А.В.ВЕРЕМЬЁВ[1], В.А.ВИШНЯКОВ[2]

МОДЕЛИ РОЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», г. Минск, Республика Беларусь, аспирант

Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», г. Минск, Республика Беларусь, профессор, доктор технических наук, профессор

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (далее – БЛА) стремительно меняют как классические принципы ведения боевых действий на полях сражений, так и традиционные подходы в различных гражданских сферах деятельности. Закономерное развитие систем управления БЛА – это внедрение систем роевого управления. Выполнению этой задачи способствует значительное повышение вычислительных мощностей аппаратно-программных платформ, с одновременным уменьшением массогабаритных параметров, развитие систем искусственного интеллекта.

Роевые технологии управления БЛА используются: в военной сфере – разведка, огневое поражение, создание ложных целей, радиоэлектронная борьба и т. д.; спасательные операции – покрытие большой площади при поиске людей; логистика – автономная доставка с динамической маршрутизацией; 3D-картография – быстрое создание детальных моделей местности.

Роевые системы БЛА – программно-аппаратные комплексы, позволяющие группе дронов работать как единое целое. Один оператор может управлять сотнями беспилотников с автономным распределением задач, обменом данными и адаптацией к изменениям в реальном времени [1].

Ключевые функции роя:

– автономное следование и коммуникация: дроны движутся в заданной формации, обмениваются информацией, скрывают местоположение ведущего аппарата;

– гибкость и приоритизация: при выходе из строя одного аппарата или изменении условий рой перестраивается, перераспределяет обязанности;

– распознавание объектов: алгоритмы и нейросети идентифицируют предметы, людей, зоны постоянного внимания и внезапного интереса;

– захват и удержание: при идентификации цели один или часть беспилотников могут остаться наблюдать, пока другие продолжают миссию.

Проблемы, которые решают роевые технологии:

– низкая эффективность одного дрона: программное обеспечение роя распределяет задачи внутри группы, повышая общую результативность;

– сложность координации: один оператор управляет целой группой, что упрощает процесс и снижает затраты на персонал;

– уязвимость к помехам: автономные системы позволяют БЛА продолжать работу даже при сбоях связи.

Выбор той или иной стратегии группового управления определяет и структурную организацию соответствующей системы группового управления БЛА. Существуют централизованные, иерархические (комбинированные) и децентрализованные системы группового управления [1, 2].

Модель управления БЛА в централизованной системе с использованием наземной станции. Централизованные системы управления БЛА широко применяются в задачах, где требуется высокая степень координации и контроля. В таких системах наземная станция выступает в роли центра управления, собирая данные от всех БЛА, обрабатывая их и отправляя управляющие команды.

Централизованная система управления включает: наземную станцию управления, канал связи «земля – БЛА» и «БЛА – земля», – рой БЛА с бортовыми контроллерами. НСУ выступает единым центром принятия решений, формируя управляющие воздействия для каждого аппарата на основе глобальной информации о состоянии роя.

Преимущества и недостатки централизованного подхода. Данные системы относительно просты в разработке и реализации, но вычислительная сложность растет экспоненциально с размером роя; система обеспечивает высокую точность и надежность, но требует устойчивой связи и вычислительных ресурсов. К недостаткам централизованного подхода относят уязвимость к сбоям НСУ, высокие требования к каналу связи, ограниченную масштабируемость [3].

Модель управления БЛА в децентрализованной системе с использованием «peer-to-peer» взаимодействия. Система состоит из N БЛА, образующих децентрализованную «peer-to-peer» сеть (P2P) без центрального координатора. Каждый БЛА $i \in I=\{1,\ldots, N\}$: взаимодействует только с ближайшими соседями, принимает решения на основе локальной информации, обладает полной автономией в выполнении команд.

Сеть остается связной при выходе из строя отдельных узлов.

Преимущества и недостатки модели управления. К положительным сторонам данной системы управления относят: отсутствие единой точки отказа, возможность добавления/удаления БЛА, реакция на динамические изменения среды, распределение вычислений между узлами. Но в тоже время для функционирования системы требуется надежная связь между соседями, растет вычислительная сложность алгоритма Dec-MDP, появляется зависимость от точности сенсоров и моделей движения [4, 5].

Модель управления БЛА в гибридной системе (с наземной станции и P2P взаимодействия между дронами). Гибридная система объединяет централизованное управление (через наземную станцию) и децентрализованную координацию (P2P между дронами). Структура системы имеет в своем составе компоненты:

Преимущества и недостатки модели управления. Для данной системы характерны параметры двух предыдущих систем управления, но гибридный подход позволил улучшить отдельные качественные показатели модели и устранить ряд ограничений.

Выделим ряд показателей:

гибкость – сочетание централизованного планирования и децентрализованной адаптации;

отказоустойчивость – работа при потере связи с НСУ;

масштабируемость – добавление/удаление БЛА без перестройки системы;

эффективность – распределение вычислений между узлами.

Ограничения: система требует надежной связи (особенно для НСУ → БЛА); вычислительная сложность оптимизации на уровне НСУ; зависимость от точности сенсоров и моделей динамики; возможные задержки в P2P-согласовани при большом количестве БЛА [4, 5].

Заключение. Системы с централизованным управлением относительно просты в разработке и реализации, но вычислительная сложность растет экспоненциально с размером роя; система обеспечивает высокую точность и надежность, но требует устойчивой связи и вычислительных ресурсов. К недостаткам централизованного подхода относят уязвимость к сбоям НСУ, высокие требования к каналу связи, ограниченную масштабируемость. К положительным сторонам децентрализованной системы управления относят: отсутствие единой точки отказа, возможность добавления/удаления БЛА, реакция на динамические изменения среды, распределение вычислений между узлами. Но для функционирования системы требуется надежная связь между соседями, растет вычислительная сложность алгоритма Dec-MDP, появляется зависимость от точности сенсоров и моделей движения. Для гибридной системы управления характерны параметры двух предыдущих систем

управления, но этот подход позволил улучшить отдельные качественные показатели модели и устранить ряд ограничений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Роевые технологии управления дронами. URL: https://www.braginskyoleg.com/ru/ content/ 2025/04/15/roevye-tekhnologii-upravleniya-dronami (дата обращения 18.08.2026).

2. Вишняков В.А., Веремьев А.В. Сети интернет вещей для управления БПЛА // Проблемы инфокоммуникаций, 2025. № 2. – С 91–96.

3. Иванов Д.Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 116. – № 3. – С. 221–229.

4. Захаров Н.С., Харисов А.Р. Численное моделирование алгоритмов роевого управления для автономных групп беспилотных летательных аппаратов // Международный научный журнал «Вестник науки» № 6 (87) Том 3. Июнь 2022. – С. 1935–1944.

5. Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А. Децентрализованное групповое нелинейное управление строем беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Мехатроника, автоматизация, управление. 2020; 21(1). – С.43–50.