

УДК 621.391

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.57.6.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.57.6.005)

Размещение антенных систем радиоэлектронных средств в локальной группировке

В.В. Исмагилов, Р.Р. Гайнутдинов 

*Казанский национальный исследовательский технический университет (КНИТУ-КАИ)
им. А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация*

Резюме. Актуальность исследования обусловлена тем, что проблема обеспечения внутриобъектовой электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств является критически важной для проектирования перспективных технических средств, однако в настоящий момент не существует подхода для оптимального размещения антенных систем радиоэлектронных средств с учётом их электромагнитной совместимости при влиянии через антенные системы. В качестве основного метода решения задачи предложен генетический алгоритм. Он учитывает взаимное влияние антенных систем радиоэлектронных средств как ключевой критерий для оптимизации их пространственного расположения, обеспечивая поиск компромиссных решений в многопараметрическом пространстве. В результате был разработан алгоритм, позволяющий определять рациональные схемы размещения антенн. Основной вывод заключается в том, что учет взаимного влияния радиоэлектронных средств через их антенные системы может быть эффективно использован не только для анализа, но и для прямой оптимизации электромагнитной обстановки. Разработанный алгоритм может быть применен на этапе проектирования технических объектов для автоматизированного планирования размещения антенных систем в соответствии с требованиями стандартов по электромагнитной совместимости, что способствует снижению уровня взаимных помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоприёмник, радиопередатчик, монтажное пространство, локальная группировка, летательный аппарат, оптимизация, размещение антенных систем.

Благодарности: Результаты были получены в рамках реализации Программы развития Передовой инженерной школы «Комплексная авиационная инженерия» (Соглашение № 075-15-2025-129).

Для цитирования: Исмагилов В.В., Гайнутдинов Р.Р. Размещение антенных систем радиоэлектронных средств в локальной группировке. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(6). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2222> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.005

Placement of antenna systems of radio-electronic equipment in a local grouping

V.V. Ismagilov, R.R. Gaynutdinov 

*Kazan National Research Technical University (KNITU-KAI) named after A.N. Tupolev,
Kazan, the Russian Federation*

Abstract. This research is scientifically significant because the issue of maintaining internal electromagnetic compatibility within electronic systems is essential for the development of modern and advanced technical devices and technologies. However, there is currently no approach for optimal placement of electronic equipment antenna systems that considers their electromagnetic compatibility when interacting with them through antenna systems. A genetic algorithm is proposed as the primary method for solving this problem. It considers the mutual influence of electronic equipment antenna

systems as a key criterion for optimizing their spatial arrangement, enabling the search for compromise solutions in a multi-parameter space. As a result, an algorithm was developed for determining rational antenna placement schemes. The main conclusion is that considering the mutual influence of electronic equipment through their antenna systems can be effectively used not only for analysis but also for direct optimization of the electromagnetic environment. The developed algorithm can be applied at the design stage of technical facilities for automated planning of antenna system placement in accordance with electromagnetic compatibility standards, thereby reducing the level of mutual interference.

Keywords: electromagnetic compatibility, radio receiver, radio transmitter, installation space, local grouping, aircraft, optimization, placement of antenna systems.

Acknowledgments: The results were obtained within the framework of the implementation of the Development Program of the Advanced Engineering School "Integrated Aviation Engineering" (Agreement No. 075-15-2025-129).

For citation: Ismagilov V.V., Gaynutdinov R.R. Placement of antenna systems of radio-electronic equipment in a local grouping. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(6). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2222> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.005

Введение

При разработке современных новейших технических устройств, которые используют радиоэлектронные средства (РЭС) наблюдается тенденция, во-первых, к внедрению различных РЭС с широким спектром функциональных возможностей, и, во-вторых, к применению и внедрению различных более лёгких материалов и менее экранирующих материалов в большинство разрабатываемых конструкций. Помимо перечисленных существуют и другие факторы, такие как необходимость компактного размещения и другие, которые в конечном счёте приводят к возрастанию уровня непреднамеренных помех, что приводит к возникновению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС [1].

Наиболее опасным механизмом взаимодействия между РЭС является их электромагнитная связь через антенные системы, которая представляет собой ключевой фактор, определяющий уровень ЭМС. Одним из основополагающих параметров, используемых для оценки ЭМС РЭС в условиях влияния через антенные системы, является электромагнитная развязка. Эта характеристика непосредственно зависит от пространственного разнесения и направленности излучающих элементов антенных систем. В свою очередь, пространственное разнесение и направленность антенн оказывают значительное влияние на уровень электромагнитных помех и на общую эффективность ЭМС. Поэтому исследование и оптимизация параметров, влияющих на электромагнитную развязку, становятся неотъемлемой частью процесса обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, что является важным аспектом в разработке и эксплуатации современных радиоэлектронных систем, а изменение этих параметров могут вносить значительные изменения в электромагнитную обстановку [2, 3].

Локальная группировка – совокупность РЭС, размещенных в ограниченном пространстве, например на фюзеляже летательного аппарата, на морских и речных судах, на наземных средствах взлёта и посадки, на наземных пунктах управления и связи и других [4].

Проблема исследования совокупности электромагнитных явлений и (или) процессов в данной области пространства является предметом многочисленных как зарубежных, так и отечественных научных исследований, что подтверждается значительным количеством публикаций в данной области [5, 6]. В дополнение к этому в статье [7] освещаются методы автоматизации процессов исследования ЭМС и

предлагаются инновационные подходы к оптимизации проектных решений на основе критериев ЭМС применительно к различным техническим объектам. Применение различных биоинспирированных алгоритмов для получения оптимальных решений сложных задач, в том числе и задач по критериям ЭМС, применяется достаточно широко, что подробно описано в научно-технической литературе [8, 9]. В ГОСТ Р 55898-2013 представлен метод расчёта взаимных радиопомех в локальной группировке, который может являться основой для функции оптимизации. Однако, несмотря на весь объем и комплексность решаемых проблем, в научно-технической литературе задача размещения антенных систем в локальной группировке не нашла достаточного отражения.

Цель исследования заключается в нахождении такого метода оптимального размещения антенных систем в некоторой локальной группировке – потенциальном перспективном техническом средстве, для которого учитывается условие соблюдения требований к обеспечению электромагнитной совместимости при влиянии через антенные системы. Соответственно, в основе этого метода должно лежать описание путей решения задачи оптимизированного размещения антенных систем РЭС, а также анализ и исследование электромагнитной совместимости РЭС проектируемого объекта.

Анализ электромагнитной совместимости включает в себя детальное изучение взаимного влияния радиоэлектронных систем друг на друга, что позволяет выявить потенциальные источники помех и разработать меры по их минимизации. Определение оптимальной установочной позиции предполагает использование методов математического моделирования и оптимизации для нахождения таких конфигураций размещения антенных систем, которые обеспечивают максимальное снижение уровня взаимных помех при сохранении требуемых характеристик функционирования РЭС.

Материалы и методы

Задача оптимизации размещения антенных систем в локальной группе состоит из двух ключевых аспектов: анализа электромагнитной совместимости РЭС и определения такого расположения антенных систем внутри локальной группировки, которое оптимизируется на основе индекса влияния между антенными системами РЭС. Анализ ЭМС РЭС направлен на оценку воздействия радиопередатчиков на радиоприемники через антенные системы в пространстве локальной группы РЭС. Задача размещения предполагает выбор наилучшего расположения антенных систем в данном пространстве. Для этого на основе оценок индексов влияния различных вариантов размещения антенных систем выбирается наиболее подходящая конфигурация.

Для выявления индексов влияния между антенными системами РЭС в локальной группировке необходимы частотные и энергетические параметры РЭС и координаты антенных систем, в результате расчётов получается матрица индексов влияния, по которой возможна оптимизация.

Оценка ЭМС РЭС в группировке производится методом парной оценки. Пары формируются на основе частотного анализа, а количество пар равно количеству N .

$$N = n \cdot m,$$

где n – количество приёмников, m – количество передатчиков.

В каждой паре поэтапно проводится частотный анализ и далее идентифицируется принадлежность пары к одной из следующих возможных групп: пара, в которой возможно возникновение непреднамеренных помех по основному каналу приёма; пара, в которой возможно возникновение помех по соседнему или побочному каналу приёма;

пара, в которой возможно возникновение помех на гармониках радиоизлучения; пара, в которой возможно возникновение только блокирующего радиоизлучения.

Для учёта возможного возникновения продукта интермодуляции из всех возможных РЭС в локальной группировке формируются группы типа «два передатчика и один приёмник», в которых возможна двухсигнальная интермодуляция, а также формируются группы типа «три передатчика и один приёмник», в которых возможна трёхсигнальная интермодуляция. Число групп двух типов (N_I) определяется следующим образом:

$$N_I = m(C_n^2 + C_n^3),$$

где C – количество сочетаний, n – количество приёмников, m – количество передатчиков.

Индекс влияния в каждой паре и группе (N_I, N) рассчитывается в соответствии с следующей формулой:

$$S_{i,j} = P_i - D - P_{i,j}^{\text{BX}},$$

где $S_{i,j}$ – индекс влияния в паре передатчик – приёмник (дБ); P_i – пороговая чувствительность поражённого приёмника (дБВт); D – коэффициент, усиления или ослабления помехи, зависящий от множества параметров исследуемых РЭС и их антенных систем (дБ).

Мощность помехи на входе общем случае рассчитывается по следующей формуле, при этом i – индекс приёмника, j – передатчика:

$$P_{i,j}^{\text{BX}} = P_j - \eta_j + G(x_j, y_j, z_j, f_j)_j - \eta_i + G(x_i, y_i, z_i, f_j)_i - L(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, f_j)_0,$$

где $P_{i,j}^{\text{BX}}$ – уровень мощности на входе поражённого приёмника (дБВт), P_j – мощность передатчика (дБВт), η_j – потери в антенно-фидерном тракте передающего РЭС (дБ), $G(x, y, z)_j$ – коэффициент усиления антенны передатчика в направлении на антенну приёмника на средней частоте помехи (дБ), η_i – потери в антенно-фидерном тракте приёмного РЭС (дБ), $G(x, y, z)_i$ – коэффициент усиления антенны приёмника в направлении на антенну передатчика на средней частоте помехи (дБ), L_0 – ослабление радиопомехи при распространении между центрами их фазовых антенн (дБ), $x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j$ – координаты антенных систем (м), f_j – средняя частота передачи в диапазоне частотного совпадения (ГГц).

В результате расчёта всех пар приёмников передатчиков заполняется матрица индексов влияния, которая представлена в следующем виде:

$$S = \begin{pmatrix} S_{1,1} & \dots & S_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i,1} & \dots & S_{i,j} \end{pmatrix},$$

где $S_{i,j}$ – индекс влияния j -го передатчика на i -ый приёмник (дБ).

Тогда целевая функция задачи оптимизации будет иметь вид:

$$c(f) = \max_{\substack{i=1\dots i \\ j=1\dots j}} (S_{i,j}) \rightarrow \min,$$

где целью оптимизации будет минимизация максимального индекса влияния, где при необходимости возможно дополнение, для ограничения в получении в результате оптимизации только тех решений, где невозможно нарушение ЭМС РЭС при влиянии через антенные системы в виде:

$$S_{i,j} < 0 \forall i, j.$$

Результаты и обсуждение

Для решения этой задачи предлагается использовать генетический алгоритм, показавший свою эффективность для решения схожих задач [10], концептуальная диаграмма представлена на Рисунке 1.

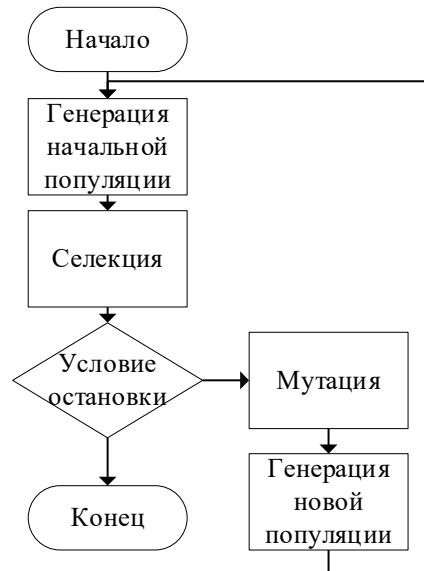


Рисунок 1 – Схема применяемого генетического алгоритма
 Figure 1 – Scheme of used genetic algorithm

Генетический алгоритм предполагает, что хромосомой является потенциальное решение для текущей задачи. Для применения этого алгоритма пространство размещения (локальная группировка) дискретизируется, координаты пересечения дискретной сетки становятся потенциальными точками для размещения антенных систем. Из всего массива потенциальных точек антеннам присваиваются неповторяющиеся значения и генерируется исходное решение задачи.

Родительские пары для генерации следующей популяции выбираются случайным образом. В виде оператора мутации применяется скольжение по пространству антенны в соседние точки, при этом вероятность мутации крайне высока для того, чтобы новое потенциальное решение содержало большее количество отличий от исходного. Во время селекции проводится расчёт индексов влияния для каждого потенциального решения, где далее по сформированным матрицам методом швейцарской сетки выбираются наилучшие и более везучие особи. Далее оценивается прирост улучшения решения и его дальнейший потенциал развития. При большом потенциале развития или просто при несоответствии критерию обеспечения ЭМС алгоритм продолжает работу, генерируя следующие поколения и повторяя прохождение описанных шагов.

На основе представленного алгоритма было разработано информационное и программное обеспечение на языке C# на фреймворке .NET 4.8.7 с использованием библиотек Windows Forms для визуализации размещения антенн в локальной группировке и OpenTK для визуализации размещения антенн на трёхмерном упрощённом объекте цилиндрической формы, условно представляющем фюзеляж летательного аппарата. Экранная форма разработанного программного обеспечения представлена на Рисунке 2. С левой стороны формы представлены исходные параметры размещаемых антенных систем и координаты оптимального решения. Ниже представлены рассматриваемые пары РЭС, а также индекс влияния между ними для

оптимального решения, который получен с применением предложенного алгоритма. В правой части формы находится поле для схематичного отображения результата, снизу расположено поле для отображения значения целевой функции. Также имеется шкала прогресса расчёта, реализована возможность сохранения результатов и возможность смены пространства для более детального анализа в зависимости от локальной группировки.

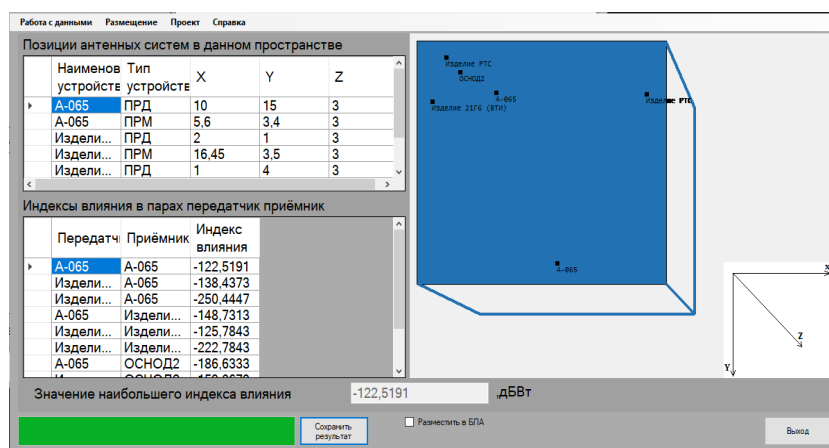


Рисунок 2 – Экранная форма разработанного программного обеспечения
Figure 2 – Screen form of the developed software

С применением разработанной программы были получены схемы для размещения антенных систем РЭС в локальной группировке на поверхности монтажного пространства для антенных систем (Рисунок 3).

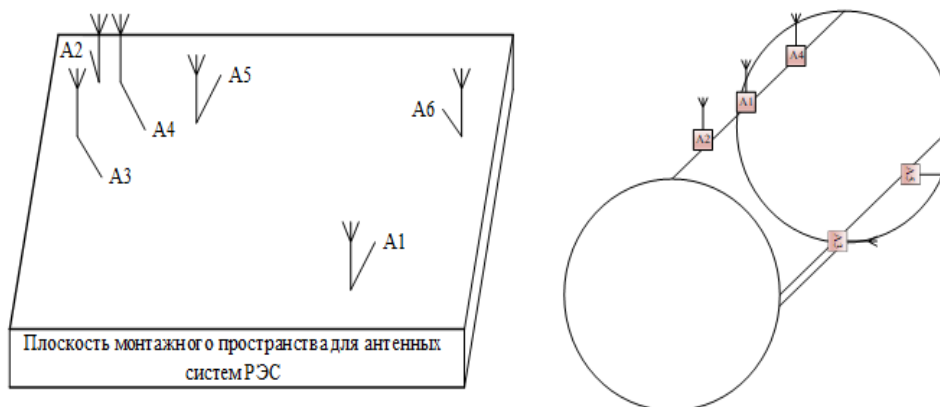


Рисунок 3 – Пример схемы размещения на локальной группировке
Figure 3 – Example of antennas' layout

В процессе разработки программного обеспечения была предусмотрена возможность интеграции антенных систем на различные мобильные технические платформы, включая объекты сложной геометрической конфигурации. Данное программное обеспечение позволяет получить решение, удовлетворяющее условию обеспечения критериев ЭМС РЭС. Это достигается посредством пространственной развязки между фазовыми центрами антенных систем, что позволяет минимизировать взаимные помехи и обеспечить эффективное функционирование радиоэлектронного оборудования в условиях сложной компоновки.

Заключение

В результате выполнения данной работы был предложен подход для оптимизации размещения антенных систем РЭС в локальной группировке. В качестве критерия оптимизации ЭМС в данной задаче выступает дефицит развязки между приёмниками и передатчиками, который рассчитывается в соответствии с методикой, приведённой в ГОСТ Р 55898-2013. Для автоматизации размещения антенных систем РЭС разработана программа, учитывающая предложенные критерии и ограничения для размещения антенных систем РЭС. При этом базовым алгоритмом для проведения оптимизации был выбран генетический алгоритм, оптимизированный для применения к данной задаче. Получены результаты оптимального размещения антенных систем в рассмотренных локальных группировках для подтверждения работоспособности предложенного подхода оптимизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Zatuchny D.A., Negreskul G.G., Sauta O.I., et al. *Aerospace Radionavigation Systems: Electromagnetic Compatibility*. Singapore: Springer; 2022. 210 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6341-4>
2. Васильев Б.В. *Прогнозирование надёжности и эффективности радиоэлектронных устройств*. Москва: Сов. радио; 1970. 334 с.
3. Иванов В.А. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств*. Киев: Техника; 1983. 120 с.
4. Седельников Ю.Е., Веденькин Д.А., Латышев В.Е. и др. Антенные системы радиосредств перспективных БЛА: проблемы и направления решения. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2015;(2):81–86.
Sedel'nikov Y.E., Veden'kin D.A., Latyshev V.E., et al. Antenna systems of radio equipment for advanced UAVs: Problems and lines of development. *Russian Aeronautics*. 2015;58(2):221–226. <https://doi.org/10.3103/S1068799815020142>
5. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Моделирование внешних электромагнитных воздействий на сложные технические системы. В сборнике: *XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015), 19–21 мая 2015 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); 2015. С. 235–238.
Gaynutdinov R.R., Chermoshencev S.F. Modeling the external electromagnetic influences on the complex electronic equipment. In: *XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015), 19–21 May 2015, Saint Petersburg, Russia*. IEEE; 2015. P. 90–92. <https://doi.org/10.1109/SCM.2015.7190420>
6. Князев А.Д. *Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств*. Москва: Радио и связь; 1984. 336 с.
7. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Размещение бортового оборудования в пространстве фюзеляжа беспилотного летательного аппарата с применением генетического алгоритма. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.021>
Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Placing on-board equipment in the fuselage space of an unmanned aerial vehicle using a genetic algorithm. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.021>
8. Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В. и др. *Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации*. Чебоксары: Среда; 2024. 229 с.

9. Суздальцев И.В., Чермошенцев С.Ф., Богула Н.Ю. Генетический алгоритм для размещения бортовых электронных средств в беспилотном летательном аппарате. В сборнике: *XIX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2016), 25–27 мая 2016 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); 2016. С. 481–484.
Suzdaltsev I.V., Chermoshencev S.F., Bogula N.Y. Genetic algorithm for onboard equipment placement inside the unmanned aerial vehicle fuselage. In: *XIX International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2016), 25–27 May 2016, Saint Petersburg, Russia*. IEEE; 2016. P. 262–264. <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519748>
10. Суздальцев И.В., Крупенникова Д.Е. Компоновка электронных блоков бортового оборудования летательного аппарата с учетом критерия электромагнитной совместимости. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2024;(4):230–237.
Suzdal'tsev I.V., Krupennikova D.E. Layout of aircraft onboard equipment electronic units taking into account the electromagnetic compatibility criterion. *Russian Aeronautics*. 2024;67(4):987–994. <https://doi.org/10.3103/S1068799824040275>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Исмагилов Владислав Вячеславович, Vladislav V. Ismagilov, Postgraduate at the аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования, Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация. Department of Computer-Aided Design Systems, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, the Russian Federation.
e-mail: ivv_vlad@bk.ru
ORCID: [0009-0001-1550-4688](https://orcid.org/0009-0001-1550-4688)

Гайнутдинов Рустам Рафкатович, Rustam R. Gaynutdinov, Candidate of технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация. Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Computer-aided Design Systems, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, the Russian Federation.
e-mail: emc-kai@mail.ru
ORCID: [0000-0003-1973-2941](https://orcid.org/0000-0003-1973-2941)

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 04.06.2026; принята к публикации 11.06.2026.

The article was submitted 06.03.2026; approved after reviewing 04.06.2026; accepted for publication 11.06.2026.