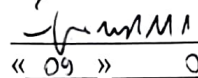


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиофизики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

канд. физ.-мат наук, доцент

 М.Л. Громов
« 09 » 06 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

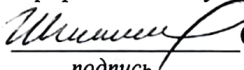
**СИСТЕМА ЗАХВАТА И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
ТОМОГРАФИИ В ДВИЖЕНИИ**

по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика
направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы»

Колоскова Мария Евгеньевна

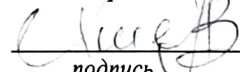
Руководитель ВКР

д-р физ.-мат. наук, профессор

 С.Э. Шипилов
подпись
« 30 » 05 2023 г.

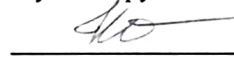
Консультант ВКР

Инженер

 В.Л. Хмелев
подпись
« 30 » 05 2023 г.

Автор работы

студент группы № 791

 М.Е. Колоскова
подпись
« 30 » 05 2023 г.

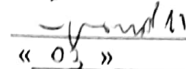
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП

канд. физ.-мат наук, доцент

 М.Л. Громов
« 03 » 10 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы обучающемуся
Колосковой Марии Евгеньевне

по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика, направленность (профиль)
«Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы

СИСТЕМА ЗАХВАТА И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
ТОМОГРАФИИ В ДВИЖЕНИИ

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) на кафедру – 30.05.2023 б) в ГЭК – 15.06.2023

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования – Компьютерное зрение и цифровая обработка изображений

Предмет исследования – Оптическая лучевая локация

Цель исследования – Создание системы захвата объекта в движении для задачи
радиовидения

Задачи:

Обзор принципов работы оптических модулей

Разработка программного обеспечения для получения информации о дальности
расположения объекта

Разработка системы захвата движения объекта в пространстве в режиме реального
времени

Разработка программного обеспечения для решения задачи томографии методом
дифракционного суммирования

Анализ влияния количества приемо-передатчиков на восстановленное
радиоизображение

Решение задачи томографии с добавлением случайной ошибки при определении
положения объекта

Анализ влияния точности захвата объекта на качество томографии

Методы исследования:

Инфракрасная локация, решение обратной задачи методом дифракционного
суммирования во временной области

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа, –

Подповерхностная локация

4 Краткое содержание работы

В процессе работы создана система захвата и сопровождения объекта (человека) для решения задачи томографии в движении. Создано программное обеспечение для захвата и определения положения человека в пространстве, его антропометрических параметров на основе инфракрасной лучевой локации и методов компьютерного зрения в режиме реального времени. В области пространства, где находится человек, необходимо провести сканирование с целью нахождения скрытых опасных объектов. Для этого проведено численное моделирование задачи томографии методом дифракционного суммирования для восстановления радиоизображений.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Профессор каф. радиофизики

должность, место работы



подпись

С.Э. Шипилов

И.О. Фамилия

Задание принял к исполнению

Студент

должность, место работы



подпись

/ М.Е. Колоскова

И.О. Фамилия

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа бакалавра, 58 страниц, 23 рисунка, 8 формул, 11 использованных источников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инфракрасная локация, компьютерное зрение, система захвата движения, радиовидение.

Целью данной работы является создание системы захвата объекта в движении для задачи радиовидения. В ходе работы рассмотрены принципы работы оптического модуля Intel RealSense, разработана программа для определения в исследуемой области человека и его антропометрических параметров в режиме реального времени с использованием методов компьютерного зрения и нейронной сети.

Программа по захвату движения человека определяет область пространства, в которой в дальнейшем необходимо провести сканирование для обнаружения скрытых опасных предметов. Для выполнения этой задачи создано программное обеспечение на языке программирования Python для решения задачи томографии методом дифракционного суммирования во временной области. В программу добавлена возможность внесения случайной ошибки при определении положения объекта, проводится анализ влияния точности захвата объекта на качество томографии.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Методы и технологии.....	8
1.1 Цифровые изображения	8
1.2 Компьютерное зрение	9
1.3 Технологии дополненной реальности	10
2 Описание и принцип работы оптических модулей	13
2.1 Оптический инфракрасный модуль	13
2.2 Глубина поля зрения	14
2.3 Оптический модуль Microsoft Kinect.....	16
2.4 Оптический модуль Intel RealSense D435i	18
3 Система захвата объекта и определение дальности.....	21
3.1 Получение изображений в среде Intel RealSense Viewer	221
3.2 Разработка программного обеспечения для получения информации о дальности.....	23
3.3 Нейронная сеть Cubemos BodyTracker	27
3.4 Программное обеспечение Intel: Cubemos Skeleton Tracking.....	28
3.5 Получение изображения дополненной реальности программным кодом	30
4 Методы получения радиоизображений	37
4.1 Метод Столта	37
4.2 Метод дифракционного суммирования.....	38
5 Моделирование задачи томографии и разработка программного обеспечения	41
5.1 Моделирование в Mathcad	41
5.2 Создание программного обеспечения	43
5.3 Моделирование сложного распределения неоднородностей.....	45
5.4 Добавление случайной ошибки в данные позиционирования	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	57

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения безопасности в местах массового скопления людей актуальна уже многие годы. В аэропортах, торговых центрах, на вокзалах используются системы досмотра для обнаружения скрытых запрещенных опасных предметов. Все существующие системы досмотра предназначены для сканирования статичных объектов, которыми являются неподвижные на некоторое время люди и скрытые опасные предметы. Разрабатываемый в рамках данной научной работы метод будет использоваться для сканирования движущихся объектов в реальном времени. Таким методом можно проводить скрытое сканирование людей, не тревожа их.

Целью данной работы является создание системы захвата объекта в движении для задачи радиовидения. Чтобы получить радиоизображение движущегося человека важно знать, какую область необходимо сканировать (какой объем занимает человек в пространстве). Для этого нужно «выделить» человека внутри видеоряда в каждый момент времени.

Чтобы обнаружить область пространства, занимаемую человеком, необходимо определить его антропометрические параметры, такие как длина конечностей и углы между ними. В данной работе описан метод получения данных о глубине с использованием оптических инфракрасных модулей. Полученная информация необходима для определения положения объектов в снимаемой сцене. Для распознавания и отслеживания человека подключена нейронная сеть Cubemos. Описан процесс разработки программного обеспечения и получения изображений, содержащих информацию о дальности объектов. Также получено изображение человека, дополненное скелетной моделью, позволяющей определить положение конечностей человека, используя методы компьютерного зрения.

Для того, чтобы получить информацию о скрытых объектах необходимо решить задачу томографии. В данной работе задача томографии численно

решена методом дифракционного суммирования для точечных неподвижных рассеивателей в двумерном пространстве. Разработано программное обеспечение на языке программирования Python, также моделирование задачи было проведено в среде Mathcad. Оценено влияние количества приемо-передатчиков на получаемое изображение, добавлена случайная ошибка при определении положения объекта.

1 Методы и технологии

1.1 Цифровые изображения

Оптическое представление видимой сцены может быть описано как цифровое изображение. Цифровое изображение – это дискретная функция двух координат, аргументы которой называются пикселями, а значения – относительной интенсивностью света. Каждый пиксель представляет собой значение относительной интенсивности света, падающего на полупроводниковую матрицу приемника (цифровая фото- или видеокамера). Такие изображения принято называть растровыми. Цифровое изображение может быть цветным и в оттенках серого. Основное отличие между цветным изображением и изображением в оттенках серого – канальность. Цветное изображение является многоканальным, например RGB и HSV. В то время как изображение в оттенках серого и черно-белое изображение являются одноканальными. Размер и глубина цвета являются основными характеристиками растрового изображения. Размер изображения в пикселях представляет собой количество строк и столбцов матрицы, содержащих информацию об изображении. Каждое значение пикселя матрицы может быть представимо в булевой форме, а значит, будет иметь размерность в битах. Классическая размерность пикселя цифрового изображения 8 бит, в оттенках серого $[0, 255]$, а цветное изображение $[0, 255; 0, 255; 0, 255]$ – 24 бит. Когда необходима высокая цветопередача или изображение имеет не оптическую природу, используются другие размерности.

Растровые изображения можно получить с помощью цифровых фотоаппаратов, цифровых видеокамер, сканеров изображений и других устройств. Для работы с цифровыми изображениями, необходимо уметь анализировать изображение в размерности 8 бит и 16 бит, а также нескольких форматах. В данной работе изображения были получены с использованием оптических модулей и методов компьютерного зрения.

1.2 Компьютерное зрение

Компьютерное зрение – это технология и набор методов, которые имеют дело с распознаванием объектов и образов компьютером, взаимодействуя с цифровыми изображениями и видео. Методы компьютерного зрения позволяют получить информацию об объектах и взаимодействии между объектами из видеопоследовательности или кадра видеопоследовательности. Компьютерное зрение стремится решить задачи, которые выполняет система человеческого зрения. Можно выделить несколько сфер, где применения компьютерное зрение.

Сферы применения компьютерного зрения:

1. Системы управления процессами (автономные транспортные средства, такие как беспилотные автомобили, различные промышленные роботы)
2. Системы видеонаблюдения (система распознавания лиц, контроль перемещения людей на производствах, в супермаркетах, контроль дорожного трафика)
3. Трехмерное отслеживание поверхностей и плоскостей (построение трехмерных моделей, отслеживание деформации объектов наблюдения)
4. Смежные и другие сферы

Компьютерное зрение применяется для реконструкции трехмерных изображений на основе последовательного видеоряда, либо множества снимков сцены. В зависимости от типа датчика конечные данные изображения могут быть представлены как двухмерное изображение, реконструированное трехмерное изображение или последовательность кадров (видео). Цифровое изображение получается с использованием датчиков дальности, томографических устройств, радаров, ультразвуковых камер и множества других устройств. При помощи технологии компьютерного зрения устройства со встроенными датчиками и камерами распознают и анализируют

информацию о снимаемой сцене. Библиотеки компьютерного зрения могут использоваться для создания дополненной реальности.

1.3 Технологии дополненной реальности

Одной из быстроразвивающихся и перспективных технологий является дополненная реальность. Дополненная реальность – это совокупность технологий, которые дополняют реальный мир цифровыми данными с помощью программных и аппаратных систем в режиме реального времени. Дополненная реальность создается помощью компьютера путем добавления каких-либо данных (текст, компьютерная графика, аудио и другая информация) в реальное пространство. Необходимые данные предоставляется с индикаторов, сенсоров, датчиков, камер, GPS и других устройств и систем, на устройство отображения (например, очки дополненной реальности, дисплей и т.д.), для наиболее удобного восприятия информации человеком в реальном времени.

Изначально, термин «дополненная реальность» использовался для описания цифровых дисплеев, используемых при постройке самолетов. С помощью полупрозрачных дисплейных панелей на шлеме авиаконструкторы видели чертежи и инструкции. Современные системы дополненной реальности используют одну или несколько технологий отслеживания: цифровые камеры, оптические датчики, гироскопы, радиочастотную идентификацию. Технологии дополненной реальности применяются в компьютерных играх, военной промышленности, медицине, образовании и других областях. Например, компания Amazon использует технологию дополненной реальности (рисунок 1) для проверки социальной дистанции сотрудников. На мониторы транслируется изображение с камер наблюдения и вокруг каждого человека отображается круг безопасного диаметра. При слишком близком расположении людей друг с другом, круг становится красного цвета, в остальных случаях – зеленого.



Рисунок 1 – Дополненная реальность для контроля социальной дистанции

В США существует программа для обучения военных летчиков, моряков и рядовых солдат, а также отработки первой медицинской помощи с использованием дополненной реальности. Множество игр с дополненной реальностью позволяют с помощью камеры телефона увидеть виртуальный предмет в снимаемой сцене. В медицине используется устройство AccuVein, способное отображать в реальном времени сосудистую сеть на поверхности кожи для поиска вен.

Объекты дополненной реальности могут создаваться двумя способами. Первый – используя специальные маркеры-маяки (QR-коды, Aztec-коды, BAR-коды), расположенные внутри снимаемой сцены. Второй вариант – на основе заранее известных геометрических параметров объекта. Система дополненной реальности распознает маркеры в снимаемой сцене, и на их место добавляет виртуальную среду или виртуальные объекты. Тем самым накладывает дополненную реальность на изображение снимаемого пространства.

Видимую сцену можно представить и описать как цифровое изображение. Используя методы компьютерного зрения, из цифрового изображения видимой сцены или кадра видеопоследовательности можно

получить и обработать информацию об объектах и взаимодействии между объектами в снимаемой сцене. Для визуального отображения цифровых данных используется технология дополненной реальности – добавление виртуальных объектов в реальное пространство, например, к видеопоследовательности в реальном времени.

2 Принцип работы и описание оптических модулей

2.1 Оптический инфракрасный модуль

Оптический модуль – устройство, которое позволяет получить оптическое изображение и карту глубины сцены с находящимися в ней объектами, используя метод инфракрасной лучевой локации. Суть этого метода заключается в использовании инфракрасного излучения оптического модуля для получения информации о дальности расположения объектов. Оптический модуль состоит из инфракрасного проектора, одной или нескольких инфракрасных камер и цветной камеры. Инфракрасный проектор излучает структурированный свет, который, встречая на своем пути препятствие, отражается от него и принимается инфракрасными камерами. Структурированный свет будет иметь разную плотность заполнения в зависимости от дальности от оптического модуля до препятствия. Чем ближе расположен объект – тем выше плотность заполнения. На основе анализа расстояния между точками отражения структурированного света строится синтезированная карта глубины.

Изображение инфракрасного спектра и RGB-изображение снимаемой сцены необходимо согласовать так, чтобы каждый пиксель цветного изображения был сопоставлен соответствующему пикселю инфракрасного изображения. Данная необходимость возникает из-за расположения инфракрасной камеры и цветной камеры на некотором расстоянии друг от друга на оптическом модуле. После сопоставления пикселей двух изображений возможно извлечь информацию о дальности до объекта из карты глубины.

2.2 Глубина поля зрения

Инфракрасный проектор излучает структурированный свет в невидимом для человека диапазоне, который принимается двумя идентичными друг другу инфракрасными камерами. Принятое излучение, отразившееся от объектов в снимаемой сцене, содержит в себе информацию об их положении и используется для сбора данных о глубине. Использование оптических методов сканирования накладывает ограничения на размер сцены (углы обзора оптического модуля). Пример допустимого диапазона при получении карты глубины можно наблюдать на рисунке 2.

Поле зрения камеры называется угловое расстояние снимаемой сцены. Поле зрения может быть горизонтальным вертикальным или диагональным. Наложение точек, полученных с двух сенсоров глубины, и их объединение является глубиной поля зрения.

На рисунке 2 обозначены: *HFOV* (horizontal field of view) – горизонтальное поле зрения левой инфракрасной стереокамеры, *B* – базовая линия или расстояние между левой и правой инфракрасными стереокамерами, Z_1 и Z_2 – расстояние до сцены от оптического модуля, причем $Z_1 < Z_2$.

Полным изображением глубины называется недопустимая полоса глубины и допустимая карта глубины. Левая и правая инфракрасные стереокамеры имеют горизонтальный угол обзора, как представлено на рисунке 2. Можно заметить, что при увеличении расстояния от Z_1 до Z_2 от модуля глубины, недопустимая полоса глубины уменьшается в полном изображении глубины, а глубина поля зрения возрастает.

В качестве эталона для сопоставления используется одна левая инфракрасная стереокамера, что приводит к появлению областей, где невозможно совместить точки с двух стереокамер, так как есть недоступные участки в поле зрения правой стереокамеры. На левом краю данные о глубине

не будут получены, эти области выделяются черным цветом на изображении снимаемой сцены.

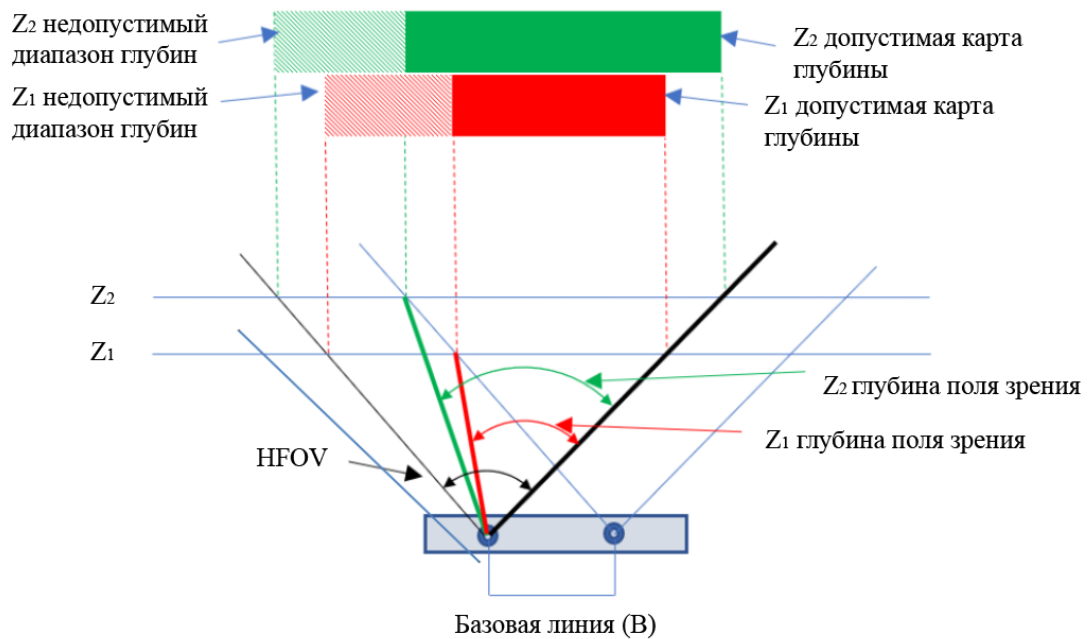


Рисунок 2 – Допустимая карта глубины и недопустимая полоса глубины поля зрения снимаемой сцены

Глубина поля зрения на расстоянии (Z) определяется по формуле (1):

$$Depth\ FOV = \frac{HFOV}{2} + \tan^{-1} \left\{ \tan \left(\frac{HFOV}{2} \right) - \frac{B}{Z} \right\}, \quad (1)$$

где $Depth\ FOV$ (field of view) – глубина поля зрения, $HFOV$ (horizontal field of view) – горизонтальное поле зрения левой инфракрасной стереокамеры, B – базовая линия или же расстояние между левой и правой инфракрасными стереокамерами, Z – расстояние до сцены от оптического модуля.

Значение глубины поля зрения зависит от оптического модуля, которым была распознана снимаемая сцена. Далее рассмотрены характеристики оптических модулей Microsoft Kinect и Intel RealSense.

2.3 Оптический модуль Microsoft Kinect

Microsoft Kinect – это оптический модуль, позволяющий взаимодействовать с программами используя движения, жесты и голосовые команды. Было разработано компанией Microsoft как контроллер, который может быть применен к любому приложению с операционной системой Windows или игровой приставке Xbox 360.

Оптический модуль Kinect и расположение его компонент можно рассмотреть на рисунке 3.

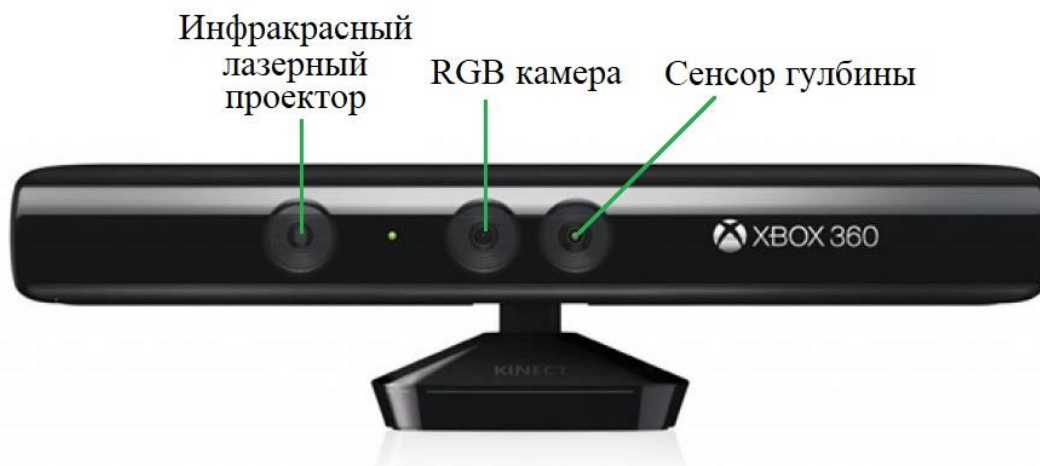


Рисунок 3 – Оптический модуль Microsoft Kinect v1

Оптический модуль Kinect имеет инфракрасный лазерный проектор, цветную (RGB) камеру и сенсор глубины. Инфракрасный лазерный проектор излучает инфракрасный свет, невидимый для человеческого глаза. Эти лучи, отраженные от объектов в снимаемой сцене, принимает сенсор глубины. Устройство анализирует полученную информацию о дальности до объектов и преобразует ее в информацию о глубине сцены. Полученная информация – это расстояние до объектов в снимаемой сцене.

За захват и передачу цветного видеопотока отвечает цветная камера. Эта камера возвращает поток данных в виде последовательности изображений.

Поддерживает до 30 кадров в секунду при разрешении 640×480 пикселей. Для более высокого разрешения 1280×960 пикселей количество кадров в секунду не более 15. Вертикальный и горизонтальный углы обзора камеры 43° и 57° соответственно. Поток данных, полученных от инфракрасного проектора и сенсора глубины, передается с разрешением 640×480 пикселей и ниже. Угол обзора такой же, как у цветной камеры. Некоторые параметры оптического модуля представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры оптического модуля Microsoft Kinect v1

Комментарий/Режим	Разрешение, пиксели	Количество кадров в секунду
Карта глубины	640×480	6, 15, 30
	320×240	6, 30
Инфракрасный лазерный проектор	640×480	6, 15, 30
	640×360	6, 15, 30
	480×270	6, 15, 30
Цветовой поток RGB-камеры	1280×960	6, 12, 15
	640×480	6, 15, 30
	640×360	6, 15, 30
	424×240	6, 15, 30

Используя технологию Microsoft Kinect возможно захватывать видео в реальном времени, отслеживать положение конечностей человека, их размеры, определять расстояния от устройства до объекта, генерировать карту глубины объектов в снимаемой сцене и многое другое.

Оптический модуль Kinect имеет множество идентичных ему устройств, например Intel RealSense, ZED mini от Stereolabs, Structure Sensor от Occipital и другие. В следующем разделе рассмотрен оптический модуль Intel RealSense.

2.4 Оптический модуль Intel RealSense D435i

Оптический модуль Intel RealSense имеет два сенсора глубины (левая и правая инфракрасная стереокамера), инфракрасный лазерный проектор и RGB модуль (цветная камера). Подробнее можно рассмотреть оптический модуль на рисунке 4.



Рисунок 4 – Изображение оптического модуля Intel RealSense D435i

Цветная камера создает RGB изображение снимаемой сцены. Инфракрасный проектор излучает структурированный свет в невидимом для человека диапазоне, который принимается двумя идентичными друг другу инфракрасными камерами. Принятое излучение, отразившееся от объектов в снимаемой сцене, содержит в себе информацию об их положении и используется для сбора данных о глубине. Использование оптических методов сканирования накладывает ограничения на размер сцены (углы обзора оптического модуля).

Из документации разработчика, снимаемая сцена ограничивается горизонтальными и вертикальными углами обзора соответственно: для сенсора глубины – $91,2^\circ \times 65,5^\circ$, цветной камеры – $69,4^\circ \times 42,5^\circ$. Цветовой поток RGB-камеры в формате YUY2 [16 бит] поддерживает максимальное разрешение 1920×1080 пикселей при 6, 15, 30 кадрах в секунду. Меньшее

разрешение, например 640×480 , поддерживает до 60 кадров в секунду. Для разрешения 848×480 формата Z [16 бит] карты глубины и формата Y8 [8 бит] инфракрасной стереокамеры, доступная смена кадров до 90 кадров в секунду. Минимальное фокусное расстояние 0,11 метров, максимальный диапазон примерно 10 метров. Идеальный диапазон дальности объектов в сцене от 0,3 до 3 метров.

Некоторые доступные форматы, разрешения и количество кадров в секунду для камеры Intel RealSense D435i представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры оптического модуля Intel RealSense D435i

Формат изображения	Разрешение, пиксели	Количество кадров в секунду	Комментарий/Режим
Z [16 бит]	1280×720	6, 15, 30	Карта глубины
	848×480	6, 15, 30, 60, 90	
	640×480	6, 15, 30, 60, 90	
	640×360	6, 15, 30, 60, 90	
	480×270	6, 15, 30, 60, 90	
	424×240	6, 15, 30, 60, 90	
Y8 [8 бит]	1280×720	6, 15, 30	Инфракрасная стереокамера
	848×480	6, 15, 30, 60, 90	
	640×480	6, 15, 30, 60, 90	
	640×360	6, 15, 30, 60, 90	
	480×270	6, 15, 30, 60, 90	
	424×240	6, 15, 30, 60, 90	
YUY2 [16 бит]	1920×1080	6, 15, 30	Цветовой поток RGB-камеры
	1280×720	6, 15, 30	
	960×540	6, 15, 30, 60	
	848×480	6, 15, 30, 60	
	640×480	6, 15, 30, 60	
	640×360	6, 15, 30, 60	
	424×240	6, 15, 30, 60	
	320×240	6, 30, 60	
	320×180	6, 30, 60	

В данной работе для получения карты глубины использовался формат Z [16 бит] при разрешении 640×480 и 1280×720 пикселей. Данные обновлялись каждые 30 кадров в секунду в режиме реального времени.

Получение оптического изображения проводилось в восьмибитном RGB-формате. Полученные данные представлены в виде цифрового изображения.

Был рассмотрен способ получения информации о глубине с использованием инфракрасной лучевой локации. Рассмотрены характеристики оптических модулей Microsoft Kinect и Intel RealSense и принцип их работы. При сравнении двух оптических модулей выявлено, что Kinect имеет меньший угол обзора, как камеры, так и сенсора глубины, а также меньшее разрешение при съемке 30 кадров в секунду. Еще одним фактором послужило то, что для Microsoft Kinect не существует средств разработки программного обеспечения, написанных на Python 3 версии, поэтому для данной работы использовался Intel RealSense.

3 Система захвата объекта и определение дальности

3.1 Получение изображений в среде Intel RealSense Viewer

Intel RealSense Viewer – программное обеспечение от компании Intel. Программное обеспечение поддерживает установку параметров для получения изображений, которые отображают информацию о дальности расположении объектов в снимаемой сцене. Было проведено тестирование среды Intel RealSense Viewer и оптического модуля Intel RealSense. С помощью разработанного программного обеспечения и оптического модуля были получены изображения снимаемой сцены (рисунок 5-7).

Снимаемый объект в видимом оптическом диапазоне представлен на рисунке 5. Изображение получено RGB-камерой, которая является частью оптического модуля. Объект (гитара) практически полностью расположен в одной плоскости, равноудаленной от оптического модуля. Правая часть гитары (гриф) находится в другой плоскости.

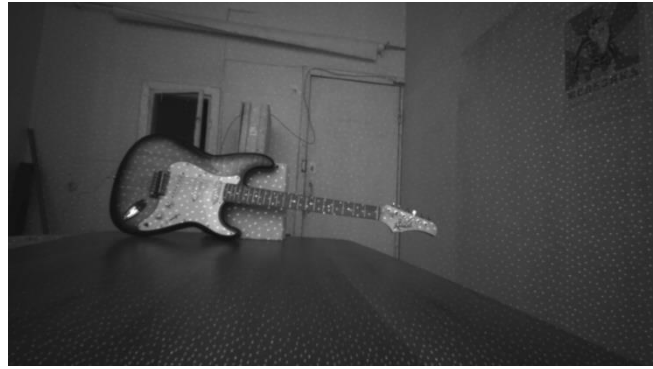


Рисунок 5 – Цветное изображение видимого диапазона

На рисунке 6 представлена та же сцена, но в инфракрасном диапазоне, невидимом человеческим глазом. Структурированный свет излучается инфракрасным проектором и принимается двумя идентичными инфракрасными камерами. Расстояние до объекта определяется в зависимости от плотности заполнения структурированным светом поверхности.



а)



б)

Рисунок 6 – Изображение в инфракрасном диапазоне а) увеличенный фрагмент,
б) полное изображение, полученное оптическим модулем

Изображение инфракрасного спектра является картой глубины – двухмерным цифровым изображением. Синтезированная карта глубины (рисунок 7), является одноканальным изображением в оттенках серого цвета. Получение цветного изображения карты глубины основывается на согласовании изображения в инфракрасном диапазоне и цвета. Каждый пиксель карты глубины равен не относительной интенсивности света, как в привычном изображении видимого диапазона, а равен определенному расстоянию. В этом случае записывается расстояние между объективом инфракрасной камеры и точкой пространства, в которой свет был отражен.

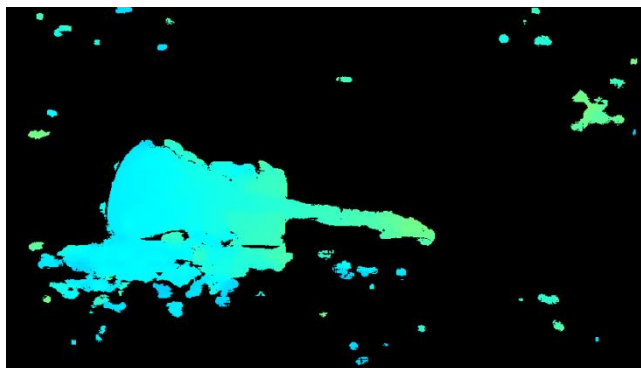


Рисунок 7 – Изображение синтезированной карты глубины

Intel RealSense Viewer позволяет провести настройку некоторых параметров изображения и вывести эти изображения на экран, но не позволяет

получить информацию о расположении объекта. В следующем разделе описывается разработанное программное обеспечение, с помощью которого возможно получить и использовать информацию о дальности.

3.2 Разработка программного обеспечения для получения информации о дальности

Для вывода изображения в оптически видимом диапазоне и карты глубины была разработана программа на языке программирования Python. Блок-схема работы программы представлена на рисунке 8.

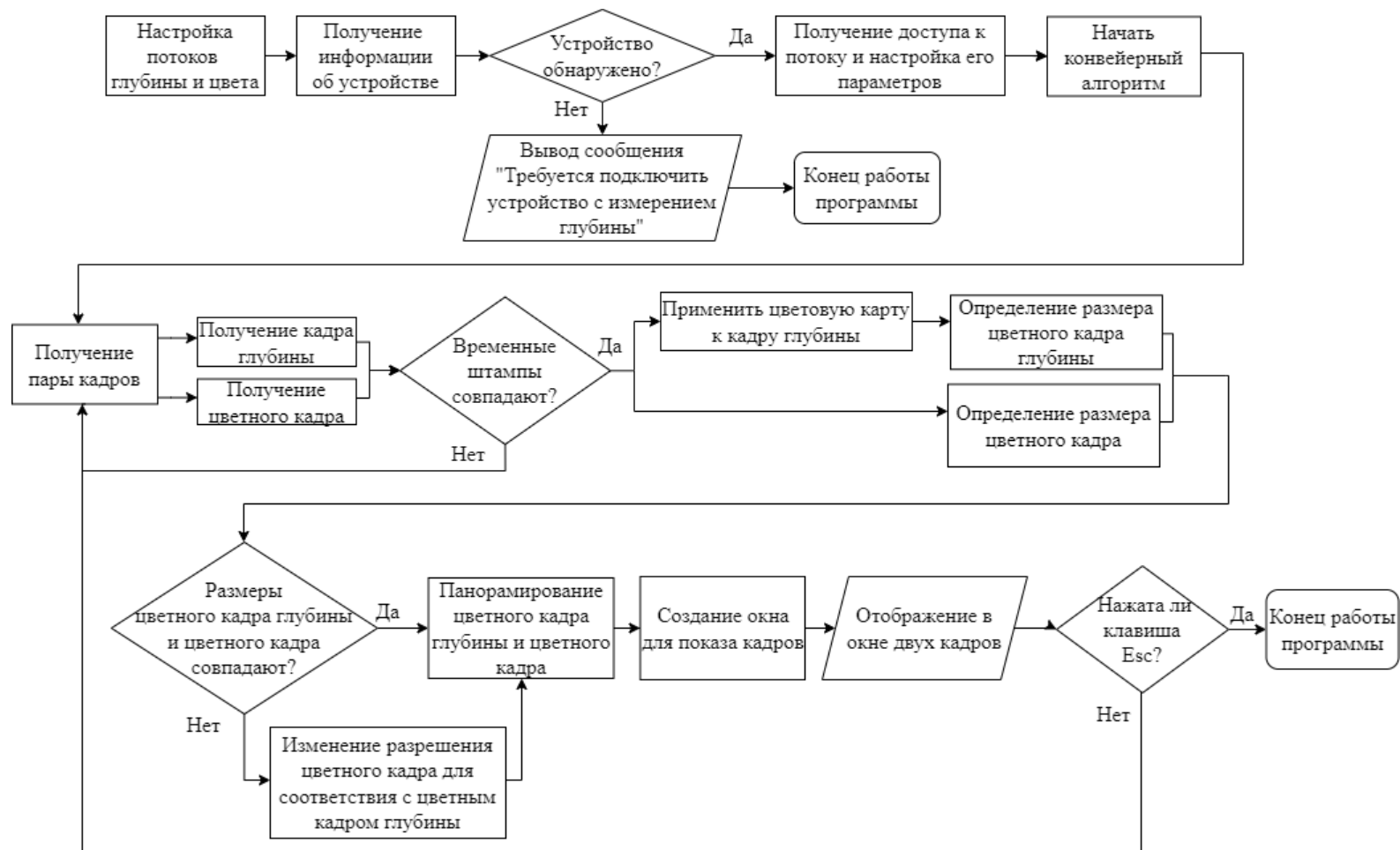


Рисунок 8 – Блок-схема программы вывода двух изображений: синтезированной карты глубины и RGB-изображения

Программа для представления информации о дальности объектов, а также вывода оптического цветного изображения и карты глубины снимаемой сцены работает следующим образом. Производится настройка двух потоков оптического модуля: глубины и цвета. Далее программа запрашивает информацию об устройстве (оптическом модуле), проверяет наличие цветной камеры на устройстве и инфракрасных датчиков. Если необходимая информация о модуле не была обнаружена, то работа программы заканчивается, при этом на экран выводится соответствующее сообщение. Если модуль обнаружен, то алгоритм продолжается. Таким образом, получен доступ к потокам и их настройкам. Начинается конвейерный алгоритм – это несколько идущих друг за другом этапов расчета, расположенных так, что конец предыдущего является началом следующего. Цикл конвейерной потоковой передачи собирает данные с устройства и доставляет их в подключенные модули компьютерного зрения и блоки обработки.

Далее программа с оптического модуля получает два кадра: цветной кадр и кадр глубины. В следующем блоке начинается цикл, производится проверка совпадения временных штампов полученных кадров (кадры должны быть получены одновременно). Алгоритм не продолжается пока не совпадут временные штампы.

Информация о глубине представляется как изображение в оттенках серого цвета (в результате данной программы оно не выводится). Для получения синтезированной карты глубины необходимо применить цветовое отображение к изображению глубины в соответствии с дальностью до объекта. В данной работе применена карта цветности JET. В следующем блоке производится проверка размеров двух кадров. Если размеры не совпадают, то программа изменит разрешение цветного кадра в соответствии с разрешением цветного кадра глубины. С помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV программа выводит цветное изображение в видимом диапазоне и синтезированную карту глубины. Цикл потоковой передачи выполняется до

тех пор, пока не будет остановлен. Разрешение полученных изображений – 640×480 пикселей, а количество кадров в секунду равно 30.

С помощью оптического модуля Intel RealSense, программного кода и набора инструментов библиотек OpenCV, pyrealsense и NumPy, был получен доступ к выделенной памяти. Данные из памяти были преобразованы в два трехканальных RGB-изображения (рисунок 9), которые обновлялись каждые 30 кадров в секунду, обеспечивая обновление данных в реальном времени. На рисунке 9 (а) представлено изображение снимаемой сцены и объектов в ней (А-Д) в видимом глазом диапазоне. На рисунке 9 (б) изображение синтезированной карты глубины с цветовым отображением.

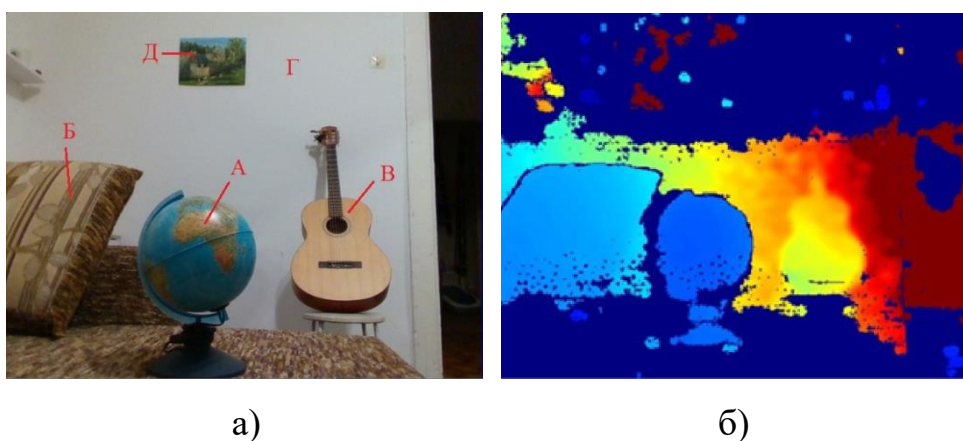


Рисунок 9 – Изображение в видимом диапазоне (а) и синтезированная карта глубины (б)

Изображение инфракрасного спектра, невидимого для глаза, является картой глубины (рисунок 9 б) – двухмерным цифровым изображением. Но каждый пиксель карты глубины равен не относительной интенсивности света, как в привычном изображении видимого диапазона, а равен определенному расстоянию. В этом случае записывается расстояние между объективом инфракрасной камеры и точкой пространства, в которой свет был отражен. Таким образом, синтезированная карта глубины, является одноканальным изображением в оттенках серого цвета. В то же время приведенная карта глубины является цветной. Получение цветного изображения карты глубины основывается на согласовании изображения в инфракрасном диапазоне и

цвета. Объекты, которые находятся ближе всего к камере, отображены синим цветом, самые отдаленные – темно-красным.

На рисунке 9 (а) можно рассмотреть несколько основных объектов, расположенных на разном расстоянии от оптического модуля. Дистанция до ближайшего объекта (А) – 80 см, этой дальности соответствуют синий и голубой цвет. Немного дальше расположен объект (Б) на расстоянии 110 см, соответствующий этому расстоянию цвет светло-голубой. Расстояние до гитары (В) – 190 см. Объект (В) расположен в непараллельной плоскости относительно плоскости стены, таким образом, на синтезированной карте глубины объект отображен не одним цветом. Расстояние до стены (Г) – 230 см. На изображении синтезированной карты глубины практически незаметна картина (Д). Это связано с тем, что картина плоская и тонкая, располагается практически в плоскости стены.

Таким способом можно получить информацию о дальности и расположении объектов в снимаемой сцене. Для того, чтобы отслеживать положение человека, необходимо сегментировать его контур на составляющие. Рекомендованная Intel нейронная сеть Cubemos предназначена для отслеживания положения человека в снимаемой сцене. Далее рассматривается принцип работы нейронной сети.

3.3 Нейронная сеть Cubemos BodyTracker

Доступный алгоритм отслеживания положения человека в снимаемой сцене может быть реализован с помощью рекомендованной Intel нейронной сети Cubemos. Нейронная сеть – это математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, способное распознавать образы. Нейронная сеть является одним из методов компьютерного зрения.

Отслеживание ключевых точек происходит с помощью виртуальной модели «скелета» человека и ключевых узлов с использованием коммерчески

доступной системы отслеживания тела Cubemos. Данная нейронная сеть способна распознавать людей, а также сегментировать человеческий контур на составляющие (ноги, руки, плечи и другие) и 18 ключевых узлов, пронумерованных от нуля до семнадцати. Система отслеживания скелета осуществляется за счет использования RGB-изображения объекта, полученного цветной камерой оптического модуля. Данные о глубине используются для определения координат восемнадцати ключевых узлов в получаемой модели. На рисунке 10 представлена модель скелета и нумерация ключевых точек.

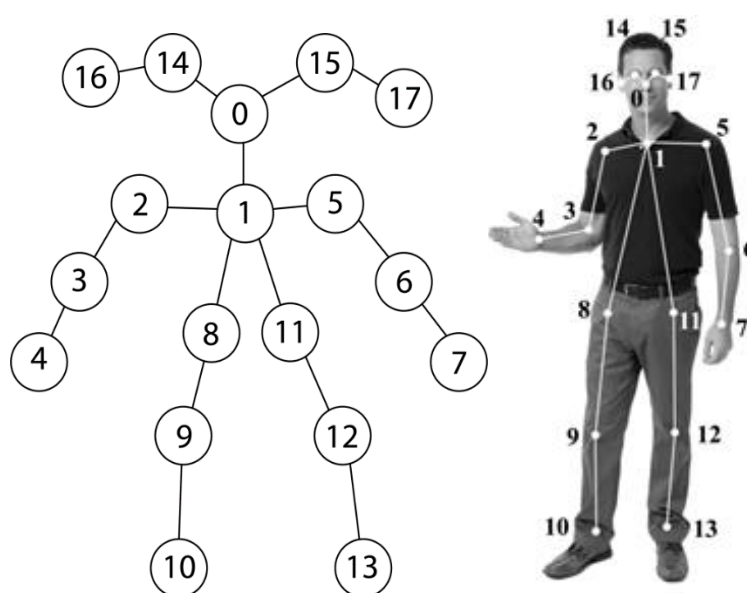


Рисунок 10 – Отображение ключевых точек частей тела

Цель заключается в получении и обработке информации о положении человека в снимаемой сцене. Эту информацию можно получить, используя оптический инфракрасный модуль Intel RealSense.

3.4 Программное обеспечение Intel: Cubemos Skeleton Tracking

Протестировано программное обеспечение Cubemos Skeleton Tracking, рекомендуемое Intel. Программа позволяет обнаружить положение человека и получить скелетную модель в режиме реального времени. На рисунке 11 представлен кадр видеопоследовательности, который получен используя

доступное готовое программное обеспечение Cubemos Skeleton Tracking и инфракрасный оптический модуль Intel RealSense.



Рисунок 11 – Изображение дополненной реальности, полученное программой Skeleton Tracking

На изображении выделены ключевые узлы, количество которых равно восемнадцати, и соединения между ними, образующие скелетную модель человека.

В процессе тестирования программного обеспечения была выявлена ошибка: нейронная сеть не определяла точное положение правой руки и принимала часть рубашки за конечность. Данная программа не дает возможности работать с данными о положении человека. С ее помощью можно только получить изображение дополненной реальности и вывести координаты положения ключевых точек на изображении. Получить аналогичное изображение и вывести данные возможно используя программный код.

3.5 Получение изображения дополненной реальности программным кодом

Отслеживание положения человека нейронной сетью осуществляется за счет использования RGB-изображения, в представленном случае кадра видеопоследовательности, и библиотеки компьютерного зрения. Данные о глубине используются для определения координат восемнадцати ключевых узлов в получаемой модели.

Доступ к информации о расположении ключевых точек предоставляется с помощью библиотек OpenCV, NumPy, pyrealsense и оптического модуля Intel RealSense D435i. В результате работы разработанной программы выведено изображение дополненной реальности и координаты соответствующих ключевых узлов. Блок схема программы представлена на рисунке 12.

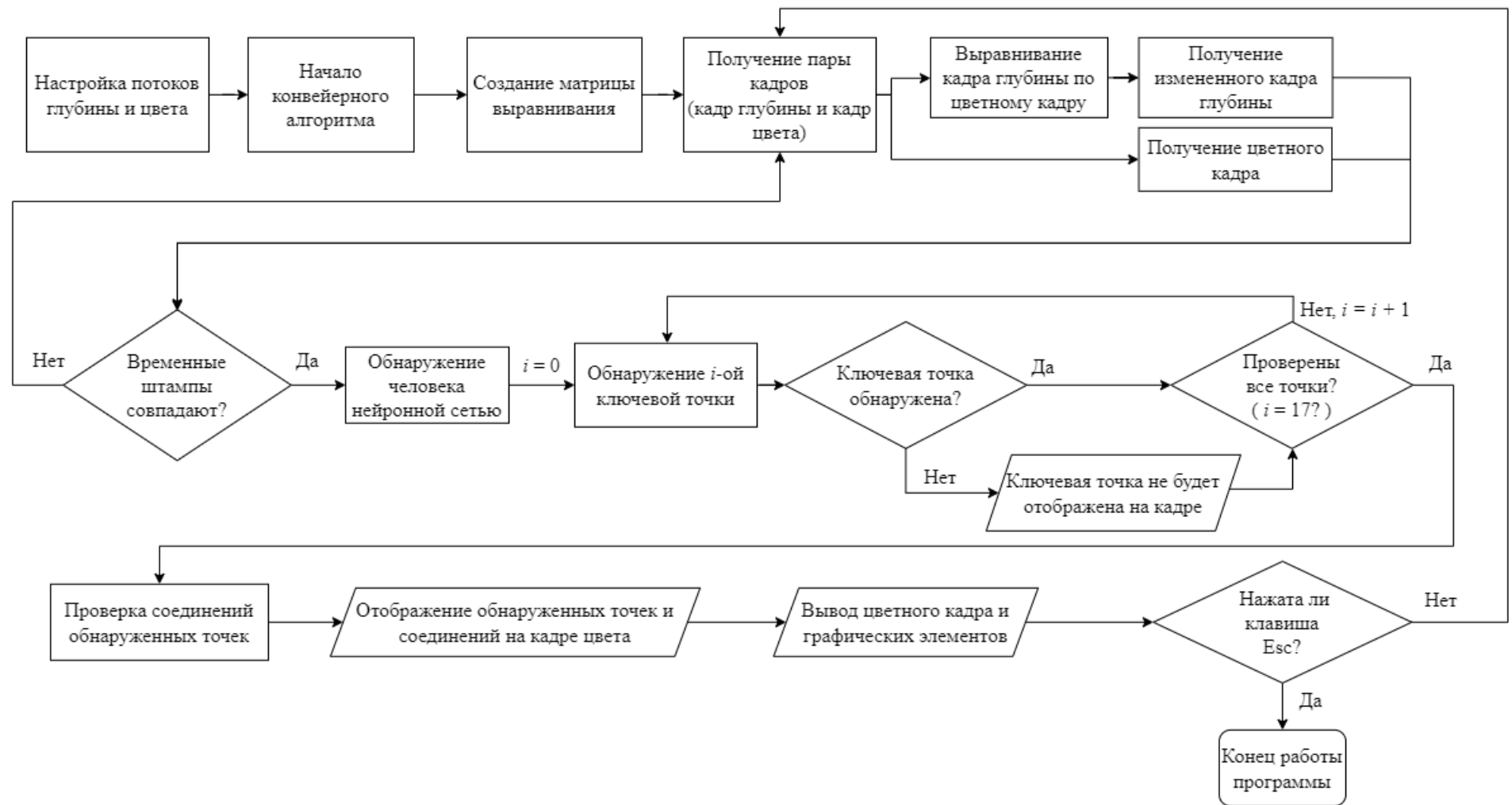


Рисунок 12 – Блок-схема работы программы

В первом блоке производится настройка потоков глубины и цвета оптического модуля. Задаются параметры изображений для двух потоков: разрешение 1280×720 пикселей, формат изображения глубины Z16, формат цветного изображения BGR8, количество кадров в секунду равно 30 для каждого потока. Затем начинается конвейерный алгоритм (несколько идущих друг за другом этапов, расположенных так, что конец предыдущего является началом следующего). Создается матрица выравнивания кадра глубины по цветному кадру. Кадры выравниваются в зависимости от базового расстояния (расстояние между двумя инфракрасными камерами) и модели оптического модуля. В результате полученный кадр глубины выравнивается по цветному кадру и представляется как элемент видеопотока.

В следующем блоке начинается цикл, в котором необходимо, чтобы временные штампы полученных кадров глубины и цвета совпадали (условие, что кадры получены одновременно). Алгоритм не продолжается пока не совпадут временные штампы.

Затем из полученного цветного кадра происходит обнаружение в нем человека и определяется его положение с помощью подключенной нейронной сети Cubemos. Проводится проверка каждой ключевой точки (в блок-схеме i – номер ключевого узла). Если ключевая точка не была обнаружена, то она не будет отображена на кадре. В следующем блоке проводится проверка соединений между двумя обнаруженными точками в соответствии со «скелетной» моделью. Соединение не будет отображено, если хотя бы одна ключевая точка не была определена.

На экране выводится окно с названием программы. Демонстрация полученных в результате работы кадров происходит в реальном времени с обновлением 30 кадров в секунду. Цикл не прекращается до прерывания.

Библиотека компьютерного зрения OpenCV позволяет вывести цветное изображение в видимом диапазоне и добавить в кадр видеопоследовательности на распознанного человека, графическую

скелетную модель. В случае если человек не был обнаружен демонстрируется изображение с RGB-камеры. Последовательность кадров создает видеоряд в реальном времени. Оптический модуль позволяет получить информацию о расположении каждой ключевой точки скелетной модели человека по полученной карте глубины. В результате выводятся координаты ключевых узлов, а на RGB-изображение накладывается «скелетная модель», состоящая из восемнадцати ключевых точек, их номеров и соответствующих соединений.

На рисунке 13 представлено изображение дополненной реальности кадр видеопоследовательности, полученное с помощью разработанной программы.



Рисунок 13 – Отображение ключевых точек скелета, наложенное на оптическое изображение отслеживаемого в реальном времени человека

В результате выполнения программы нейронная сеть по цветному кадру видеопоследовательности определяет, находится ли человек в исследуемой области. Если человек обнаружен, методами компьютерного зрения производится совмещение цветного изображения и карты глубины – каждый пиксель цветного изображения должен быть сопоставлен соответствующему пикселю изображения глубины. После сопоставления для каждого узла запрашивается информация о дальности. На цветное изображение

накладывается текст с номерами узлов и соответствующие этим номерам координаты. Нумерация ключевых узлов соответствует эталонной (рисунок 10). Положение конечностей отображается корректно. В процессе выполнения программы производится расчет длины конечностей на основе полученной информации. Антропометрические параметры, полученные с помощью программно-аппаратного комплекса и измеренные напрямую, для кадра видеопоследовательности представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета длины частей тела

Часть тела	Номера узловых точек	Расстояние между узловыми точками	
		Результат программы, см	Прямые измерения, см
От грудины до носа	0, 1	20	22
От грудины до правого плеча	1, 2	16	19
Правое плечо	2, 3	25	30
Правое предплечье	3, 4	22	22
От грудины до левого плеча	1, 5	18	19
Левое плечо	5, 6	26	30
Левое предплечье	6, 7	20	22
От грудины до правого бедра	1, 8	45	51
Правое бедро	8, 9	50	46
Правая голень	9, 10	46	41
От грудины до левого бедра	1, 11	50	51
Левое бедро	11, 12	49	46
Левая голень	12, 13	44	41
От носа до правого глаза	0, 14	4	7
От правого глаза до правого уха	14, 16	5	9
От носа до левого глаза	0, 15	3	7
От левого глаза до левого уха	15, 17	7	9

При сравнении антропометрических параметров, полученных программно-аппаратным комплексом и прямых измерений выявлено отклонение в пределах 6 см.

Было протестировано программное обеспечение Intel RealSense Viewer, с помощью которого возможно получить цветное изображение, изображение в инфракрасном диапазоне и синтезированную карту глубины. Так как Intel RealSense Viewer не позволяет работать с информацией о дальности расположения объекта, было разработано собственное программное решение, которое позволяет вывести данные о дальности объектов в снимаемой сцене.

Рассмотрен принцип работы нейронной сети Cubemos, протестирована программа Cubemos Skeleton Tracking, способная определять положение человека в пространстве и графически обозначать положения суставов скелета на кадрах видеопоследовательности. Для определения антропометрических параметров человека – длин конечностей, было разработано программное обеспечение. В программе используется нейронная сеть Cubemos, которая способна обнаружить человека в кадре видеопоследовательности в реальном времени и создать скелетную модель. Для каждого сустава скелета определяется его положение в пространстве на основе карты глубины, данные для построения которой получены оптическим модулем. На основе информации о дальности и номеров соответствующих суставов программа производит расчет расстояния между узловыми точками и выводит длину конечности. Отличие результатов прямых измерений и полученных программно-аппаратным комплексом составляют до шести сантиметров.

В следующей главе рассматривается задача радиотомографии и методы ее решения для распознавания скрытых за радиопрозрачной преградой объектов. Задачу радиотомографии необходимо применить к разработанной системе активной лучевой локации для сканирования обнаруженного человека с целью поиска скрытых опасных предметов.

4 Методы получения радиоизображений

Помимо оптических изображений существуют радиоизображения. Восстановленное радиоизображение – это представление распределения объектов в исследуемой области в виде изображения по данным зондирования. В данной главе рассматриваются методы восстановления радиоизображений, которые часто используются на кафедре радиофизики: метод Столта и метод дифракционного суммирования. Обработка данных измерений необходима при восстановлении радиоизображений скрытых неоднородностей. Выбор метода, которым будет проводиться обработка данных, зависит от используемых сигналов и способа проведения измерений. В данном разделе рассмотрены некоторые методы обработки, которыми возможно решить задачу томографии и восстановить радиоизображение неоднородностей, скрытых за радиопрозрачной преградой.

4.1 Метод Столта

При решении задачи томографии можно воспользоваться методом миграционного преобразования Столта. Этот метод был разработан для решения обратных задач сейсмологии, но также применяется при решении задач радиотомографии, так как является самым быстродействующим.

В методе Столта неоднородности являются источниками сигнала на удвоенной частоте. Такое условие справедливо, потому что волна, которая распространяется от излучателя до неоднородности, пройдет тот же путь, что и волна, распространяющаяся от неоднородности до приемника. Обе эти волны приобретают одинаковый фазовый набег, принятый после отражения от неоднородности сигнал суммарно приобретет двойной фазовый набег. Такой же набег фаз приобретает сигнал на удвоенной частоте, прошедший в одну сторону от неоднородности до приемника.

Амплитудно-фазовое распределение поля – $S(x,y,\omega)$, где (x,y) координаты на плоскости, ω – частота сигнала. Переход из пространственной области в область пространственных частот. Спектр пространственных частот измеренного поля представлен в виде:

$$\tilde{S}(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y, \omega) e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy. \quad (2)$$

Восстановленный спектр пространственных частот распределения неоднородностей:

$$\tilde{P}(k_x, k_y, k_z) = \tilde{S}\left(k_x, k_y, \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}\right), \quad (3)$$

где $\frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}}{2}$ – волновое число, так как неоднородности являются источниками сигнала на удвоенной частоте необходимо деление на два.

Для получения восстановленного радиоизображения необходимо применить трехмерное обратное преобразование Фурье:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}(k_x, k_y, k_z) e^{ik_x x + ik_y y + ik_z z} dk_x dk_y dk_z. \quad (4)$$

Метод Столта основан на операции преобразования Фурье, что позволяет быстро восстанавливать изображения. Метод не лишен недостатков, в методе Столта необходимо чтобы измерения были моностатическими, а сканирование проводилось только вдоль плоской поверхности. Далее представлен метод дифракционного суммирования во временной области, который является более универсальным при обработке данных.

4.2 Метод дифракционного суммирования

При решении задачи томографии можно воспользоваться методом дифракционного суммирования во временной области. Основная идея заключается в том, чтобы суммировать отраженные сигналы приемо-

передатчиков в заданной точке фокуса исследуемой области. Использование фокусировки уменьшает влияние многократных взаимодействий и дифракционных эффектов. Распределения неоднородностей в исследуемой области возможно получить сканированием точкой фокусировки этой области. График дифракционных гипербол представляет из себя зависимость задержки по времени от координаты, одна дифракционная гипербола является проекцией одной неоднородности. Для определения местоположения неоднородности, необходимо определить разницу в задержках сигналов, принимаемых в точках фокусировки.

Координаты положения излучающих антенн записаны как $\vec{T}_m$, приемных антенн – $\vec{R}_m$, m – номер положения антенны. Распределение неоднородностей записано как $\rho(\vec{r})$, излученный сигнал – $s(t)$. В приближении однократного рассеяния измеренный сигнал в точке исследуемой среды $\vec{r}$ запишется как:

$$E_m(t) = \iiint_V \rho(\vec{r}) \frac{s\left(t - \frac{|\vec{T}_m - \vec{r}| + |\vec{r} - \vec{R}_m|}{c}\right)}{|\vec{T}_m - \vec{r}| |\vec{r} - \vec{R}_m|} d\vec{r}, \quad (5)$$

где c – скорость света в среде. Далее изображение будет нормировано, поэтому в выражении не учитываются постоянные множители.

Восстановленное изображение является решением обратной задачи метода дифракционного суммирования. Для распределения неоднородностей $\rho(\vec{r})$ решение запишется как

$$U_m(\vec{r}) = \sum_m E_m \left(\frac{|\vec{T}_m - \vec{r}| + |\vec{r} - \vec{R}_m|}{c} \right). \quad (6)$$

Для получения функции $U_m(\vec{r})$ выполняется большой объем вычислений, что требует значительных временных затрат для восстановления радиоизображения.

Рассмотрены два преимущественно используемых метода восстановления радиоизображений: метод Столта и метод дифракционного суммирования.

Преимущество метода Столта заключается в высокой скорости вычислений при исследовании большой области в отличие от метода дифракционного суммирования. Метод дифракционного суммирования является более универсальным: возможно разместить приемо-передающие антенны произвольно и использовать любую траекторию сканирования. В результате сопоставления достоинств и недостатков этих методов для данной работы был выбран метод дифракционного суммирования.

5 Моделирование задачи томографии и разработка программного обеспечения

Термин «томография» означает послойное исследование структуры объекта. Решение задачи радиотомографии необходимо для определения пространственного распределения неоднородностей в исследуемой области. В данной работе проведено моделирование прямой и обратной задачи томографии, разработано программное обеспечение для получения восстановленного радиоизображения расположения неоднородностей, добавлена возможность внесения случайной ошибки в расположение приемопередатчиков и вывод графика среза радиоизображения для определения разрешающей способности системы. Моделирование задачи томографии необходимо для определения оптимальных условий, таких как расположение приемопередающих антенн, определение их минимального количества, достаточного для решения задачи, оценка влияния случайных ошибок на результат восстановления радиоизображения.

5.1 Моделирование в Mathcad

Для решения задачи томографии был выбран метод суммирования дифракционных гипербол, или же метод миграции во временной области. Метод дифракционного суммирования позволяет разместить приемопередающие антенны произвольно и использовать любую траекторию сканирования. Ниже описанное моделирование показало, что восстановление изображения возможно при внесении ошибки позиционирования приемопередатчиков порядка длины волны.

На первом этапе было проведено моделирование задачи восстановления радиоизображения используя систему для численного моделирования Mathcad. В численной модели все приемопередатчики излучают импульсный

сигнал, который, отражаясь от неоднородности, является первой производной гауссоиды $s(t)$. Гауссоида задана функцией (7).

$$s(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\right), \quad (7)$$

где t – момент времени, t_0 – длительность импульса.

Принимаемый импульс описан функцией (8):

$$s1(t) = \frac{-2 \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\right)}{t_0^2}. \quad (8)$$

Дальнейшее моделирование приведено для длительность импульса 0,2 нс. Форма излученного модельного импульса представлена на рисунке 14.

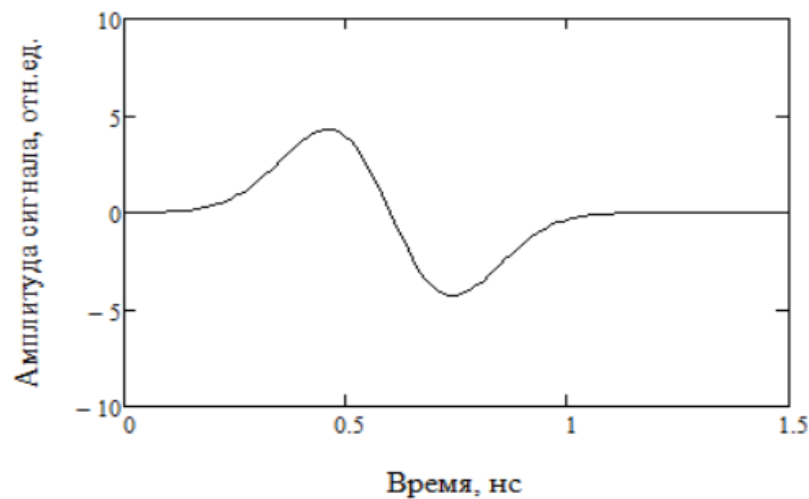


Рисунок 14 – Форма излученного импульса

Решение обратной задачи – это нахождение распределения неоднородностей в исследуемом пространстве. Нормированное распределение неоднородностей называется восстановленным радиоизображением. Для построения радиоизображения необходимо провести фокусировку в точках исследуемого пространства. Излученный сигнал дважды проходит расстояние от точки фокусировки до приемопередающей антенны. Если поделить расстояние, которое сигнал прошел от антенны до исследуемой точки и обратно, на скорость сигнала, то получим

задержку сигнала – промежуток времени от излучения до приёма отражённого сигнала.

Каждый приемо-передатчик линейной антенной решетки примет отраженный сигнал с соответствующим временем задержки. Зависимость положения приемо-передатчика от времени задержки представляет собой график дифракционной гиперболы. Суть метода дифракционного суммирования заключается в представлении, что каждая наблюдаемая гипербола является проекцией одной точечной неоднородности и все значения сигналов на соответствующей гиперболе нужно просуммировать с учетом вышеупомянутых временных задержек.

Получившаяся сумма должна быть сопоставима с выбранной точкой. При совпадении выбранной точки фокусировки и истинного положения неоднородности результат даст достаточно большое значение сигнала. Для получения картины распределения неоднородностей необходимо провести сканирование точкой фокусировки всего исследуемого пространства.

5.2 Создание программного обеспечения

Используя высокоуровневый язык программирования Python, была разработана программа для решения задачи томографии в двумерном пространстве для статичных точечных неоднородностей методом суммирования дифракционных гипербол. Создание программного обеспечения необходимо для моделирования задачи при различных условиях: различном количестве приемо-передатчиков, длительности импульса, размерах исследуемой области. Блок-схема работы программы представлена на рисунке 15.

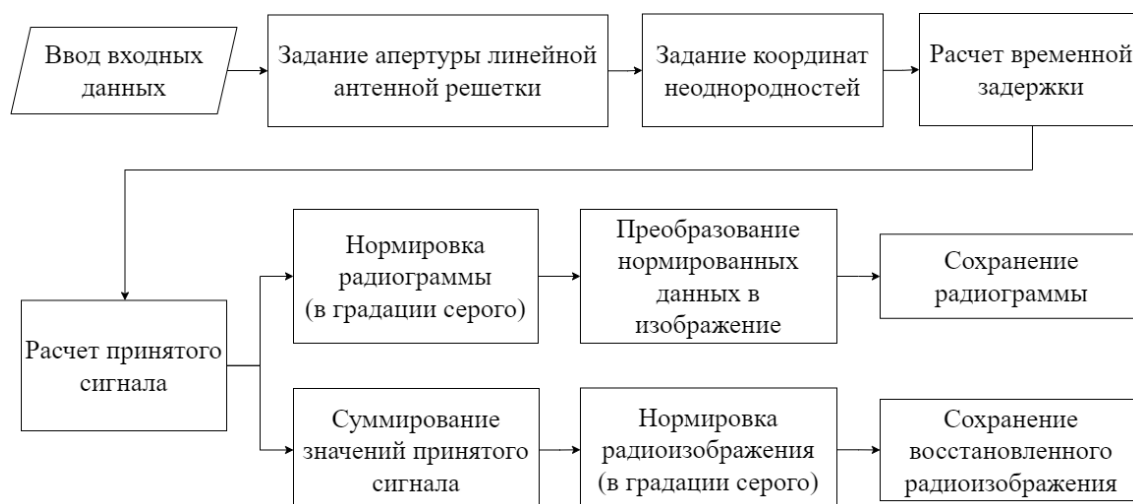


Рисунок 15 – Блок-схема программы для решения томографической задачи

В блоке входных данных указывается количество приемо-передающих антенн и длительность импульса. Приемо-передатчики расположены вдоль оси абсцисс, центр системы приемо-передатчиков находится в начале координат. В следующем блоке задается апертура линейной антенной решетки, размеры которой по оси абсцисс 128 см. Далее необходимо задать координаты точечных неоднородностей. Время, за которое сигнал отразится от неоднородности и его примет приемо-передатчик, рассчитывается в блоке «Расчет временной задержки». Для нахождения значения временной задержки необходимо расстояние, которое проходит излученный приемо-передатчиком сигнал до неоднородности и обратно, разделить на скорость сигнала.

В следующем блоке рассчитывается принятый сигнал, учитывая временную задержку. Полученные в этом блоке значения нормируются от 0 – черный цвет, до 255 – белый цвет, каждый пиксель кодируется одним байтом, всего 256 градаций серого, и преобразуются в изображение. Это изображение является картиной дифракционных гипербол. Восстановленное изображение сохраняется на жесткий диск компьютера.

Чтобы получить изображение распределения неоднородностей, необходимо просуммировать принятый сигнал согласно формуле (6) (блок

«суммирование значений принятого сигнала» нижняя ветвь блок-схемы), аналогично верхней ветке блок-схемы нормировать и сохранить.

На рисунке 16 представлен результат работы программы для двух заданных неоднородностей при количестве приемо-передатчиков равном 128. Оси были градуированы. На диск сохраняются два изображения: нормированная картина дифракционных гипербол (рисунок 16, а) и нормированное восстановленное радиоизображение (рисунок 16, б).

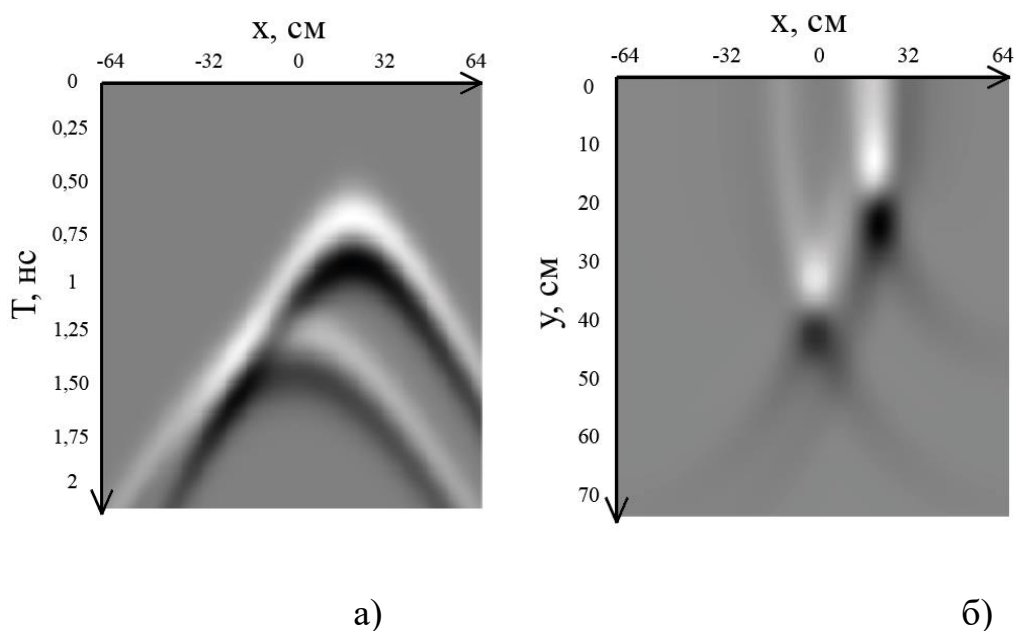


Рисунок 16 – Дифракционные гиперболы а) и радиоизображение б) при количестве приемо-передатчиков равном 128, длительность импульса 0,2 нс

На картине дифракционных гипербол ось абсцисс – координата, ось ординат – временная задержка отраженного сигнала. По оси абсцисс восстановленного радиоизображения откладывается координата, по оси ординат – дальность или глубина.

5.3 Моделирование сложного распределения неоднородностей

Далее рассмотрено моделирование сложного распределения неоднородностей. Размеры апертуры линейной антенной решетки по оси абсцисс 128 см, максимальная глубина (y) неоднородности представлена по

оси ординат и составляет 140 см, длительность импульса 0,2 нс. Приемо-передатчики расположены вдоль оси абсцисс (x), центр системы приемо-передатчиков находится в начале координат. В таблице 4 представлены координаты неоднородностей.

Таблица 4– Координаты сложного распределения неоднородностей

X, см	-25	0	20	-25	0	20	-25	0	20	-25	0	20	-25	0	20
Y, см	40	40	40	60	60	60	80	80	80	100	100	100	130	130	130

Распределение пятнадцати заданных положений неоднородностей на координатной сетке и положение приемопередающих антенн представлено на рисунке 17.

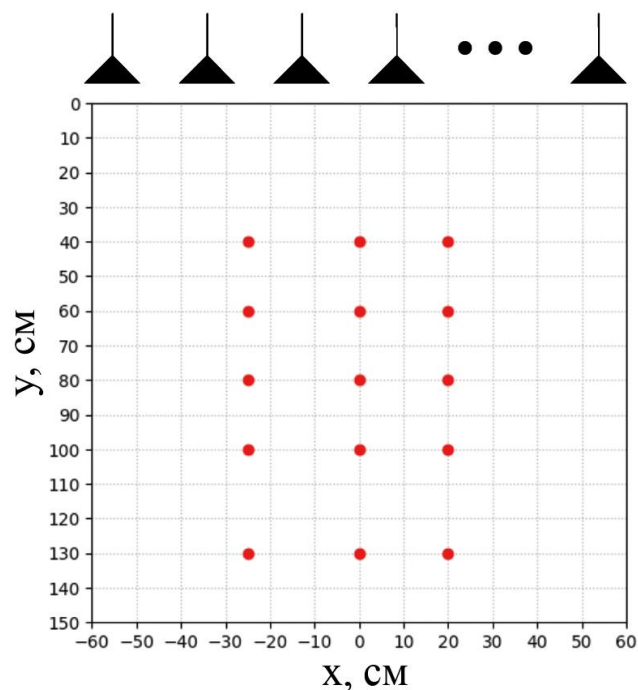


Рисунок 17 – Распределение неоднородностей и положение приемо-передатчиков

Далее были получены восстановленные изображения сложного распределения неоднородностей. Задано количество приемо-передатчиков равное 16, расстояние между которыми 8 см и 32 приемо-передатчика с интервалом 4 см. На рисунке 18 представлено восстановленное

радиоизображение при количестве приемо-передатчиков равном 16 (а) и 32 (б). По оси абсцисс восстановленного радиоизображения расположена координата (x), по оси ординат – глубина расположения неоднородности (y).

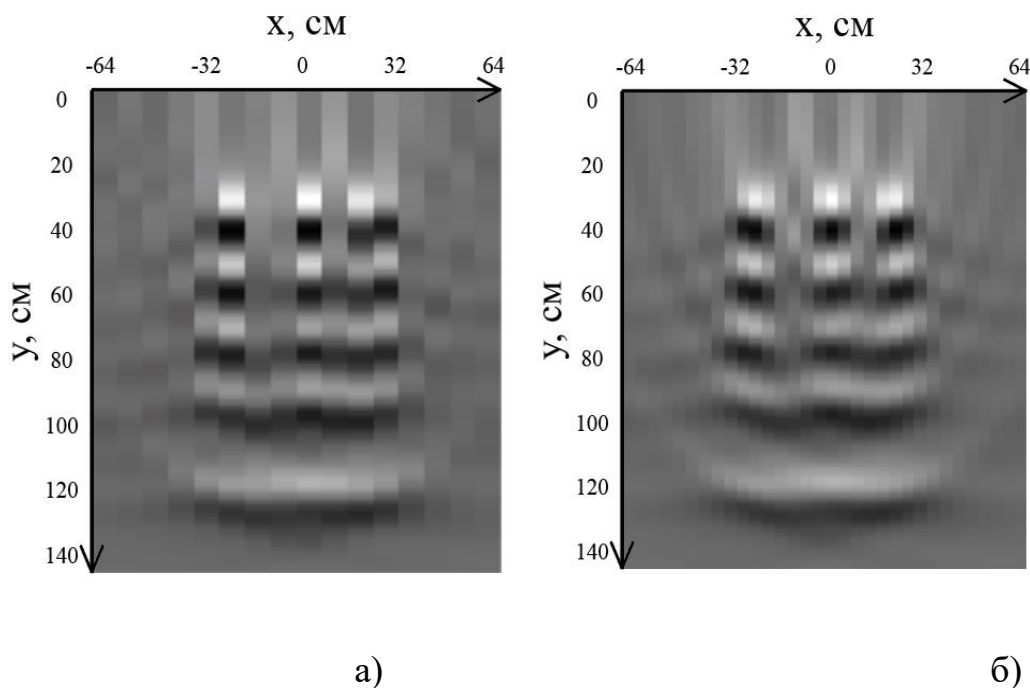


Рисунок 18 – Восстановленное радиоизображение при количестве приемо-передатчиков равном 16 (а) и 32 (б)

В ситуации, когда количество приемо-передатчиков равно 16 возможно различить лишь неоднородности, расположенные на глубине не больше 40 см, допустимое расстояние между двумя неоднородностями, находящимися на одинаковой дальности, равно 25 см. При увеличении количества приемо-передатчиков до 32 радиоизображение восстанавливается более точно, возможно различить соседние неоднородности на глубине до 80 см. Расположенные дальше 80 см по глубине неоднородности сливаются в полосу, при том, что поперечное расстояние между ними такое же, как и на глубине выше 80 см.

Большее количество приемо-передатчиков приводит к большему количеству излученных сигналов. Значения этих сигналов для соответствующей гиперболы суммируются, с учетом временного

запаздывания. При увеличении количества приемо-передатчиков повышается разрешающая способность. На рисунке 19 представлены восстановленные радиоизображения при количестве приемо-передатчиков равном 64 (20а) и 128 (20б). Расстояние между приемо-передатчиками в этом случае составляет 2 см и 1 см соответственно.

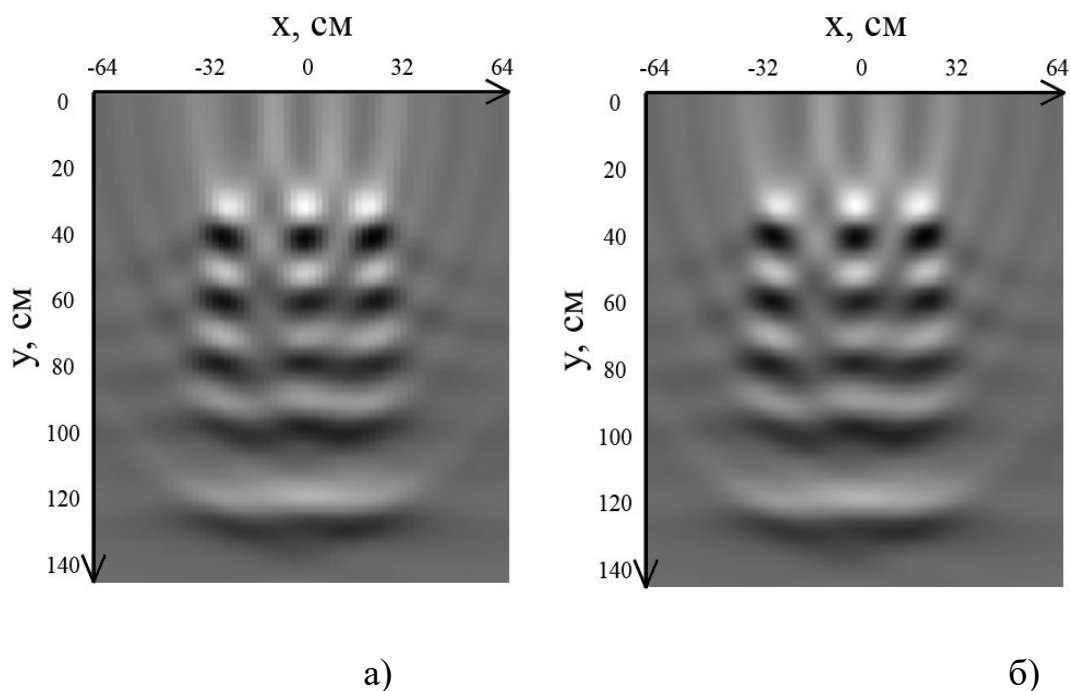


Рисунок 19 – Восстановленное радиоизображение при количестве приемо-передатчиков равном 64 (а) и 128 (б)

Неоднородности различимы как в случае, когда количество приемо-передатчиков составляет 32. Расположенные дальше 80 см по глубине неоднородности сливаются в полосу. Чем дальше расположены неоднородности, тем больше разрешающая способность. Сравнение разрешающей способности можно увидеть на рисунке 20. Количество приемо-передающих антенн равно 128, заданы две неоднородности расположены на поперечном расстоянии 20 см друг от друга на глубине 20 см и 130 см. Оси градуированы с использованием дополнительного графического редактора для демонстрации размеров исследуемой области.

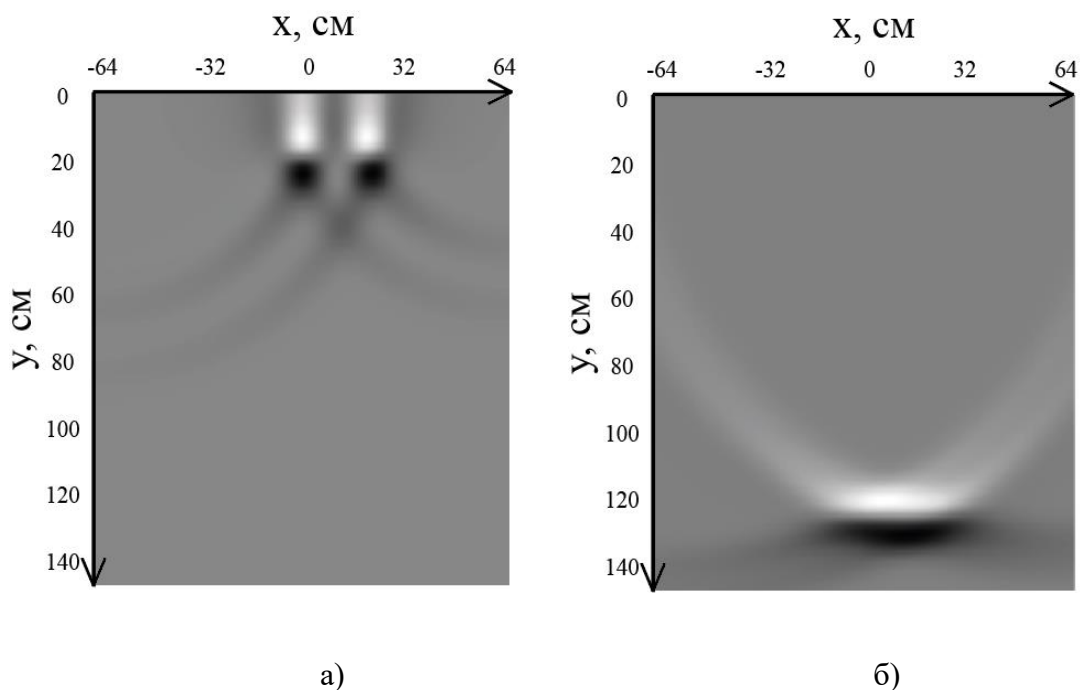


Рисунок 20 – Восстановленное радиоизображение на глубине от приемо-передающих антенн 20 см (а) и 130 см (б)

Как показало численное моделирование, разрешающая способность радиоизображения повышалась с увеличением количества приемо-передатчиков. Соседние неоднородности как отдельные объекты распознаются хуже при увеличении расстояния от неоднородностей до приемо-передатчиков. Можно считать оптимальным количество приемо-передатчиков равное 64, при этом они расположены на расстоянии друг от друга 2 см, так как при увеличении их количества качество восстановления радиоизображения не повышается.

5.4 Добавление случайной ошибки в данные позиционирования

В реальных условиях при исследовании пространства невозможно исключить наличие помех и их влияние на результат решения задачи томографии. Внесение шумов необходимо для определения оптимальных условий, при которых созданная система томографии будет работать корректно.

В разработанную программу была добавлена возможность внесения случайной ошибки в данные позиционирования приемо-передатчиков. Размеры апертуры линейной антенной решетки составляют по оси абсцисс (x) 128 см, максимальная глубина расположения неоднородности представлена по оси ординат (y) и равна 150 см. Шестьдесят четыре приемо-передатчика расположены вдоль оси абсцисс с шагом 2 см, центр системы приемо-передатчиков находится в начале координат. К заданному положению приемо-передатчиков было добавлено случайно сгенерированное число из определенного диапазона таким образом, что каждый приемо-передатчик смещался по оси абсцисс на это число. В разработанную программу добавлена возможность внесения случайной ошибки с помощью генератора случайных чисел. Это позволяет моделировать ситуацию, когда системы зондирования находится не в статичном положении.

На рисунке 21 представлен результат выполнения работы программы для двух точечных неоднородностей – восстановленное радиоизображение с внесенной ошибкой (22а) и результат без внесенного шума (22б). Неоднородности расположены на расстоянии 80 см от центра системы приемо-передатчиков, расстояние между ними 20 см. Каждый приемо-передатчик был смещен по оси абсцисс на некоторую случайную величину в диапазоне ξ . На рисунке 21 (б) представлено восстановленное радиоизображение при заданном диапазоне значений ξ от -1 до 1 см. Из заданного диапазона случайным образом генерировалось значение ошибки для каждого приемо-передатчика – величина смещения в линейной антенной решетке.

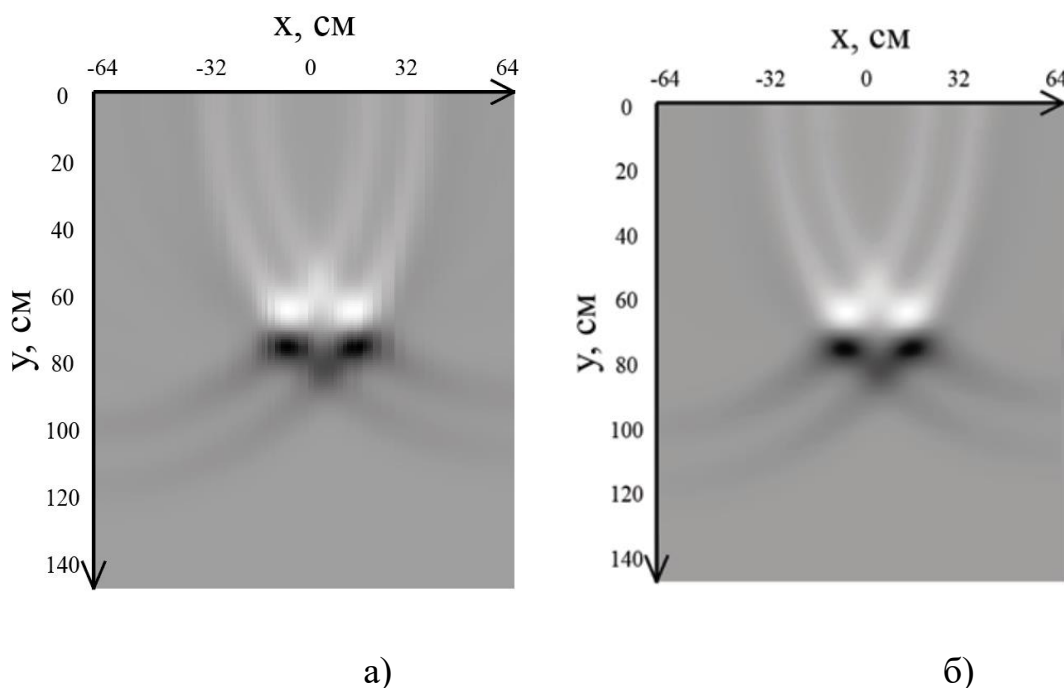


Рисунок 21 – Восстановленное радиоизображение с внесенной ошибкой: а) диапазон случайной ошибки от -1 до 1 см, б) без внесения случайной ошибки

Из представленных на рисунке 21 восстановленных радиоизображений видно, что диапазон случайной ошибки $[-1, 1]$ см практически не влияет на результат радиотомографии, точечные неоднородности различимы. При этом на изображении появляются незначительно влияющие артефакты.

На рисунке 22 представлено восстановленное радиоизображение, диапазон случайной ошибки ξ составляет $[-3, 3]$ см.

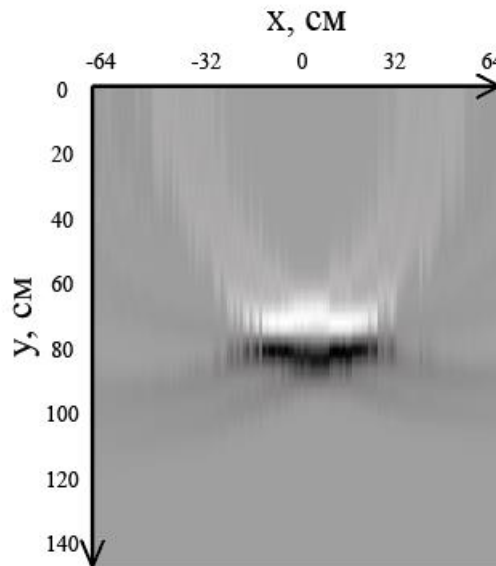


Рисунок 22 – Восстановленное радиоизображение с внесенной ошибкой от -3 до 3 см

При внесении ошибки в расположение приемо-передатчиков в пределах трех сантиметров распознать две неоднородности по восстановленному изображению становится затруднительно, также на изображении значительно увеличивается количество артефактов.

Для определения разрешающей способности в программу добавлена функция вывода графика среза восстановленного изображения. Разрешающая способность определяется критерием Рэля. Два ближайших одинаковых точечных источника различимы в том случае, если на срезе изображения уровень «провала» между максимумами ниже 70% максимального значения сигнала. На рисунке 23 представлены продольные срезы представленных ранее восстановленных радиоизображений при различном диапазоне случайной ошибки.

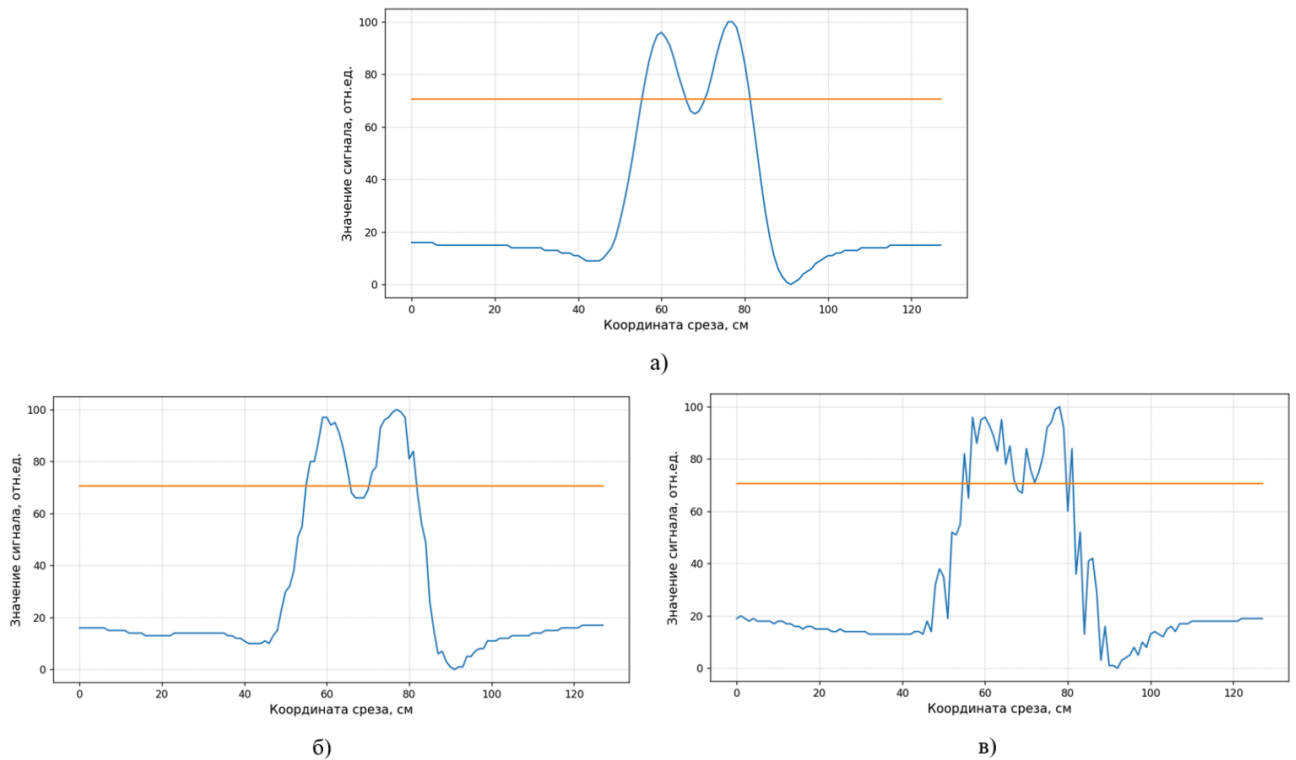


Рисунок 23 – Продольный срез восстановленного изображения а) без внесенной ошибки, б) с внесенной ошибкой от -1 до 1 см, в) с внесенной ошибкой от -3 до 3 см

По полученным срезам восстановленных изображений можно определить, является ли разрешающая способность достаточной для определения двух неоднородностей как отдельных объектов. При добавлении случайной ошибки в диапазоне от $[-1, 1]$ см две неоднородности явно различимы. При генерировании случайной ошибки в диапазоне $[-3, 3]$ см минимальное значение сигнала между двумя максимумами располагается на уровне выше 70% максимума сигнала, разрешающая способность в этом случае недостаточная для определения неоднородностей как отдельно расположенных объектов.

Было проведено моделирование задачи томографии, для решения использовался метод дифракционного суммирования. Создано программное обеспечение на языке программирования Python для решения задачи томографии в двумерном пространстве. Проведено моделирование сложного

распределения пятнадцати неоднородностей, в результате которого выявлено оптимальное количество приемо-передатчиков, равное 64 при заданной длительности импульса 0,2 нс. В разработанную программу добавлена возможность внесения случайной ошибки в положение приемо-передатчиков для определения оптимальных условий, при которых созданная система будет работать корректно. Построены срезы восстановленных изображений, позволяющие определить разрешающую способность в зависимости от заданно уровня случайной ошибки при определении положения объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен обзор оптических модулей Microsoft Kinect и Intel RealSense. По результатам тестирования и поиска необходимых для работы наборов программного обеспечения для оптических модулей, был выбран Intel RealSense. С использованием выбранного модуля были получены изображения в видимом диапазоне, инфракрасном диапазоне и синтезированная карта глубины. Эти изображения были получены готовой средой Intel RealSense Viewer, а затем с помощью разработанного программного обеспечения и подключенных библиотек компьютерного зрения OpenCV, так как готовая среда Intel позволяет получать только изображения и не позволяет работать с информацией о дальности объектов в исследуемой сцене.

Была подключена нейронная сеть, способная распознавать и сегментировать человеческий контур на составляющие: 18 ключевых узлов и соединения между ними, образующих «скелет» человека. Захват человека в кадре проводился двумя способами: готовым программным обеспечением Skeleton Tracking, которое не позволяет работать с данными о расположении человека в пространстве, и разработанной программой. Разработанная программа позволяет получить изображение дополненной реальности (RGB-изображение и наложенная скелетная модель на человека в снимаемой сцене), обновляя данные в реальном времени 30 раз в секунду, а также выводить координаты ключевых узлов и на их основе рассчитывать длину конечностей снимаемого человека.

Программа для захвата движения человека позволяет определить область пространства, в которой в дальнейшем необходимо провести сканирование для обнаружения скрытых опасных предметов. В данной работе была численно решена задача томографии методом суммирования дифракционных гипербола для точечного неподвижного рассеивателя в двумерном пространстве, проведено моделирование в среде Mathcad и создано

программное обеспечение на языке программирования Python, с помощью которого возможно выводить восстановленное изображение и вносить случайную ошибку в данные позиционирования приемопередатчиков. Моделирование проводилось для статичной единичной неоднородности при 128 приемопередатчиков, а также для сложного распределения 15 неоднородностей при 16, 32, 64 и 128 приемопередатчиков. В результате были получены радиограммы – восстановленные радиоизображения распределения неоднородностей. Оценено количество приемопередатчиков, необходимое для получения достаточной разрешающей способности радиоизображения при длительности импульса 0,2 нс – 64 приемопередатчика, расположенных на расстоянии 2 см, получены срезы радиоизображения для определения разрешающей способности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новак Д. Цифровые изображения и их виды. // «Медиаскоп. Электронный научный журнал Факультета журналистики МГУ имени М.В. Ломоносова». 2006. № 1. — [Электронный ресурс] — URL: <http://www.mediascope.ru/цифровые-изображения-и-их-виды>.
2. Huang T. Computer Vision: Evolution and Promise // 19th CERN School of Computing / Ed. by C. E. Vandoni. Geneva, CERN. 1996-11-19.
3. Petrenko V.I. et al. Anthropomorphic manipulator master-slave teleoperation using 3D depth sensor and color camera // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. / Tebueva F.B, Gurchinskiy M.M., Svistunov N.Yu., Nestulya A.K. – IOP Publishing, 2020
4. Камеры глубины. Опыт сканирования помещений. [Электронный ресурс] / Medium – URL: <https://medium.com/phygitalism/rgb-d-sensors-room-scan-c0c70fbe1946>
5. Microsoft Kinect for Xbox 360. [Электронный ресурс] / Microsoft – URL: <http://www.xbox.com/en-US/kinect>
6. Payandeh S., Wael J. Experimental Study of a Deep-Learning RGB-D Tracker for Virtual Remote Human Model Reconstruction // International Journal of Telemedicine and Applications. 2021 — [Электронный ресурс] — URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijta/2021/5551753/>
7. Intel Corporation. Intel® RealSense Product Family D400 Series: Datasheet. – 2020.
8. Шипилов С.Э. Обратные задачи радиофизики / С. Э. Шипилов, В. П. Якубов. – Томск : Изд-во НТЛ, 2016. – 162 с.

9. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая Томография: Достижения и Перспективы / под общ. ред. В. П. Якубова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 264 с.

10. 11. Yilmaz Oz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. V. I. / Editor Doherty Stephen M. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2001. P. 2027.

11. Якубов В. П. Радиотомография по сверхширокополосным моностатическим измерениям на неплоской поверхности / В. П. Якубов, Д. Я. Суханов, А. В. Клоков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 9. С. 72-79.

СПРАВКА

Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

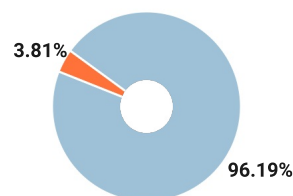
ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Колоскова Мария Евгеньевна
Самоцитирование
рассчитано для: Колоскова Мария Евгеньевна
Название работы: Колоскова_ВКР
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение:

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ 3.81%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ 96.19%
ЦИТИРОВАНИЯ 0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ 0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 11.06.2023



Структура документа:

Проверенные разделы: основная часть с.2-4, 6-56

Модули поиска:

ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Лапутенко Андрей Владимирович

ФИО проверяющего

Дата подписи: 11-06-2023



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.