

УДК 623.746.4-519

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ТАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ РОЕВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ БАК В УСЛОВИЯХ АКТИВНОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

А. Р. ЛАРКИН, курсант

Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема повышения эффективности беспилотных авиационных комплексов (БАК) за счет внедрения систем терминального наведения и роевого интеллекта. Проведен анализ тактической трансформации современного боя под влиянием автономизации БПЛА. Предложена математическая модель вероятности поражения цели группой дронов, демонстрирующая нелинейный рост эффективности при насыщении систем ПВО и РЭБ противника. Результаты моделирования подтверждают, что критическое

преимущество достигается при соотношении количества атакующих дронов к числу каналов обороны более единицы.

Ключевые слова: беспилотные авиационные комплексы, FPV-дроны, роевой интеллект, терминальное наведение, радиоэлектронная борьба, сетцентрическая война, самоорганизация.

Развитие средств ведения вооруженной борьбы в период 2022–2025 гг. продемонстрировало критическую зависимость успеха тактических операций от массового применения малых БПЛА. Однако повсеместное внедрение систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) «окопного» и объектового типа привело к снижению эффективности дистанционно управляемых аппаратов. Как отмечает ведущий российский эксперт в области беспилотной авиации Денис Федутинов, современная беспилотная авиация находится на пороге перехода от полной зависимости от оператора к концепции автономного выполнения полетного задания [2, 6]. В своих публикациях он подчеркивает, что новые схемы применения, включающие запуск нескольких дронов с разных ракурсов, позволяют гарантированно уничтожать даже такие сложные цели, как системы ПВО [2].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска эффективных методов противодействия средствам РЭБ, которые в настоящее время способны полностью подавлять каналы управления на терминальных участках траектории. Решением данной проблемы становится интеграция технологий роевого интеллекта и машинного зрения в бортовые системы беспилотных комплексов [1, 4].

Техническая база: алгоритмы машинного зрения.

Основным ограничением применения БАК в зоне действия помех является потеря канала управления на терминальном (заключительном) участке траектории. В условиях высоких помех, когда связь как с командным пунктом, так и между агентами роя отсутствует, требуются специальные алгоритмы самоорганизации [1].

Решением данной проблемы является интеграция в полетный контроллер специализированных нейропроцессоров, способных обрабатывать видеопоток в реальном времени. Использование методов машинного зрения позволяет реализовать алгоритм «захвата и сопровождения», при котором дрон продолжает движение к цели даже при полном отсутствии радиосигнала. Алгоритм функционирует на базе сверточных нейронных сетей (CNN), натренированных на распознавание образов военной техники в различных спектральных диапазонах.

Практическая реализация таких алгоритмов уже демонстрируется в современных разработках. Например, главный конструктор Zala Aero Group Александр Захаров сообщил о проведении боевых испытаний автоматического распознавания целей барражирующими боеприпасами «Ланцет» с приоритетом выбора более дорогостоящих целей, таких как средства противовоздушной обороны и радиолокационные станции [2].

Математическая модель эффективности группового применения.

Для оценки превосходства автономных роевых систем над одиночными аппаратами применяют математическую модель вероятности прорыва обороны.

Вероятность поражения цели одиночным дроном P_{hit} при воздействии РЭБ стремится к минимуму.

Однако при использовании группы из N аппаратов, атакующих с интервалом t_{arr} многоканальную систему ПВО/РЭБ, имеющую K каналов и время реакции t_{def} , вероятность успеха P_{swarm} рассчитывают по формуле

$$P_{swarm} = \begin{cases} (1 - 1 - Pa)^N \\ (1 - 1 - Pa)^{N-K} \cdot \prod_{i=1}^K (1 - P_{hit}^{(i)}) \end{cases},$$

если $N \leq K$ (нет насыщения);
если $N > K$ (режим насыщения),

где Pa – вероятность автономного донаведения каждого аппарата после потери канала управления; $P_{hit}^{(i)}$ – вероятность поражения i -го дрона средствами ПВО до момента насыщения; N – общее количество дронов в рое; K – количество целевых каналов системы ПВО/РЭБ противника.

При $N > K$ наступает эффект «насыщения», когда технические средства обороны не способны обработать избыточное количество целей ($\lambda_{def} > K$, где λ – интенсивность прибытия дронов), и оставшиеся $(N - K)$ дроны полагаются только на свою помехозащищенную систему наведения Pa . Это подтверждает тезис военного эксперта Юрия Кнутова о том, что массовость и дешевизна БАК становятся ключевыми факторами подавления технологически сложных систем ПВО [3]. В своих комментариях он также отмечает, что появление беспилотников с заранее записанной траекторией полета, функционирующих в режиме полного радиомолчания, делает их практически невидимыми для систем РЭБ [3].

Тактическая трансформация: роевой интеллект и сетецентризм.

Переход к роевым технологиям требует изменения алгоритмов управления. В отличие от жестко иерархических систем, рой БАК строится на принципах децентрализованного мультиагентного управления. Исследования в области формирования полетного управления для группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритмов мультиагентной роевой модели активно ведутся как в России, так и за рубежом [4].

Самоорганизация и распределение ролей. В рамках выполнения задачи группа дронов распределяет цели на основе протоколов консенсуса. Если один аппарат идентифицирует цель как «уничтоженную», данные мгновенно передаются остальным участникам роя для перенацеливания на другие объекты. В условиях отсутствия связи между агентами роя разработаны алгоритмы, позволяющие осуществлять самоорганизацию на основе локальных наблюдений и заранее определенных правил поведения [1, 4].

Сетецентрическое взаимодействие. Современные БАК интегрируются в автоматизированные системы управления (АСУ) тактического звена. Это позволяет создавать единое информационное поле, где дрон-разведчик не только

передает видео, но и автоматически выдает целеуказание для ударных роев или артиллерии, сокращая цикл «обнаружение – поражение» до десятков секунд.

Количественно данный выигрыш можно выразить через коэффициент сокращения цикла управления. Пусть классический цикл разведки $T_{classic}$ включает этапы: обнаружение t_1 , распознавание t_2 , передача данных t_3 , принятие решения t_4 , целеуказание t_5 . В сетевидной системе с участием роя исключаются этапы t_3 и t_4 , т. к. данные поступают напрямую в АСУ ударного средства:

$$\Delta T \frac{T_{classic}}{T_{network}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{t_1 + t_2 + t_5} \approx 1,5 - 2,5.$$

Навигация в сложных условиях. Применение роевого интеллекта позволяет аппаратам осуществлять коллективный обход препятствий в условиях городской застройки или лесных массивов, используя данные от сенсоров соседних аппаратов для компенсации слепых зон собственного обзора. Формально движение каждого дрона может быть описано моделью потенциальных полей, где суммарная сила, действующая на агента, определяется градиентами потенциалов притяжения к цели и отталкивания от препятствий и соседей.

Перспективные исследования в этой области направлены на создание интерактивных технологий многокритериального поиска и управления для интеллектуальных киберфизических систем в условиях неопределенности. Как отмечается в проекте, реализуемом Санкт-Петербургским политехническим университетом совместно с китайскими коллегами, одна из ключевых задач – обеспечение безопасных и эффективных схем автономного планирования при выполнении множественных задач [4].

Перспективные средства противодействия и пути их преодоления.

Несмотря на высокую эффективность автономных систем, развитие средств обороны также не стоит на месте. Фундаментальное исследование проблем противодействия БПЛА представлено в монографии С. И. Макаренко, где систематизированы различные способы и средства борьбы с беспилотниками [5].

Эволюция средств поражения БПЛА. Согласно анализу Макаренко, все способы противодействия можно разделить на несколько категорий: огневое поражение средствами ПВО, радиоэлектронное подавление систем навигации и связи, функциональное поражение сверхвысокочастотным электромагнитным излучением, а также поражение лазерным излучением [5]. Особое внимание уделяется развитию систем «оптического РЭБ», предназначенных для лазерного ослепления видеокамер БПЛА, что делает невозможным работу алгоритмов машинного зрения.

Живучесть роя в условиях противодействия. Для оценки устойчивости роевых систем к воздействию средств противодействия может быть применена модель связности. Пусть вероятность ослепления одного дрона P_{blind} . Для роя с полносвязной топологией (каждый с каждым) вероятность сохранения управляемости и целостности информационной сети определяется вероятностью того, что количество ослепленных аппаратов не превысит критического порога:

$$P_{connectivity} = 1 - \sum_{m=\lfloor N/2 \rfloor + 1}^N C_N^m (P_{blind})^m (1 - P_{blink})^{N-m} .$$

Данная формула отражает тот факт, что если ослеплено более половины роя ($m > N/2$), децентрализованная сеть может распасться на изолированные кластеры, неспособные к скоординированным действиям [5].

Тактические инновации. Анализ современных боевых действий показывает появление принципиально новых тактических схем. Как отмечает Юрий Кнутов, в ходе боевых действий в 2024 г. ВСУ применили тактику «многодоменных операций», при которой сначала мощными станциями РЭБ подавляются каналы связи обороняющейся стороны, после чего наносится массированный удар из FPV-дронов по укреплениям, и только затем под прикрытием ранцевых станций РЭБ выдвигаются штурмовые группы [7]. Это демонстрирует, что развитие роевых технологий происходит в тесной связке с эволюцией тактики общевойскового боя.

Заключение. Автономизация терминального наведения и переход к групповому применению БАК являются доминирующими трендами развития беспилотной авиации в 2025–2026 гг. Внедрение роевого интеллекта позволяет нивелировать влияние традиционных средств РЭБ и обеспечивает высокую вероятность выполнения боевых задач за счет эффекта насыщения оборонительных систем противника.

Проведенное математическое моделирование подтверждает, что при соотношении количества атакующих дронов к числу каналов обороны более единицы ($N > K$) вероятность успеха операции возрастает нелинейно, причем оставшиеся после насыщения ПВО аппараты полагаются только на свои автономные системы наведения.

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на трех ключевых направлениях: повышение помехозащищенности оптических каналов навигации (включая разработку алгоритмов, устойчивых к лазерному ослеплению), снижение энергопотребления бортовых вычислителей для увеличения продолжительности полета, а также совершенствование протоколов децентрализованного взаимодействия агентов роя в условиях полного подавления каналов связи [5].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Толмачев, А. С.** Управление роем беспилотных летательных аппаратов в условиях высоких помех / А. С. Толмачев, Д. С. Куксенко // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия : Естественные и технические науки. – 2022. – № 11, ч. 2. – С. 157–162.
2. **Федутинов, Д.** Новая схема применения сделает «Ланцеты» убийцами ПВО, считает эксперт / Д. Федутинов // РИА Новости. – 2023. – 18 июля. – URL: <https://vpk.name/news/202307/?p=37>.
3. **Кнутов, Ю.** Гонка в сфере создания новейших беспилотников развернута серьезная, но России есть, чем ответить / Ю. Кнутов // Офицеры России. – 2024. – 11 окт. – URL:

<https://www.oficery.ru/2024/10/11/yurijknutovgonkavsfereozdaniyabespilotnikovrazvernutasereznayanorossiestichtopredyavitprotivniku/>.

4. **Zhu, Yu. Q.** Formation of flight control for a group of unmanned aerial vehicles based on algorithm of multiagent swarm model / Yu. Q. Zhu // Computing, Telecommunications and Control. – 2022. – Vol. 15, iss. 4. – P. 2236.

5. **Макаренко, С. И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам : монография / С. И. Макаренко. – СПб., 2020. – 204 с.

6. **Федутинов, Д.** «Птицы» большие и малые: какие беспилотники хорошо проявили себя в украинском конфликте, а какие оказались неэффективны / Д. Федутинов // Профиль. – 2023. – № 27/28 (208). – С. 42–45.

7. **Кнутов, Ю.** О тактике ВСУ при вторжении в РФ / Ю. Кнутов // Лента новостей Пыталово. – 2024. – 28 авг. – URL: <https://pytalovonews.ru/society/2024/08/28/19918.html>.

Контакты:

Larkin.anton112@gmail.com (Ларкин Антон Русланович).