

3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26.02.2026 № 360-р «Об утверждении перечня типовых отраслевых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: справочно-правовая система / URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_527541/ (дата обращения 11.03.2026).

4. Методика моделирования угроз безопасности информации ФСТЭК России. — М., 2021.

5. Малюк А.А. Информационная безопасность: теория и практика. — М.: Горячая линия – Телеком, 2020.

6. Гафнер В.В. Защита информации в автоматизированных системах управления. — М.: Академия, 2019.

7. Исмагилова, А. С. Теоретико-графовая интерпретация системы защиты информации / А. С. Исмагилова, И. А. Шагапов, И. В. Салов // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 9(117). – С. 171-179. – EDN LWCKXX.

Летюк Полина Александровна, студ. ИИГУ, polinaletom@gmail.com

Яппаров Рауф Мидхатович, к.ю.н., доцент, доцент каф. УИБ, bist2002@yandex.ru

УДК 519.87 + 004.056

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ РОЯ БПЛА

В.И. Петренко, М.П. Сутормин

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Ключевые слова: рой БПЛА, многокритериальная маршрутизация, кибербезопасность, GPS-спуфинг, MAVLink, метод анализа иерархий, фронт Парето.

Точное земледелие всё активнее переходит к роевым системам БПЛА с централизованным планированием маршрутов. Такой подход сокращает время обработки угодий и повышает отказоустойчивость, однако существенно расширяет поверхность кибератак: GPS-спуфинг, перехват телеметрии по протоколу MAVLink и DoS-воздействие на ретрансляторы способны нарушить выполнение агротехнологического задания [1]. Классические алгоритмы маршрутизации оптимизируют лишь один критерий — время или энергию — и не учитывают пространственно распределённых киберрисков отдельных сегментов траектории. Настоящая работа предлагает многокритериальный подход, в котором риск формализован как самостоятельный критерий, равноправный с временем полёта.

Пространство угроз задаётся вектором $T = \{t_1, \dots, t_k\}$, где каждый элемент $t_i = \langle \tau_i, p_i, d_i \rangle$ — тип атаки, вероятность её реализации на данном сегменте и нормированный коэффициент ущерба. Выделяются три класса: GPS-спуфинг (вероятность p_1 растёт с удалением от базовой станции), перехват MAVLink (p_2 обратно пропорциональна ширине спектра канала) и

DoS на ретранслятор (p_3 линейно зависит от плотности трафика) [2]. Для каждого ребра e_{ij} графа полётного поля метрика деструктивного воздействия выводится из теории надёжности параллельных систем [3]:

$$D(e_{ij}) = 1 - \prod_k (1 - p_k \cdot w_k),$$

где w_k — весовой коэффициент критичности k -й угрозы. При независимости событий формула даёт точную вероятность хотя бы одного успешного воздействия на сегменте. Параметры p_k присваиваются зонам поля на основе экспертных оценок или данных OSINT, формируя пространственную карту рисков.

Параметры p_k присваиваются зонам поля на основе экспертных оценок или данных OSINT, формируя пространственную карту рисков. Такая карта позволяет заранее выявить наиболее уязвимые участки и учитывать их при построении маршрута.

Интегральный функционал качества маршрута R строится как аддитивная свёртка трёх нормированных критериев:

$$J(R) = \alpha \cdot \tilde{T}(R) + \beta \cdot \bar{D}(R) + \gamma \cdot (1 - \tilde{R}el(R)), \quad \alpha + \beta + \gamma = 1,$$

где $\tilde{T}$ — нормированное время полёта, $\bar{D}$ — среднее деструктивное воздействие по рёбрам маршрута, $\tilde{R}el$ — нормированная надёжность канала связи. Нормировка выполняется методом min-max.

Обоснование аддитивной формы опирается на теорему фон Неймана–Моргенштерна об условиях независимости предпочтений [4]. Весовые коэффициенты определяются методом анализа иерархий (МАИ): матрица попарных сравнений с приоритетом безопасности даёт вектор $(\alpha, \beta, \gamma) \approx (0,16; 0,54; 0,30)$ при индексе согласованности $CR = 0,007 < 0,1$. Функционал $J(R)$ монотонен по каждой компоненте; при выпуклом графе множество Парето-оптимальных решений выпукло, что гарантирует существование единственного глобального оптимума при положительных весах.

Численный эксперимент проведён на графе 15×15 узлов (поле 150×150 га, группа 5 БПЛА) при трёх сценариях интенсивности угроз. Фронт Парето в пространстве $(\tilde{T}, \bar{D})$ для сценария «средний риск» подтвердил выпуклость множества недоминируемых решений. Сравнение модифицированного алгоритма A^* с классическим Дейкстрой при $\alpha = \beta = 0,4, \gamma = 0,2$ приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов ($\alpha = \beta = 0,4, \gamma = 0,2$)

Алгоритм	$\bar{D}(R)$	$\tilde{T}(R)$	$J(R)$
Дейкстра	0,412	0,331	0,374
A^* модифицированный	0,255 (–38%)	0,371 (+12%)	0,298 (–20%)

Ключевой результат исследования заключается в том, что модифицированный A^* снижает нормированный показатель деструктивного воздействия на 38% при росте времени маршрута лишь на 12%, то есть каждый процент снижения киберриска обходится примерно 0,32% прироста времени. Полученное соотношение позволяет оператору осознанно выбирать конфигурацию весов в зависимости от актуальной угрозовой обстановки. Предложенная модель прошла апробацию в рамках зарегистрированного программного обеспечения серверной платформы планирования маршрутов группы БПЛА.

Дальнейшее развитие работы предполагает учёт динамически изменяющихся угроз в реальном времени и расширение модели на задачи с ограничениями по заряду аккумулятора.

Список использованных источников

1.Singh, C. The internet of drones in precision agriculture: Challenges, solutions, and research opportunities / C. Singh [et al.] // IEEE internet of things magazine. – 2022. – Vol. 5, № 1. – P. 180–184.

2.Adil, M. A systematic survey: Security threats to UAV-aided IoT applications, taxonomy, current challenges and requirements with future research directions / M. Adil [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 24, № 2. – P. 1437–1455.

3. Barlow, R. E. Mathematical theory of reliability / R. E. Barlow, F. Proschan. – [S. l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996. – 258 p.

4.Ehrgott, M. Multicriteria optimization / M. Ehrgott. – Berlin; Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005. – 323 p.

Петренко Вячеслав Иванович, к.т.н., доцент, зав. каф. ОиТЗИ, vipetrenko@ncfu.ru.
Сутормин Матвей Павлович, студент, sutormin.p@gmail.com.