

А.А. Шмидт, В.Р. Бикбулатов, Д.Н. Поляков, А.А. Тхакахов

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНО-ВОЗДУШНЫХ
РАДИОЛИНИЙ МЕТОДОМ АДАПТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ МАРШРУТА
БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ**

Актуальность работы обусловлена возрастающей интенсивностью радиоэлектронного противодействия в тактическом звене управления, при котором традиционные методы организации связи через ретрансляторы с фиксированными маршрутами не обеспечивают требуемую помехоустойчивость и разведзащищённость. Цель работы – разработка метода адаптивного управления маршрутом БПЛА-ретранслятора на основе непрерывного анализа электромагнитной обстановки для повышения помехоустойчивости наземно-воздушных радиолиний. В качестве основного метода использована многокритериальная оптимизация траектории полёта с адаптивными весовыми коэффициентами, одновременно учитывающая три критерия: минимизацию уровня помех на рабочих частотах ретранслятора, обеспечение радиодоступности с корреспондентами сети и снижение вероятности обнаружения средствами радиоэлектронной борьбы противника. Для восстановления пространственной картины помеховой обстановки по ограниченному набору бортовых измерений исследованы методы интерполяции и экстраполяции: метод обратных взвешенных расстояний, метод радиальных базисных функций и статистическая экстраполяция на основе пространственной корреляционной функции. Разработана циклическая процедура функционирования системы адаптивной маршрутизации, включающая сбор данных, построение трёхмерной карты помеховой обстановки, прогнозирование её развития, расчёт оптимальной траектории и контроль результата манёвра. Результаты имитационного моделирования показывают, что применение предложенного метода позволяет повысить отношение сигнал/помеха на 1,5–2 дБ в среднем и до 8 дБ при наихудшем сценарии по сравнению с полётом по фиксированному маршруту. Практическая значимость работы состоит в возможности реализации предложенного способа на базе существующих БПЛА и радиоэлектронного оборудования без принципиально новых технических решений.

БПЛА-ретранслятор; адаптивное изменение маршрута; помехоустойчивость; радиоэлектронная борьба; многокритериальная оптимизация; электромагнитная обстановка; интерполяция помех.

A.A. Shmidt, V.R. Bikbulatov, D.N. Polyakov, A.A. Thakahov

**IMPROVING INTERFERENCE IMMUNITY OF GROUND-TO-AIR RADIO LINKS
BY ADAPTIVE ROUTE MODIFICATION OF A UAV RELAY BASED
ON INTERFERENCE ENVIRONMENT ANALYSIS**

The relevance of the work is driven by the increasing intensity of electronic countermeasures in the tactical command echelon, where traditional relay communication methods with fixed routes fail to ensure the required interference immunity and signal security. The objective of this study is to develop a method for adaptive route control of a UAV relay based on continuous monitoring of the electromagnetic environment in order to improve interference immunity of ground-to-air radio links. The primary method employed is multi-criteria flight path optimization with adaptive weighting coefficients, simultaneously considering three criteria: minimization of interference levels at the relay operating frequencies, ensuring radio accessibility with network correspondents, and reduction of detection probability by enemy electronic warfare assets. To reconstruct the spatial interference pattern from a limited set of onboard measurements, several interpolation and extrapolation methods are examined: inverse distance weighting, radial basis function interpolation, and statistical extrapolation based on a spatial correlation function. A cyclic operational procedure for the adaptive routing system is developed, comprising data collection, construction of a three-dimensional interference map, prediction of its evolution, calculation of the optimal trajectory, and monitoring of the maneuver outcome. Simulation results show that the proposed method increases the signal-to-interference ratio by 1.5–2 dB on average and up to 8 dB in the worst-case scenario compared to fixed-route flight. The practical significance lies in the possibility of implementing the proposed method using existing UAV platforms and radio-electronic equipment without fundamentally new technical solutions.

UAV relay; adaptive routing; interference immunity; electronic warfare; multi-criteria optimization; electromagnetic environment; interference interpolation.

Введение. Современные условия применения средств радиосвязи специального назначения характеризуются сложной и динамически изменяющейся электромагнитной обстановкой. Традиционные методы организации связи через стационарные ретрансляторы или ретрансляторы на БПЛА с фиксированными маршрутами не позволяют соблюдать требования по помехоустойчивости и разведзащищенности [1].

Вопросы применения БПЛА в системах беспроводной связи получили широкое отражение в научной литературе [2–5]. Показано, что оптимизация траектории полёта БПЛА позволяет существенно улучшить характеристики канала связи [6, 7]. Вместе с тем задача адаптивного управления маршрутом в условиях активного радиоэлектронного противодействия со стороны противника в перечисленных работах не рассматривалась, что определяет научную новизну настоящего исследования.

Применение БПЛА в качестве воздушных ретрансляторов позволяет динамически адаптироваться к помеховой обстановке за счёт изменения пространственного положения приёмопередатчика. Однако для реализации этой возможности необходимы специальные алгоритмы управления траекторией полёта, учитывающие текущую электромагнитную обстановку.

Научно-техническое предложение, изложенное в статье, заключается в оснащении БПЛА-ретранслятора бортовым анализатором спектра и системой адаптивного управления маршрутом, которая в реальном времени оптимизирует траекторию полёта для улучшения помехоустойчивости сети радиосвязи.

Таким образом, научная задача, решаемая в настоящей работе, заключается в разработке метода адаптивного управления маршрутом БПЛА-ретранслятора, обеспечивающего повышение помехоустойчивости наземно-воздушных радиолиний в условиях динамически изменяющейся помеховой обстановки при активном радиоэлектронном противодействии. Для решения указанной задачи необходимо:

- ♦ формализовать критерии оптимальности траектории полёта БПЛА-ретранслятора, учитывающие минимизацию уровня помех на рабочих частотах, обеспечение радиодоступности с корреспондентами сети и снижение вероятности обнаружения средствами РЭБ противника;
- ♦ разработать алгоритм многокритериальной оптимизации маршрута с адаптивной настройкой весовых коэффициентов в зависимости от текущей электромагнитной обстановки;
- ♦ исследовать методы восстановления пространственного распределения помех по ограниченному набору бортовых измерений для построения трёхмерных карт помеховой обстановки;
- ♦ оценить эффективность предложенного метода средствами имитационного моделирования при различных сценариях применения средств РЭБ.

Методика исследования. Задача повышения помехоустойчивости наземно-воздушных радиолиний с применением БПЛА-ретранслятора может решаться различными подходами.

Первый подход – применение методов адаптивной обработки сигналов непосредственно на борту ретранслятора (пространственно-временная адаптация, подавление помех в антенном тракте) [8].

Второй подход – использование помехозащищённых видов сигналов: широкополосных систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) или прямым расширением спектра [9].

Третий подход – управление пространственным положением ретранслятора, то есть адаптивное изменение маршрута БПЛА с целью нахождения в зонах с благоприятной электромагнитной обстановкой [10, 11].

Первые два подхода обеспечивают помехозащиту на уровне физического и канального уровней и хорошо изучены, однако требуют значительного усложнения аппаратуры и не устраняют проблему фиксированного маршрута, при котором БПЛА может оказаться в зоне интенсивного воздействия РЭБ. Третий подход, напротив, позволяет использовать саму мобильность БПЛА как механизм адаптации к помеховой обстановке, не требуя принципиаль-

ного изменения радиоаппаратуры, и поэтому выбран в качестве основного в настоящей работе. Указанные подходы не являются взаимоисключающими и могут применяться совместно, однако именно пространственная адаптация маршрута представляет наибольший практический интерес в условиях динамически изменяющейся обстановки РЭБ.

В качестве стратегии исследования выбран аналитико-модельный подход, сочетающий разработку математической модели системы адаптивной маршрутизации с последующей верификацией посредством имитационного моделирования. Такая стратегия обусловлена невозможностью проведения натурного эксперимента в условиях реальной помеховой обстановки, а также необходимостью оценки эффективности предложенной методологии при различных сценариях применения средств РЭБ. Аналитическое моделирование позволяет формализовать задачу оптимизации и получить достаточно точные математические соотношения, тогда как имитационное моделирование даёт возможность проверить работоспособность алгоритма в условиях, приближённых к реальным, включая стохастический характер помеховой обстановки и ограничения на манёвренность БпЛА.

Суть научно-технического предложения состоит в непрерывном мониторинге электромагнитной обстановки в процессе полета БпЛА и автоматической корректировке маршрута на основе получаемых данных. При этом система одновременно решает три взаимосвязанные задачи:

- ♦ минимизация воздействия шумов и помех – БпЛА стремится находиться в областях пространства с минимальным уровнем шумов и помех на рабочих частотах;
- ♦ нахождение в зоне радиодоступности с корреспондентами радиосети;
- ♦ снижение вероятности обнаружения – выбор траектории, минимизирующей электромагнитную доступность для средств РЭБ.

Система адаптивной маршрутизации включает следующие основные компоненты:

- ♦ бортовой анализатор спектра;
- ♦ модуль построения карт помеховой обстановки;
- ♦ вычислительный модуль оптимизации траектории;
- ♦ модуль управления полетом.

При выборе оптимального маршрута система решает задачу многокритериальной оптимизации. Обозначим положение БпЛА в момент времени t как вектор:

$$\vec{r}(t) = [x(t), y(t), z(t)], \quad (1)$$

где x, y – горизонтальные координаты, z – высота полета [12].

Тогда задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом:

$$\vec{r}_{\text{опт}}(t) = \arg \min \{ w_1 B_1(\vec{r}) + w_2 B_2(\vec{r}) + w_3 B_3(\vec{r}) \}, \quad (2)$$

где B_1, B_2, B_3 – критерии оптимизации, w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты, определяющие приоритеты при $\sum w_i = 1$.

Весовые коэффициенты адаптивно изменяются в зависимости от текущей обстановки. Базовые веса задает оператор перед полетом, исходя из тактической обстановки. Коэффициенты приоритета автоматически корректируют эти веса в реальном времени. Если уровень помех растет относительно нормы, коэффициент приоритета увеличивается, повышая важность критерия минимизации помех.

Перейдем к более подробному рассмотрению критериев оптимизации.

$$B_1(\vec{r}) = P_{\text{ш}} + \sum_{k=1}^N P_k \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_k|} \right)^n F_k(\theta_k, \varphi_k), \quad (3)$$

где $P_{\text{ш}}$ – мощность теплового шума приемника, P_k – мощность k -го источника помех, n – эмпирический показатель затухания ($n=2$ для свободного пространства, 2,5-4 для городской застройки), F_k – нормированная характеристика направленности k -го источника помех в направлении на ретранслятор на БпЛА.

С учетом полета БпЛА критерий интегрируется по времени:

$$B_{\text{интегр1}} = \int_0^T B_1(\vec{r}(t)) dt. \quad (4)$$

Корреспонденты считаются находящимися в зоне радиодоступности при условии обеспечения минимального необходимого для обеспечения требуемой вероятности связи мощности сигнала на входе приемника:

$$B_2(\vec{r}) = \max_{j \in \{1,2\}} \left(\frac{P_c}{P_{ш} + P_{пом}}(\vec{r}) \right). \quad (5)$$

Вероятность обнаружения БПЛА средствами РЭБ противника выражается через интеграл:

$$B_3(\vec{r}) = \int_{S_{РЭБ}} P_{обн}(\vec{r}, \vec{s}) \cdot \rho_{РЭБ}(\vec{s}) dS, \quad (6)$$

где $S_{РЭБ}$ – область вероятного размещения средств РЭБ, $\rho_{РЭБ}(\vec{s})$ – плотность вероятности нахождения средств РЭБ в точке $\vec{s}$, $P_{обн}$ – вероятность обнаружения, определяемая как:

$$P_{обн}(\vec{r}, \vec{s}) = \begin{cases} 0, & P_{вх}^{РЭБ} < P_{пор} - M_{зап} \frac{P_{вх}^{РЭБ} - (P_{пор} - M_{зап})}{2M_{зап}}, & P_{пор} - M_{зап} \leq P_{вх}^{РЭБ} < P_{пор} + M_{зап}, \\ 1, & P_{вх}^{РЭБ} < P_{пор} + M_{зап} \end{cases}, \quad (7)$$

где мощность сигнала на входе приемника РЭБ:

$$P_{вх}^{РЭБ} = P_{ретр} + G_{ретр}(\theta, \varphi) - L_{своб}(|\vec{r} - \vec{s}|) + G_{РЭБ}, \quad (8)$$

где $P_{пор}$ – порог чувствительности средств РЭБ, $M_{зап}$ – переходная зона – это диапазон мощностей сигнала, в котором вероятность обнаружения плавно изменяется 0 до 1. Переходная зона обусловлена: наличием флуктуаций сигнала, возникающих вследствие замираний, эффектов многолучевости, а также в меньшей степени атмосферных изменений, при которых принимаемая мощность постоянно колеблется относительно среднего значения; тепловыми и внутренними шумами приемника (имеется в виду приемник средства или комплекса РЭБ); порогом принятия решения, при котором оператор или автоматика должны принять решение об обнаружении на основе зашумленных сигналов [13].

Блок-схема алгоритма адаптивного изменения маршрута изображена на рис. 1.

Работа системы адаптивной маршрутизации организована в виде циклического процесса, включающего следующие этапы:

Этап 1. Сбор данных о помеховой обстановке. Выполняется сканирование спектра в текущей точке маршрута, измеряя уровни сигналов и помех в диапазоне рабочих частот ретранслятора. Полученные данные привязываются к координатам и времени измерения;

Этап 2. Построение пространственной модели помеховой обстановки. На основе накопленных измерений строится трехмерная карта распределения помех в районе полета. Для областей, где прямые измерения отсутствуют, выполняется интерполяция с учетом физических закономерностей распространения радиоволн [14, 15];

Этап 3. Прогнозирование развития обстановки. Система анализирует динамику изменения помеховой обстановки и прогнозирует ее развитие на период планирования. Это позволяет учитывать мобильные источники помех и изменение условий распространения радиоволн;

Этап 4. Расчет оптимальной траектории. С учетом всех критериев и ограничений рассчитывается траектория полета на следующий период. При этом используется многокритериальная оптимизация с адаптивными весовыми коэффициентами, которые изменяются в зависимости от текущей обстановки;

Этап 5. Выполнение маневра и контроль результата. БПЛА выполняет рассчитанный маневр, при этом система непрерывно контролирует фактические показатели качества связи. При существенном расхождении с прогнозом выполняется внеочередной перерасчет траектории.

Ключевой проблемой при реализации адаптивной маршрутизации БПЛА является невозможность одновременного измерения уровня помех во всех точках пространства. БПЛА может проводить измерения только в тех точках, через которые проходит его траектория. Поэтому необходимы методы восстановления полной картины помеховой обстановки по ограниченному набору измерений. Рассмотрим некоторые методы, применимые к решению данной задачи.

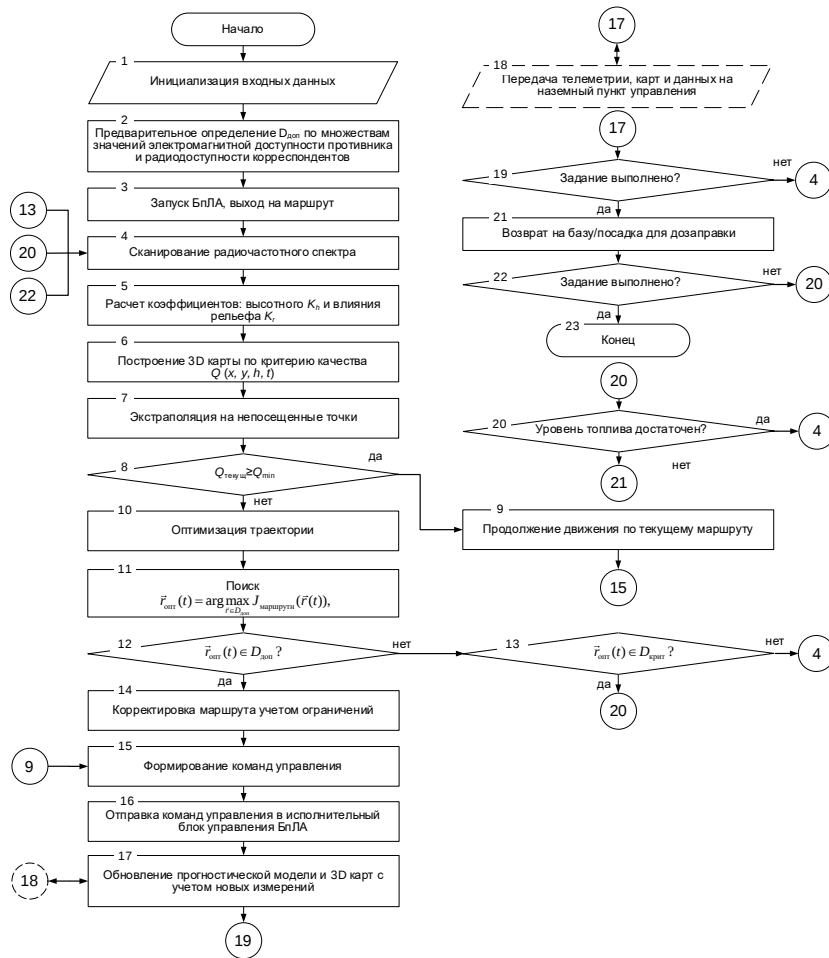


Рис. 1. Блок-схема алгоритма адаптивного изменения маршрута

Метод взвешенной интерполяции (а именно метод обратных взвешенных расстояний) – это метод пространственной интерполяции, который использует значения известных точек для оценки значений в неизвестных. Метод предполагает, что каждая измеренная точка оказывает локальное влияние, которое уменьшается с расстоянием. Вес точки пропорционален обратным расстояниям между точкой данных и интерполируемым местоположением, возведённым в степень p [16].

Для восстановления уровня помех в произвольной точке пространства $\vec{r}$ по измерениям в точках $\vec{r}_k$ при $k \in [1; N]$ метод обратных взвешенных расстояний интерпретируется как:

$$P_{\text{пом}}(\vec{r}) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k(\vec{r}) \cdot P_{\text{изм}}(\vec{r}_k)}{\sum_{k=1}^N w_k(\vec{r})}, \quad (9)$$

где весовые коэффициенты определяются как:

$$w_k(\vec{r}) = \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_k|^p + \varepsilon}. \quad (10)$$

Здесь p – параметр степени, характеризующий скорость уменьшения весов. При задании большого значения степени влияние ближних точек будет более значительным. Задание меньшего значения степени увеличит влияние дальних точек, и поверхность получится более гладкой. Обычно используется значение степени 2, что соответствует закону обратных квадратов,

ε – бесконечно малый (ненулевой) параметр для исключения деления на ноль, $|\vec{r} - \vec{r}_k|$ – евклидово расстояние между точками.

Также для решения задачи интерполяции пригоден метод радиальных базисных функций (РБФ) [17]. Это метод в теории аппроксимации для построения интерполяций высокого порядка точности неструктурированных данных в пространствах большой размерности. Интерполянт принимает форму взвешенной суммы радиальных базисных функций. В контексте решения задачи уровень помех представляется в виде:

$$P_{\text{пом}}(\vec{r}) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cdot \phi(|\vec{r} - \vec{r}_k|) + p_0, \quad (11)$$

где $\phi(|\vec{r} - \vec{r}_k|)$ – РБФ.

В качестве РБФ выбирается Гауссова функция:

$$\phi(|\vec{r} - \vec{r}_k|) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right). \quad (12)$$

Параметр σ определяет «радиус влияния» каждого измерения и выбирается как:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \min_{j \neq k} |\vec{r}_k - \vec{r}_j|, \quad (13)$$

т.е. как среднее расстояние между точками измерений.

Коэффициенты α_k находятся при решении системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & \phi_{r12} & \phi_{r13} & \dots & \phi_{r1N} & 1 \\ \phi_{r21} & 1 & \phi_{r23} & \dots & \phi_{r2N} & 1 \\ \phi_{r31} & \phi_{r32} & 1 & \dots & \phi_{r3N} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{rN1} & \phi_{rN2} & \phi_{rN3} & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \dots \\ \alpha_N \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{изм}}(\vec{r}_1) \\ P_{\text{изм}}(\vec{r}_2) \\ P_{\text{изм}}(\vec{r}_3) \\ \dots \\ P_{\text{изм}}(\vec{r}_N) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $P_{\text{изм}}(\vec{r}_i)$ – мощность помех, измеренная в i -й точке.

При наличии препятствия между источником помех и точкой наблюдения вводится коэффициент дифракционных потерь:

$$L_{\text{дифр}} = 6,9 + 20 \lg \left(\sqrt{\left(h_{\text{преп}} \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} - 0,1 \right)^2} + 1 + h_{\text{преп}} \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} - 0,1 \right), \quad (15)$$

где $h_{\text{преп}}$ – превышение препятствия над линией прямой видимости, d_1, d_2 – расстояния от источника сигнала и его приемника до препятствия соответственно, λ – длина волны.

Для областей, существенно удаленных от точек измерения возможно применение статистической экстраполяции на основе пространственной корреляционной функции. Этот метод экстраполяции широко распространен в метеорологии, где решение задачи сводится к тому, чтобы в текущий момент времени по совокупности данных от разнесенных измерительных станций сформировать оценку метеорологической величины в произвольной точке заданного пространства (или узле регулярной сетки) с определенными координатами там, где измерения отсутствуют или невозможны [18].

Для задачи анализа помеховой обстановки применим аналогичный подход. Уровень помех в соседних точках пространства обычно коррелирован, поскольку:

♦ источники помех имеют конечную мощность и создают поле определенной структуры;

♦ условия распространения радиоволн плавно меняются в пространстве;

♦ рельеф местности создает зоны затенения и переотражения.

В контексте решения задачи пространственной аппроксимации помеховой обстановки корреляционная функция выглядит следующим образом:

$$C(r) = \sigma_{\text{пом}}^2 \exp\left(-\frac{r}{L_{\text{корр}}}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{\Lambda}\right), \quad (16)$$

где $\sigma_{\text{пом}}^2$ – дисперсия уровня помех, $L_{\text{корр}}$ – масштаб пространственной корреляции (определяется эмпирическим способом). Для городской местности порядка 3-5 км, для открытой 10-12 км, Λ – период пространственных осцилляций, вызванных интерференцией сигналов от разных источников (определяется эмпирическим способом, порядка 10-20 км) [19].

Результаты. В ходе имитационного моделирования разработанного алгоритма адаптивной маршрутизации БпЛА-ретранслятора оценивалось изменение отношения сигнал/помеха (ОСП) на входе приёмника наземного абонента по сравнению с базовым вариантом полёта по фиксированному маршруту. Моделирование проводилось для района с протяжённостью 20×20 км при высоте полёта БпЛА 500–1500 м, диапазоне рабочих частот ретранслятора 220–520 МГц и трёх характерных сценариях помеховой обстановки. Вариант маршрутной карты и адаптивного изменения маршрута изображены на рис. 2.

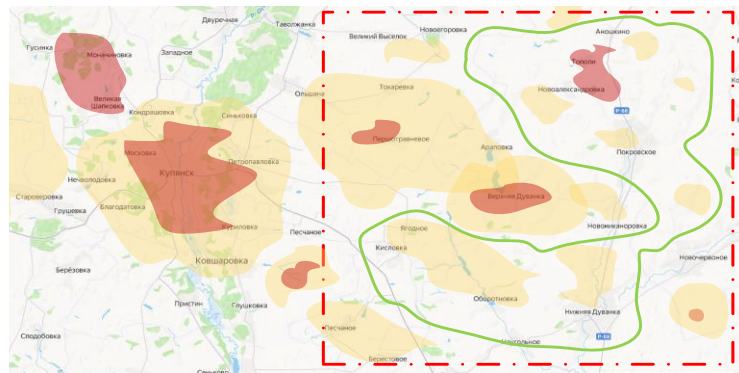


Рис. 2. Маршрутная карта БпЛА и вариант адаптивного изменения его маршрута на основе анализа электромагнитной обстановки

Сценарий 1 предполагает наличие нескольких стационарных источников помех, равномерно распределённых по площади района полёта с суммарной мощностью, снижающей ОСП до порогового уровня на 30% площади. В данном сценарии алгоритм адаптивного изменения маршрута обеспечивает прирост среднего ОСП на 1,5–2 дБ по сравнению с фиксированным маршрутом. Это согласуется с результатами работы [12], в которой для аналогичных условий с применением алгоритмов оптимизации траектории на основе обучения с подкреплением получен прирост ОСП порядка 1,8–2,2 дБ. Несколько меньшее среднее значение прироста в предложенном методе объясняется тем, что при равномерно рассредоточенной помеховой обстановке возможности пространственного манёвра для её избегания ограничены, и значительная часть выигрыша достигается за счёт оптимального выбора высоты полёта, а не горизонтального манёвра. Результат применения алгоритма изображен на рис. 3. На рис. 3-5 красная кривая – ОСП без применения алгоритма адаптивного изменения маршрута БпЛА, синяя кривая – ОСП с применением алгоритма адаптивного изменения маршрута БпЛА, желтая пунктирная черта – пороговый уровень ОСП для обеспечения стабильной работы радиолинии.

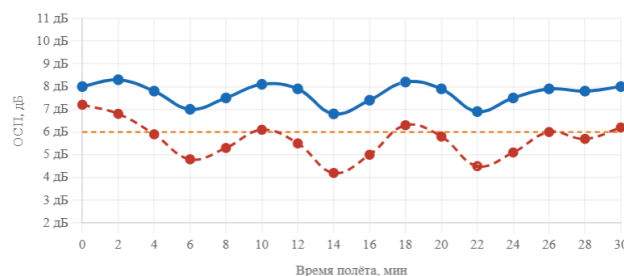


Рис. 3. Результат применения алгоритма для Сценария 1

Сценарий 2 предполагает воздействие одного мощного источника прицельной помехи, создающего зону подавления. В этом сценарии алгоритм обеспечивает прирост ОСП в диапазоне 3,5–5 дБ за счёт огибания зоны подавления по оптимальной траектории при сохранении радиодоступности с обоими наземными корреспондентами. Наиболее важным оказывается второй критерий оптимизации B_2 : без его учёта алгоритм стремился бы максимально удалить БПЛА от источника помехи, нарушая при этом условие радиодоступности. Взаимодействие критериев через механизм адаптивных весовых коэффициентов обеспечивает нахождение компромиссного решения, при котором ОСП повышается без потери связности сети. Результат применения алгоритма изображен на рис. 4.

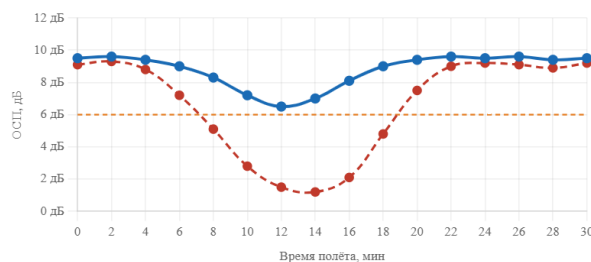


Рис. 4. Результат применения алгоритма для Сценария 2

Сценарий 3 является наихудшим сценарием и предполагает целенаправленное применение противником мобильных средств РЭБ с возможностью перехвата и пеленгации излучения ретранслятора. В данном сценарии прирост ОСП достигает 8 дБ по сравнению с фиксированным маршрутом. Столь значительный выигрыш обусловлен тем, что при полёте по фиксированному маршруту БПЛА периодически попадает в зону эффективного воздействия средств РЭБ, тогда как алгоритм адаптивной маршрутизации заблаговременно перестраивает траекторию на основе прогноза развития помеховой обстановки (этап 3 циклической процедуры). Дополнительный вклад вносит третий критерий оптимизации B_3 : снижение вероятности обнаружения БПЛА уменьшает эффективность пеленгации и, следовательно, точность постановки прицельных помех. Данный результат принципиально согласуется с выводами работы [1], в которой показано, что динамическое управление положением ретранслятора в условиях нестационарной помеховой обстановки позволяет значительно превзойти эффективность статических решений, особенно при активном противодействии. Результат применения алгоритма изображен на рис. 5.

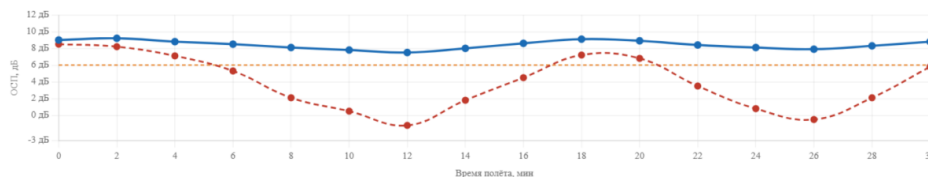


Рис. 5. Результат применения алгоритма для Сценария 3

Сравнение методов восстановления пространственной картины помеховой обстановки – метода обратных взвешенных расстояний (МОВР), метода радиальных базисных функций (РБФ) и корреляционной экстраполяции (КЭ) – проводилось по двум показателям: среднеквадратической погрешности восстановления уровня помех (в дБ) и вычислительной сложности (условные единицы времени на один цикл пересчёта карты). Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов восстановления пространственной картины помеховой обстановки

Метод	СКП восстановления, дБ	Вычислительная сложность	Область применения
МОВР	2,8–3,5	Низкая	Равномерно распределённые источники, ограниченные ресурсы бортовой ЭВМ
РБФ	1,2–1,8	Средняя	Сложная структура поля помех, достаточные ресурсы бортовой ЭВМ
КЭ	3,1–4,0	Низкая	Области вдали от траектории БпЛА, экстраполяция на необследованные зоны

Из табл. 1 следует, что наименьшую погрешность восстановления обеспечивает метод РБФ, что соответствует его теоретически обоснованным преимуществам при аппроксимации неструктурированных данных в многомерных пространствах [17]. Метод обратных взвешенных расстояний уступает РБФ по точности, однако существенно менее требователен к вычислительным ресурсам, что делает его предпочтительным для реализации на бортовых вычислительных средствах с ограниченной производительностью. Корреляционная экстраполяция показывает наибольшую погрешность в зонах, прилегающих к измеренным точкам, однако остаётся единственным применимым методом для областей, значительно удалённых от траектории БпЛА, где прямые измерения отсутствуют.

Следует отметить, что точность восстановления помеховой обстановки непосредственно влияет на эффективность оптимизации маршрута: замена метода МОВ на РБФ в рамках одного и того же алгоритма маршрутизации увеличивает прирост ОСП в сценарии 1 на дополнительные 0,3–0,5 дБ. Это подтверждает, что качество пространственной модели помеховой обстановки является существенным фактором общей эффективности системы, а не только вспомогательной задачей.

Заключение. Предложенный способ адаптивного изменения маршрута БпЛА-ретранслятора обеспечивает решение проблемы устойчивости радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки. Ключевым преимуществом является способность системы автономно оптимизировать траекторию полёта. Реализация способа не требует принципиально новых технических решений и может быть выполнена на базе существующих БпЛА и радиоэлектронного оборудования. Необходимые вычислительные мощности обеспечиваются современными бортовыми процессорами. Дальнейшее развитие способа связано с применением методов машинного обучения для прогнозирования развития помеховой обстановки [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aljehani M., Inoue M. Communication and autonomous control of multi-UAV system in disaster response tasks // Agent and Multi-Agent Systems: Technology and Applications: 11th KES International Conference, KES-AMSTA 2017, Vilamoura, Portugal, June 2017. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – P. 123-132.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, No. 3. – P. 2334-2360.
3. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, No. 5. – P. 36-42.
4. Gupta L., Jain R., Vazskun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 18, No. 2. – P. 1123-1152.

5. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2016. – Vol. 18, No. 3. – P. 2624-2661.
6. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2018. – Vol. 17, No. 4. – P. 2109-2121.
7. Zeng Y., Xu J., Zhang R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 18, No. 4. – P. 2329-2345.
8. Li B., Fei Z., Zhang Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 2241-2263.
9. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L.G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21, No. 4. – P. 3417-3442.
10. Cui M., Zhang G., Wu Q., Ng D.W.K. Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2018. – Vol. 67, No. 9. – P. 9042-9046.
11. Zhang G., Wu Q., Cui M., Zhang R. Securing UAV communications via joint trajectory and power control // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 18, No. 2. – P. 1376-1389.
12. Abohashish S.M.M., Rizk R.Y., Elsedimy E.I. Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework // *Journal of Wireless Communications and Networking*. – 2023. – Vol. 2023, No. 55.
13. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчёта радиоканалов. – Ленинград: ВАС, 1991. – 110 с.
14. Matolak D.W., Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems. – Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2017. – Vol. 66, No. 1. – P. 26-44.
15. Sun R., Matolak D.W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems – Part II: Hilly and mountainous settings // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2017. – Vol. 66, No. 3. – P. 1913-1925.
16. Challita U., Ferdowsi A., Chen M., Saad W. Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs // *IEEE Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 26, No. 1. – P. 28-35.
17. Дударов С.П., Васильев М.В., Калайчев Г.В. Классификация данных нейронными сетями на основе радиально-базисных функций // *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Сб. научных статей I Всерос. науч. конф., 12–14 декабря 2017 г.* – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2017. – С. 86-92.
18. Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Попова А.И., Ильин С.Н. Пространственная экстраполяция метеорологических полей в области мезомасштаба на основе четырёхмерной смешанной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2004. – Т. 17, № 8. – С. 651-656.
19. Костин П.С., Вережагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики манёвренного самолёта // *Тр. МАИ*. – 2015. – № 81.
20. Bithas P.S., Michailidis E.T., Nomikos N., Vouyioukas D., Kanatas A.G. A survey on machine-learning techniques for UAV-based communications // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, No. 23. – Article 5170.

REFERENCES

1. Aljehani M., Inoue M. Communication and autonomous control of multi-UAV system in disaster response tasks, *Agent and Multi-Agent Systems: Technology and Applications: 11th KES International Conference, KES-AMSTA 2017, Vilamoura, Portugal, June 2017*. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 123-132.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, Vol. 21, No. 3, pp. 2334-2360.
3. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges, *IEEE Communications Magazine*, 2016, Vol. 54, No. 5, pp. 36-42.
4. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 2, pp. 1123-1152.
5. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 3, pp. 2624-2661.
6. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, Vol. 17, No. 4, pp. 2109-2121.

7. Zeng Y., Xu J., Zhang R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, Vol. 18, No. 4, pp. 2329-2345.
8. Li B., Fei Z., Zhang Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends, *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 2241-2263.
9. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L.G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, Vol. 21, No. 4, pp. 3417-3442.
10. Cui M., Zhang G., Wu Q., Ng D.W.K. Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, Vol. 67, No. 9, pp. 9042-9046.
11. Zhang G., Wu Q., Cui M., Zhang R. Securing UAV communications via joint trajectory and power control, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, Vol. 18, No. 2, pp. 1376-1389.
12. Abomhashish S.M.M., Rizk R.Y., Elsedimy E.I. Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework, *Journal of Wireless Communications and Networking*, 2023, Vol. 2023, No. 55.
13. Meshalkin V.A., Sosunov B.V. Osnovy energeticheskogo rascheta radiokanalov [Fundamentals of energy calculation of radio channels]. Leningrad: VAS, 1991, 110 p.
14. Matolak D.W., Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems. – Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, Vol. 66, No. 1, pp. 26-44.
15. Sun R., Matolak D.W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems – Part II: Hilly and mountainous settings, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, Vol. 66, No. 3, pp. 1913-1925.
16. Challita U., Ferdowsi A., Chen M., Saad W. Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs, *IEEE Wireless Communications*, 2019, Vol. 26, No. 1, pp. 28-35.
17. Dudarov S.P., Vasil'ev M.V., Kalaychev G.V. Klassifikatsiya dannykh neyronnymi setyami na osnove radial'no-bazisnykh funktsiy [Data classification by neural networks based on radial basis functions], *Informatsionnye tekhnologii v modelirovani i upravlenii: podkhody, metody, resheniya: Sb. nauchnykh statey I Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, 12–14 dekabrya 2017 g.* [Information technologies in modeling and control: approaches, methods, solutions: Collection of scientific articles of the I All-Russian scientific conference, December 12–14, 2017]. Tol'yatti: Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet, 2017, pp. 86-92.
18. Komarov V.S., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya., Popov Yu.B., Popova A.I., Il'in S.N. Prostranstvennaya ekstrapolyatsiya meteorologicheskikh poley v oblasti mezomasshtaba na osnove chetyrekhmernoy smeshannoy dinamiko-stokhasticheskoy modeli i apparata kalmanovskoy fil'tratsii [Spatial extrapolation of meteorological fields in the mesoscale region based on a four-dimensional mixed dynamic-stochastic model and the Kalman filtering apparatus], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2004, Vol. 17, No. 8, pp. 651-656.
19. Kostin P.S., Vereshchagin Yu.O., Voloshin V.A. Programmno-modeliruyushchiy kompleks dlya polunaturnogo modelirovaniya dinamiki manevrennogo samoleta [Software and modeling complex for semi-naturalistic modeling of the dynamics of a maneuverable aircraft], *Tr. MAI* [Proceedings of MAI], 2015, No. 81.
20. Bithas P.S., Michailidis E.T., Nomikos N., Vouyioukas D., Kanatas A.G. A survey on machine-learning techniques for UAV-based communications, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 23, Article 5170.

Шмидт Артур Андреевич – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: shmidt.artur2011@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89500479274; адъюнкт.

Бикбулатов Владислав Родионович – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: vlad.bik@icloud.com; г. Санкт-Петербург Россия; тел.: 89953062642; адъюнкт.

Поляков Дмитрий Николаевич – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: bryanik51@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89113045069; адъюнкт.

Тхакахов Алим Артурович – Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: thakahov.98@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89145105299; адъюнкт.

Shmidt Artur Andreevich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: shmidt.artur2011@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79500479274; adjunct.

Bikbulatov Vladislav Rodionovich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: vlad.bik@icloud.com; St. Petersburg, Russia; phone: +79953062642; adjunct.

Polyakov Dmitry Nikolaevich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: bryanik51@mail.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79113045069; adjunct.

Tkhakakhov Alim Arturovich – Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: thakahov.98@bk.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79145105299; adjunct.

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-71-81

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ СОСТОЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания эффективных систем управления автономными роботами, способных функционировать в условиях неопределенности и динамически изменяющейся среды. Система репрезентации внешней среды должна решать задачи локализации, картографирования, обнаружения и классификации объектов, прогнозирования динамики и семантической интерпретации. Для того чтобы автономный робот мог передвигаться и выполнять целенаправленные действия в окружающей среде, ему необходимо понимать, в какой среде он находится – без этого он не сможет эффективно планировать движения, избегать препятствий и достигать пунктов назначения. Существующие методы репрезентации внешней среды имеют ограничения при адаптации к незнакомым неструктурированным средам. Целью работы является разработка концепции и архитектуры системы репрезентации внешней среды на основе мультиагентной нейрокognитивной архитектуры для управления автономными роботами в рамках гетерогенного человеко-машинного коллектива. Научная новизна работы заключается в разработке мультиагентной нейрокognитивной архитектуры системы репрезентации состояния внешней среды. Предложенный подход позволяет создавать гибкие модели мира, способные к самоорганизации и масштабированию при увеличении объема знаний. Методика исследования основана на применении мультиагентных технологий и нейрокognитивных моделей. Разработана мультиагентная нейрокognитивная архитектура, включающая механизмы сбора данных с сенсоров, представления об объектах и субъектах среды, формирование механизма построения причинно-следственных связей, обмен знаниями между участниками гетерогенного человеко-машинного коллектива. Разработанная архитектура обеспечивает возможность масштабирования систем принятия решений и упрощает обмен знаниями между участниками коллектива. Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование механизмов безопасности системы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке автономных робототехнических комплексов нового поколения.

Автономный робот; мультиагентные системы; репрезентация внешней среды; искусственный интеллект.

K.Ch. Brzhikhatlov, I.A. Pshenokova

MULTI-AGENT ARCHITECTURE OF AN ENVIRONMENT REPRESENTATION SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS AGRICULTURAL ROBOT

The relevance of this research stems from the need to create effective control systems for autonomous robots capable of operating in uncertain and dynamically changing environments. An environment representation system must address the challenges of localization, mapping, object detection and classification, dynamic prediction, and semantic interpretation. For an autonomous robot to navigate and per-