



Научная статья

УДК 621.37

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189153>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IPFHQT>

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ НОСИТЕЛЕЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ БОРТОВЫХ РЛС ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КАДРОВ

В.А. Ненашев¹✉ , В.П. Кузьменко¹ , П.Н. Хатунцев², Н.К. Третьяков³ 

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург, Россия

²Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь, Россия

³ федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург, Россия

✉ nenashev.va@yandex.ru

Цитирование: Ненашев В.А., Кузьменко В.П., Хатунцев П.Н., Третьяков Н.К. Модель оптимального траекторного управления группой носителей малогабаритных бортовых РЛС при формировании потока радиолокационных кадров // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189153>

Аннотация. В исследовании рассматривается задача синтеза траекторного управления движением группы малых летательных аппаратов, оснащённых малогабаритными бортовыми радиолокационными станциями и осуществляющих групповой авиационной контроль земной поверхности. Целью исследования является разработка модели траекторного управления группой носителей МБРЛС, обеспечивающей формирование потока радиолокационных кадров высокого разрешения при одновременном повышении точности

оценивания параметров объекта наблюдения по разноракурсным измерениям и соблюдении ограничений на движение носителей. Задача синтеза траекторного управления сформулирована как задача условной нелинейной оптимизации. В рамках предложенного подхода на дискретной временной сетке формирования радиолокационных кадров используются кинематическая модель движения группы носителей, модель многопозиционных измерений и рекуррентный расчёт матрицы нижней границы ковариации ошибки оценивания параметров объекта наблюдения.

При синтезе управления учитываются ограничения на скорость, ускорение, минимально допустимую дистанцию между носителями и разрешение. Численная валидация предложенного метода выполнена в имитационной модели для трёх сценариев начального положения объекта наблюдения. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения предложенного подхода при разработке алгоритмов группового траекторного управления носителями бортовых радиолокационных станций и при реализации на их базе режимов многопозиционного наблюдения.

Ключевые слова: малогабаритная бортовая радиолокационная станция; групповое управление; траекторное управление; поток радиолокационных видеокадров; разноракурсное радиолокационное наблюдение.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

MODEL OF OPTIMAL TRAJECTORY CONTROL FOR A GROUP OF SMALL AIRBORNE RADAR CARRIERS IN THE FORMATION OF A RADAR FRAME STREAM

V.A. Nenashev¹✉, V.P. Kuzmenko¹, P.N. Khatuntsev², N.K. Tretiakov³

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

²Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union
G.K. Zhukov, Tver, Russia

³Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ nenashev.va@yandex.ru

Abstract. This study addresses the problem of synthesizing trajectory control for a group of small aerial vehicles equipped with compact airborne radar systems and performing cooperative aerial surveillance of the Earth's surface. The objective of the research is to develop a trajectory control model for a group of compact airborne radar carriers that ensures the formation of a high-resolution radar frame stream while simultaneously improving the accuracy of estimating the parameters of the observed object based on multi-aspect measurements and satisfying motion constraints of the carriers.

The trajectory control synthesis problem is formulated as a constrained nonlinear optimization problem. Within the proposed approach, defined on a discrete time grid corresponding to radar frame formation, a kinematic model of carrier group motion, a multistatic measurement model, and a recursive computation of the covariance lower bound matrix for the estimation error of the observed object parameters are employed.

The control synthesis accounts for constraints on velocity, acceleration, minimum allowable distance between carriers, and spatial resolution. Numerical validation of the proposed method is performed using a simulation model for three scenarios of the initial position of the observed object. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach for the development of group trajectory control algorithms for airborne radar carriers and for the implementation of multistatic observation modes based on such systems.

Keywords: compact airborne radar system; group control; trajectory control; radar frame stream; multistatic radar observation.

Funding: the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 24-79-10259).

Введение

В задачах авиационного контроля земной поверхности всё более широко применяются малогабаритные бортовые радиолокационные станции (МБРЛС), размещаемые на малых летательных аппаратах (МЛА) и других носителях.

Использование группы МБРЛС позволяет реализовать режимы многопозиционного радиолокационного наблюдения, повышающее информативность и достоверность получаемых данных по сравнению с однопозиционным вариантом [1-3].

Одним из основных преимуществ группового применения МБРЛС является возможность формирования потока радиолокационных видеок кадров, формируемых с различных ракурсов и подлежащих последующей совместной обработке [4-6].

Эффективность группового формирования потока радиолокационных видеок кадров определяется траекториями движения носителей МБРЛС и их взаимным расположением относительно наблюдаемой подстилающей поверхности. Неоптимальная или неточная конфигурация позиций наблюдения группы МБРЛС приводит к ухудшению условий радиолокационного обзора, появлению зон недостаточного покрытия, снижению информативности радиолокационных кадров (РЛК) и, как следствие, к ухудшению качества выдаваемых результирующих данных совместной обработки [7-9].

Влияние взаимного расположения позиций носителей на траектории МБРЛС на точность радиолокационных измерений подробно исследовано в литературе [10-12]. Для оценки предельной точности определения параметров наземных объектов широко используется неравенство Крамера-Рао. На его основе разработаны подходы к выбору геометрии взаимного расположения носителей МБРЛС и наблюдаемой поверхности, а также задаваемых параметров режима формирования РЛК, обеспечивающих повышение точности оценивания характеристик наземных объектов.

В задачах группового управления носителями МБРЛС рассмотрены методы к совместной оптимизации траекторий [13, 14], а также подходы к развертыванию групп, состоящих из МЛА и применяемых в поисково-спасательных сценариях, требующих оперативного характера [15-17]. Однако в указанных работах траекторное управление не рассматривается как средство формирования потока радиолокационных видеок кадров требуемого высокого разрешения, предназначенного для последующей интеллектуальной обработки с учётом

взаимного расположения носителей МБРЛС и объектов наблюдаемой сцены на интервале синтеза видеок кадров.

Таким образом, актуальным является решение задачи согласованного выбора траекторий группы носителей МБРЛС, при котором одновременно обеспечиваются требуемая точность оценивания параметров наземного объекта наблюдения и требуемые характеристики потока РЛК [18-21].

Постановка задачи

Рассматривается задача группового применения МЛА, представляющих собой группу носителей МБРЛС, выполняющих авиационный контроль подстилающей поверхности и наземных объектов на ней. В процессе полёта – группа носителей МБРЛС на интервале синтеза осуществляется формирование упорядоченной во времени последовательности РЛК, получаемых группой носителей МБРЛС при их движении. Качество этого потока РЛК определяется траекториями движения носителей МБРЛС и их взаимным расположением относительно друг друга и относительно наблюдаемой подстилающей поверхности, а также наземных объектов на ней.

В связи с этим требуется определить такие законы траекторного управления группой взаимодействующих носителей МБРЛС, которые обеспечивают одновременно:

1) высокую информативность потока РЛК, достаточную для картографирования подстилающей поверхности и оценивания параметров объектов наблюдения на ней;

2) требуемое качество потока РЛК, необходимое для его последующей межкадровой, совместной и интеллектуальной обработки;

3) реализуемость взаимного движения носителей с учётом ограничений на манёвр и минимально допустимую дистанцию между ними.

Пусть будет задана группа носителей МБРЛС численностью $N \geq 2$, тогда формирование потока РЛК осуществляется на дискретной временной сетке как:

$$t_k = t_0 + kT_k,$$

$$k = 0, 1, \dots, K,$$

$$K = \left\lceil \frac{T}{T_k} \right\rceil,$$

где t_k – момент формирования k -го радиолокационного кадра, с;

t_0 – начальный момент времени, с;

T_k – период следования радиолокационных кадров, с;

T – длительность интервала формирования потока, с;

K – число тактов формирования РЛК на интервале $[t_0, t_0 + T]$;

$[\cdot]$ – операция взятия целой части.

Индекс i используется для произвольного носителя МБРЛС. Индексы m и n применяются при записи ограничения на минимально допустимую дистанцию между носителями. Индекс j обозначает носитель, выполняющий функцию передатчика.

На рисунке 1 приведена схема, иллюстрирующая задачу траекторного управления движением группы носителей МБРЛС при формировании потока РЛК. На каждом такте один МБРЛС₁ выполняет функцию излучающей станции, а остальные соседние МБРЛС осуществляют приём излучаемого сигнала с МБРЛС₁, при этом МБРЛС₁ сам сигнал не принимает, а соседние МБРЛС не излучают сигналы. На рис. 1 показаны направления на объект наблюдения, формирование бистатистических измерений и передача потока РЛК в пункт приёма и синхронизации. Рис. 1 иллюстрирует связь между траекториями движения носителей МБРЛС, информативностью разноракурсных измерений и качеством потока РЛК. В верхней части рисунка показана пространственно-временная геометрия многопозиционного наблюдения, формируемая группой МЛА, в которой на каждом такте один носитель МБРЛС выполняет функцию передатчика $j(k)$, а остальные носители из множества $I_{\text{пр}}(k)$ – функцию приёмников, при этом направления на объект наблюдения задаются единичными векторами $e_{\text{перед}}(k)$ и $e_i(k)$.



Рисунок 1 – Схема задачи траекторного управления движением группы носителей МБРЛС при формировании потока РЛК

После введения дискретной временной сетки положение и скорость i -го носителя МБРЛС на такте k описываются векторами $r_i(k) \in \mathbb{R}^3$ и $v_i(k) \in \mathbb{R}^3$, а управляющее воздействие – вектором ускорения $a_i(k) \in \mathbb{R}^3$. Движение носителя задаётся дискретной кинематической моделью второго порядка:

$$\begin{aligned} r_i(k+1) &= r_i(k) + T_k v_i(k) + \frac{T_k^2}{2} a_i(k), \\ v_i(k+1) &= v_i(k) + T_k a_i(k), \\ i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

где $r_i(k)$ – радиус-вектор положения i -го носителя МБРЛС на такте k м;

$v_i(k)$ – скорость носителя i -го носителя МБРЛС на такте k м/с;

$a_i(k)$ – ускорение носителя i -го носителя МБРЛС на такте k м/с²;

Ограничения на движение группы носителей МБРЛС задаются условиями (2) и (3):

$$\|v_i(k)\| \leq V_{\max}, \quad \|a_i(k)\| \leq a_{\max}, \quad (2)$$

$$\|r_m(k) - r_n(k)\| \geq d_{\min}, \quad m \neq n, \quad m, n \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (3)$$

где $r_m(k)$ и $r_n(k)$ – радиус-векторы положения m -го и n -го носителей МБРЛС на такте k , м;

где $V_{\max}$ – максимально допустимая скорость носителя МБРЛС, м/с;

$a_{\max}$ – максимально допустимое ускорение носителя МБРЛС, м/с²;

$d_{\min}$ – минимально допустимая дистанция между носителями МБРЛС, м.

На каждом такте используется схема «один передатчик – несколько приёмников». Индекс носителя, выполняющего функцию передатчика, обозначим как $j(k) \in \{1, 2, \dots, N\}$. Тогда множество индексов носителей, выполняющих функцию приёмников, задаётся как

$$I_{\text{пр}}(k) = \{1, \dots, N\} / \{j(k)\},$$

где $I_{\text{пр}}(k)$ – множество индексов носителей МБРЛС, выполняющих функцию приёмников, безразмерная величина.

При этом $r_j(k)$ – радиус-вектор положения носителя МБРЛС с индексом $j(k)$, выполняющего функцию передатчика на такте k , м;

$v_j(k)$ – вектор скорости носителя МБРЛС с индексом $j(k)$, выполняющего функцию передатчика на такте k м/с;

Параметры объекта наблюдения, подлежащие оцениванию по многопозиционным измерениям, описываются вектором состояния (4):

$$x(k) = [r^T(k), v_{\text{об}}^T(k)]^T, \quad (4)$$

и динамикой (5):

$$x(k+1) = Fx(k) + w(k), \quad (5)$$

где $r(k)$ – радиус-вектор положения объекта наблюдения, м;

$v_{\text{об}}(k)$ – вектор скорости объекта наблюдения, м/с;

F – матрица перехода состояния объекта наблюдения, безразмерная величина;

$w(k)$ – вектор случайного возмущения (шум) в модели движения объекта наблюдения, единицы измерения компонент которого согласованы с единицами измерения компонент вектора состояния $x(k)$;

$Q = E\{w(k), w^T(k)\}$ в единицах измерения м^2 и $(\text{м/с})^2$;

$E\{\cdot\}$ – оператор математического ожидания.

Ковариационная матрица вектора $w(k)$, единицы измерения элементов которой определяются единицами измерения компонент вектора состояния $x(k)$: м^2 , $(\text{м/с})^2$ и $\text{м} \cdot (\text{м/с})$ для смешанных ковариаций.

Для задания измерительной модели введём единичный вектор направления от носителя МБРЛС, выполняющего функцию передатчика на такте k , к объекту наблюдения и единичный вектор направления от i -го носителя МБРЛС,

выполняющего функцию приёмника на такте k , к объекту наблюдения. Эти векторы задаются выражением (6):

$$\begin{aligned} e_{\text{перед}}(k) &= \frac{p(k) - r_{j(k)}(k)}{\|p(k) - r_{j(k)}(k)\|}, \\ e_i(k) &= \frac{p(k) - r_i(k)}{\|p(k) - r_i(k)\|}, \\ i &\in I_{\text{пр}}(k), \end{aligned} \quad (6)$$

где $e_{\text{перед}}(k)$ – единичный вектор направления от носителя МБРЛС, выполняющего функцию передатчика на такте k , к объекту наблюдения, безразмерная величина;

$e_i(k)$ – единичный вектор направления от i -го носителя МБРЛС, выполняющего функцию приёмника на такте k , к объекту наблюдения, безразмерная величина;

$p(k)$ – радиус-вектор положения объекта наблюдения, м;

$r_{j(k)}(k)$ радиус-вектор положения носителя МБРЛС с индексом $j(k)$, выполняющего функцию передатчика на такте k , м;

$r_i(k)$ – радиус-вектор положения i -го носителя МБРЛС, выполняющего функцию приёмника на такте k , м.

Из радиолокационного кадра, полученного по каналу «носитель МБРЛС, выполняющий функцию передатчика – объект наблюдения – i -й носитель МБРЛС, выполняющий функцию приёмника», на такте k извлекается вектор бистатистических дальностно-доплеровских измеряемых величин, задаваемый выражением (7):

$$\begin{aligned} z_i(k) &= \begin{bmatrix} p_i(k) \\ \dot{p}_i(k) \end{bmatrix} + n_i(k), \\ i &\in I_{\text{пр}}(k), \\ p_i(k) &= \|p(k) - r_{j(k)}(k)\| + \|p(k) - r_i(k)\|, \\ \dot{p}_i(k) &= e_{\text{перед}}^T(k)(v_{\text{об}}(k) - v_{j(k)}(k)) + e_i^T(k)(v_{\text{об}}(k) - v_i(k)), \end{aligned} \quad (7)$$

$z_i(k)$ – вектор бистатистических дальностно-доплеровских измеряемых величин, формируемый i -м носителем МБРЛС, выполняющим функцию приёмника на такте k ;

$p_i(k)$ – бистатистическая дальность, м;

$\dot{p}_i(k)$ – скорость изменения бистатической дальности, м/с;

$n_i(k)$ – вектор шума измерений i -го носителя МБРЛС, выполняющего функцию приёмника на такте k ;

$v_{j(k)}(k)$ – вектор скорости носителя МБРЛС с индексом $j(k)$, выполняющего функцию передатчика на такте k , м/с; (k) – вектор скорости i -го носителя МБРЛС, выполняющего функцию приёмника на такте k , м/с.

Вектор $z_i(k)$ является разноразмерным: первая компонента имеет единицу измерения м, вторая компонента имеет единицу измерения м/с.

Ковариационная матрица вектора шума измерений $n_i(k)$ определяется соотношением:

$$R_i(k) = E \{ n_i(k) n_i^T(k) \}, i \in I_{\text{пр}}(k),$$

$R_i(k)$ – ковариационная матрица вектора шума измерений i -го носителя МБРЛС, выполняющего функцию приёмника на такте k ; единицы измерения элементов матрицы $R_i(k)$ определяются единицами измерения компонент вектора $z_i(k)$ для смешанной ковариации;

$E\{\cdot\}$ – оператор математического ожидания.

Суммарная информативность многопозиционных измерений, полученных на такте k , задаётся информационной матрицей Фишера (8):

$$J_{\text{изм}}(k) = \sum_{i \in I_{\text{пр}}(k)} H_i^T(k) R_i^{-1}(k) H_i(k),$$
$$H_i(k) = \frac{\partial}{\partial x(k)} \begin{bmatrix} p_i(k) \\ \dot{p}_i(k) \end{bmatrix}, i \in I_{\text{пр}}(k),$$
(8)

где $J_{\text{изм}}(k)$ – информационная матрица Фишера по совокупности бистатических дальностно-доплеровских измеряемых величин, полученных на такте k ;

$H_i(k)$ – матрица Якоби вектора бистатических дальностно-доплеровских измеряемых величин по вектору состояния объекта наблюдения $x(k)$.

Требование к геометрии многопозиционного наблюдения задаётся через бистатический угол, определяемый выражением (9):

$$\psi_i(k) = \arccos(e_{\text{перед}}^T(k) e_i(k)), i \in I_{\text{пр}}(k),$$
(9)

где $\psi_i(k)$ – бистатистический угол в канале «носитель МБРЛС, выполняющий функцию передатчика – объект наблюдения – i -й носитель МБРЛС, выполняющий функцию приёмника» на такте k ;

$e_{\text{перед}}^T(k), e_i(k)$ – единичные векторы направлений, определённые выражением (6).

Тогда задача траекторного управления движением группы носителей МБРЛС формулируется как задача нахождения последовательностей ускорений $a_i(k)$, минимизирующих функционал оценочной неопределённости с учётом затрат на манёвр:

$$\min_{\{a_i(k)\}} \left[\sum_{k=0}^K \text{tr}(WP(k)) + \gamma \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{i=1}^N \|a_i(k)\|^2 \right], \quad (10)$$

где $\text{tr}(\cdot)$ – след матрицы: то есть сумма всех элементов, расположенных на ее главной диагонали (от верхнего левого к нижнему правому углу);

W – диагональная матрица нормировки по допустимым дисперсиям компонент вектора состояния объекта наблюдения;

$P(k)$ – матрица нижней границы ковариации ошибки оценивания вектора состояния объекта наблюдения на такте k ;

γ – весовой коэффициент при слагаемом, ограничивающем интенсивность манёвра;

$\|a_i(k)\|^2$ – квадрат нормы вектора ускорения i -го носителя МБРЛС на такте k , $\text{м}^2/\text{с}^4$.

Минимизация функционала (10) выполняется при ограничениях (1)-(3) на движение группы носителей МБРЛС и при ограничениях на качество потока РЛК по бистатистическому углу, разрешению по дальности и перекрытию кадров.

Для пояснения математической постановки задачи на рисунке 2 представлена схема с введёнными основными величинами, показаны носитель-передатчик, носитель-приёмник и объект наблюдения, а также основные величины, введённые в модели: радиус-векторы положений, векторы скоростей, единичные векторы направлений на объект, бистатистический угол и дистанция между носителями. Рисунок поясняет обозначения и соотношения, используемые в кинематической и измерительной моделях.

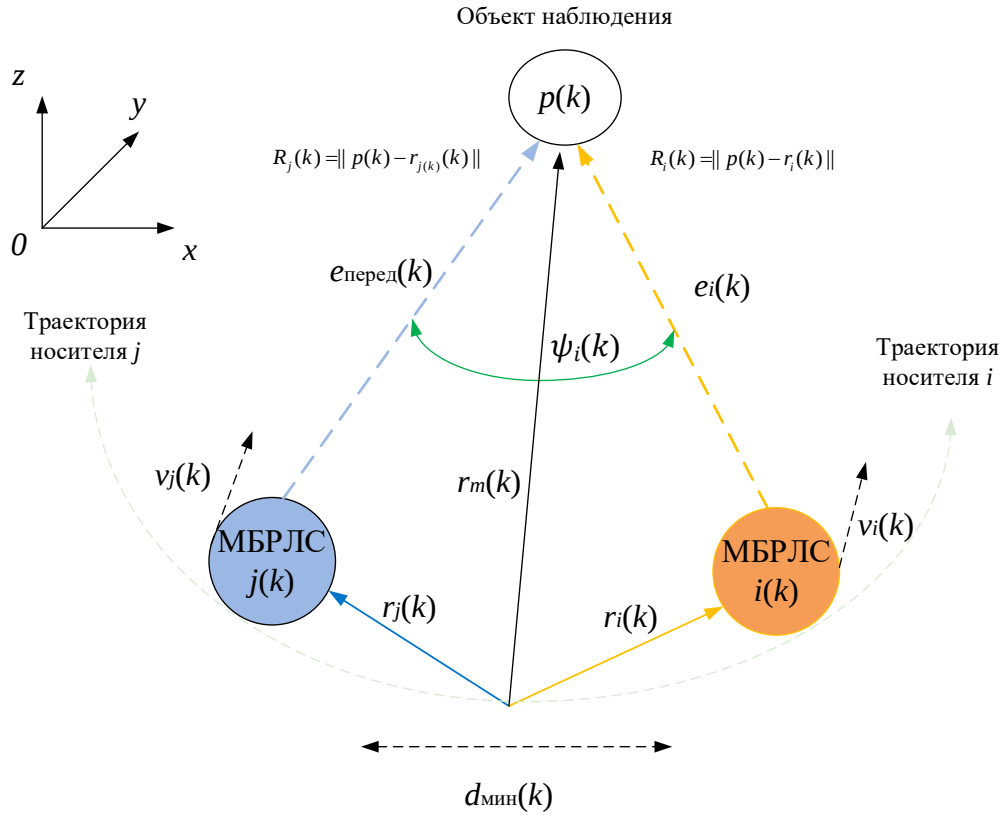


Рисунок 2 – Схема расположения носителей и объекта наблюдения, используемая в математической постановке задачи траекторного управления движением группы носителей МБРЛС

Для завершения постановки задачи зададим ограничения на качество потока РЛК. Геометрия наблюдения на такте k характеризуется бистатическим углом $\psi_i(k)$, определённым выражением (9). Требование к геометрии наблюдения задаётся двусторонним ограничением:

$$\psi_{\min} \leq \psi_i(k) \leq \psi_{\max}, \quad (11)$$

где $\psi_{\min}$ – минимально допустимое значение бистатического угла, рад;

$\psi_{\max}$ – максимально допустимое значение бистатического угла, рад;

Требование к разрешению по дальности задаётся через расчётный показатель $\delta R_i(k)$ для i -го носителя-приёмника на такте k . В постановке задачи используется наихудшее значение по всем приёмным позициям (12):

$$\delta R(k) = \max_{i \in I_{\text{пр}}(k)} \delta R_i(k). \quad (12)$$

Тогда ограничение на разрешение по дальности имеет вид (13):

$$\delta R(k) \leq \delta R_{\text{тр}}. \quad (13)$$

В выражениях (12)-(13) $\delta R_i(k)$ – расчётный показатель разрешения по дальности для i -го носителя МБРЛС, выполняющего функцию приёмника, на такте k , м;

$\delta R(k)$ – наихудшее (максимальное) значение показателя разрешения по дальности по всем приёмным позициям на такте k , м;

$\delta R_{\text{тр}}$ – требуемое (допустимое сверху) значение разрешения по дальности, м.

Ограничение (13) гарантирует сохранение требуемой детализации потока РЛК на всём интервале синтезируемого движения.

Требование к перекрытию радиолокационных кадров задаётся коэффициентом перекрытия для пары носителей-приёмников с индексами m и n (14):

$$\beta_{mn}(k) = \frac{S_{mn}^{(nep)}(k)}{\min \{S_m(k), S_n(k)\}}, \quad (14)$$

$$m, n \in I_{\text{пр}}(k), m \neq n,$$

где $\beta_{mn}(k)$ – коэффициент перекрытия радиолокационных кадров для пары носителей МБРЛС с индексами m и n , на такте k , безразмерная величина;

$S_m(k), S_n(k)$ площади участков земной поверхности, отображаемых в радиолокационных кадрах, м²;

$S_{mn}^{(nep)}(k)$ – площадь пересечения указанных участков земной поверхности, м².

При таком определении величина $\beta_{mn}(k)$ принимает значения в диапазоне от 0 до 1 по ограничению (15):

$$\beta_{mn}(k) \geq \beta_{\min}, \quad (15)$$

$$m, n \in I_{\text{пр}}(k), m \neq n,$$

где $\beta_{\min}$ – минимально допустимое значение коэффициента перекрытия радиолокационных кадров, безразмерная величина.

С учётом ограничений (11)-(15) минимизация функционала (10) выполняется при ограничениях на движение группы носителей МБРЛС (1)-(3) и при ограничениях на качество потока РЛК. Тем самым задача траекторного управления движением группы носителей МБРЛС сводится к задаче условной

оптимизации, в которой одновременно учитываются требования к точности оценивания параметров объекта наблюдения и к качеству потока РЛК.

На рисунке 3 показана последовательность вычислительных процедур, используемых при синтезе траекторного управления движением группы носителей МБРЛС.

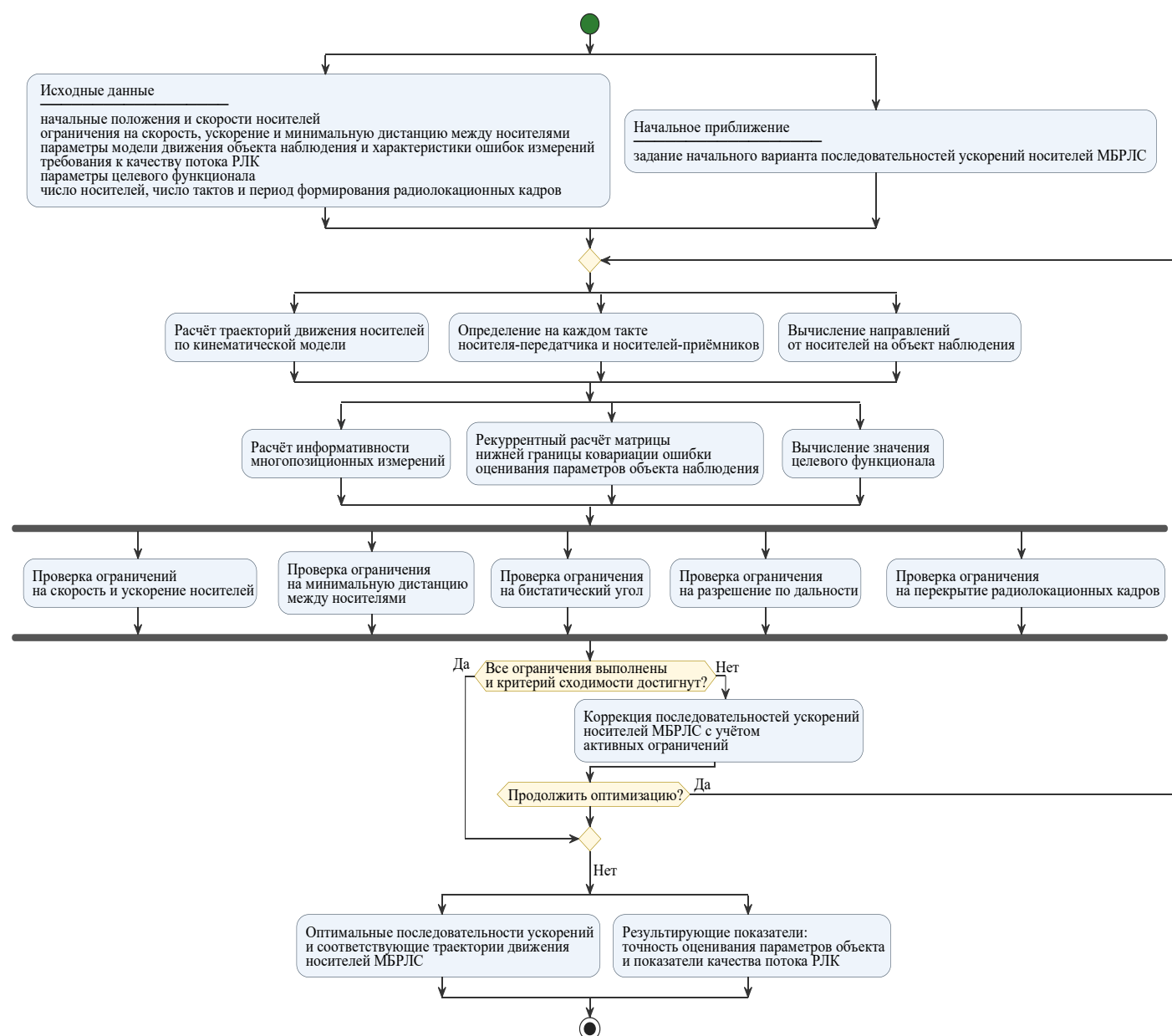


Рисунок 3 – Блок-схема метода синтеза траекторного управления движением группы носителей МБРЛС

Схема отражает переход от задания исходных данных и начального приближения по управляющим параметрам к расчёту траекторий, оценке информативности многопозиционных измерений и показателей качества потока РЛК, проверке ограничений и последующей коррекции управляющих воздействий в оптимизационном цикле.

Моделирование и анализ результатов

Численная валидация предложенного метода синтеза траекторного управления движением группы носителей МБРЛС выполнена в имитационной модели многопозиционного радиолокационного наблюдения при формировании потока радиолокационных кадров в схеме «один передатчик – несколько приёмников». Моделирование проводилось на дискретной временной сетке с периодом такта формирования РЛК $T_k = 1$ с на интервале длительностью $T = 50$ с (число тактов $K = 50$).

На каждом такте по текущей геометрии взаимного расположения носителей и объекта наблюдения рассчитывались бистатические углы в каналах «передатчик-объект наблюдения-приёмник», наихудший по приёмным позициям показатель разрешения по дальности и матрица нижней границы ковариации ошибки оценивания $P(k)$. Выполнение ограничений на качество потока РЛК оценивалось по доле тактов, на которых одновременно выполнялись указанные требования.

Сравнение проведено для двух стратегий траекторного управления движением носителей МБРЛС: базовой, при которой носители направляются непосредственно на объект наблюдения, и предложенной, при которой траектории формируются с учётом требований к геометрии многопозиционного наблюдения, реализуемости движения и качеству потока РЛК. Исходные данные численного эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные, принятые в имитационной модели

Параметр	Значение
Число носителей МБРЛС в группе	3
Период такта формирования радиолокационного кадра	1 с
Число тактов на интервале моделирования	50
Длительность интервала моделирования	50 с
Максимально допустимая скорость носителя	300 м/с
Максимально допустимое ускорение носителя	30 м/с ²
Минимально допустимая дистанция взаимного сближения	150 м
Допустимый диапазон бистатического угла	30°-150°
Требуемое разрешение по дальности	≤ 60 м
Полоса (для расчёта разрешения по дальности)	10 МГц
Априорная неопределённость координат объекта наблюдения (по диагонали)	1000 м
Априорная неопределённость скоростей объекта наблюдения (по диагонали)	50 м/с

В численном эксперименте рассмотрены три сценария, различающиеся начальным положением объекта наблюдения относительно группы носителей МБРЛС при фиксированных начальных условиях движения носителей. В сценарии 1 реализована базовая геометрия наблюдения, в сценарии 2 – увеличенное продольное смещение объекта, в сценарии 3 – увеличенное поперечное смещение объекта.

На рисунке 4 приведены траектории движения носителей МБРЛС в горизонтальной плоскости и распределения бистатических углов для трёх рассматриваемых сценариев.

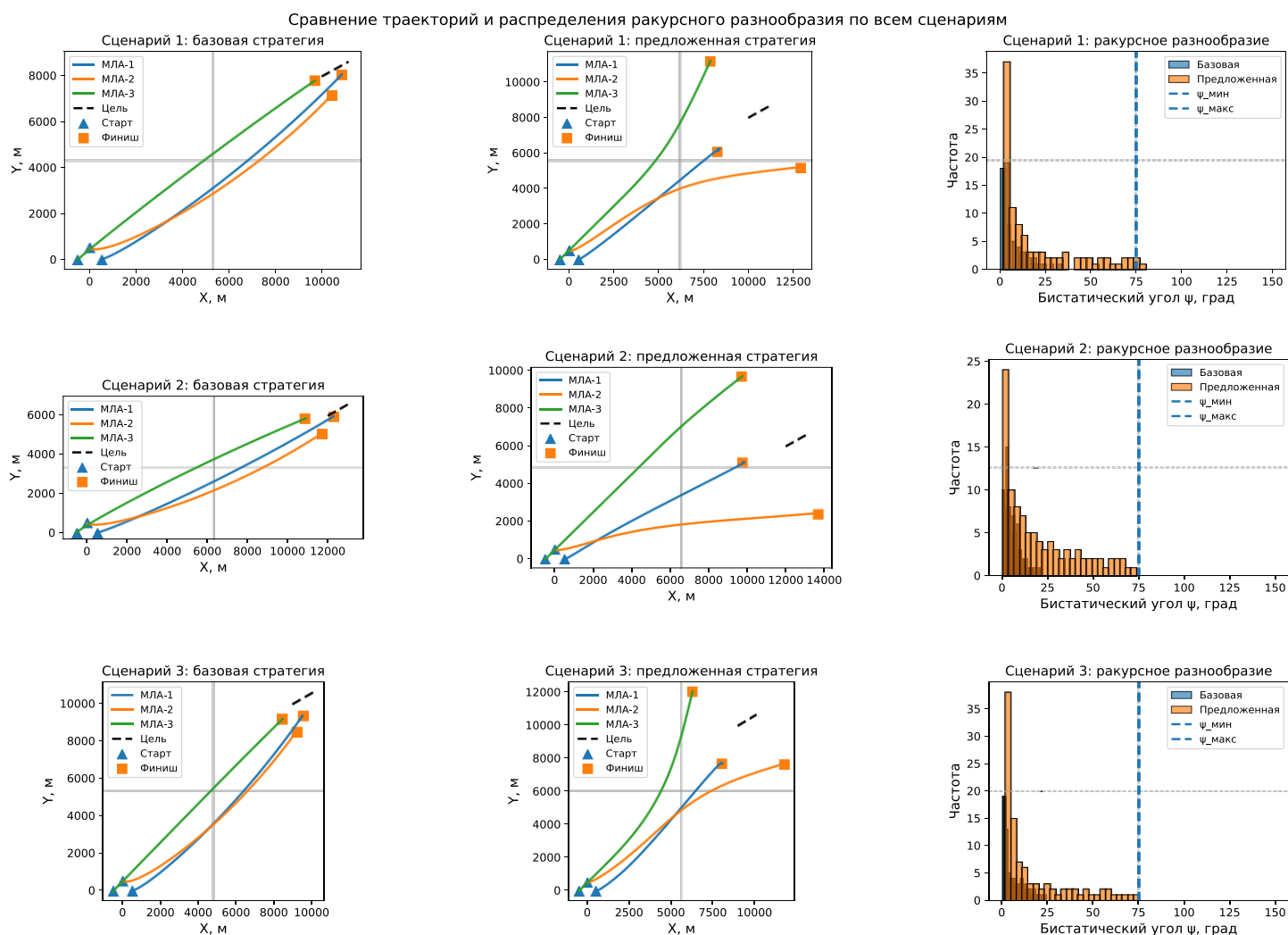


Рисунок 4 – Траектории движения группы носителей МБРЛС и распределение бистатических углов для базовой стратегии и предложенного метода в трёх сценариях

Предложенная стратегия обеспечивает увеличение доли значений бистатического угла, попадающих в допустимый диапазон. Доля тактов, удовлетворяющих ограничению на бистатический угол, составляет 22%, 28% и

16% для сценариев 1–3 соответственно. Наиболее выраженный эффект наблюдается в сценариях 1 и 2.

На рисунке 5 приведено сравнение динамики следа нормированной матрицы нижней границы ковариации ошибки оценивания для базовой и предложенной стратегий в трёх сценариях.

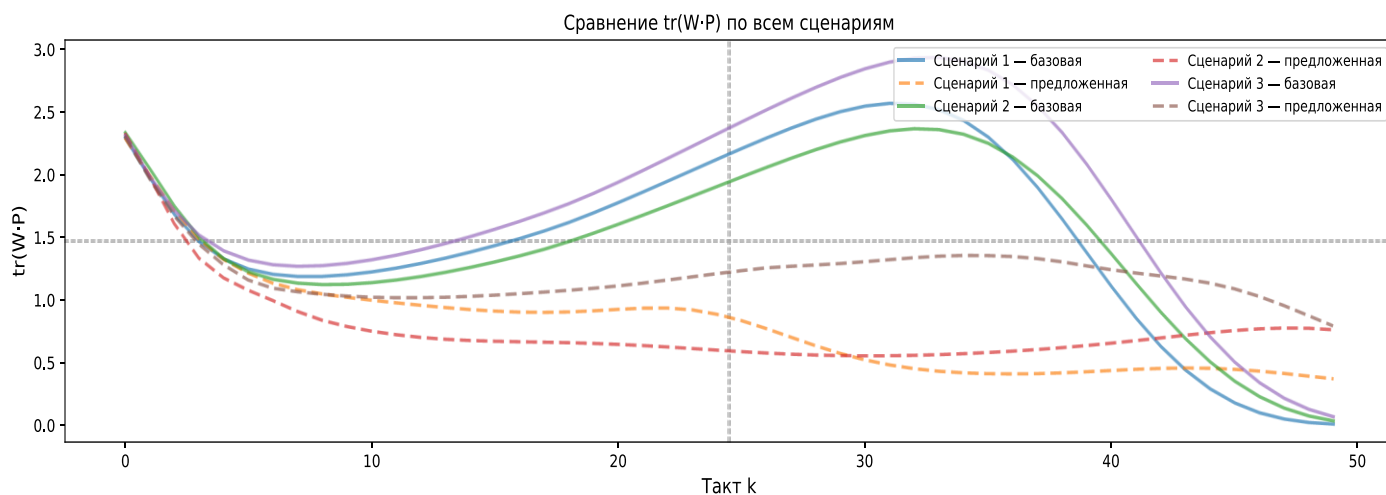


Рисунок 5 – Динамика следа нормированной матрицы нижней границы ковариации ошибки оценивания $tr(WP(k))$ по тактам моделирования для базовой стратегии и предложенного метода в трёх сценариях

Из рисунка следует, что предложенный метод обеспечивает снижение среднего за интервал моделирования значения показателя оценочной неопределённости на 46,7 % в сценарии 1, на 46,9 % в сценарии 2 и на 31,8 % в сценарии 3.

Заключение

Авторами статьи разработан метод синтеза траекторного управления движением группы носителей малогабаритных бортовых радиолокационных станций при формировании потока радиолокационных кадров в многопозиционном режиме наблюдения. В отличие от базовой стратегии траекторного управления носителей с наблюдением наземного объекта, предложенный подход учитывает не только ограничения на движение группы, но и требования к качеству формируемого потока РЛК, задаваемые через бистатистический угол, разрешение по дальности и перекрытие кадров. Оценка информативности многопозиционных измерений выполняется на основе матрицы нижней границы ковариации ошибки оценивания параметров объекта наблюдения.

Численная валидация в трёх сценариях начального положения объекта наблюдения показала, что предложенный метод обеспечивает более благоприятную геометрию наблюдения по сравнению с базовой стратегией. Это проявляется в расширении диапазона реализуемых бистатических углов и увеличении доли тактов, на которых выполняется ограничение на бистатический угол, до 22 %, 28 % и 16 % соответственно. При этом среднее за интервал моделирования значение показателя оценочной неопределённости параметров объекта наблюдения уменьшается на 46,7 %, 46,9 % и 31,8 % по трём рассмотренным сценариям.

Полученные результаты показывают, что траектория движения группы носителей МБРЛС может рассматриваться как инструмент, позволяющий влиять как на точность оценивания параметров объекта наблюдения, так и качество потока РЛК. Предложенный метод может быть использован при разработке алгоритмов группового управления носителями МБРЛС и при планировании пространственной конфигурации многопозиционного радиолокационного наблюдения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Солёный С. В., Ненашев В. А., Кузьменко В. П. Метод объединения радиолокационных видеокадров с виртуальной моделью местности в группе малогабаритных бортовых РЛС // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2025. – № 10. – С. 128–134.
2. Солёный С. В., Ненашев В. А., Кузьменко В. П. Модель оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных внешних воздействий в светодиодном канале связи малой бортовой РЛС // Труды МАИ. – 2025. – № 145. – С. 1–34.

3. Солёный С. В., Ненашев В. А., Кузьменко В. П. Авиационный контроль земной поверхности на основе формирования видеокадров и методов группового технического зрения: монография. – СПб.: ГУАП, 2025. – 186 с. – ISBN 978-5-8088-2062-3.
4. Гончаренко Я. В. Осуществление навигации беспилотных воздушных судов в зоне действия наземных радиотехнических систем // Труды МАИ. – 2025. – № 142.
5. Xiong K., Cui G., Liao M., Gan L., Kong L. Transmit-Receive Assignment and Path Planning of Multistatic Radar-Enabled UAVs for Target Tracking in Stand-Forward Jamming // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – DOI: 10.1109/TAES.2024.3394794.
6. Tun Y. K., Ei N. N., Hassan S. S., Stefanovic C., Huynh N. V., Alsenwi M., Hong C. S. Joint Beamforming and Trajectory Optimization for Multi-UAV-Assisted Integrated Sensing and Communication Systems // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2503.16915. – DOI: 10.48550/arXiv.2503.16915.
7. Jiao H., Yan J., Pu W., Chen Y. Joint transmission resource allocation and path planning scheme for airborne radar cooperation in non-ideal detection environments // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2025. – Vol. PP, No. 99. – P. 1–11. – DOI: 10.1109/TAES.2025.3604396.
8. Ахмедов Э. М. Вопросы оптимизации расположения центра приема и управления разведывательными БПЛА с учетом отражений сигнала от городских застроек // Труды МАИ. – 2025. – № 142.
9. Глушков А. Н., Коратаев П. Д., Частухин К. Р., Толстых М. Ю. Способ демодуляции биортогональных сигналов с двоичной фазовой
10. Фетисов С. Е. Повышение точности моноимпульсной пеленгации в многолучевых антенных решётках // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2022. – № 4 (43). – С. 18–24.
11. Dhulashia D., Ritchie M. A. Multistatic radar distribution geometry effects on parameter estimation accuracy // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2023. – Vol. 17, No. 1. – P. 1–16. – DOI: 10.1049/rsn2.12529.

12. Вербa В. С., Меркулов В. И., Харьков В. П. Подходы к оптимизации методов наведения на высокоскоростные интенсивно маневрирующие цели. Часть 2. Анализ возможностей различных способов оптимизации // Автоматика и телемеханика. – 2025. – № 1. – С. 44–62. – DOI: 10.31857/S0005231025010033.
13. Bouzid A., Sierra-Sosa D., Elmaghraby A. A Robust Pedestrian Re-Identification and Out-Of-Distribution Detection Framework // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 6. – Art. 352. – DOI: 10.3390/drones7060352.
14. Tan L., Zhao H. A multi-UAV rapid post-disaster search and rescue method based on deep reinforcement learning // Complex Intelligent Systems. – 2026. – Vol. 12. – Art. 41. – DOI: 10.1007/s40747-025-02166-3.
15. Cao J., Wang Y., Li K., Zhu Y., Sun Q. Multi-UAV adaptive cooperative coverage search method based on area dynamic sensing // Journal of Computational Design and Engineering. 2025. Vol. 12, No. 4. P. 77–93.
16. Phadke A., Medrano F. A. Increasing Operational Resiliency of UAV Swarms: An Agent-Focused Search and Rescue Framework // Aerospace Research Communications. – 2024. – Vol. 1. – Art. 12420. – DOI: 10.3389/arc.2023.12420.
17. Karthik V., Priya M., Ramkumar M., Nagarajan S. K. Point-ConNet: Integrated Power Allocation and Target Assignment for Efficient Multi-Target Tracking in Distributed Radar Networks // International Journal of Communication Systems. – 2025. – Vol. 38, No. 5. – Art. e70030. – DOI: 10.1002/dac.70030.
18. Лежанкин Б. В., Ерохин В. В., Малисов Н. П. Управление траекторией полета беспилотного летательного аппарата при различной конфигурации источников навигационной информации // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2024. – № 1. – С. 113–127. – DOI: 10.51955/2312-1327_2024_1_113.
19. Тачков А. А., Козов А. В., Курочкин С. Ю., Яковлев Д. С., Бузлов Н. А. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 43–54.
20. Кадочников А. П., Тамасян Г. Ш., Пророк В. Я., Петрич Д. О. Метод обнаружения группы объектов на основе решения экстремальной задачи

определения траектории // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2024. – № 32. – С. 150–158.

21. Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Зайцев Е. А., Култаев Д. Р., Белявцев М. В., Силин И. П. Разработка алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов самолетного типа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 179–188. – DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-179-188.

References

1. Solyonyj, S. V.; Nenashev, V. A.; Kuzmenko, V. P. (2025). Metod ob"edineniya radiolokatsionnykh videokadrov s virtual'noy model'yu mestnosti v gruppe malogabaritnykh bortovykh RLS [Method of Radar Video Frame Fusion with a Virtual Terrain Model in a Group of Small Airborne Radars]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, No. 10, pp. 128–134. [in Russian].

2. Solyonyj, S. V.; Nenashev, V. A.; Kuzmenko, V. P. (2025). Model' operativnogo obnaruzheniya i kompensatsii prednamerennykh vneshnikh vozdeystviy v svetodiodnom kanale svyazi maloy bortovoy RLS [Model of Operational Detection and Compensation of Intentional External Impacts in the LED Communication Channel of a Small Airborne Radar]. *Trudy MAI*, No. 145, pp. 1–34. [in Russian].

3. Solyonyj, S. V.; Nenashev, V. A.; Kuzmenko, V. P. (2025). Aviatsionnyy kontrol' zemnoy poverkhnosti na osnove formirovaniya videokadrov i metodov gruppovogo tekhnicheskogo zreniya: monografiya [Aviation Control of the Earth's Surface Based on Frame Formation and Group Technical Vision Methods: Monograph]. Saint Petersburg: GUAP, 186 p. ISBN 978-5-8088-2062-3. [in Russian].

4. Goncharenko, Ya. V. (2025). Osushchestvlenie navigatsii bespilotnykh vozдушnykh sudov v zone deystviya nazemnykh radiotekhnicheskikh sistem [Navigation of Unmanned Aerial Vehicles within Ground-Based Radio Technical System Coverage Areas]. *Trudy MAI*, No. 142. [in Russian].

5. Xiong, K.; Cui, G.; Liao, M.; Gan, L.; Kong, L. (2024). Transmit-Receive Assignment and Path Planning of Multistatic Radar-Enabled UAVs for Target Tracking in

Stand-Forward Jamming. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. DOI: 10.1109/TAES.2024.3394794.

6. Tun, Y. K.; Ei, N. N.; Hassan, S. S.; Stefanovic, C.; Huynh, N. V.; Alsenwi, M.; Hong, C. S. (2025). Joint Beamforming and Trajectory Optimization for Multi-UAV-Assisted Integrated Sensing and Communication Systems. *arXiv preprint*, arXiv:2503.16915. DOI: 10.48550/arXiv.2503.16915.

7. Jiao, H.; Yan, J.; Pu, W.; Chen, Y. (2025). Joint Transmission Resource Allocation and Path Planning Scheme for Airborne Radar Cooperation in Non-Ideal Detection Environments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. PP, No. 99, pp. 1–11. DOI: 10.1109/TAES.2025.3604396.

8. Akhmedov, E. M. (2025). Voprosy optimizatsii raspolozheniya tsentra priema i upravleniya razvedyvatel'nyimi BPLA s uchetom otrazheniy signala ot gorodskikh zastroyek [Optimization of Location of the UAV Reconnaissance Control Center Considering Urban Signal Reflections]. *Trudy MAI*, No. 142. [in Russian].

9. Glushkov, A. N.; Korataev, P. D.; Chastukhin, K. R.; Tolstykh, M. Yu. (2025). Sposob demodulyatsii biortogonal'nykh signalov s dvoichnoy fazovoy manipulyatsiey [Method of Demodulation of Bi-Orthogonal Signals with Binary Phase Shift Keying]. *Trudy MAI*, No. 142. [in Russian].

10. Fetisov, S. E. (2022). Povyshenie tochnosti monoimpul'snoy pelengatsii v mnogoluchevykh antennykh reshetkakh [Improving Monopulse Direction-Finding Accuracy in Multibeam Antenna Arrays]. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz-Antey"*, No. 4(43), pp. 18–24. [in Russian].

11. Dhulashia, D.; Ritchie, M. A. (2023). Multistatic Radar Distribution Geometry Effects on Parameter Estimation Accuracy. *IET Radar, Sonar &*

12. Verba, V. S.; Merkulov, V. I.; Kharkov, V. P. (2025). Podkhody k optimizatsii metodov navedeniya na vysokoskorostnye intensivno manevriruyushchie tseli. Chast' 2. Analiz vozmozhnostey razlichnykh sposobov optimizatsii [Approaches to Optimization of Guidance Methods for High-Speed Maneuvering Targets. Part 2]. *Avtomatika i Telemekhanika*, No. 1, pp. 44–62. DOI: 10.31857/S0005231025010033. [in Russian].

13. Bouzid, A.; Sierra-Sosa, D.; Elmaghraby, A. (2023). A Robust Pedestrian Re-Identification and Out-Of-Distribution Detection Framework. *Drones*, Vol. 7, No. 6, Article 352. DOI: 10.3390/drones7060352.
14. Sujecki, P.; Frąszczak, D. Artificial Intelligence-Based Decision Support System for UAV Control in a Simulated Environment. *Sensors* **2026**, *26*, 2436. <https://doi.org/10.3390/s26082436>.
15. Cao, J.; Wang, Y.; Li, K.; Zhu, Y.; Sun, Q. (2025). Multi-UAV Adaptive Cooperative Coverage Search Method Based on Area Dynamic Sensing. *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 77–93. DOI
16. Arshid, K.; Krayani, A.; Marcenaro, L.; Gomez, D.M.; Regazzoni, C. Toward Autonomous UAV Swarm Navigation: A Review of Trajectory Design Paradigms. *Sensors* **2025**, *25*, 5877. <https://doi.org/10.3390/s25185877>.
17. Karthik, V.; Priya, M.; Ramkumar, M.; Nagarajan, S. K. (2025). Point-ConNet: Integrated Power Allocation and Target Assignment for Efficient Multi-Target Tracking in Distributed Radar Networks. *International Journal of Communication Systems*, Vol. 38, No. 5, Article e70030. DOI: 10.1002/dac.70030.
18. Lezhankin, B. V.; Erokhin, V. V.; Malisov, N. P. (2024). Upravlenie traektoriyey poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri razlichnoy konfiguratsii istochnikov navigatsionnoy informatsii [UAV Trajectory Control under Different Navigation Information Source Configurations]. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk*, No. 1, pp. 113–127. DOI: 10.51955/2312-1327_2024_1_113. [in Russian].
19. Tachkov, A. A.; Kozov, A. V.; Kurochkin, S. Yu.; Yakovlev, D. S.; Buzlov, N. A. (2022). Realizatsiya traektornogo regul'yatora nazemnogo robototekhnicheskogo kompleksa na osnove model'nogo prognoziruyushchego upravleniya [Implementation of a Trajectory Controller Based on Model Predictive Control]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, Vol. 10, No. 1, pp. 43–54. DOI: 10.31776/RTCJ.10105. [in Russian].
20. Kadochnikov, A. P.; Tamasyan, G. Sh.; Prorok, V. Ya.; Petrich, D. O. (2024). Metod obnaruzheniya gruppy ob"ektov na osnove resheniya ekstremal'noy zadachi opredeleniya traektorii [Method for Detecting a Group of Objects Based on Extremal

Trajectory Determination]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, No. 32, pp. 150–158. [in Russian].

21. Zaitseva, A. A.; Kilmakov, D. K.; Zaitsev, E. A.; Kultaev, D. R.; Belyavtsev, M. V.; Silin, I. P. (2023). Razrabotka algoritma upravleniya gruppoy bespilotnykh letatel'nykh apparatov samoletnogo tipa [Control Algorithm for a Group of Fixed-Wing UAVs]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, Vol. 19, No. 3, pp. 179–188. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-179-188. [in Russian].

Информация об авторах

Вадим Александрович Ненашев, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры №23 конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заведующий лабораторией машинного обучения Инженерной школы, ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 6728-6108; AuthorID: 745612; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5285-2051>; ScopusID: 57188553603; e-mail: nenashev.va@yandex.ru

Владимир Павлович Кузьменко, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры №32 электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского Государственного университета аэрокосмического приборостроения, заведующий Лабораторий электроэнергетики Инженерной школы, ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 3159-4202; AuthorID: 1111872; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0270-4875>; ScopusID: 57215003337.

Павел Николаевич Хатунцев, Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь, Россия.

Никита Константинович Третьяков, аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 2747-2242; AuthorID: 1303377; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4795-5181>; Scopus Author ID: 60010365500.

Information about the authors

Vadim A. Nenashev, Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department No. 23 of Design and Technologies of Electronic and Laser Equipment, Head of the Machine Learning Laboratory of the SUAI School of Engineering, SUAI, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 6728-6108; AuthorID: 745612; ScopusID: 57188553603; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5285-2051>; e-mail: nenashev.va@yandex.ru

Vladimir P. Kuzmenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department No. 32 of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Head of the Electrical Power Engineering Laboratory, SUAI Engineering School, SUAI, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 3159-4202; AuthorID: 1111872; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0270-4875>; ScopusID: 57215003337.

Pavel N. Khatuntsev, degree-seeking researcher at the Marshal Zhukov Military Academy of Aerospace Defense, Tver, Russia.

Nikita K. Tretiakov, postgraduate student of the Department of Automatic Control Systems of ETU, ETU, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 2747-2242; AuthorID: 1303377; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4795-5181>; ScopusID: 60010365500.

Получено 10 апреля 2026 ● Принято к публикации 09 июня 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 10 April 2026 ● Accepted 09 June 2026 ● Published 31 August 2026
