

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»**

Факультет физико-математических и естественных наук

Кафедра информационных технологий

«Допустить к защите»

Заведующий кафедрой
информационных технологий

д.ф.-м.н.

_____ Ю.Н. Орлов

«___» _____ 20__ г.

**Выпускная квалификационная работа
бакалавра**

Направление 09.03.03 «Прикладная информатика»

ТЕМА «Исследование методов целенаправленного поведения группы
робототехнических систем для решения прикладных задач»

Выполнил студент Абакумов Егор Александрович

(Фамилия, имя, отчество)

Группа НПИбд-01-18

Студ. билет №1032182599

Руководитель выпускной
квалификационной работы

Хачумов М. В., к.ф.-м.н., доцент
кафедры информационных технологий
(Ф.И.О., степень, звание, должность)

(Подпись)

Автор _____
(Подпись)

г. Москва

2022 г.

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**

«Российский университет дружбы народов»

АННОТАЦИЯ

выпускной квалификационной работы

Абакумова Егора Александровича

(фамилия, имя, отчество)

на тему: «Исследование методов целенаправленного поведения группы робототехнических систем для решения прикладных задач»

Настоящее исследование затрагивает решения перспективной задачи управления группой бесплотных летательных аппаратов (БПЛА) с применением методов искусственного интеллекта. В первую очередь работа интересна предлагаемым методом безопасного и эффективного формирования строя БПЛА при помощи венгерского метода и систем правил. Под строем имеется в виду заранее запрограммированное или переданное взаимное расположение участников группы, которое поддерживается в течение определенного периода времени. Актуальность решения задачи связана с тем, что БПЛА принимают все большее участие в решении как ежедневных рутинных задач, так в сложных миссиях, иногда представляющих опасность для жизни или здоровья человека. В частности, БПЛА используются при прочесывании районов, мониторинге и патрулировании территории, для организации сетей связи в труднодоступных местах, для доставки грузов. На этом фоне возникает необходимость в их групповом взаимодействии и, в частности, в построении по требованию и поддержании заданной формации, например, для оптимального покрытия территории. Выполненный аналитический обзор современной литературы показал, что задача в

настоящее время не является полностью решенной, что в первую очередь связано с различными внешними возмущающими факторами, влияющими на траекторию движения БПЛА, включая сложные полетные условия и ветровую нагрузку. В настоящей работе дается постановка задачи формирования строя и предлагается ее оригинальное решение с применением методов интеллектуального управления для оперативного реагирования на внешние изменения. Показан пример решения задачи формирования строя БПЛА, включающий планирование и реализацию траекторного движения в сложной среде, который демонстрирует перспективность предложенного решения.

Автор ВКР

(Подпись)

(ФИО)

Оглавление

Список сокращений.....	3
Введение	5
1. Исследование прикладных задач управления группой робототехнических систем	8
1.1. Постановка задачи управления целенаправленным поведением группы робототехнических систем и исследование сфер ее практического применения	9
1.2. Математическая постановка задачи	10
2. Современные методы решения задачи формирования строя группы робототехнических систем	12
2.1 Исследование основных подходов к решению задачи	12
3. Разработка методов решения строевой задачи для группы БПЛА	22
3.1 Задача траекторного движения летательного аппарата	23
3.2 Задача о назначениях.....	26
3.3 Задача контроля движения группы БПЛА под ветровой нагрузкой	Ошибка!
Закладка не определена.	
4 Практическое исследование решения задачи управления группой робототехнических систем	31
4.1 Описание сред моделирования.....	33
4.1.1 MATLAB Simulink	33
4.1.2 Gazebo	34
4.2 Описание экспериментальной модели	37
4.3 Результаты моделирования экспериментов	39
Заключение.....	40
Список литературы.....	44

Список сокращений

Русскоязычные сокращения

БПЛА (БЛА) — беспилотный летательный аппарат

ИИ — искусственный интеллект

ПО — программное обеспечение

БП — база правил

РС — робототехническая система

ЛА — летательный аппарат

СВВП — самолет вертикального взлета и посадки

МФК — мультифункциональными комплексами

НЛК — нечеткий логический контроллер

Англоязычные сокращения

AI — Artificial intelligence

UAV — Unmanned Aerial Vehicle

SITL — System-In-The-Loop

ROS — The Robot Operating System

UDP — User Datagram Protocol

TCP — Transmission Control Protocol

GCS — Ground Control Station

MAVLink — Micro Aerial Vehicle Link

MAV — Micro aerial vehicle

XML — eXtensible Markup Language

SDF — Simulation Description Format

Введение

Актуальность темы

Использование искусственных систем все глубже проникает в нашу жизнь. Для решения таких технических задач, как доставка грузов, картографирование местности, аэросъемка или получение данных о труднодоступных местах все чаще используются беспилотные роботы, управляемые дистанционно или руководимые правилами искусственного интеллекта. Иногда использование РС позволяет сэкономить на средствах исполнения или оптимизировать, иногда — обезопасить оператора или других людей, иногда — является единственным возможным способом выполнения задачи. Таким образом, привлечение РС и БПЛА в работу позволяет решать проблемы сравнительно недорогими и простыми средствами.

Отдельно можно выделить из всего спектра робототехнических систем летательные аппараты, позволяющие выполнять задачи аэросъемки, разведки, слежения, перехвата и многие другие. Именно БПЛА являются одними из самых востребованных на рынке РС в силу возможности перемещения в трех плоскостях, что позволяет значительно расширить спектр применения таких устройств, позволяя им выполнять задания, недоступные для человека или других технических средств.

Наряду с эффективностью использования БПЛА можно отметить ограниченность любой РС её техническими характеристиками. Например, одиночный БПЛА не может обеспечить полноценный контроль за территорией больше его площади прямого обзора. Модификация же конкретных устройств зачастую дорогостояща и нецелесообразна, что выводит на передний план проблему масштабирования БПЛА.

Решить эту проблему позволяет использование групп БПЛА, подразумевающее объединение нескольких дронов в строй, способный выполнять необходимые задачи гораздо эффективнее одиночных экземпляров.

Например, такие группы могут выполнять задачи картографирования местности, совместного наведения на цель, радиоэлектронного подавления, поиска и локализации объектов, построения летающих фазированных антенных решеток и т. д. [1].

Особенной важностью в таком случае обладает вопрос контроля за группой, построение наиболее эффективного в заданных условиях строя и безопасного перемещения БПЛА непосредственно к выделенным для них местам. Строй РС способен наиболее рационально распределить агентов по площади, обеспечить нужную степень контроля объекта или минимальное время выполнения задания.

Таким образом, вопрос единого управления организованной группой робототехнических систем является одним из первостепенных в сфере систем управления, связи и безопасности.

Цель работы

Данная дипломная работа посвящена решению современной проблемы управления группой РС в целях достижения поставленных перед группой прикладных задач. Планируется разработать оригинальное решение задачи о назначениях РС в состав формации и представить траекторное движение БПЛА, основанное на системе правил. В экспериментальной части работы будет проведено моделирование представленных систем и методов, проведен анализ результатов, сделаны выводы и озвучены дальнейшие перспективы работы в предметной области управления РС.

Методы исследования

В данной дипломной работе для решения задачи управления целенаправленным поведением группы робототехнических систем применяются методы математического моделирования с использованием

среды MATLAB Simulink, методы искусственного интеллекта и основанные на правилах системы управления.

В качестве источников информации использовалась российская и зарубежная научная литература, а также ресурсы сети интернет.

Структура работы

В первой главе дана математическая постановка задачи и обзор сфер ее применения.

Во второй главе исследованы и формально описаны современные методы решения задачи управления группой робототехнических систем.

В третьей главе предложены методы и алгоритмы решения задачи целенаправленного поведения группы робототехнических систем.

В четвертой главе исследуются практические вопросы моделирования решения задачи управления группой РС, проводятся экспериментальные исследования.

Апробация работы

Работа прошла апробацию на международном уровне, результаты были представлены на конференции Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems 2022 (ИТТММ 2022), которая прошла в Москве 18–22 апреля 2022 г.

Публикации

По теме выпускной дипломной работы опубликована статья в сборнике тезисов конференции ИТТММ 2022 [2].

1. Исследование прикладных задач управления группой робототехнических систем

Рассмотрим подробнее объект изучения, а также введем некоторую классификацию. Семейство беспилотных летательных аппаратов можно разделить на несколько категорий:

- БПЛА с жестким крылом (БПЛА самолетного типа);
- БПЛА с гибким крылом;
- БПЛА с вращающимся крылом (БПЛА вертолетного типа);
- БПЛА с машущим крылом;
- аэростатические БПЛА.

В основном на сегодняшний момент используются две основных категории по: ЛА с неподвижным крылом и ЛА с вертикальным взлетом и посадкой (СВВП). БПЛА с неподвижным крылом обычно используются там, где за короткое время необходимо покрыть обширные территории, поскольку они могут летать со значительными скоростями [3].

В настоящее время доступность недорогих датчиков, электроники и каркасов для воздушных суден вызвала значительный интерес к разработке более дешевых беспилотных летательных аппаратов среди любителей авиации, исследователей и промышленных предприятий. Беспилотные летательные аппараты, особенно с неподвижным крылом, широко используются военными и правительственными организациями. Эти беспилотники очень удобны при транспортировке полезных грузов [4], [5]. Более того, такие задачи, как картографирование, исследования, обнаружение, патрулирование, требуют, чтобы БПЛА автономно следовал по заданной траектории на заданной высоте [6], [7].

Введем задачу управления группой РС. В качестве основной задачи возьмем именно построение формации БПЛА, как первоочередную для дальнейшего осуществления управления.

1.1. Постановка задачи управления целенаправленным поведением группы робототехнических систем и исследование сфер ее практического применения

В вопросе управления многоагентной системой синхронизация агентов является одним из основных условий. На сегодняшний момент эта активно исследуемая задача привлекает внимание не только ученых в области БПЛА, но и их коллег из других сфер науки [8], [9]. Потенциальное решение для координации между крупномасштабными системами может быть достигнуто за счет сетевой синхронизации. Авторы работ [10], [11] представили управление беспилотного летательного аппарата по аналогии с ориентацией космического аппарата.

Существует два метода достижения координации внутри многоагентной системы. Это либо распределенный (децентрализованный), либо централизованный метод [12]. Распределенный подход подразумевает наличие индивидуального контроллера внутри каждого отдельного устройства, что позволяет агенту использовать локальную информацию от своих соседей. В свою очередь, при централизованном подходе каждый отдельный агент зависит от центрального узла, от которого он получает информацию. Таким образом, один центральный узел управляет поведением всех БПЛА в строю или его части.

В случае работы дронов в средах, предусматривающих наличие ограничений связи, распределенный метод имеет значительное преимущество перед централизованным [13], [14], однако ведет к увеличению нагрузки на каждое отдельное устройство. Тем не менее, так как те или иные помехи присутствуют почти в любой реальной среде, в данной работе будет рассмотрен метод распределенной синхронизации как способ управления различными формациями БПЛА в том числе в возмущенных средах.

1.2. Математическая постановка задачи

Введем некоторые понятия. Пусть существует n одинаковых БПЛА $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ случайно размещенных в ограниченном пространстве. Положение дрона p_i в момент времени t будем описывать следующими переменными: координатами $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$, скоростью $v_i(t)$ и двумя углами ориентации θ и ψ , обозначающими угол тангажа (то есть поворот вокруг оси Z) и рысканья (то есть поворот вокруг оси Y , рис. 1). Будем рассматривать следующую динамическую систему:

$$x_i(t), y_i(t), z_i(t), v_i(t), \theta_i(t), \psi_i(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

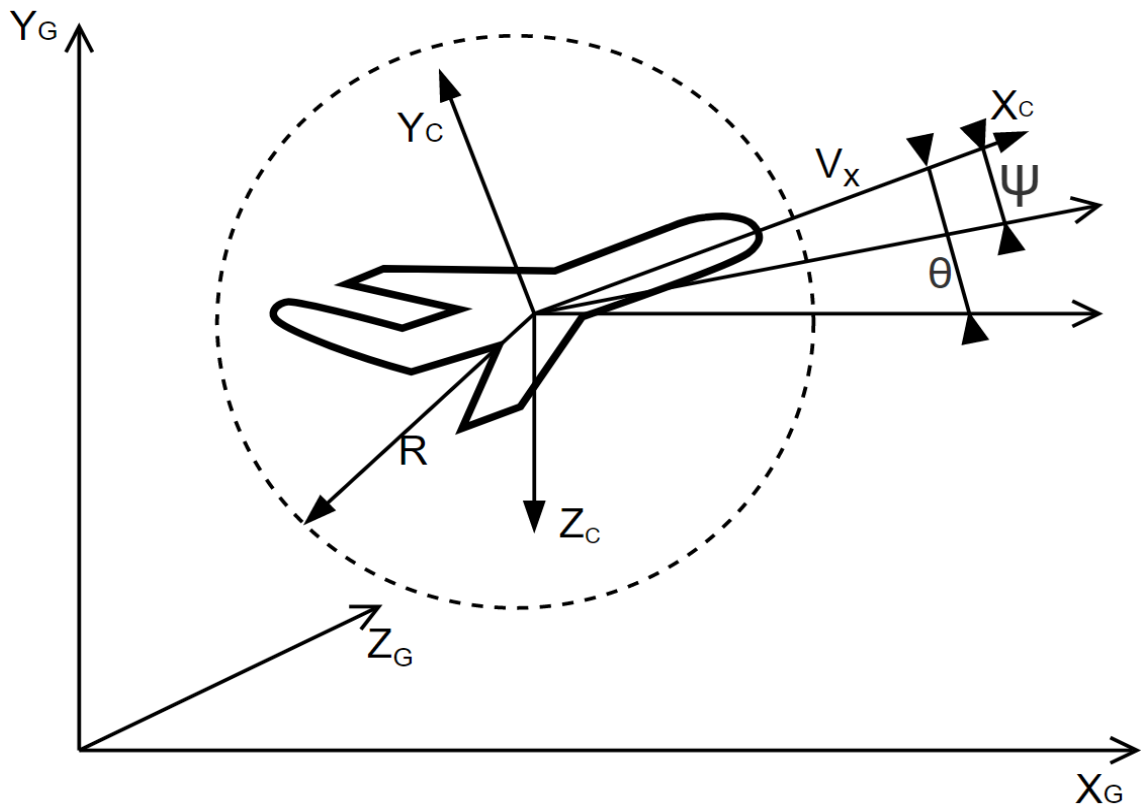


Рис. 1. Система координат БПЛА

Здесь X_G, Y_G, Z_G – координаты относительно земли; X_C, Y_C, Z_C – координаты относительно центра масс БПЛА; V_x – скорость БПЛА; Ψ – угол рысканья (поворот вокруг оси OY); θ – угол тангажа (поворот вокруг оси OZ); R – радиус сферы безопасности.

Предположим, что целевые позиции $S = \{s_1, \dots, s_n\}$, $s_i = \{x_i^s, y_i^s, z_i^s\}$ в формации даны. Тогда задачей становится перевести систему (1) из состояния $x_i(0), y_i(0), z_i(0), v_i(0), \theta_i(0), \psi_i(0)$, что обозначает положение устройства в начальный момент времени в финальное состояние $x_i(T), y_i(T), z_i(T), v_i(T), \theta_i(T), \psi_i(T)$ за определенное время T , минимизируя при этом перемещение БПЛА в целях уменьшения затрат на движение. При этом такое целевое состояние у каждого БПЛА существует только одно и принадлежит множеству S целевых позиций для любого дрона формации. Таким образом, $(x_i(T), y_i(T), z_i(T)) \neq (x_j(T), y_j(T), z_j(T)), (x_i(T), y_i(T), z_i(T)) \in S, \forall i, j = \overline{1, n}$.

Введем упрощенную модель движения БПЛА в среде без возмущений:

$$\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \cos \psi_i; \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i; \dot{z}_i = v_i \cos \theta_i \sin \psi_i. \quad (2)$$

Положим, что геометрической моделью робототехнической системы будет являться сфера радиуса R . Это условие вводится для обеспечения безопасности движения дрона в целях избегания столкновений устройств. Таким образом, безопасной дистанцией для каждого устройства в строю будет являться расстояние $d_{ij}(t) \geq 2R$.

2. Современные методы решения задачи формирования строя группы робототехнических систем

В рамках решения задачи управления целенаправленным поведением группы робототехнических систем выделим отдельно задачу построения строя БПЛА (строевую задачу). На сегодняшний момент существует целый ряд методов решения строевой задачи, основанных на различных подходах. Некоторые основаны на подражании природным принципам, какие могут наблюдаться в поведении животных, другие реализуют математически обоснованные структуры.

Особенно интересными представляются методы децентрализованного управления строем, как наиболее актуальные и разнообразные по сравнению с централизованным управлением. Таким образом, не будем в вопросе управления затрагивать непосредственно физическую реализацию методов, а рассмотрим только лишь их модели, позволяющие провести анализ преимуществ и недостатков того или иного подхода в сравнении с другими. Ознакомимся подробнее с некоторыми основными примерами.

2.1 Исследование основных подходов к решению задачи

Метод «ведущий-ведомый». Одним из самых распространенных методов является модель поведения «ведущий-ведомый». Данный способ выделяет в группе БПЛА лидера, за которым следуют все остальные – ведомые – устройства. Ведомые в данном случае поддерживают определенное положение относительно ведущего или друг друга, что и позволяет сформировать строй.

Особенного внимания в данном контексте заслуживает способ координации ведомых и ведущих аппаратов. Коммуникация может происходить как только с ведущим БПЛА, так и со всеми аппаратами, по цепочке от лидера или напрямую с главным устройством.

Множество исследователей применяет подход «ведущий-ведомый/-ые» в своих работах. Например, в работе [17] рассматривается задача синтеза согласованного управления совокупности летательных аппаратов на основе вышеназванной модели. В работе [18] производится исследование методов поддержания строя путем обмена получаемой с бортовых сенсоров информацией.

Среди достоинств данного подхода можно выделить простоту организации взаимодействия внутри группы, а также в возможность формирования строев из множества различных предусмотренных заранее конфигураций, задаваемых программно.

Недостатками метода «ведущий-ведомый» являются наличие одного или нескольких уязвимых мест, то есть тех узлов иерархии, выход из строя которых, или потеря связи с которыми дестабилизирует всю группу, или значительную ее часть. Эту проблему можно было бы решить введением дополнительных каналов связи, однако, во-первых, это не решает проблему с потерей командного устройства, а во-вторых, перегружает дроны средствами связи, что негативно сказывается на эффективности устройств и целесообразности использования столь дорогостоящих и сложных групп в целом.

Кроме того, формирование строя определенной формы требует определенной структуры связей «ведущий-ведомый» между БПЛА в группе. Без изменения структуры возможно формирование только некоторого ограниченного набора строевых положений, а изменение структуры связей «в реальном времени» не предусмотрено.

Таким образом, данный подход не подходит для тех задач, в которых роботам группы заранее не назначены целевые положения в строю, что, опять же, порождает новые сложности в виде задачи о назначениях.

Метод потенциальных полей. Следующим методом рассмотрим метод потенциальных полей. Данный метод является усложнением одноименного метода для решения задачи о поиске пути, и состоит в наделении всех существенных объектов пространства некоторыми виртуальными полями, физическим аналогом которых являются потенциальные поля. Те объекты, которые должны избегать чрезмерного сближения и столкновения, наделяются полями одного «заряда», а те объекты, которые должны двигаться друг к другу – наделяются полями противоположного «заряда» (разумеется, «заряды» - понятие условное). Движение каждого робота, таким образом, определяется влиянием результирующей силы, полученной суммированием векторов всех сил притяжения и отталкивания, действующих на этого робота.

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q)$$

Здесь притягивающий потенциал $U_{att}(q)$ и его градиент определяется как функция от фактической конфигурации q и конфигурации цели q_{goal} . Отталкивающий потенциал $U_{rep}(q)$ и его градиент определяется как функция расстояния $D(q)$ от фактической конфигурации q и ближайшим препятствием [19].

Таким образом можно выстроить ту или иную конфигурацию внутри группы, как, например, «ведущий-ведомый» при придании ведущему одного заряда, а всем ведомым противоположного; «расхождение» при задании всем объектам однополярного заряда; «схождение» при задании всем противоположных зарядов и т.д..

К достоинствам системы можно отнести простоту вычислений, которые могут быть легко реализованы даже на относительно слабых бортовых вычислительных устройствах, типичных для малоразмерных роботов. Кроме того, простота так же позволяет повысить автономность робота, в силу отсутствия связи с другими устройствами или мультифункциональными

комплексами (МФК), что делает этот метод особенно ценным в условиях возмущенной или агрессивной среды.

Бионические (биомиметические) методы решения строевой задачи.

Бионические методы основываются на стайных или роевых моделях управления, реализованных на основе природных примеров, как то рои насекомых или стаи птиц, косяки рыб [20].

Исследования стай и роев показывают, что поведение каждой особи сочетает желание оставаться в группе и в то же время стремление соблюдать некоторую дистанцию от других членов группы. Современные технические системы (компьютерные модели или роботы) способны довольно точно имитировать поведенческие тактики живых организмов, что привело к широкому распространению бионических подходов к решению различных технических задач, в том числе и строевых.

Основными характеристиками такого типа управления являются [21]:

- роботы не связаны прямыми информационными каналами связи;
- каждый робот группы располагает информацией о цели группы;
- каждый робот располагает оперативной, адаптивной моделью влияния своих действий на среду;
- каждый робот может самостоятельно получать информацию о состоянии окружающей среды;
- робот способен адаптировать модель влияния своих действий на среду на основе анализа результатов совместных действий роботов группы.

При подобной модели действия существует ограничение в виде отсутствия связи между устройствами, что вызывает сложность в получении необходимого сценария, что может решаться различными способами. Одним из таких способов является программирование дрона на некоторое воздействие, оказываемое им на среду [20]. В робота закладывается эффект,

оказываемый им на окружение при определенном действии. При совершении этого действия, в случае не наступления заложенных последствий, робот адаптирует свое поведение в соответствии с реакцией среды и поставленной целью, повторяя тем самым поведение животного в составе стаи при, например, коллективной охоте.

Таким образом, все устройства в таких группах являются автономными и реагируют на среду, изменяя свое поведение именно на основании окружения.

Достоинствами таких систем являются низкая вычислительная сложность алгоритмов, реализующих эти методы и высокая точность решения строевой задачи. Кроме того, автономность дронов в таких системах позволяет реализовывать механизмы взаимозаменяемости и этим повышать надежность систем.

К недостаткам же можно отнести ограниченность количества сценариев, закладываемых в память устройств, что не позволяет формировать строи произвольной формы в зависимости от ситуации. Более того, ряд бионических методов нацелен скорее на поддержание, а не формирование строя. С практической точки зрения эти алгоритмы находят применение в некоторых областях, но с точки зрения универсальности плохо подходят для управления робототехническими системами.

Методы на основе нечеткой логики. Широкое применение в системах группового управления интеллектуальными робототехническими системами получили методы на основе нечеткой логики. Для реализации управления на базе такого подхода используется блок обработки и преобразования данных на основе нечеткой логики – нечеткий логический контроллер (НЛК). Типичная его структура приведена на рисунке ниже (рис. 2).

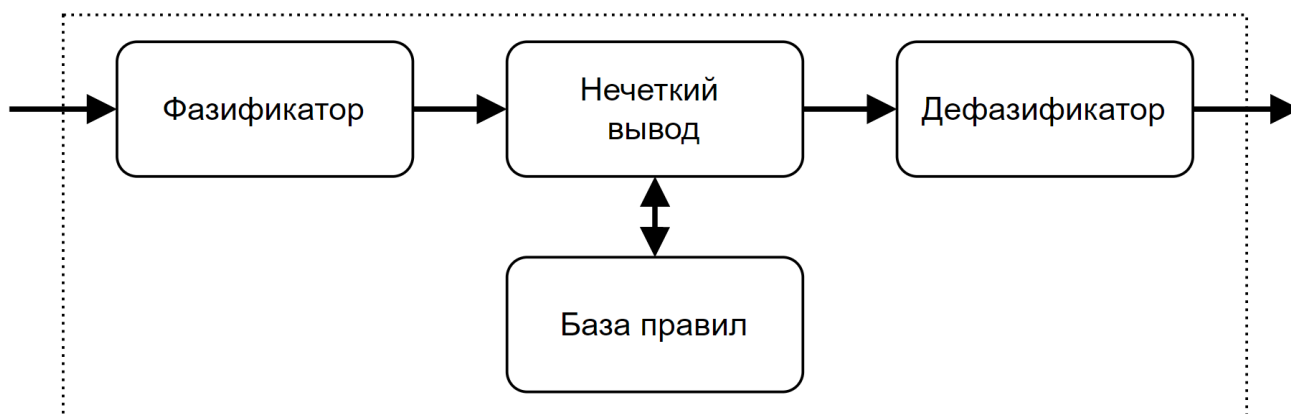


Рис. 2. Структура НЛК.

На вход НЛК поступают сигналы, имеющие некоторый физический смысл. Далее входные данные нормализуются путем умножения на соответствующие масштабные коэффициенты и поступают в фазификатор — блок, преобразующий дискретные цифровые данные в лингвистическую информацию. После обработки с помощью функций принадлежности, применяемых к нормализованным входным переменным, определяются значения соответствующих входных лингвистических переменных. Затем система нечеткого вывода на основе определенной совокупности правил нечеткого логического вывода преобразует входные переменные в нечеткие управляющие решения, после чего дефазификатор конвертирует нечеткие управляющие решения в конкретные дискретные физические сигналы управления.

Вкупе с имеющимися механизмами может применяться нейросеть, позволяющая дополнительно обрабатывать сигналы с использованием

интеллектуальных механизмов. В таком случае она помещается перед блоком дефазафикации.

Нечеткая логика нашла широкое применение в научной и практической робототехнике. Например, в работе [22] описывается решение задачи безопасного перемещения группы дронов без столкновений к определенной цели, а в работе [23] описана организация группы роботов для игры в футбол и реализации стратегии «ведущий-ведомый».

К достоинствам методов построения строев на основе нечетких контроллеров можно отнести высокую точность реализации строя и адаптивность таких систем к внешним воздействиям.

Из недостатков выделяется необходимость обработки значительного объема информации, несмотря на использование логических операций. Кроме того, отсутствуют теоретические положения, которые бы однозначно определяли порядок определения типов и количества лингвистических переменных. Все еще не формализованным является выбор количества и границ нечетких термов лингвистических переменных; отсутствует и теоретическое обоснование необходимой формы и количества функций принадлежности. Значительную сложность представляет проблема исследования свойств системы управления с нечетким контроллером. Ввиду отсутствия аналитических методов, для этой цели используется в основном компьютерное моделирование.

Метод виртуальных структур. При таком подходе для реализации задачи управления строем последовательно выполняются три этапа:

- рассчитывается требуемая динамика виртуальной структуры, ее формат и состояния;
- состояния виртуальной структуры трансформируются в соответствующие состояния для каждого отдельного исполнителя;

- индивидуальные правила управления каждого из устройств в строю реализуются для отслеживания траекторий в соответствии с предыдущими этапами [24].

Каждый аппарат точно рассчитывает свое движение для перемещения в заданные вершины движущейся выбранным образом виртуальной структуры. Таким образом, в данном подходе необходимо точное вычисление координат роботов в некоторой глобальной системе координат, что не всегда является достижимым или необходимым условием выполнения миссий.

Чуть позже появилась идея виртуальных лидеров, основанная на том, что форма строя представлена в виде многоугольников. Данная концепция подразумевает наличие некоторой группы виртуальных акторов, задающих как движение реальных аппаратов, так и саму форму строя. Эта модификация является более гибкой стратегией управления, однако сложность системы возрастает с ростом количества реальных аппаратов (а значит, и виртуальных лидеров), что усложняет масштабируемость. Подобный метод использовался авторами работы [25] при построении моделей автономного морского транспорта.

К достоинствам подхода относится устойчивость к внешним возмущениям вследствие наличия обратной связи от виртуальной структуры ко всем аппаратам группы. Поведение строя при этом довольно легко предсказуемо, что позволяет без затруднений сохранять форму строя при следовании пути или отслеживании траектории. Кроме того, отсутствие лидера позволяет избежать типичных для метода «ведущий-ведомый» проблем с уязвимостью ключевого аппарата и загруженностью каналов связи.

Однако на практике из-за высокой динамики событий при полете БПЛА, наличия возмущений различных типов, а также неголономной динамики самих аппаратов (для самолетного типа), становится проблематичным поддержание структуры с одновременным отслеживанием

функции желаемых состояний виртуальной структуры каждым из аппаратов. Аналогично подходу «ведущий-ведомый» отсутствует обратная связь от ведомых к лидеру. Таким образом, данный метод представляется предпочтительным для спутников или наземных микро-роботов, то есть устройств, не работающих в динамично меняющейся среде. Кроме того, большая вычислительная и коммуникативная нагрузка ложится на централизованный узел управления.

Подход на основе консенсуса. Еще одним из возможных подходов к управлению формациями БПЛА и роботов, в которых анализируется децентрализованная архитектура взаимодействия агентов, является «консенсус» иначе называемый «флокированием» или стайным управлением, также получивший применение в современной науке. Например, в работе [26] изучается стайное управление группы малых БПЛА при движении к целевой точке в среде с препятствиями, а в [27] рассматривается стайное движение однотипных управляемых систем, выполняющих задачу движения к цели внутри виртуального эллипсоидального контейнера с учетом стратегии избегания столкновений.

Данный подход изначально разрабатывался для упрощенных моделей аппаратов, соответственно для реальных систем с неидеальным балансом она может работать только вблизи положения равновесия.

Базовая модель флокирования (разработанная Рейнолдсом, [28]) предусматривает три простых правила управления скоростью и курсом, которые описывают маневрирование отдельных объектов на основе положений и скоростей ближайших соседей:

- объект стремится избежать столкновений с соседями (отгалкивание);
- объект старается двигаться в том же направлении, что и соседи (выравнивание);

- объекты пытаются двигаться вместе на одинаковом расстоянии друг от друга, не допуская разделения стаи (притяжение).

На данный момент эта первоначальная идея получила дальнейшее развитие в нескольких видах, таких как, например, теоретические основы Олфати-Сабера и Таннера [29], однако четко детерминированного «правильного» метода нет. Понятие консенсуса или флокирования больше концептуальное и объединяет в себе множество реализаций стайного или роевого децентрализованного подхода к управлению группой БПЛА.

Среди сильных сторон подхода можно выделить то, что изначально он основывается на анализе архитектуры взаимодействия агентов и предполагает полностью децентрализованную структуру, со всеми вытекающими достоинствами такими как: масштабируемость, распределение вычислительных и коммуникативных ресурсов, адаптивность к внешним условиям, локальное взаимодействие, а также сохранение устойчивости при потере агентов.

Но так как изначально подход рассматривал простейшие линейные модели в виде точечных масс, для применения к реальным системам необходимы дальнейшие исследования, в которых будут учтены нелинейности моделей, ограничения на входах систем, различного рода неопределенности в измерениях и внешних возмущениях и т.д.. Метод весьма активно развивается, но пока только развивается.

3. Разработка методов решения строевой задачи для группы БПЛА

Выполнение любого задания группой агентов (БПЛА) подразумевает в себе взаимодействие дронов. Групповое же взаимодействие невозможно без распределения задач между исполнителями в группе, что автоматически ставит перед оператором задачу формирования такого управления группой, при котором группа будет максимально эффективно и безопасно принимать те положения в пространстве, которые будут отвечать интересам группы агентов. Для этого каждому исполнителю в строе необходимо назначить задание и место в формации, что поднимает вопрос о распределении этих мест и заданий между дронами.

Для решения конкретной задачи о формировании и поддержании устойчивой формации группы БПЛА необходимо ввести некоторые вводные данные, которые будут использоваться в дальнейшей работе. Положим, что в начальный момент времени БПЛА в группе могут быть размещены произвольным образом в пространстве, иметь произвольный курс и скорость движения. Угол отклонения курса дрона от курса формации обозначим за ξ_i , где $i = \overline{1, n}$ (рис. 3).

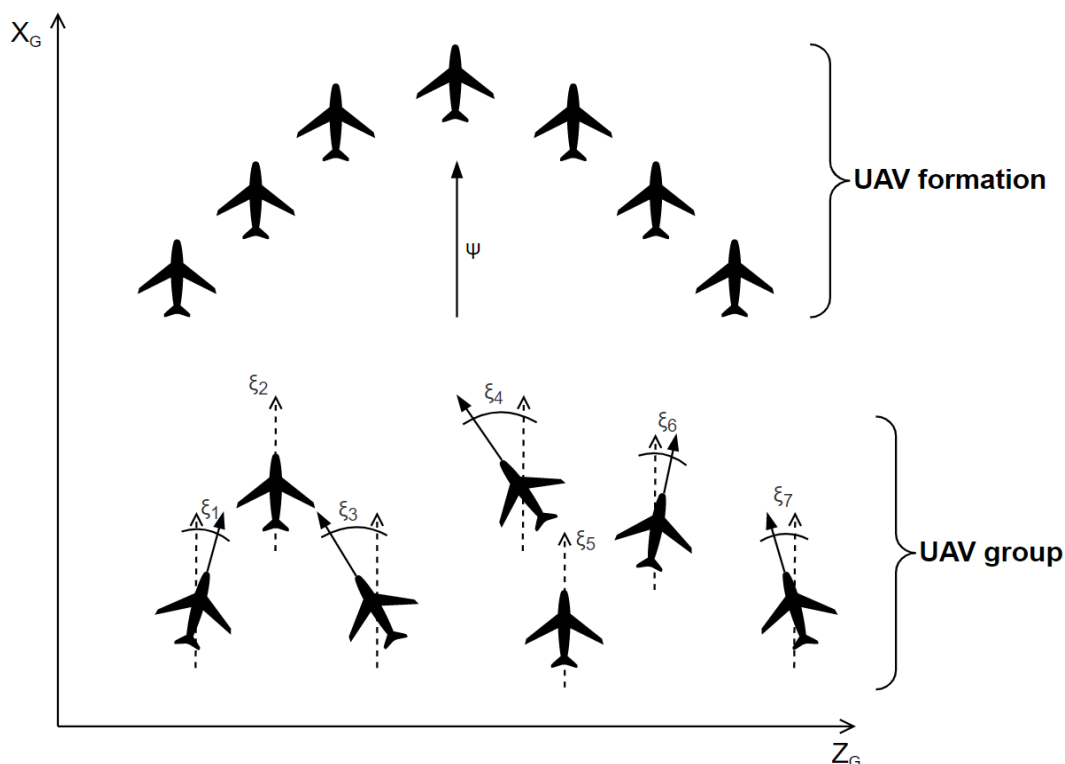


Рис. 3. Распределение БПЛА и заданные места в формации.

3.1 Задача траекторного движения летательного аппарата

В данной работе для представления метода решения поставленной задачи и моделирования реального полета группы БПЛА будет использоваться основанная на правилах модель траекторного движения БПЛА в условиях возмущенной среды [30].

В общем случае движение ЛА по траектории может быть представлено в виде движения к определенной желаемой целевой позиции. Представив движение этой целевой позиции по необходимой траектории, получим задачу преследования псевдоцели, решение которой позволяет направить летательный аппарат нужным образом. Траекторию же такой псевдоцели можем представить в виде последовательности опорных точек, сравнение позиции ЛА в пространстве с которыми позволяет последнему вычислить свое отклонение от курса и скорректировать летные параметры.

Задача осложняется наличием ветровых нагрузок, которые влияют на скорости, траектории, расстояния между беспилотниками и, в конечном счете, на безопасность полета. Для компенсации данного эффекта предполагается, что движение каждой псевдоцели (которая и занимает в итоге позицию в формации) формирует идеальную траекторию динамического объекта в виртуальной структуре строя.

Положим, что летательные аппараты должны достигать назначенных пунктов назначения одновременно. Тогда общая схема решения сформулированной задачи определяется следующим образом:

- 1) Указать начальные местоположения беспилотных летательных аппаратов и их пункты назначения.
- 2) Решить задачу назначения и определить траектории беспилотных летательных аппаратов для достижения желаемых позиций. На этом этапе формируется базовое решение проблемы.
- 3) Определить точки пересечения траекторий беспилотных летательных аппаратов. Если существуют коллизии, перейти к пункту 4, в противном случае перейти к пункту 6.
- 4) Поменять местами назначенные позиции для конфликтующих пар беспилотных летательных аппаратов. Если коллизии все еще существуют, перейти к пункту 5, в противном случае перейти к пункту 6.
- 5) Применить предусмотренные правила для определения скоростей беспилотных летательных аппаратов, позволяющих обеспечить предотвращение столкновений. Рассчитать новые траектории достижения целевых позиций.
- 6) Конец.

Проблема назначения беспилотных летательных аппаратов на доступные позиции в строю будет описана далее, на данном же этапе необходимо рассмотреть проблему предотвращения столкновений ЛА.

Когда транспортные средства назначаются на свои целевые позиции, траектории движения становятся известными. Столкновения потенциально возможны, когда расстояния между беспилотниками уменьшаются в процессе движения. Приведем условие столкновения двух беспилотных летательных аппаратов сферической формы представлено в виде неравенства относительно времени t [30]:

$$\sqrt{\begin{aligned} &(x_i^0 + v_i t \cos \theta_i \cos \psi_i - x_j^0 - v_j t \cos \theta_j \cos \psi_j)^2 + \\ &+(y_i^0 + v_i t \sin \theta_i - y_j^0 - v_j t \sin \theta_j)^2 + \\ &+(z_i^0 + v_i t \cos \theta_i \sin \psi_i - z_j^0 - v_j t \cos \theta_j \sin \psi_j)^2 \end{aligned}} \leq 2R, \quad (4)$$

где (x_i^0, y_i^0, z_i^0) - начальное местоположение, v_i - скорость движения, θ_i, ψ_i определяют курсы тангажа и рыскания определенного БПЛА p_i .

Таким образом, конфликтная ситуация возникает, если неравенство (4) имеет действительные корни в интервале $[0; T]$. В этом случае траектории корректируются с помощью специальных правил, используемых в авиации [31].

Правило 1. Модифицировать план полета путем замены назначенных позиций для конфликтующих пар беспилотных летательных аппаратов. Это правило направлено на уменьшение количества столкновений.

Правило 2. Когда транспортные средства сближаются на одной и той же высоте, транспортное средство справа от другого имеет право приоритетного движения. Беспилотный летательный аппарат, который должен уступить дорогу, снижает скорость на Δv . Необходимо задавать это значение таким образом, чтобы неравенство (4) не имело действительных корней в $[0; T]$. Снижение скорости приведет к тому, что беспилотник прибудет в пункт

назначения позже, чем ожидалось. Избежав столкновения, беспилотный летательный аппарат должен после прохождения опасной точки увеличить скорость, чтобы компенсировать это расхождение.

Правило 3. Беспилотный летательный аппарат, который уступает дорогу, должен совершить поворот вправо, если траектории пересекаются под тупым углом, или влево, если траектории пересекаются под острым углом. Беспилотный летательный аппарат, имеющий право приоритетного движения, должен сохранять свою скорость. Предлагается отклонить направление транспортного средства на минимальное значение θ_i , чтобы неравенство (4) не имело реальных корней в $[0; T]$. После избежания столкновения беспилотный летательный аппарат должен скорректировать свою траекторию, чтобы достичь целевого положения за время T . В этом случае маршрут беспилотника состоит из нескольких прямолинейных участков.

Сначала применяется правило 1. Если после этого предполагаемые столкновения получается избежать и прочие проблемы отсутствуют, другие правила пропускаются.

3.2 Задача о назначениях

Предположим, что задана некая формация, которую дронам необходимо сформировать. Координаты вершин формации зафиксированы в пространстве в системе координат, связанной с землей. Тогда группа БПЛА должна занять позиции в формации и продолжить полет в заданном строе с заданными параметрами. Тогда в качестве критерия эффективности введем критерий наименьшего суммарного перемещения, позволяющего обеспечить минимум по перестроению и пересечению траекторий.

В таком случае суть задачи заключается в нахождении такой комбинации «БПЛА – цель», чтобы при суммировании всех полученных после распределения расстояний получился наименьший результат.

Таким образом мы получаем задачу о назначениях БПЛА на места в формации. Для решения этой задачи будем применять венгерский метод [32].

Венгерский метод предполагает распределение n агентов по n местам при минимизации затрат. Так как для каждого перелета требуется выделение ресурсов (время, топливо, стоимость и т.д.), венгерский метод будет особенно эффективен в решении поставленной задачи.

Обозначим $c_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ – затраты на перемещение, связанные с назначением агента i на место j . Далее введем переменные $x_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ так, что $x_{ij} = 1$, если пункт i назначен на место j , и $x_{ij} = 0$, если такого назначения нет. Тогда задача о назначении формулируется как задача линейного программирования [33]:

$$c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

при том условии, что

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1,$$

для всех $i, j = 1, 2, \dots, n$.

При решении задачи прямым перебором возникает затруднение при увеличении n . Венгерский же алгоритм, в свою очередь, является алгоритмом полиномиальной сложности, что дает итоговую сложность $O(n^4)$ для базовой версии или $O(n^3)$ для лучших модификаций алгоритма [34].

Для решения задачи венгерским алгоритмом составим полный двудольный граф (рис. 4), вершинами которого с одной стороны будут являться БПЛА $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ и целевые места в строю $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ с другой. Ребрами будут выступать суммы всех затрат на перемещение для каждого из БПЛА в каждое целевое место будущей формации. Наилучшую

конфигурацию распределения будем строить на основе полученной матрицы (табл. 1).

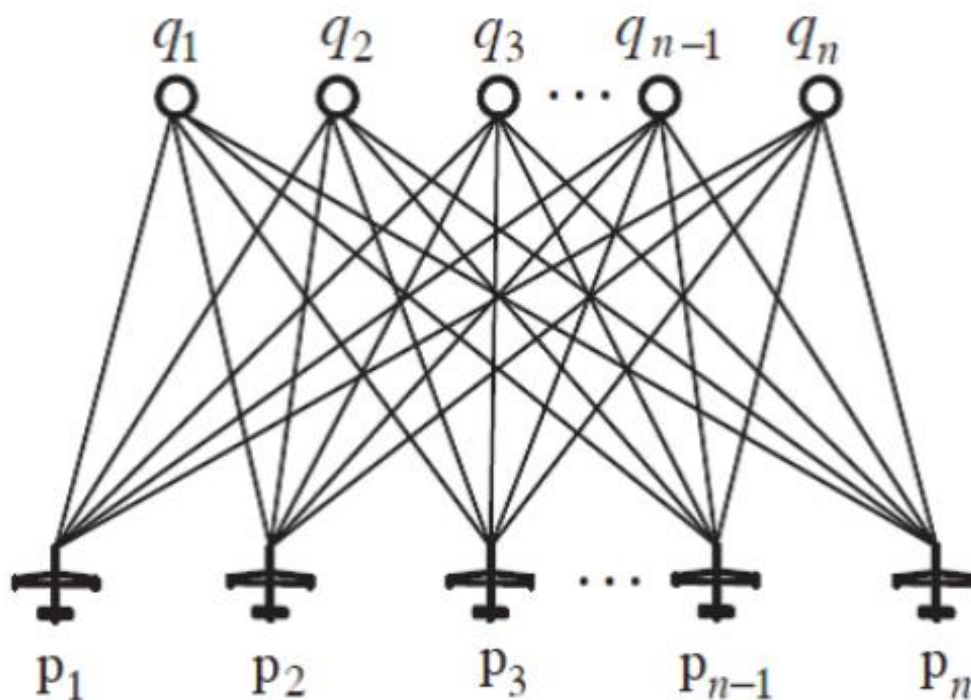


Рис. 4. Двудольный граф отношений БПЛА и формации.

Таблица 1. Матрица распределения затрат.

БПЛА группы	Места формации			
	1	2	...	N
1	c_{11}	c_{12}	...	c_{1n}
2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2n}
...
n	c_{n1}	c_{n2}	...	c_{nn}

Получив матрицу, производим нижеследующие шаги до тех пор, пока алгоритм не даст итоговый результат:

- 1) В каждой строке матрицы производим вычитание наименьшего элемента строки из каждого элемента строки (построчная редукция).
- 2) В каждом столбце матрицы производим вычитание наименьшего элемента столбца из каждого элемента столбца (редукция по столбцам).
- 3) Находим все строки с одним нулевым элементом, отмечаем эти нули и вычеркиваем все остальные нули в столбцах с отмеченными элементами.
- 4) Находим все столбцы с одним нулевым элементом, отмечаем эти нули и вычеркиваем все остальные нули в строках с отмеченными элементами.
- 5) Если остались неотмеченные или невычеркнутые нули, то выбираем случайным образом один из нулей в строке или столбце, остальные же нули вычеркиваем.
- 6) Если после выполнения предыдущих шагов каждая строка и столбец матрицы имеют по ровно одному отмеченному нулю, то получено оптимальное решение. Иначе проводим минимально возможное количество горизонтальных и вертикальных линий так, чтобы перечеркнуть все нули матрицы. Далее среди всех незачеркнутых чисел ищем минимальное и вычитаем его из всех незачеркнутых элементов, а к элементам, находящимся на пересечении горизонтальных и вертикальных линий, прибавляем это минимальное число. После возвращаемся к пункту 3.

Оптимальное распределение будет представлено отмеченными нулями на пересечении позиций БПЛА и мест в строю.

Ниже на рисунке приведен пример работы алгоритма для формации из четырех дронов. В первой таблице представлена начальная матрица

распределения затрат, далее результат редуцирования по строкам, а в последней таблице дано итоговое распределение (табл. 2–4). Таким образом, в примере оптимальным распределением является распределение $U = \{(p_1; q_3), (p_2; q_4), (p_3; q_2), (p_4; q_1)\}$, что дает сумму затрат в 20 условных единиц, что является наименьшим возможным результатом.

Таблица 2. Начальная матрица затрат.

БЦЛА группы	Места формации			
	1	2	3	4
1	14	11	2	18
2	11	15	16	9
3	18	6	3	17
4	3	18	4	10

Таблица 3. Редуцированная по строкам матрица.

БЦЛА группы	Места формации			
	1	2	3	4
1	12	9	0	16
2	2	6	7	0
3	15	3	0	14
4	0	15	1	7

Таблица 4. Итоговая матрица.

БЦЛА группы	Места формации			
	1	2	3	4
1	12	6	0	16
2	2	3	7	0
3	15	0	0	14
4	0	12	1	7

Что касается ветровой нагрузки на группу БПЛА, то она учитывается в венгерском методе путем введения матрицы ветров, которая составляется с учетом направления ветра. Введем коэффициент k_i , который будет менять свое значение в зависимости от проекции вектора направления ветра на перпендикуляр к БПЛА. Тогда матрица имеет следующий вид (табл. 5):

Таблица 5. Матрица ветров.

БПЛА группы	Места формации			
	1	2	...	N
1	k_{11}	k_{12}	...	k_{1n}
2	k_{21}	k_{22}	...	k_{2n}
...
n	k_{n1}	k_{n2}	...	k_{nn}

Тогда итоговая матрица затрат будет считаться путем сложения итоговой матрицы из венгерского метода и матрицы ветров (табл. 6). Таким образом, венгерский метод позволяет учитывать наличие ветровых или иных возмущений при движении летательного аппарата в среде. Разумеется, возмущения среды могут быть подвержены неожиданным изменениям. В таком случае изначальная матрица ветров станет неактуальна, однако даже в таком случае матрицу можно пересчитать и скорректировать курс в соответствии с необходимостью. В большинстве же случаев возмущения среды оказывают сравнительно незначительное воздействие на БПЛА и позиции в формации, поэтому такой пересчет – мера, скорее, исключительная.

Таблица 6. Финальная матрица затрат венгерского метода.

БПЛА группы	Места формации			
	1	2	...	N
1	$c_{11} + k_{11}$	$c_{12} + k_{12}$...	$c_{1n} + k_{1n}$
2	$c_{21} + k_{21}$	$c_{22} + k_{22}$...	$c_{2n} + k_{2n}$
...
n	$c_{n1} + k_{n1}$	$c_{n2} + k_{n2}$...	$c_{nn} + k_{nn}$

4. Практическое исследование решения задачи управления группой робототехнических систем

В целях подтверждения верности и адекватности предложенных методов было проведено моделирование реальных ситуаций в средах моделирования MATLAB Simulink и Gazebo.

4.1 Описание сред моделирования

4.1.1 MATLAB Simulink

MATLAB Simulink - это графическое расширение пакета MATLAB для симуляции и моделирования систем. По сути, это схематическая структура с настраиваемыми пакетами библиотек блоков с контролем стиля продукта, критериями прослеживаемости и анализом охвата приложений, аналогичная ссылка способна регулярно проверять и проверять модели.

Важными преимуществами среды Simulink являются масштабируемость и открытость. Абсолютно все файлы доступны для изменений и корректировки. Пользователю может как одиночные файлы, так и целые библиотеки файлов в целях реализации самых различных задач.

Пакет MATLAB Simulink весьма органично подходит для описания модулей физических систем. Интерфейс среды можно сравнить с конструктором, посредством блоков которого можно сконструировать практически любую модель различной сложности – начиная от системы АБС автомобиля вплоть до дальнемагистрального самолета. При всем том пользователь может конструировать свои оригинальные блоки и объединять несколько имеющихся модулей в одну общую подсистему, что позволяет значительно разгрузить модель, ввести различные уровни модели, разграничить зоны ответственности систем. Особенно ценным становится это преимущество при значительных количествах действующих блоков или при работе со сложной разветвленной схемой одного модуля. MATLAB Simulink

позволяет интегрировать в систему многие уже существующие toolbox'ы, так как является известной и широко распространенной средой моделирования.

Среди недостатков системы моделирования можно выделить неестественность структуры некоторых сложных моделей, когда приходится нагромождать модули в целях обеспечения корректной функциональности моделируемого объекта. Кроме того, можно упомянуть некоторую сложность интерфейса системы, а также связанный с этим высокий входной порог знаний для пользователя. Для освоения всего имеющегося функционала может понадобиться не один день практики и разбора инструкций, что осложняет начало работы в среде для новых пользователей. Отдельным пунктом необходимо отметить высокую стоимость пакета – даже стандартная коммерческая лицензия будет стоить несколько тысяч долларов США, а домашняя версия или версия для обучения выйдет около ста долларов США.

Тем не менее, сегодня MATLAB Simulink остается одной ведущих систем моделирования, позволяющих производить симуляции объектов любой сложности. Среда широко используется в автоматическом управлении и цифровой обработке сигналов для многодоменного моделирования и проектирования на основе моделей [35].

4.1.2 Gazebo

Еще одной популярной системой моделирования, активно используемой сегодня является симулятор Gazebo [36]. Gazebo использует формат описания SDF для моделирования транспортного средства или робота: это аналог формата XML, который описывает объекты и среду для симуляторов БПЛА, визуализации и управления [37]. Формат был разработан как часть симулятора Gazebo. SDF предназначен для использования в различных приложениях научного моделирования. Благодаря непрерывному развитию за последние несколько лет SDF стал стабильным, надежным и расширяемым форматом,

способным описывать все аспекты, от моделей роботов, статических и динамических объектов до освещения, рельефа местности и даже физики.

Ниже приведены краткое описание различных элементов формата. На рисунке 5 показаны корневые элементы SDF являющиеся основными строительными блоками при моделировании робота, в данном случае беспилотного летательного аппарата (рис. 5).

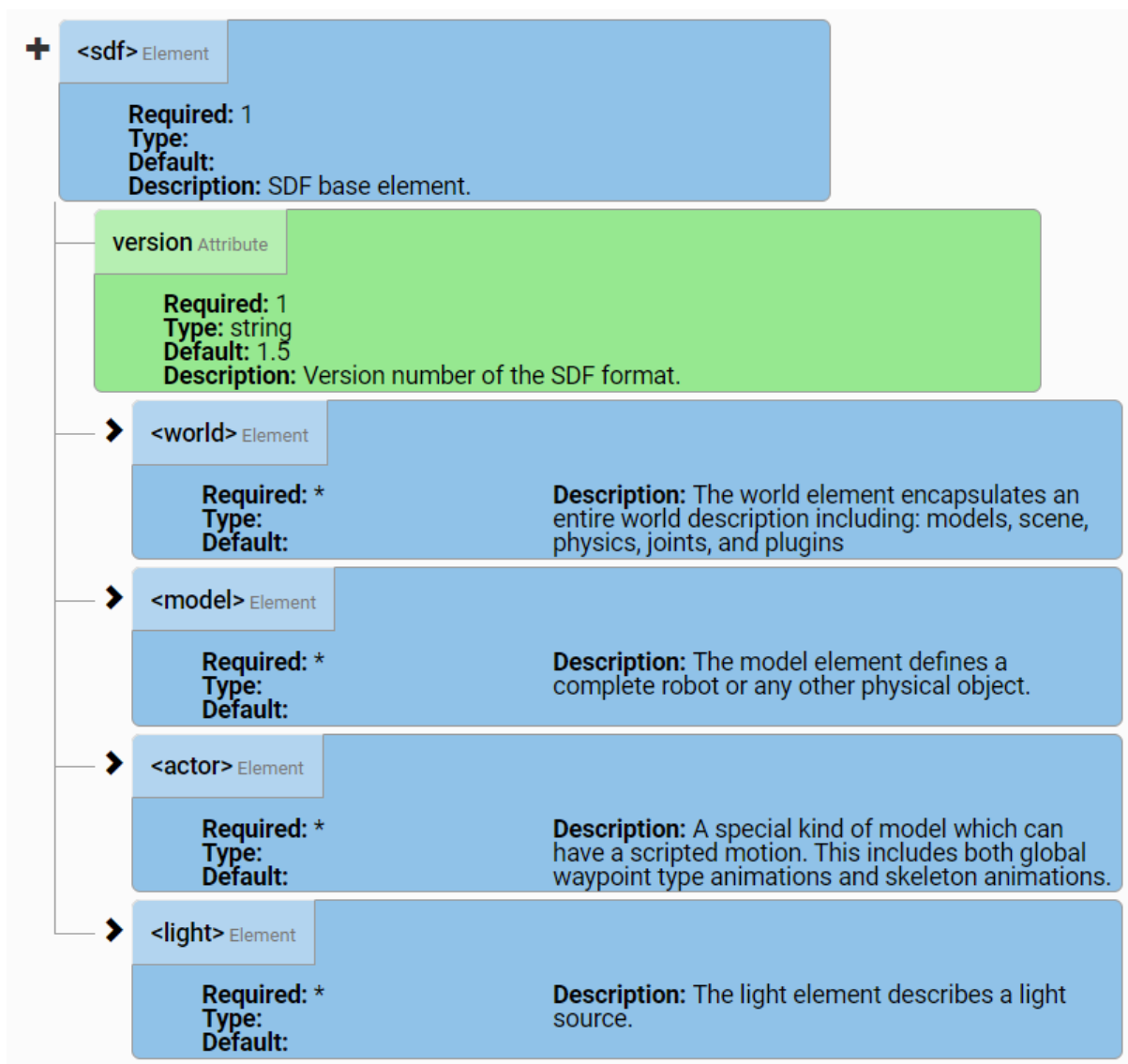


Рис. 5. Архитектура формата моделирования SDF.

Файл SDF может содержать только одного актора, но в мире может быть много акторов. Мир — это особый вид модели, которая может осуществлять движение по сценарию.

Для симуляции полета мы будем использовать SITL подход, поэтому опишем используемые приложения. Для SITL моделирования используются следующие программы: Gazebo в качестве симулятора, прошивка PX4-(v2) / cube (black) в качестве стека автопилота и QGroundControl в качестве наземной станции управления (GCS).

Архитектура взаимодействия для такой конфигурации показана на рисунке 6. Различные части системы, такие как Gazebo Simulator или QGC подключены через протокол связи UDP, PX4 использует специальный модуль MAVLink для прослушивания TCP и UDP каналов.

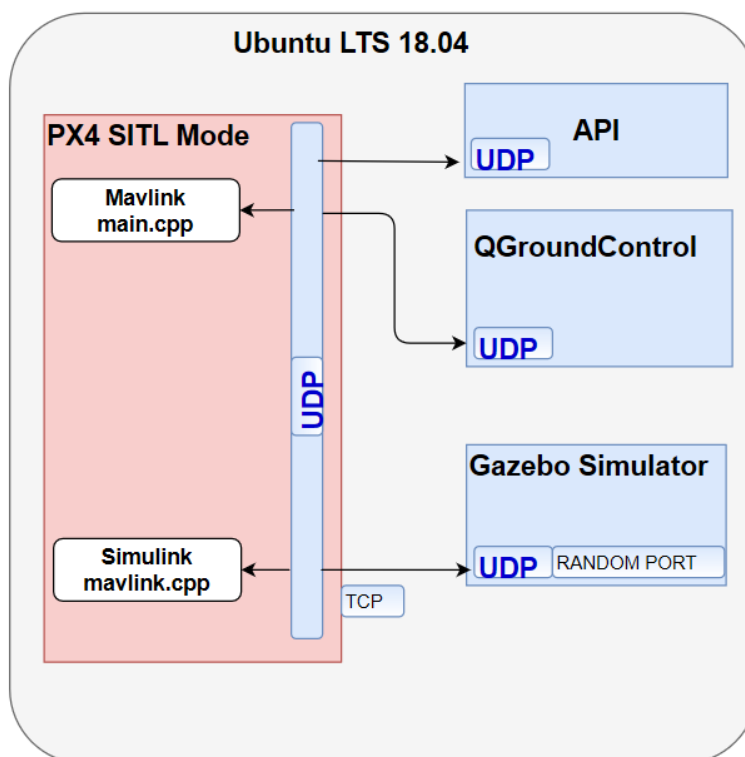


Рис. 6. Архитектура взаимодействия одиночного дрона.

Для управления несколькими БПЛА также требуется пакет MAVROS [38] вместе с другими программными пакетами, рассмотренными выше. MAVROS — это пакет, который использует коммуникационный протокол MAVLink для обеспечения драйвера связи для различных автопилотов. Кроме того, он также соединяет UDP и MAVLink наземных

станций управления. Затем беспилотные летательные аппараты управляются с помощью QGroundControl и MAVROS.

4.2 Описание экспериментальной модели

Общая схема движения БПЛА реализована в виде схемы (рис. 7). Данная архитектура позволяет учитывать ветровые нагрузки, возникающие в среде, а также математическую модель движения беспилотника.

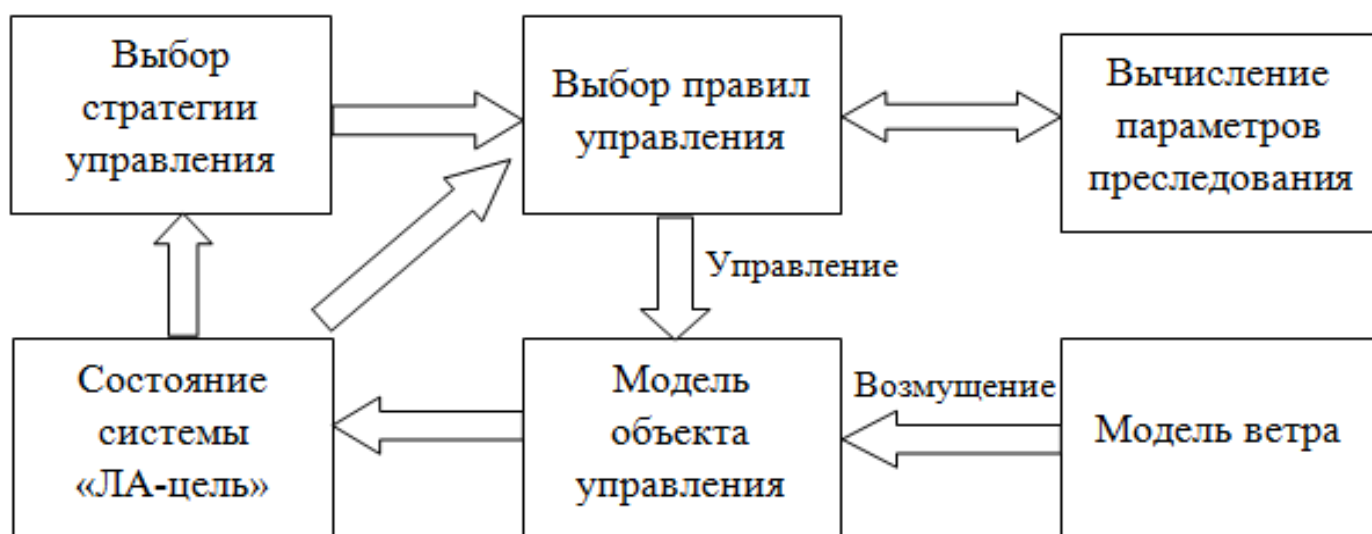


Рис. 7. Схема моделирования системы управления.

Здесь возникающие от модели ветра возмущения влияют на объект, который, подвергаясь внешнему воздействию, смещается относительно идеальной траектории своей псевдоцели. Тогда данные в ходе очередной сверки собственных координат с эталонными блок управления БПЛА это замечает, передает информацию в блок выбора стратегии управления, который, вычислив возникшее отклонение, производит выбор нужного правила управления дроном и корректирует курс преследования.

Более подробно схема представлена на рисунке 8 (рис. 8, [30]).

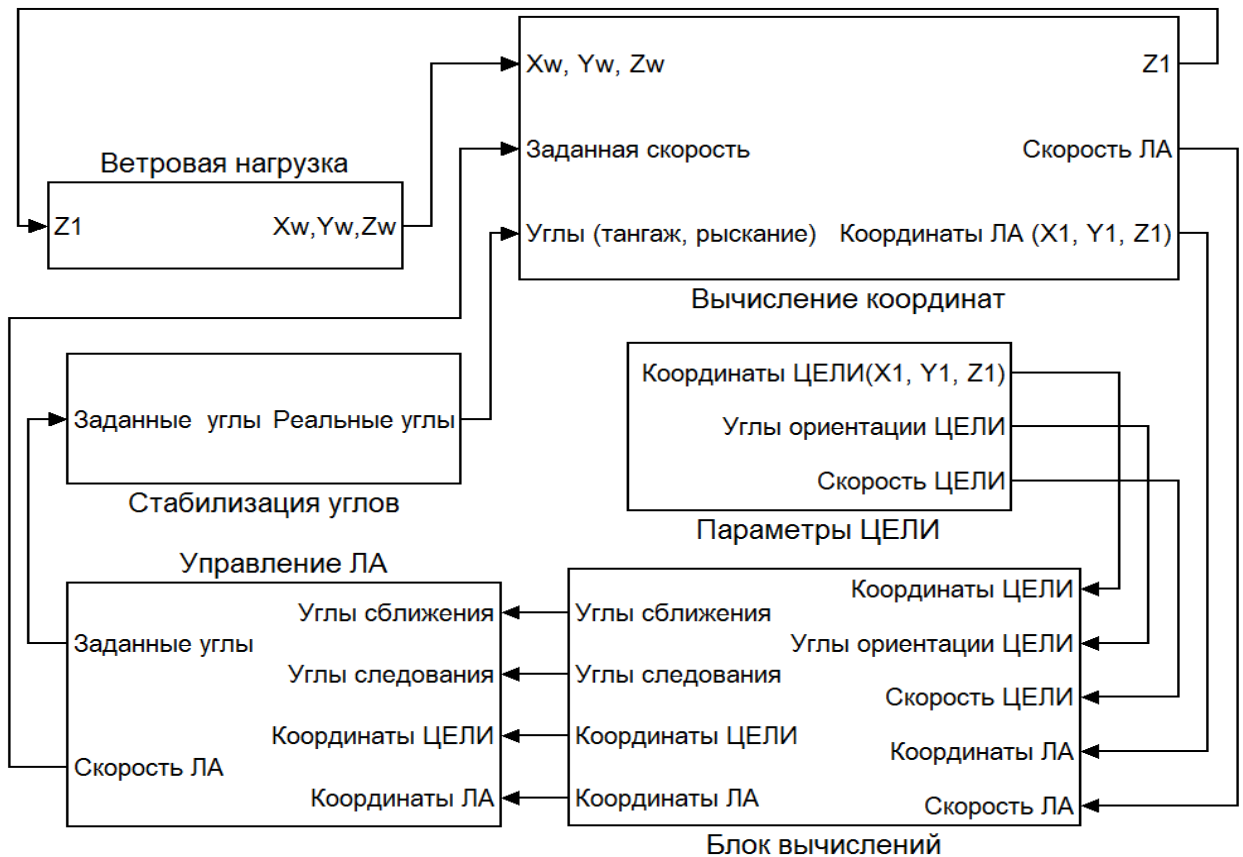


Рис. 8. Схема системы управления БПЛА в эксперименте.

Блок "Стабилизация углов" на вход получает заданные для коррекции курса при возмущениях углы ориентации. После отработки блок подает реальные углы тангаже $\theta_{pi}(t)$ и рысканья $\psi_{pi}(t)$ БПЛА на блок «Вычисление координат».

Блок "Вычисление координат" определяет местоположение дрона в пространстве. В данной модели положение каждого беспилотника в момент времени t зависит от его координат в предыдущий момент времени $(t-1)$ и ряда параметров: заданная скорость БПЛА, углы тангажа и рысканья $\theta_{pi}(t)$ и $\psi_{pi}(t)$, скорость ветра $v_{wi}(t)$. Данный блок подает на выход текущую скорость $v_{pi}(t)$ и координаты $(x_{pi}(t), y_{pi}(t), z_{pi}(t))$ беспилотного летательного аппарата.

Блок "Ветровая нагрузка" необходим для имитации возмущений среды, а именно продольных и нормальных ветровых нагрузок.

Блок "Параметры ЦЕЛИ" выводит текущие параметры цели в момент времени t . То есть координаты $(x_{c_i}(t), y_{c_i}(t), z_{c_i}(t))$, углы ориентации θ_{c_i}, ψ_{c_i} и скорость $v_{c_i}(t)$ псевдоцели c_i .

Блок "Вычисления" выводит углы сближения $\theta_{p_i}^{(1)}(t), \psi_{p_i}^{(1)}(t)$ и углы слежения $\theta_{p_i}^{(2)}(t), \psi_{p_i}^{(2)}(t)$ беспилотника.

Блок «Управление ЛА» позволяет производить корректировку курса, скорости и углов управления БПЛА, что позволяет сближаться с целью после отклонения от псевдоцелевой траектории [30].

4.3 Результаты моделирования экспериментов

В ходе работы было выполнено моделирование реального полета нескольких БПЛА, занимающих позиции в строю. Для симуляции траекторного перемещения использована динамическая модель на основе следования за псевдоцелью [39]. На рисунке 9 мы можем видеть, как три дрона формируют строй «треугольник», поддерживая такое распределение на протяжении некоторого продолжительного времени. Дроны выдерживают равное расстояние друг между другом, а также поддерживают общую скорость движения таким образом, чтобы строй не размыкался. Кроме того, мы видим незначительные отклонения в движении устройств, что свидетельствует о воздействии ветра на аппараты, то есть на наличие возмущений среды.

Продольное и нормальное воздействие ветра моделируются с помощью корреляционных функций: $R_t(\tau) = \sigma_t^2 \exp^{-|\mathbf{V}|\tau/L}$, $R_n(\tau) = \sigma_n^2 (1 - 0.5|\mathbf{V}|\tau/L) \exp^{-|\mathbf{V}|\tau/L}$, где $|\mathbf{V}|$ - величина средней воздушной скорости БПЛА; σ_t - среднеквадратичное значение продольных составляющих ветра (проекция на ось x); σ_n - среднеквадратичное значение нормальной составляющей ветра (проекция на ось y); τ - период генерации порывов ветра; L - шкала турбулентности. Сначала беспилотники (серые маркеры) назначаются на равномерно распределенные позиции (красные маркеры) в требуемом строю. Далее мы

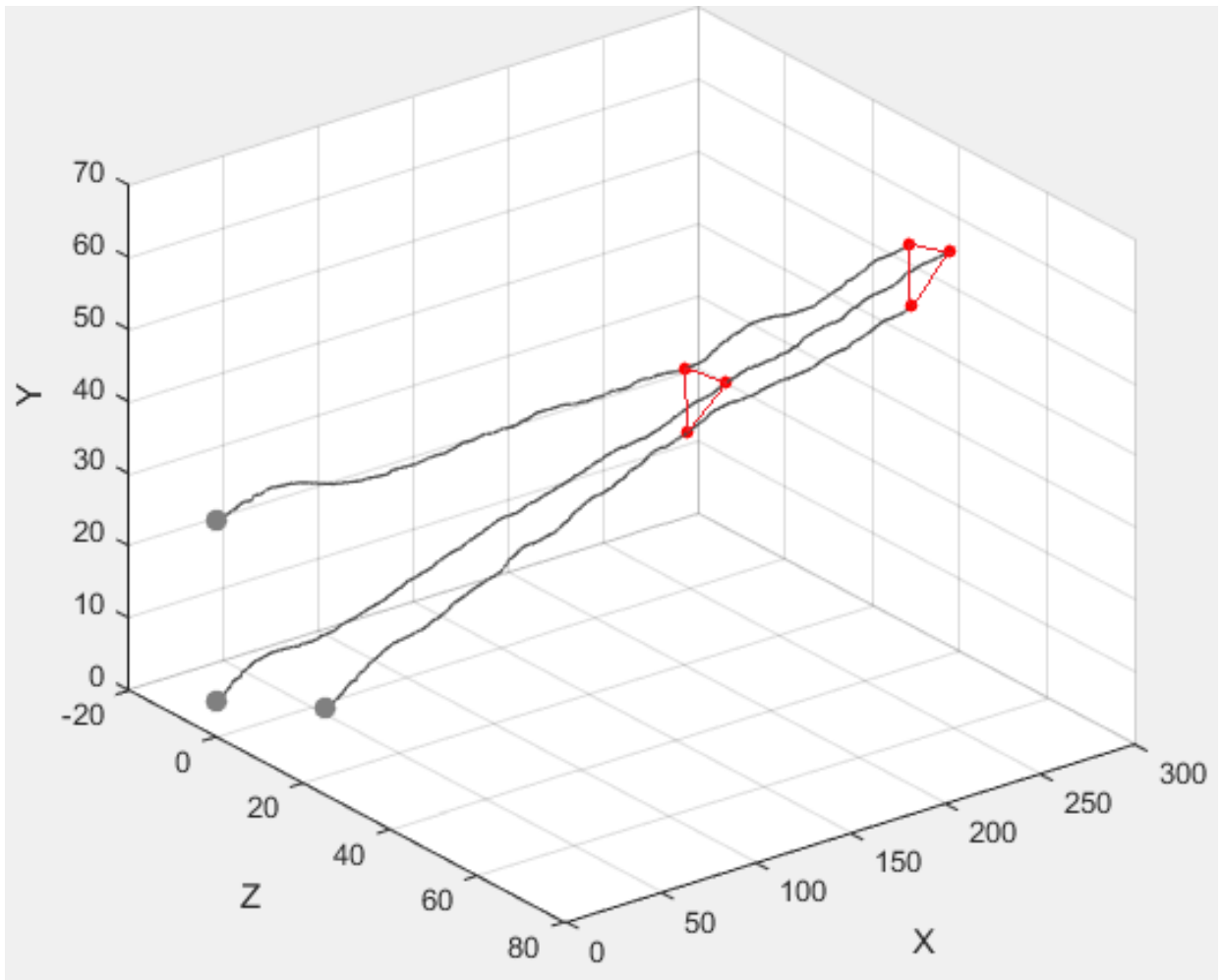


Рис. 9. Траектории движения БПЛА при формировании строя в среде MATLAB Simulink.

получаем идеальные траектории беспилотных летательных аппаратов и моделируем полет в строю для трёх летательных аппаратов. Моделирование производилось в системе MATLAB Simulink.

На рисунке 10, в свою очередь, мы можем наблюдать построение строя дронов в системе моделирования Gazebo. На данном рисунке мы видим, как группа из пяти дронов принимает строй в виде буквы V, после чего поддерживает его, вращаясь вокруг конечной точки.

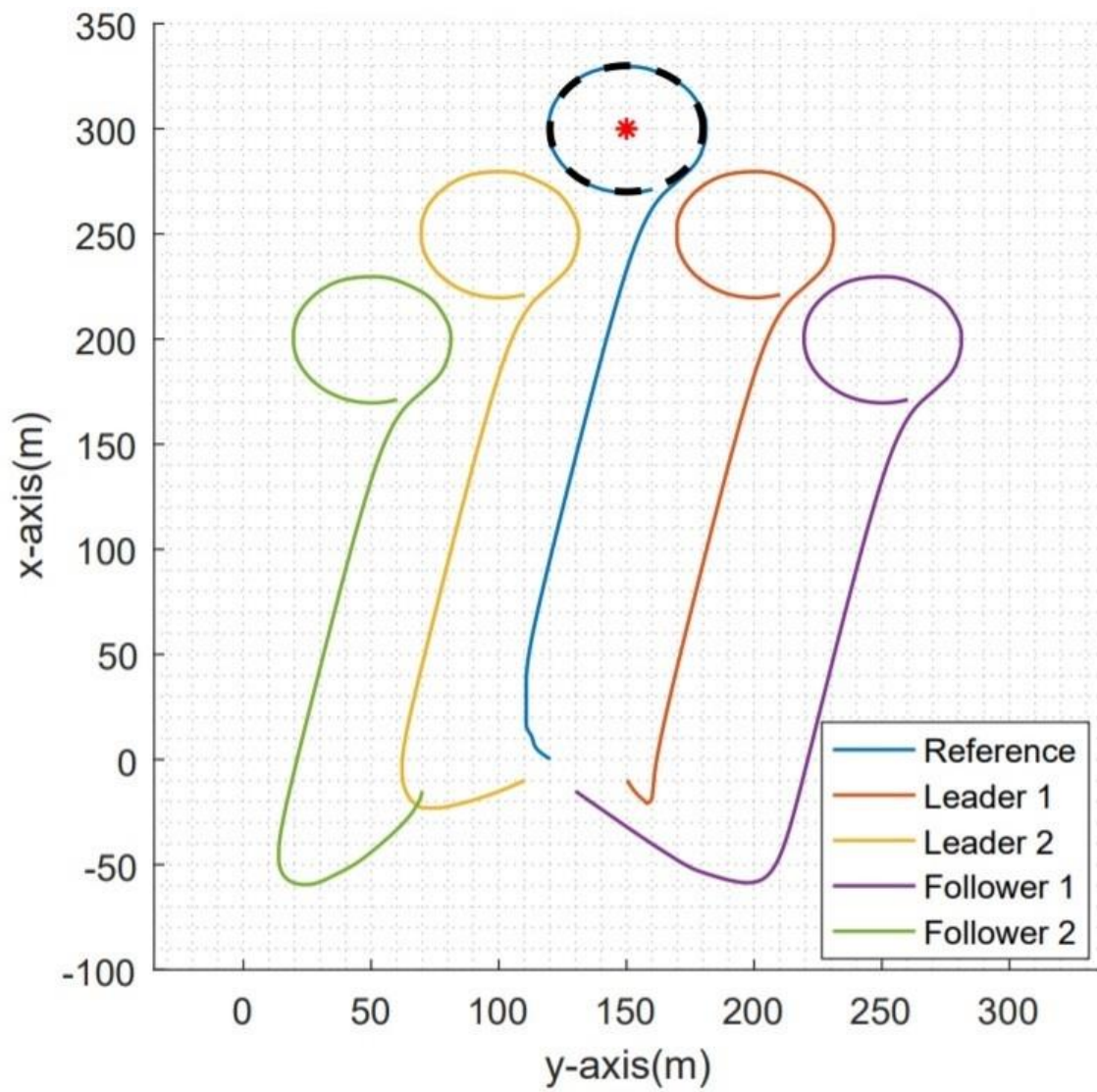


Рис. 10. Траектории движения БПЛА при формировании строя в среде Gazebo.

Заключение

В данной работе обсуждались методы целенаправленного управления группой БПЛА для достижения поставленных прикладных задач. Особое внимание было уделено вопросу эффективного и безопасного формирования строя беспилотных летательных аппаратов. В рамках рассмотрения этой задачи был предложен алгоритм назначения летательных аппаратов в строй с использованием венгерского метода, введена модель траекторного движения БПЛА, основанная на правилах искусственного интеллекта и проведено моделирование реальной задачи построения формации в условиях возмущенной среды. Все полученные результаты согласовались с обозначенными во введении целями и задачами. Таким образом, получение точных моделей группы БПЛА, формирующей строй, и является итогом выполнения исследовательской работы.

Моделирование групп БПЛА происходило в двух средах: в программном пакете MATLAB Simulink, а также в среде Gazebo. Обе среды были кратко описаны в ходе работы, продемонстрированы возможности каждой из них. Системы моделирования показали свою эффективность в задачах симуляции движения групп летательных аппаратов, в обоих был достигнут положительный результат.

В данной работе также были приведены и рассмотрены основные методы управления группами дронов, выделены наиболее значимые и исследуемые подходы к решению строевой задачи, как отдельно, так и как части общей стратегии управления группой БПЛА. Были рассмотрены такие методы, как стратегия «ведущий-ведомый», метод потенциальных полей, бионические (поведенческие) методы, методы на основе нечеткой логики, методы виртуальных структур и подход на основе консенсуса (флокирование). На сегодняшний момент данная выборка охватывает большую часть современных исследований в сфере подходов к управлению формированием и

поддержанием строя автономных роботов, в том числе БПЛА, и позволяет говорить об общем состоянии сферы.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

- Текущее состояние исследований в области поведения групп робототехнических систем открывает широкий простор для дальнейших работ, как в вопросах более глубокого изучения и внедрения уже существующих подходов к теме, так и со стороны разработки новых перспективных методов.
- Предложенный метод формирования строя БПЛА, основанный на использовании правил искусственного интеллекта и венгерского метода, показал свою адекватность и эффективность. Моделирование задачи по построению формации из нескольких беспилотников в двух системах прошло успешно и подтвердило изначальную гипотезу.
- Дальнейшие исследования могут быть направлены в сторону решения вопроса взаимодействия нескольких независимых групп БПЛА, автоматического выбора наиболее эффективной формации для выполнения поставленной перед строем задачи и повышения устойчивости роя беспилотников к помехам или выбыванию части устройств из группы.
- Текущее состояние сферы позволяет говорить о скорейшем воплощении в жизнь перспективного направления применения групп БПЛА для решения прикладных задач.

Список литературы

1. Муслимов Т.З., Мунасыпов Р.А. Проблемы поддержки принятия решений при групповом управлении БПЛА // Proceedings of the 2nd International Conference Intelligent Technologies for Information Processing and Management (ITIPM'2014). – Уфа, 2014. – С. 196-199.
2. Абакумов Е.А. Исследование методов формирования строя БПЛА для решения прикладных задач // Информационно- телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 18–22 апреля 2022 г. — Москва: РУДН, 2022. — с. 165-169.
3. B. Min, J. Hong, and E. T. Matson. Adaptive robust control (arc) for an altitude control of a quadrotor type UAV carrying an unknown payloads. In 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, pages 1147–1151, Oct 2011.
4. Marconi Lorenzo Serrani Andrea Isidori, Alberto. Robust Autonomous Guidance. Springer-Verlag, 2003.
5. E. Pastor, J. Lopez, and P. Royo. Uav payload and mission control hardware/software architecture. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 22(6):3–8, June 2007.
6. Patrick Doherty and Piotr Rudol. A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization. In Mehmet A. Orgun and John Thornton, editors, AI 2007: Advances in Artificial Intelligence, pages 1–13, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer Berlin Heidelberg.
7. T. Tomic, K. Schmid, P. Lutz, A. Domel, M. Kassecker, E. Mair, I. L. Grixa, F. Ruess, M. Suppa, and D. Burschka. Toward a fully autonomous UAV: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue. IEEE Robotics Automation Magazine, 19(3):46–56, Sep. 2012.

8. Muhammad Rosa, Simone Baldi, Ximan Wang, Maolong Lv, and Wenwu Yu. Adaptive hierarchical formation control for uncertain Euler-Lagrange systems using distributed inverse dynamics. *European Journal of Control*, Dec 2018.
9. Ilario Azzollini, Simone Baldi, and Elias Kosmatopoulos. Adaptive synchronization in networks with heterogeneous uncertain Kuramoto-like units. Pages 2417–2422, Jun 2018.
10. Wenwu Yu, Guanrong Chen, and Jihu Lu. On pinning synchronization of complex dynamical networks. *Automatica*, 45(2): 429 – 435, 2009.
11. Wei Ren, Randal W. Beard, and Al W. Beard. Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 27: 73–82, 2003.
12. Ерофеева В. А., Иванский Ю. В., Кияев В. И. Управление роём динамических объектов на базе мультиагентного подхода / Компьютерные инструменты в образовании, 2015, № 6. — С. 34–42.
13. Ruggero Carli, Fabio Fagnani, Paolo Frasca, and Sandro Zampieri. Gossip consensus algorithms via quantized communication. *Automatica*, 46(1), Jan 2010.
14. Zhang L., Gao H., and Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems—a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1): 403–416, Feb 2013.
15. Borkar V. and Varaiya P. Asymptotic agreement in distributed estimation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 27(3): 650–655, June 1982.
16. Yongcan Cao, Wenwu Yu, Wei Ren, and Guanrong Chen. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9, Jul 2012.
17. Paul T., Krogstad T.R., Gravdahl J.T. Modelling of UAV formation flight using 3D potential field // *Simul. Model. Pract. Theory*. 2008. Vol. 16. P. 1453-1462.

18. Park C. et al. Formation flight of multiple UAVs using onboard information sharing // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 17397–17419.
19. Петухов П.А., Додонов С.В., Толоч А.В. Применение метода функционально-воксельного моделирования на основе средств потенциальных полей к задачам поиска пути // *Материалы XVIII Международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2018)» [Электронный ресурс]*. 2018 С. 39-43.
20. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
21. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Стайные принципы управления в группе объектов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2004. – № 12. – С. 29–33.
22. Benbouabdallah K., Qi-dan Z. A Fuzzy Logic Behavior Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment // *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 5(14). – P. 3835–3842.
23. Duman H., Hu H. Fuzzy Logic for Behavior Coordination and Multi- Agent Formation in RoboCup // *Developments in Soft Computing, Advances in Soft Computing*. – 2001. – Vol. 9. – P. 191–198.
24. Semsar-Kazerooni E., Khorasani K. Introduction // *Team Cooperation in a Network of Multi-Vehicle Unmanned Systems*. New York, NY: Springer New York, 2013. P. 1–17.
25. *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles* / ed. Sharma S., Subudhi B. London: The Institution of Engineering and Technology, 2019.

- 26.Ефремов А.Ю., Легович Ю.С. Стайное управление малыми беспилотными летательными аппаратами в среде с препятствиями // Проблемы управления. 2019. № 3. С. 72–80.
- 27.Куржанский А.Б. О задаче группового управления в условиях препятствий // Тр. ИММ УрО РАН. 2014. Том 20, № 3. С. 166–179.
- 28.Reynolds, C.W. Flocks, Herds and Schools: a Distributed Behavioral Model // Computer Graphics. — 1987. — Vol. 21, No. 4. — P. 25—34.
29. Olfati-Saber, R. Flocking for multi-agent dynamics systems: algorithms and theory // IEEE Trans. on Automatic Control. — 2006. — Vol. 51, No. 3. — P. 401—420.
- 30.Khachumov M.V. A Rule-based Approach for Controlling UAVs Formation Flight.
- 31.Хачумов М.В. Интеллектуально-геометрическое управление траекторным движением группы БПЛА в сложных условиях // Материалы Всероссийской конференции с международным участием "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем", Москва, РУДН, 13 - 17 апреля 2020 г. - М.: Изд-во РУДН, 2020. - С. 207-211.
- 32.Цирель С.В. Венгерский способ. М.: УРСС, 2007. 120 с.
- 33.Кудрявцев Е.М. Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. – М.: Радио и связь, 1984.
- 34.Khachumov V.M. Planning the trajectory of the aircraft. — Artificial intelligence and decision-making, 2015. — Vol. 4. — P. 70–76.
- 35.SIMULINK // exponenta.ru. URL: <https://exponenta.ru/simulink> (дата обращения 15.05.2022).
- 36.Gazebo Simulator website // gazebosim.org. URL: <https://www.gazebosim.org/> (дата обращения 11.02.2022).

37. Gazebo // sdformat.org URL: <http://sdformat.org/>. 2019 Open Source Robotics Foundation.
38. Vladimir Ermakov vooon341 AT gmail DOT com. <http://wiki.ros.org/mavros>.
39. Abramov N.S. Makarov D.A. Khachumov M.V. Controlling Flight Vehicle Spatial Motion Along a Given Route. — Automation and Remote Control, 2015. — June. — Vol. 76. — P. 1070–1080