

На правах рукописи



**Титков Иван Павлович**

**АЛГОРИТМЫ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ФОРМАЦИЕЙ ГРУППЫ МНОГОРОТОРНЫХ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ТРАЕКТОРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность 2.3.1 –  
Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Карпунин Александр Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Системы автоматического управления»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Капустян Сергей Григорьевич**,  
доктор технических наук, ведущий научный  
сотрудник лаборатории информационных технологий  
и процессов управления Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
«Федеральный исследовательский центр Южный  
научный центр Российской академии наук»

**Миляков Денис Александрович**,  
кандидат технических наук, начальник отдела  
перспектив развития систем радиуправления и  
радиолокации акционерного общества «Концерн  
радиостроения «Вега».

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Объединенная  
авиастроительная корпорация» опытно-  
конструкторское бюро Сухого («ОКБ Сухого»)

Защита состоится «23» мая 2023 г. в 16 часов 30 минут на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные  
печатью, просьба высылать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5,  
стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана  
и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Муратов Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Решение задач координированного управления группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с обеспечением траекторной безопасности (ТБ) в настоящее время является актуальной проблемой поскольку принадлежит перечню критических технологий в Российской Федерации (РФ) согласно указу Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 (п. 13. Технологии информационных, управляющих, навигационных систем). Данная задача принадлежит перечню технологических барьеров в рамках перечня приоритетных групп технологий Национальной Технологической Инициативы (п. 1. Большие данные. Системы для автоматической координации полетов роев БВС (беспилотное воздушное судно) численностью более 300 шт. над площадью 5000 м<sup>2</sup> с максимальным расстоянием между дронами не более 100 метров в любой момент времени). Теория и технологии управления сложными системами входят в перечень приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021 – 2030 годы), утвержденной распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р (п. 2.2.1.6).

Современные практические задачи выполнения одновременной многоракурсной съемки; наблюдения за территорией; контроля периметра; обнаружения и локализации угроз, например, возгорания; поисково-спасательных работ; формирования пространственных активных фазированных антенных решеток комплексами БПЛА сводятся к задаче координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности.

Проблемам группового управления БПЛА и обеспечения траекторной безопасности посвящен ряд научно-исследовательских проектов: ГК «Геоскан», ООО «Коптер Экспресс», ООО «ЦАПК», Ars Electronica (Австрия), DARPA (США), STM (Турция) и др. Данные проблемы исследуются в работах А.Р. Гайдука, С.Л. Зенкевича, Д.Я. Иванова, И.А. Каляева, С.Г. Капустяна, А.А. Карпунина, Н.В. Кима, В.И. Меркулова, Д.А. Милякова, Г.З. Муслимова, С.А. Норсеева, J. Alonso-Mora, M. Dorigo, M.A. Lewis, R. Vijay Kumar, K. Reynolds и др.

В настоящей работе при исследовании и решении задачи координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ ключевое внимание уделяется реализуемости назначений целевых положений БПЛА, прогнозируемой длительности и гарантированному получению решения, простоте описания и реализации управления, универсальности и масштабируемости.

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритмов координированного управления с обеспечением траекторной безопасности в системах группового управления многороторными БПЛА в задаче формации.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- 1) провести анализ существующих методов и технологий координированного управления группой БПЛА и обеспечения ТБ;
- 2) разработать алгоритмы координированного управления (АКУ) формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности;
- 3) разработать программное обеспечение (ПО) для моделирования и управления формацией группы БПЛА;

4) провести вычислительный эксперимент по проверке работоспособности системы координированного управления группой БПЛА и анализ результатов.

**Методы исследования.** В диссертационной работе используются методы теории управления, теории графов, математического анализа, аналитической геометрии, численные методы, математические методы исследования операций, методы теории алгоритмов, методы оптимизации, сетевое планирование.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы:

1) Предложена постановка задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА в формации и определения очередности движения БПЛА и разработан алгоритм ее решения. Выявлена проблематика и подтверждены недостаточность решения только классической задачи о назначениях целевых положений БПЛА в формации и необходимость проверки реализуемости назначений. Алгоритм отличается от известных поисковых и эвристических алгоритмов прогнозируемой длительностью получения решения. Его реализация позволяет получить решение для формации с прямолинейными пространственными траекториями (ПТ) менее чем за 1 с для группы из 1024 БПЛА при отсутствии нереализуемых назначений и для 32 БПЛА – при их наличии.

2) Разработан алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления (ЗУ) желаемыми положениями БПЛА на ПТ. Отличается от известных алгоритмов возможностью аналитического определения безопасных желаемых положений БПЛА на кусочно-линейных ПТ, вследствие чего обладает на порядок большим быстродействием и позволяет синтезировать управление для прямолинейных ПТ 4096 БПЛА менее чем за 1 с.

3) Разработан алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде параметрического программного управления (ППУ) желаемыми положениями (ЖП) БПЛА на ПТ на основе линейного программирования (ЛП). Отличается от известных алгоритмов ППУ аналитическим определением опорных точек кусочно-линейных ПТ движения БПЛА, используемых для синтеза безопасных траекторий движения БПЛА во времени. Сведение задачи определения параметров ППУ к основной задаче ЛП позволяет определить параметры ППУ 64 прямолинейных ПТ менее чем за 1 с.

4) Разработан алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде параметрической программы управления (ПУ) желаемыми положениями БПЛА на ПТ на основе сетевого планирования (СП). Отличается от разработанного алгоритма координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ на основе линейного программирования применением сетевого планирования для определения параметров ППУ, что позволяет снизить вычислительную сложность их определения до квадратичной. Вследствие этого обладает на порядок большим быстродействием и позволяет определить параметры ППУ 3000 ПТ из 4 опорных точек и 256 ПТ из 32 опорных точек менее чем за 1 с.

**Практическая значимость** диссертационной работы:

1) Разработанный алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления желаемыми положениями БПЛА на ПТ обладает универсальностью и может применяться к

широкому классу математических моделей движения БПЛА, для этого достаточно известных координат и возможности «зависания» БПЛА в заданном положении на ПТ с известной точностью. Высокое быстродействие алгоритма синтеза управления обеспечивается возможностью аналитического определения безопасных желаемых положений БПЛА на кусочно-линейных ПТ.

2) Разработанные алгоритмы координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ на основе линейного программирования и сетевого планирования позволяют заранее синтезировать безопасные опорные траектории движения БПЛА во времени, что позволяет обеспечить ТБ БПЛА при реализации формации.

3) Разработанное ПО для моделирования координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ позволяет моделировать различные сценарии с применением разработанных алгоритмов, что позволяет оценивать эффективность и обосновывать выбор алгоритмов управления группой БПЛА.

4) Представленные результаты вычислительных экспериментов демонстрируют возможность практического применения разработанных алгоритмов координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности в режиме реального времени.

**Внедрение результатов работы.** Часть результатов диссертационной работы получена в рамках научно-исследовательских работ по теме «Разработка системы автоматического управления группой БПЛА с применением технического зрения» при поддержке гранта федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере» («Фонд содействия инновациям») в 2014-2016 годах (Договор № 5376ГУ1/2014, Договор № 12089ГУ2/2016).

**Достоверность полученных в диссертационной работе результатов** обеспечивается корректным применением математического аппарата, проведением вычислительных экспериментов для проверки работоспособности и оценки производительности разработанных алгоритмов управления группой БПЛА.

**Апробация диссертационной работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2014); семинаре «Автономные малоразмерные высокоманевренные беспилотные летательные аппараты мультироторного типа» (Кубинка, 2016); тринадцатом международном симпозиуме «Интеллектуальные системы (INTELS'2018)» (Санкт-Петербург, 2018); Всероссийской научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления (ТЗСУ) – 2019» (Москва, 2019); Всероссийской научно-технической конференции «ТЗСУ – 2020» (Москва, 2020); VII Всероссийской конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем» (Москва, 2020); четырнадцатом международном симпозиуме «Интеллектуальные системы INTELS'2020» (Москва, 2020); Всероссийской научно-технической конференции «ТЗСУ – 2021» (Москва, 2021); четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2021); научном семинаре кафедры «Системы автоматического

управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2021).

**Личный вклад.** Автором поставлена задача об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА в формации и определения очередности движения БПЛА и разработан алгоритм ее решения. Автором разработаны алгоритмы координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления и в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на пространственных траекториях. Автором разработано ПО для моделирования разработанных алгоритмов координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ и проведен многофакторный анализ их работоспособности, эффективности и возможности практического применения.

**Публикации.** Результаты отражены в 11 работах, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в научных изданиях, входящих в SCOPUS, 4 тезисов докладов на Всероссийских конференциях и 2 тезисов докладов на международных конференциях, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объем опубликованных работ составляет 5,36 / 3,16 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка использованных источников (192 наименования) и 2 приложений. Общий объем работы составляет 224 страницы, содержит 91 рисунок, 11 таблиц.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1) алгоритм решения поставленной задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА позволяет определить очередность (приоритеты) движения БПЛА;

2) алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности в виде закона управления желаемыми положениями БПЛА на пространственных траекториях позволяет безопасно выполнить построение заданной пространственной конфигурации группой БПЛА;

3) алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности в виде параметрического программного управления желаемыми положениями БПЛА на пространственных траекториях позволяет сформировать траектории движения БПЛА во времени и безопасно выполнить построение заданной пространственной конфигурации группой БПЛА;

4) результаты многофакторного анализа разработанных алгоритмов координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности позволяют сделать вывод об их работоспособности, эффективности и возможности практического применения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы: обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, кратко изложено содержание работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проводится анализ методов и технологий координированного управления группой БПЛА: анализ задач автоматизации управления группой БПЛА, системно-алгоритмический анализ координированного

управления. Приводится описание систем координат и математической модели движения БПЛА. Выполняется постановка задач для решения комплексной задачи координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ.

В роли объекта управления выступает БПЛА многороторного типа (квадрокоптер), далее БПЛА. Особенностью разрабатываемых и исследуемых в настоящей работе АКУ является отсутствие явной зависимости от конкретной математической модели объекта и системы управления БПЛА. Необходимость в ней возникает лишь на этапе моделирования движения БПЛА для получения опорных ППУ и траектории движения БПЛА во времени. Предполагается, что БПЛА способен к движению вдоль заданных ПТ и отслеживанию заданных траекторий во времени с известной точностью; способен к зависанию на месте. Задача управления движением БПЛА является известной и считается решенной.

**Постановка задачи формации группы БПЛА.** Формация группы БПЛА – множество желаемых положений центров масс БПЛА в трехмерном пространстве. Известны положение и скорость центра масс БПЛА в каждый момент времени  $\bar{X}(t) = (x(t), y(t), z(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t))^T$ . Известно состояние группы из  $N$  БПЛА в каждый момент времени  $\mathbf{X}(t) = [\bar{X}_1(t), \dots, \bar{X}_N(t)]^T$ . Требуется перевести группу БПЛА из начального состояния  $\mathbf{X}(t_0)$  (начальной формации) в желаемое терминальное  $\mathbf{X}(t_f)$  (конечную формацию) за время  $t \in [t_0, t_f]$ ,  $t_f$  не закреплен. Конечную формацию определяет и задает оператор группы БПЛА. В начальный момент времени БПЛА зависит в начальном положении. В терминальном состоянии БПЛА должны стабилизировать назначенные конечные положения. Формация считается сформированной, если достигнуты требования к точности формации  $|\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}(t_f)| \leq \mathbf{X}_\varepsilon$ . ПТ БПЛА, соединяющие начальные и конечные положения, предполагаются известными и кусочно-непрерывными.

**Постановка задачи обеспечения ТБ.** Для обеспечения ТБ группы БПЛА необходимо обеспечить требуемые расстояния между БПЛА и статическими препятствиями. Схематично задача обеспечения ТБ показана на Рис. 1. В настоящей работе задача о планировании безопасных ПТ с точки зрения статических препятствий считается известной и является решенной.

Таким образом, в настоящей работе задача обеспечения ТБ движения БПЛА сводится к устранению коллизий во времени при движении БПЛА по опорным ПТ.

**Постановка задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА в формации и определения очередности движения БПЛА.** Проблема реализуемости назначений возникает в формациях, для которых занятие одним из БПЛА конечного положения блокирует возможность безопасного движения других БПЛА. Данная проблема наиболее актуальна для плотных близко расположенных формаций; при применении группы БПЛА в условиях ограниченного пространства при наличии препятствий; при слишком длительном или невозможном планировании альтернативных ПТ; для формаций с несколькими оптимальными назначениями. В работе демонстрируются примеры формаций с несколькими нереализуемыми и реализуемыми назначениями.

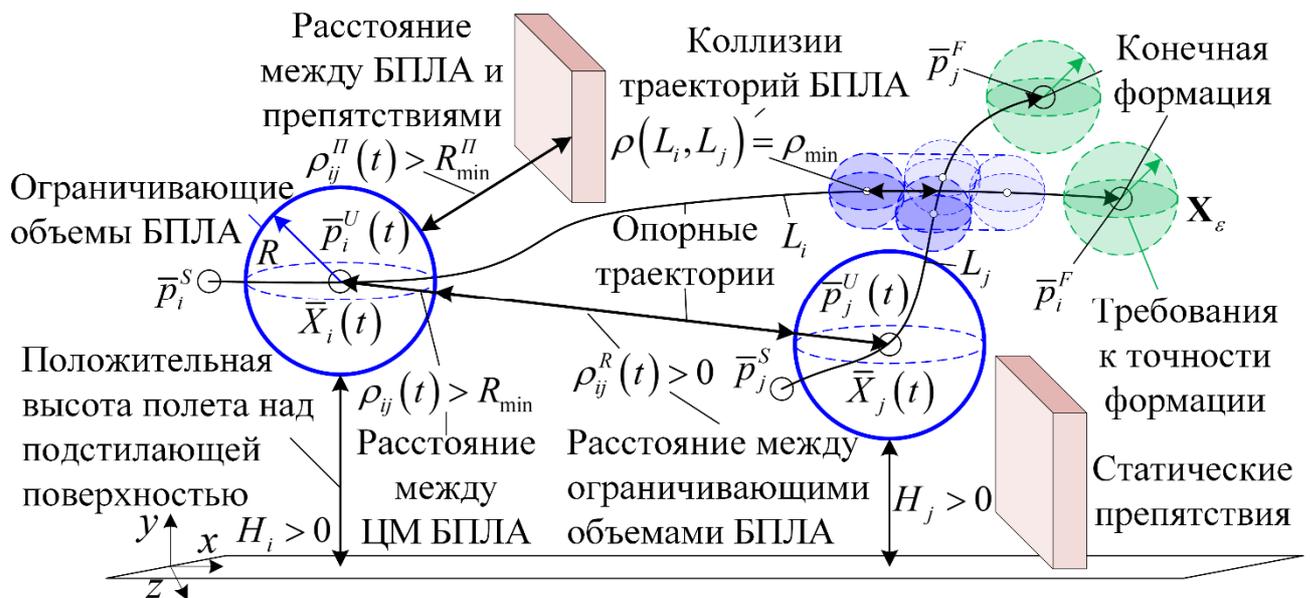


Рис. 1. Задача обеспечения траекторной безопасности

Производится модификация классической задачи о назначениях добавлением условия реализуемости назначений: должна существовать очередность движения БПЛА из начальных положений в назначенные конечные, не допускающая нахождение переместившегося БПЛА на траектории еще не переместившегося. Очередность движения задается через назначение приоритетов движения БПЛА  $\Pi = [\pi_1, \dots, \pi_N]$ . Решение данной задачи – назначенные БПЛА целевые положения и приоритеты  $\Pi$  такие, что суммарная длина назначенных ПТ минимальная и назначения реализуемы.

**Постановка задачи координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ как задача оптимизации.** Требуется перевести БПЛА из начальных положений в конечные с нулевой терминальной скоростью:

$$J = \sum_{i=1}^N \left( \alpha \left( (x_n^F - x_i(t_f))^2 + (y_n^F - y_i(t_f))^2 + (z_n^F - z_i(t_f))^2 \right) + \beta \left( (\dot{x}_i(t_f))^2 + (\dot{y}_i(t_f))^2 + (\dot{z}_i(t_f))^2 \right) \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\alpha = 1 \text{ м}^{-2}$ ;  $\beta = 1 \text{ м}^{-2} \text{ с}^2$ ;  $\bar{p}_n^F = (x_n^F, y_n^F, z_n^F)$  – назначенное  $n$ -ое конечное положение для  $i$ -го БПЛА. Наложены ограничения в виде требований к обеспечению ТБ.

В функционале качества (1) в явном виде отсутствует управление. В настоящей работе предлагается координированное управление группой БПЛА в виде безопасных желаемых положений (БЖП) БПЛА  $\bar{p}_i^B(t)$  на назначенных ПТ:

$$\begin{aligned} \bar{U}_i(t) = \bar{p}_i^B(t) &= [x_i^B(t), y_i^B(t), z_i^B(t)], \\ \bar{p}_i^B : \rho(\bar{p}_i^B(t), p_j(t)) &\geq \rho_{\min}, \bar{p}_i^B(t) \subset L_i, p_j(t) \subset L_j, \forall t \in [0, t_f]. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, координированное управление заключается в обеспечении безопасного движения БПЛА во времени по заданным ПТ из положений в начальной формации в назначенные положения в конечной формации.

**Во второй главе** разрабатываются АКУ группой БПЛА с обеспечением ТБ.

**Декомпозиция координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ.** Для решения комплексной задачи формации группы БПЛА с обеспечением ТБ предлагается схема, состоящая из четырех этапов.

**Этап 1.** Выполнить планирование безопасных траекторий в пространстве.

**Этап 2.** Решить задачу об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА в формации и определить очередность движения.

**Этап 3.** Выявить и устранить коллизии.

**Этап 4.** Реализовать безопасное движение БПЛА.

Задачи этапов 1 и 4 предполагаются известными и решенными, задачи этапов 2 и 3 решаются и исследуются в настоящей работе.

**Проектирование системы управления группой БПЛА с обеспечением ТБ.** Для управления группой БПЛА проектируется и используется централизованная иерархическая структура системы управления (СУ), состоящая из СУ группой БПЛА, СУ движением (СУД) БПЛА, системы стабилизации (ССТ) БПЛА, БПЛА, датчиков и системы телеметрии и измерений, образующих уровни координации, управления, регулирования, объекта управления, датчиков и информационной подсистемы. Функциональная схема этой СУ показана на Рис. 2.

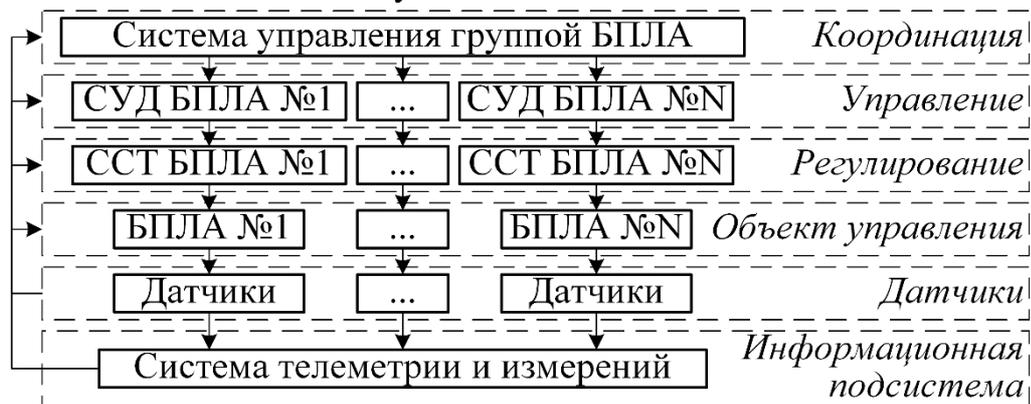


Рис. 2. Функциональная схема централизованной иерархической структуры системы автоматического управления группой БПЛА

СУ группой БПЛА выполняет координацию для обеспечения ТБ формации группы БПЛА, решает задачи планирования безопасных ПТ; определения реализуемых назначений и очередности движения БПЛА; формирования управления БПЛА группы. СУД БПЛА реализует безопасное движение БПЛА. ССТ решает одноименную задачу. Датчики БПЛА и система телеметрии и измерений формируют обратную связь по состоянию для вышестоящих уровней.

**Решение задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА в формации и определения очередности движения.** Для решения данной задачи разрабатывается алгоритм решения задачи об оптимальных реализуемых назначениях БПЛА целевых положений в формации и определения очередности движения БПЛА. Входные данные алгоритма: начальная и конечная формации; ПТ между точками начальной и конечной формаций; требования к безопасному расстоянию. Выходные данные – оптимальные реализуемые назначения целевых положений БПЛА и очередность движения (приоритеты) БПЛА. Алгоритм состоит из трех этапов.

**Этап 1.** Сформировать матрицу стоимости по входным данным.

**Этап 2.** Решить классическую задачу о назначениях.

**Этап 3.** Проверить реализуемость назначений и определить очередность движения. Если назначения нереализуемы, то увеличить стоимость блокирующего назначения (установить бесконечной) в матрице стоимости и повторить этапы 2-3.

Для определения очередности движения на этапе 3 используются формальные условия. Условие перемещения – БПЛА может переместиться, если на его ПТ отсутствуют другие БПЛА; условие ожидания – БПЛА ожидает, если на его ПТ находится другой БПЛА в начальном положении; условие блокировки – БПЛА заблокирован, если на его ПТ находится БПЛА в конечном положении. Проверки по условиям выполняются в статике, перемещение БПЛА считается мгновенным.

Разработанный алгоритм позволяет получить оптимальные реализуемые назначения БПЛА целевых положений в формации и определить безопасную очередность движения (приоритеты) БПЛА.

**Решение задачи выявления и устранения коллизий в задаче формации.**

Для выполнения требований к безопасным расстояниям между БПЛА необходимо выявить и устранить коллизии. Условия возникновения коллизий для пары ПТ: в пространстве  $\|\bar{p}_i, \bar{p}_j\| < \rho_{\min}$ , где  $\bar{p}_i = (x_i, y_i, z_i) \in L_i$  – точка на траектории  $i$ -го БПЛА  $L_i$ ;  $\bar{p}_j = (x_j, y_j, z_j) \in L_j$  – точка на траектории  $j$ -го БПЛА  $L_j$ ; во времени  $\|\bar{p}_i(t), \bar{p}_j(t)\| < \rho_{\min}$ , где  $\bar{p}_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t)) \in L_i$  – положение точки на траектории  $i$ -го БПЛА  $L_i$  в момент времени  $t$ ;  $\bar{p}_j(t) = (x_j(t), y_j(t), z_j(t)) \in L_j$  – положение точки на траектории  $j$ -го БПЛА  $L_j$  в момент времени  $t$ .

Вводятся понятия границы безопасного сближения (ГБС), участков безопасного сближения и участков опасного сближения траекторий в пространстве и во времени. Данные понятия схематично показаны на Рис. 3.

Для определения ГБС пары прямолинейных ПТ ставится и решается аналитически задача о нахождении точки, принадлежащей первому отрезку на заданном расстоянии от второго, в виде задачи условной оптимизации.

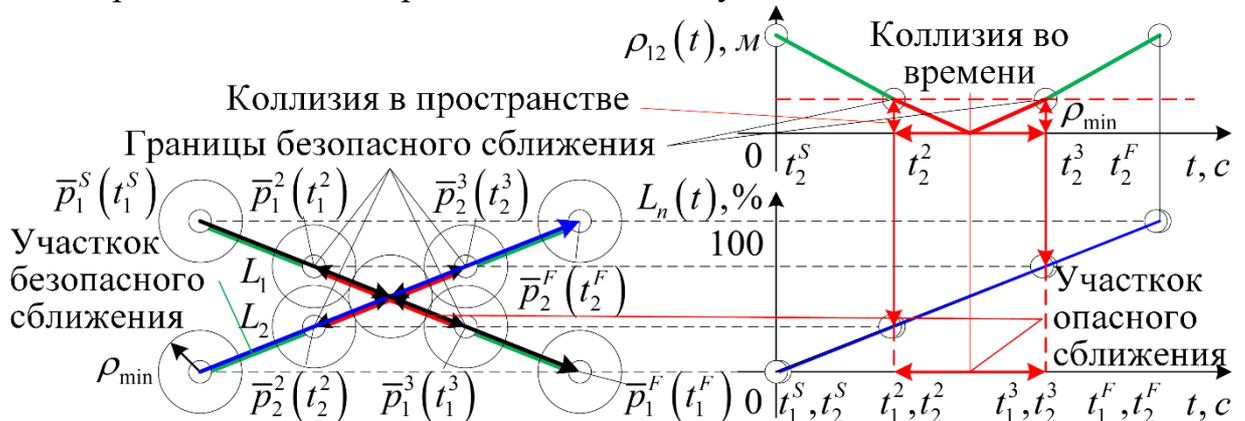


Рис. 3. Схема коллизий и участков сближения траекторий

В работе приводятся примеры определения ГБС для различных ПТ.

**Координированное управление формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления желаемыми положениями БПЛА на ПТ.** Управление (2) с точки зрения функционала качества (1) может быть

сведено к задаче перемещения БПЛА вдоль опорных ПТ в БЖП, расположенные на ПТ как можно ближе к концам траекторий. ТБ обеспечивается выдерживанием безопасных расстояний между ЖП и траекториями с учетом очередности движения – БПЛА с меньшим приоритетом выдерживает расстояние с еще не пройденной частью ПТ БПЛА с большим приоритетом. Вычисленные БЖП поступают в систему управления движением БПЛА для реализации перемещения.

**Постановка задачи определения БЖП БПЛА на ПТ.** Входные данные задачи: реализуемая очередность движения (приоритеты) БПЛА  $\Pi = [\pi_1, \dots, \pi_N]$ , упорядоченное множество назначенных ПТ движения БПЛА  $\mathbf{L} = [L_1, \dots, L_N]$  из начальной формации в конечную. Необходимо обеспечить безопасное расстояние между БЖП БПЛА и траекториями БПЛА с учетом приоритетов:  $\rho(\bar{p}_i^B, L_j) \geq \rho_{\min}$ ,  $\bar{p}_i^B \subset L_i$ ,  $i, j: \pi_i < \pi_j$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ . БЖП БПЛА должны быть как можно ближе к назначенным положениям в конечной формации:  $J^B = \sum_{i \in N} \|\bar{p}_i^B, \bar{p}_n^F\| \rightarrow \min, n: x_{in} = 1$ .

Выходные данные: оптимальные БЖП  $\mathbf{P}^{B*} = [\bar{p}_1^{B*}, \dots, \bar{p}_N^{B*}]$  на ПТ движения БПЛА.

Для получения аналитического решения задачи определения БЖП БПЛА на ПТ в классе кусочно-линейных ПТ разрабатывается следующий алгоритм.

**Алгоритм определения БЖП на кусочно-линейных ПТ.** Входные данные алгоритма: реализуемая очередность движения (приоритеты) БПЛА; назначенные кусочно-линейные ПТ движения БПЛА. Выходные данные – БЖП на кусочно-линейных ПТ. Данный алгоритм состоит из трех этапов. На первом этапе для каждой ломаной  $L_i$  найти звено  $l_i^m$ , расположенное на небезопасном расстоянии от звеньев  $l_j^k$  других ломаных  $L_j$   $\rho(l_i^m, l_j^k) < \rho_{\min}$ ,  $\pi_i < \pi_j$ . На втором этапе, если все звенья ломаной  $L_i$  расположены на безопасном расстоянии  $\rho_{\min}$  от звеньев более приоритетной ломаной  $L_j$   $\rho(l_i^m, l_j^k) \geq \rho_{\min}$ , то БЖП совпадает с конечной точкой траектории  $\bar{p}_i^B = \bar{p}_i^F$ . Иначе перейти к следующему этапу. На третьем этапе в найденных парах звеньев  $l_i^m$  и  $l_j^k$  на звене с меньшим приоритетом  $l_i^m$  определить точку  $\bar{p}_i^B$ , находящуюся на заданном безопасном расстоянии  $\rho_{\min}$  от звена  $l_j^k$  и расположенную ближе к началу звена  $l_i^m$ .

Разработанный алгоритм позволяет решить аналитически поставленную задачу определения БЖП на кусочно-линейных ПТ. В работе демонстрируется пример применения данного алгоритма для определения БЖП на трех ПТ.

**Алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления ЖП БПЛА на пространственных траекториях.** Управление формацией группы БПЛА осуществляется как итеративный процесс по определению БЖП с учетом очередности движения БПЛА и перемещения в них БПЛА до тех пор, пока формация не будет реализована с требуемой точностью. На Рис. 4 представлена блок-схема алгоритма.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления ЖП БПЛА на ПТ

Разработанный алгоритм позволяет решить поставленную задачу координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ.

**Координированное управление формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ.** Управление формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ЖП БПЛА на пространственных траекториях сводится к задаче ППУ перемещением БПЛА вдоль назначенных опорных ПТ в БЖП в заданные моменты времени. Вычисленное ППУ поступает в СУД БПЛА в виде желаемой траектории движения во времени для реализации формации. ТБ обеспечивается выдерживанием безопасных расстояний между БПЛА за счет изменения времени прохождения участков опасного сближения траекторий с учетом очередности движения (приоритетов) БПЛА.

**Параметризация ПУ формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде желаемых положений БПЛА на ПТ.** Параметризация ПУ заключается в дискретизации ПТ на точки с указанием моментов времени их прохождения.

ПУ желаемыми положениями группы БПЛА на назначенных ПТ имеет вид:

$$\mathbf{U}^P(t) = [\mathbf{U}_1^P(t), \dots, \mathbf{U}_k^P(t), \dots, \mathbf{U}_N^P(t)],$$

$$\mathbf{U}_k^P(t) = \bar{p}_k^d(t) = [x_k^d(t), y_k^d(t), z_k^d(t)], \quad k = \overline{1, N} \quad \bar{p}_k^d(t) \subset L_k,$$

где  $\mathbf{U}_k^P$  – ПУ желаемым положением  $\bar{p}_k^d(t)$   $k$ -го БПЛА на назначенной ПТ  $L_k$ ;  $N$  – количество БПЛА;  $t$  – момент времени прохождения желаемого положения  $\bar{p}_k^d(t)$ .

ППУ желаемыми положениями группы БПЛА на траекториях задано моментами времени прохождения опорных точек ПТ каждым БПЛА:

$$\mathbf{U}^T = [\mathbf{U}_1^T, \dots, \mathbf{U}_i^T, \dots, \mathbf{U}_N^T], \quad \mathbf{U}_k^T = [t_k^1, \dots, t_k^i, \dots, t_k^{n_k}], \quad k = \overline{1, N}, \quad i = \overline{1, n_k},$$

где  $\mathbf{U}_k^T$  – ППУ для  $k$ -го БПЛА в виде моментов времени  $t_i^k$  прохождения опорных точек  $k$ -ой траектории;  $t_k^i$  – момент времени прохождения  $i$ -ой точки  $k$ -ой траектории  $\bar{p}_k^i$ ;  $n_k$  – количество точек ППУ для  $k$ -ой траектории  $L_k$ .

Опорное ППУ без обеспечения ТБ на основе синтезированной траектории движения каждого БПЛА во времени без координации с остальными БПЛА:

$$\mathbf{U}^{T_0} = [\mathbf{U}_1^{T_0}, \dots, \mathbf{U}_k^{T_0}, \dots, \mathbf{U}_N^{T_0}], \quad \mathbf{U}_k^{T_0} = [t_k^{1_0}, \dots, t_k^{i_0}, \dots, t_k^{n_{k0}}], \quad k = \overline{1, N}, \quad i = \overline{1, n_k}.$$

где  $\mathbf{U}_k^{T_0}$  – опорное ППУ без обеспечения ТБ для  $k$ -го БПЛА в виде моментов времени  $t_i^{k_0}$  прохождения опорных точек  $k$ -ой назначенной траектории  $L_k$ .

Необходимо определить значения параметров ППУ группой БПЛА, обеспечивающего минимизацию длительности прохождения траекторий с учетом ограничений на моменты времени прохождения опорных точек траектории:

$$J = \sum_{k=1}^N t_k^{n_k} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$t_k^i \geq t_k^{i_0}, \quad (4)$$

$$t_k^{i+1} - t_k^i \geq t_k^{i+1_0} - t_k^{i_0}, \quad (5)$$

$$t_k^i \geq t_k^{i_0} + t_m^{j+1} - t_m^j, \quad t_k^i : \rho(\bar{p}_k^i(t_k^i), \bar{p}_m^j(t_m^j)) \leq \rho_{\min}, \quad \pi_k < \pi_m, \quad k, \quad (6)$$

где  $J$  – функционал качества;  $t_k^i$  – момент времени прохождения  $i$ -ой точки  $k$ -ой траектории;  $t_k^{i_0}$  – опорный момент времени прохождения  $i$ -ой точки  $k$ -ой траектории;  $t_k^{i+1} - t_k^i$  – разность моментов времени прохождения текущей и следующей за ней точек на  $k$ -ой траектории;  $m = \overline{1, N}$ ,  $i = \overline{1, n_k}$ ,  $j = \overline{1, n_m}$ .

Опорные точки выбираются последовательно из точек границ безопасного сближения траекторий с учетом очередности движения (приоритетов) БПЛА.

**Алгоритм определения параметров ППУ желаемыми положениями БПЛА с обеспечением ТБ на основе линейного программирования.** Для определения параметров ППУ возможно сформировать описание в виде основной задачи линейного программирования (ОЗЛП) и применить следующий алгоритм.

Функционал качества (3) в виде линейной целевой функции  $J = f(\mathbf{T}) = \sum_{j=1}^{N_t} t_j \rightarrow \min$ , где  $\mathbf{T} = [t_1, \dots, t_j, \dots, t_n]$  – параметры ППУ со сквозной индексацией;  $n$  – количество параметров ППУ;  $t_j$  – желаемый момент времени прохождения  $j$ -ой точки со сквозной индексацией;  $N_t$  – количество переменных. Условия (4)-(6) со сквозной индексацией:  $t_j \geq t_j^0$ ,  $t_{j+1} - t_j \geq t_{j+1}^0 - t_j^0$ ,  $t_j \geq t_j^0 + t_{n+1} - t_n$ ,  $t_n : \rho(\bar{p}_j, \bar{p}_n) \leq \rho_{\min}$ ,  $\bar{p}_j \in L_j$ ,  $\bar{p}_n \in L_n$ ,  $\bar{p}_n$ ,  $j \neq n$ ,  $\pi_j < \pi_n$ .

Входные данные алгоритма: назначенные ПТ движения БПЛА; реализуемая очередность движения (приоритеты) БПЛА; требуемое безопасное расстояние между БПЛА. Выходные данные: ППУ желаемыми положениями БПЛА; безопасные траектории движения БПЛА во времени. Алгоритм состоит из шести

этапов. На первом этапе определяются ГБС назначенных ПТ. На втором этапе формируется структура опорного ППУ на основе определенных ГБС. На третьем этапе определяются параметры опорного ППУ в виде моментов времени прохождения опорных точек. На четвертом этапе из параметров опорного ППУ формируется ОЗЛП. На пятом этапе решается ОЗЛП для определения параметров безопасного ППУ. На шестом этапе выполняется моделирование движения группы БПЛА с применением полученного ППУ и проверяется выполнение требований ТБ. Если требования не выполнены, то повторяются этапы 3-6 с полученным ППУ. Если требования выполнены, то получены ППУ желаемыми положениями БПЛА и безопасные траектории движения БПЛА во времени.

В работе демонстрируется пример определения параметров ППУ для пары опорных прямолинейных ПТ с применением данного алгоритма.

**Алгоритм определения параметров ППУ желаемыми положениями БПЛА с обеспечением ТБ на основе сетевого планирования.** ППУ желаемыми положениями БПЛА с обеспечением ТБ может быть представлено в виде сетевого графика прохождения участков опасного сближения траекторий БПЛА во времени. Для определения его параметров на основе сетевого планирования формируется следующий алгоритм. Входные данные: назначенные ПТ движения БПЛА; реализуемая очередность движения (приоритеты) БПЛА; требуемое безопасное расстояние между БПЛА; математическая модель траекторного движения БПЛА. Выходные данные: ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ; безопасные траектории движения БПЛА во времени. Алгоритм состоит из шести этапов.

На первом этапе определяются ГБС ПТ. На втором этапе формируется структура ППУ из ГБС ПТ. На третьем этапе определяются параметры ППУ в виде моментов времени прохождения опорных точек ПТ. На четвертом этапе для каждой ПТ в порядке уменьшения приоритета движения БПЛА выявляются участки опасного сближения во времени с ПТ с большим приоритетом. На пятом этапе для каждого выявленного участка опасного сближения сдвигаются моменты времени прохождения границ участка и последующих опорных точек так, чтобы движение БПЛА с меньшим приоритетом начиналось только после того, как этот участок преодолел БПЛА с большим приоритетом. На шестом этапе выполняется моделирование применения полученного ППУ и проверяется выполнение требований ТБ. Если требования не выполнены, то повторяются этапы 3-6 с ППУ, полученном на шестом этапе. Если требования выполнены, то получены ППУ желаемыми положениями БПЛА и безопасные траектории движения во времени.

В работе демонстрируется пример применения данного алгоритма для определения параметров ППУ для трех кусочно-линейных ПТ.

**Алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ.** Управление формацией группы БПЛА осуществляется как процесс планирования и реализации безопасных траекторий движения БПЛА во времени с применением разработанного алгоритма. Входные данные алгоритма: начальная и конечная формации; требования к безопасным расстояниям. Результат выполнения – реализованная формация. Алгоритм состоит из нескольких этапов.

**Этап 1.** Синтезировать ПТ между всеми положениями в начальной и

конечной формациях с учетом требований к безопасному расстоянию.

**Этап 2.** Определить реализуемые назначения и очередность движения БПЛА.

**Этап 3.** Назначить ПТ движения БПЛА.

**Этап 4.** Определить границы безопасного сближения ПТ БПЛА.

**Этап 5.** Сформировать структуру ППУ желаемыми положениями БПЛА на основе границ безопасного сближения ПТ БПЛА.

**Этап 6.** Определить параметры ППУ с применением разработанного алгоритма на основе линейного программирования или сетевого планирования.

**Этап 7.** Синтезировать безопасные траектории движения БПЛА во времени с применением полученного ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ.

**Этап 8.** Реализовать безопасные траектории движения БПЛА во времени.

Разработанный алгоритм координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ позволяет решить поставленную задачу формации.

**В третьей главе** осуществляется разработка ПО: приводятся функциональные требования к СУ группой БПЛА; состав ПО системы управления группой БПЛА; этапы разработки; выполняется разработка ПО моделирования разработанных алгоритмов решения поставленных задач. Разработан графический интерфейс для автоматизации проведения вычислительных экспериментов; настройки и редактирования моделей БПЛА, формаций, сценариев моделирования на базе игрового движка Unreal Engine на языке программирования C++.

**В четвертой главе** выполняются вычислительные эксперименты и многофакторный анализ эффективности и быстродействия разработанных АКУ.

Приводятся результаты исследования длительности решения задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА в формации и определения очередности движения, подтверждающие возможность получения решения менее чем за 1 с для группы из 32 БПЛА при наличии и для группы из 1024 БПЛА при отсутствии нереализуемых назначений. На Рис. 5 показаны результаты сравнения длительности назначения целевых положений.

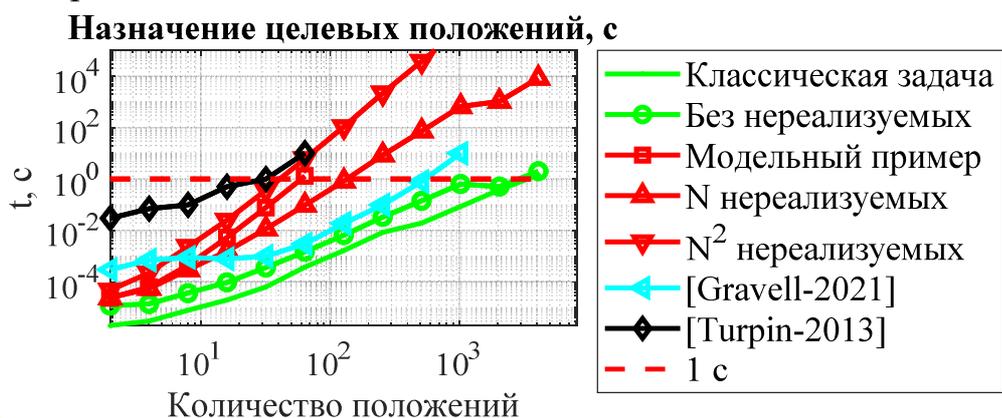


Рис. 5. Сравнение длительности назначения целевых положений

На Рис. 5 оценкой снизу прогнозируемой длительности получения реализуемых назначений является длительность одного решения классической задачи о назначениях и проверки реализуемости при отсутствии нереализуемых назначений («без нереализуемых»); оценкой сверху –  $N^2$  длительности решения и проверки (« $N^2$  нереализуемых»). Модельный пример подтверждает возможность

существования от  $N$  до  $N^2$  нереализуемых назначений.

Приводятся результаты исследования длительности определения БЖП на прямолинейных (не менее 4096 ПТ менее чем за 1 с) и кусочно-линейных ПТ (не менее 2048 ПТ из 3 участков и не менее 256 ПТ из 7 участков менее чем за 1 с). Достоинства разработанного АКУ в виде закона управления ЖП БПЛА: возможность применения к БПЛА, способным к «зависанию» в заданном желаемом положении и следованию вдоль ПТ; высокое быстродействие синтеза управления вследствие аналитического определения БЖП БПЛА на кусочно-линейных ПТ.

Приводятся результаты исследования длительности определения параметров ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ в зависимости от количества прямолинейных ПТ и опорных точек на ПТ для выработки безопасных траекторий движения БПЛА во времени – не менее 3000 ПТ из 4 опорных точек и не менее 256 ПТ из 32 опорных точек за 1 с. На Рис. 6 показаны результаты сравнения длительности устранения коллизий в зависимости от количества прямолинейных ПТ. Быстродействие разработанного алгоритма определения параметров ППУ на основе СП на порядок превосходит алгоритм на основе ЛП; разработанного АКУ в виде закона управления ЖП БПЛА на ПТ – превосходит известные аналоги вследствие аналитического определения БЖП. Результаты подтверждают возможность применения разработанного АКУ формацией группы из 32 БПЛА с обеспечением ТБ в виде ЗУ ЖП БПЛА в режиме реального времени.

Демонстрируются и сравниваются результаты моделирования применения разработанных АКУ формацией группы БПЛА со способами устранения коллизий в пространстве для пары пересекающихся ПТ в зависимости от дальности перелета (размеров формации). В модельном примере с увеличением дальности перелета отличия эффективности применения разработанных АКУ уменьшаются нелинейно по сравнению с движением без обеспечения ТБ: на дальностях от 5 м до 25 м отличия по длительности реализации формации и энергетическим затратам уменьшаются от 293% до 50%, от 25 м до 100 м – от 50% до 10%, от 100 м – не более 10%. В обоих АКУ наибольшие затраты уходят на поддержание высоты и пропорциональны длительности реализации формации.

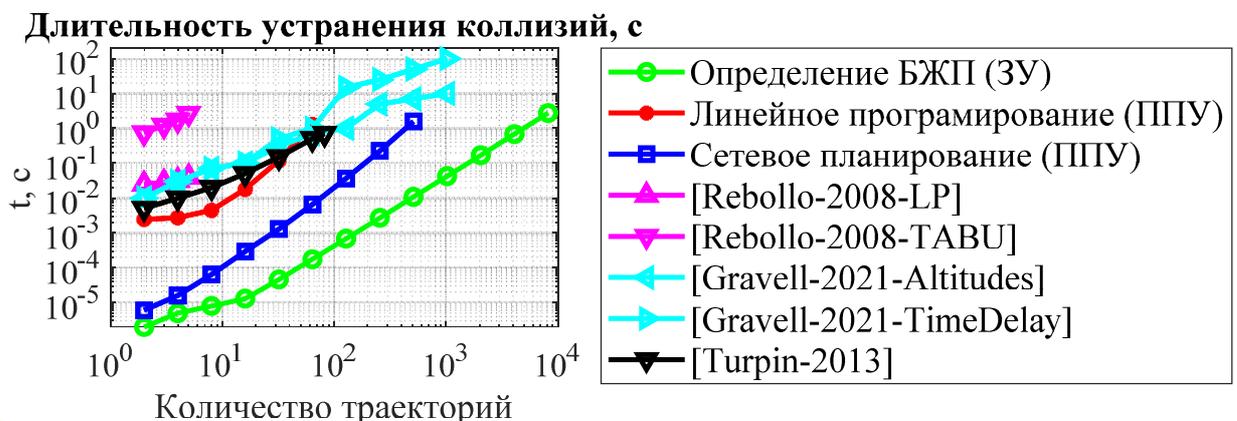


Рис. 6. Сравнение длительности устранения коллизий в зависимости от количества прямолинейных ПТ и способов обеспечения ТБ

На Рис. 7 показана зависимость нормированной длительности реализации формации для различных дальностей и используемых способов обеспечения ТБ.

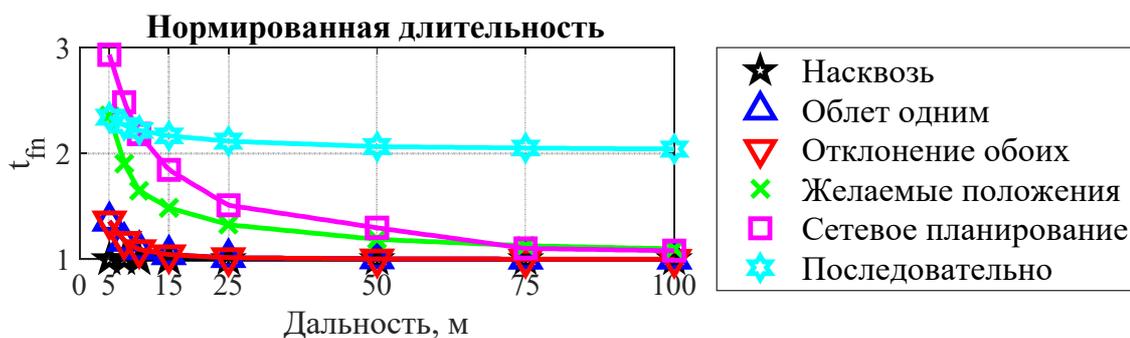


Рис. 7. Нормированная длительность реализации формации в зависимости от дальности и способов обеспечения траекторной безопасности

Достоинствами, выделяющими разработанные АКУ формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ среди известных на данный момент алгоритмов решения задачи формации, являются: прогнозируемая длительность получения решения при его существовании; простота описания и реализации управления; универсальность разработанных алгоритмов; вычислительная масштабируемость решения; возможность аналитического определения БЖП и опорных точек ППУ.

Рассматриваются сценарии возможного применения разработанных АКУ формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ для решения практических задач выполнения одновременной многоракурсной съемки и наблюдения, построения фазированных антенных решеток; проводится анализ типовых ситуаций, влияния внешних возмущений, неисправностей и отказов на их применение.

**В заключении** отражены основные результаты работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выявлена проблематика и подтверждена недостаточность решения только классической задачи о назначениях целевых положений БПЛА в формации из-за возможности существования нереализуемых и реализуемых назначений с одинаковым значением целевой функции стоимости назначений.

2. Разработаны постановка и алгоритм решения задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА и очередности движения БПЛА в задаче формации. Данный алгоритм позволяет получить решение для формации с прямолинейными ПТ менее чем за 1 с для группы из 1024 БПЛА при отсутствии нереализуемых назначений и для 32 БПЛА – при их наличии.

3. Разработан АКУ формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде закона управления желаемыми положениями БПЛА на ПТ. АКУ отличается от известных алгоритмов возможностью аналитического определения безопасных желаемых положений БПЛА на кусочно-линейных траекториях. Вследствие этого реализация данного алгоритма позволяет получить решение для формации с прямолинейными ПТ менее чем за 1 с для группы из 4096 БПЛА.

4. Разработан АКУ формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ в виде ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ на основе сетевого планирования. Отличается от известных алгоритмов ППУ аналитическим определением опорных точек кусочно-линейных ПТ движения БПЛА и на порядок большим быстродействием – позволяет определить параметры для 3000 ПТ из 4 опорных точек и 256 ПТ из 32 опорных точек менее чем за 1 с.

5. Разработанные АКУ формацией группы БПЛА в виде закона управления и

ППУ желаемыми положениями БПЛА на ПТ решают поставленную задачу координированного управления формацией группы БПЛА с обеспечением ТБ и удовлетворяют требованиям, предъявленным к решению задачи. В модельном примере с увеличением размеров формации отличие эффективности реализации формации по критериям быстродействия и энергетических затрат стремится к идеальной эффективности (без обеспечения ТБ) – отличие по обоим критериям уменьшается нелинейно вплоть до 10% на дистанциях от 100 м.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

В качестве расширения темы предлагается применение разработанных АКУ для управления формацией мобильных робототехнических систем, проработка возможности применения к управлению группой БПЛА самолетного и вертолетного типов, а также интеграция разработанного программно-алгоритмического обеспечения с существующими и перспективными системами.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Карпунин А.А., Титков И.П. Принцип иерархического уравнивания по Штакельбергу в задаче управления группой БПЛА // Будущее машиностроения России: сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (Москва, 24–27 сентября 2014 г.). 2014. С. 447–451. (0,13 п.л. / 0,06 п.л.)

2. Титков И.П. Применение машинного зрения в задачах координированного управления группой БПЛА в плоскости // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 11. 12 с. (0,54 п.л.)

3. Титков И.П. Система дистанционного автоматического управления БПЛА на основе технического зрения // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2015. № 12. 8 с. (0,47 п.л.)

4. Программный модуль идентификации БПЛА в составе группы: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ / И. П. Титков. № 2018663278. Дата регистрации 24.10.2018.

5. Карпунин А.А., Титков И.П. Система идентификации и сопровождения БПЛА в группе на основе системы технического зрения. Техническое зрение в системах управления – 2019: сб. тез. докл. научно-техн. конф. (Москва, 12-13 марта 2019 г.). 2019. С. 27-28. (0,08 п.л. / 0,04 п.л.)

6. Karpunin A.A., Titkov I.P. Evaluation of the Influence of Cross-connections Accounting in the Simplified Mathematical Model of the Quadrotor Motion in Three-dimensional Space // Procedia Computer Science. Vol. 150, 2019. P. 663-670. DOI:10.1016/j.procs.2019.02.040. (0,23 п.л. / 0,11 п.л.)

7. Карпунин А.А., Титков И.П. Выявление и методы устранения коллизий в задаче построения формации группы беспилотных летательных аппаратов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: VII Всерос. научно-практическая конф. (Москва, 1-2 апреля 2020 г.): сб. тр. 2021. С. 196-202. (0,28 п.л. / 0,14 п.л.)

8. Titkov I.P., Karpunin A.A. Collision-Aware Formation Assignment of Quadrotors // Procedia Computer Science. Vol. 186, 2021. P. 727-735. DOI: 10.1016/j.procs.2021.04.195. (1,19 п.л. / 0,59 п.л.)

9. Титков И.П., Карпунин А.А. Выявление коллизий и определение границ безопасного сближения траекторий группы беспилотных летательных аппаратов на

основе условной оптимизации // Будущее машиностроения России: сб. докл. четырнадцатой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с международ. участием) (Москва, 21-24 сентября 2021 г.). 2021. С. 196-202. (0,33 п.л. / 0,16 п.л.)

10. Титков И.П., Карпунин А.А. Решение задачи об оптимальных реализуемых назначениях целевых положений БПЛА и определении очередности движения в задаче формации с обеспечением траекторной безопасности // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 4 (118). С. 95-109. DOI:10.23670/IRJ.2022.118.4.016. (1,4 п.л. / 0,7 п.л.)

11. Титков И.П., Карпунин А.А. Координированное управление формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности в виде желаемых положений на пространственных траекториях (Ч. 1) // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2022. Т. 20. № 4. С. 25-35. DOI: 10.18127/j20700814-202204-03. (0,71 п.л. / 0,35 п.л.)