-	5	-	3,8	-	4	-	5	-
9. Расчет спектров излучения	5	-	8	-	6,2	-	6	-	8	-
10. Построение графических зависимостей	2	-	4	-	2,8	-	3	-	3	-
11. Проверка и анализ полученных зависимостей	2	1	3	2	2,4	1,4	1	1	2	1
12. Оформление расчетов	1	-	2	-	1,4	-	2	-	2	-
13. Составление пояснительной записки	2	-	3	-	2,4	-	3	-	3	-
14. Подготовка работы к защите	3	-	5	-	3,8	-	4	-	5	-

На основании полученных данных был построен план-график в виде диаграммы Ганта. График построен с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план-график выполнения данной дипломной работы в виде диаграммы Ганта представлен ниже в таблице 6.

Таблица 11.2.3.2 – Календарный план-график проведения ВКР

№ работ	Вид работ	Исполнитель	Т _к , калд.	Продолжительность выполнения работ											
				Апрель			Май			Июнь					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	2	■											
2	Выбор направления исследования	Научный руководитель	1,2	■											
3	Разработка методики проведения исследования	Научный руководитель	4	■	■										
4	Календарное планирование работ по теме исследования	Научный руководитель	2		■										
5	Подбор и изучении литературы по теме исследования	Студент	10		■	■									
6	Освоение программного обеспечения	Студент	4			■									
7	Создание и программная реализация алгоритма обработки данных	Студент	21			■	■	■							
8	Тестирование алгоритма	Студент	5					■							
9	Расчет спектров излучения	Студент	8						■	■					
10	Построение графических зависимостей	Студент	3							■					
11	Проверка и анализ полученных зависимостей	Научный руководитель Студент	1,2								■				
12	Оформление расчетов	Студент	2								■				
13	Составление пояснительной записки	Студент	3									■			
14	Подготовка работы к защите	Студент	5										■		

Диаграмма Ганта показывает, что общее время выполнения работы составит 72 календарных дней. Наиболее время затратным этапом является создание и программная реализация алгоритма.

11.3 Бюджет научно-технического исследования

При формировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе планирования бюджета НТИ затраты группируются по следующим статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных исследований;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- научные затраты и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

11.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 11. Затраты составили лишь амортизационные издержки. Так как использовалась студенческая лицензия MATLAB. Стоимость ноутбука составляет 37.990 рублей.

Срок службы ноутбуку в днях 1825 (5 лет). Получает, что за 52 дня выполнения работы амортизационные издержки составят 1083 рублей.

11.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Раздел включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (46)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (47)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = Z_m \cdot M / F_d \quad (48)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5 -дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 7).

Таблица 11.3.2.1 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный оклад работника с учетом районного коэффициента для Томска $k = 1,3$, вычисляется:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot 1,3 \quad (49)$$

Данные и результаты расчета основной заработной платы приведены в таблице 13. Например для руководителя расчет основной заработной платы, зная, что его оклад 33776 руб./месяц, проводится следующим образом.

Находим месячный должностной оклад:

$$З_{\text{м}} = 33776 \cdot 1,3 = 43909 \text{ руб./месяц} \quad (50)$$

рассчитываем среднедневную заработную плату:

$$З_{\text{дн}} = 43909 \cdot 10,4/251 = 1819 \text{ руб.} \quad (51)$$

Подобный расчет проводится для вычисления основной заработной платы студента. В расчете заработная плата бралась для ставки лаборанта.

Таблица 11.3.2.2 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	k_p	$З_{\text{м}}$, руб./месяц	$З_{\text{дн}}$, руб./месяц	T_p , раб.дн.	$З_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	33776	1,3	43909	1819	11	19943
Студент	9893	1,3	12861	539	52	27710
Итого, руб.						47653

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей работы учитывают величину предусмотренных ТК РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата составляет 12-15% от основной. Таким образом дополнительная заработная плата руководителя при $k=0,12$ составит 2393 руб.

11.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые фонды)

В данном разделе расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда

работников. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внед}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (52)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30% в 2018 от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИОКР [18]. На основании пункта 1 ст.58 закона № 212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность водится пониженная ставка – 27,1 %.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда научному руководителю представлен в таблице 15.

Таблица 11.3.2.3 – Отчислений во внебюджетные фонды

Наименование	Научный руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	19943	27710
Дополнительная заработная плата, руб.	2393	—
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	0,271
Итоговая сумма отчислений, руб.	6053	7510

11.3.4 Накладные расходы

Затраты на электроэнергию во время выполнения ВКР составили:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 5.8 \cdot 0.7 \cdot 312 = 1267 \text{ руб.}, \quad (53)$$

где $C_{\text{эл}}$ – тариф на промышленную электроэнергию, руб.; P – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $F_{\text{об}}$ – время использования оборудования, ч.

11.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 10.

Таблица 11.3.5.1 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование	Сумма, руб.
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	47653
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	2393
Отчисления во внебюджетный фонды	13563
Накладные расходы	1267
Бюджет затрат НТИ	64876

11.5 Вывод по разделу финансовый менеджмент

Изучение возможности коммерческого применения разработки показало, что основной областью применения является диагностическая медицина, а именно компьютерная томография. В меньшей степени разработка востребована в сфере неразрушающего контроля.

Анализ конкурентоспособности и SWOT-анализ наглядно демонстрируют преимущества разработки над традиционными методами томографии. Это позволяет утверждать, что рынок востребован в исследованиях фазо-контрастной томографии на основе интерферометра Тальбо-Лау.

Также в данном разделе были распределены обязанности выполнения работ, составлен график проведения работ и затраты на её проведения.

12 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

12.1 Анализ опасных производственных факторов

Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при написании данной диссертационной работы представлены в таблице 11.

Таблица 12.1.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Экспериментальные исследования на рентгеновской трубке ТПУ; обработка данных на ПК	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне		Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09.
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
		Пожарная безопасность	ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На оператора ЭВМ воздействуют физические (температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой чистоты, освещённость, наличие ионизирующего излучения) и психофизиологические факторы. Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

12.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного воздействия и устранению их влияния при работе на ПК и микротроне

12.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом. Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение. Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

12.2.2 Организация рабочего места оператора ПК

Рациональная планировка рабочего места предусматривает порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой

досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости представлены на рисунке 12.1, где а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

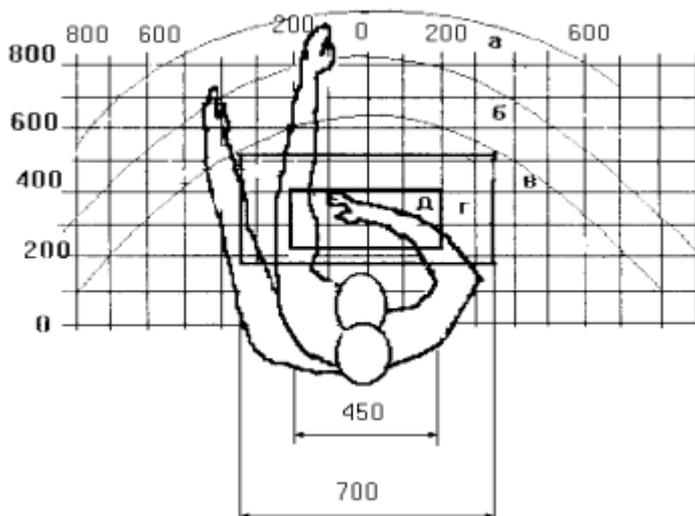


Рисунок 12.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); в зоне в (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола необходимо, чтобы высота рабочей поверхности стола варьировалась в пределах 680-800 мм, высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Также необходимо, чтобы рабочий стол был шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм, должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420- 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать ширину и глубину поверхности сиденья с заглублённым передним краем не менее 400 мм.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Также должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

12.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость. Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со и приведены в таблице 2.

Таблица 12.2.3.1 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом составляет от

20 до 25°C, зимой – от 13 до 15°C. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе.

Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5-2000 Гц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5-2000 Гц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2-400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др.

Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность эквивалентной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп.

Согласно требованиям освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

12.3 Радиационная безопасность

Лаборатория, в которой проводилась работа была подвергнута испытаниям в аккредитованной Госстандартом России лаборатории радиационного контроля по параметру: определение радиационной обстановки и соответствует нормативным требованиям, представленным в документах.

В ходе выполнения ВКР эксперименты проводились на рентгеновском интерферометре с энергией около 22 кэВ. Согласно [] данный вид ускорителей относятся к IV группе техногенных источников ионизирующего излучения. При такой энергии фотонов наведенная активность окружающей среды не представляет опасности для здоровья людей.

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и от индивидуальных особенностей организма вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. Любой вид ионизирующего излучения вызывает биологические изменения в организме как при внешнем облучении,

когда источник облучения находится вне организма, так и при внутреннем облучении, когда радиоактивные вещества попадают внутрь организма.

При работе с рентгеновскими трубками необходимо соблюдать ряд требований, которые перечислены ниже.

К работе на ускорителе допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, отнесенные к категории персонала группы А или персонал группы Б в сопровождении персонала группы А, прошедшие обучение по правилам работы на ускорителе и по радиационной безопасности, прошедшие инструктаж по радиационной безопасности.

Женщины должны освобождаться от работы на ускорителе, связанной с воздействием ионизирующих излучений, на весь период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Радиационная защита от всех видов ионизирующего излучения, возникающего при работе ускорителя, должна проектироваться так, чтобы суммарные годовые эффективные дозы облучения персонала и населения не превышали величин 20 мЗв/год для персонала группы А, 5 мЗв/год для персонала группы Б и 1 мЗв/год для обычного населения.

Данная рентгеновская трубка находится в специальном бункере, конструкция радиационной защиты которой обеспечивает необходимую защиту персонала и населения в соответствии с документом []. Доступ лиц, не связанных непосредственно с работой на рентгеновской трубке должен быть регламентирован. Перед включением рентгеновской трубке необходимо в срочном порядке покинуть бункер, после чего убедиться, что двери плотно закрыты и все условия удовлетворяют требованиям. Во время работы рентгеновской трубки на пульте управления и над входом в рабочую камеру в обязательном порядке горят предупреждающие световые сигналы.

12.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими устройствами в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ, при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ), при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением, при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Для обеспечения электробезопасности электроустановок происходит отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа. Также принимаются меры по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы, вывешивание плакатов, указывающих место работы, заземление корпусов всех установок через нулевой провод, покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией, недоступность токоведущих частей аппаратуры.

12.5 Пожарная и взрывная безопасность

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на следующие группы: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для

предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. сообщить руководству (дежурному);
2. позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС;
3. принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В ходе исследовательской работы был изучен метод обработки интерферограмм на основе РСА, описанного в статье [5] для получения фазо-контрастных изображений. На его основе был создан, и программно реализован алгоритм математической обработки в среде Wolfram Mathematica и Matlab. В нем были разрешены проблемы восстановления фазо-контрастной картины данным методом, которые связаны с областью определения арктангенса и муара.

Следующим этапом стал сборка томографа на основе интерферометре Тальбота-Лау. После сборки и настройки экспериментальной установки были проверены технические характеристики её компонентов для проверки эффективности установки при разных режимах работы в зависимости от тока, напряжения и времени экспозиции.

В рамках проделанной работы были выполнены обработка и анализ рентгенограмм полученных в опытах на интерферометре Тальбота-Лау. На полученных фазо-контрастных объектах отчетливо видна структура слабопоглощающего объекта. Однако, не смотря на достаточно хорошо восстановленную фазо-контрастную карту, на снимках имеется явный след муара. А также наличие артефактов, связанных с восстановлением дифференциального фазо-контраста. Дальнейшая разработка алгоритма позволит не только избежать описанных ошибок, но и значительно улучшить качество изображений.

Список использованной литературы

1. Батрагин А.В. Методы и средства контроля основных параметров характеристик рентгеновских томографов высокого разрешения: диссертация на соискание уч.ст.-канд. тех.н. Томский политехнический университет. Томск – 2016
2. Buzug T. M. Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam CT. – Springer Science & Business Media, 2008.
3. Buzug T. M. Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam CT. – Springer Science & Business Media, 2008.
4. ISO 17636-2: 2013(E) Non-destructive testing of welds — Radiographic testing — Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors.
5. G. Pelzer, J. Rieger, C. Hauke, F. Horn. Reconstruction method for grating-based x-ray phase-contrast images without knowledge of the grating positions. Journal of Instrumentation
6. Сырецкий Г.А. Моделирование систем. Часть 2. Интеллектуальные системы: учебн. пособие / Г.А. Сырецкий. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. — 80 с.
7. J. Vargas, J. Antonio Quiroga, T. Belenguer. Phase-shifting interferometry based on principal component analysis. OPTICS LETTERS / Vol. 36, No. 8 / April 15, 2011
8. Васильев А.Ю., Дударев А.Л. Применение рентгенографии с прямым многократным увеличением изображения в учреждениях здравоохранения. Методические рекомендации. — Л.: ВМА, 1990. — 48 с.
9. Z. Wang, B. Han. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms. OPTICS LETTERS
10. Мазуров А.И., Потрахов Н.Н. Особенности использования методики микрофокусной рентгенографии в медицине //Диагностика и интервенционная радиология, 2011.том 5. —№2. — С. 255/256.

11. Потрахов Н.Н. Микрофокусная рентгенография в стоматологии и челюстно/лицевой хирургии. — СПб.: Технолит, 2006, — 209 с.
12. Гинье А. Рентгенографи кристаллов, гл. 1. М., ИЛ, 1961.
13. Умански Я С. Рентгенографи металлов, гл. 1. М., Металлургиздат, 1960
14. Комяк Н.Н. Рентгеновская аналитическая аппаратура и перспективы ее развития // Изв. ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). — 1979. — Вып. 246. — С. 5–11.
15. Месяц Г.А., Иванов С.А., Комяк Н.И., Пеликс Е.А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 165 с.
16. Momose, A.; Kawamoto, S.; Koyama, I.; Hamaishi, Y.; Takai, K.; Suzuki, Y. Demonstration of X-Ray Talbot Interferometry. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003, 52, L866–L868.
17. Weitkamp, T.; Diaz, A.; David, C.; Pfeiffer, F.; Stampanoni, M.; Cloetens, P.; Ziegler, E. X-ray phase imaging with a grating interferometer. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005, 13, 6296–6304.
18. Pfeiffer, F.; Weitkamp, T.; Bunk, O.; David, C. Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources. *Nat. Phys.* 2006, 2, 258–261.
19. Olivo, A.; Arfelli, F.; Cantatore, G.; Longo, R.; Menk, R.; Pani, S.; Prest, M.; Poropat, P.; Rigon, L.; Tromba, G.; et al. An innovative digital imaging set-up allowing a low-dose approach to phase contrast applications in the medical field. *Med. Phys.* 2001, 28, 1610–1619.
20. Ирчиков Ф.Л. Управляемое импульсное рентгеновское излучение в приборостроении.— М. : Энергоатомиздат, 1987. — 87 с.
21. .Марипов А. Радужная голография / А. Марипов. Бишкек: Илим, 1988. 146 с.
22. Криштал М.М., Ясников И.С. Физика и техника, сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ, Техносфера, 2009

23. Смирнов Е.В., Б.Г. Скуйбин, Л.К. Мартинсон. Эффект Тальбота. I. Дифракция на одномерных решетках. // Физическое образование в вузах, т.20, 2014, №2, с.109-121.
24. Scherer K.H. Grating-Based X-ray phase-contrast mammography (Germany, Technical University of Munich, Springer Theses), 2016
25. Смирнов Е.В., Б.Г. Скуйбин, Л.К. Мартинсон. Эффект Тальбота. II. Самоизображение двумерных периодических структур. // Физическое образование в вузах, т.20, 2014, №4, с.3-16.
26. Wen J., Zhang Y., Xiao M. The Talbot effect: recent advances in classical optics, nonlinear optics, and quantum optics. // Advances in optics and photonics, v. 5, 2013, p. 83–130.
27. Lee S.Y. et al. Hard x-ray nano patterning using a sectioned multilayer. // Journal of applied physics, v. 109, 2011, 044307.
28. Diemoz, P.; Bravin, A.; Coan, P. Theoretical comparison of three X-ray phase-contrast imaging techniques: Propagation-based imaging, analyzer-based imaging and grating interferometry. Opt. Express 2012, 20, 2789–2805.
29. Momose, A.; Takeda, T.; Itai, Y.; Hirano, K. Phase-contrast X-ray computed tomography for observing biological soft tissues. Nat. Med. 1996, 2, 473–475.
30. Lewis, R.A.; Hall, C.J.; Hufton, A.P.; Evans, S.; Menk, R.H.; Arfelli, F.; Rigon, L.; Tromba, G.; Dance, D.R.; Ellis, I.O.; et al. X-ray refraction effects: Application to the imaging of biological tissues. Br. J. Radiol. 2003, 76, 301–308.
31. Snigirev, A.; Snigireva, I.; Kohn, V.; Kuznetsov, S.; Schelokov, I. On the possibilities of X-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation. Rev. Sci. Instrum. 1995, 66, 5486–5492.
32. Thomas Thüring. Compact X-ray grating interferometry for phase and dark-field computed tomography in the diagnostic energy range , A dissertation submitted to ETH Zurich, 2013
33. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

34. Павлейно М.А., Ромаданов В.М. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В MATLAB. – СПб., 2007
35. Будылин А.М. Ряды и интегралы Фурье. СПбГУ. 2002.
36. Дремин И. М. Иванов О. В. Нечитайло В. А. УФН 171, №5. Вейвлеты и их использование. 2001.
37. Parfitt A, Drezner M, Glorieux F, Kanis J, Recker R. Bone histomorphometry: standardization of nomenclature, symbols and units. J Bone Miner Res. 1987;2:595–610.
38. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
39. ГОСТ Р12.1.004-85. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. Пожарная безопасность. – М. Стандартиформ, 1985. – 10с.
40. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.