

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ

Проектирование и реализация твердотельного датчика обнаружения препятствий повышенной надежности на базе TOF-сенсоров

Выполнил студент группы ПС-21:

Крылов И. М.

Кафедра:

Информационных технологий

Научный руководитель:

Патрушев Е. М.

доцент, кандидат технических наук

Барнаул, 2026

Актуальность исследования

Для безопасного движения современных автономных робототехнических систем необходим непрерывный круговой обзор: возникновение «слепых» зон или кратковременная потеря объектов из вида неизбежно грозят авариями.

В то же время, длительная эксплуатация оборудования предъявляет жесткие требования к его механической надёжности. Любые подвижные элементы со временем изнашиваются и становятся главным источником отказов при вибрациях.

Данная проблема наиболее критична в условиях замкнутых пространств и интерьеров, где активно применяются малые наземные роботы, мобильные робототехнические платформы и малые БАС. В этих сценариях техника маневрирует на ближних дистанциях в окружении статичных и динамических препятствий.

Поэтому актуальностью данной работы является создание датчика обнаружения препятствий, с широким полем обзора и твердотельной конструкцией. Такой подход позволяет объединить высокую надёжность с полнотой охвата, необходимой для безопасной автономной навигации.

Цель и задачи работы

- 🎯 **Цель работы:** Разработать датчик обнаружения препятствий для БАС, обеспечивающий круговой обзор без использования движущихся элементов, а также реализовать его программно-аппаратный прототип.
- ✓ **Аналитический обзор:** Выполнить обзор существующих устройств обнаружения препятствий для БАС.
- ✓ **Проектирование:** Разработать структурную и принципиальную схемы устройства.
- ✓ **Алгоритмизация:** Разработать программную часть устройства для микроконтроллера.
- ✓ **3D-моделирование:** Разработать 3D-модель корпуса устройства для позиционирования ToF-матриц.
- ✓ **Эксперимент:** Реализовать прототип устройства и провести лабораторный эксперимент для оценки погрешности.

Сравнительный анализ аналогов

Таблица 1 – Сравнительный анализ с разрабатываемым устройством

Характеристика	Livox Mid-360	Unitree L2	RoboSense RS-16	TeraRanger Tower Evo	Разрабатываемый прибор
Движущиеся части	Да	Да	Да	Нет	Нет (Твердотельный)
Азимутальный обзор	360°	360°	360°	Дискретный (4/8 лучей)	360° (Сплошной)
Вертикальный обзор	±29.5°	±48°	±15°	±0°	±22.5°
Дальность	70 м	30 м	150 м	60 м	до 4 м
Масса / Габариты	265 г / 65×65×60мм	230 г / 75×75×65мм	870 г / Ø109×81мм	135 г / Ø120×42мм	~35 г / Ø40×38мм

Структурная схема датчика

Архитектура аппаратной части

Прибор построен на базе распределенной сенсорной матрицы, что обеспечивает высокую масштабируемость системы:

-  **Микроконтроллер STM32:** Центральный вычислительный блок для опроса датчиков и вывода данных.
-  **Сенсоры VL53L5CX:** 8 независимых времяпролетныхToF-модулей, формирующих матрицы расстояний.
-  **Шина I²C:** Общий высокоскоростной протокол обмена информацией.

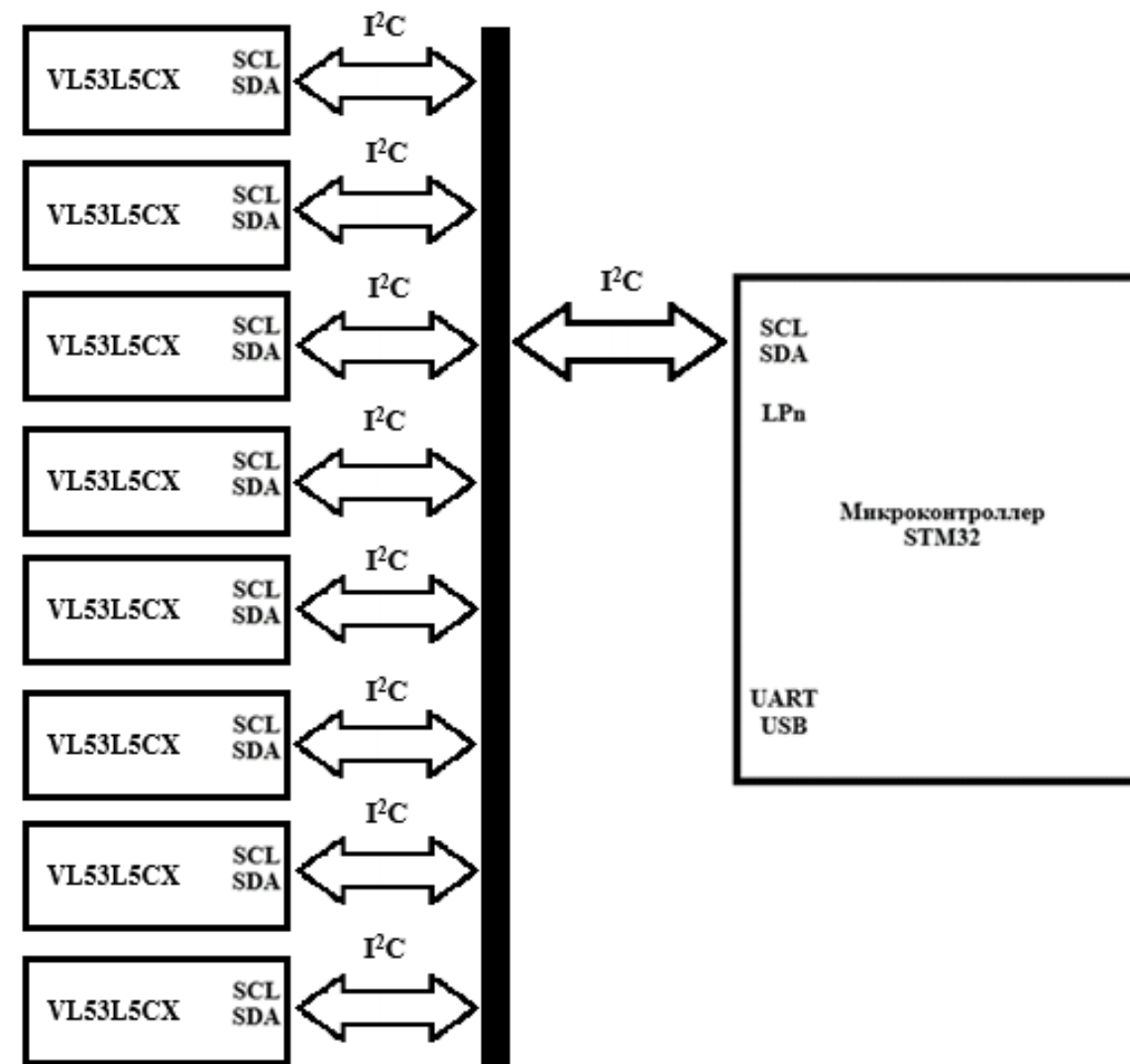


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

Принципиальная схема прибора

Схемотехническое решение

⚡ **STM32G474CEU6:** Выбор микроконтроллера STM32G474CEU6 обусловлен наличием 128 Кбайт ОЗУ и 512 Кбайт ПЗУ. Дополнительным определяющим фактором стало то, что микроконтроллер и используемые датчики VL53L5CX выпускаются одним производителем, что гарантирует полную совместимость и позволяет использовать официальную оптимизированную библиотеку.

🔵 **Линии сброса LPn:** Подключение каждого вывода LPn к индивидуальным пинам МК позволяет поочередно инициализировать каждый датчик.

⚡ **Доступны 2 режима работыToF-датчика:**

1. Матрица 8 x 8 точек при частоте опроса 15 Гц
2. Матрица 4 x 4 точки при частоте опроса 60 Гц

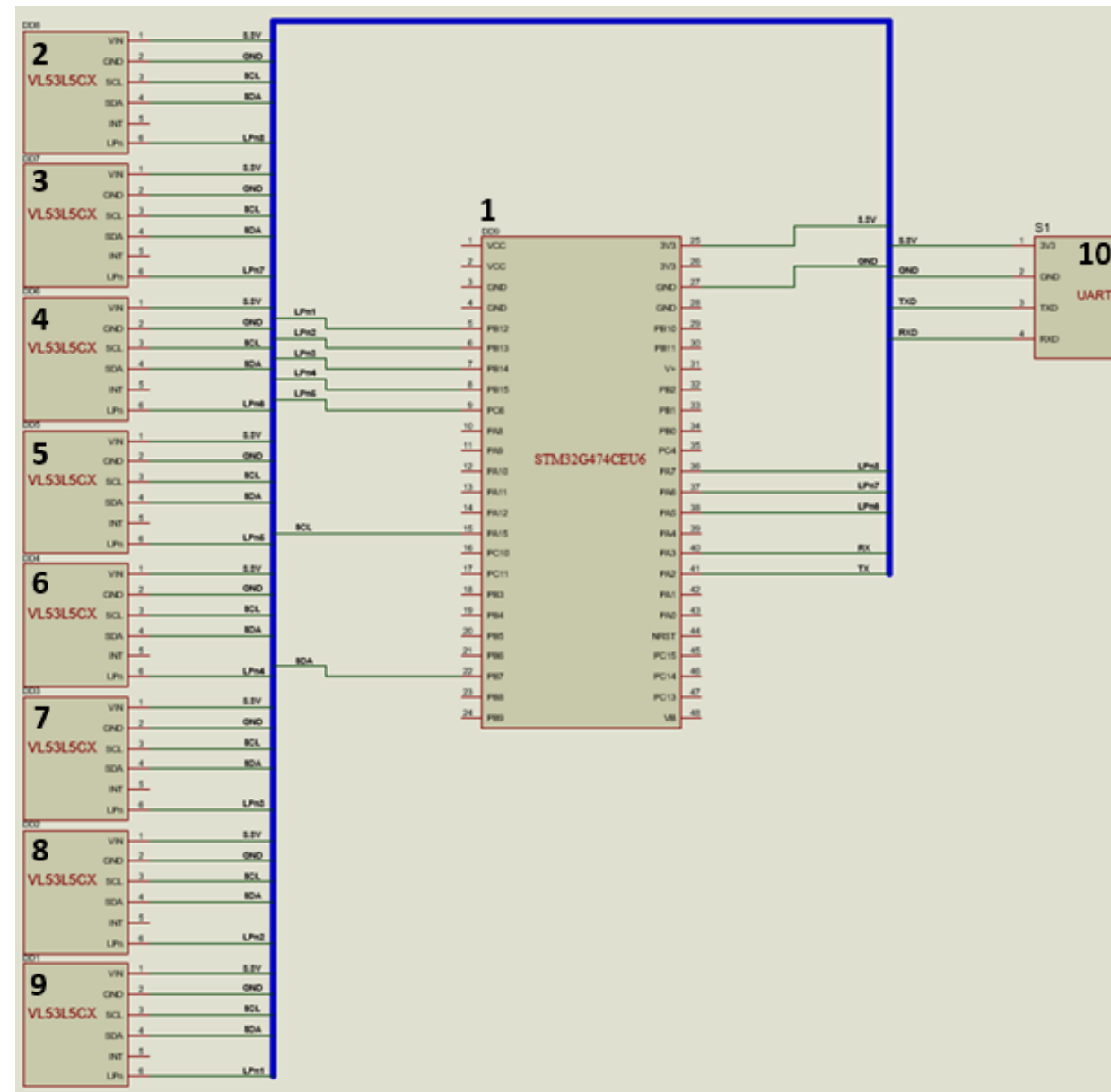


Рисунок 2 – Принципиальная схема устройства

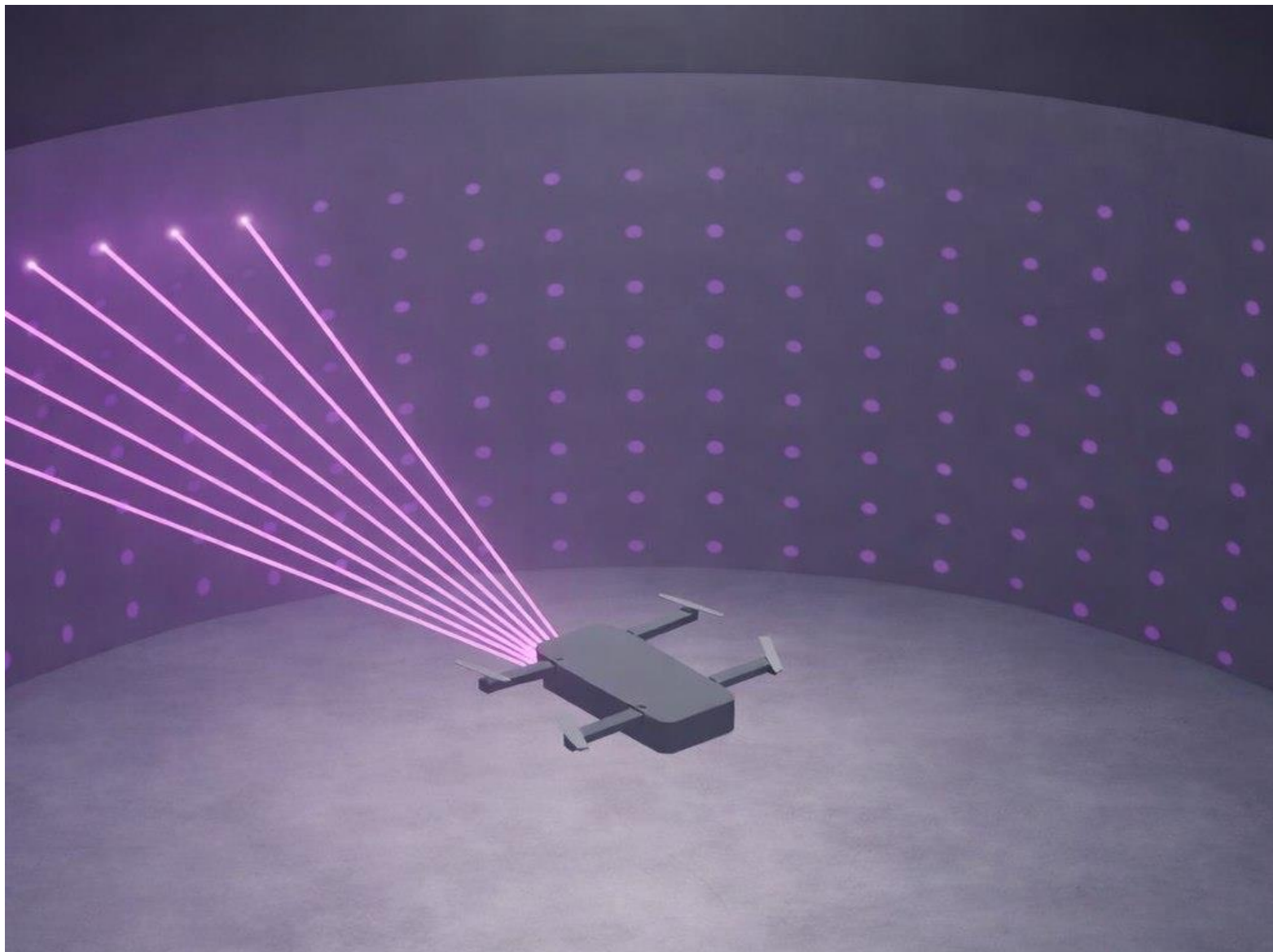


Рисунок 3 – Пример использования датчика обнаружения

Блок-схема программы микроконтроллера

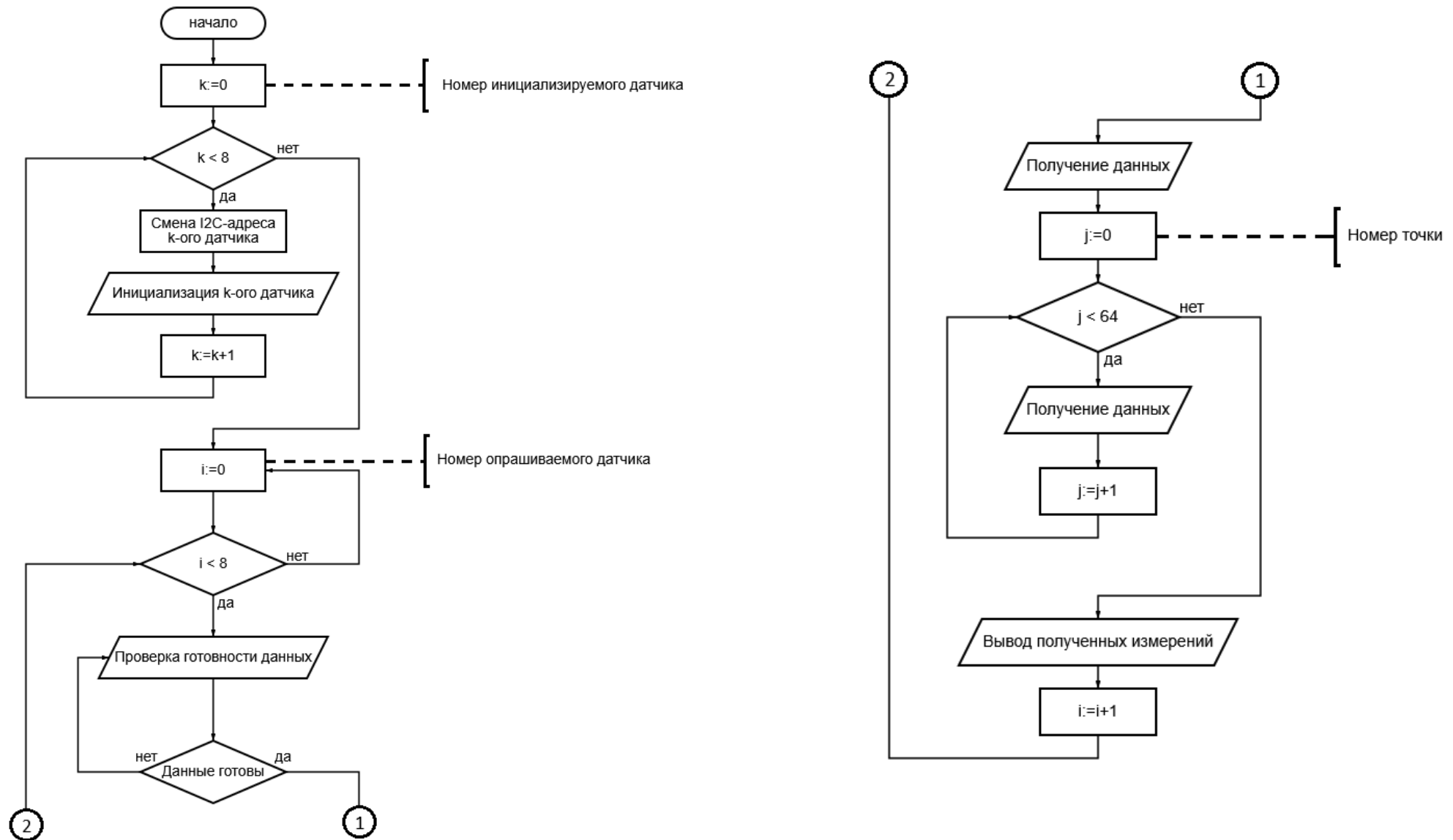


Рисунок 4 – Блок-схема программы МК

Экспериментальный стенд

Метрологическая верификация

Для подтверждения заявленной точности разработан и собран лабораторный испытательный стенд:

-  **Позиционирование:** Датчик зафиксирован на штативе соосно направлению на тестовое препятствие.
-  **Контроль дистанции:** Эталонное расстояние определялось рулеткой.
-  **Сбор данных:** Регистрация результатов велась на ПК с логгированием сырых массивов дальностей.



Рисунок 5 – Экспериментальная установка

Круговая панорама препятствий

Визуализация в реальном времени

🕒 **Программа визуализации:** Осуществляет потоковое чтение входящих пакетов данных, поступающих от микроконтроллера через виртуальный COM-порт интерфейса USB.

1. Преобразование координат: На основе полученных массивов расстояний и фиксированных углов наклона осей каждого из 8 датчиков программа преобразует дистанционные измерения из локальных систем координат ToF-матриц в единую полярную систему координат.

2. Отрисовка карты: Результатом обработки становится непрерывное динамическое построение двумерной карты окружающих препятствий в радиусе до 2000 мм в режиме реального времени.



Рисунок 6 – Пример работы ПО

Метрологический анализ результатов



В ходе тестов сформирована выборка из 10 измерений на дистанциях 1м, 1.5м и 2 м, результаты которых сведены в таблицу.



Метрологический контроль зафиксировал СКО на уровне 6.9–21.1 мм и абсолютную погрешность до 29 мм.



Полученные характеристики удовлетворяют требованиям регламента безопасной навигации малых беспилотных аппаратов

Таблица 2 – Результаты эксперимента

Номер измерения	1000 мм	1500 мм	2000 мм
1	1028	1519	2014
2	1022	1546	2009
3	1017	1539	2077
4	1018	1553	2044
5	1020	1528	2032
6	1035	1509	2040
7	1031	1518	2031
8	1030	1519	1999
9	1032	1513	2012
10	1020	1513	2029
СКО, мм	6.92	14.5	21.1
Абсолютная погрешность, мм	26	26	29

Конструкция корпуса прибора

Конструкция спроектирована в САПР FreeCAD с учетом углов обзора ToF-матриц:

- ▲ **Сплошное поле зрения:** Восемь граней расположены под углом 45° друг к другу, обеспечивая перекрытие 360° по азимутальному углу.
- ↕ **Вертикальный охват:** Конфигурация крепежных окон сенсоров VL53L5CX обеспечивает вертикальное поле зрения в пределах $\pm 22,5^\circ$.
- 🛒 **Малый вес:** Общая масса прибора составляет всего 35 грамм.

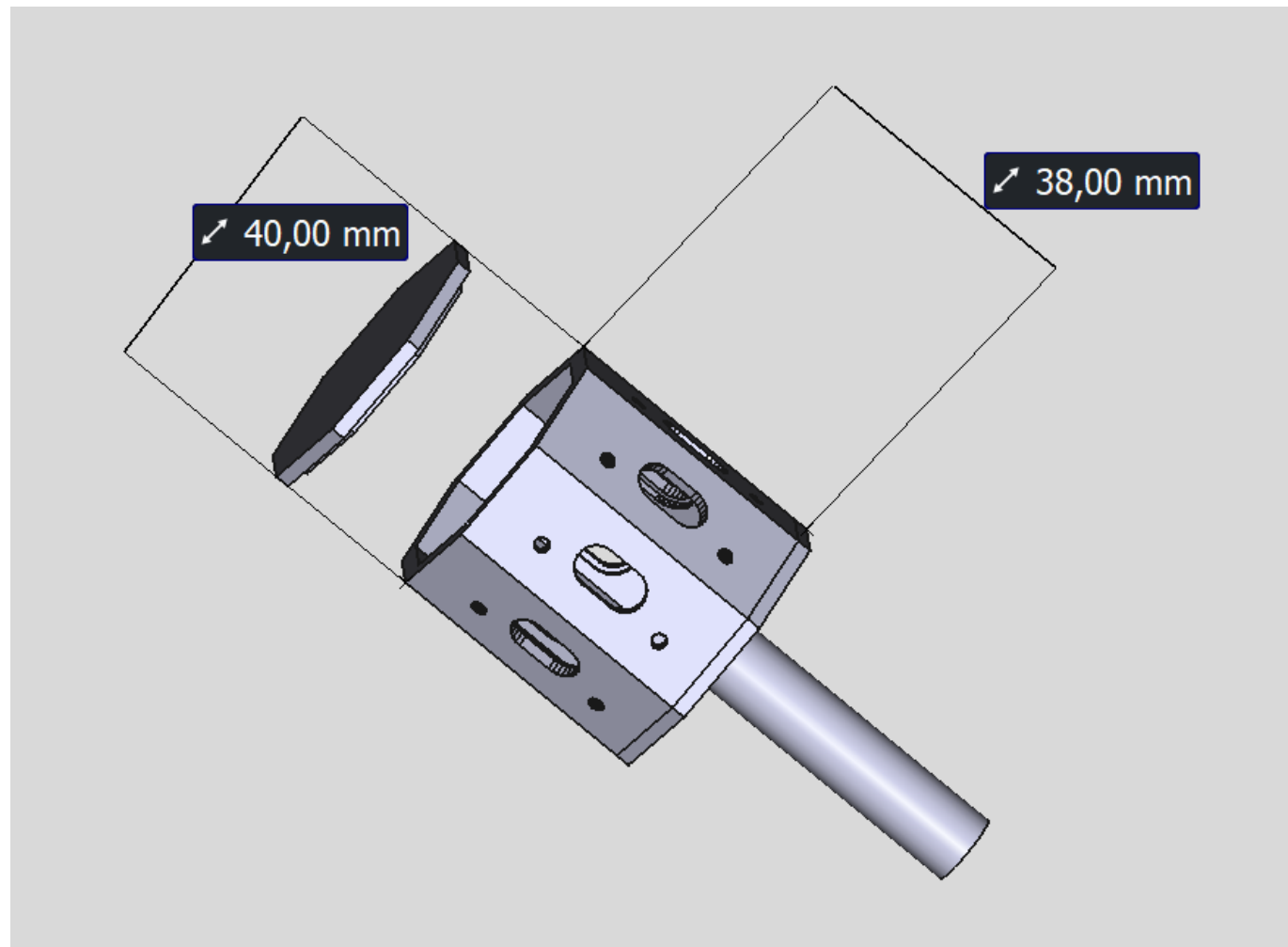


Рисунок 7 – 3D модель корпуса устройства

Заключение

- ✓ В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан датчик обнаружения препятствий для малых беспилотных систем.
- ✓ В ходе аналитического обзора аналогов была доказана целесообразность создания твердотельного устройства, сочетающего малые габариты и широкое поле зрения для распознавания препятствий в замкнутых пространствах.

Разработана структурная схема прибора, включающая микроконтроллер STM32G474CEU6 и массив из восьми времяпролётных сенсоров VL53L5CX, расположенных в форме восьмигранной призмы. На её основе спроектирована принципиальная схема устройства

- ✓ На языке C написано встроенное ПО с циклическим алгоритмом опроса, динамическим присвоением I2C-адресов через линии L_{Pn} и установкой одного из 2-х режимов: 8x8 точек 15 Гц и 4x4 точки 60 Гц. Программа считывает матрицы расстояний до 4 метров и может передавать данные как через USB, так и через UART.
- ✓ В САПР FreeCAD спроектирована 3D-модель корпуса, оптимизированная для устранения «мёртвых зон» при обзоре 360° по азимуту и ±22,5° по вертикали. Для проверки работоспособности собран действующий прототип датчика.
- ✓ На языке Python написана программа визуализации, которая через виртуальный COM-порт принимает измерения и строит круговую диаграмму препятствий.