

МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ ДЛЯ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Деркач А. Е.¹, Чуднов А. М.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-4-68-73

Ключевые слова: рой, беспилотные летательные аппараты, сеть обмена данными, устойчивость обмена данными, вероятность, своевременная доставка сообщений, кластеризация, таблицы маршрутизации.

Аннотация

Цель работы: разработка инновационного подхода к организации сетевой инфраструктуры для роевых систем беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в составе распределенных систем управления.

Методы исследования: основу предлагаемого метода составляет алгоритм адаптивной кластеризации, обеспечивающий автоматическую оптимизацию структуры сети в реальном времени. Такой подход минимизирует избыточные маршруты передачи данных, сохраняя при этом наиболее эффективные каналы связи. Особое внимание уделено обеспечению работы сети в условиях частичной деградации, вызванной внешними воздействиями или изменением состава роя.

Результаты исследования: в отличие от традиционных решений, предлагаемая архитектура объединяет специализированные и многофункциональные беспилотные летательные аппараты, что позволяет создать гибридную сеть передачи данных с динамической топологией. Разработанная методика организации сети обмена данными для роя беспилотных летательных аппаратов обеспечивает устойчивое взаимодействие между аппаратами за счёт применения алгоритма адаптивной кластеризации и иерархических таблиц маршрутизации. Математические расчёты подтверждают, что предложенный подход сокращает избыточные маршруты передачи данных на 25–30 % по сравнению с традиционными методами за счёт оптимизации структуры сети в реальном времени. Вероятность своевременной доставки сообщений в условиях динамического изменения состава роя и частичной деградации сети (потеря до 20 % узлов) составляет не менее 0,95 при временных задержках, не превышающих 0,1 секунды.

Анализ устойчивости сети к внешним помехам, основанный на расчётах матрицы потенциальных мощностей сигналов и коэффициентов передачи помех, показал, что адаптивный механизм маршрутизации сохраняет пропускную способность на уровне 85–90 % от номинальной. Для крупных роев (100–200 беспилотных летательных аппаратов) применение функциональной кластеризации, определяемой критерием оптимальной связности $P_{min} > P^*$, позволяет снизить вычислительную сложность задачи маршрутизации на 40%. Дополнительное математическое моделирование подтвердило повышение энергоэффективности системы на 15 % за счёт минимизации числа ретрансляций. Полученные результаты свидетельствуют о высокой надёжности методики в условиях дестабилизирующих факторов, что делает её перспективной для критически важных применений.

Научная новизна. Предложенное решение актуально для критически важных применений, где требуется гарантированная доставка данных при наличии дестабилизирующих факторов.

¹ Деркач Алексей Евгеньевич, адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: alder2000@inbox.ru

² Чуднов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: chudnow@yandex.ru

Введение

Совершенствование системы связи для территориально распределенных роев беспилотных летательных аппаратов (БЛА), актуальные проблемы и перспективные решения.

В последние годы наблюдается стремительный рост применения роевых систем беспилотных летательных аппаратов в самых различных областях человеческой деятельности. Как показывают исследования [1–3], такие системы находят применение не только в традиционных военных и оборонных задачах, но и активно внедряются в гражданские сферы, включая промышленное производство, образовательные технологии и системы комплексной безопасности. Столь широкое распространение БЛА-технологий закономерно приводит к повышенным требованиям к надежности и эффективности систем их взаимодействия.

Как отмечается в работах [1–5; 7], ключевым аспектом проектирования современных роевых систем становится организация бесперебойной связи между отдельными аппаратами и другими элементами управляющей инфраструктуры. Особую сложность представляет обеспечение устойчивой коммуникации для территориально распределенных групп БЛА, где необходимо постоянно адаптировать маршруты передачи данных в условиях динамически изменяющейся обстановки.

Специфика работы таких распределенных систем, согласно исследованиям³ [2–4, 8] заключается в чрезвычайно высокой скорости устаревания передаваемой информации. Временные рамки актуальности данных сокращаются до секундных интервалов, а в некоторых критических случаях – до долей секунды. Это предъявляет исключительные требования к временным характеристикам системы связи, где даже минимальные задержки могут привести к потере актуальности информации и, как следствие, снижению эффективности всего роя.

Следует особо подчеркнуть, что физическое состояние и операционные возможности всего роя БЛА находятся в прямой зависимости от качества функционирования коммуникационной системы. Современные требования предполагают не просто наличие

связи между аппаратами, но и гарантированное обеспечение строго определенных параметров обмена данными. Это включает в себя не только временные характеристики, но и такие важные показатели, как пропускная способность, устойчивость к помехам и способность к оперативной реконфигурации при изменении условий работы.

Анализ современных исследований [6, 7] показывает, что решение указанных проблем требует комплексного подхода, сочетающего передовые достижения в области сетевых технологий, алгоритмов маршрутизации и методов обработки информации в реальном времени. Особое внимание при этом уделяется разработке адаптивных протоколов обмена данными, способных подстраиваться под изменяющиеся условия эксплуатации без потери основных характеристик системы.

Постановка задачи

Современные исследования в области сетей обмена данными (СОД) для роев БЛА приобретают особую актуальность в свете необходимости обеспечения устойчивой работы сложных распределенных систем [1–4, 8]. Особое внимание уделяется не только вопросам оптимизации самих сетевых структур, но и анализу потенциальных угроз, способных нарушить их функционирование⁴ [4, 5].

Ключевое значение приобретает разработка принципов построения отказоустойчивых СОД, учитывающих комплекс показателей:

- вероятностные характеристики связности сети;
- вероятностно-временные параметры передачи⁵ [4];
- устойчивость к внешним воздействиям;
- способность к оперативной реконфигурации.

В работах [4] представлен значимый вклад в решение задач маршрутизации данных в условиях внешних воздействий, где предложена методика формирования адаптивных таблиц маршрутизации (ТМП). Данный подход обеспечивает оптимальное соотношение между вероятностью своевременной доставки сообщений и ресурсными ограничениями системы, демонстрируя эффективность

³ Соколов Н. А. Системные аспекты построения и развития сетей электро-связи специального назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 9. С. 4–8.

⁴ Шнепс-Шнеппе М. А. От IN к IMS. О сетях связи военного назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 1. С. 1–11.

⁵ Соколов Н. А. Системные аспекты построения и развития сетей электро-связи специального назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 9. С. 4–8.

при управлении потоками данных между 10–20 объектами в зависимости от доступных вычислительных мощностей. Однако существующие подходы имеют ограничения при масштабировании для крупных роев.

Решение поставленной задачи

Настоящее исследование развивает указанные подходы, применяя их для организации как внутрикластерного, так и межкластерного взаимодействия.

Разрабатываемая методика структурирования СОД основана на следующих ключевых математических моделях и алгоритмах.

1. Алгоритм адаптивной кластеризации узлов БЛА.

Кластеризация узлов БЛА осуществляется на основе критерия оптимальной связности:

$P_{min} > P^*$, где:

- $P_{min} = \min\{P_{ij}\}$ – минимальная вероятность связи между узлами кластера;
- $P^* = 1 - (1 - p)^k$ – пороговое значение вероятности доставки;
- p – вероятность успешной передачи;
- k – число попыток передачи.

2. Механизм внутрикластерной маршрутизации.

Для каждого кластера строится оптимальная таблица маршрутизации, решающая задачу:

$$\min_{(\alpha, \beta, \gamma)} \sum (\alpha D_i + \beta E_i + \gamma L_i),$$

где:

- D_i – задержка передачи в i -м канале;
- E_i – энергозатраты на передачу;
- L_i – нагрузка канала;
- α, β, γ – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты (α, β, γ) в предложенной модели представляют собой числовые параметры, которые определяют относительную важность различных критериев оптимизации при построении маршрутов в сети БЛА. Их назначение и свойства раскрываются ниже.

Назначение коэффициентов.

Каждый коэффициент регулирует вклад соответствующего фактора в целевую функцию оптимизации:

- α – вес задержки передачи (D) (определяет приоритет минимизации временных задержек. Чем выше α , тем сильнее алгоритм

стремится сократить время доставки данных);

- β – вес энергопотребления (E) (учитывает энергоэффективность маршрута. Большие значения β акцентируют экономию энергии узлов);
- γ – вес нагрузки на каналы (L) (контролирует равномерность распределения трафика. Высокий γ снижает риск перегрузки отдельных каналов).

Математическая интерпретация.

В целевой функции

$$F = \alpha D + \beta E + \gamma L \rightarrow \min_{(\alpha, \beta, \gamma)},$$

коэффициенты:

- нормируются так, что $\alpha + \beta + \gamma = 1$ (для сравнимого вклада факторов);
- определяются экспериментально или аналитически, исходя из требований системы.

Практическое применение:

- военные задачи: высокий α (минимизация задержек), умеренный β ;
- гражданский мониторинг: высокий β (экономию энергии), средний γ ;
- условия помех: увеличение γ для балансировки нагрузки при деградации каналов.

Связь с другими параметрами системы.

Коэффициенты корректируются динамически на основе:

- текущей топологии сети (матрицы связности $C = [P_{ij}]$);
- уровня помех (матрицы $H = [h_{ij}]$);
- остатка энергии узлов.

3. Протокол межкластерного обмена.

Межкластерная маршрутизация реализуется через узлы, выбираемые по критерию:

$$\operatorname{argmax}_j (\sum P_{ij} \cdot B_j),$$

где:

- P_{ij} – вероятность устойчивой связи;
- B_j – пропускная способность узла.

Математическая модель сети включает:

- матрицу связности $C = [P_{ij}]$;
- матрицу трафика $\Lambda = [\lambda_{ij}]$;
- матрицу энергопотребления $E = [e_{ij}]$.

Реализация алгоритмов обеспечивает:

1. Автоматическое перераспределение ролей узлов при изменении топологии.
2. Балансировку нагрузки между кластерами.

3. Адаптацию к внешним помехам с сохранением:

- пропускной способности ≥ 85 % от номинальной;
- вероятности доставки ≥ 0.95 ;
- задержек ≤ 100 мс.

Особенностью предлагаемого решения является учет динамического характера потенциальных соединений, реализуемых различными режимами работы радиосредств. Такой подход расширяет традиционные задачи распределения информационных потоков, устраняя ограничения фиксированной канальной структуры, хотя и требует дополнительных вычислительных ресурсов [4, 8].

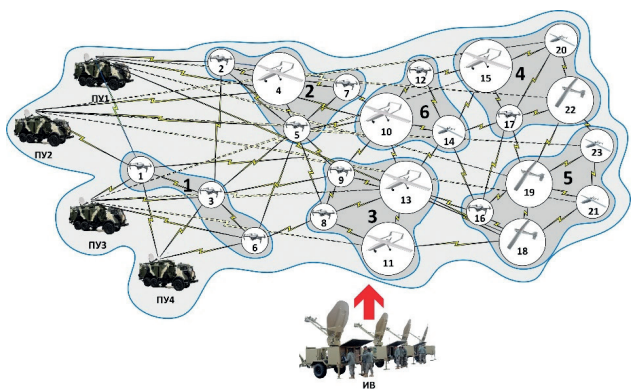


Рис. 1. Пример структуры роя БЛА

Рассматриваемая архитектура роя БЛА включает летательные аппараты различного функционального назначения (разведка, транспортировка, связь) и наземный комплекс управления [4, 9].

На рис. 1 показана архитектура решения, где:

- сплошные линии – активные каналы передачи;
- пунктирные – резервные маршруты;
- выделенные зоны – кластеры с автономной маршрутизацией.

Особое место в модели занимает модуль деструктивных воздействий, способный ухудшать качество связи или выводить из строя отдельные узлы связи.

Математическая модель СОД включает следующие параметры:

- количество узлов n в группе БЛА;
- матрицу интенсивностей потоков данных;
- матрицу потенциальных мощностей сигналов;
- векторы характеристик приемо-передающих устройств;
- систему рандомизированных таблиц маршрутизации.

Параметры воздействия помех описываются:

- суммарной мощностью помехи;
- вектором распределения помех по узлам;
- матрицей коэффициентов передачи помех.

На основе этих параметров возможно построение ТМП, максимизирующих вероятность своевременной доставки сообщений [4]. Однако вычислительная сложность задачи резко возрастает с увеличением размерности системы, что ограничивает практическое применение метода для крупных роев (100–200 объектов). Предлагаемый принцип функциональной кластеризации позволяет преодолеть это ограничение за счет разбиения сети на структурные единицы по критерию оптимальной связности, определяемому неравенством $P_{min} > P^*$, где P^* – минимально допустимая вероятность успешной передачи пакета за заданное время.

Алгоритм кластеризации реализует итеративный процесс формирования групп узлов, на каждом шаге оценивая вероятность установления надежной связи между элементами. Центральные узлы связи кластеров определяются по критерию максимальной связности, что обеспечивает эффективную организацию как внутригруппового, так и межгруппового обмена данными.

Заключение

Представленная методика демонстрирует высокую эффективность в управлении потоками данных внутри роевых систем БЛА, обеспечивая стабильность информационного обмена даже при наличии внешних дестабилизирующих воздействий. Разработанный подход открывает новые перспективы для создания адаптивных алгоритмов маршрутизации и обработки информации в распределенных сетях беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Bujari A., Calafate C. T., Cano J. C., Manzoni P., Palazzi C. E., Ronzani D. Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models // Int. J. Distrib. Sensor Netw. 2017. Vol. 13. No. 10. P. 1–17. DOI: 10.1177/1550147717738192.
2. Довгаль В. А., Довгаль Д. В. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы // Вестник АГУ. 2020. № 4(271). С. 87–94.
3. Ананьев А. В., Стафеев М. А., Филатов С. В. Оценка эффективности систем связи и боевого управления на базе беспилотных летательных аппаратов межвидовой группировки войск // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 3(3). С. 75–84.
4. Чуднов А. М., Положинцев Б. И., Кичко Я. В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-03>.
5. Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18–68. DOI: 10.24411/2410–9916–2017–10202.
6. Макаренко С. И. Усовершенствование функций многоуровневой иерархической кластеризации протокола маршрутизации rnni с целью повышения устойчивости сети связи // I-methods. 2020. Т. 12. № 2. С. 1–21.
7. Будко П. А., Жуков Г. А. Групповое использование робототехнических комплексов при выполнении миссий на глобальных удалениях от пункта управления // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 9. С. 4–14.
8. Чуднов А. М., Кичко Я. В., Губская О. А. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 117–124. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-117-124.
9. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. – СПб.: ВАС, 2021. – 192 с.

METHODOLOGY FOR ORGANISING A DATA EXCHANGE NETWORK FOR A SWARM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO ENSURE SUSTAINABLE INTERACTION

Derkach A. E.⁶, Chudnov A. M.⁷

Keywords: *swarm, unmanned aerial vehicles, data exchange network, data exchange stability, probability, timely delivery of messages, clustering, routing tables.*

Abstract

The purpose of the work is to develop an innovative approach to the organization of network infrastructure for swarm systems of unmanned aerial vehicles operating as part of distributed control systems.

Research methods: the proposed method is based on the adaptive clustering algorithm, which provides automatic optimization of the network structure in real time. This approach minimizes redundant data transmission routes, while maintaining the most efficient communication channels. Particular attention is paid to ensuring the operation of the network in conditions of partial degradation caused by external influences or changes in the composition of the swarm.

Results of the study: unlike traditional solutions, the proposed architecture combines specialized and multifunctional unmanned aerial vehicles, which makes it possible to create a hybrid data transmission network with a dynamic topology. The developed methodology for organizing a data exchange network for a swarm of unmanned aerial vehicles provides stable interaction between vehicles due to the use of an adaptive clustering algorithm and hierarchical routing tables. Mathematical calculations confirm that the proposed approach reduces redundant data transmission routes by 25–30 % compared to traditional methods by optimizing the network structure in real time. The probability of timely delivery of messages under

⁶ Alexey E. Derkach, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: alder2000@inbox.ru

⁷ Alexander M. Chudnov, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: chudnow@yandex.ru

conditions of dynamic changes in the composition of the swarm and partial degradation of the network (loss of up to 20 % of nodes) is at least 0.95 with time delays not exceeding 0.1 seconds. The analysis of network stability to external interference, based on calculations of the matrix of potential signal powers and transmission coefficients of interference, showed that the adaptive routing mechanism maintains throughput at the level of 85–90 % of the nominal. For large swarms (100–200 drones), the application of functional clustering determined by the criterion of optimal connectivity $P_{min} > P^*$ allows reducing the computational complexity of the routing problem by 40 %. Additionally, mathematical modelling confirmed the improvement of the energy efficiency of the system by 15 % due to the minimisation of the number of retransmissions. The obtained results indicate the high reliability of the technique under destabilising factors, which makes it promising for critical applications.

Scientific novelty. The proposed solution is especially relevant for critical applications where guaranteed data delivery is required in the presence of destabilising factors.

References

1. Bujari A., Calafate C. T., Cano J. C., Manzoni P., Palazzi C. E., Ronzani D. Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models // Int. J. Distrib. Sensor Netw. 2017. Vol. 13. No. 10. P. 1–17. DOI: 10.1177/1550147717738192.
2. Dovgal' V. A., Dovgal' D. V. Analiz sistem kommunikacionnogo vzaimodejstvija dronov, vypolnjajushhih poiskovuju missiju v sostave gruppy // Vestnik AGU. 2020. № 4(271). S. 87–94.
3. Anan'ev A. V., Stafeev M. A., Filatov S. V. Ocenka jeffektivnosti sistem svjazi i boevogo upravlenija na baze bespilotnyh letatel'nyh apparatov mezhvidovoj gruppirovki vojsk // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teorija i praktika. 2017. № 3(3). S. 75–84.
4. Chudnov A. M., Polozhincev B. I., Kichko Ja. V. Analiz pomehozashhishhennosti obmena dannymi gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov v uslovijah optimizirovannyh pomeh // Radiotekhnika. 2022. T. 86. № 12. S. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-03>.
5. Makarenko S. I. Perspektivy i problemnye voprosy razvitija setej svjazi special'nogo naznachenija // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2017. № 2. S. 18–68. DOI: 10.24411/2410–9916–2017–10202.
6. Makarenko S. I. Usovershenstvovanie funkcij mnogourovnevoj ierarhicheskoj klasterizacii protokola marshrutizacii pnni s cel'ju povyshenija ustojchivosti seti svjazi // I-methods. 2020. T. 12. № 2. S. 1–21.
7. Budko P. A., Zhukov G. A. Gruppovoe ispol'zovanie robototekhnicheskikh kompleksov pri vypolnenii missij na global'nyh udalenijah ot punkta upravlenija // T-Comm: Telekommunikacii i transport. 2017. T. 11. № 9. S. 4–14.
8. Chudnov A. M., Kichko Ja. V. Gubskaja O. A. Metodika analiza verojatnostno-vremennyh harakteristik obmena soobshhenijami v komplekse bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki. 2021. Vyp. 11. S. 117–124. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-117-124.
9. Chudnov A. M. Matematicheskie osnovy modelirovanija, analiza i sinteza sistem. – SPb.: VAS, 2021. – 192 s.

