Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт	Неразрушающего контроля
Направление подготовки	Приборостроение
Кафедра	ФМПК

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Коррекция апертурных искажений в системах измерения плотности в объеме УДК 620.179.152.1:004.3/.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Мухорьянов Руслан Борисович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий	Капранов Б.И.	Д.Т.Н.		
Эксперт				

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Ассистент	Николаенко В.С.			
По разделу «Социальная ответственность				
Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Лоцент	Анишенко Ю.В.	K.T.H.		

допустить к защите:

Зав.кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	д.фм.н.		

Запланированные результаты обучения по программе

Код резуль- тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
1414	Профессиональные компетенции	занитересованных сторон
P1	Использовать результаты освоения фундаментальных и прикладных дисциплин ООП магистратуры; понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения; демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи	Требования ФГОС (ПК-1–3), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
P2	Анализировать состояние научно-технической проблемы путём подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников; определять цели, осуществлять постановку задач проектирования приборов наноэлектроники, схем и устройств различного функционального назначения с использованием современной элементной базы наноэлектроники, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-8), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
Р3	Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.	Требования ФГОС (ПК-16). Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- АСЕ и FEANI
P4	Осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени; разрабатывать физические и математические модели элементов наноэлектроники, компьютерное моделирование исследуемых физических процессов, приборов, схем и устройств, относящихся к профессиональной сфере	Требования ФГОС (ПК-18), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
Р5	Делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научно-технические отчёты, обзоры, рефераты, публикации по результатам выполненных исследований, доклады на научные конференции и семинары, научные публикации в центральных изданиях и заявки на изобретения	Требования ФГОС (ПК-20). Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
P6	Работать в качестве преподавателя в образовательных учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования по учебным дисциплинам предметной области данного направления под руководством профессора, доцента или старшего	Требования ФГОС (ПК-26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
	Универсальные компетениии	
P7	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень. Самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности	Требования ФГОС (ОК-1; ПК-4). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
P8	Использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов. Участвовать в проведении технико-экономического и функционально-стоимостного анализа рыночной эффективности создаваемого продукта	Требования ФГОС (ОК-9; ПК-23), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
Р9	Разрабатывать планы и программы инновационной деятельности в подразделении. Проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-25), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
P10	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	Требования ФГОС (ОК-4, ПК-19), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI
P11	Обладать способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности	Требования ΦГОС (ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR- ACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля Направление подготовки – Приборостроение Кафедра ФМПК

УТВЕРЖДАЮ: Зав. кафедрой

Суржиков А.П.

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Мухорьянову Руслану Борисовичу

Тема работы:

Коррекция апертурных искажений в системах измерения плотности в объеме

Утверждена приказом директора ИНК (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Произвести обзор методов и средств для			
	цифровой коррекции апертурных			
	искажений.			
	2. Разработать программу для			
	восстановления функции распределения			
	плотности в объекте по сигналу,			
	получаемому при сканировании объекта			
	системой сканирования с апертурной			
	функцией, имеющей конечную ширину.			
Перечень подлежащих исследованию,	1. Теорема о свертке.			
проектированию и разработке вопросов	в 2. Дискретное преобразование Фурье.			
	3. Программная среда МАТLAB 2016			

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)		Алгоритм программы для коррекции апертурных искажений		
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)				
Раздел	Раздел Консультант			
Социальная ответственность		Анищенко Юлия Владимировна		
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич			
Иностранный язык	Вебер Юлия Юрьевна			
Названия разделов, которые языках:	е должны	быть написаны на русском и иностранном		
Введение				
Теоретические основы				
Получение изображений				
Экспериментальная часть	Экспериментальная часть			
Заключение				

Дата выдачи задания на выполнение выпускной	
квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий эксперт	Капранов Б.И.	д.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Мухорьянов Руслан Борисович		

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

0	
Стуленту:	

))	
Группа	ФИО
1БМ5А	Мухорьянов Руслан Борисович

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходин ю данин ю к раздолу «Финансов ий маналумант, расурс	and developer a neconcochene wallen.		
<i>1.</i> Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):	Затраты на выполнение НИР включают в себя затраты на сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, основную и дополнительную заработную платы исполнителей, отчисления на социальные нужды, накладные расходы		
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов			
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	НИР выполнялась в соответствии со стандартной системой налогообложения, отчислений, кредитования		
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектирован	ию и разработке:		
1. Предпроектный анализ	Определение потенциальных потребителей результатов исследования и анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, оценка готовности проекта к коммерциализации. Проведения FAST анализа.		
2. Инициация проекта	Информация о заинтересованных сторонах проекта, цели и ожидаемые результаты НИР, трудозатраты и функции исполнителей проекта		
3. Планирование управления научно-техническим проектом	Составление перечня этапов и работ по выполнению НИР, составление калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов		
4. Оценка сравнительной эффективности исследования	Расчёт интегрального показателя эффективности НИР, за счёт определения его основных составляющих: финансовой эффективности и ресурсоэффективности		
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):			
1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических рег	пений		

Функционально-стоимостная диаграмма
 График проведения и бюджет НТИ

- 4. Календарный план проекта

Галисидарный имай проскта
 Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе (диаграмма Гантта)
 Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
0.001107701177	Николаенко Валентин			
ассистент	Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Мухорьянов Руслан Борисович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Мухорьянову Руслану Борисовичу

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:			
 Характеристика объекта исследования и области его применения Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проекти 1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов, которые может создать устройство. 1.2. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов. 	Разрабатываемым объектом является программное обеспечение для комплекса цифровой радиографии shadowbox. Для коррекции апертурных искажений системы сканирования. рованию и разработке: Работа с системой сканирования является источником следующих опасных и вредных факторов: -повышенный уровень электромагнитных и гамма исзлучений; -повышенный уровень статического электричества; -недостаточное освещение; -повышенный уровень шума;		
2. Экологическая безопасность:	Факторы, оказывающих негативное влияние на окружающую среду при разработке и эксплуатации проектируемого устройства, отсутствуют.		
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможно возникновение пожара		
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Рациональная планировка рабочей зоны, требования для основных элементов управления проектируемого устройства.		

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Анищенко Ю.В.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Мухорьянов Руслан Борисович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 100с., 75 рис., 48 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: Коррекция апертурных искажений, реконструкция исходной функции, повышение разрешающей способности системы сканирования, цифровая обработка сигналов, Восстановление сигналов МАТLAB.

Объектом исследования является функция распределения плотности в объеме.

Цель работы – Разработать программу для восстановления функции распределения плотности в объекте по сигналу, получаемому при сканировании объекта системой сканирования с апертурной функцией, имеющей конечную ширину.

В процессе работы проводились:

- исследование методов реконструкции изображения;
- разработка программного обеспечения для реконструкции изображений;
- разработка программного обеспечения для реконструкции одномерных сигналов;
- проведение экспериментальных исследований влияния уровня шума на конечную реконструкцию исходной функции;

В результате исследования реализована программа для реконструкции исходной функции распределения плотности объекте по сигналу, получаемому при сканировании объекта системой сканирования с апертурной функцией, имеющей конечную ширину.

В будущем планируется доработка программного обеспечения

7

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты

1. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

2. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

3. ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

4. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

5. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

6. ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

7. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.

9. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.

10. СП 51.13330.2011. Защита от шума.

11. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.

12. ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.

13. ГОСТ Р 22.0.07-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров.

8

Определения

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Система сканирования – Система цифровой радиографии для сканирования объектов контроля.

Апертурные искажения – Искажения, вносимые системой сканирования, зависят от геометрии просвечивания и имеют конечную ширину.

Сигнал – одномерный массив данных, получаемый по значениям интенсивности изображения экспериментальной функции распределения плотности в объеме.

Аппроксимация – определение в явном виде параметров функции, описывающей распределение точек.

Сокращения

FTT – Преобразование Фурье;

ПК – персональный компьютер.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	11
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	12
1.1 ПРОБЛЕМЫ С РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ	12
1.2 TEOPEMA O CBEPTKE	13
1.3 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ	13
2. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ	14
2.1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ	14
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	16
3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	16
3.2. ПОЛУЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	17
3.3. ПОЛУЧЕНИЕ АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ	18
3.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ	19
3.5. Теоретический сигнал с добавлением шума в 1%	22
3.6. Теоретический сигнал с добавлением шума в 3%	38
3.7. Теоретический сигнал с добавлением шума в 5%	52
3.8. Теоретический сигнал с добавлением шума в 7%	63
3.9. Теоретический сигнал с добавлением шума в 10%	74
3.10. Теоретический сигнал с добавлением шума в 15%	85
3.11. Теоретический сигнал с добавлением шума в 20%	87
3.12. Теоретический сигнал с добавлением шума в 30%	89
3.13. Реконструкция экспериментальной функции	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ПУБЛЕКАЦИЙ СТУДЕНТА	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А	100

введение

Известно, что процесс визуализации изображений в цифровой радиографии сопровождается различными искажениями. Среди таковых и апертурные искажения. Эта проблема часто возникает и в других областях науки и техники визуализации изображений и имеет решающее значение для возможности обнаружения дефектов и определения их характеристик.

Основной целью данной работы является разработка алгоритма для восстановления "размытого" изображения, основанного на вычислительном методе, который основан на спектральном анализе изображения, содержащего помехи.

Акцент был сделан на спектральный анализ как метод для быстрого восстановления и передачи изображения. При аппроксимации изображения, ввиду важности частотной области преобразования Фурье (FFT) оно стало одним из наиболее широко используемых инструментов анализа сигналов. Преобразование Фурье генерируется путем проецирования сигнала к набору базисных функций, каждая из которых представляет собой синусоиду с уникальной частотой.

Соответственно, изображение сначала анализируется в ортогональной матричной формулировке, а затем реконструируется из набора его геометрических моментов. Преимуществом данного метода является представление и восстановление любого изображения

В этом исследовании выбранным преобразованием является преобразование Фурье, благодаря своей способности преобразовывать информацию о интенсивности изображения в частотную информацию. Это преобразование имеет преимущество в описании глобальных особенностей изображения по низкочастотным компонентам преобразования. Более того, можно выборочно игнорировать определенные компоненты с минимальным влиянием на конечное изображение.

11

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1.1 ПРОБЛЕМЫ С РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В области цифровой обработки изображений аналитическая форма линейной деградации изображения задается следующим интегральным уравнением:

$$x_{out}(i,j) = \int \int_D x_{in}(u,v)h(i,j;u,v)dudv$$

4

6

Где, $x_{in}(u, v)$ данные оригинального изображения, а $x_{out}(i, j)$ представляет собой данные из которых мы будем восстанавливать оригинальное изображение и h(i, j; u, v) известная функция размытия, определяется измерительной системой.

Цифровое изображение описанное В двумерном дискретном пространстве является производным от аналогового изображения $x_{in}(u, v)$ в двумерном непрерывном пространстве посредством процесса обработки, который часто называют оцифровкой. Двухмерное непрерывным образом делится на r строки и m колонны. Пересечение строки и столбца называется пиксель. Дискретная модель для указанной выше линейной деградации изображения быть сформирована может с помощью следующетс 5 суммирования

$$x_{out}(i,j) = \sum_{u=1}^{r} \sum_{v=1}^{m} x_{in}(u,v)h(i,j;u,v)$$

Где, i=1, 2..., rand j=1, 2..., m.

В этой работе мы принимаем использование сдвига инвариантной модели процесса размытия. Поэтому выражения аналитической формы для непригодной системы определяются одномерной сверткой.

$$x_{out}(i,j) = \sum_{u=1}^{r} \sum_{v=1}^{m} x_{in}(u,v)h(i,j;u,v) = x_{in}(u,v) * h(u,v)$$

Где * это одномерная свертка

В формулировке уравнения (6) шум также может быть смоделирован с помощью перезаписи уравнения как

$$x_{out}(i,j) = \sum_{u=1}^{r} \sum_{v=1}^{m} x_{in}(u,v)h(i,j;u,v) + n(i,j)$$

$$= x_{in}(u,v) * h(u,v) + n(i,j)$$
7

1

8

Где *n*(*i*, *j*) аддитивный шум, введенный системой.

1.2 TEOPEMA O CBEPTKE

Свертка является операцией, одна функция h непрерывно смещается над второй функцией p и принимает интеграл перекрытия h и p в виде функции временного сдвига T.

$$(p*h)(t) = \int p(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

Теорема свертки утверждает, что преобразование Фурье свертки двух функций h и p равно преобразованию Фурье функции h, умноженному на преобразование Фурье функции p.

$$F[f * g] = F[f] \cdot F[g]$$
$$F[f] * F[g] = F[f \cdot g]$$

1.3 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ

Ввиду важности частотной области, преобразование Фурье стало одним из наиболее широко используемых инструментов для анализа. Преобразование Фурье генерируется путем проецирования сигнала к набору базисных функций, каждая из которых представляет собой синусоиду с уникальной частотой. Преобразование Фурье временного сигнала s(t).

$$\tilde{s}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) exp(-i\omega t) dt$$

Где, ω=2πf угловая частота. Так как множество экспонент образуют ортогональный базис и сигнал может быть восстановлен из значений проекций

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{s}(\omega) exp(i\omega t) dt$$

2. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ



Рис. 1. Система сканирования.

Геометрические условия просвечивания определяются рядом величин: фокусным пятном Ф (проекция источника излучения на плоскость просвечивания), фокусным расстоянием F (расстояние от источника излучения до пленки), положением дефекта и его ориентацией. От геометрических условий просвечивания зависит геометрическая нерезкость Ng (Puc. 2.) изображения и, следовательно, разрешающая способность метода. На практике в цифровой радиографии геометрические условия выбирают таким образом, чтобы чувствительность метода и его разрешающая способность были оптимальными.



Рис. 2. Геометрия просвечивания

Разрешающая способность радиографического метода зависит от разрешающей способности детектора излучения, но в основном - от геометрической схемы просвечивания, которая определяют величину полутени на снимке. Чем меньше величина Ng полутени на снимке, тем лучшая разрешающая способность достигается при сканировании и, следовательно, тем лучше выявляются дефекты.



Рис. 3. Искажение изображения системой сканирования

Резкость перехода на снимке от одной оптической плотности к другой, определяется шириной границы между двумя участками снимка с различными оптическими плотностями Резкость перехода на снимке зависит от геометрической схемы просвечивания и от зернистости изображения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Разработать программу для восстановления функции распределения плотности в объекте по сигналу, получаемому при сканировании объекта системой сканирования с апертурной функцией, имеющей конечную ширину.

Если представить выходной сигнал n(x) как свертку исходной p(x) и апертурной h(x) функции, то для реконструкции исходной плотности p(x) нам понадобится теорема, о свертке которая говорит, что свертка двух сигналов. 10 эквивалентна умножению преобразований Фурье этих сигналов. 11

$$h(x) = \frac{dn(x)}{dx}$$

12

13

14

n(x) = p(x) * h(x)

F[n(x)] = F[p(x)] * F[h(x)]

$$F[p(x)] = \frac{F[n(x)]}{F[h(x)]}$$
$$p(x) = F^{-1}(F[p(x)])$$

В этой работе мы принимаем использование сдвига инвариантной модели процесса размытия h(x), с использование операции математической свертки одномерных сигналов (уравнение 7).

3.2. ПОЛУЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальная функция распределения плотности в объеме получение исследуемого экспериментального выходного сигнала.



Рис. 4. а) Исходное изображение полученное при сканировании объекта системой сканирования. б) Двумерный сигнал распределения плотности в объеме объекта сканирования.

3.3. ПОЛУЧЕНИЕ АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ

Для того, чтобы получить исследуемый сигнал мы считываем данные о интенсивности серого из исходного изображения (рис. 4, а), полученный двумерный массив данных интерпретирован на (рис. 4, б). Далее нам потребуется одномерный сигнал, обрезая массив получаем экспериментальный выходной сигнал n(x) (рис. 5, а). Полученный массив данный n(x) необходимо продифференцировать dn(x) h(x) (рис. 5, б.)., чтобы получить апертурную функцию системы сканирования h(x) (рис. 5, в.). Из полученной производной (рис. 5, б) можно выделить два пика, совместив их на одном графике и усреднив, получаем теоретическую апертурную функцию системы сканирования h(x) (рис. 5, в).



Рис. 5. а) Экспериментальный выходной сигнал n(x), получаемый при сканировании объекта контроля системой сканирования. б) продифференцированный сигнал n(x) для расчёта апертурной функции системы сканирования h(x). в) теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x).

3.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Рассмотрим теоретический сигнал (рис.6, б) имитирующий образец с включениями плотности p(x) расположенными на разном расстоянии друг от друга. На (рис. 6, в) выведен результат свертки h(x)*p(x), хорошо видны искажения входного сигнал p(x), для его реконструкции нам потребуются преобразования Фурье (рис.7, а., б.) функций h(x) и n(x) уравнение (13). Также из уравнения (13) видно для получения преобразования Фурье теоретической плотности необходимо поэлементное деление преобразований Фурье F[n(x)]/F[h(x)], результат деления представлен на (рис.7, в.). Восстанавливаем сигнал из значений проекций уравнение (5). Реконструированный сигнал (рис.8, б) полностью соответствует исходной p(x) теоретической плотности.



Рис. 6. а) Теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x). б) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме. в) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).



Рис. 7. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 8. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Как отмечало ранее, исходная теоретическая плотность p(x) полностью восстановлена из проекций преобразования Фурье F[p(x)], полученных при делении F[n(x)]/F[h(x)]. Где F[n(x)], это есть преобразование Фурье выходного сигнала, полученного в результате свертки истиной теоретической плотности с теоретической апертурной функцией системы сканирования p(x)*h(x), а функция F[h(x)], это есть, преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования.

3.5. Теоретический сигнал с добавлением шума в 1%

Реальные сигналы искажены шумами, аддитивный шум, который вносит система мы симулируем изменением уравнения (6). На (рис. 9, в) выведен искаженный сигнал. Шумы раскрываются в преобразования Фурье F[p(x)] (рис. 10, в), на выходе при обратном преобразовании получаем полностью искаженный сигнал (рис. 11, б).



Рис. 9. а) Теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x). б) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме. в) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x)



Рис. 10. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 11. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Как видно, обратная свертка является некорректной задачей. Для решения данной проблемы будем применять методы регуляризации. Вспомним что, в частотной области преобразования Фурье можно выборочно игнорировать определенные компоненты с минимальным влиянием на конечное изображение.

Так как, имитированный аддитивный шум имеет высокочастотный характер и накладывается на выходной сигнал в процессе сканирования, то, в качестве метода регуляризации предлагается игнорировать высокочастотную часть преобразования Фурье, а именно, спектр симметричен и начиная от нулевой частоты Найквиста, двигаясь в обе стороны будем последовательно обнулять значения преобразования Фурье выходного сигнала. Исходя из преобразования Фурье деления (рис. 10, в). выберем начальный диапазон фильтрации от 200 до 800 ($\frac{1}{_{MM}}$) (рис. 12, б.).

Из реконструкции (рис. 12, в.) видно, что ожидаемого результата мы не получили, так как в спектре деления F[p(x)] (рис. 12, б.) по-прежнему присутствуют шумы продолжим последовательно игнорировать значения в высокочастотной области преобразования Фурье F[p(x)] (рис. 12, б.) с шагом в 25 $(\frac{1}{MM})$ в каждую сторону.





Рис. 12. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 13, б.) в диапазоне от 175 до 849 ($\frac{1}{MM}$).





Рис. 13. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 14, б.) в диапазоне от 150 до 874 ($\frac{1}{_{MM}}$).





Рис. 14. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 15, б.) в диапазоне от 125 до 899 ($\frac{1}{MM}$).





Рис. 15. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 16, б.) в диапазоне от 100 до 924 ($\frac{1}{_{MM}}$).





Рис. 16. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 17, б.) в диапазоне от 90 до 934 ($\frac{1}{_{MM}}$).





Рис. 17. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 18, б.) в диапазоне от 80 до 944 ($\frac{1}{_{MM}}$).





Рис. 18. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 19, б.) в диапазоне от 70 до 954 ($\frac{1}{_{MM}}$).





Рис. 19. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 20, б.) в диапазоне от 60 до 964 ($\frac{1}{_{MM}}$).





Рис. 20. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 21, б.) в диапазоне от 50 до 974 ($\frac{1}{MM}$).





Рис. 21. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 22, б.) в диапазоне от 40 до 984 ($\frac{1}{MM}$).





Рис. 22. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

При исследовании добавления в уравнение (6) аддитивного шума в 1% и последующей регуляризации, можно заметить, что оптимальными примерами диапазона игнорирования значений в преобразования Фурье выходного сигнала F[n(x)] при реконструкции исходной плотности p(x) могут послужить:

- 1. Диапазон 90-934 (<u>1</u>). (рис. 23, а.)
- 2. Диапазон 40-984 (¹/_{мм}). (рис. 23, б.)

Видно, что крутизна склонов восстановленной функции p(x) больше, чем экспериментальной функции n(x). В обоих диапазонах ближайшие выбросы 4 и 5й разрешаются ниже плотности 0.5 p(x). При выше описанных условиях. Что говорит о действительной коррекции апертурных искажений в исходной функции


Рис. 23. а) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Так как реально при сканировании объекта системой контроля, аддитивный шум вносимой этой системой превышает 10%, исследуем влияние 3, 5, 7, 10, 15, 20 и 30% шума.

3.6. Теоретический сигнал с добавлением шума в 3%

Добавим в исследуемое уравнение (6) аддитивный шума вносимый системой уровнем в 3% (рис. 24, в.) и применим методы последующей регуляризации.



Рис. 24. а) Теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x). б) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме. в) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x)



Рис. 25. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 26. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Как говорилось ранее, аддитивный шум, внесенный системой сканирования, делает некорректной задачу обратной свертки.

Для подбора оптимального диапазона фильтрации преобразования Фурье выходного сигнала n(x), рассмотрим преобразование Фурье деления F[p(x)] и найдем нужные пространственные частоты для фильтрации. Выделим:



1. Диапазон 90-934 (¹_{мм}), результаты приведены на (рис. 26.)

Рис. 27. Деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].

Из реконструкции (рис. 26, в.) видно, что хорошего результата мы не получили, так как в результате деления F[p(x)] = F[n(x)]/F[n(x)] в преобразовании Фурье F[p(x)]. (рис. 26, б.) по-прежнему присутствуют сильные шумы продолжим последовательно игнорировать значения в высокочастотной области F[p(x)] (рис. 26, б.) с шагом в 10 ($\frac{1}{_{MM}}$) в каждую сторону.



Рис. 28. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 90 до 934 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 29. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 30, а.) в диапазоне от 80 до 944 ($\frac{1}{MM}$).



Рис. 30. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 31, б.) в диапазоне от 70 до 954 ($\frac{1}{MM}$).



Рис. 31. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования

Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)] F[p(x)], (рис. 32, б.) в диапазоне от 60 до 964 ($\frac{1}{MM}$).



Рис. 32. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования

Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)] F[p(x)], (рис. 33, б.) в диапазоне от 50 до 974 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 33. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 34, б.) в диапазоне от 40 до 984 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 34. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 40 до 984 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 35. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

При исследовании добавления в уравнение (6) аддитивного шума в 3% и последующей регуляризации, можно заметить, что оптимальными примерами диапазона игнорирования значений в преобразования Фурье выходного сигнала F[n(x)] при реконструкции исходной плотности p(x) могут послужить:

- 1. Диапазон 90-934 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 36, а.)
- 2. Диапазон 60-964 (¹/_{мм}). (рис. 36, б.)
- 3. Диапазон 40-984 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 36, в.)





Рис. 36. а) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x),

результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Видно, что крутизна склонов восстановленной функции p(x) больше, чем экспериментальной функции n(x). В обоих диапазонах ближайшие выбросы 4 и 5й разрешаются ниже плотности 0.5 p(x). При выше описанных условиях. Что говорит о действительной коррекции апертурных искажений в исходной функции.

Добавленный в уравнение (6) аддитивный шум уровнем в 3% вносит существенные искажения при реконструкции исходной функции p(x). Этот шум хорошо заметен на (рис. 36, а.) и в дальнейшем убывает, например, при реконструкции p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 60-964 (1/мм). (рис. 36, б.) шумы сгладились, но не ушли. А при реконструкции сигнала p(x) с игнорирование значений в преобразование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 60-964 (1/мм). (рис. 36, б.) шумы сгладились, но не ушли. А при реконструкции сигнала p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 40-984 (1/мм). (рис. 36, б.) аддитивный шум, внесенный системой, не превышают 0.04. p(x), что позволяет отчетливо разделить выбросы плотности.

3.7. Теоретический сигнал с добавлением шума в 5%

Добавим в исследуемое уравнение (6) аддитивный шума вносимый системой уровнем в 5% (рис. 37, в.) и применим методы последующей регуляризации.



Рис. 37. а) Теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x). б) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме. в) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x)



Рис. 38. а) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 39. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).



Рис. 40. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме
б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в)
Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Для подбора оптимального диапазона фильтрации спектра выходного сигнала n(x), рассмотрим спектр деления F[p(x)] и найдем нужные частоты для фильтрации. Выделим:

1. Диапазон 60-964 $\left(\frac{1}{MM}\right)$., результаты приведены на (рис. 41.)



2. Диапазон 40-974 (<u>1</u>)., результаты приведены на (рис. 41.)

Рис. 41. Деление двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 60 до 964 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 42. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 60 до 964 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 43. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 44, б.) в диапазоне от 40 до 944 ($\frac{1}{MM}$).



Рис. 44. а) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования

Фурье
$$F^{-1}(F[p(x)])$$
.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 40 до 984 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 45. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

При исследовании добавления в уравнение (6) аддитивного шума в 5% и последующей регуляризации, можно заметить, что оптимальными примерами диапазона игнорирования значений в преобразования Фурье выходного сигнала F[n(x)] при реконструкции исходной плотности p(x) могут послужить:

- 1. Диапазон 90-934 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 46, а.)
- 2. Диапазон 60-964 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 46, б.)



3. Диапазон 40-984 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 46, в.)



Рис. 46. а) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x),

результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Видно, что крутизна склонов восстановленной функции p(x) больше, чем экспериментальной функции n(x). В обоих диапазонах ближайшие выбросы 4 и 5й разрешаются ниже плотности 0.5 p(x). При выше описанных условиях. Что говорит о действительной коррекции апертурных искажений в исходной функции.

Добавленный в уравнение (6) аддитивный шум уровнем в 3% вносит существенные искажения при реконструкции исходной функции p(x). Этот шум хорошо заметен на (рис. 36, а.) и в дальнейшем убывает, например, при реконструкции p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 60-964 (1/мм). (рис. 36, б.) шумы сгладились, но не ушли. А при реконструкции сигнала p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 40-984 (1/мм). (рис. 36, б.) аддитивный шум, внесенный системой, не превышают 0.04. p(x), что позволяет отчетливо разделить выбросы плотности.

3.8. Теоретический сигнал с добавлением шума в 7%

Добавим в исследуемое уравнение (6) аддитивный шума вносимый системой уровнем в 7% (рис. 47, в.) и применим методы последующей регуляризации.



Рис. 47. а) Теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x). б) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме. в) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x)



Рис. 48. a) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 49. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 90 до 934 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 50. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Для подбора оптимального диапазона фильтрации спектра выходного сигнала n(x), рассмотрим спектр деления F[p(x)] и найдем нужные частоты для фильтрации. Выделим:

3. Диапазон 60-964 (¹/_{мм})., результаты приведены на (рис. 51.)



4. Диапазон 40-974 (<u>1</u>_{мм})., результаты приведены на (рис. 51.)

Рис. 51. Деление двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 60 до 964 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 52. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования

Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 60 до 964 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 53. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], (рис. 54, б.) в диапазоне от 40 до 944 ($\frac{1}{MM}$).



Рис. 54. а) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 40 до 984 ($\frac{1}{_{MM}}$).



Рис. 55. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

При исследовании добавления в уравнение (6) аддитивного шума в 7% и последующей регуляризации, можно заметить, что оптимальными примерами диапазона игнорирования значений в преобразования Фурье выходного сигнала F[n(x)] при реконструкции исходной плотности p(x) могут послужить:

- 1. Диапазон 90-934 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 56, а.)
- 2. Диапазон 60-964 (¹/_{мм}). (рис. 56, б.)



3. Диапазон 40-984 (<u>1</u>). (рис. 56, в.)


Рис. 56. а) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x),

результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Видно, что крутизна склонов восстановленной функции p(x) больше, чем экспериментальной функции n(x). В обоих диапазонах ближайшие выбросы 4 и 5й разрешаются ниже плотности 0.5 p(x). При выше описанных условиях. Что говорит о действительной коррекции апертурных искажений в исходной функции.

Добавленный в уравнение (6) аддитивный шум уровнем в 7% вносит существенные искажения при реконструкции исходной функции p(x). Этот шум хорошо заметен на (рис. 36, а.) и в дальнейшем убывает, например, при реконструкции p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 60-964 (1/мм). (рис. 36, б.) шумы сгладились, но не ушли. А при реконструкции сигнала p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 40-984 (1/мм). (рис. 36, б.) аддитивный шум, внесенный системой, не превышают 0.04. p(x), что позволяет отчетливо разделить выбросы плотности.

3.9. Теоретический сигнал с добавлением шума в 10%

Добавим в исследуемое уравнение (6) аддитивный шума вносимый системой уровнем в 10% (рис. 57, в.) и применим методы последующей регуляризации.



Рис. 57. а) Теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x). б) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме. в) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x)



Рис. 58. а) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 59. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Игнорируем значения в высокочастотной области F[p(x)], в диапазоне от 90 до 934 (<u>1</u>_{мм}). p(x) 1 а 0.8 0.6 (x)d 0.4 0.2 0 0 100 200 300 700 1000 400 500 600 800 900 х n(x)+noise 1 б 0.8 0.6 (x)d 0.4 0.2 0 200 400 500 600 700 800 0 100 300 900 1000 х р(х) восстановленный 1 в 0.8 0.6 (x)d 0.4 0.2 0 0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 х

Рис. 60. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Для подбора оптимального диапазона фильтрации спектра выходного сигнала n(x), рассмотрим спектр деления F[p(x)] и найдем нужные частоты для фильтрации. Выделим:

- 5. Диапазон 60-964 (¹/_{мм})., результаты приведены на (рис. 61.)
- 6. Диапазон 40-974 (<u>1</u>)., результаты приведены на (рис. 61.)



Рис. 61. Деление двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 62. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.



Рис. 63. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).



Рис. 64. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.



Рис. 65. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

При исследовании добавления в уравнение (6) аддитивного шума в 10% и последующей регуляризации, можно заметить, что оптимальными примерами диапазона игнорирования значений в преобразования Фурье выходного сигнала F[n(x)] при реконструкции исходной плотности p(x) могут послужить:

- 1. Диапазон 90-934 (<u>1</u>_{мм}). (рис. 66, а.)
- 2. Диапазон 60-964 (¹/_{мм}). (рис. 66, б.)







Рис. 66. а) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

Видно, что крутизна склонов восстановленной функции p(x) больше, чем экспериментальной функции n(x). В обоих диапазонах ближайшие выбросы 4 и 5й разрешаются ниже плотности 0.5 p(x). При выше описанных условиях. Что говорит о действительной коррекции апертурных искажений в исходной функции.

Добавленный в уравнение (6) аддитивный шум уровнем в 10% вносит существенные искажения при реконструкции исходной функции p(x). Этот шум хорошо заметен на (рис. 36, а.) и в дальнейшем убывает, например, при реконструкции p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 60-964 (1/мм). (рис. 36, б.) шумы сгладились, но не ушли. А при реконструкции сигнала p(x) с игнорирование значений в преобразовании Фурье выходного сигнала F[n(x)] в диапазоне 40-984 (1/мм). (рис. 36, б.) аддитивный шум, внесенный системой, не превышают 0.04. p(x), что позволяет отчетливо разделить выбросы плотности.

3.10. Теоретический сигнал с добавлением шума в 15%



Рис. 67. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье $F^{-1}(F[p(x)])$.



Рис. 68. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

3.11. Теоретический сигнал с добавлением шума в 20%



Рис. 69. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).



Рис. 70. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x). в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

3.12. Теоретический сигнал с добавлением шума в 30%



Рис. 71. а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).



Рис. 72. а) Сигнал p(x), имитирующий истинное распределение плотности в объеме б) Теоретический выходной сигнал n(x), результат свертки двух сигналов, апертурной функции h(x) системы сканирования и исходной теоретической плотности p(x).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

3.13. Реконструкция экспериментальной функции

Исследуем коррекцию апертурных искажений для сигнала, полученного из экспериментальной функции распределения плотности в объеме.



Рис. 73. а) теоретическая апертурная функция системы сканирования h(x).б) Экспериментальный выходной сигнал n(x), получаемый при сканировании объекта контроля системой сканирования.



Рис. 74. a) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 74. а) а) Преобразование Фурье выходного сигнала F[n(x)] б) Преобразование Фурье теоретической апертурной функции системы сканирования F[h(x)]. в) Преобразование Фурье деления двух преобразований Фурье сигналов, выходного n(x) и апертурной функции h(x), F[p(x)] =F[n(x)]/F[n(x)].



Рис. 75. а) Экспериментальный выходной сигнал n(x), получаемый при сканировании объекта контроля системой сканирования. б) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).в) Восстановленный из выходной теоретической плотности n(x), сигнал p(x), результат обратного преобразования Фурье F⁻¹ (F[p(x)]).

При реконструкции экспериментального сигнала, исходя из результатов теоретических сигналов видно, что оптимальными примерами диапазона игнорирования значений в преобразования Фурье экспериментального сигнала F[n(x)] при реконструкции его исходной плотности p(x) могут послужить:

- 1. Диапазон 90-934 (<u>1</u>). (рис. 75, б.)
- 2. Диапазон 40-984 (¹_{мм}). (рис. 75, в.)

Из восстановленных значений проекций преобразования Фурье F[p(x)], можно заметить, что при фильтрации в диапазоне 90-934 ($\frac{1}{_{MM}}$). крутизна склонов восстановленной функции p(x) больше, чем экспериментальной функции n(x). Но в реконструкции присутствуют сильные шумы, из которых можно выделить истинные значение плотности (рис. 75, а.)

А при реконструкции сигнала p(x) из восстановленных значений проекций преобразования Фурье F[p(x)], при фильтрации в диапазоне 40-984 $\left(\frac{1}{_{MM}}\right)$. крутизна склонов восстановленной функции p(x) не сильно отличается от исходной, но аппроксимировались шумы, которые превышают 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены методы для цифровой коррекции апертурных искажений в системах измерения плотности в объеме.

Разработана программа для коррекции апертурных искажений в системах измерения плотности в объеме.

Доказана возможность использование цифровой обработки сигналов для повышения разрешающей способности систем сканирования радиографического контроля.

Получены зависимости влияния уровня шума в выходном сигнале системы сканирования, на реконструкцию его истинной плотности.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения» оценена конкурентоспособность разработки и сравнительная эффективность проекта, определены структура плана проекта и трудоемкость работ, проведен FAST – анализ, разработан график проведения работ и рассчитан бюджет исследования. По полученным результатам разработка является перспективной, прибор может использоваться при проведении контроля легкосплавных бурильных труб, существенным образом снижая трудоемкость и повышая точность и достоверность результатов. Бюджет для реализации исследования составляет 364381,15 рублей.

В разделе «Социальная ответственность» проведён анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды. Затронуты вопросы охраны окружающей среды. Рассмотрены защита при возникновении чрезвычайных ситуаций. Рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

96

СПИСОК ПУБЛЕКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Мухорьянов Р. Б., ТПУ, «Коррекция апертурных искажений в системах измерения плотности в объеме. Международная научно-техническая конференция "Измерение, контроль, информатизация"; Раздел 5. Элементы, устройства и программные средства для измерения, контроля и информатизации.

2. Мухорьянов Р. Б., ТПУ, «Коррекция апертурных искажений теневых радиационных изображений. VII научно –практическая конференция «Информационно – измерительная техника и технологии» с международным участием изображений в радиометрических системах контроля»;

3. Мухорьянов Р.Б. Исследование влияния ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства стали 12Х1МФ / И. В. Власов, Р. Б. Мухорьянов // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении : сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Томск, 9 – 11 ноября 2015 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 57-60].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Капранов Б.И. Разработка метода и средств реконструктивной комптоновской томографии. Диссертация д.т.н., ТПУ, Томск, 2000 – 257с.

2. J. Chantas, N. P. . Galatsanos, N. Woods, 2007 Super Resolution Based on Fast Registration and Maximum A Posteriori Reconstruction, IEEE Trans. on Image Processing, 1618211830

3. K. R. Castleman, 1996 Digital Processing, Eglewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall

4. В.И. Солодушкин, В.А. Клименов, В.А. Удод, А.К. Темник, Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4

5. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

6. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

7. ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

8.ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

9. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

10. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

11. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

12. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.

13. СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях.

14. СП 51.13330.2011. Защита от шума.

15. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.

16. ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.

17. ГОСТ Р 22.0.07-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров.

18. ГОСТ Р 50948-2001. Средства отображения информация индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности

19. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие/ Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 73 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Раздел

«Introduction, the recovery of an original image from degraded observations »

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Мухорьянов Руслан Борисович		

Консультант кафедры ФМПК:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Ведущий	Капранов Б.И.	д.т.н.		
эксперт				

Консультант – лингвист кафедры ФМПК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Вебер Ю.Ю.	К.П.Н.		