

Зау Хтет Наинг

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМЫ И
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
СТОЛКНОВЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидат технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель:

Бердонос Виктор Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Официальные оппоненты:

Карпов Александр Иванович,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник лаборатории физико-химической механики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск

Доррер Георгий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-управляющих систем Института информатики и телекоммуникаций Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,
г. Красноярск

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
г. Уфа

Защита состоится «16» марта 2020 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 999.055.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр.Ленина, д.27, ауд.201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте <http://sovnet.knastu.ru>.
Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета: Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.055.04, e-mail: diss@knastu.ru.

Автореферат разослан «___» января 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент

Ю. Г. Егорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В начале XX в. появились новые беспилотные устройства: лодки, автомобили самолёты. В девяностые годы эти устройства начали активно развиваться, стимулом к их развитию послужило традиционное для всех пионерских систем военное применение. Первоначально беспилотные летательные аппараты (БПЛА) использовались в разведывательных целях. С начала XXI века БПЛА стали активно использоваться и в гражданских целях. В настоящее время количество возможных сфер применений БПЛА приближается к нескольким сотням. Объём производства и реализации БПЛА растёт в геометрической прогрессии. По разным оценкам к 2025 году БПЛА будет выпущено на сумму от 10 до 15 млрд. долларов в год. Соответственно, можно предположить, что количество БПЛА будет неуклонно увеличиваться (до миллиона в год) и к 2030 году встанет серьёзная проблема их взаимодействия в едином воздушном пространстве.

С теоретической точки зрения актуальность темы определяется недостаточным уровнем исследований, касающихся алгоритмического обеспечения взаимодействия БПЛА, принадлежащих разным собственникам. Современные системы управления БПЛА, как правило, не содержат развитых автоматизированных инструментов оценивания окружающей воздушной обстановки и предотвращения столкновений в воздухе.

С практической точки зрения актуальность темы исследования объясняется следующим: БПЛА всё чаще используются как региональными и муниципальными органами власти, так и различными коммерческими структурами и предотвращение столкновений в воздухе позволит более эффективно их использовать. При этом управление взаимодействием разнотипных БПЛА позволит не только предотвратить столкновения в воздухе, но и выработать оптимальную траекторию движения БПЛА с точки зрения достижения целей за минимальное время с минимальной затратой ресурсов.

Значительный вклад в разработку теоретических и практических основ в области предотвращения столкновений летательных аппаратов внесли советские и российские учёные: Антонов В.О., Воропаев Н.П., Иноземцев Д.П., Шихмагомедова С.М.; в области технологии автоматического зависимого наблюдения-вещания – Фальков Э.Я. и др. Среди зарубежных авторов наиболее известны работы A. Raimundo, D. Peres, A. Masieroa, A. Al-Kaff, F. García, B. Cerit, Bin Fang, C. Pasaoglu, D. G. Fasanoa, H. Findi, I. Mahjri, J. Verstraeten, L. R. Newcome, I. Lenz, M. Melega, L. Mejias, I. Campoy, L. Merino, T. Merz, F. Kendoul, A. Moses, R. Murphy, O. Cetin, Phuong D. H. Nguyen, P. Pourbaba, K. S. Pratt, R. G. Braga, V. Cichell.

Все БПЛА делятся на два больших класса: «крыло» и «вертолёт», разнообразные коптеры (квадрокоптеры, октокоптеры и так далее) относятся к вертолётному типу. И если БПЛА вертолётного типа могут «зависать» в некоторой точке пространства, то БПЛА типа «крыло» должны обязательно двигаться с некоторой минимальной скоростью. Кроме того, массо-энергетические характеристики БПЛА ограничивают возможности для их манёвра.

Целью диссертационной работы является разработка моделей и алгоритмов и их реализация для предотвращения столкновений беспилотных летательных аппаратов между собой, основанных на скоростном подходе.

Задачи исследования:

- Выполнить анализ существующих методов предотвращения столкновений БПЛА.
- Разработать математическую модель обнаружения потенциально опасных динамически-движущихся объектов, основанную на скоростном подходе.
- Разработать алгоритм оценки возможности столкновения, по особенностям и характеристикам поведения этих объектов.
- Разработать алгоритмы расчёта параметров БПЛА для уклонения от столкновения.
- Реализовать разработанные алгоритмы в программном комплексе для моделирования движения БПЛА и их визуального отображения.
- Проверить адекватность разработанных алгоритмов путём прямого математического моделирования.

Научная новизна

1. Предложена новая математическая модель динамически меняющегося взаиморасположения беспилотных летательных аппаратов, позволяющая оценить параметры, применение которых позволяет предотвращать столкновения беспилотных летательных аппаратов, отличающаяся возможностью получения результатов в аналитическом виде.

2. Предложен новый алгоритм определения границ диапазона критических скоростей на основе скоростного подхода, отличающийся возможностью получения значений этих границ в аналитическом виде.

3. Предложен новый алгоритм определения линейного ускорения БПЛА для предотвращения столкновения при скоростном маневре, отличающийся тем, что для расчёта линейного ускорения используются значения границ диапазона критических скоростей, рассчитанных на основе скоростного подхода.

4. Предложен и реализован в программе новый алгоритм повышения эффективности метода Монте-Карло для построения границ зоны взаимодей-

ствия, отличающийся от существующих контекстным сужением области поиска границ.

5. Разработан алгоритм и создан программный комплекс для реализации системы предотвращения столкновений с большим числом, до пятидесяти, беспилотных летательных аппаратов, отличающихся от существующих возможностью реализации скоростного подхода для предотвращения столкновений.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует области исследования специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений» (п. 1 научной новизны), п. 2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей» (п. 2-3 научной новизны), п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» (п. 4 научной новизны), п. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования» (п. 5 научной новизны).

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена возможностью интегрирования программного обеспечения, реализующего вышеперечисленные алгоритмы, основанные на скоростном подходе бортовую вычислительную систему БПЛА. Разработанные алгоритмы позволят БПЛА уклоняться от столкновений с большим числом (не менее пятидесяти) динамических объектов, находящихся в том же воздушном пространстве.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель динамически меняющегося взаиморасположения беспилотных летательных аппаратов, позволяющая оценить параметры, применение которых позволяет исключить столкновения беспилотных летательных аппаратов.

2. Алгоритм определения границ диапазона критических скоростей на основе скоростного подхода.

3. Алгоритм определения линейного ускорения БПЛА для предотвращения столкновения при скоростном маневре.

4. Алгоритм к повышению эффективности метода Монте-Карло для построения границ зоны взаимодействия.

5. Программный комплекс для реализации системы предотвращения столкновений и моделирования взаимного движения до пятидесяти беспилотных летательных аппаратов.

Достоверность результатов исследования определяется применением апробированных математических методов, использованием современных ком-

плексов программ инженерного анализа, а также сравнением полученных численных решений с аналитическими.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con-2018» Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток, 2018 г.);
- «International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018» Томского политехнического университета (г. Томск, 2018 г.);
- международная (заочная) научно-техническая конференция «Достижения и перспективы современной науки» (Казахстан, г. Астана, 2017 г.);
- 47-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (г. Комсомольск-на-Амуре, 2017 г.);
- международная научно-техническая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (г. Комсомольск-на-Амур, 2017 г.).

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах, в том числе в 1 работе в издании, рекомендованном ВАК, в 1 работе в издании, индексируемом в международной базе Scopus, в 1 работе в издании, индексируемом в международной базе Web of Science.

Объём и структура диссертационной работы: диссертация включает в себя введение, три основные главы, заключение, список используемой литературы и три приложение. Объём диссертации составляет 131 страницу. Текст работы содержит 16 таблиц и 36 рисунков. Список литературы включает 124 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности и характеристика работы, сформулированы цель и задачи, указаны методы исследования, представлены основные положения, показана научная новизна и практическая значимость, описана структура работы.

В первой главе рассмотрены различные системы предотвращения столкновений БПЛА как со статическими, так и с динамическими объектами. Проведён анализ систем предотвращения столкновений с динамическими объектами, определены их основные недостатки. Рассмотрены основные технические средства, как некорпоративные, так и корпоративные, оценки положения потенциальных динамических угроз.

Исследователи используют самые разнообразные подходы для решения задачи предотвращения столкновений от алгоритмов быстро расширяющихся случайных деревьев (Changhong Fu, Chin E. Lin) до генетического сетевого программирования с усиленным обучением (M. Melega, L. Mejias). Все эти подходы требуют высокопроизводительных бортовых вычислительных комплексов. Частично эта проблема связана с попытками авторов уклоняться от столкновений путём изменения траекторий движения БПЛА. Микро- и мини БПЛА, для которых проводятся исследования в данной диссертации имеют весьма скромные вычислительные возможности. Использование скоростного подхода [2] основанного на анализе скоростей движения БПЛА, а не траекторий движения, позволяет решить проблему предотвращения столкновений аналитическими, а не итерационными численными методами.

Другая проблема связана с оценкой положения потенциальных динамических угроз. Выделяются две группы систем для такой оценки: некорпоративные и корпоративные. Корпоративные системы позволяют предотвращать столкновения путём взаимодействия со всеми участниками аварийной ситуации. Исследования в этой области включают в себя, помимо разработки алгоритмов, разработку способов обмена информацией, протоколов и стандартов передачи сообщений и так далее. Сообщения могут передаваться с использованием таких технических средств, как: радиоканал, Wi-Fi, мобильная связь (GSM, LTE), автоматическое зависимое наблюдение-вещание (АЗН-В).

Технология автоматического АЗН-В применяется в пилотной гражданской авиации и начала использоваться в БПЛА. АЗН-В, имея стандарт передачи данных GGMM.MMMM по широте (в градусах “G”, минутах “M” и долях минут), gggmm.mmmm по долготе (в градусах “g”, минутах “m” и долях минут), xxxxx по высоте (в “x” футах), для средних широт позволяет получить точность передачи: в 0,18 метра по широте, в 0,11 метра по долготе (на широте 53,85°), и 0,32 метра по высоте. В настоящее время применение этой технологии закреплено стандартами Международной организацией гражданской авиации.

Основная область проводимого исследования: предотвращение столкновений БПЛА с динамическими объектами, в первую очередь – между собой, поэтому была выбрана корпоративная система, а именно, АЗН-В.

Во второй главе приводится разработанная математическая модель взаимного движения БПЛА. Обосновывается возможность линеаризации траекторий движения БПЛА на относительно небольших участках траектории их движения, ограниченных временем поступления сигналов от корпоративной системы передачи текущих координат. Описывается математическая модель взаиморасположения БПЛА, позволяющая оценить параметров, применение которых помогает исключить столкновения БПЛА. Приводятся результаты компью-

терного моделирования взаимного движения БПЛА подтверждающие адекватность полученных моделей.

Система уравнений, описывающая движение БПЛА, в соответствии с моделью аэродинамической системы координат беспилотного летательного аппарата (Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С, Rezaee, Abdollahi) (см. рис.1) выглядит следующим образом (1):

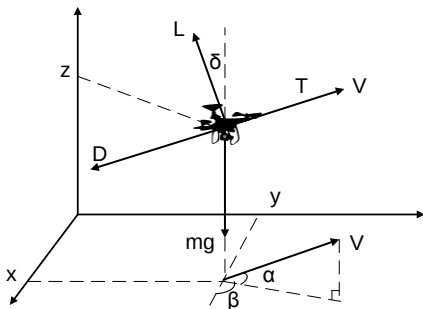


Рисунок 1 – Модель аэродинамической системы координат беспилотного летательного аппарата

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= V \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \\
 \frac{dy}{dt} &= V \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \\
 \frac{dz}{dt} &= V \cdot \sin \alpha \\
 \frac{dV}{dt} &= \frac{T - D}{m} - g \cdot \sin \alpha \\
 \frac{d\alpha}{dt} &= \frac{L \cdot \cos \delta - m \cdot g \cdot \cos \alpha}{m \cdot V} \\
 \frac{d\beta}{dt} &= \frac{L \cdot \sin \delta}{m \cdot V \cdot \cos \alpha}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= V^C \cdot \cos \alpha^C \cdot \cos \beta^C \\
 \frac{dy}{dt} &= V^C \cdot \cos \alpha^C \cdot \sin \beta^C \\
 \frac{dz}{dt} &= V^C \cdot \sin \alpha^C
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

где m – масса БПЛА, D – лобовое сопротивление, T – тяга двигателя, g – ускорение свободного падения, $(dx/dt, dy/dt, dz/dt)$ – вектор скорости БПЛА в 3D пространстве, L – подъёмная сила, α – угол тангажа, β – курсовой угол, δ – угол крена, V – проекция скорости на горизонтальную плоскость.

Учитывая действия стабилизирующих обратных связей, заложенных в автопилотах БПЛА, можно исключить влияние инерционных факторов и, тогда система уравнений преобразуется к выражению (2), где V^C, α^C, β^C проекция скорости и соответствующие углы, обеспечиваемые системой автопилота.

Отметим, что использование системы АЗН-В для передачи информации «своему» о координатах «чужих», позволяет кусочно линеаризовать траектории движения БПЛА, учитывая наличие малого (до 0,5 с) периода обновления.

Математическая формулировка задачи определения параметров БПЛА, позволяющих избежать столкновения выглядит следующим образом. Пусть есть счётное множество пар БПЛА $UAV^P \subseteq UAV \times UAV$, где UAV счётное множество БПЛА $uav \in UAV : uav = \{uav_0, uav_1, \dots, uav_n\}$, причём каждый элемент этого множества представляет собой вектор в многомерном пространстве $uav_i = (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, V_{i0}^G, V_{i0}^V, A_{i0}^G, A_{i0}^V, r_i)$ координат текущего (x_0, y_0, z_0) и предшествующего (x_1, y_1, z_1) положения БПЛА, а также и параметров БПЛА: динамически меняющихся (V^G, V^V, A^G, A^V) и постоянных (r) , где V^G, V^V – горизонтальная и вертикальная скорости БПЛА, A^G, A^V – горизонтальное и вертикальное ускорения БПЛА, r – радиус безопасности БПЛА. Существует подмножество $UAV^{P1} \subset UAV^P$ попарно слетающихся БПЛА, для элементов которого $uav^{P1} = \{uav^P | H^1\}$ выполняется условие H^1 ; кроме того существует подмножество

$UAV^{P2} \subset UAV^{P1}$ попарно слетающихся равновысотных БПЛА, для элементов которого $uav^{P2} = \{uav^{P1} | H^2\}$ выполняется условие H^2 ; далее существует подмножество попарно слетающихся равновысотных потенциально сталкивающихся $UAV^{P3} \subset UAV^{P2}$, для элементов которого $uav^{P3} = \{uav^{P2} | H^3\}$ выполняется условие H^3 . Кроме того, существует множество A^G горизонтальных ускорений одного из БПЛА, входящего в $uav^P \in UAV^P$ позволяющих избежать столкновение соответствующей пары.

Функциональные зависимости UAV , UAV^{P1} , UAV^{P2} , UAV^{P3} и A^G могут быть представлены в виде последовательности отображений: $F_1: UAV^P \rightarrow UAV^{P1}$; $F_2: UAV^{P1} \rightarrow UAV^{P2}$; $F_3: UAV^{P2} \rightarrow UAV^{P3}$; $F_4: UAV^{P3} \rightarrow A^G$, то есть $A^G = F_4(F_3(F_2(F_1(uav_i(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, V_i^G, V_i^V, r_i), uav_j(x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}, x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}, V_j^G, V_j^V, r_j))$.

Таким образом, ставится задача получения функциональных зависимостей F_1, F_2, F_3, F_4 которые определяются условиями H^1, H^2, H^3 и элементами вектора uav_i .

Функция F_1 позволяет определить слетаются ли попарно БПЛА. Для этого, используя допущение о прямолинейном движении БПЛА, определяются координаты точки скрещивания [10]

$$x_{ij} = -\frac{C_i \cdot B_j - C_j \cdot B_i}{A_i \cdot B_j - A_j \cdot B_i} \quad y_{ij} = \frac{A_i \cdot C_j - A_j \cdot C_i}{A_i \cdot B_j - A_j \cdot B_i}, \quad (3)$$

где $A_i, B_i, C_i, A_j, B_j, C_j$ определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} A_i &= y_{i0} - y_{i1}; B_i = -(x_{i0} - x_{i1}); C_i = (x_{i0} - x_{i1}) \cdot y_{i1} - (y_{i0} - y_{i1}) \cdot x_{i1}; \\ A_j &= y_{j0} - y_{j1}; B_j = -(x_{j0} - x_{j1}); C_j = (x_{j0} - x_{j1}) \cdot y_{j1} - (y_{j0} - y_{j1}) \cdot x_{j1}, \end{aligned} \quad (4)$$

по которым формируется условие сближения БПЛА

$$(|x_{ij} - x_{i1}| > |x_{ij} - x_{i0}| \text{ или } |y_{ij} - y_{i1}| > |y_{ij} - y_{i0}|) \& (|x_{ij} - x_{j1}| > |x_{ij} - x_{j0}| \text{ или } |y_{ij} - y_{j1}| > |y_{ij} - y_{j0}|).$$

Функция F_2 позволяет определить для попарно слетающихся БПЛА, те пары, для которых расстояние по вертикали в точки скрещивания меньше допустимой величины Δ [10].

$$|z_i - z_j| \leq \Delta,$$

где

$$\begin{aligned} z_i^c &= \frac{(z_{i0} - z_{i1}) \cdot x_{ij} + (x_{i0} - x_{i1}) \cdot z_{i1} - (z_{i0} - z_{i1}) \cdot x_{i1}}{x_{i0} - x_{i1}} \\ z_j^c &= \frac{(z_{j0} - z_{j1}) \cdot x_{ij} + (x_{j0} - x_{j1}) \cdot z_{j1} - (z_{j0} - z_{j1}) \cdot x_{j1}}{x_{j0} - x_{j1}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Функция F_3 позволяет определить для попарно слетающихся равно высотных БПЛА, те пары, для которых при сохранении их скоростей и угла схождения

произойдёт столкновения. Для этого, из каждой пары один БПЛА выбирается «своим» (с индексом f – от англ. friendly), другой «чужим» (с индексом s – от англ. stranger). Относительно «своего» определяются границы диапазона критических скоростей $(V_f^{\max}, V_f^{\min})$, таких, что если скорость «своего» лежит внутри этого диапазона $V_f^{\max} \leq V_f \leq V_f^{\min}$, то столкновение произойдёт. Эти граничные скорости определяются в соответствии со следующими выражениями [9]:

$$V_f^{\min}(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha) = \frac{-BV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha) + \sqrt{BV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha)^2 - 4 \cdot AV(L_{s/r}, \alpha) \cdot CV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha)}}{2 \cdot AV(L_{s/r}, \alpha)} \quad (6)$$

$$V_f^{\max}(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha) = \frac{-BV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha) - \sqrt{BV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha)^2 - 4 \cdot AV(L_{s/r}, \alpha) \cdot CV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha)}}{2 \cdot AV(L_{s/r}, \alpha)} \quad (7)$$

где $L_{f/r} = L_f / (r_f + r_s)$, $L_{s/r} = L_s / (r_f + r_s)$ – относительные расстояния от текущего положения БПЛА до точки столкновения, соответственно «своего» и «чужого» БПЛА; L_f , L_s – абсолютные расстояния от текущего положения БПЛА до точки столкновения, соответственно «своего» и «чужого» БПЛА; α – угол схождения траекторий сталкивающихся БПЛА; $AV(L_{s/r}, \alpha) = L_{s/r}^2 \cdot (1 - \cos(\alpha)^2) - 1$; $BV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha) = 2 \cdot (\cos(\alpha) - L_{f/r} \cdot L_{s/r} \cdot (1 - \cos(\alpha)^2))$; $CV(L_{f/r}, L_{s/r}, \alpha) = L_{f/r}^2 \cdot (1 - \cos(\alpha)^2) - 1$ вспомогательные выражения.

Таким образом, алгоритм определения границ диапазона критических скоростей включает следующие шаги: для попарно-слетающихся определяются координаты точек скрещивания, затем определяются равновысотны ли попарно-слетающиеся БПЛА в точках скрещивания, и, наконец, рассчитываются $V_f^{\min}$ и $V_f^{\max}$.

Результаты прямого компьютерного моделирования для широкого диапазона скоростей, расстояний и углов схождения, показали справедливость полученных функциональных зависимостей (6) и (7) для функции F_3 для границ критических скоростей: отклонение расстояний между БПЛА в точке максимального сближения отличается от расчётных не более чем на 3%. Пример, одного из результатов моделирования, представлен на рисунке 2.

Функция F_4 позволяет определить величину горизонтального ускорения A^G , при котором попарно слетающиеся равно высотные потенциально сталкивающиеся БПЛА способны избежать столкновения. В алгоритме определения линейного ускорения БПЛА для уклонения от столкновения используется концепция выведения скорости «своего» за границы диапазона критических скоростей, причём выведение осуществляется в направлении ближайшей границы.

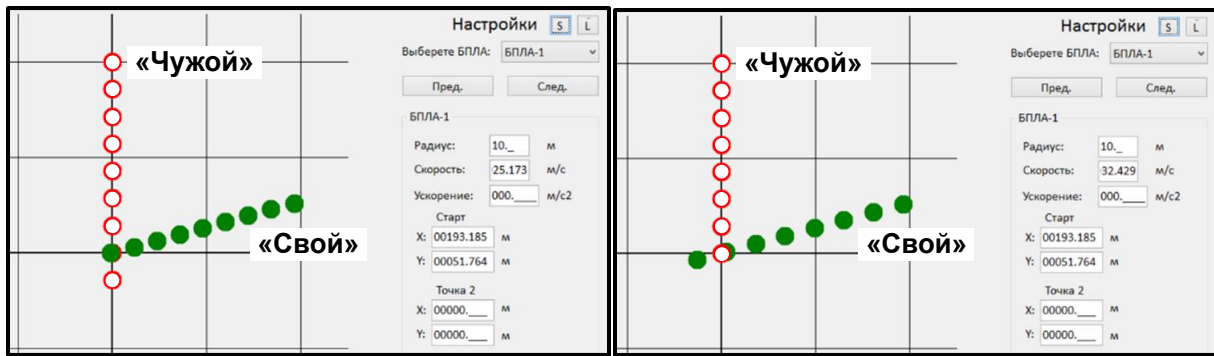


Рисунок 2 – Моделирование движения с максимальной (25,173 у.е.) и минимальной (32,429 у.е.) критическими скоростями.

$$A_f^G = \begin{cases} 2 \cdot V_f \cdot (V_f^{min} - V_f) / L_f, & V_f^{min} \geq V_f \geq (V_f^{min} + V_f^{max}) / 2 \\ 2 \cdot V_f \cdot (V_f^{max} - V_f) / L_f, & (V_f^{min} + V_f^{max}) / 2 \geq V_f \geq V_f^{max} \end{cases} \quad (8)$$

Для предотвращения столкновения необходимо определить величину ускорения в горизонтальной плоскости и передать автопилоту команду на реализацию этого ускорения.

Ещё одни результаты прямого компьютерного моделирования для широкого диапазона скоростей, расстояний и углов схождения, показали справедливость полученных функциональных зависимостей для определения величины горизонтального ускорения A_f^G функции F_4 : отклонение расстояний между БПЛА в точке максимального сближения отличается от расчётных не более чем на 1,3%. Пример, представлен на рисунке 3.

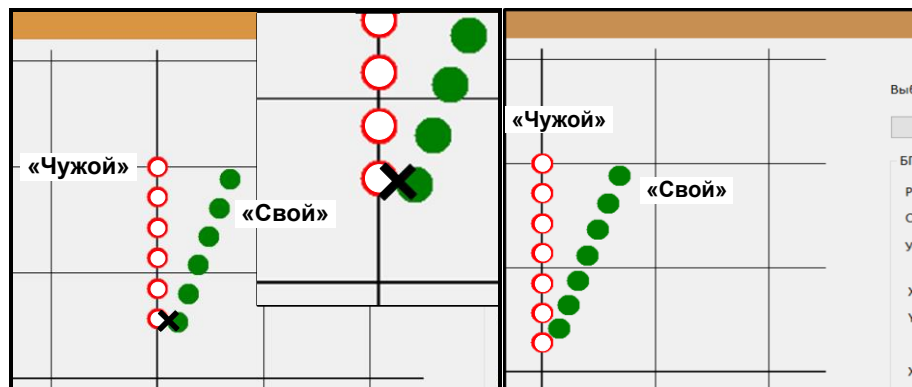


Рисунок 3 – Моделирование ситуации со столкновением и той же ситуации, но с применением скоростного манёвра уклонения

В третьей главе рассматривается метод предотвращения столкновений с учётом ограничений на ресурсы БПЛА. Обосновывается необходимость использования понятия «зона взаимодействия» и определяется алгоритм оценки границ этой зоны. Выбирается численный метод, позволяющий получить зна-

чения этих границ в полярной системе координат. Формируется аппроксимирующая функция границ зоны взаимодействия и рассчитываются значения её параметров.

Представленная во второй главе математическая модель, обеспечивающая предотвращения столкновений БПЛА работоспособна только при неограниченных ресурсах (линейная и угловые скорости, линейные ускорения и так далее). При ограничении ресурсов даже на линейное ускорение БПЛА появляется необходимость в разграничении пространства вокруг «своего» на несколько зон: безопасная зона, зона взаимодействия и опасная зона. Если «чужой» БПЛА находится в безопасной зоне, достаточно только следить за его перемещениями; если в зоне взаимодействия, то «свой» имеет достаточно ресурсов, чтобы предотвратить столкновение; если в опасной зоне, то могут возникнуть ситуации, когда у «своего» не хватит ресурсов, чтобы избежать столкновение.

Математическая формулировка задачи выявления границ зоны взаимодействия выглядит следующим образом. Пусть есть множество UAV^{P3} попарно слетающихся равновысотных потенциально сталкивающихся БПЛА, каждый элемент этого множества представляет пару векторов в многомерном пространстве $uav^{P3}_i = (x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, V^G_i, A^G_i, A^{Gmax}_i, A^{Gnom}_i, r_i)$, $uav^{P3}_j = (x_{j0}, y_{j0}, x_{j1}, y_{j1}, V^G_j, A^G_j, A^{Gmax}_j, A^{Gnom}_j, r_j)$, координат текущего (x_0, y_0, z_0) и предшествующего (x_1, y_1, z_1) положения БПЛА, а также и параметров БПЛА: динамически меняющихся (V^G, A^G) и постоянных (A^{Gmax}, A^{Gnom}, r) , где V^G, A^G – соответственно горизонтальная скорость и ускорение БПЛА, A^{Gmax}, A^{Gnom} – соответственно, максимально допустимое и номинальное горизонтальное ускорения БПЛА, r – радиус безопасности БПЛА. Один векторов из этой пары, например, uav^{P3}_i будем считать относящимся к «своему» БПЛА $uav^{P3}_i = uav^{P3}_f$, а другой uav^{P3}_j – к «чужому» БПЛА $uav^{P3}_j = uav^{P3}_s$.

Кроме того, есть множество Fu относительных координат дальней границы зоны взаимодействия, при котором «своему», даже в случае наихудшего направления движения «чужого» относительно движения «своего», достаточно реализовать номинальное ускорение/замедление для предотвращения столкновения «своего» и «чужого», причём каждый элемент этого множества представляет собой вектор в многомерном пространстве $fu_j = (x_{j0} - x_{i0}, y_{j0} - y_{i0}, V^G_i, V^G_j, A^G_i, A^{Gnom}_i, r_i, r_j)$. И есть множество Ne относительных координат ближней границы зоны взаимодействия, при котором «своему», даже в случае наихудшего направления движения «чужого» относительно движения «своего», достаточно реализовать максимальное ускорение/замедление для предотвращения столкновения «своего» и «чужого», причём каждый элемент этого множества представляет собой вектор в многомерном пространстве $ne_j = (x_{j0} - x_{i0}, y_{j0} - y_{i0}, V^G_i, V^G_j, A^G_i, A^{Gmax}_i, r_i, r_j)$.

Функциональная зависимость UAV^{P3} , Fu и Ne могут быть представлены в виде отображений $F_5 : UAV^{P3} \rightarrow Fu$; $F_6 : UAV^{P3} \rightarrow Ne$, то есть $Fu = F_5(R_j, \beta_j, V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gnom}, r_i, r_j)$, а $Ne = F_6(R_j, \beta_j, V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gmax}, r_i, r_j)$.

Таким образом, ставится задача получения функциональной зависимости F_5 , которая определяется условием $A_i^G = A_i^{Gnom}$ и элементами векторов $uav^{P3}_i = (x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, V_i^G, A_i^G, A_i^{Gmax}, A_i^{Gnom}, r_i)$, $uav^{P3}_j = (x_{j0}, y_{j0}, x_{j1}, y_{j1}, V_j^G, A_j^G, A_j^{Gmax}, A_j^{Gnom}, r_j)$ и задача получения функциональной зависимости F_6 , которая определяется условием $A_i^G = A_i^{Gmax}$ и элементами векторов $uav^{P3}_i = (x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, V_i^G, A_i^G, A_i^{Gmax}, A_i^{Gnom}, r_i)$, $uav^{P3}_j = (x_{j0}, y_{j0}, x_{j1}, y_{j1}, V_j^G, A_j^G, A_j^{Gmax}, A_j^{Gnom}, r_j)$. Отметим, что обе эти задачи отличаются только правыми условиями.

Без потери общности, над парами векторов uav^{P3}_i и uav^{P3}_j выполнено преобразование поворота и сдвига координат (x, y) , в результате которого движение «своих» стало однонаправленным и исходящим из начала координат, а положение «чужих» определяется в полярной системе координат (R, β) , где R – радиус-вектор расстояния между «своим» и «чужим» БПЛА, а β – угол между направлением движения «своего» и направлением от «своего» на «чужого» БПЛА (см. рисунок 3). В этом случае, функциональная зависимость F_5 трансформируется к виду $R_{Fu}(\beta, V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gnom}, r_i, r_j)$, где β – аргумент, а $V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gnom}, r_i, r_j$ – параметры, а функциональная зависимость F_6 – к виду $R_{Ne}(\beta, V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gmax}, r_i, r_j)$, где β – аргумент, а $V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gmax}, r_i, r_j$ – параметры. Геометрическую модель, описанной выше задачи, представлена на рисунке 4, где α_{min} и α_{max} минимальные и максимальные углы схождения для каждой конфигурации взаимного расположения «своего» и «чужого». Предложено в качестве $R_{Ne}(\beta)$ использовать минимальное значение вещественного корня нелинейного уравнения, определённого исходя из $A_i^G = A_i^{Gmax}$, для всех значений α в интервале от α_{min} до α_{max} , при фиксированных значениях параметров $V_i^G, V_j^G, A_i^G, A_i^{Gmax}, r_i, r_j$.

$$R_{Ne}(\beta) = \min(\text{Root}(FR^{max}(R(\beta), \alpha))), \alpha = (\alpha_{min}, \alpha_{max}), \quad (9)$$

$$FR^{max}(R(\beta)) = R(\beta) - ((V_f^{min}(R(\beta), \beta, A_f^{Gmax}, \alpha, V_f, V_s, (r_f + r_s)))^2 - \\ \text{где } - (V_f^{max}(R(\beta), \beta, A_f^{Gmax}, \alpha, V_f, V_s, (r_f + r_s)))^2) / (2 \cdot A_f^{Gmax}) = 0$$

Аналогично для $R_{Fu}(\beta)$ – минимальное значение вещественного корня нелинейного уравнения, определённого исходя $A_i^G = A_i^{Gnom}$, для всех значений α в интервале от α_{min} до α_{max} .

$$R_{Fu}(\beta) = \min(\text{Root}(FR^{nom}(R(\beta), \alpha))), \alpha = (\alpha_{min}, \alpha_{max}), \quad (10)$$

$$FR^{nom}(R(\beta)) = R(\beta) - ((V_f^{min}(R(\beta), \beta, A_f^{Gmax}, \alpha, V_f, V_s, (r_f + r_s)))^2 - \\ \text{где } - (V_f^{max}(R(\beta), \beta, A_f^{Gmax}, \alpha, V_f, V_s, (r_f + r_s)))^2) / (2 \cdot A_f^{Gmax}) = 0$$

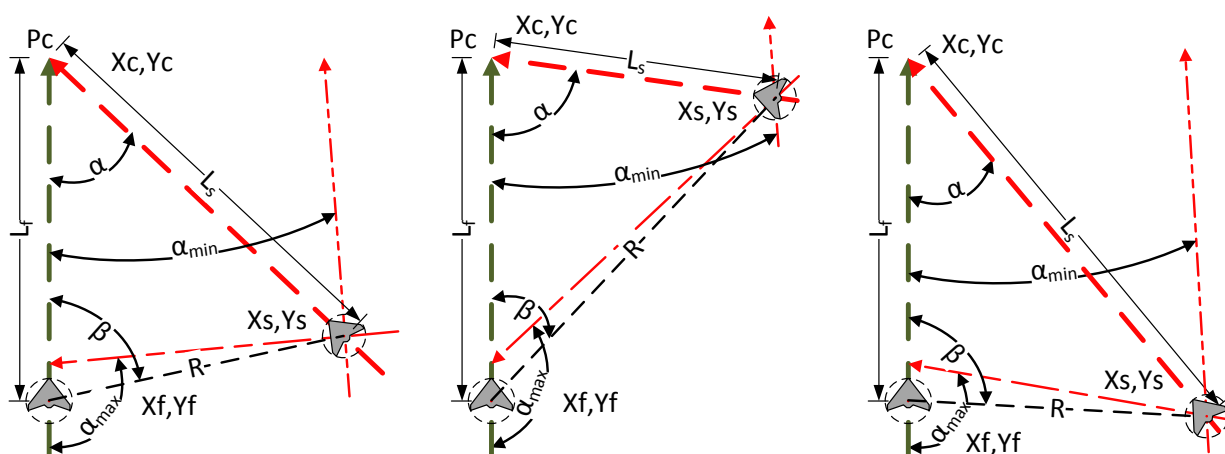


Рисунок 4 – Схема для вывода выражения для границ зоны взаимодействия.

Анализ различных методов численного решения нелинейных уравнений: метод простой итерации, метод Ньютона, метод секущих, модифицированный метод Ньютона, метод Стефенсона, интерполяционный метод различных порядков, наилучший релаксационный метод, метод Эйткена ускорения сходимости, показал, что все эти методы имеют существенный недостаток, связанный с необходимостью знать достаточно близкие к искомому решению начальные приближения. Кроме того, существует проблема, связанная с трудностью отделения действительных корней уравнения. Использовался комбинированный алгоритм: методом простых итераций, с постоянной коррекцией в ручном режиме, было получены начальные приближения для $R_{Ne}(\beta)$ и $R_{Fu}(\beta)$, а более точный результат получался по методу Монте-Карло. Метод Монте-Карло (рисунок 5а) по следующему алгоритму: задание начальных значений и диапазона генерации случайных величин; затем генерация случайных положений «чужих» БПЛА со случайными направлениями движения; после этого селекция положений только потенциально-опасных БПЛА и расчёт ускорений для предотвращения столкновений; далее селекция положений только тех БПЛА, для которых, рассчитанное ускорение с заданной точностью (εA), ускорение равно A^{Gmax}_f , наконец, для R с одинаковыми β отбираются минимальные; используя эти минимальные значения на их основе получают аппроксимирующие выражения для границы для заданных начальных значений.

Прямое применение метода Монте-Карло даже при значительном количестве испытаний (более 500 000) не позволяет получить достаточно достоверные результаты при нахождении корней нелинейного уравнения. Для повышения эффективности предложен контекстный алгоритм, при котором области поиска по R , β , α существенно сокращаются на основе предшествующей информации. Углы β генерируются в виде дискретной случайной величины с интервалом 5 градусов, диапазон изменения R сужается до $\pm 10\%$ от начального приближения,

а α – до $\pm 4\%$ от начального приближения. Такой подход позволил повысить плотность попадания в диапазон критических скоростей до 85 %, и плотность точек, для которых ускорение лежит в заданном диапазоне до 3,8 %. Это позволило получать данные для построения аппроксимирующей функции при допустимом числе испытаний (100 000 – 200 000) для каждого набора начальных значений V_f^G , V_s^G , A_f^{Gmax} , r_f , r_s .

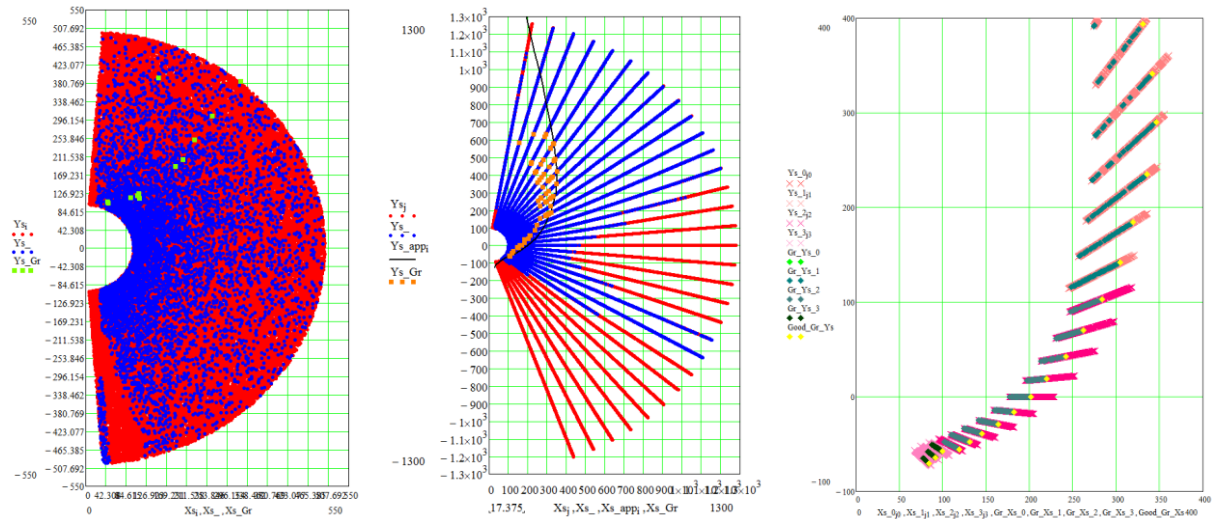


Рисунок 5 – Массив случайных точек расположения угроз: красные точки – случайные положения БПЛА, синие точки – положение потенциально опасных БПЛА, зелёные точки – положение БПЛА, для предотвращения столкновений с которыми требуется $A_f^G > A_f^{Gnom}$, жёлтые точки – положение БПЛА, для предотвращения столкновений с которыми требуется $A_f^G = A_f^{Gnom}$.

Аппроксимирующая функция представляет собой полином 6-ой степени с коэффициентами, зависящими от значений V_f^G , V_s^G , A_f^{Gmax} , r_f , r_s

$$R_{Ne}(\beta) = u_0 + u_1 \cdot (u_2 - \beta) + u_3 \cdot (u_4 - \beta)^2 + u_5 \cdot (u_6 - \beta)^6. \quad (11)$$

Отметим, что диапазон значений коэффициентов в одном аппроксимирующем выражении достигает 16 порядков, что приводит к вычислительным проблемам на борту БПЛА. Для исключения этих проблем координаты зон взаимодействия хранятся на борту БПЛА в табличном виде, а расчёты конкретных значений выполняются с использованием линейной интерполяции.

В четвёртой главе приводится реализации метода предотвращения столкновений и описывается программный комплекс, построенный в соответствии с этой методикой. Описывается архитектура программного комплекса и основных его подсистем: генерации навигационных параметров беспилотных летательных аппаратов; моделирования движения беспилотных летательных аппаратов; формирования управляющих воздействий на автопилот беспилотного летательного аппарата; визуализации моделирования и вывода результатов

моделирования. Приводятся результаты моделирования метода предотвращения столкновений.

Решение задачи предотвращения столкновений большого числа БПЛА состоит из двух этапов:

- селекция малоопасных потенциальных «угроз» («чужих»), для которых может быть применён упрощённый алгоритм;
- ранжирование опасных «угроз» («чужих»), с выявлением наиболее опасной, для которой должен быть реализован маневр предотвращения столкновения.

Математическая формулировка задачи селекции малоопасных потенциальных «угроз» («чужих») выглядит следующим образом. Пусть есть множество «чужих» БПЛА UAV^S : $uav^S = \{uav^S_0, uav^S_1, \dots, uav^S_m\}$, причём каждый элемент этого множества представляет собой вектор в многомерном пространстве $uav^S_i = (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, V^G_i, V^V_i, A^G_i, A^V_i, r_i)$ координат текущего (x_0, y_0, z_0) и предшествующего (x_1, y_1, z_1) положения БПЛА, а также и параметров БПЛА: динамически меняющихся (V^G, V^V, A^G, A^V) и постоянных (r) , где V^G, V^V – соответственно, горизонтальная и вертикальная скорости БПЛА, A^G, A^V – соответственно, горизонтальное и вертикальное ускорения БПЛА, r – радиус безопасности БПЛА. Есть два подмножества $UAV^{S+T} \subset UAV^S$ и $UAV^{S-T} \subset UAV^S$, где UAV^{S+T} – множество потенциально опасных БПЛА, для элементов которого $uav^{S+T} = \{uav^S | H^5\}$ выполняется условие H^5 , «чужой» находится ближе дальней границы R_{Fu} . Кроме того, есть множество UAV^{S-T} малоопасных БПЛА, причём UAV^{S-T} является дополнением к множеству UAV^{S+T} . Функциональные зависимости $UAV^S, UAV^{S+T}, UAV^{S-T}$, могут быть представлены в виде последовательности отображений: $F_5 : UAV^S \rightarrow UAV^{S+T}$. Функция F_5 позволяет определить потенциально опасные БПЛА. Для этого, сравниваются расстояния между «своим» и «чужим» с дальней границей зоны взаимодействия, и, если, «чужой» находится внутри границы, этот БПЛА помечается как потенциально опасный.

Математическая формулировка задачи ранжирования потенциально опасных «угроз» («чужих») выглядит следующим образом. Пусть есть множество, определённых на первом этапе, потенциально опасных «чужих» БПЛА UAV^{S+T} : $uav^{S+T} = \{uav^{S+T}_0, uav^{S+T}_1, \dots, uav^{S+T}_l\}$, причём каждый элемент этого множества представляет собой вектор в многомерном пространстве $uav^{S+T}_k = (x_{k0}, y_{k0}, z_{k0}, x_{k1}, y_{k1}, z_{k1}, V^G_k, V^V_k, A^G_k, A^V_k, r_k)$ координат текущего (x_0, y_0, z_0) и предшествующего (x_1, y_1, z_1) положения БПЛА, а также и параметров БПЛА: динамически меняющихся (V^G, V^V, A^G, A^V) и постоянных (r) , где V^G, V^V – соответственно, горизонтальная и вертикальная скорости БПЛА, A^G, A^V – соответственно, горизонтальное и вертикальное ускорения БПЛА, r – радиус безопасности БПЛА.

Есть подмножество $UAV^{S+T1} \subset UAV^{S+T}$ слетающих со «своим» БПЛА, для элементов которого $uav^{S+T1} = \{uav^{S+T} | H^1\}$ выполняется условие H^1 ; кроме того есть подмножество $UAV^{S+T2} \subset UAV^{S+T1}$ слетающих равновысотных со «своим» БПЛА, для элементов которого $uav^{S+T2} = \{uav^{S+T1} | H^2\}$ выполняется условие H^2 ; далее есть подмножество слетающих равновысотных потенциально сталкивающихся со «своим» БПЛА $UAV^{S+T3} \subset UAV^{S+T2}$, для элементов которого $uav^{S+T3} = \{uav^{S+T2} | H^3\}$ выполняется условие H^3 . Кроме того, есть подмножество $UAV^{S+T4} \subset UAV^{S+T3}$ максимально опасного, требующего максимального ускорения A^G для предотвращения столкновения, «чужого» БПЛА, для элементов которого $uav^{S+T4} = \{uav^{S+T3} | H^6\}$ выполняется условие H^6 .

Функциональные зависимости UAV^{S+T} , UAV^{S+T1} , UAV^{S+T2} , UAV^{S+T3} и UAV^{S+T4} могут быть представлены в виде последовательности отображений: $F_1 : UAV^{S+T} \rightarrow UAV^{S+T1}$; $F_2 : UAV^{S+T1} \rightarrow UAV^{S+T2}$; $F_3 : UAV^{S+T2} \rightarrow UAV^{S+T3}$; $F_6 : UAV^{S+T3} \rightarrow UAV^{S+T4}$, то есть $UAV^{S+T4} = F_6(F_3(F_2(F_1(uav_s, uav_k)))$.

Таким образом, ставится задача получение функциональных зависимостей F_1, F_2, F_3, F_6 которые определяются условиями H^1, H^2, H^3, H^6 и элементами вектора uav_i .

Функция F_1, F_2, F_3 реализуются аналогично описанию в разделе 2. Для реализации функции F_6 относительно каждого элемента множества UAV^{S+T3} рассчитывается горизонтальное ускорение «своего» A^G , предотвращающее столкновение, затем к элементу множества UAV^{S+T4} относится только тот элемент, для которого $|A^G| = A^{Gmax}$.

Алгоритм нахождения UAV^{S+T4} содержит следующие шаги.

0. Всем «чужим» БПЛА установить уровень угрозы равный 0.
1. Определить движение БПЛА относительно точки пересечения траекторий: а) оба БПЛА двигаются к точке пересечения траекторий, уровень угрозы установить равным 1, б) только один БПЛА двигается в точку пересечения траекторий или ни одного БПЛА (БПЛА разлетаются), уровень угрозы не менять.
2. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых больше 0, сравнить высоты, на которых двигаются аппараты, если БПЛА двигаются на одинаковой высоте, то рассчитать относительные расстояния обоих БПЛА от точки столкновения и уровень угрозы установить 1, иначе уровень угрозы установить 0.
3. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых больше 0, сравнить углы схождения с углами «мёртвых» зон для скоростного маневра, если «чужой» находится во встречной или попутной «мёртвой» зоне, то уровень угрозы установить 2, иначе уровень угрозы не менять.

4. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых больше 1, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с дальней границей «мёртвой» зоны, если за границей, то уровень угрозы установить 0, иначе уровень угрозы установить 3.

5. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых больше 2, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с ближней границей «мёртвой» зоны, если внутри границы, то уровень угрозы установить 4, иначе уровень угрозы не менять.

6. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых равен 1, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с дальней границей угрозы взаимодействия, если за границей, то уровень угрозы установить 0, иначе уровень угрозы установить 5.

7. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых равен 5, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с ближней границей зоны взаимодействия, если внутри границы, то уровень угрозы установить 6, иначе уровень угрозы не менять.

8. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых 5, по относительным расстояниям, значениям скоростей и координатам точки столкновения определить критические скорости, и если скорость «своего» лежит в границах опасного диапазона, то уровень угрозы установить 7, иначе установить 0.

9. Для всех «чужих», уровень угрозы, которых 6, по относительным расстояниям, значениям скоростей и координатам точки столкновения определить критические скорости, и если скорость «своего» лежит в границах опасного диапазона, то уровень угрозы установить 8, иначе установить 0.

10. Для всех «чужих» с уровнями угрозы 3, 4, 7, 8 рассчитать время до столкновения и определить «чужой», имеющий минимальное время, к уровню этого «чужого» добавить 10.

11. Если хотя бы у одного «чужого» уровень угрозы больше 10, то отдать команду на инициирование скоростного маневра.

Для проверки эффективности алгоритма разработана программа моделирования. Реализация выполнена на языке программирования C#. Программа позволяет моделировать поведение от 2 до 50 летательных аппаратов и реализовывать описанный алгоритм поведения «своего». Схема взаимодействия модулей программы представлена на рисунке 6.

Первый БПЛА определяется как «свой», в процессе моделирования производится расчёт возможности столкновения с остальными БПЛА, которые позиционируются как «угрозы». С учётом зоны взаимодействия опасным БПЛА присваиваются урон угрозы, в соответствии с которыми определяется необходимый манёвр уклонения. Такие расчёты повторяются при каждой итерации моделирования.

Моделирование и его результаты

Моделирование для «своего» и 11 «чужих» БПЛА, при моделировании применены условные значения параметров.

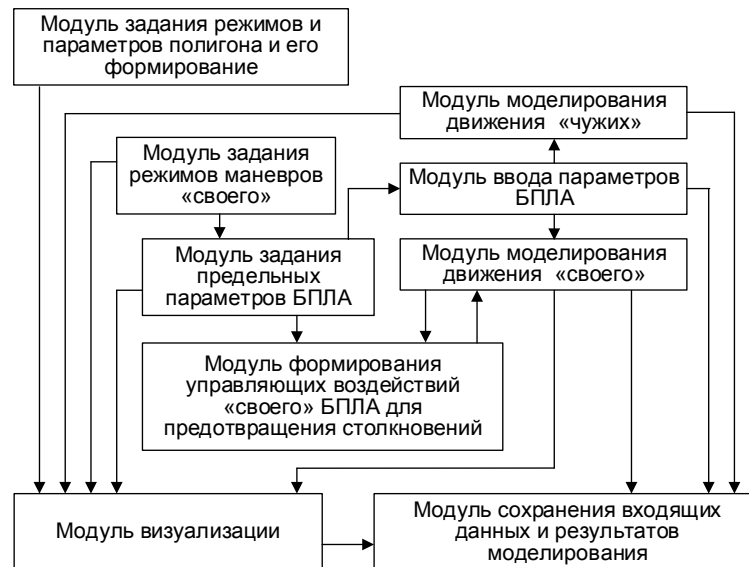


Рисунок 6 – Схема взаимодействия модулей программы моделирования.

Параметры «своего» при моделировании: радиус – 10, начальная скорость – 30, ускорение – 0. Параметры «чужих» при моделировании: радиус – 10, начальная скорость – 39,999, ускорение – 0. БПЛА-угрозы, разделены на пять групп: «угрозы» за дальней границей и в диапазоне критических скоростей (БПЛА с номерами 1 и 2), «угрозы» за дальней границей и вне диапазона критических скоростей (БПЛА 3 и 4), «угрозы» в зоне взаимодействия и в диапазоне критических скоростей (БПЛА 5, 6 и 7), «угрозы» в зоне взаимодействия и вне диапазона критических скоростей (БПЛА 8), «угрозы» на дальней границе (БПЛА 9, 10 и 11).

Результаты моделирования без использования манёвра (рисунок 7) и с применением скоростного маневра представлены ниже (рисунок 8). «Свой» БПЛА отмечен номером 0. На рисунках показаны начало и конец моделирования, а также графики изменения расстояний между «своим» и «чужими» аппаратами с течением времени. Красная пунктирная линия показывает расстояние равное сумме радиусов «своего» и одного из «чужих» аппаратов. Если расстояние между двумя аппаратами станет меньшим либо равным сумме их радиусов, то происходит столкновение. Так как в эксперименте у всех аппаратов одинаковые радиусы (равны 10), то эта граница равна 20 и одинакова для всех «чужих».

На рисунке 7б видно, что семь аппаратов пересекают красную пунктирную линию. Столкновение происходит с БПЛА под номерами: 1, 5, 6, 7, 9, 10, 11. На рисунке 7в с результатом моделирования так же можно видеть столкно-

вения, показанные красными крестами. Так как столкновения с аппаратами 5, 6, 10 и 11 происходит практически в одинаковых местах, на графике они отмечены одним крестом. Результат моделирования той же ситуации (рисунок 8), что и на рисунке 7, но с применением скоростного манёвра уклонения, показывает, что «свой» прошёл по траектории мимо других 11 аппаратов без столкновений.

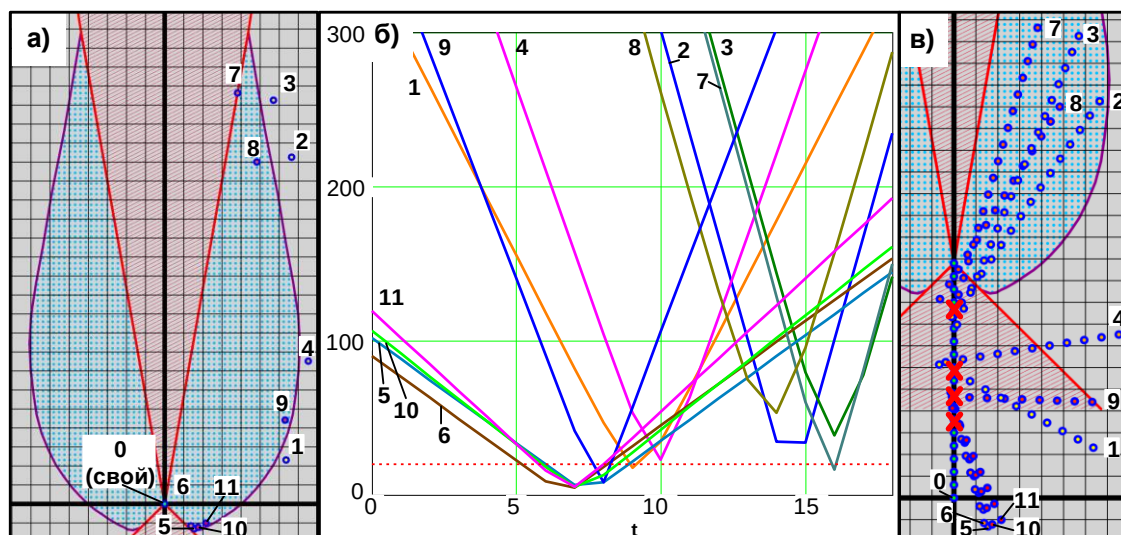


Рисунок 7 – Результаты моделирования без использования манёвра: *а* – исходное положение всех аппаратов, красным выделены мёртвые зоны, синим выделена зона взаимодействия; *б* – графики изменения расстояния между «своим» и каждым БПЛА-угрозой; *в* – завершение моделирование, места столкновений отмечены красными крестиками.

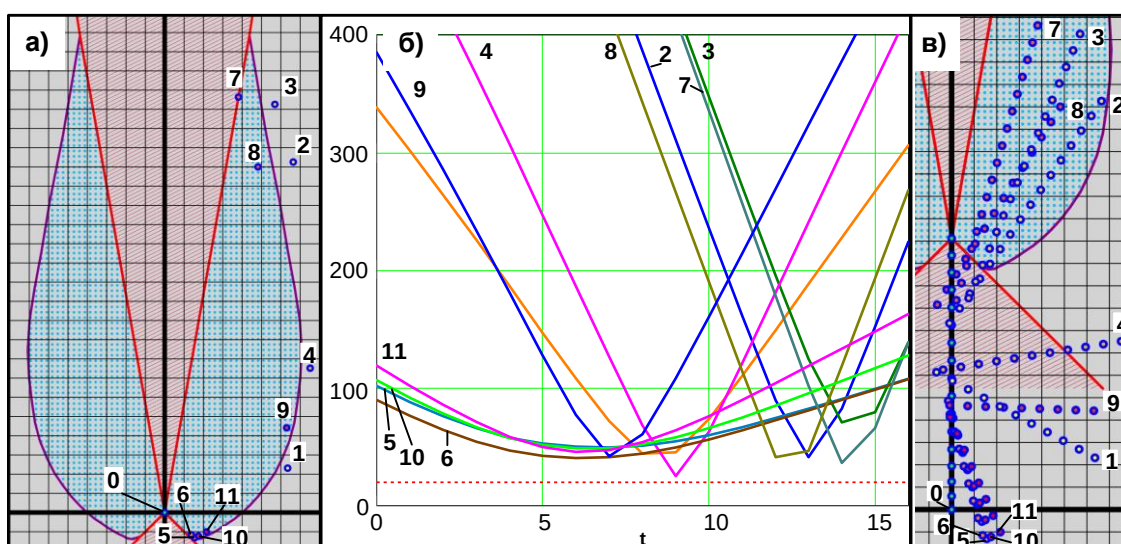


Рисунок 8 – Результаты моделирования с использованием скоростного манёвра: *а* – исходное положение всех аппаратов, красным выделены мёртвые зоны, синим выделена зона взаимодействия; *б* – графики изменения расстояния между «своим» и каждым БПЛА-угрозой; *в* – завершение моделирование, «свой» прошёл весь путь без столкновений.

Рис. 8б подтверждает отсутствие столкновений: ни одно расстояние между «своим» и остальными БПЛА не стало меньше суммы их радиусов. Это доказывает эффективность применения скоростного подхода для предотвращения столкновений большого числа беспилотных летательных аппаратов между собой.

Основные результаты работы

В области математического моделирования:

1. Предложена математическая модель динамически меняющегося взаиморасположения беспилотных летательных аппаратов, отличительной особенностью математической модели является возможность получения результатов в аналитическом виде.

2. Предложен алгоритм определения границ диапазона критических скоростей на основе скоростного подхода, отличающийся возможностью получения значений этих границ в аналитическом виде.

3. Предложен алгоритм определения линейного ускорения БПЛА для уклонения от столкновения при скоростном маневре, отличающийся тем, что для расчёта линейного ускорения используются значения границ диапазона критических скоростей, рассчитанных на основе скоростного подхода.

В области численных методов:

4. Предложен алгоритм, позволивший повысить эффективность метода Монте-Карло для построения границ зоны взаимодействия, отличающийся от существующих контекстным сужением области поиска.

5. Предложен непрерывный численный метод для расчёта параметров, применение которых позволяет предотвращать столкновения беспилотных летательных аппаратов.

В области комплексов программ:

6. Программно реализован алгоритм повышения эффективности метода Монте-Карло для построения границ зоны взаимодействия, отличающийся от существующих контекстным сужением области поиска границ.

7. Реализованы программные комплексы для проверки идентичности, полученных аналитическими и численными методами, результатов оценки параметров, применение которых позволяет исключать столкновения БПЛА без учёта, так и с учётом ограниченности ресурсов БПЛА.

8. Реализован программный комплекс для моделирования взаимного движения до пятидесяти беспилотных летательных аппаратов, отличающийся от существующих возможностью реализации скоростного подхода для предотвращения столкновений.

Список основных публикаций по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1 Бердонос В. Д., Журавлёв Д. О., **Зау Хтет Наинг** Разработка алгоритма и программного обеспечения интеллектуальной подсистемы предотвращения столкновений БПЛА // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-3(39). стр. 38-47.

В изданиях, индексируемых в базе Scopus:

2 Berdonosov, V. D., Zhivotova, A. A., **Zaw Htet Naing**, Zhuravlev, D. O. Speed Approach for UAV Collision Avoidance // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 22 May (volume 1015).

В изданиях, индексируемых в базе Web of Science:

3 Berdonosov, V. D., Zhivotova, A. A., Zhuravlev, D. O., **Zaw Htet Naing** Implementation of the Speed Approach for UAV Collision Avoidance in Dynamic Environment // Published in: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). – 2018. - 3-4 October.

Другие издания:

4 **Зау Хтет Наинг** Актуальность исследования группового взаимодействия беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения / Зау Хтет Наинг, В. Д. Бердонос // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 212-214.

5 **Зау Хтет Наинг** Исследование актуальности формирования алгоритмов обеспечения группового взаимодействия беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения / Зау Хтет Наинг, В. Д. Бердонос // Современные тенденции и проекты развития информационных систем и технологий: материалы всероссийской научно-исследовательской конференции студентов и школьников, г. Хабаровск, 2016 г. – Хабаровск : Хабаровский государственный университет экономики и права, 2016. – С. 333-335.

6 Журавлёв Д. О., **Зау Хтет Наинг** Эволюция систем управления беспилотных летательных аппаратов: от появления до наших дней // Достижения и перспективы современной науки: материалы международной (заочной) научно-практической конференции под общей редакцией А. И. Вострецова, Астана (Казахстан), 7 фев. 2017 г. – Нефтекамск : НИЦ «Мир Науки», 2017. – С. 57-87.

7 Журавлёв Д. О., **Зау Хтет Наинг**, Бердонос В. Д. Методы предотвращения столкновений беспилотных летательных аппаратов / // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-

технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 406-408.

8 **Зау Хтет Наинг**, Журавлёв Д. О., Бердонос В. Д. Выявление потенциально опасных объектов в поле зрения бортовых видеокамер БПЛА // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 416-419.

9 Бердонос В. Д. **Зау Хтет Наинг**, Журавлёв, Д. О. К расчёту критических скоростей, ведущих к коллизии двух БПЛА // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 29-30 сен. 2017. – С. 9-14.

10 Бердонос В. Д. Журавлёв, Д. О., **Зау Хтет Наинг** Об алгоритме оценивания возможности коллизии двух БПЛА // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сен. 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 15-21.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619898. Программа для моделирования движения беспилотных летательных аппаратов / В. Д. Бердонос (RU), М. Д. Ливень (RU), Д. О. Журавлёв (RU), **Зау Хтет Наинг** (MM) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГУ»; заявл. 27.06.2018; зарегистр. 14.08.2018.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019663874. Программа для моделирования движения беспилотных летательных аппаратов / В. Д. Бердонос (RU), М. Д. Ливень (RU), Д. О. Журавлёв (RU), **Зау Хтет Наинг** (MM) // Правообладатель: В. Д. Бердонос (RU), М. Д. Ливень (RU), Д. О. Журавлёв (RU), **Зау Хтет Наинг** (MM); заявл. 15.10.2019; зарегистр. 24.10.2019.