

Научная статья

УДК 621.3.048.2;004.896;629.7

URL: <https://trudymai.ru/publications.php?ID=186903>

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

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТРАССИРОВКА КАБЕЛЕЙ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ НА ОСНОВЕ РОЕВОГО АЛГОРИТМА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

А.А. Амирханов, Р.Р. Гайнутдинов✉

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Республика Татарстан, Россия

✉ emc-kai@mail.ru

Цитирование: Амирханов А.А., Гайнутдинов Р.Р. Автоматизированная трассировка кабелей в летательных аппаратах на основе роевого алгоритма с учетом электромагнитной совместимости // Труды МАИ. 2025. № 145. URL:<https://trudymai.ru/publications.php?ID=186903>

Аннотация. Данная статья посвящена модификации роевого алгоритма для решения задачи автоматизированной трассировки кабелей в летательных аппаратах с учетом электромагнитной совместимости. Предложена топологическая модель монтажного пространства бортовой кабельной сети летательного аппарата в виде ортогонального графа-решетки, которая позволяет решать задачу автоматизированной трассировки с учетом крепления кабелей к конструкции летательного аппарата, пересечения кабелей с конструкцией летательного аппарата и электромагнитной обстановки во внутрифюзеляжном пространстве летательного аппарата, характеризующейся распределением напряженности электрического или магнитного поля. Предложена модификация роевого алгоритма для решения задачи автоматизированной трассировки кабелей в летательных аппаратах на графовой модели монтажного пространства с учетом критериев минимизации суммарной

длины кабелей и минимизации влияния электрических полей на кабельные линии связи. Разработаны программная реализация предложенной топологической модели монтажного пространства бортовой кабельной сети летательного аппарата и модифицированного роевого алгоритма. Получены результаты трассировки кабелей в конструкции тестового летательного аппарата, которые демонстрируют возможность использования роевых алгоритмов для решения задачи трассировки и определяют методы коллективного поведения, как одно из актуальных направлений для дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, летательный аппарат, бортовая кабельная сеть, роевой алгоритм, трассировка кабелей.

Финансирование: Данная работа выполнена согласно Соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ по теме «Повышение эффективности и надежности элементов оборудования, создание новых нано - и полимерных композиционных материалов для энергетических и транспортных систем».

AUTOMATED CABLE ROUTING IN AIRCRAFT TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BASED ON A SWARM ALGORITHM

A.A. Amirkhanov, R.R. Gaynutdinov✉

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI»,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

✉ emc-kai@mail.ru

Citation: Amirkhanov A.A., Gaynutdinov R.R. Automated cable routing in aircraft taking into account electromagnetic compatibility based on a swarm algorithm // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/publications.php?ID=186903>

Abstract. One of the most important elements of the on-board equipment of modern aircraft is the cable network. Strict requirements are imposed on the design of on-board

cable networks in terms of manufacturability, reliability and electromagnetic compatibility. In the process of designing on-board cable networks, it is necessary to understand the tracing of cables in the aircraft structure. In most cases, cable tracing is done manually and is determined by the experience and expertise of the designers, which makes it largely heuristic. This approach is associated with difficulties in taking into account several tracing criteria, including electromagnetic compatibility criteria. Computer-aided design systems allow you to automate the tracing procedure. However, in such systems, there is no possibility of multi-criteria cable tracing, including taking into account electromagnetic compatibility. Solving this problem requires the development and research of specialized multicriteria tracing algorithms. This article is devoted to the development of such algorithms. An algorithm is proposed for forming a topological model of the mounting space of an aircraft's on-board cable network, which allows automated tracing, taking into account the attachment of cables to the aircraft structure, the intersection of cables with the aircraft structure, and the electromagnetic environment in the interior of the aircraft, characterized by the distribution of electric or magnetic field strength. A modification of the swarm algorithm for tracing cables in a graph model of the mounting space is presented, taking into account the distribution of electric field strength. The paper presents a software implementation of the algorithm and examples of how the algorithm works in the design of an abstract aircraft.

Keywords: electromagnetic compatibility, aircraft, on-board cable network, swarm algorithm, cable tracing.

Funding: This work was carried out under Agreement No. 075-03-2023-032 dated January 16, 2023 (code: FZSU-2023-004) between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and KNRTU-KAI, on the topic: «Improving the Efficiency and Reliability of Equipment Components and Developing New Nano- and Polymer Composite Materials for Energy and Transport Systems».

Введение

Современные летательные аппараты (ЛА) имеют в своем составе множество электрических соединений, которая формирует сложную бортовую

кабельную сеть (БКС), состоящую из проводов и кабелей, размещенных во внутрифюзеляжном пространстве ЛА. Кабели, входящие в состав БКС ЛА благодаря своим электрофизическим и конструкционным параметрам, а также их большой протяженности являются хорошими приемниками и переносчиками наведенных электромагнитных помех к чувствительным элементам бортового оборудования [1]. Качественное и надежное функционирование бортового оборудования ЛА напрямую зависит от соблюдения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) при трассировке кабелей БКС [2,3].

При автоматизированном проектировании БКС для ЛА необходимо учитывать ряд факторов:

- функциональные и системные требования, характеризующиеся перечнем бортового оборудования, типами сигналов и напряжений, а также необходимостью обеспечить резервирование и надежность;
- конструктивно-компоновочные ограничения, характеризующиеся трассировкой, составом кабельного жгута, защитой от внешних воздействующих факторов, обеспечить доступность для технического обслуживания;
- требования минимальной массы и стоимости жизненного цикла БКС;
- требования нормативно технических документов.

Одним из центральных вопросов при проектировании БКС стоит задача обеспечения требуемой надежности и ЭМС. Последние, как правило, характеризуется терминами потеря времени, жизни финансов. Так по оценкам ряда экспертов обеспечение ЭМС на ранних стадиях разработки изделий существенно сокращает их итоговую стоимость разработки [4].

Вопросами автоматизированной трассировки кабелей БКС ЛА занимаются специалисты разных стран [5-12], в том числе, и в России [7-12]. Можно отметить ряд систем автоматизированного проектирования БКС (CSoft ElectriCS, ZukenE3.Series, Mentor Graphics Capital и др.) [13]. Однако подавляющее большинство работ, в том числе, системы автоматизированной трассировки БКС ЛА, основаны на учете функциональных и системных требований, и конструктивно – компоновочных ограничениях. Оптимизация же трассировки БКС, как правило, проводится по критерию минимизации длин кабелей, что

только косвенно решает проблему обеспечения ЭМС. Разработанные методы и алгоритмы не учитывают возможную электромагнитную обстановку в фюзеляже ЛА, а также возможные перекрёстные помехи. В целом решение задачи по обеспечению ЭМС на ранней стадии разработки ЛА, а в частности, при автоматизированной трассировке кабелей БКС позволит сократить сроки разработки и улучшить качество функционирования бортового оборудования.

Объектом исследования в данной работе является ЛА с бортовой кабельной сетью.

Предметом исследования является обеспечение ЭМС БКС летательного аппарата на основе оптимальной трассировки кабелей.

Целью данной работы является модернизация и исследование роевого алгоритма для решения задачи автоматизированной трассировки БКС ЛА с учетом электромагнитной совместимости.

Постановка задачи трассировки кабелей в летательных аппаратах с учетом электромагнитной совместимости

В настоящее время разрабатываются более совершенные ЛА, оснащающиеся многочисленными устройствами и системами, имеющими в своем составе мощные радиопередающие антенны, создающие мощные электромагнитные поля во внутрифюзеляжном пространстве ЛА. Источниками нежелательных электромагнитных полей также могут являться и блоки бортового оборудования. Кроме того, штатное функционирование бортовых устройств ЛА может нарушаться и под влиянием внешних электромагнитных полей. В частности, направленные импульсные электромагнитные поля способны наводить в кабелях связи критические уровни напряжения и тока, что в свою очередь представляет опасность для нормального функционирования ЛА [14]. Излучение от антенн радиопередатчиков радиоэлектронных средств, эмиссия электромагнитных полей от блоков бортового оборудования и внешние электромагнитные воздействия могут вызывать нежелательные электромагнитные помехи в кабельных линиях связи, нарушать работу бортовой аппаратуры и даже приводить к их отказу. Снижение уровня наведённых помех

требует минимизации суммарной длины кабелей, однако обеспечение ЭМС может потребовать их удлинение для обхода областей внутрифюзеляжного пространства с высокой напряжённостью электромагнитного поля. Таким образом, задача трассировки кабелей в ЛА с учетом ЭМС является многокритериальной.

Постановка задачи автоматизированной трассировки кабелей в ЛА с учетом ЭМС заключается в следующем: задана трехмерная модель ЛА с блоками бортового оборудования, множество кабельных соединений между блоками бортового оборудования и распределение напряженности электрического поля во внутрифюзеляжном пространстве ЛА. Задача сводится к поиску таких путей прокладывания кабелей в ЛА, которые наилучшим образом удовлетворяют заданным критериям трассировки:

- в качестве первого критерия предлагается минимизировать суммарную длину кабелей, т. к. это обеспечивает уменьшение массы, минимизирует потери полезных сигналов и взаимные наводки, а также способствует снижению их восприимчивости к внешним электромагнитным воздействиям;

- в качестве второго критерия предлагается минимизировать влияние внутрисистемных помех при электромагнитных взаимодействиях, которые определяются электромагнитной обстановкой во внутрифюзеляжном пространстве ЛА, характеризующейся распределением напряженности электрического поля. Кабели, входящие в электротехнический комплекс ЛА, в силу своей протяженности и разветвлённой структуры образуют замкнутые контуры которые хорошо воспринимают электромагнитные помехи от внешних источников.

Монтажное пространство БКС ЛА в данной работе моделируется в виде графа трасс прокладки кабелей. Исходными данными в математической постановке задачи являются:

- граф монтажного пространства $G = (X, U)$, где X — множество вершин графа, представляющих возможные точки подключения кабелей к блокам, а U — множество рёбер, представляющих возможные пути прокладки кабелей;

- множество блоков бортового оборудования $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, где b_i – это i -ый блок;
- множество кабелей $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, где $c_j = (b_i, b_k)$ – это j -ое кабельное соединение между блоками b_i и b_k ;
- массив напряженностей электрического поля $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, где e_i – уровень напряженности электрического поля в вершине $x_i \in X$.
- массив предельно допустимых уровней напряженности электрического поля $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где s_i – максимальная допустимая восприимчивость кабеля $c_i \in C$ к электрическому полю.

Математические описания критериев примут вид:

1. Минимизация длины всех кабелей:

$$\sum_{i=1}^{|C|} \sum_{j=1}^{|U|} a \cdot y_{i,j} \cdot l_j \rightarrow \min; \quad 1)$$

где a – весовой коэффициент, определяющий важность критерия, $y_{i,j}$ – величина, принимающая значение 1, если i -ый кабель проходит через j -ое ребро графа G , и 0 в противном случае, l_j – длина j -го ребра.

2. Минимизация суммы длин участков кабелей, в которых происходит превышение допустимого уровня восприимчивости к электрическому полю:

$$\sum_{i=1}^{|C|} \sum_{j=1}^{|U|} \sum_{k=1}^{|X|} b \cdot y_{i,j} \cdot f_{i,k} \cdot z_{j,k} \cdot \frac{l_j}{2} \rightarrow \min; \quad 2)$$

где b – весовой коэффициент, определяющий важность критерия, $z_{j,k}$ – величина, принимающая значение 1, если k -ая вершина инцидентна j -му ребру, и 0 в противном случае, $f_{i,k}$ – величина, принимающая значение 1, если i -ый кабель проходит через k -ую вершину графа G , и 0 в противном случае.

Разработка топологической модели монтажного пространства бортовой кабельной сети летательного аппарата в виде графа

Трассировка кабелей БКС ЛА в значительной степени базируется на опыте и эвристических подходах [15]. В процессе трассировки монтажное пространство БКС ЛА представляют в виде различных топологических моделей, в том числе, в

виде графа трасс прокладки кабелей [10,11]. Для применения алгоритмов трассировки при заданной постановке задачи необходимо отобразить конструкцию ЛА с возможными путями прокладки кабелей в топологическую модель в виде графа. Так, в работе [16] автор приводит подход, заключающийся в дискретизации конструкции объекта автоматизации с помощью точек ортогональной сетки для формирования модели монтажного пространства кабельной сети в виде ортогонального графа-решётки. Вершины такого графа представляют место перегиба или разветвления кабеля, а ребра представляют физические пути, по которым может проходить кабель.

Применение данного подхода обусловлено некоторыми трудностями, в число которых входит:

- большая размерность задачи из-за большого количества узлов сетки;
- высокое разрешение сетки для получения удовлетворительных результатов;
- сложность трассировки с учетом крепления и пересечения с конструкцией.

Для устранения перечисленных недостатков предлагается дискретизировать только конструктивно-силовую схему ЛА.

Блок-схема предлагаемого алгоритма формирования графа монтажного пространства БКС ЛА представлена на рисунке 1.

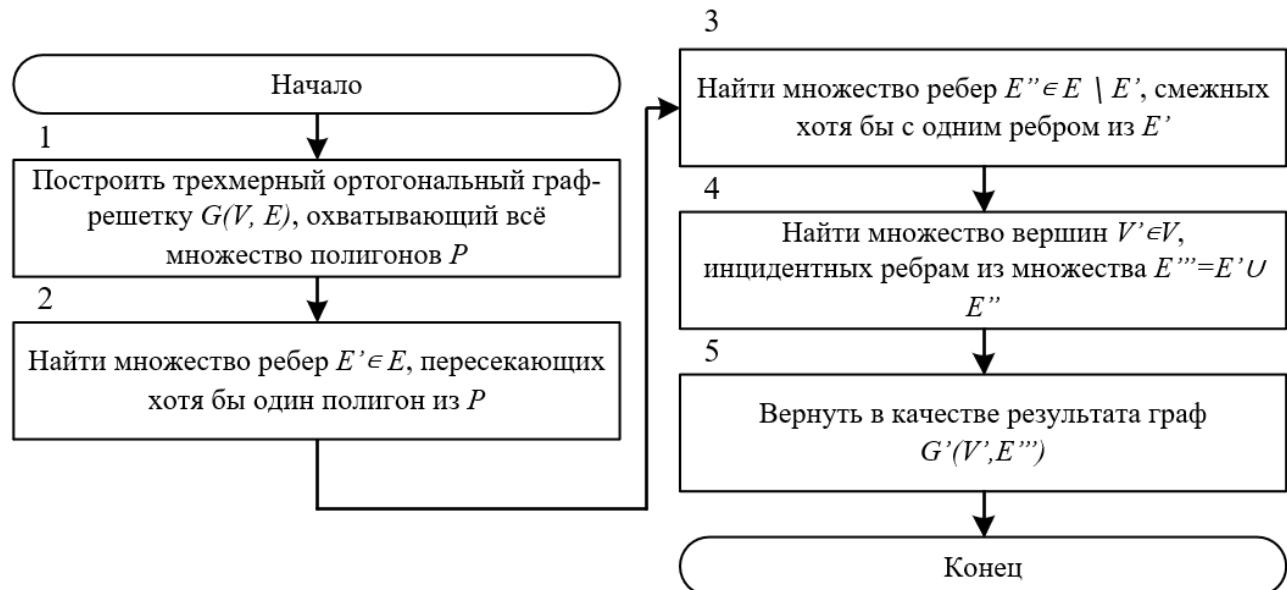


Рисунок 1- Блок-схема алгоритма дискретизации конструкции ЛА.

Приведем более детальное описание шагов алгоритма:

Шаг 1. На данном шаге осуществляется построение кубического ортогонального графа-решетки, которая охватывает всю трехмерную модель, заданную в виде множества полигонов. Пример выполнения данного шага представлен на рисунке 2.

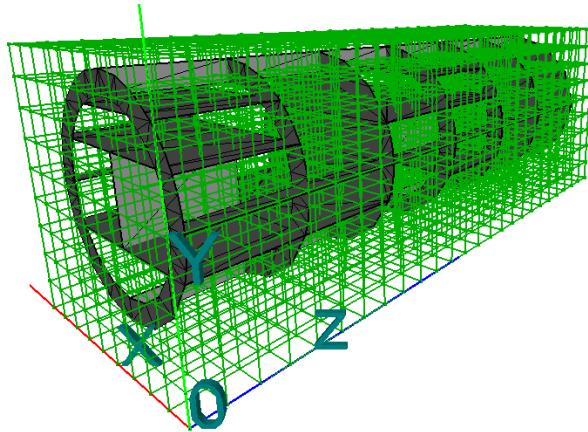


Рисунок 2 - Пример дискретизации трехмерной модели.

Шаг 2. На данном шаге для всех ребер образованного графа осуществляется расчет факта пересечения ребра с полигонами заданной модели. Результатом выполнения данного шага является множество ребер красного цвета, представленных на рисунке 3.

Шаг 3. На данном шаге для всех ребер, не пересекающих полигоны, определяется факт смежности ребра с пересекающими полигонами ребрами. Результатом выполнения данного шага является множество ребер голубого цвета, представленных на рисунке 3.

Шаг 4. На данном шаге из графа G извлекаются все вершины, инцидентные ребрам, образованным на шаге 2 и 3 данного алгоритма.

Шаг 5. Результатом выполнения данного блока является граф, представленный на рисунке 3.

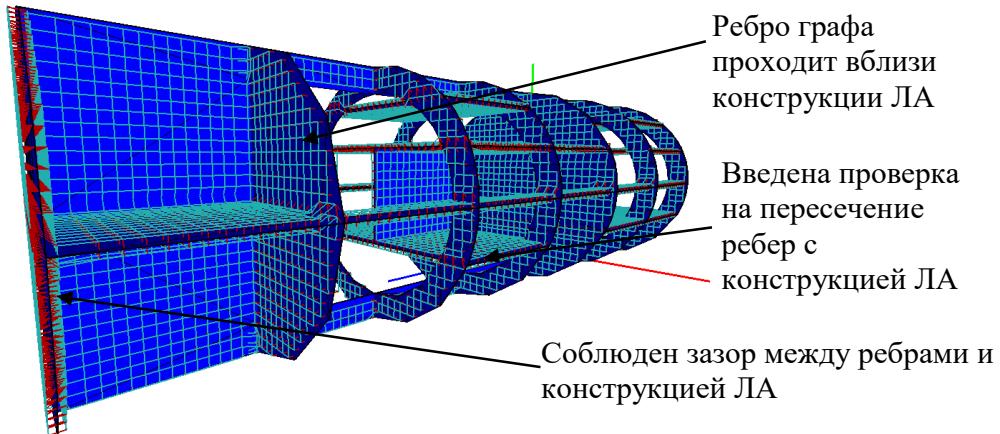


Рисунок 3 - Пример дискретизации конструкции ЛА.

Разработка алгоритма для трассировки кабелей в летательных аппаратах с учетом электромагнитной совместимости

Под трассировкой кабелей в ЛА будем понимать нахождение наиболее оптимальных маршрутов прокладки на имеющемся графе монтажного пространства. Задача сводится к нахождению решений с минимальным значением целевой функции при наличии ограничений. Данная задача относится к классу задач дискретной комбинаторной оптимизации [17].

Задача трассировки кабелей в ЛА осложняется дополнительным критерием и большой размерностью графа монтажного пространства для больших конструкций ЛА. В таких ситуациях вычислительная сложность классических алгоритмов растет и на помощь приходят эвристические методы и алгоритмы, которые обеспечивают получение решений, близких к оптимальному, за приемлемое время. Эвристические методы не гарантируют получения оптимального решения, но дают “близкие” к оптимальным. В некоторых задачах применение эвристических методов оказывается единственно возможным.

В последнее время для решения различных задач автоматизации проектирования в машиностроении всё чаще используются методы и технологии искусственного интеллекта. Особенно стремительно растёт интерес к разработке алгоритмов, имитирующих природные и общественные явления [18, 19]. В основе большинства этих алгоритмов лежат идеи, заимствованные из природы или общества. Эвристические методы являются относительно новыми и перспективными. Их можно разделить на эволюционные и поведенческие

(имитационные) методы. Поведенческие методы основаны на моделировании коллективного интеллектуального поведения (роевой интеллект или Swarm Intelligence) элементов систем. Роевой интеллект представляет собой коллективный разум, т. е. коллективное поведение отдельных автономных агентов, локально взаимодействующих между собой и с окружающей средой, обмениваясь информацией по примитивным правилам в самоорганизующейся системе без выраженного центра управления для достижения всех его целей (рисунок 4) [20].

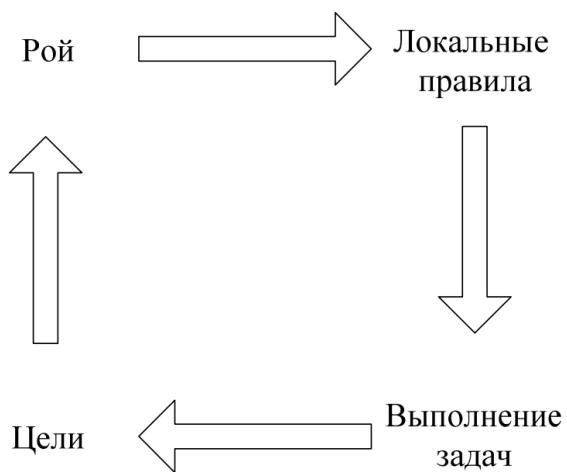


Рисунок 4 - Обобщенная схема роя.

Исследование роевых моделей ведется с 90-х годов. За время их развития ученые пришли к единодушному мнению, что данные модели эффективны при решении различных оптимизационных задач, а также динамической оптимизации процессов в распределенных нестационарных системах [20]. Также отмечено, что модель роевого интеллекта может быть построена и реализована при решении оптимизационных задач на графах, при наличии конечного набора элементов и их всевозможных состояний.

На практике немаловажное значение имеет выбор конкретного алгоритма для решения той или иной задачи. Не существует универсальной метаэвристики для решения задач оптимизации в автоматизированном проектирования [21]. Для решения конкретных прикладных задач обычно требуется применение нескольких алгоритмов и их адаптация для решения конкретных прикладных задач. Известные рекомендации по выбору метаэвристик включают выбор

критериев и проверку результатов путем статистического анализа и визуализации, а также настройку параметров алгоритмов [20]

Рассмотрим алгоритм абстрактной децентрализованной самоорганизующейся системы для решения задачи маршрутизации между двумя точками в дискретном координатном пространстве. Основные преимущества, которые может дать роевой алгоритм:

- гибкая адаптация к различным областям поиска и критериям трассировки;
- возможность одновременной параллельной трассировки всех кабельных соединений и быстрое сведение к глобальному оптимуму;
- слабая зависимость времени сходимости алгоритма от размерности задачи, в частности, от количества вершин графа-решетки.

Блок-схема алгоритма абстрактного роя представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 - Блок-схема алгоритма абстрактного роя.

Параметрами алгоритма являются: количество агентов, радиус крика агентов, диапазон возможных значений скорости агентов. В данном алгоритме агенты курсируют между двумя вершинами на графе (рисунок 3) – блоками бортового оборудования (пункт А и пункт Б), которые являются началом или концом кабельного соединения.

Представим более подробно шаги работы алгоритма:

Шаг 1. Создается популяция агентов. Каждому агенту случайно назначается вершина графа, направление, скорость и текущий пункт назначения А или Б. У каждого агента инициализируются счетчики – предполагаемые расстояние до пункта А или Б.

Шаг 2. Каждый агент обновляет свое положение в соответствии с его скоростью и направлением, прибавляя при этом к каждому из своих счетчиков число $h^*(a+b^*f_{i,k})$, где h - шаг дискретизации ортогонального графа решетки при этом: если агент “натыкается” на один из пунктов А или Б, то он обнуляет соответствующий счетчик, а если агент “натыкается” на свой текущий пункт назначения, то он меняет пункт назначения и направление на противоположные.

Шаг 3. Каждый агент “выкрикивает” значения своих счетчиков на дистанцию крика и прислушается к “выкрикиваниям” других агентов, находящихся в пределах радиуса крика, при этом, если агент “услышал” значение счетчиков, меньшее, чем у себя, то он обновляет соответствующий счетчик, а если у агента обновился счетчик до текущего пункта назначения, то он меняет направление в сторону агента, от которого услышал обновляющее значение.

Шаг 4. Исходя из убывания значений счетчиков агентов формируется маршрут из пункта А в пункт Б и рассчитывается сумма критерия (1) и (2) и если она меньше глобального, то глобальное решение обновляется.

Шаг 5. Алгоритм повторяет шаги 2–5 до выполнения одного из условий остановки: достигнута максимальное число итерации или достигнута минимальная разница в длине маршрутов между итерациями i и $i+1$.

На рисунке 6 представлен пример работы модифицированного алгоритма абстрактного роя на разных итерациях при имитации распределения напряженности электрического поля. Агенты на рисунках обозначены белым цветом. Черными линиями обозначены оптимальные пути на каждой итерации. Как видно из рисунка, рой осуществляет параллельный поиск всех путей одновременно и стремится обойти зоны с максимальной напряженностью электрического поля, при этом на каждой итерации алгоритм находит все более

короткий маршрут для кабельного соединения на графе монтажного пространства.

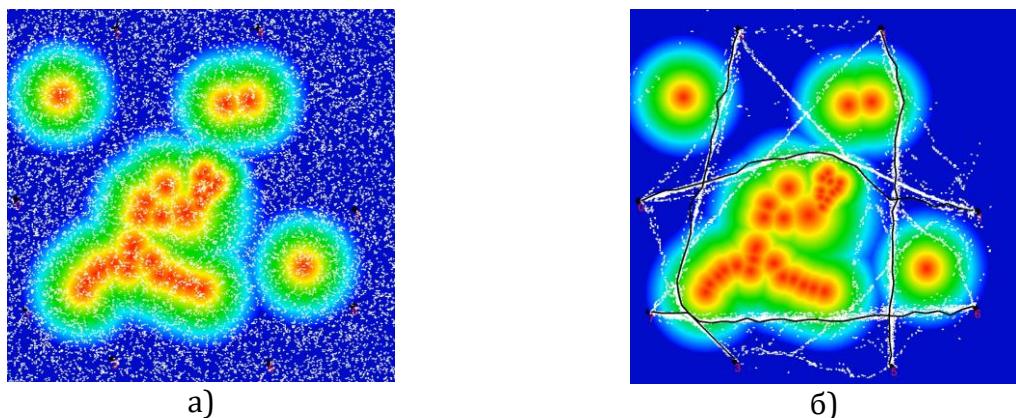


Рисунок 6 - Пример работы алгоритма: а) итерация 0; б) итерация 150.

Для демонстрации работы алгоритма абстрактного роя в конструкции ЛА (схема основных силовых элементов планера) была разработана программа на языке C#. Для соблюдения второго критерия из математической постановки вершинам графа-решетки необходимо сопоставить уровни напряженности электрического поля, которые могут быть получены путем экспериментальных исследований, аналитических расчетов или имитационного моделирования с использованием специализированных программ [4]. Результат трассировки кабелей в ЛА при отсутствии напряженности электрического поля представлен на рисунке 7.

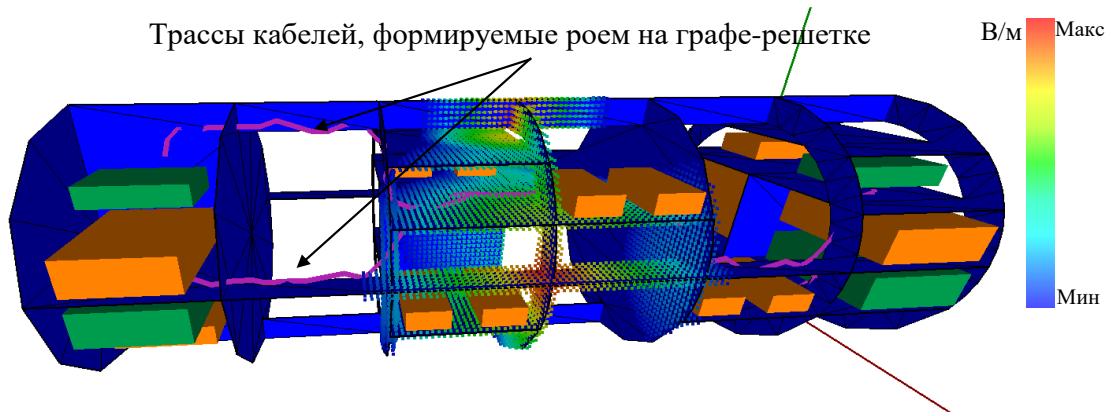


Рисунок 7 - Результат трассировки кабелей в ЛА с учетом напряженности поля.

Как видно из полученных результатов применение модифицированного алгоритма абстрактного роя позволяет выполнить автоматизированную трассировку кабелей в ЛА с учетом ЭМС. Достоинством алгоритма является слабая зависимость от размерности графа-решетки, гибкая адаптируемость под

различные критерий и возможность трассировки множества кабельных соединений одновременно, без последовательного нахождения маршрутов кабельных трасс.

Заключение

На основании проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Предложена топологическая модель монтажного пространства бортовой кабельной сети летательного аппарата в виде ортогонального графа-решетки, которая позволяет производить трассировку кабелей с учетом их крепления к конструкции ЛА, пересечения с конструкцией ЛА и распределения напряженности электрического поля во внутрифюзеляжном пространстве ЛА.

2. Модифицирован алгоритм абстрактного роя, что позволяет решать задачу многокритериальной трассировки кабелей на графе-решетке, для трассировки кабелей в ЛА с учетом ЭМС.

3. Разработано исследовательское программное обеспечение и получены результаты трассировки кабелей в конструкции тестового ЛА с применением модифицированного алгоритма абстрактного роя.

4. Результаты исследования демонстрируют возможность применения алгоритмов оптимизации, основанных на коллективном поведении, для решения задачи автоматизированной трассировки кабелей в летательных аппаратах с учётом критериев электромагнитной совместимости.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

[1] Гайнутдинов, Р. Р. Прогнозирование электромагнитных помех в межблочных линиях связи летательного аппарата при микросекундных импульсных электромагнитных взаимодействиях / Р. Р. Гайнутдинов, С. Ф.

[2] Модель процесса оценки электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры летательного аппарата / А. Н. Дементьев, Д. С. Клюев, А. Н. Новиков [и др.] // Труды МАИ. – 2022. – № 123. – DOI 10.34759/trd-2022-123-27.

[3] Амирханов, А. А. Прогнозирование перекрестных помех в кабельных линиях связи летательных аппаратов на основе искусственной нейронной сети / А. А. Амирханов, Р. Р. Гайнутдинов // Труды МАИ. – 2024. – № 139.

[4] Гайнутдинов, Р. Р. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов / Р. Р. Гайнутдинов, С. Ф. Чермошенцев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2(65). – С. 62-78.

[5] Zhu, Z. A methodology to enable automatic 3D routing of aircraft Electrical Wiring Interconnection System / Z. Zhu, G. La Rocca, M. J. L. Van Tooren // CEAS Aeronautical Journal – 2017. – Vol 8, No. 2. – P. 287-302. – DOI 10.1007/s13272-017-0238-3.

[6] Automatic Cable Harness Layout Routing in a Customizable 3D Environment / T. Karlsson, E. Åblad, T. Hermansson [et al.] // Computer-Aided Design. – 2024. – Vol 169. – P. 103671. – DOI 10.1016/j.cad.2023.103671.

[7] Федоров, Е. Ю. Разводка сложных электрических цепей межблочного монтажа при автоматизированном проектировании летательного аппарата / Е. Ю. Федоров, В. С. Терещук, А. В. Ференец // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 1. – С. 76-78.

[8] Низамов, Р. А. Оптимизационные алгоритмы автоматизированного проектирования бортовой кабельной сети беспилотного летательного аппарата / Р. А. Низамов // XXIII ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых) : Международная молодёжная научная конференция: Материалы конференции. Сборник докладов: в 4 томах, Казань, 08-10 ноября 2017 года. Том II. – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2017. – С. 370-374.

[9] Агафонов, Д. В. Метод оптимизации монтажа бортовой кабельной сети на изделиях ракетно-космической техники / Д. В. Агафонов, Ю. А. Воробьев, Ю. В. Осокин // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 1(70). – С. 88-94.

[10] Ромо Фуентес Карлос. Разработка алгоритмов размещения бортовых устройств и прокладки трасс кабелей подвижных объектов с учетом электромагнитной совместимости : специальность 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ромо Фуентес Карлос. – Москва, 2008. – 164 с.

[11] Нгуен, В. Т. Проектирование электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов с учетом перекрестных помех : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Ван Тай, 2022. – 140 с.

[12] Гаранин, И. Н. Разработка методики решения задачи канальной трассировки кабельной сети беспилотного летательного аппарата с использованием муравьиного алгоритма / И. Н. Гаранин, И. В. Сузdal'цов // Современные материалы, техника и технология : материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Курск, 29–30 декабря 2015 года / Ответственный редактор Горохов А.А.. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. – С. 41-44.

[13] Сайфутдияров, К. Р. Автоматизация трассировки кабельных систем беспилотного летательного аппарата с учетом критерия электромагнитной совместимости / К. Р. Сайфутдияров // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли - акто-2016 : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х томах, Казань, 10–12 августа 2016 года. Том 2. – Казань: Академия наук Р, 2016. – С. 213-217.

[14] Кириллов, В. Ю. Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов / В. Ю. Кириллов, М. М. Томилин // Труды МАИ. – 2013. – № 66. – С. 21.

[15] Коптев, А. Н. Концептуальные основы проектирования сложных жгутов бортовой кабельной сети летательных аппаратов / А. Н. Коптев, А. Ю. Мясников

// Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т. 19, № 2. – С. 19-30.

[16] Tobias K. Optimization of Cable Harness Routing. Mathematical Modelling, Lagrangian Relaxation, and Subgradient Optimization // Department of Mathematical Sciences Chalmers University of Technology and University of Gothenburg: Master's Thesis. – Gothenburg, 2020 – p. 52.

[17] Ватутин, Э. И. Решение дискретных комбинаторных оптимизационных задач с использованием эвристических методов: методические указания / Ватутин Э. И. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. – 30 с.

[18] Вычисление критического пути: сравнение эвристических методов / А. А. Горячев, А. В. Горячев, А. В. Монахов, Н. Е. Новакова // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2016. – Т. 1. – С. 62-66.

[19] Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой. М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017.

[20] Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации : монография / Л. А. Гладков, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. – Чебоксары: Среда, 2024. – 228 с.

[21] Горячев, А. В. Применение алгоритмов роевого интеллекта для решения задач дискретной оптимизации в САПР / А. В. Горячев, Н. Е. Новакова // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении : Сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Ялта, 20-22 мая 2020 года / Отв. редактор К.А. Маковейчук. – Ялта: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2020. – С. 15-19.

References

[1] Gainutdinov, R. R. Forecasting electromagnetic interference in interblock communication lines of an aircraft with microsecond pulsed electromagnetic interactions / R. R. Gainutdinov, S. F. Chermoshentsev // Bulletin of the Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev. - 2014. - No. 2. - P. 203-208.

[2] Model of the process of assessing the electromagnetic compatibility of on-board equipment of an aircraft / A. N. Dementyev, D. S. Klyuev, A. N. Novikov [et al] // Proceedings of MAI. - 2022. - No. 123. - DOI 10.34759/trd-2022-123-27.

[3] Amirhanov, A. A. Prediction of crosstalk in cable communication lines of aircraft based on an artificial neural network / A. A. Amirhanov, R. R. Gainutdinov // Proceedings of MAI. - 2024. - No. 139.

[4] Gainutdinov, R. R. Electromagnetic compatibility of promising aviation systems / R. R. Gainutdinov, S. F. Chermoshentsev // Electromagnetic compatibility technologies. - 2018. - No. 2 (65). - P. 62-78.

[5] Zhu, Z. A methodology to enable automatic 3D routing of aircraft Electrical Wiring Interconnection System / Z. Zhu, G. La Rocca, M. J. L. Van Tooren // CEAS Aeronautical Journal. - 2017. - Vol. 8, No. 2. - P. 287-302. - DOI 10.1007/s13272-017-0238-3.

[6] Automatic Cable Harness Layout Routing in a Customizable 3D Environment / T. Karlsson, E. Åblad, T. Hermansson [et al] // Computer-Aided Design. - 2024. - Vol. 169. - P. 103671. - DOI 10.1016/j.cad.2023.103671.

[7] Fedorov, E. Yu. Layout of complex electrical circuits of inter-unit installation in automated design of aircraft / E. Yu. Fedorov, V. S. Tereshchuk, A. V. Ferenets // News of higher educational institutions. Aviation technology. - 2015. - No. 1. - P. 76-78.

[8] Nizamov, R. A. Optimization algorithms for computer-aided design of an on-board cable network of an unmanned aerial vehicle / R. A. Nizamov // XXIII TUPOLEV READINGS (school of young scientists) : International Youth Scientific Conference: Conference Proceedings. Collection of reports: in 4 volumes, Kazan, November 08-10, 2017. Volume II. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2017. pp. 370-374.

[9] Agafonov, D. V. Method for optimizing the installation of on-board cable networks on rocket and space technology products / D. V. Agafonov, Yu. A. Vorobyov, Yu. V. Osokin // Cosmonautics and rocket engineering. - 2013. - No. 1 (70). - P. 88-94.

[10] Romo Fuentes Carlos. Development of algorithms for the placement of on-board devices and the laying of cable routes for moving objects taking into account electromagnetic compatibility: specialty 05.13.05 "Elements and devices of computing

equipment and control systems": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Romo Fuentes Carlos. - Moscow, 2008. - 164 p.

[11] Nguyen, V. T. Design of electrical harnesses for electrical systems of aircraft taking into account crosstalk: specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Nguyen Van Thai, 2022. - 140 p.

[12] Garanin, I. N. Development of a methodology for solving the problem of channel tracing of an unmanned aerial vehicle cable network using an ant algorithm / I. N. Garanin, I. V. Suzdaltsev // Modern materials, equipment and technology : proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference, Kursk, December 29-30, 2015 / The responsible editor is A.A. Gorokhov.. Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book", 2015. pp. 41-44.

[13] Saifutdiyarov, K. R. Automation of tracing cable systems of an unmanned aerial vehicle taking into account the criterion of electromagnetic compatibility / K. R. Saifutdiyarov // New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry - acto-2016 : collection of reports of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation: in 2 volumes, Kazan, August 10-12 in 2016. Volume 2. Kazan: Academy of Sciences, 2016, pp. 213-217.

[14] Kirillov, V. Yu. Impact of intentional electromagnetic interference on on-board cables of spacecraft / V. Yu. Kirillov, M. M. Tomilin // Proceedings of MAI. - 2013. - No. 66. - P. 21.

[15] Koptev, A. N. Conceptual foundations of designing complex harnesses of the on-board cable network of aircraft / A. N. Koptev, A. Yu. Myasnikov // Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technology, and mechanical engineering. - 2020. - Vol. 19, No. 2. - pp. 19-30.

[16] Tobias K. Optimization of Cable Harness Routing. Mathematical Modelling, Lagrangian Relaxation, and Subgradient Optimization // Department of Mathematical Sciences Chalmers University of Technology and University of Gothenburg: Master's Thesis. - Gothenburg, 2020 - p. 52.

[17] Vatutin, E. I. Solving discrete combinatorial optimization problems using heuristic methods: methodological guidelines / Vatutin E. I. – Kursk: Yugo-Zapad. gosudarstvennogo univ., 2016. – 30 p.

[18] Critical Path Calculation: A Comparison of Heuristic Methods / A. A. Goryachev, A. V. Goryachev, A. V. Monakhov, N. E. Novakova // International Conference on Soft Computing and Measurements. – 2016. – Vol. 1. – P. 62-66.

[19] Karpenko A. P. Modern algorithms for search engine optimization. Algorithms inspired by nature. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2017. [20] Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization: monograph / L. A. Gladkov, Yu. A. Kravchenko, V. V. Kureichik, S. I. Rodzin. – Cheboksary: Sreda, 2024. – 228 p.

[20] Gladkov L.A., Kravchenko I.A., Kureichik V.V., Rodzin S.I. Intellektual'nye sistemy: modeli i metody metaevristicheskoi optimizatsii // Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization. – 2024. – <https://doi.org/10.31483/r-112579>

[21] Goryachev, A.V. Application of swarm intelligence algorithms to solve discrete optimization problems in CAD / A.V. Goryachev, N. E. Novakova // Information systems and technologies in modeling and management : Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Yalta, May 20-22, 2020 / Editor-in-chief K.A. Makoveychuk. Yalta: Limited Liability Company Publishing House Printing House Arial, 2020, pp. 15-19.

Информация об авторах

Альберт Айратович Амирханов, аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ; г. Казань, Республика Татарстан, Россия; e-mail: reimeartorias@mail.ru

Рустам Рафкатович Гайнутдинов, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ; г. Казань, Республика Татарстан, Россия; e-mail: emc-kai@mail.ru

Information about the authors

Albert A. Amirkhanov, Postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI», Kazan, Republic of Tatarstan, Russia;
e-mail: reimartorias@mail.ru

Rustam R. Gaynutdinov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-aided Design Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI», Kazan, Republic of Tatarstan, Russia;
e-mail: emc-kai@mail.ru

Получено 10 ноября 2025 • Принято к публикации 25 декабря 2025 • Опубликовано 30 декабря 2025
Received 10 November 2025 • Accepted 25 December 2025 • Published 30 December 2025
