

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)**  
**Кафедра МО ЭВМ**

**ОТЧЕТ**  
**по научно-исследовательской работе**  
**Тема: Разработка итеративного алгоритма безопасного группового**  
**полета БЛА**

Студент гр. 7304

Власов Р.А.

Научный руководитель

Филатов А.Ю.

Санкт-Петербург

2022

## ЗАДАНИЕ НА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ РАБОТУ

Студент Власов Р.А.

Группа 7304

Тема НИР: Разработка итеративного алгоритма безопасного группового полета группы БЛА

Задание на НИР: разработать и реализовать алгоритм совместного движения группы БЛА, который позволит нескольким БЛА одновременно двигаться в направлении общей цели, избегая столкновений

Сроки выполнения НИР: 01.09.2022 – 20.12.2022

Дата сдачи отчета: 19.12.2022

Дата защиты отчета: 23.06.2022

Студент		Власов Р.А.
Научный руководитель		Филатов А.Ю.

## АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является разработка итерационного алгоритма совместного безопасного движения группы БЛА. В данной работе описываются исходные данные для работы разрабатываемого алгоритма, принцип работы алгоритма. Также приводится описание и пример тестирования алгоритма. Формулируются достоинства и недостатки разработанного алгоритма. К достоинствам относится то, что алгоритм обеспечивает безопасное движение и устойчив к идеальным вырожденным ситуациям. К недостаткам алгоритма относится необходимость внешнего вмешательства в алгоритм для остановки БЛА вблизи цели и необходимость знать все координаты БЛА на каждой итерации. Также в работе формируется список задач для дальнейшего исследования.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Определения, обозначения, сокращения	5
	Введение	6
1.	Постановка задачи	7
2.	Результаты работы в весеннем семестре	8
3.	Описание предполагаемого метода решения	12
4.	План работы на осенний семестр	13
	Заключение	14
	Список использованных источников	15

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе использованы следующие определения и сокращения.

Определения, сокращения	Описание
БЛА, БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
Управляющая команда	Команда движения БЛА согласно трём составляющим скорости: на север, на запад и вниз
RTK-поправка	Метод дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем

## ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматривается задача одновременного движения группы БЛА.

При одновременном применении нескольких БЛА возникают существенные риски столкновения, возникающие из-за недостатков режимов управления. Так при полете в автоматическом режиме БЛА не учитывают опасность столкновения, так как связь с другими БЛА в данном режиме не предусмотрена. При полете в ручном режиме оператор может учитывать другие БЛА, однако не может исключить опасность столкновений из-за таких факторов, как возможная задержка или потеря управляющих сигналов и визуальное искажение расстояний при наблюдении с большого расстояния или через камеру, а также возможная несогласованность действий нескольких операторов.

Несмотря на опасность применения нескольких БЛА одновременно, существуют задачи, выполнение которых группой БЛА предоставляет существенный выигрыш по времени и стоимости выполнения задачи. Для решения подобных задач была поставлена цель — разработать алгоритм совместного полета группы из нескольких БЛА, который позволит им одновременно двигаться в направлении общей цели, избегая столкновений.

Для решения поставленной задачи был принят алгоритм стайного децентрализованного управления движением роботов [1]. Алгоритм описан для движения колёсных роботов на плоскости, однако подобный алгоритм можно применить для движения БЛА в трехмерном пространстве.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### **Актуальность:**

Задачи, требующие запуска нескольких БЛА (задач картографирования, разведки, доставки грузов, спасательных операций), решаются быстрее и проще при одновременном запуске нескольких БЛА, чем при запуске БЛА по очереди по одному, так как снижаются общие временные затраты на движение к цели, а также затраты на координацию движений. Такие задачи появляются всё чаще, из-за возможности автоматизировать работу человека, а также проводить работу в участках, доступ которого без дополнительных средств затруднён.

Также материальные затраты на одновременный запуск нескольких БЛА оказываются меньше суммы затрат на индивидуальные запуски, так как сокращается время на организацию старта и приземления БЛА, а также на ожидания оператором выполнения полетного задания.

**Проблема:** Запуск одновременно нескольких БЛА вблизи друг друга даже под управлением нескольких операторов несет высокие риски столкновения.

**Целью** данной работы является разработка и реализация алгоритма совместного движения группы БЛА, который позволит нескольким БЛА одновременно двигаться в направлении общей цели, избегая столкновений.

### **Задачи:**

- Разработать алгоритм безопасного совместного движения группы из нескольких БЛА;
- Сформировать эвристические параметры;
- Сформулировать достоинства и недостатки алгоритма.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ В ОСЕННЕМ СЕМЕСТРЕ

План работы на осенний семестр, сформированный в результате работы в весеннем семестре, состоит в следующем:

- Исправить недостатки, выявленные в ходе симуляции работы алгоритма;
- Добавить в алгоритм механизм, позволяющий продолжать безопасный полет в случае, когда известно, что координаты одного или нескольких БЛА на текущем шаге неактуальны;
- Сформулировать эвристику, улучшающую полет.

Для решения проблемы остановки БЛА вблизи цели было принято добавить в алгоритм динамические коэффициенты движения, зависящие от расстояния до цели. При уменьшении коэффициентов движения обратно пропорционально расстоянию до цели удалось добиться возможности достижения заданной точки с погрешностью в 5 сантиметров без участия оператора.

Результатом работы в осеннем семестре стал алгоритм группового движения, описанный далее.

Управляющая команда разделена 4 составляющие:

- Движение к цели – Данная составляющая нужна для сокращения дистанции с целью. Она представлена нормализованным вектором от БЛА до цели, показанном на рис. 1, где  $target_{ENU}$  – вектор, в прямоугольной системе координат от БЛА до цели, соответствующий расстоянию до цели в метрах по направлениям на Север, на Восток и вниз соответственно;

$$\vec{target} = \begin{pmatrix} target_{ENU}X \\ target_{ENU}Y \\ target_{ENU}Z \end{pmatrix}$$
$$target = \frac{\vec{target}}{|\vec{target}|}$$

Рисунок 1 – Формула вычисления составляющей движения к цели



- Движение к центру группы – Данная составляющая нужна для сохранения строя. Она представлена нормализованным вектором от БЛА к центру группы, показанном на рис. 2, где  $center_{ENU}$  – вектор, в прямоугольной системе координат от БЛА до средней арифметической координаты по всем составляющим всех БЛА группы, соответствующий расстоянию в метрах по направлениям на Север, на Восток и вниз соответственно;

$$\vec{center} = \begin{pmatrix} center_{ENU}X \\ center_{ENU}Y \\ center_{ENU}Z \end{pmatrix}$$

$$center = \frac{\vec{center}}{|\vec{center}|}$$

Рисунок 2 – Формула вычисления составляющей движения к центру группы

- Движение от других БЛА – Данная составляющая нужна для предотвращения столкновений. Она представлена суммой векторов от других БЛА группы до текущего. Каждый составляющий вектор скалярно умножается на коэффициент, зависящий от расстояния между БЛА. Формула вычисления составляющей для  $i$ -го БЛА приведена на рис. 3, где  $coord_{ENU}$  – координата БЛА,  $k_j$  – коэффициент, зависящий от расстояния между БЛА. На рис. 4 приведен пример графика зависимости коэффициента  $k_j$  от расстояния между БЛА при критическом радиусе 2 метра;

$$\vec{avoid} = \sum_{j \neq i} = k_j \left( \begin{pmatrix} coord_{ENU}X \\ coord_{ENU}Y \\ coord_{ENU}Z \end{pmatrix}_i - \begin{pmatrix} coord_{ENU}X \\ coord_{ENU}Y \\ coord_{ENU}Z \end{pmatrix}_j \right)$$

Рисунок 3 – Формула вычисления составляющей движения от других БЛА

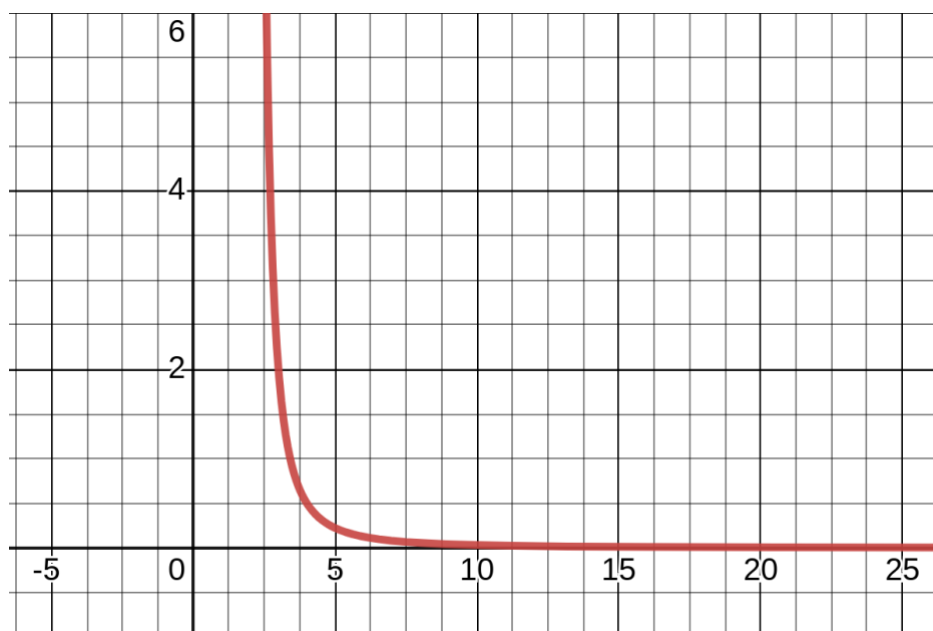


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента избежания столкновений от расстояния между БЛА при критическом радиусе 2 метра

- Случайное движение – Данная составляющая нужна для обеспечения возможности разлететься при возникновении спорной ситуации. Она представлена нормализованным случайным вектором.

Для более вариативного управления движением БЛА были добавлены динамические коэффициенты для каждой составляющей управляющей команды. Величина коэффициентов движения изменяется обратно пропорционально расстоянию между целью и БЛА.

Алгоритм выполняет вычисление управляющей команды для каждого БЛА в группе. Результатом применения алгоритма для текущего БЛА является управляющая команда (команда движения БЛА согласно трем составляющим скорости: на Север, на Восток и вниз), являющаяся суммой описанных составляющих. Формула показана на рис. 5.

$$\vec{command} = k_t \cdot \vec{target} + k_c \cdot \vec{center} + k_a \cdot \vec{avoid} + k_r \cdot \vec{random}$$

Рисунок 5 – Формула вычисления управляющей команды

Разработанный алгоритм движения группы БЛА был протестирован с помощью математической симуляции движения БЛА. В результате тестирования

было решено, что алгоритм удовлетворяет требованиям безопасного группового полета и может применяться на настоящих БЛА.

Был проведен ряд полевых испытаний алгоритма с использованием настоящих БЛА, в результате которых были подобраны оптимальные коэффициенты движения для группового полета в составе 5 БЛА.

В ходе работы с настоящими БЛА были обнаружены и исправлены следующие проблемы:

- При потере соединения БЛА выходит из режима ручного управления;
- Базовой точности спутникового приемника недостаточно для безопасного полета.

Проблема выхода из ручного управления была решена с помощью внесения изменения в конфигурацию автопилота.

Базовая точность спутникового приемника, установленного в БЛА, отличается для разных моделей и может достигать порядка 1 метра. Для увеличения точности спутникового приемника было решено использовать RTK-поправки (Real Time Kinematic), присылаемые с наземной станции. Благодаря использованию поправок удалось достичь точности позиционирования БЛА в 1 сантиметр.

### **3. ОПИСАНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ**

Результатом разработки алгоритма безопасного группового полета БЛА является алгоритм, описанный в разделе 2.

Для тестирования алгоритма разработана программа на языке программирования Java 17, содержащая следующие модули:

- Модуль, реализующий алгоритм группового полета БЛА;
- Модуль, обеспечивающий получение RTK-поправок от наземной станции;
- Модуль, обеспечивающий связь с БЛА по радиоканалу с помощью модема, для получения информации о состоянии БЛА, необходимой для работы алгоритма, передачи управляющих команд и RTK-поправок на борт;
- Модуль, обеспечивающий пользовательский интерфейс.

Тестирование алгоритма в составе разработанной программы, проводится с помощью компьютерной симуляции, а также в ходе полевых испытательных полетов.

#### **4. ПЛАН РАБОТЫ НА ВЕСЕННИЙ СЕМЕСТР**

Направления дальнейшей работы на весенний семестр:

- Разработать интерфейс управления ходом группового полета БЛА с визуальным отображением местоположения БЛА, статусом выполнения задачи, возможностью исключения БЛА из роя.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе работы был доработан итерационный алгоритм совместного безопасного движения группы БЛА. Алгоритм был протестирован с помощью компьютерной симуляции, в результате которой было принято решения о проведении полевых испытаний, и в ходе полевых испытаний. В ходе полевых испытаний были обнаружены и исправлены недостатки в настройках автопилота, а также недостатки, связанные с точностью бортовых приборов БЛА. Был составлен план работы на весенний семестр.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алгоритмы стайного децентрализованного управления движением группы роботов с дифференциальным приводом / В. Д. Сенотов, А. П. Алисейчик, Е. В. Павловский и др. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2020. № 123. 39 с.
2. Исходный код разработанного алгоритма /  
URL: <https://github.com/ravlasov/movement-control>