

Санкт-Петербургский государственный университет

Системное программирование

Группа 22.М07-мм

# Расширение возможностей существующей инфраструктуры для решения задачи диспетчеризации БПЛА

*Ершов Владислав Евгеньевич*

Отчёт по учебной практике

в форме «Решение»

Научный руководитель:  
директор НОЦ "Математическая робототехника и искусственный интеллект", к.ф.-м.н.  
К. С. Амелин

Санкт-Петербург  
2023

Saint Petersburg State University

Advisor's chair

Group 22.M07-mm

*Vladislav Ershov*

# Expanding the capabilities of existing infrastructure to solve the problem of drone dispatching

Internship report  
in a «Solution» form

Scientific supervisor:  
Sc.D, director of the Scientific and Educational Center of St. Petersburg State University  
"Mathematical Robotics and Artificial Intelligence" K.S. Amelin

Saint Petersburg  
2023

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>Постановка задачи</b>	<b>7</b>
<b>1. Обзор</b>	<b>8</b>
1.1. Радиолокационные станции . . . . .	8
1.2. Акустические сенсоры . . . . .	9
1.3. Камеры видеонаблюдения . . . . .	9
1.4. Камеры ночного виденья . . . . .	10
<b>2. Метод</b>	<b>11</b>
2.1. Математическая модель . . . . .	11
<b>3. Реализация</b>	<b>13</b>
3.1. Аппаратная реализация . . . . .	13
3.2. Программная реализация . . . . .	15
<b>4. Эксперимент</b>	<b>18</b>
4.1. Описание стенда . . . . .	18
4.2. Метрики . . . . .	18
<b>Заключение</b>	<b>19</b>
<b>Список литературы</b>	<b>21</b>

# Введение

В последние годы возможности БПЛА расширяются, а рост их доступности позволяют практически каждому приобрести себе БПЛА [6, 26, 12]. Общественное принятие БПЛА наблюдается во все большем количестве отраслей и государств [33, 25, 2, 16, 5]. Такая ситуация влечет определенные последствия. К примеру, бесконтрольное увеличение количества БПЛА в современных городах, аэропортах, объектах инфраструктуры и промышленности может приводить к аварийным ситуациям, даже если у пользователей БПЛА нет злого умысла [27, 9, 13]. Появляются глобальные опасности для жизнедеятельности и функционирования различных систем и самих жителей целых городов [34].

Возникает необходимость во-первых в отслеживании, а в последующем и в диспетчеризации БПЛА. Существующие системы отслеживания и контроля летательных объектов не могут позволить решить эту проблему, так как они разрабатывались для других условий и других объектов [15, 17, 23]. Размер БПЛА гораздо меньше размеров объектов, которые отслеживаются существующими системами, также БПЛА летают на предельно малых высотах полета, они могут буквально стелиться над землей. К тому же, современные системы отслеживания просто не способны эффективно одновременно контролировать сотни или тысячи объектов.

Решением этой задачи занимаются многие ведущие университеты и научные организации<sup>1</sup>. Схожие задачи выдвигает НТИ<sup>2</sup>.

Большинство предлагаемых решений это создание новых систем с нуля. Такие системы включают различные датчики и используют широкую номенклатуру алгоритмов. Однако, недостаток всех таких решений это большая цена и малая скорость создания по настоящему глобальной системы, так как надо фактически заново создавать всю инфраструктуру [30, 11]. Таким образом, предлагаемые решения не позволяют решить задачу диспетчеризации БПЛА в необходимом объеме

---

<sup>1</sup>Обзорная статья <https://robotrends.ru/robopedia/sistemy-kontrolya-i-dispetcherizacii-trafika-bespiotnikov>

<sup>2</sup>Сайт НТИ <https://nti2035.ru/>

за короткое время.

Помимо взрывного роста количества БПЛА в современном мире также неуклонно растет число и качество камер видеонаблюдения. Особенно это заметно в столицах развитых государств - Москва, Лондон, Пекин и прочих [14, 28]. За столицами подтягиваются и остальные города. Также стоит отметить, что наибольшую опасность и одновременно сложность отслеживания представляют БПЛА, которые летают на уровне или чуть выше городской застройки. Городские камеры довольно часто позволяют отслеживать такое пространство. Например, в Санкт-Петербурге распространены камеры видеонаблюдения, которые транслируют на youtube.com<sup>3 4 5</sup>, большинство из них позволяют отслеживать пространство в городской застройке и над ней.

Возникает идея переиспользования таких камер для решения задачи диспетчеризации БПЛА. Такая идея очень выгодна с экономической точки зрения, так как вся физическая инфраструктура уже существует, не хватает только программного решения. Стоит заметить, что анализ видеоряда с одной камеры не требует больших вычислительных ресурсов, его можно обеспечить на очень простом и дешевом аппаратном узле<sup>6</sup>. Однако, при получении данных с огромного числа камер, которых в современных городах все больше и больше, возникает проблема обработки этих данных. К тому же, такая централизованная система уязвима к потере центра или коммуникаций между центром и частью камер [18, 1, 3].

В таких ситуациях прекрасный результат показывают мультиагентные решения [8, 32]. К примеру, перед отправкой данных можно обрабатывать видеоряд на каждой камере или на небольшой группе камер и выдавать результат - летательные объекты и их расположение. После такой предобработки гораздо меньшие по объему данные могут спокойно передаваться по всей сети. Такой подход снимает вычислительную нагрузку с центров управления и принятия решений, к тому же в такой

---

<sup>3</sup><https://www.youtube.com/@msbud2>

<sup>4</sup><https://www.youtube.com/@LiveKamera>

<sup>5</sup><https://www.youtube.com/@DahuaCamsSPB>

<sup>6</sup>Подробная инструкция для ESP32 <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/645877/>

сети можно подключиться к любому узлу и получить информацию со всей системы о наблюдаемом пространстве.

# Постановка задачи

Целью работы является разработка и реализация алгоритма, который позволит эффективно решать задачу диспетчеризации БПЛА, опираясь на уже существующую инфраструктуру.

Поставленная цель обусловила решение следующих задач.

1. Сделать обзор средств отслеживания и контроля БПЛА.
2. Разработать алгоритм для диспетчеризации БПЛА.
3. Реализовать прототип для камер с обрабатывающим блоком Raspberry Pi 4.
4. Провести испытание прототипа в замкнутом помещении и на открытом пространстве на фоне неба.
5. Провести испытание алгоритма на существующих городских камерах.

# 1. Обзор

В обзоре будем рассматривать способы и средства отслеживания БПЛА.

## 1.1. Радиолокационные станции

Радиолокационная станция (РЛС) - это радиотехническая система, которая основана на регистрации отраженных от отслеживаемых объектов радиоволн<sup>7</sup>.

### 1.1.1. Активный режим

В активном режиме РЛС сами излучают радиоволны и отслеживают их отражение в наблюдаемом пространстве.

Это довольно крупные и дорогостоящие системы, которые требуют развитой инфраструктуры и недешевого обслуживания.

Преимущество таких систем заключается в возможности отслеживать объекты на огромных расстояниях, а также в слабой зависимости от погодных условий и времени суток.

При этом даже самые современные РЛС имеют ограничение на количество одновременно отслеживаемых объектов. Следовательно, для решения задачи диспетчеризации БПЛА будет требоваться большое количество станций.

Также стоит учесть, что радиоволны не могут проходить сквозь строения, то есть отслеживание БПЛА в условиях современной городской застройки потребует просто гигантского количества РЛС.

Однако, такие системы можно применять как часть комплексной системы обнаружения для первоначального наведения более простых и дешевых средств обнаружения.

---

<sup>7</sup>Обзорная статья о РЛС <https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>



### **1.1.2. Пассивный режим**

В пассивном режиме РЛС занимается только отслеживанием радиоволн, которые генерируются другими объектами.

Обычно такой режим применяется в специфических условиях. Например, есть необходимость оставаться незамеченным. Также в таком режиме РЛС тратят меньше энергии.

В пассивном режиме есть возможность обнаруживать объекты, которые не имеют собственного излучения. Так как источников излучения уже сейчас много [31, 29], а в современном мире их становится только больше, зная стандартную схему поля, можно находить аномалии - движущиеся объекты.

## **1.2. Акустические сенсоры**

Акустические сенсоры являются недорогим решением, которое позволяет решать задачу обнаружения объектов, которые создают звуковые колебания.

При наличии большой базы с данными БПЛА, в частности, их шумовым следом, могут хорошо определять тип объекта [7], что может быть полезным при решении задачи диспетчеризации БПЛА для предсказания возможных действий отслеживаемых объектов.

Однако, такие сенсоры сильно ограничены расстоянием эффективного обнаружения (десятки метров) в условиях шумной городской среды.

## **1.3. Камеры видеонаблюдения**

Камеры видеонаблюдения применяются повсеместно, при этом их цена уменьшается, следовательно, их доступность растет. При этом, качество и возможности камер увеличиваются.

К тому же, успехи в области компьютерного зрения [21, 4], а именно, в распознавании объектов позволяют сказать, что камеры могут эффективно решать задачу обнаружения и контроля БПЛА.

К сожалению, остается проблема плохого качества сигнала с камер и ограничений, которые накладываются погодными условиями и временем суток.

Уже сейчас существуют программные решения, которые позволяют идентифицировать БПЛА метрового размера на расстоянии до 700 метров с помощью 20-мегапиксельных камер [22].

Аппаратные и программные возможности камер видеонаблюдения позволяют решать задачу отслеживания БПЛА [19]. К тому же, разветвленная и хорошо обеспеченная инфраструктура для камер, уже существует и может быть переиспользована для решения задачи диспетчеризации БПЛА.

#### **1.4. Камеры ночного видения**

Такие камеры более дорогие, чем обычные, а также менее доступные.

Они позволяют эффективно обнаруживать объекты в плохих погодных условиях или темное время суток.

Могут хорошо расширять возможности обычных камеры, являясь составной частью комплексных систем обнаружения.

## 2. Метод

В описании метода рассмотрим математическую модель.

### 2.1. Математическая модель

Рассмотрим существующую инфраструктуру камер видеонаблюдения. У каждой камеры есть ее координаты -  $(x, y, z, \alpha, \beta)$ , где  $(x, y, z)$  это трехмерные координаты,  $\alpha$  - угол горизонтального наклона, а  $\beta$  - угол вертикального наклона относительно изначально заданного общего для всех камер вектора.

Каждому обнаруженному объекту можно сопоставить луч с начальной точкой -  $(x, y, z)$  и направляющим вектором -  $(p_x, p_y, p_z)$ . Такой луч вычисляется с учетом погрешности наблюдения, искривления линзы, неточностей при настройке камеры.

Будем считать измерением такой луч и время обнаружения объекта  $t$ , также введем коэффициент уверенности  $q$  в корректности обнаружения -  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z, t, q)$ .

В реальности почти невозможно избавиться ото всех погрешностей измерений. Таким образом, при последующем анализе, а именно, попытке пересечь лучи для определения точного расположения обнаруженного объекта возникают проблемы. Для обхода таких проблем стоит модифицировать измерение.

При настройке системы, которая будет включать камеры видеонаблюдения, произведем разбиение наблюдаемого пространства на кубы. Теперь каждому лучу можно сопоставить набор кубов, через которые он проходит. При этом решается проблема погрешности вычисления лучей, так как теперь нет необходимости пересекать лучи, можно просто проверить какие кубы у двух лучей совпадут.

Теперь наше измерение включает в себя набор кубов, например, их порядковые номера или трехмерные координаты, время и уверенность в правильности обнаружения объекта -  $(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n, t, q)$ .

Камеры или небольшие группы камер обмениваются этими измерениями, при этом при совпадении кубов у нескольких измерений уверен-

ность в этом измерении увеличивается, а при не совпадении - уменьшается. По совокупности таких данных можем получить координаты кубов, в которых были обнаружены объекты в интересующей области слежения. Таким образом, решается задача диспетчеризации БПЛА.

## 3. Реализация

В секции реализация опишем реализацию прототипа для проведения экспериментов.

### 3.1. Аппаратная реализация

Для аппаратной части выбрана платформа Raspberry Pi 4<sup>8</sup> (Рис. 1). Эта платформа при небольшой стоимости предоставляет огромную функциональность.

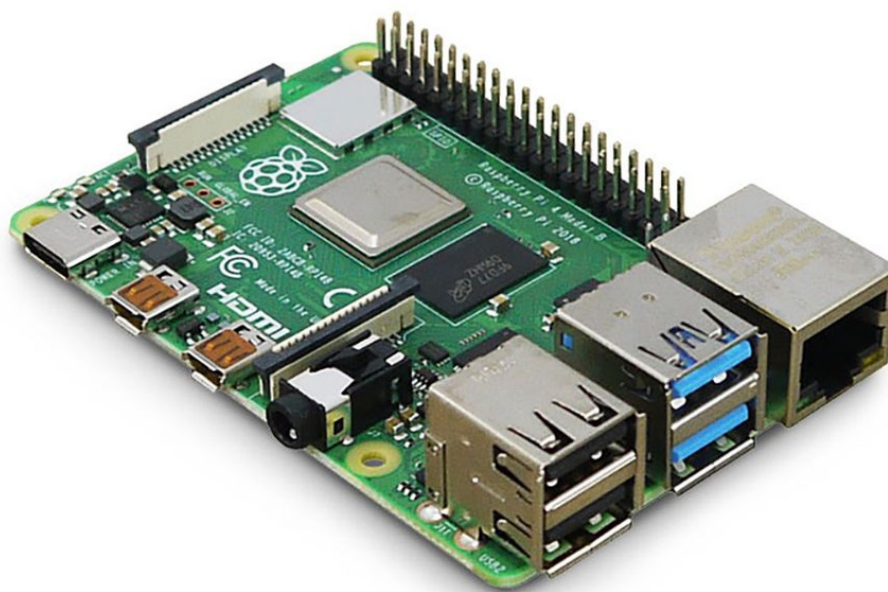


Рис. 1: Raspberry Pi 4

---

<sup>8</sup>Документация на Raspberry Pi 4 <https://www.raspberrypi.com/documentation/>

- Платформа работает на несколько урезанном Linux - Raspberry Pi OS<sup>9</sup>. При этом, на платформе вполне можно создать ПК, так как предлагаемые 2/4/8/16 Гб (в зависимости от версии) оперативной памяти позволяют решать практически все существующие запросы пользователей [10, 20, 24].
- Для Raspberry Pi 4 существует огромное количество различных датчиков и дополнительных внешних устройств, в том числе несколько десятков моделей камер<sup>10</sup>.
- Для всех этих узлов существует прекрасная и постоянно обновляемая программная поддержка.
- Построение сети из таких платформ также не предполагает нерешаемых проблем, что будет важно при проведении экспериментов.
- Стоимость одной платформы с необходимыми узлами всего несколько тысяч рублей, что позволяет провести эксперимент с участием нескольких устройств.

Для платформы выбрана довольно простая камера - Raspberry Pi Camera Board v2.1 (Рис. 2). Применение такой простой камеры оправдывается тем, что эксперимент планируется провести в уменьшенных масштабах.

---

<sup>9</sup>Документация на Raspberry Pi 4 OS <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html>

<sup>10</sup>Список предлагаемых устройств <https://www.raspberrypi.com/products/>

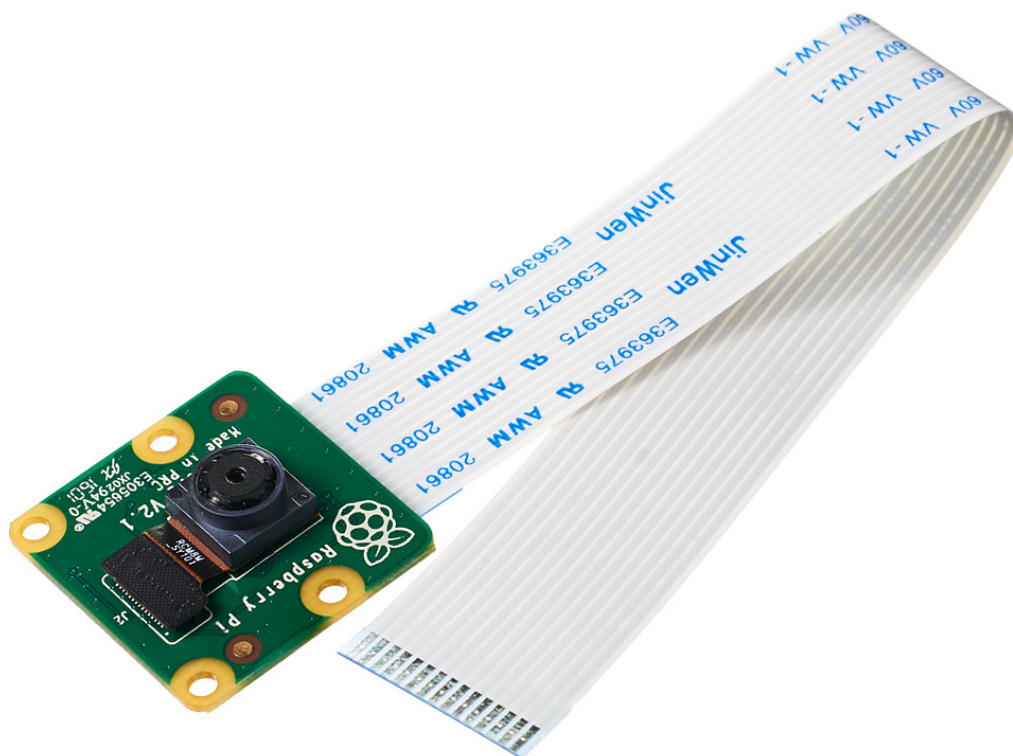


Рис. 2: Camera Board v2.1

### 3.2. Программная реализация

Для реализации программного решения выбран Python и библиотеки для работы с аппаратными компонентами Raspberry Pi<sup>11</sup>. Такой подход позволяет реализовать различные варианты для апробирования подхода.

В реализации можно выделить три блока.

- Блок камеры - занимается захватом видеоряда и обнаружением движения (Листинг 1).
- Блок обработки видео с обнаруженным движением - вычисляет измерения.
- Основной блок - вызывает блоки и занимается отправкой и принятием измерений. (Листинг 2).

#### Листинг 1: Камера

---

<sup>11</sup>Инструкция <https://projects.raspberrypi.org/en/projects/getting-started-with-picamera/0>

```

class Camera:
    def __init__(noise_level):
        self.videos = list()
        self.noise_level = noise_level

    def start():
        self.prev = self.get_state()
        self.cur = self.get_state()
        while True:
            if self.cur - self.prev > self.noise_level:
                self.videos.append(self.get_video(self.prev, self.cur))

            self.prev = self.cur
            self.cur = self.get_state()

    def get_state():
        ...

    def get_video(prev, cur):
        ...

```

## **Листинг 2: Основной блок**

```

def send_measures(cubes):
    ...

def rec_measures():
    ...

camera = Camera()
camera.start()

while True:
    videos = camera.videos

```



```
if len(videos) > 0:
    camera.clear_videos()

    cubes_with_object, time = compute_cubes(videos)
    send_mesures(cubes_with_object)

rec_measures()
```

## 4. Эксперимент

Будем проверять эффективность отслеживания БПЛА созданным прототипом.

### 4.1. Описание стенда

Опишем стенд для проведения экспериментов.

- В закрытом помещении располагаются три платформы Raspberry Pi (Рис. 3).
- Объектом для отслеживания является болванка на тросе, которая передвигается в наблюдаемом пространстве (Рис. 4).
- Каждая платформа делает измерение и получает набор кубов, в котором находится обнаруженный объект, затем обменивается измерениями с остальными камерами. В результате, на каждой камере есть кубы, для которых уверенность в обнаружении приближается к 1.

### 4.2. Метрики

Зная движение объекта отслеживания можно точно определить в каких кубах он находился и в какой момент времени.

- Метрика точности – точность определения кубов, в которых обнаружен отслеживаемый объект.
- Временная метрика – временная задержка между прохождением отслеживаемым объектом кубов и получением информации об этом.

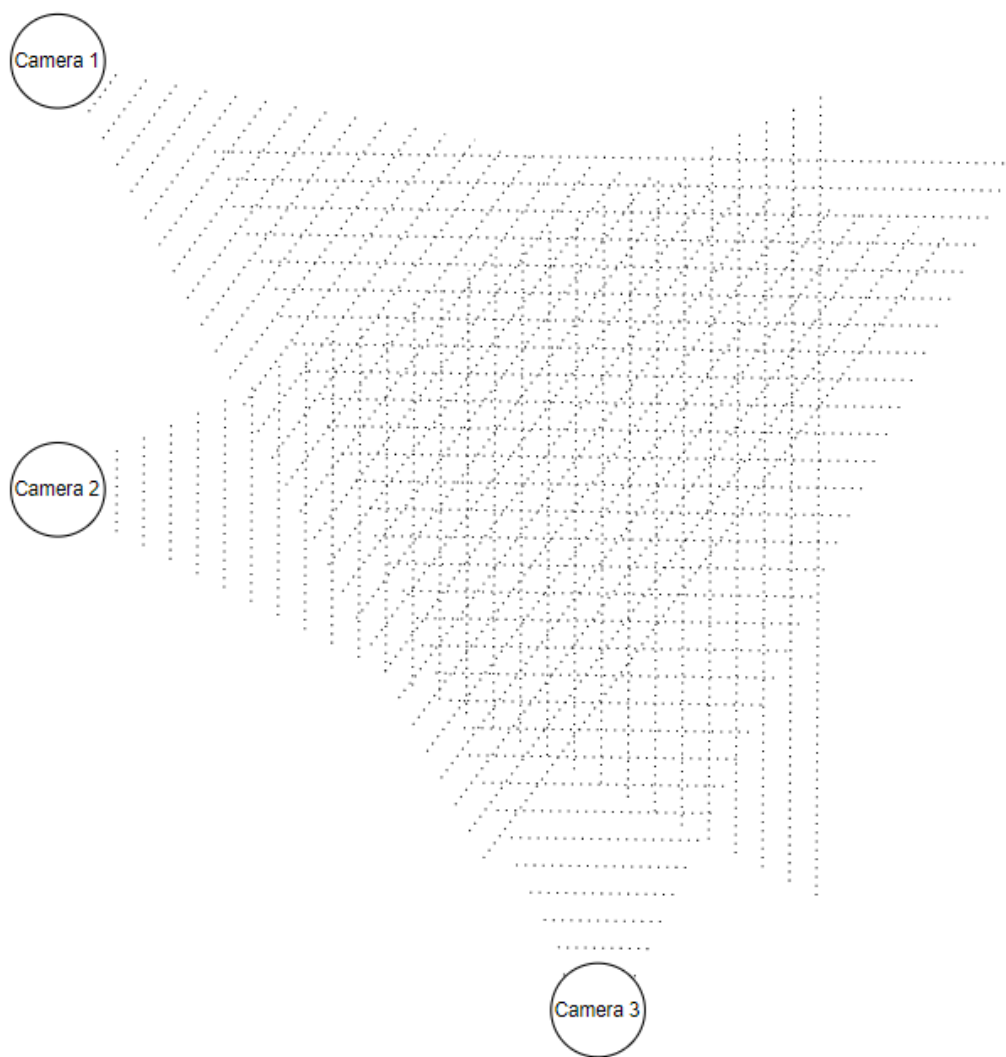


Рис. 3: Диспозиция камер

## Заключение

Были достигнуты следующие результаты.

1. Сделан обзор средств отслеживания и контроля БПЛА.
2. Разработан алгоритм для диспетчеризации БПЛА.
3. Реализован прототип для камер с обрабатывающим блоком Raspberry Pi 4.
4. Разработан стенд для первоначального тестирования прототипа.

На весенний семестр остаются следующие задачи.

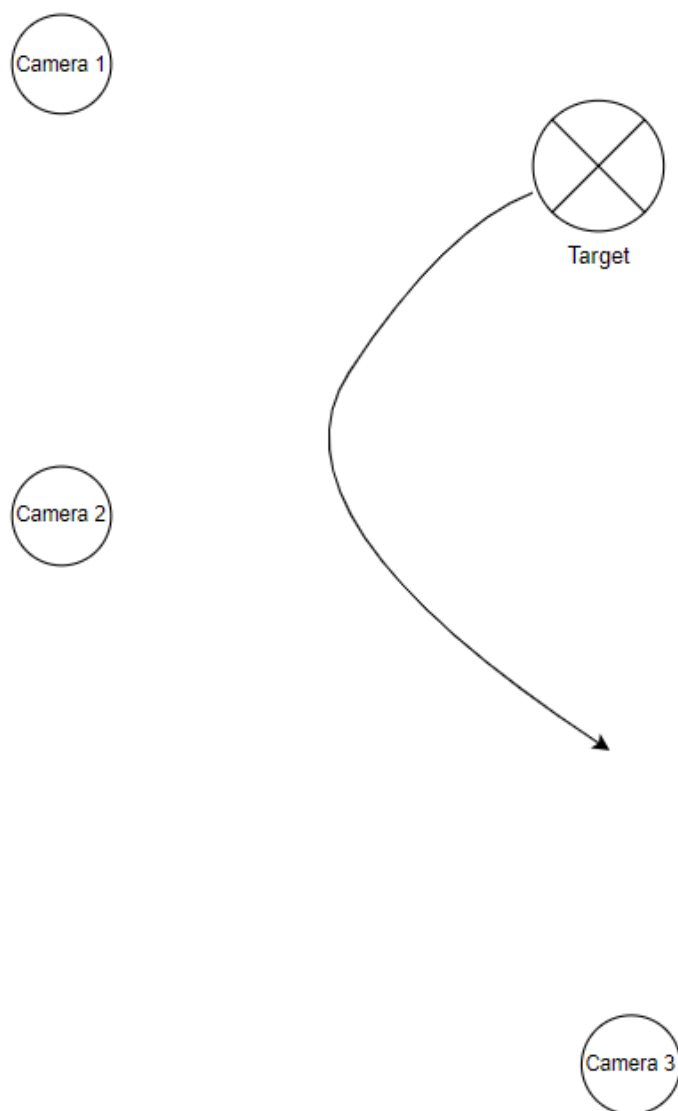


Рис. 4: Передвижение наблюдаемого объекта

1. Провести испытание прототипа в замкнутом помещении и на открытом пространстве на фоне неба.
2. Провести испытание алгоритма на существующих городских камерах.

Код проекта доступен на сайте Github:

<https://github.com/ErshovVladislav10M/Master-s-work>

## Список литературы

- [1] Amelin Konstantin, Vladislav Ershov. Data transfer in a decentralized network of robots using a local voting protocol // CYBERNETICS AND PHYSICS Учредители: Институт проблем машиноведения РАН. — 2021. — Vol. 10, no. 4. — P. 219–223.
- [2] Aydin Burchan. Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice // Technology in society. — 2019. — Vol. 59. — P. 101180.
- [3] Centralization vs. decentralization in multi-robot coverage: Ground robots under uav supervision / A Jamshidpey, M Wahby, MK Heinrich et al. — 2021.
- [4] Cetin Ender, Barrado Cristina, Pastor E. Improving real-time drone detection for counter-drone systems // The Aeronautical Journal. — 2021. — Vol. 125, no. 1292. — P. 1871–1896.
- [5] Designing drones: Factors and characteristics influencing the perception of flying robots / Anna Wojciechowska, Jeremy Frey, Esther Mandelblum et al. // Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. — 2019. — Vol. 3, no. 3. — P. 1–19.
- [6] Detection and tracking meet drones challenge / Pengfei Zhu, Longyin Wen, Dawei Du et al. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2021. — Vol. 44, no. 11. — P. 7380–7399.
- [7] Detection of Civil Unmanned Aerial Vehicles by Sound Processing / Guy Haroush, Chi Leung, Aaditya Malhotra et al.
- [8] Dorri Ali, Kanhere Salil S, Jurdak Raja. Multi-agent systems: A survey // Ieee Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 28573–28593.
- [9] Driving Distraction Due to Drones : Rep. / Oregon. Dept. of Transportation. Research Section ; Executor: David S Hurwitz, Michael J Olsen, Zachary Barlow et al. : 2018.

- [10] Fletcher Anthony C, Mura Cameron. Ten quick tips for using a Raspberry Pi // PLoS computational biology. — 2019. — Vol. 15, no. 5. — P. e1006959.
- [11] Ganti Sai Ram, Kim Yoohwan. Implementation of detection and tracking mechanism for small UAS // 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) / IEEE. — 2016. — P. 1254–1260.
- [12] Hall Abigail R, Coyne Christopher J. The political economy of drones // Defence and Peace Economics. — 2014. — Vol. 25, no. 5. — P. 445–460.
- [13] Harrington Anthony. Who controls the drones? // Engineering & Technology. — 2015. — Vol. 10, no. 2. — P. 80–83.
- [14] Improve safety using public network cameras / Youngsol Koh, Anup Mohan, Guizhen Wang et al. // 2016 IEEE Symposium on Technologies for Homeland Security (HST) / IEEE. — 2016. — P. 1–5.
- [15] Interference of radar detection of drones by birds / Jiangkun Gong, Jun Yan, Deren Li et al. // Progress In Electromagnetics Research M. — 2019. — Vol. 81. — P. 1–11.
- [16] Khan Rabeel, Tausif Sadaf, Javed Malik Ahmed. Consumer acceptance of delivery drones in urban areas // International Journal of Consumer Studies. — 2019. — Vol. 43, no. 1. — P. 87–101.
- [17] Multispectral detection of commercial unmanned aerial vehicles / Jan Farlik, Miroslav Kratky, Josef Casar, Vadim Stary // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 7. — P. 1517.
- [18] Mutambara Arthur GO. Decentralized estimation and control for multisensor systems. — Routledge, 2019.
- [19] Practical aspects of range determination and tracking of small drones by their video observation / Igor Koryttsev, Sergiy Sheiko, Vladimir Kartashov et al. // 2020 IEEE International Conference

on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) / IEEE. — 2020. — P. 318–322.

- [20] Raspberry Pi as Internet of things hardware: performances and constraints / Mirjana Maksimović, Vladimir Vujović, Nikola Davidović et al. // design issues. — 2014. — Vol. 3, no. 8. — P. 1–6.
- [21] Real-time and accurate drone detection in a video with a static background / Ulzhalgas Seidaliyeva, Daryn Akhmetov, Lyazzat Ilipbayeva, Eric T Matson // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 14. — P. 3856.
- [22] Real-time high-resolution omnidirectional imaging platform for drone detection and tracking / Bilal Demir, Selman Ergunay, Gokcen Nurlu et al. // Journal of Real-Time Image Processing. — 2020. — Vol. 17, no. 5. — P. 1625–1635.
- [23] Riabukha Viacheslav P. Radar surveillance of unmanned aerial vehicles // Radioelectronics and Communications Systems. — 2020. — Vol. 63. — P. 561–573.
- [24] Richardson Matt, Wallace Shawn. Getting started with raspberry PI. — " O'Reilly Media, Inc.", 2012.
- [25] Risk perception and the public acceptance of drones / Reece A Clothier, Dominique A Greer, Duncan G Greer, Amisha M Mehta // Risk analysis. — 2015. — Vol. 35, no. 6. — P. 1167–1183.
- [26] Rollins Heather. Drone pilots in the USA: A statistical study of recreational and professional flyers : Ph.D. thesis / Heather Rollins ; University of West Florida. — 2020.
- [27] Yaacoub Jean-Paul, Noura Hassan, Salman Ola, Chehab Ali. Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. Internet of Things, 11, 100218. — 2020.
- [28] Sheng Hao, Yao Keniel, Goel Sharad. Surveilling surveillance: Estimating the prevalence of surveillance cameras with street view data //

Proceedings of the 2021 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society. — 2021. — P. 221–230.

- [29] Stacenko L, Anna Ageeva. Monitoring of levels of electromagnetic radiation from base station antennas // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) / IEEE. — 2015. — P. 1–3.
- [30] Svanström Fredrik, Alonso-Fernandez Fernando, Englund Cristofer. Drone Detection and Tracking in Real-Time by Fusion of Different Sensing Modalities // Drones. — 2022. — Vol. 6, no. 11. — P. 317.
- [31] Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities / Damiano Urbinello, Wout Joseph, Leen Verloock et al. // Environmental research. — 2014. — Vol. 134. — P. 134–142.
- [32] Van der Hoek Wiebe, Wooldridge Michael. Multi-agent systems // Foundations of Artificial Intelligence. — 2008. — Vol. 3. — P. 887–928.
- [33] The future of drones and their public acceptance / Miquel Macias, Cristina Barrado, Enric Pastor, Pablo Royo // 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC) / IEEE. — 2019. — P. 1–8.
- [34] la Cour-Harbo Anders. Mass threshold for ‘harmless’ drones // International Journal of Micro Air Vehicles. — 2017. — Vol. 9, no. 2. — P. 77–92.