

Rybak Larisa Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: rl_bgtu@intbel.ru; Belgorod, Russia; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Mechanical Engineering Technology; chief researcher at the Federal Research Center "Informatics and Control" of the Russian Academy of Sciences.

Duen Ivan Alexandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: duyun77@mail.ru; Belgorod, Russia; phone: +79087828422; postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology.

Cherkasov Vladislav Vital'evich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, e-mail: labbgugos@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79805253793; junior researcher.

Voloshkin Artem Alexandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79524349277; cand. of eng. sc.; junior researcher an employee.

Dunin Tatyana Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: tanduun@mail.ru; Belgorod, Russia; phone: +79202028298; dr. of eng. sc.; associate professor; head Department of Mechanical Engineering Technology.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-45-59

А.И. Савельев, А.В. Рябинов, А.В. Семенов

МОДЕЛИ БЕСШОВНОГО СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ БПЛА

Внедрение групп беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в точное земледелие сдерживается рядом проблем, относящихся к устойчивости связи на удаленных от точки взлета участках и зависимостью от погодных условий, которые могут снижать эффективность применения технологии. Существующие модели планирования недостаточно адаптивны к динамическим изменениям агросреды, проблемам связи и в большинстве случаев предполагают строгое следование фиксированным траекториям. Целью данного исследования является разработка концептуальных моделей бесшовного функционирования и системы связи для координации группы сельскохозяйственных БПЛА. В работе представлена диаграмма связанности элементов системы, которая обеспечивает непрерывность процессов от инициализации до автоматической замены аккумуляторов и дозаправки БПЛА. Разработана модель связи системы с узлом ретрансляции, разделяющая трафик, что позволяет исключать коллизии и стабилизировать обмен данными на дистанциях свыше 2,5 км. Представлен способ распределения задач с учетом энергообеспечения и пространственных координат БПЛА, который позволяет динамически перераспределять нагрузку при отказах. Предложенные решения повышают автономность и отказоустойчивость группы БПЛА, минимизируют участие оператора и обеспечивают безопасное выполнение миссий в условиях недетерминированной среды. Апробация предложенной модели, выполненная в лабораторных и полевых условиях, показала устойчивое функционирование при передаче данных на дальних дистанциях и при групповом режиме работы. Отдельно подтверждено отсутствие коллизий при обмене данными между БПЛА, что свидетельствует о корректности разделения трафика и эффективности выбранной архитектуры связи. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения разработанных моделей для повышения автономности и непрерывности выполнения сельскохозяйственных работ. Разработанные решения также демонстрируют потенциал масштабирования, что расширяет область их применения в задачах точного земледелия.

Беспилотные летательные аппараты; точное земледелие; бесшовное функционирование; группа БПЛА; модель связи; распределение задач; узел ретрансляции.

A.I. Saveliev, A.V. Ryabinov, A.V. Semenov

MODELS OF SEAMLESS OPERATION OF A GROUP OF AGRICULTURAL UAVS

The introduction of groups of unmanned aerial vehicles (UAVs) into precision farming is hampered by several problems related to the stability of communications in areas remote from the take-off point and dependence on weather conditions, which can reduce the effectiveness of the technology. Existing planning models are insufficiently adaptive to dynamic changes in the agricultural environment, communication problems, and in

most cases assume strict adherence to fixed trajectories. The purpose of this study is to develop conceptual models of seamless operation and a communication system for coordinating a group of agricultural UAVs. The paper presents a diagram of the connectivity of the system elements, which ensures the continuity of processes from initialization to automatic battery replacement and UAV refueling. A communication model of the system with the relay node has been developed that separates traffic, which makes it possible to eliminate collisions and stabilize data exchange over distances of more than 2.5 km. A method for distributing tasks, considering the energy supply and spatial coordinates of the UAV, is presented, which allows dynamically redistributing the load in case of failures. The proposed solutions enhance the autonomy and fault tolerance of the UAV group, minimize operator involvement, and ensure safe mission performance in a non-deterministic environment. The approbation of the proposed model, performed in laboratory and field conditions, showed its stability when transmitting data over extended distances and in group operation. The absence of collisions during data exchange between UAVs has been separately confirmed, which indicates the correctness of traffic separation and the effectiveness of the chosen communication architecture. The results obtained confirm the possibility of practical application of the developed models to increase the autonomy and continuity of agricultural work. The developed approach also demonstrates the potential for scaling, which expands the scope of its application in precision farming tasks.

Unmanned aerial vehicles; precision farming; seamless operation; UAV group; communication model; task allocation; relay node.

Введение. Развитие агропромышленного производства и реализация концепции точного земледелия стимулируют активное внедрение цифровых и роботизированных технологий. Среди них применение БПЛА сельскохозяйственного назначения занимает особое место, как гибкий и экономически эффективный способ мониторинга и обработки растений и почвы [1–4]. Ключевым преимуществом данных аппаратов является возможность работы на труднодоступных участках со сложным рельефом без необходимости создания масштабной наземной инфраструктуры, а также низкая стоимость и вариативность при проведении работ.

Эффективность полевых миссий в значительной степени зависит от погодных условий, таких как температура окружающей среды, наличие и интенсивность осадков, скорость и направление ветра, а также влажность воздуха, что обуславливает жесткие временные рамки для проведения большинства сельскохозяйственных операций. Кроме того, высокая влажность почвы, формирующаяся в результате длительных осадков, существенно ограничивает мобильность наземной агротехники из-за снижения несущей способности грунта и рисков нарушения его агрофизических свойств. В данном контексте сельскохозяйственные БПЛА предоставляют возможность оперативного проведения работ в краткосрочные временные окна с благоприятными погодными условиями. Однако для реализации этого потенциала требуется максимальное упрощение и автоматизация процессов подготовки и обслуживания группы БПЛА, с сокращением простоев между вылетами в течение рабочей смены.

Существенным фактором, ограничивающим применение сельскохозяйственных БПЛА, является удаленность полей от баз их технического обслуживания. Низкое качество полевых дорог значительно увеличивает время перемещения техники. Выезд на позицию и возвращение с нее могут занимать несколько часов, что делает нерациональным проведение кратковременных работ посредством аппаратов указанного типа. Кроме того практическое применение групп сельскохозяйственных БПЛА сдерживается отсутствием моделей, обеспечивающих их непрерывное согласованное функционирование в условиях удаленности от базы, ограничений радиосвязи и необходимости оперативной замены аппаратов без остановки выполнения миссии. Существующие подходы, как правило, ориентированы на фиксированное планирование отдельных маршрутов и демонстрируют ограниченную устойчивость обмена данными при увеличении радиуса рабочей зоны. Таким образом, эффективная эксплуатация БПЛА требует обеспечения длительной автономной работы непосредственно в границах обрабатываемых площадей.

Научная новизна работы заключается в разработке новой модели организации группового функционирования сельскохозяйственных БПЛА, а также в усовершенствовании подходов к координации и обмену данными за счёт введения двухканальной схемы взаимодействия с промежуточным узлом ретрансляции, что позволяет устранить коллизии при доступе к радиоканалу.

Обзор существующих подходов. Современное сельское хозяйство активно применяет БпЛА для мониторинга посевов [5, 6], картографирования местности [7, 8], агрохимической обработки [9], оценки урожайности и анализа состояния полей [10]. Чем больше БпЛА работает одновременно и сложнее становится организация воздушного движения, тем выше требований к слаженному взаимодействию групп агентов. Когда множество аппаратов выполняют различные задачи в одном воздушном пространстве, критически важно обеспечить их пространственную координацию и предотвратить столкновения на пересекающихся маршрутах.

При выполнении сельскохозяйственных операций БпЛА работают в условиях плотной загрузки выделенного воздушного пространства, жестких временных рамок для выполнения задач и ограниченной вычислительной мощности бортовых систем [11]. Кроме того, в реальной эксплуатации на выполнение полётных заданий влияют внешние природные воздействия, такие как неустойчивые погодные условия – в частности, порывистый ветер способен отклонить фактическую траекторию движения БпЛА от запланированной, и внутренние технические отклонения, включающие погрешности телеметрии, сбои навигационных систем, временные потери связи с наземной станцией и отказы отдельных аппаратов. В связи с этим, маршруты миссий должны обеспечивать безопасность движения и исключение конфликтов между аппаратами в условиях прерывистой связи с центром управления, одновременно компенсируя навигационные ошибки при возможных отклонениях от запланированного курса.

Существующие методы и алгоритмы многоагентного планирования обеспечивают различный уровень оптимальности, но, как правило, не адаптированы к требованиям и ограничениям практической эксплуатации в аграрной отрасли.

Алгоритм Conflict-Based Search (CBS) [12] и его производные формируют маршруты путём централизованного разрешения конфликтов между агентами в пространственно-временной области через построение дерева конфликтов. Хотя базовый CBS обеспечивает оптимальность решения, он также предполагает дискретное пространственно-временное планирование и строгое следование фиксированным траекториям, что делает его непригодным для прямого применения в реальных сценариях с БпЛА [13]. Такие алгоритмы не предусматривают отклонений от запланированного поведения – при выходе одного БпЛА из строя или сдвига его траектории возникает риск несогласованности с действиями других агентов, что может потребовать полной переработки конфигурации маршрутов для сохранения безопасности.

Модификация алгоритма для работы с непрерывным временем – Continuous-time CBS (CCBS) [14], также имеет вычислительные ограничения при масштабировании и требует учёта физических характеристик и динамических параметров реальных летательных аппаратов.

Алгоритм Multi-Conflict-Based Search (MCBS) [15] показывает, что при росте числа агентов и плотности взаимодействий структура дерева конфликтов значительно усложняется. Количество возможных ветвлений растёт экспоненциально, что ограничивает применимость метода в сценариях с высокой насыщенностью полётов, особенно при необходимости учёта трёхмерного пространства и временных ограничений.

Алгоритм Multi-Agent Rapidly-Exploring Random Tree* (MA-RRT*) [16] осуществляет поиск траекторий в объединённом конфигурационном пространстве размерности R^3 , где m – число агентов. Базовый алгоритм Rapidly-Exploring Random Tree* (RRT*) [17] представляет собой стохастический подход выборочного построения деревьев, обеспечивающий асимптотическую сходимость к оптимальному решению. В многоагентной версии данная стратегия теоретически сохраняет глобальную сходимость, однако сталкивается с проклятием размерности – объём пространства поиска растёт экспоненциально с увеличением числа агентов. Кроме того, MA-RRT* предполагает точное выполнение заранее построенных траекторий и не учитывает внешние отклонения – например, сбои навигации, воздействие ветра или ошибки телеметрии. При отказе одного БпЛА или отклонении от плана нарушается согласованность всей конфигурации, что требует пересчёта маршрутов группы в целом.

Централизованные эвристические алгоритмы, такие как Cooperative A*, использующий приоритетное планирование и эвристики расстояния для координации агентов [18], и Enhanced Conflict-Based Search (ECBS), применяющий фокальный поиск и ограниченную субоптимальность для ускорения разрешения конфликтов [19], сокращают объем вычислений при планировании маршрутов. Данные подходы эффективны при фиксированном составе группы БПЛА и статичной среде, но не обладают устойчивостью к навигационным ошибкам и вынуждены инициировать глобальное перепланирование при незначительных отклонениях агентов от заданных траекторий.

Реактивные алгоритмы, такие как Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA) [20] и Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) [21], обеспечивают локальное предотвращение столкновений через корректировку векторов скорости в реальном времени без явной коммуникации между агентами. Однако данные подходы критически зависят от точности локализации и предполагают надёжное измерение скоростей окружающих агентов. Они особенно чувствительны к накапливающимся погрешностям навигации. Ошибки в определении относительных положений и скоростей приводят к неэффективным или потенциально опасным траекториям. При временных сбоях в измерениях или задержках обновления телеметрии эти алгоритмы не имеют механизмов компенсации, что ограничивает их применение в условиях нестабильной связи и требует постоянной высокоточной локализации для безопасного функционирования.

Поведенческие и децентрализованные подходы, включая модели на основе потенциальных полей (Artificial Potential Field, APF) [22], алгоритмы имитации поведения роя (Boids, Cucker-Smale model) [23, 24], а также алгоритмы альтернативной коллективной адаптации [25] и роевого управления с элементами кластерного анализа [26] обладают высокой адаптивностью и подходят для работы в частично наблюдаемых или слабо структурированных средах. Однако такие методы, как правило, требуют тонкой эмпирической настройки параметров, их поведение сложно предсказать в новых условиях, а маршруты формируются в процессе исполнения, а не заранее. Это затрудняет проверку надёжности, воспроизводимости и безопасности движения до начала полёта.

Проведённый обзор современных исследований позволил выявить ряд ограничений и нерешённых проблем в существующих подходах. Для наглядного представления основных характеристик и недостатков рассмотренных методов их сравнительный анализ приведён в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ существующих методов и их недостатки

Метод	Маршрутные ограничения	Отказоустойчивость	Масштабируемость	Требование тонкой настройки	Зависимость от внешних условий	Требования к качеству связи
CBS [12, 13]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
CCBS [14]	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Нет
MCBS [15]	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
MA-RRT [16], RRT [17]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Cooperative A [18], ECBS [19]	Нет	Нет	Ограничено	Нет	Да	Нет
Реактивные алгоритмы (ORCA, RVO) [20, 21]	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Да
Децентрализованные подходы [22-26]	Да	Да	Да	Да	Да	Нет

Ввиду выявленных недостатков существующих методов, таких как следование фиксированным траекториям, ограничения по масштабируемости, зависимость от внешних условий и высокие требования к качеству связи, актуальной является задача разработки модели бесшовного функционирования группы сельскохозяйственных БПЛА, обеспечивающей непрерывность выполнения миссии, устойчивую связь на удаленных участках поля, динамическое перераспределение задач между аппаратами и возможность автоматического восстановления работоспособности системы при отказе отдельных БПЛА.

Модель связанности элементов бесшовной системы. В рамках исследования разработана диаграмма связанности, которая отражает топологическую и функциональную взаимосвязь ключевых элементов бесшовной системы функционирования группы сельскохозяйственных БПЛА в условиях недетерминированной агросреды.

На рис. 1 группа БПЛА выступает в качестве основной части системы, осуществляющая взаимодействие с другими компонентами. Функционирование представленной системы охватывает этапы от инициализации и планирования до завершения миссии и подготовки к следующему циклу, обеспечивая непрерывность, автономность и устойчивую связь при выполнении всех операций.

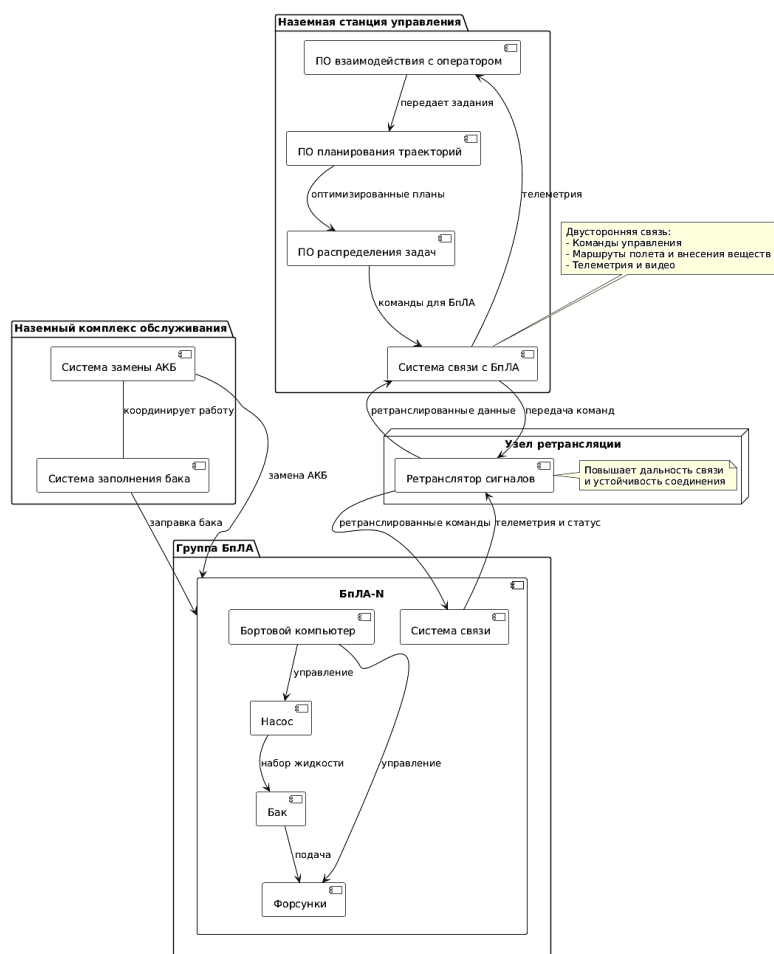


Рис. 1. Связанность элементов бесшовной системы функционирования

Процесс начинается с инициализации программного обеспечения наземной станции, после чего система функционирования проводит комплексную диагностику. На первом шаге проверяется связь с узлом ретрансляции, опрашивается состояние всех БПЛА, включая уровень заряда аккумуляторных батарей, объём рабочего раствора и исправность бортового оборудования. Затем подтверждается готовность наземного комплекса обслуживания.

На основе полученных данных оператор формулирует задачу, задавая геометрию целевой области, агрохимические параметры – тип препарата, норму внесения, высоту полёта, и ограничения миссии, в том числе временные рамки, запретные зоны. ПО планирования траекторий анализирует доступные ресурсы, количество и характеристики БПЛА, и с учётом геометрии поля формирует энергоэффективные маршруты, распределяя зоны работы между аппаратами.

Сформированные индивидуальные задания передаются на борт каждого БпЛА группы через канал связи, усиленный промежуточным узлом ретрансляции, после чего аппараты подтверждают готовность к выполнению.

В ходе выполнения миссии БпЛА осуществляют координированный взлёт, занимают расчётные позиции и следуют по назначенным траекториям с постоянной коррекцией курса по данным глобальной навигационной спутниковой системы и бортовых датчиков. По достижении зоны внесения активируется распыляющее оборудование: бортовой вычислитель управляет насосом, обеспечивающим подачу рабочего раствора из бака к форсункам, которые формируют аэрозоль с заданной дисперсностью. Расход жидкости контролируется в режиме реального времени. БпЛА обмениваются данными о прогрессе выполнения, а наземная станция при необходимости перераспределяет зоны ответственности в случае исчерпания ресурсов или технических отклонений.

Параллельно осуществляется непрерывный мониторинг состояния каждого БпЛА – через узел ретрансляции передаётся телеметрия, включающая текущие координаты, остатка заряда и раствора, а также статус оборудования и параметры миссии. На основе полученных данных алгоритмы на наземной станции прогнозируют необходимость в обслуживании и обеспечивают ротацию агентов группы. При подходе к пороговым значениям ресурсов система определяет оптимальный момент для возвращения БпЛА на обслуживание, формирует маршрут возврата и назначает замену из резерва или перераспределяет нагрузку. По прибытии на площадку наземный комплекс автоматически фиксирует аппарат, заменяет аккумулятор и производит дозаправку бака требуемым рабочим раствором до заданного уровня, после чего БпЛА возвращается в состав группы.

Ключевую роль в обеспечении устойчивости взаимодействия играет узел ретрансляции, который устанавливает и поддерживает канал связи между наземной станцией и группой БпЛА. Он агрегирует данные телеметрии от всех аппаратов и ретранслирует команды управления, обеспечивая надёжную передачу информации в том числе и при значительном удалении или наличии радиотеневых зон. По завершении обработки система инициирует возврат всех аппаратов, формирует очередь посадки и проводится послеполётная диагностика. В ходе диагностики собираются и анализируются данные о выполненной работе: обработанная площадь, израсходованные ресурсы, длительность миссии, выявленные аномалии, после чего на их основе формируется отчёт для оператора. Завершающий этап включает полное техническое обслуживание группы: зарядка аккумуляторов, заправка баков, калибровка оборудования и, при необходимости, обновление программного обеспечения, что обеспечивает готовность системы к выполнению следующей миссии.

Представленная диаграмма демонстрирует сквозную, интегрированную модель взаимодействия программных и аппаратных компонентов, реализующую принципы бесшовного функционирования – непрерывности, автономности, адаптивности и минимального участия человека на всех этапах цикла миссии. Предложенная модель также служит теоретической основой для последующего синтеза алгоритмов распределённого управления, а также инструментом верификации архитектурной согласованности технических решений, разрабатываемых в ходе исследования.

Модель функционирования системы связи группы БпЛА для распределения и назначения задач. Для обеспечения бесшовной коммуникации между агентами была разработана модель связи, которая обеспечивает устойчивую передачу данных и команд управления между БпЛА и наземной станцией. Широко отмечается [27] значительное снижение качества связи при удалении сельскохозяйственного аппарата на расстояние свыше 2 км от точки взлёта, а на дистанциях, превышающих 2,5 км, канал становится нестабильным ввиду чего не обеспечивает корректное распределение задач между агентами группы из-за возможного наличия препятствий и неоднородности местности. В данном случае информирование оператора о состоянии БпЛА может отсутствовать, что оказывает влияние на качество и безопасность работы группы в целом.

Существующие схемы прямой связи между БпЛА демонстрируют ограниченную эффективность при групповом применении [28]. Данные решения не обеспечивают полноценного взаимодействия агентов, лишены механизмов межаппаратного обмена данными

ми и не обладают масштабируемостью при увеличении числа аппаратов в группе. Это в свою очередь препятствует реализации распределённого управления и снижает устойчивость системы в условиях сельскохозяйственных работ.

С целью устранения выявленных ограничений архитектура системы связи БпЛА была сформирована для решения следующих проблем:

- ◆ исключение конкуренции между агентами за один канал для передачи данных;
- ◆ разделение потоков обмена между наземной станцией, промежуточным узлом и функционирующими аппаратами;
- ◆ обеспечение устойчивой передачи данных в условиях неоднородного рельефа и препятствий для группы БпЛА;
- ◆ сохранение совместимости с используемыми в проекте аппаратными решениями связи.

В качестве решения предложена модель обмена данными через промежуточный узел ретрансляции, который выполняет функцию разграничения трафика между компонентами системы. Данная архитектура предполагает наличие двух независимых каналов, что позволяет изолировать потоки информации, устранить конкуренцию за радиоресурс и исключить блокировку сообщений, характерную для одноканальных схем связи:

1) Канал «наземная станция – промежуточный узел» обеспечивает передачу данных между наземной станцией и ретранслятором. В данном случае трафик канала включает: служебные данные управления, параметры обмена и сообщения автопилота.

2) Канал «промежуточный узел – рабочие БпЛА» обеспечивает обмен данными внутри группы БпЛА и позволяет подключать несколько аппаратов без ухудшения качества.

Промежуточный узел осуществляет функцию межканального шлюза, выполняя ретрансляцию служебных сообщений между независимыми каналами. Потоки данных, поступающие от сельскохозяйственного БпЛА, перенаправляются в канал связи с наземной станцией, а управляющие сигналы и сообщения телеметрии от наземной станции управления (НСУ) – в обратном направлении, к аппарату (рис. 2).

Предложенная модель основана на функциональном и физическом разделении коммуникационных каналов. Промежуточный узел для реализации модели должен быть оснащен двумя независимыми радиомодулями, каждый из которых функционирует в собственном режиме обмена, при этом каналы не разделяют общий эфир и изолированы друг от друга. Маршрутизация служебных сообщений осуществляется программным обеспечением вычислителя промежуточного узла, который транслирует входящие данные без изменения их формата и объединения потоков. Канал связи между наземной станцией и промежуточным узлом работает в режиме одиночного обмена, тогда как канал между промежуточным узлом и рабочими БпЛА реализован в режиме группового обмена. Необходимо отметить, что параметры скорости в обоих каналах подбираются с учётом нагрузки и адаптивности к трафику для достижения устойчивости обмена данными.



Рис. 2. Модель организации групповой передачи данных

Логика распределения задач между агентами группы строится на последовательной обработке данных, получаемых от всех БПЛА. На этапе инициализации каждый из них устанавливает связь с НСУ и передаёт исходные параметры своего состояния. Далее осуществляется оценка доступных ресурсов и задач, после чего наземная станция формирует множество задач. Алгоритм выбора исполнителя основан на анализе параметров энергообеспечения, пространственных координат, доступной полезной нагрузки и оценке временных затрат на движение к точке выполнения задачи. Назначение задач происходит с учетом минимизации совокупных временных потерь и максимизации общей эффективности выполнения миссии.

Важной особенностью предложенной модели функционирования является механизм поддержания работоспособности группы в целом. На основе обмена сообщениями о состоянии и ресурсах с наземной станцией посредством БПЛА-ретранслятора принимаются решения о временной смене ведущего аппарата, перераспределении задач и выборе альтернативных траекторий движения. Такой подход обеспечивает отказоустойчивость группового поведения даже при частичной деградации прямых каналов связи. Исходя из принимаемых данных НСУ способна выполнить корректировку принятого к исполнению задания, сформировать уточняющие указания либо принять решение о перераспределении задач между БПЛА группы. В случае отказов или критических отклонений от маршрутов выполняются аварийные процедуры, включая переход в безопасный режим или возврат агента к точке базирования.

Предложенная модель связи опирается на сочетание централизованного управления и механизма самокоординации, что позволяет обеспечить высокую устойчивость группового функционирования. Новизна предложенного решения заключается в многоуровневой организации каналов связи, а также интеграции распределённого механизма выбора исполнителя задач, повышающего адаптивность и автономность группы БПЛА в условиях ограниченной или частично деградировавшей связи.

Материалы и методы. В рамках представленной работы испытания выполнялись на комплекте радиомодулей RFDesign RFD900, который был выбран в качестве базового средства обмена данными в составе группы БПЛА. Данные радиомодули обеспечивают одиночный и групповой обмен, а также поддерживают режим, заявленный производителем как обмен с включением промежуточного узла-ретранслятора. Наличие указанных режимов является основанием для выбора обсуждаемого оборудования с целью разработки канала связи в мультиагентной среде. На уровне данных ретрансляция осуществляется средствами программного обеспечения полетного контроллера, которое поддерживает пересылку служебных сообщений между подключёнными радиомодулями. В многоканальной конфигурации входящие данные могут быть направлены на другие радиомодули, что обеспечивает их программируемую ретрансляцию. Рассмотренный принцип работает в рамках выбранного режима радиоканала и использует те же особенности доступа к общему коммуникационному ресурсу, что и в одноканальной конфигурации.

В рамках лабораторных и полевых испытаний использовался единый показатель качества передачи данных, рассчитываемый по отношению доставленных пакетов к суммарному числу отправленных. Показатель определяется выражением:

$$Q = \frac{N_{\text{recv}}}{N_{\text{recv}} + N_{\text{lost}}} \times 100\%,$$

где N_{recv} – число успешно принятых пакетов; N_{lost} – число потерянных или повреждённых пакетов.

Для сравнительного анализа в лабораторных условиях проводятся испытания четырех схем взаимодействия, доступных в штатном функционале рассматриваемого оборудования:

- 1) Обмен один к одному (базовые параметры): содержит один ведущий модуль и одно ведомое устройство, при этом обмен данными выполняется по прямому каналу.

2) Обмен один к одному при повышенной скорости: включает один ведущий модуль и одно ведомое устройство, а параметры скорости увеличиваются для оценки поведения канала при повышенной нагрузке.

3) Групповой режим: обладает одним ведущим модулем и двумя (или более) ведомыми устройствами, использующими общий радиоканал.

4) Групповой режим с промежуточным узлом-ретранслятором: содержит один ведущий модуль, один модуль-ретранслятор и два ведомых устройства; режим соответствует реализации ретрансляции в составе стандартного функционала оборудования.

В рамках сравнительного анализа выполнены лабораторные испытания рассмотренных выше схем взаимодействия в условиях контролируемой внутренней среды при следующих фиксированных параметрах (табл. 2).

Таблица 2

Фиксированные параметры лабораторных испытаний

Параметр	Значение
Расстояние между устройствами	3 м
Высота расположения антенн	1,2 м
Тип видимости между антеннами	прямая
Закрепление устройств	стационарное
Наличие внешних источников радиопомех	отсутствуют

При экспериментах для каждой схемы выполнялись формирование требуемой конфигурации, запуск непрерывного обмена служебной информацией и регистрация следующих показателей:

- ◆ объём принятых данных;
- ◆ объём переданных данных;
- ◆ количество доставленных пакетов;
- ◆ количество потерянных пакетов;
- ◆ максимальный интервал между пакетами;
- ◆ скорость обмена;
- ◆ показатель качества канала.

Результаты лабораторных испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты лабораторных испытаний в условиях контролируемой внутренней среды

Показатель	Одиночный обмен	Одиночный обмен (повышенная скорость)	Групповой режим	Групповой режим с промежуточным узлом в стандартном (одноканальном) режиме
Объём принятых данных, байт	1 060 000	220 520	835 380	2 080 000
Скорость приёма, байт/с	1 860	843	1 260	1 470
Доставленные пакеты, шт.	34 145	7 490	10 577	68 722
Потерянные пакеты, шт.	145	322	539	432 390
Скорость приёма, пакетов/с	58	28	39	48
Макс. интервал между пакетами, мс	286	587	610	88
Показатель качества канала Q , %	99,6	95,9	95,2	13,7

Результаты экспериментальных исследований показывают, что одиночный режим обмена данными обеспечивает устойчивую связь только при базовых параметрах сеанса. При повышении скорости передачи данных и использовании группового режима наблюдается рост количества потерянных пакетов и увеличение временных интервалов между последовательными передачами. Штатный групповой режим с использованием промежуточного узла-ретранслятора демонстрирует крайне низкую эффективность – значение показателя качества снижается до уровня порядка 14%, сопровождаясь выраженной фрагментацией потока данных, что исключает возможность использования данной схемы для задач группового обмена.

Детальный анализ функционирования указанного режима с промежуточным узлом показывает, что все устройства функционируют в едином радиоканале, при этом промежуточный узел и ведомый аппарат конкурируют за доступ к общему каналу. Реализация ретрансляции выполнена как последовательная передача без механизма арбитража или приоритизации трафика, что приводит к возникновению коллизий и блокировкам. Промежуточное устройство не обладает приоритетом на передачу ранее принятых данных, вследствие чего служебные сообщения не могут быть своевременно переданы. В результате временные интервалы между пакетами увеличиваются более чем в 6 раз относительно одиночного канала и достигают величин порядка 600 мс, что приводит к выраженной фрагментации потока данных и падению качества канала до указанного ранее уровня.

Результаты и обсуждение предлагаемого решения. Лабораторные испытания выполнялись в условиях и по методике, полностью совпадающими с проведёнными ранее тестированиями стандартных схем связи, что обеспечивает сопоставимость результатов и исключает влияние дополнительных факторов на оценку решения.

Промежуточный узел функционирует в двухканальной конфигурации, предусматривающей отдельный канал связи с наземной станцией и независимый канал связи с рабочим БПЛА. Обмен данными между участниками осуществляется последовательно через промежуточный узел, без совместного использования общего радиоресурса. Полученные при экспериментальных исследованиях показатели представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты лабораторных испытаний разработанной модели функционирования

Показатель	Значение
Объём принятых данных, байт	257 950
Скорость приёма, байт/с	531
Доставленные пакеты, шт.	6 304
Потерянные пакеты, шт.	489
Скорость приёма, пакетов/с	18
Макс. интервал между пакетами, мс	495
Показатель качества канала Q , %	92,8

Двухканальная архитектура обеспечивает устойчивый обмен служебной информацией, в рамках которого отсутствует конкуренция устройств за общий радиоканал, а поток данных сохраняет свою равномерность. Экспериментальные результаты приводят к оптимальному результату надёжности: число потерянных пакетов выше, чем в базовом одиночном режиме и в одиночном режиме на повышенной скорости, но ниже, чем в групповом режиме без промежуточного узла. Максимальный интервал между последовательными пакетами при двухканальном групповом режиме меньше, чем при одиночном режиме на повышенной скорости и при групповом режиме без промежуточного узла, однако остаётся больше, чем при базовом одиночном режиме обмена данными. Итоговое значение показателя качества канала составляет 92,8%. Данные результаты сопоставимы с результатами, полученными в режиме прямого одиночного обмена, а также подтверждают высокую устойчивость и эффективность предложенной модели по сравнению с групповым режимом и групповым режимом с промежуточным узлом в стандартном режиме.

Разработанное решение подтверждает работоспособность в условиях лабораторных испытаний и удовлетворяет стандартным требованиям к устойчивости канала связи.

Полевые испытания проводились с целью подтверждения работоспособности предложенной модели обмена данными через промежуточный узел ретрансляции в составе группы БпЛА и оценки устойчивости канала связи на дистанциях, достигающих 5 км.

Прототип БпЛА, выполняющего функцию промежуточного узла канала связи, формируется на базе типовой мультироторной платформы. Конструкция и состав бортового оборудования обеспечивают работу двух независимых каналов обмена информацией и выполнение режима межканальной ретрансляции данных.

Бортовая система связи оснащена двумя радиомодулями, каждый из которых подключён к отдельному интерфейсу полетного контроллера БпЛА и работает в независимом режиме обмена данными: первый модуль обеспечивает связь с наземной станцией, второй – взаимодействие с рабочими беспилотными аппаратами группы.

Радиомодули размещаются по принципу исключения взаимного экранирования и минимизации влияния конструктивных элементов. Антенны устанавливаются на разных точках корпуса БпЛА. Прототип также оснащён автономным питанием радиомодулей и средствами контроля телеметрии, что обеспечивает устойчивое функционирование системы связи при выполнении полётных задач. Внешний вид применяемого БпЛА показан на рис. 3.

Испытания проводились в двух сериях: первая осуществлялась без использования ретранслятора, вторая – с применением БпЛА-ретранслятора, удерживаемого на высоте до 145 м. Прямая видимость между наземной станцией и ретранслятором сохраняется за счёт высоты удержания промежуточного узла, что исключает влияние экранирования рельефа на оценку качества связи. В процессе эксперимента показатель качества связи между рабочим БпЛА и наземной станцией фиксируется в каждой точке полётного задания.

В ходе испытаний первой серии, по прямой схеме связи, зафиксировано устойчивое функционирование канала на ближних точках маршрута, однако при удалении аппарата на расстояние около 2 км наблюдается резкое снижение качества связи. При последующем увеличении дистанции происходит полная потеря соединения с наземной станцией, что делает дальнейшее выполнение миссии невозможным на удалённых точках маршрута.



Рис. 3. Прототип БпЛА с промежуточным узлом связи

Во время второй серии испытаний, проводимых с использованием БпЛА-ретранслятора, обеспечивалась стабильная работа канала связи на всём диапазоне до 5 км. Также отсутствуют длительные разрывы соединения, а на максимальных дистанциях фиксируется лишь постепенное снижение показателя качества до уровня 83%, что остаётся в пределах порога устойчивого обмена и не препятствует корректному выполнению полётного задания. При этом сохраняется надёжное соединение даже после посадки рабочего аппарата в удалённых точках.

Разработанная двухканальная архитектура связи, включающая разделение потоков между наземной станцией, промежуточным узлом и рабочими аппаратами, устраняет ограничения, выявленные при использовании прямой схемы связи. Разделение каналов исключает конкуренцию устройств за общий радиоканал и обеспечивает равномерный поток информации. Экспериментальные исследования демонстрируют показатель качества $Q=92,8-83\%$, характеризующий стабильную передачу информации в двухканальной конфигурации.

Заключение. В представленной работе решена задача повышения эффективности группового применения сельскохозяйственных БпЛА за счет разработки моделей бесшовного функционирования.

В рамках исследования разработаны модели, которые обеспечивают бесшовное взаимодействие группы сельскохозяйственных БпЛА. Первым результатом является модель связанности элементов системы (рис. 1), охватывающая полный жизненный цикл миссии. В отличие от традиционных подходов, рассмотренных в работе, модель интегрирует этапы диагностики, планирования, выполнения и автоматического обслуживания. Ключевой особенностью является механизм ротации аппаратов: при достижении пороговых значений заряда или уровня рабочего раствора система автоматически формирует маршрут возврата и назначает замену, что исключает простои группы.

Вторым результатом стала модель организации групповой передачи данных (рис. 2). Экспериментально выявлено, что стандартные режимы обмена радиомодулей обеспечивают устойчивость канала связи только при ограниченных нагрузках и малом числе узлов. В условиях увеличения количества устройств или увеличении дистанции свыше 2,5 км, формируются конфликты доступа к каналу или снижается показатель качества связи. Предложенная архитектура использует промежуточный узел ретрансляции с двумя независимыми радиомодулями, разделяющими трафик на каналы «наземная станция–ретранслятор» и «ретранслятор–БпЛА». Это устраняет конкуренцию за эфир и коллизии, которые характерны для одноканальных схем. Предложенное разделение повышает надежность доставки команд управления и телеметрии в условиях неоднородного рельефа.

Логика распределения задач построена на централизованном анализе ресурсов с элементами самокоординации. Алгоритм выбора исполнителя учитывает энергообеспечение, координаты и временные затраты, минимизируя совокупные потери. В сравнении с алгоритмами CBS или ORCA, предложенный подход не требует глобального перепланирования при незначительных отклонениях. При этом механизм поддержания работоспособности позволяет группе функционировать даже при частичной деградации каналов связи, обеспечивая отказоустойчивость.

Итоговое значение показателя качества канала в лабораторных условиях составило 92,8%, что сопоставимо с результатами, полученными в режиме прямого одиночного обмена, а также подтверждает высокую устойчивость и эффективность предложенной модели. В полевых условиях устойчивый обмен данными фиксируется на всём диапазоне до 5 км с показателем качества связи не менее 83%.

В отличие от существующих методов, предполагающих использование фиксированных траекторий и ограниченную адаптацию к изменяющимся условиям функционирования, предложенные решения ориентированы на обеспечение непрерывного и согласованного взаимодействия группы БпЛА в условиях динамически изменяющейся среды с учетом ограничений радиосвязи и распределенного характера системы.

Обсуждаемый подход реализован применительно к задачам точного земледелия, где ранее подобные решения в комплексном виде не рассматривались, и подтвержден экспериментальными результатами, демонстрирующими повышение эффективности группового функционирования.

Внедрение предложенных решений способствует оптимизации операционных затрат и автономности системы в условиях недетерминированной агросреды. Предложенное решение так же устраняет ограничения, связанные с дискретным пространственно-временным планированием и необходимостью строгого следования фиксированным траекториям, что повышает его применимость в реальных сценариях эксплуатации БпЛА. Дальнейшие исследования будут направлены на программную реализацию, оценку масштабируемости предложенного решения и работу при отказе работы глобальных навигационных систем одного или нескольких БпЛА.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FFZF-2025-0012 «Теоретические основы и новые технические решения бесшовного управления группой БпЛА в недетерминированных средах при выполнении сельскохозяйственных задач»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Шабанов Н.Э., Чайка В.А. Применение микроэлементов при выращивании картофеля - предпосылки использования дронов // *Агроинженерия*. – 2021. – Т. 4. – С.14-20. – DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-14-20.
2. Sun C., Zhou J., Ma Y., Xu Y., Pan B., Zhang Z. A review of remote sensing for potato traits characterization in precision agriculture // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – P. 871859. – DOI: 10.3389/fpls.2022.871859.
3. Izmaylov A.Y. Smart technologies and robotic means in agricultural production // *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk, Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2019. – Vol. 89 (5). – P. 536-538. – DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
4. Stepanov A., Fomina E., Illarionova L., Dubrovin K., Fedoseev D. Vegetation Indices (NDVI and EVI) Time Series Approximation for Monitoring Crops of Khabarovsk Territory // *Informatics and Automation*. – 2023. – Vol. 22 (6). – P. 1473-1498. – DOI: 10.15622/ia.22.6.8.
5. Gubanov B., Lebedeva V., Lebedev I., Astapova M. Algorithms and software for evaluation of plant height in vertical farm using UAVs // *Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Second International Conference*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 351-362.
6. Шаїтупа С.В. Мониторинг сельскохозяйственных земель при помощи беспилотных летательных аппаратов // *Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов: сборник научных трудов*. – 2022. – С. 46-57.
7. Nikolakopoulos I.A., Petropoulos G.P. Obtaining a Land Use/Cover Cartography in a Typical Mediterranean Agricultural Field Combining Unmanned Aerial Vehicle Data with Supervised Classifiers // *Land*. – 2025. – Vol. 14, No. 3. – P. 643.
8. Pavlova A.I. Application of unmanned and geoinformation technologies for digital soil mapping // *Information technologies, systems and devices in agroindustrial complex. – Agroinfo-2021*. – 2021. – P. 97-99.
9. Hassler S.C., Baysal-Gurel F. Unmanned aircraft system (UAS) technology and applications in agriculture // *Agronomy*. – 2019. – Vol. 9, No. 10. – P. 618.
10. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R. K., Naseer S., Shafiq M., Choi J.G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges // *Energies*. – 2021. – Vol. 15, No. 1. – P. 217.
11. Makam S., Komatineni B.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming // *Discover Internet of Things*. – 2024. – Vol. 4, No. 1. – P. 12.
12. Sharon G., Stern R., Felner A., Sturtevant N.R. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding // *Artificial intelligence*. – 2015. – Vol. 219. – P. 40-66.
13. Wang Z., Zhang Z., Dou W., Hu G., Zhang L., Zhang M. Extending Conflict-Based Search for Optimal and Efficient Quadrotor Swarm Motion Planning // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, No. 12. – P. 719.
14. Andreychuk A., Yakovlev K., Boyarski E., Stern R. Improving continuous-time conflict based search // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2021. – Vol. 35, No. 13. – P. 11220-11227.
15. Liu X., Su Y., Wu Y., Guo Y. Multi-conflict-based optimal algorithm for multi-UAV cooperative path planning // *Drones*. – 2023. – Vol. 7, No. 3. – P. 217.
16. Čáp M., Novák P., Vokřínek J., Pěchouček M. Multi-agent RRT*: Sampling-based cooperative pathfinding // *arXiv preprint arXiv:1302.2828*. – 2013.
17. Karaman S., Frazzoli E. Sampling based algorithms for optimal motion planning // *The international journal of robotics research*. – 2011. – Vol. 30, No 7. – P. 846-894.
18. Silver D. Cooperative pathfinding // *Proceedings of the aaai conference on artificial intelligence and interactive digital entertainment*. – 2005. – Vol. 1, No. 1. – P. 117-122.
19. Barer M. Sharon G., Stern R., Felner A. Suboptimal variants of the conflict based search algorithm for the multi agent pathfinding problem // *Proceedings of the international symposium on combinatorial Search*. – 2014. – Vol. 5, No. 1. – P. 19-27.
20. Van Den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n body collision avoidance // *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – P. 3-19.
21. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real time multi agent navigation // *2008 IEEE international conference on robotics and automation*. – IEEE, 2008. – P. 1928-1935.
22. Yan X., Jiang D., Miao R., Li Y. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi USV system based on virtual structure and artificial potential field // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 161.
23. Wu W., Zhang X., Miao Y. Starling behavior inspired flocking control of fixed wing unmanned aerial vehicle swarm in complex environments with dynamic obstacles // *Biomimetics*. – 2022. – Vol. 7, No. 4. – P. 214.

24. Alqudsi Y. Synchronous task allocation and trajectory optimization for autonomous drone swarm // 2024 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI). – IEEE, 2024. – P. 1-8.
25. Kotov D.V., Lebedev O.B. Control of movement of a group of UAVs with observance of the geometric structure of the formation based on alternative collective adaptation // Bulletin of SFedU. Technical sciences. – 2024. – Vol. 1. – P. 155-167.
26. Саенко И.Б., Лаута О.С., Мутяков Е.С., Соколов А.П. Алгоритм роевого управления БПЛА с элементами кластерного анализа // Информация и космос. – 2024. – № 4. – С. 68-75.
27. Irianto, Kurniawan. Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things. Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control. – 2022. – DOI: 10.22219/kinetik.v7i4.1551.
28. Lim R.Y.H., et al. UAV swarm communication reliability based on a comprehensive SINR model // Vehicular Communications. – 2024. – Vol. 47. – P. 100781.

REFERENCES

1. Starovoytov V.I., Starovoytova O.A., Manokhina A.A., Shabanov N.E., Chayka V.A. Primenenie mikroelementov pri vyrashchivaniy kartofelya - predposylki ispol'zovaniya dronov [Application of trace elements in potato cultivation – prerequisites for the use of drones], *Agroinzheneriya* [Agricultural Engineering], 2021, Vol. 4, pp. 14-20. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-14-20.
2. Sun C., Zhou J., Ma Y., Xu Y., Pan B., Zhang Z. A review of remote sensing for potato traits characterization in precision agriculture, *Frontiers in Plant Science*, 2022, Vol. 13, pp. 871859. DOI: 10.3389/fpls.2022.871859.
3. Izmaylov A.Y. Smart technologies and robotic means in agricultural production, *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk, Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, Vol. 89 (5), pp. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
4. Stepanov A., Fomina E., Illarionova L., Dubrovin K., Fedoseev D. Vegetation Indices (NDVI and EVI) Time Series Approximation for Monitoring Crops of Khabarovsk Territory, *Informatics and Automation*, 2023, Vol. 22 (6), pp. 1473-1498. DOI: 10.15622/ia.22.6.8.
5. Gubanov B., Lebedeva V., Lebedev I., Astapova M. Algorithms and software for evaluation of plant height in vertical farm using UAVs, *Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Second International Conference*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 351-362.
6. Shaytura S.V. Monitoring sel'skokhozyaystvennykh zemel' pri pomoshchi bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Monitoring agricultural lands using unmanned aerial vehicles], *Prakticheskie aspekty primeneniya sovremennykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov: sbornik nauchnykh trudov* [Practical aspects of the use of modern unmanned aerial vehicles], 2022, pp. 46-57.
7. Nikolakopoulos I.A., Petropoulos G.P. Obtaining a Land Use/Cover Cartography in a Typical Mediterranean Agricultural Field Combining Unmanned Aerial Vehicle Data with Supervised Classifiers, *Land*, 2025, Vol. 14, No. 3, pp. 643.
8. Pavlova A.I. Application of unmanned and geoinformation technologies for digital soil mapping, *Information technologies, systems and devices in agroindustrial complex. Agroinfo-2021*, 2021, pp. 97-99.
9. Hassler S.C., Baysal-Gurel F. Unmanned aircraft system (UAS) technology and applications in agriculture, *Agronomy*, 2019, Vol. 9, No. 10, pp. 618.
10. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R. K., Naseer S., Shafiq M., Choi J.G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges, *Energies*, 2021, Vol. 15, No. 1, pp. 217.
11. Makam S., Komatineni B.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming, *Discover Internet of Things*, 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 12.
12. Sharon G., Stern R., Felner A., Sturtevant N.R. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding, *Artificial Intelligence*, 2015, Vol. 219, pp. 40-66.
13. Wang Z., Zhang Z., Dou W., Hu G., Zhang L., Zhang M. Extending Conflict-Based Search for Optimal and Efficient Quadrotor Swarm Motion Planning, *Drones*, 2024, Vol. 8, No. 12, pp. 719.
14. Andreychuk A., Yakovlev K., Boyarski E., Stern R. Improving continuous-time conflict based search, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2021, Vol. 35, No. 13, pp. 11220-11227.
15. Liu X., Su Y., Wu Y., Guo Y. Multi-conflict-based optimal algorithm for multi-UAV cooperative path planning, *Drones*, 2023, Vol. 7, No. 3, pp. 217.
16. Čáp M., Novák P., Vokřínek J., Pěchouček M. Multi-agent RRT*: Sampling-based cooperative pathfinding, *arXiv preprint arXiv:1302.2828*, 2013.
17. Karaman S., Frazzoli E. Sampling based algorithms for optimal motion planning, *The international journal of robotics research*, 2011, Vol. 30, No 7, pp. 846-894.

18. Silver D. Cooperative pathfinding, *Proceedings of the aaai conference on artificial intelligence and interactive digital entertainment*, 2005, Vol. 1, No. 1, pp. 117-122.
19. Barer M., Sharon G., Stern R., Felner A. Suboptimal variants of the conflict based search algorithm for the multi agent pathfinding problem, *Proceedings of the international symposium on combinatorial Search*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 19-27.
20. Van Den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n body collision avoidance, *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 3-19.
21. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real time multi agent navigation, *2008 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2008, pp. 1928-1935.
22. Yan X., Jiang D., Miao R., Li Y. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi USV system based on virtual structure and artificial potential field, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, Vol. 9, No. 2, pp. 161.
23. Wu W., Zhang X., Miao Y. Starling behavior inspired flocking control of fixed wing unmanned aerial vehicle swarm in complex environments with dynamic obstacles, *Biomimetics*, 2022, Vol. 7, No. 4, pp. 214.
24. Alqudsi Y. Synchronous task allocation and trajectory optimization for autonomous drone swarm, *2024 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI)*. IEEE, 2024, pp. 1-8.
25. Kotov D.V., Lebedev O.B. Control of movement of a group of UAVs with observance of the geometric structure of the formation based on alternative collective adaptation, *Bulletin of SFedU. Technical sciences*, 2024, Vol. 1, pp. 155-167.
26. Saenko I.B., Lauta O.S., Mityakov E.S., Sokolov A.P. Algoritm roevogo upravleniya BPLA s elementami klasternogo analiza [Algorithm for swarm control of UAVs with elements of cluster analysis], *Informatsiya i kosmos [Information and Space]*, 2024, No. 4, pp. 68-75.
27. Irianto, Kurniawan. Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 2022. DOI: 10.22219/kinetik.v7i4.1551.
28. Lim R.Y.H., et al. UAV swarm communication reliability based on a comprehensive SINR model, *Vehicular Communications*, 2024, Vol. 47, pp. 100781.

Савельев Антон Игоревич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: saveliev@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79522496544; старший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Рябинов Артем Валерьевич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: ryabinov.a@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79969637353; младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Семенов Александр Валерьевич – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: semenov.a@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79500016901; младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Saveliev Anton Igorevich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: saveliev@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79522496544; senior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

Ryabinov Artem Valerievich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ryabinov.a@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79969637353; junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

Semenov Alexander Valerievich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: semenov.a@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79500016901; junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.