Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 8. С. 61–69
LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 8. P. 61–69

УДК 004.896; 621.396.1 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-8-61-69

Автоматизация размещения антенных систем на летательном аппарате на основе применения модифицированного алгоритма колонии пауков

Ш. Р. Арусланов, В. В. Исмагилов, Р. Р. Гайнутдинов✉

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ, Казань, Россия

✉ emc-kai@mail.ru

Аннотация. Представлена разработка биоинспирированного алгоритма оптимизации для размещения антенных систем на фюзеляже летательного аппарата с учетом критериев электромагнитной совместимости. В качестве критериев рассматриваются парные взаимодействия между радиопередатчиками и радиоприемниками, а также возможные интермодуляционные каналы приема, возникающие при одновременной работе нескольких радиоэлектронных средств и приводящие к ухудшению качества их функционирования. Предлагаемый для оптимизации размещения антенных систем модифицированный алгоритм колонии пауков обеспечивает поиск рациональных конфигураций размещения антенн на твердотельной модели летательного аппарата с учетом требований стандартов по электромагнитной совместимости и конструктивно-эксплуатационных ограничений.

Ключевые слова: летательный аппарат, антенные системы, электромагнитная совместимость, парные и интермодуляционные помехи, автоматизация размещения антенн, модифицированный алгоритм колонии пауков

Для цитирования: Арусланов Ш. Р., Исмагилов В. В., Гайнутдинов Р. Р. Автоматизация размещения антенных систем на летательном аппарате на основе применения модифицированного алгоритма колонии пауков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 8. С. 61–69. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-8-61-69.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Исследование проведено в рамках реализации Программы развития Передовой инженерной школы «Комплексная авиационная инженерия» (Соглашение № 075-15-2025-129).

Original article

Automation Antenna System Placement on an Aircraft Based on a Modified Spider Colony Algorithm

Sh. R. Aruslanov, V. V. Ismagilov, R. R. Gaynutdinov ✉

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia

✉ emc-kai@mail.ru

Abstract. This article presents the development of a bioinspired optimization algorithm for placing antenna systems on an aircraft fuselage, taking into account electromagnetic compatibility criteria. The criteria considered include pairwise interactions between radio transmitters and receivers, as well as potential intermodulation channels that arise during the simultaneous operation of several electronic devices and lead to deterioration in their performance. The proposed modified spider colony algorithm for optimizing antenna system placement enables the search for rational antenna placement configurations on a solid-state aircraft model, taking into account electromagnetic compatibility standards and design and operational limitations.

Keywords: aircraft, antenna systems, electromagnetic compatibility, paired and intermodulation interference, antenna placement automation, modified spider colony algorithm

© Арусланов Ш. Р., Исмагилов В. В., Гайнутдинов Р. Р., 2026

For citation: Aruslanov Sh. R., Ismagilov V. V., Gaynutdinov R. R. Automation Antenna System Placement on an Aircraft Based on a Modified Spider Colony Algorithm // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 8. P. 61–69. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-8-61-69.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

Financing: The research was conducted as part of the Advanced Engineering School Development Program «Complex Aviation Engineering» (Agreement No. 075-15-2025-129).

Актуальность исследования электромагнитной совместимости антенных систем летательного аппарата. В последние годы наблюдается значительное расширение функциональных возможностей летательных аппаратов (ЛА): увеличивается число радиоэлектронных систем, а значит, и количество требуемых для их работы антенных устройств. По мере усложнения и увеличения числа радиоэлектронного оборудования, вопрос электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) становится еще более актуальным: любое нарушение в работе устройств, входящих в состав летательного аппарата, может привести к сбоям в системах управления, связи и навигации, а также негативно сказаться на безопасности полета. При этом ЛА зачастую эксплуатируются в среде со сложной электромагнитной обстановкой, где внешние помехи (от наземных станций, других летательных аппаратов) накладываются на собственные излучения бортовых модулей. Если параметры ЭМС не учтены должным образом, возможны критические ошибки в работе основных модулей летательного аппарата [1], [2]. Одно из важных требований к летной годности ЛА – это отсутствие неблагоприятного воздействия оборудования при выполнении назначенных функций на выходные параметры, работу или точность любого оборудования, важного для безопасной эксплуатации. Поэтому обеспечение ЭМС – критически важная задача при насыщении ЛА множеством радиосредств [3], [4]. В многочисленных исследованиях подчеркивается необходимость системного анализа и точного расчета ЭМС радиоэлектронных средств на этапах проектирования, чтобы обеспечить устойчивую и безопасную эксплуатацию современных ЛА [4], [5].

Цель исследований представляет разработка алгоритмического обеспечения, позволяющего подобрать рациональное размещение антенн на фюзеляже ЛА, для обеспечения совместного функционирования радиоэлектронных средств [6]. В рамках этой цели предполагается проанализировать электромагнитную обстановку на борту, сформировать двукритериальную математическую постановку задачи с системой целевых функций и ограничений, описывающих уровень помех и геометрические особенности объекта, а также адаптировать и реализовать биоинспирированный алгоритм для поиска конфигураций размещения антенн, удовлетворяющих требованиям ЭМС и геометрии фюзеляжа.

Критерии задачи размещения антенных систем на летательном аппарате. Согласно аналитической модели, полагается, что каждая антенна служит источником или рецептором помехи (в самом общем случае антенна может выполнять обе функции в разных частотных диапазонах). Параметры антенн – такие, как коэффициент усиления и диаграмма направленности, а также геометрические размеры фюзеляжа ЛА, считаются заданными. Пусть существуют r антенных систем, воспринимающих помеху (рецепторы), и s антенных систем, генерирующих помеху (источники). Положение любой антенны описывается вектором координат x на поверхности фюзеляжа.

Для выполнения критерия ЭМС необходимо, чтобы мощность помехи $P_{\text{ИП}_i}^{ij}$, поступающей от j-го источника на i-й рецептор по основному каналу, не превышала допустимого значения $P_{\text{РП}_i\,\text{доп}}$, также и мощность помехи интермодуляционного продукта $P_{\text{ИМ}}$ не должна превышать допустимой интермодуляционной помехи $P_{\text{РП}_i\,\text{ИМ доп}}$.

$$P_{\text{РП}_i\,\text{доп}} > P_{\text{ИП}_i}^{ij} = P_{\text{ИП}} + L_{\text{ИП}} + L_{\text{РП}} + L_{\text{ср}},$$

$$P_{\text{РП}_i\,\text{ИМ доп}} > P_{\text{ИМ}} = k_1 P_{\text{ИП}_1} + k_2 P_{\text{ИП}_2} - k_{\text{ИМ}},$$

$$P_{\text{РП}_i\,\text{ИМ доп}} > P_{\text{ИМ}} = k_1 P_{\text{ИП}_1} + k_2 P_{\text{ИП}_2} + k_3 P_{\text{ИП}_3} - k_{\text{ИМ}},$$

где $P_{\text{ИП}}$ – мощность источника помехи; $L_{\text{ИП}}$ – ослабление помехи источником; $L_{\text{РП}}$ – ослабление помехи рецептором; $L_{\text{ср}}$ – ослабление помехи средой распространения; k_1, k_2, k_3 – целые числа,

каждое из которых может принимать значения от 1 до 6, $i = \overline{1...r}, j = \overline{1...s}$ [6].

Формальная постановка задачи размещения антенных систем будет сформулирована следующим образом. Минимизация разницы между мощностью помехи по основному каналу и допустимой мощностью помехи однозначно приводит к ослаблению прямого электромагнитного воздействия между любой парой «источник–рецептор». Тем самым выполняются локальные требования ЭМС для каждого конкретного сочетания антенн. Исходя из этого, понимаем, что целевая функция критерия парной электромагнитной совместимости будет иметь следующий вид:

$$F_1 = \max\left[L_{\text{ср}}^{ij} - \left(P_{\text{РП}_i \text{ доп}} - P_{\text{ИП}_j} - \right.\right.$$
$$\left.\left. - L_{\text{ИП}_j} - L_{\text{РП}_i} \right)\right] \to \min.$$

Однако даже при полном соблюдении парной совместимости возможны вторичные проявления помех, обусловленные нелинейностью трактов передатчиков. Эти явления не фиксируются в рамках критерия парной электромагнитной совместимости, поскольку они опосредованы и связаны с появлением интермодуляционных продуктов по суммарным и разностным частотам. Оценка ЭМС групп радиоэлектронных средств по интермодуляционному критерию сводится к оценке отклонения мощности помехи интермодуляционного продукта от допустимой мощности помехи $P_{\text{ИМ доп}}$. Приходим к выводу, что целевая функция критерия интермодуляционной устойчивости антенн рецепторов будет иметь следующий вид:

$$F_2 = \max\left(P_{\text{ИМ доп}} - P_{\text{ИМ}} \right) \to \min.$$

Для учета нескольких критериев будем применять линейную свертку с использованием весовых коэффициентов

$$F = \varepsilon F_1 + \theta F_2 \to \min,$$

где ε, θ – весовые коэффициенты.

Разработка алгоритма размещения антенных систем с учетом критерия ЭМС. Модифицированный алгоритм колонии пауков (МАКП) – это метаэвристический алгоритм, вдохновленный социальным поведением пауков и их коммуникацией [7], [8]. Каждая особь соответствует вектору параметров, совокупность которых и есть потенциальное решение задачи [9], [10]. Коммуникация между особями зависит от качества решения («веса», значения целевой функции) и расстояния, что балансирует локальную ориентацию на соседние решения и глобальный поиск. Динамика полов различается: самки стохастически притягиваются к ближайшему более «тяжелому» пауку и глобальному лидеру или отталкиваются от него, а самцы чередуют движение к самкам и следование к взвешенному центру группы всех самцов. Размножение выполняется локально в радиусе взаимодействия с вероятностным отбором по весам, поддерживая разнообразие при фиксированном размере популяции. На практике МАКП применим к задачам размещения и обеспечивает устойчивый компромисс между исследованием пространства и эксплуатацией найденных решений при умеренном числе параметров.

Алгоритм имеет следующие шаги:

Шаг 1. Создание популяции пауков S размером N. Вся колония состоит из подмножеств самок $B = \{b_1, \ldots, b_{N_b}\}$ и самцов $M = \{m_1, \ldots, m_{N_m}\}$. Число самок вычисляется по формуле $N_b = (0.9 - 0.25\text{rand})N$, где rand – случайное число в диапазоне от 0 до 1. Число самцов, в свою очередь, равно $N_m = N - N_b$.

Шаг 2. Задание позиции каждого паука произвольным образом в n-мерном пространстве параметров задачи. Положение i-го паука задается вектором $\mathbf{q}_i = (q_{i_1}, q_{i_2}, \ldots, q_{i_n})$, задающим конфигурацию размещения антенных систем. Компонента q_{i_k} представляет k-й оптимизируемый параметр размещения (это координаты размещения каждой антенны и угол ее поворота), а n – общее число параметров вектора решения. Определяем диапазон взаимодействия между пауками по формуле $R_{\text{гер}} = \dfrac{\sum_{k=1}^{n}\left(q_{k\text{верх}} - q_{k\text{книж}} \right)}{2n}$, где $q_{k\text{верх}}$ и $q_{k\text{книж}}$ – это верхняя и нижняя границы каждого параметра.

Шаг 3. Размножение в радиусе $R_{\text{гер}}$ по методу рулетки $p_{S_i} = \dfrac{w_i}{\sum\limits_{k \in Tg} w_k}$, где p_{S_i} – вероятность i-го паука принять участие в процессе размножения; T^g – множество пауков в радиусе; w_i – вес i-го паука; w_k – вес k-го паука. Веса пауков определяются значением целевой функции заданным пауком варианта решения.

Шаг 4. Обновление позиции самки b_i по формуле

$$b_i^{t+1} = \begin{cases} b_i^t + \alpha Vibc_i \left(m_c - b_i^t\right) + \\ + \beta Vibb_{i,\max w}\left(m_{\max} - b_i^t\right) + \\ + \delta\left(\text{rand} - \frac{1}{2}\right) \text{ с вероятностью } pF; \\ b_i^t - \alpha Vibc_{i,\,u}\left(m_c - b_i^t\right) - \\ - \beta Vibb_{i,\max w}\left(m_{\max} - b_i^t\right) + \\ + \delta\left(\text{rand} - \frac{1}{2}\right) \text{ с вероятностью } 1 - pF, \end{cases}$$

где t – номер текущей итерации; α, β – коэффициенты притяжения к соседней более тяжелой и глобально лучшей особям соответственно; δ – коэффициент случайного смещения; pF – вероятность смещения самки в сторону результирующей вибрации; $m_{\max}$ самец с наибольшим весом; $Vibc_{i,\,u}$ – модель улавливаемых от ближайшего более тяжелого паука «вибраций», распространяемых по паутине и вычисляемых по формуле $Vibc_i = w_c\,\mathrm{e}^{-d_{ci}^2}$, где w_c – вес ближайшего более тяжелого соседа i-й самки; $Vibb_{i,\max w}$ – вибрации, улавливаемые пауком от паука с максимальным весом в колонии, вычисляется по формуле $Vibb_{i,\max w} = w_{\max w}\,\mathrm{e}^{-d_{i,\max w}^2}$, где $w_{\max w}$ – вес самого тяжелого паука в колонии. Евклидово расстояние $d_{i,j}$ между пауками вычисляется по формуле $d_{i,j} = q_i - q_j$.

Шаг 5. Обновление позиции m_i самца по формуле

$$m_i^{t+1} = \begin{cases} m_i^t + \alpha Vibf_i\left(b_f - m_i^t\right) + \\ + \delta\left(\text{rand} - \frac{1}{2}\right),\ w_{N_{\text{ср}}} > w_i; \\ m_i^t + \alpha\left(\frac{\sum_h^{N_m} m_h^t w_h}{\sum_h^{N_m} w_h} - m_i^t\right),\ w_i > w_{N_{\text{ср}}}, \end{cases}$$

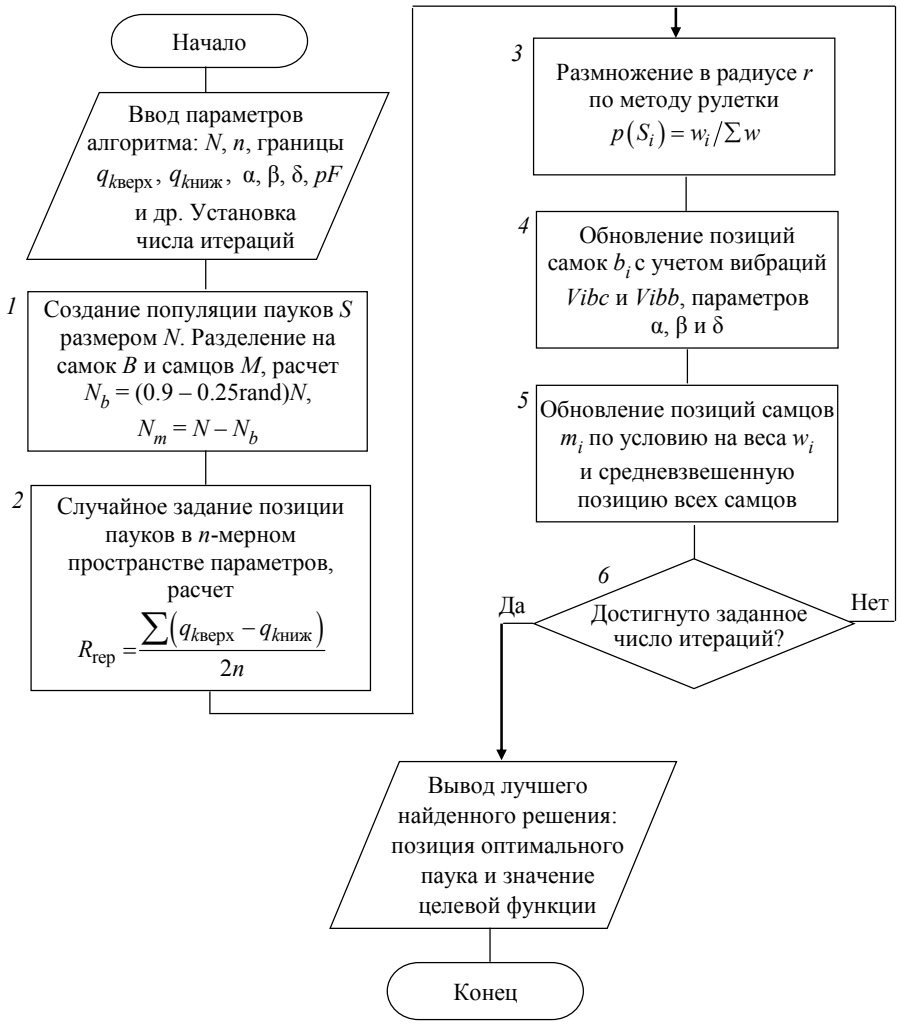


Рис. 1. Блок-схема алгоритма
Fig. 1. Flowchart of the algorithm

где $Vibf_i$ – это вибрация, улавливаемая от ближайшей самки; b_f – ближайшая к пауку самка; w_h – вес h-го самца из числа самцов N_m; $w_{N_{\text{ср}}}$ – усредненное значение веса самцов; $\frac{\sum_h^{N_m} m_h^t w_h}{\sum_h^{N_m} w_h}$ – средневзвешенная позиция самцов.

Шаг 6. Остановка алгоритма при достижении заданного числа итераций. Если заданное число итераций не достигнуто, то возврат к шагу 3.

Ход решения. Работа алгоритма будет наглядно продемонстрирована с помощью специально разработанной программы на языке C# с использованием интерфейса Windows Forms и открытым геометрическим ядром Open Cascade, позволяющим обрабатывать твердотельные модели.

Для каждой антенны дополнительно выполняется визуализация диаграммы направленности в рабочем диапазоне частот, что позволяет оценить взаимное перекрытие лепестков, потенциальные зоны сильного электромагнитного влияния и «теневые» области.

Численные значения основных настроечных параметров МАКП, использованных в проведенных вычислительных экспериментах, приведены в табл. 1. В таблице указаны размер популяции, коэффициенты, определяющие вклад вибрационных взаимодействий и случайных смещений в процесс обновления позиций особей, вероятность смещения самок к результирующей вибрации, а также весовые коэффициенты парного и интермодуляционного критериев при линейной свертке и заданное число итераций. Подбор указанных параметров обеспечивает необходимый баланс между глубиной исследования пространства решений и скоростью сходимости алгоритма, позволяя избежать преждевременного попадания в локальные минимумы и при этом сохранить приемлемое время расчета.

Табл. 1. Параметры работы алгоритма
Tab. 1. Algorithm operating parameters

Параметр	Значение	Примечание
N	20	Количество пауков в колонии
α	0.5	Коэффициент притяжения паука по вибрациям $Vibc_i$ и $Vibf_i$
β	0.5	Коэффициент притяжения паука по вибрации $Vibb_{i,\max w}$
δ	0.1	Коэффициент случайного смещения паука
pF	0.75	Вероятность смещения самки в сторону результирующей вибрации
ε	0.7	Весовой коэффициент критерия F_1 при линейной свертке
θ	0.3	Весовой коэффициент критерия F_2 при линейной свертке
τ	1000	Количество итераций

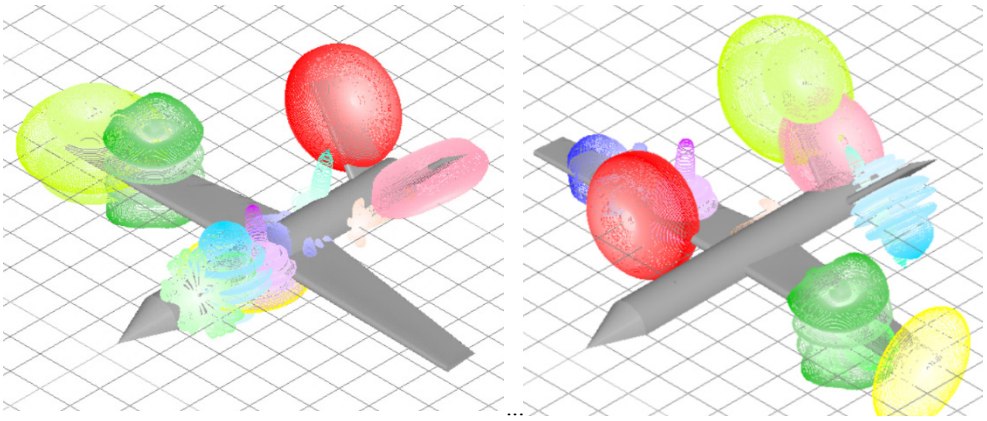
В результате работы МАКП формируется конфигурация размещения антенных систем, удовлетворяющая требованиям по электромагнитной совместимости и геометрическим ограничениям установки оборудования на фюзеляже ЛА. На каждом шаге алгоритм последовательно улучшает текущие решения, перераспределяя антенны таким образом, чтобы минимизировать значения парного и интермодуляционного критериев и соответственно уменьшить уровень взаимных помех.

В качестве примера применения алгоритма в работе рассматривается абстрактный ЛА длиной 9 м с размахом крыльев 13 м. Рассматривается твердотельная модель фюзеляжа обобщенной формы. Модель служит для воспроизведения типовых конструктивно-эксплуатационных ограничений. Поверхность фюзеляжа в расчете рассматривается как носитель точек крепления, в которых допускается размещение антенных устройств, расстояния и допустимость размещений определяются по геометрии твердотельной модели.

Рассматривается размещение антенных систем десяти тестовых РЭС. Для каждого РЭС задаются частотно-энергетические параметры, которые необходимы при вычислении парного и интермодуляционного критериев. Из общего числа РЭС три рассматриваются как приемные, две – как передающие и пять – как приемно-передающие, работающие в различных частотных диапазонах. Антенны настроены на конкретный частотный диапазон РЭС и имеют печатную форму.

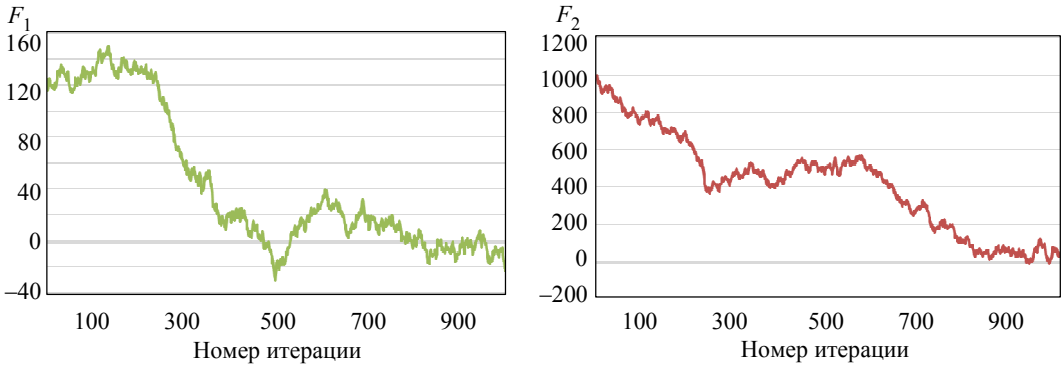
Стартовый и итоговый, соответствующий наилучшим найденным значениям целевых функций по завершении заданного числа итераций, варианты размещения антенных систем показаны на рис. 2.

Анализ динамики изменения целевых функций позволяет оценить ход работы алгоритма и характер его сходимости. На рис. 3 представлены зависимости парного и интермодуляционного критериев от номера итерации. По этим графикам можно проследить, как на начальном этапе наблюдается интенсивное уменьшение значений целевых функций за счет активного перераспределения позиций антенн, после чего скорость их изменения снижается и кривые выходят на квазистационарный уровень. Такой характер поведения свидетельствует о достижении устойчивого решения и стабилизации найденной конфигурации размещения антенных систем.



а *б*

Рис. 2. Варианты размещения: *а* – стартовый; *б* – финальный
Fig. 2. Layout variants: *а* – initial; *б* – final



а *б*

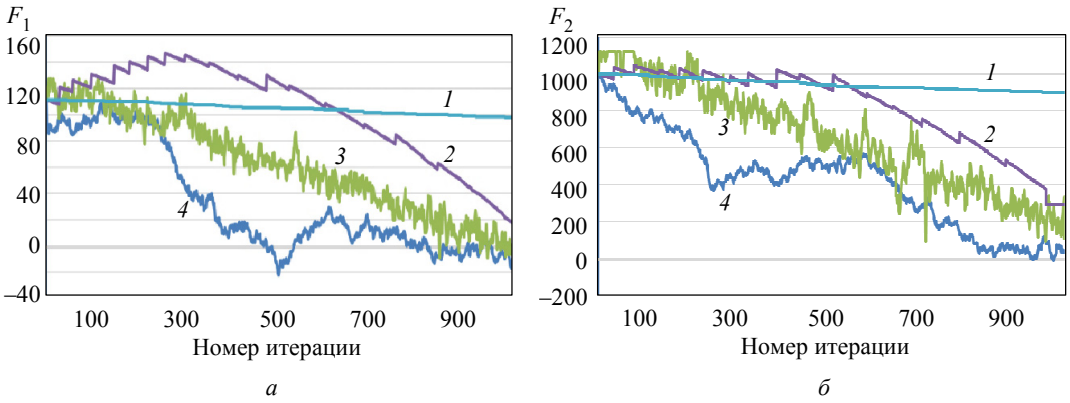
Рис. 3. Динамика изменений значений целевых функций: *а* – критерий F_1; *б* – критерий F_2
Fig. 3. Dynamics of changes in the values of target functions: *а* – criterion F_1; *б* – criterion F_2

Представленные на рис. 3 зависимости значений целевых функций от номера итерации показывают, что несмотря на выраженный стохастический характер изменения критериев, в целом наблюдается устойчивая тенденция к их снижению. Это свидетельствует о корректной работе разработанного алгоритма оптимизации и его способности последовательно улучшать решения в условиях многокритериальной постановки. Характер кривых (наличие локальных всплесков и нерегулярных колебаний) отражает поисковую природу МАКП, позволяющую избегать преждевременной сходимости к локальным экстремумам и обеспечивать нахождение конфигураций, удовлетворяющих требованиям ЭМС и геометрическим ограничениям размещения антенных систем.

В [11] был проведен сравнительный анализ различных алгоритмов оптимизации – жадного алгоритма, алгоритма имитации отжига и алгоритма стаи серых волков при решении задачи размещения антенных систем в единой постановке. В настоящем исследовании данный сравнительный анализ был расширен за счет включения модифицированного алгоритма колонии пауков. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что МАКП обеспечивает более эффективное снижение значений целевых функций по сравнению с ранее рассмотренными подходами и, соответственно, позволяет получать более качественные конфигурации размещения антенных систем с точки зрения критериев ЭМС. Для наглядного сопоставления результатов приведен график зависимостей значений целевых функций от номера шага для всех четырех алгоритмов, который позволяет проследить характер их сходимости и подтвердить преимущество МАКП (см. рис. 4).

Заключение. В данном исследовании были достигнуты следующие результаты:

1. Сформулирована формальная и математическая постановка задачи оптимизации размещения антенных систем на фюзеляже ЛА в виде двукритериальной задачи минимизации парного и интермодуляционного критериев при наличии геометрических и эксплуатационных ограничений.



а *б*

Алгоритмы оптимизации:
1 – переборный алгоритм; *2* – имитация отжига;
3 – алгоритм стаи серых волков; *4* – МАКП

Рис. 4. Динамика изменений значений целевых функций для различных алгоритмов оптимизации:
а – критерий F_1; *б* – критерий F_2

Fig. 4. Dynamics of changes in the values of target functions for different optimization algorithms:
а – criterion F_1; *б* – criterion F_2

2. Разработаны целевые функции и ограничения для задачи размещения антенных систем с учетом критериев ЭМС, включая линейную свертку частных критериев с весовыми коэффициентами, что позволяет учитывать вклад различных видов помех на этапе оптимизации.

3. Адаптирован и реализован модифицированный алгоритм колонии пауков для решения задачи размещения антенных систем на твердотельной модели ЛА; была разработана программная реализация алгоритма, с ее помощью получены конфигурации размещения антенн, удовлетворяющие заданным требованиям электромагнитной совместимости и геометрическим ограничениям.

Список литературы

1. Белоусов А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 134–196. doi: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196.

2. Гайнутдинов Р. Р., Чермошенцев С. Ф. Эмиссия электромагнитных помех от линий связи бортового оборудования беспилотного летательного аппарата // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 3. С. 221–227. doi: 10.31857/S0033849420020059.

3. Петровский В. И., Петровский В. В. Информационная безопасность и электромагнитная совместимость технических средств. Казань: Изд-во КГТУ им. А. Н. Туполева, 2005. 386 с.

4. Гайнутдинов Р. Р., Чермошенцев С. Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 155–160.

5. Гайнутдинов Р. Р., Чермошенцев С. Ф. Прогнозирование внутрисистемной электромагнитной совместимости беспилотных летательных аппаратов // Вест. КазГТУ им. А. Н. Туполева. 2014. № 4. С. 124–130.

6. Gaynutdinov R., Suzdaltsev I. Genetic algorithm for optimization placement of antennas on aircraft // Intern. Russ. Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681.

7. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider / E. Cuevas, M. Cienfuegos, D. Zaldívar, M. Pérez // Expert Syst. with Appl. 2013. Vol. 40, no. 16. P. 6374–6384. doi: 10.1016/j.eswa.2013.05.041.

8. Rodzin S., Rodzina L. Spider colony optimization algorithm: A bio-heuristic for global optimization problem // Lect. Notes in Networks and Syst. 2023. Vol. 722. P. 661–669. doi: 10.1007/978-3-031-35311-6_63.

9. Курейчик В. В., Родзин С. И. Метаэвристический оптимизатор на основе модели поведения колонии социальных пауков // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 6 (216). С. 12–20. doi: 10.14489/vkit.2022.06.pp.012-020.

10. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации / Л. А. Гладков, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. Чебоксары: Изд. дом «Среда», 2024. 228 с.

11. Арусланов Ш. Р. Сравнительный анализ метаэвристических алгоритмов при размещении антенных систем // Сб. докл. по мат. междунар. молодежной науч. конф. «XXVII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», посв. 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Казань: ИП Сагиев А. Р., 2025. С. 1933–1937. URL: https://lk.kai.ru/arhiv-konferencii/2025.pdf (дата обращения: 10.07.2026).

Информация об авторах

Арусланов Шамиль Ренатович – магистрант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия.
E-mail: aruslanov.rsln.530@gmail.ru

Исмагилов Владислав Вячеславович – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия.
E-mail: ivv_vlad@bk.ru

Гайнутдинов Рустам Рафкатович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия.
E-mail: emc-kai@mail.ru
https://orcid.org/0000–0002-6800-7124

References

1. Belousov A. O. Podhody k obespecheniju jelektromagnitnoj sovmestimosti radiojelektronnyh sredstv v sostave kompleksa funkcional'nogo porazhenija bespilotnyh letatel'nyh apparatov moshhnym jelektromagnitnym izlucheniem // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2023. № 3. S. 134–196. doi: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196. (In Russ.).

2. Gajnutdinov R. R., Chermoshencev S. F. Jemissija jelektromagnitnyh pomeh ot linij svjazi bortovogo oborudovanija bespilotnogo letatel'nogo apparata // Radiotehnika i jelektronika. 2020. T. 65, № 3. S. 221–227. doi: 10.31857/S0033849420020059. (In Russ.).

3. Petrovskij V. I., Petrovskij V. V. Informacionnaja bezopasnost' i jelektromagnitnaja sovmestimost' tehnicheskih sredstv. Kazan': Izd-vo KGTU im. A. N. Tupoleva, 2005. 386 s. (In Russ.).

4. Gajnutdinov R. R., Chermoshencev S. F. Metodologija obespechenija vnutrisistemnoj jelektromagnitnoj sovmestimosti bortovogo oborudovanija bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2016. № 4. S. 155–160. (In Russ.).

5. Gajnutdinov R. R., Chermoshencev S. F. Prognozirovanie vnutrisistemnoj jelektromagnitnoj sovmestimosti bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Vest. KazGTU im. A. N. Tupoleva. 2014. № 4. S. 124–130. (In Russ.).

6. Gaynutdinov R., Suzdaltsev I. Genetic algorithm for optimization placement of antennas on aircraft // Intern. Russ. Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681. (In Russ.).

7. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider / E. Cuevas, M. Cienfuegos, D. Zaldívar, M. Pérez // Expert Syst. with Appl. 2013. Vol. 40, no. 16. P. 6374–6384. doi: 10.1016/j.eswa.2013.05.041. (In Russ.).

8. Rodzin S., Rodzina L. Spider colony optimization algorithm: A bio-heuristic for global optimization problem // Lect. Notes in Networks and Syst. 2023. Vol. 722. P. 661–669. doi: 10.1007/978-3-031-35311-6_63.

9. Kurejchik V. V., Rodzin S. I. Metajevristicheskij optimizator na osnove modeli povedenija kolonii social'nyh paukov // Vestn. komp'juternyh i informacionnyh tehnologij. 2022. T. 19, № 6 (216). S. 12–20. doi: 10.14489/vkit.2022.06.pp.012-020. (In Russ.).

10. Intellektual'nye sistemy: modeli i metody metajevristicheskoj optimizacii / L. A. Gladkov, Ju. A. Kravchenko, V. V. Kurejchik, S. I. Rodzin. Cheboksary: Izd. dom «Sreda», 2024. 228 s. (In Russ.).

11. Aruslanov Sh. R. Sravnitel'nyj analiz metajevristicheskih algoritmov pri razmeshhenii antennyh sistem // Sb. dokl. po mat. mezhdunar. molodezhnoj nauch. konf. «XXVII Tupolevskie chtenija (shkola molodyh uchenyh)», posv. 80-letiju Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne. Kazan': IP Sagiev A. R., 2025. S. 1933–1937. URL: https://lk.kai.ru/arhiv-konferencii/2025.pdf (data obrashhenija: 10.07.2026). (In Russ.).

Information about the authors

Shamil R. Aruslanov – master's student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, 10 K. Marks St., Kazan, 420111, Russia.
E-mail: aruslanov.rsln.530@gmail.ru

Vladislav V. Ismagilov – postgraduate student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, 10 K. Marks St., Kazan, 420111, Russia.
E-mail: ivv_vlad@bk.ru

Rustam R. Gaynutdinov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Design Systems, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, 10 K. Marks St., Kazan, 420111, Russia.
E-mail: emc-kai@mail.ru
https://orcid.org/0000–0002-6800-7124

Статья поступила в редакцию 22.02.2026; принята к публикации после рецензирования 27.04.2026; опубликована онлайн 23.10.2026.

Submitted 22.02.2026; accepted 27.04.2026; published online 23.10.2026.