

Муравьиный алгоритм многокритериальной оптимизации размещения элементов на печатной плате электронных средств

И. В. Суздальцев¹, С. Ф. Чермошенцев², Н. Ю. Богула³, В. А. Суздальцев⁴

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ

¹iliasuzd@mail.ru, ²sapr@kai.ru, ³nellybog@gmail.com, ⁴svlant@mail.ru

Аннотация. В докладе представлена постановка оптимизационной задачи размещения элементов на печатной плате электронных средств. Обосновывается выбор ограничений и критериев задачи оптимизации, учитывающих конструктивные, тепловые и электромагнитные параметры конструкции печатной платы. Приводится описание основных процедур муравьиного алгоритма решения задачи размещения. Представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию эффективности муравьиного алгоритма для решения задачи размещения элементов на печатной плате.

Ключевые слова: размещение элементов; печатная плата; многокритериальная оптимизация; муравьиный алгоритм; параметры эффективности; управляемые параметры

I. ВВЕДЕНИЕ

При автоматизированном проектировании современных электронных средств возникает необходимость в решении оптимизационных задач, обладающих высокой размерностью исходных данных, с учетом большого числа (более 3-х) критериев качества и ограничений. По мнению ряда экспертов, именно многокритериальное автоматизированное проектирование электронных средств востребовано в настоящее время, что обуславливается наличием значительного количества разнообразных требований, предъявляемых к проектируемому объекту.

Большинство методов и алгоритмов проектирования электронных средств ориентированы на решение задач только с учетом одного критерия качества. Применение данных методов и алгоритмов для решения многокритериальных задач требует их модификации и проведения дополнительных исследований [1].

Целью данной работы является разработка и исследование эффективности муравьиного алгоритма для решения многокритериальной задачи размещения разноразмерных элементов на печатной плате.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ

Задача размещения заключается в определении для каждого элемента $e_i \in E$ (E - множество размещаемых элементов, $i = \overline{1..n}$, $n=|E|$ - количество размещаемых элементов) координат x_i , y_i , месторасположения его геометрического центра в пределах прямоугольной монтажной области печатной платы с габаритными размерами $A \times B$ ($0 \leq x_i \leq A$; $0 \leq y_i \leq B$), с учетом определенных критериев и ограничений.

В данной работе, при решении задачи размещения элементов на печатной плате, предлагается учитывать следующие критерии: минимума суммарной взвешенной связанности элементов; минимума максимальной длины соединений между элементами, а также тепловой критерий и критерий электромагнитной совместимости (ЭМС).

Использование первых двух критериев, при оптимизации размещения элементов, позволяет минимизировать длину соединений, что влечет к повышению трассируемости (процента разведенных на этапе трассировки соединений от общего их числа) печатных плат. Кроме того, уменьшение длины соединений приводит к сокращению величин задержек сигналов в межсоединениях, а также способствует снижению уровня электромагнитного излучения от печатных плат и повышению их устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям.

В качестве теплового критерия предлагается учитывать показатель равномерности размещения теплонагруженных элементов на печатной плате. Учет данного критерия в задаче размещения способствует снижению рабочих температур элементов и риска их перегрева, что в свою очередь ведет к повышению отказоустойчивости функционирования электронных средств.

Для реализации критериев ЭМС [2, 3, 4] в данной работе, множество размещаемых элементов распределяется по группам (например, по группам элементов: логических быстродействующих схем; логических схем умеренного быстродействия и элементов аналоговых схем). Между группами элементов устанавливаются отношения совместимости

(несовместимости). Принадлежность элементов одной из групп, а также ЭМС различных групп, определяется проектировщиком печатной платы. Для обеспечения ЭМС, в данной работе, в качестве критериев задачи размещения предлагается минимизировать расстояние между элементами одной группы, а также максимизировать расстояние между элементами, принадлежащими несовместимым группам.

В качестве конструктивных ограничений задачи размещения могут быть определены: минимальные значения расстояний между соседними элементами; координаты фиксированных элементов; запрещенные зоны печатной платы, расположение элементов в которых является недопустимым.

III. МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ

В данной работе, для решения задачи размещения элементов на печатной плате, предлагается использовать муравьиный алгоритм [5, 6, 7], представленный на рис. 1.

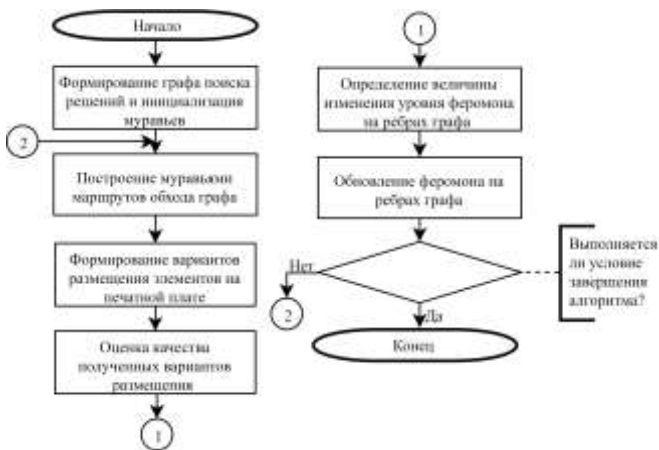


Рис. 1. Муравьиный алгоритм размещения элементов на печатной плате

Основная идея муравьиных алгоритмов заключается в моделировании поведения колонии муравьев, при поиске кратчайшего пути от муравейника к источнику пищи. При своем движении муравей пометает свой маршрут специальным веществом - феромоном, обладающим специфическим запахом. Таким образом происходит передача информации другим муравьям для выбора пути.

Для реализации муравьиного алгоритма размещения, на основе исходной схемы соединений элементов, формируется полный граф поиска решений $G(H, U)$ с альтернативными состояниями вершин. Вершинам графа из множества H соответствуют элементы схемы ($E \rightarrow H$), а ребрам множества U - электрические соединения элементов. Вес ребра определяется количеством соединений между соответствующими элементами. Для образования полного графа, в случае отсутствия ребер между некоторыми его вершинами, вводятся фиктивные ребра с нулевым весом. Каждая из вершин графа поиска решений может находиться в одном из двух альтернативных состояний: нулевом или единичном. При нулевом состоянии вершины, соответствующий элемент подлежит размещению в горизонтальном положении на

печатной плате, а при единичном состоянии - в вертикальном.

Последовательность вершин, сформированная в результате обхода графа $G(H, U)$ муравьем, определяет порядок размещения элементов на печатной плате. Таким образом, решение задачи размещения сводится к поиску оптимального маршрута в графе, с учетом поставленных критериев и ограничений.

Рассмотрим основные шаги муравьиного алгоритма решения задачи размещения элементов на печатной плате.

Шаг 1. На данном шаге происходит определение стартовых позиций для муравьев. При этом, все N муравьев равномерно распределяются по всем вершинам графа $G(H, U)$. Начальный уровень феромона на всех вершинах (для всех их состояний) и ребрах графа устанавливается равным единице.

Шаг 2. В рамках данной процедуры каждый k -ый муравей строит свой маршрут обхода графа $G(H, U)$, в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Муравей размещается в стартовой вершине с номером cur . При этом все оставшиеся вершины графа помечаются как непройденные.
2. Для текущей вершины в пути с номером cur определяется множество $S_{cur} \in H$, смежных ей вершин графа, из числа непройденных муравьем.
3. Определяется вероятность перехода муравья в каждую смежную непройденную вершину графа (для двух возможных ее состояний), по формуле:

$$p_{cur,j}(st) = \frac{(\rho_{cur,j} + w_j(st))^\alpha \cdot (c_{cur,j} + 1)^\beta \cdot t_j^\gamma \cdot e_{cur,j}^\zeta}{\sum_{\forall j \in S_{cur}} (2 \cdot \rho_{cur,j} + w_j(0) + w_j(1))^\alpha \cdot (c_{cur,j} + 1)^\beta \cdot t_j^\gamma \cdot e_{cur,j}^\zeta},$$

$$\forall j \in S_{cur}, st \in \{0, 1\};$$

где $p_{cur,j}(st)$ - вероятность перехода из текущей вершины cur в j -ую вершину с состоянием st ; $\rho_{cur,j}$ - уровень феромона на ребре между вершиной cur и вершиной j ; $w_j(st)$ - уровень феромона на j -ой вершине в состоянии st ; $c_{cur,j}$ - вес ребра между вершинами cur и j (количество соединений между соответствующими элементами); t_j - показатель тепловой совместимости j -го элемента с соседними элементами (определяется исходя из мощности тепловыделения j -го и соседних элементов); $e_{cur,j}$ - показатель ЭМС элементов с номерами cur и j (определяется исходя из информации о принадлежности элементов той или иной группе и их совместимости); $\alpha, \beta, \gamma, \zeta$ - весовые коэффициенты, определяющие приоритетность учета уровней феромонов $\rho_{cur,j}$ и $w_j(st)$, а также значений показателей $c_{cur,j}, t_j, e_{cur,j}$ при выборе следующей вершины в пути муравья.

4. Определяется следующая вершина в маршруте муравья, с использованием оператора «колеса рулетки». Отрезок единичной длины разбивается на сегменты, количество которых вдвое больше числа смежных непройденных вершин, $2 \times |S_{cur}|$. Каждому сегменту отрезка ставится в соответствие номер смежной непройденной

вершины из множества S_{cur} и одно из двух ее состояний. Длина каждого сегмента пропорциональна величине вероятности перехода муравья в соответствующую вершину с учетом ее состояния. Генерируется случайное число в диапазоне от 0 до 1. Номер и активное состояние следующей вершины в пути муравья определяется сегментом отрезка, которому принадлежит случайное число.

5. Происходит переход муравья в следующую вершину. Она помечается как пройденная и становится текущей вершиной в маршруте. Номер этой вершины присваивается переменной cur .

6. Если все вершины графа $G(H,U)$ пройдены (в графе отсутствуют не пройденные вершины), то происходит переход к п. 7 алгоритма построения маршрута обхода графа, в противном случае – к п. 2.

7. Сформированный муравьем маршрут обхода графа $G(H,U)$ сохраняется.

Пункты 1–7 алгоритма построения маршрута обхода графа выполняются для каждого k -го муравья в популяции.

Шаг 3. Каждому маршруту обхода графа $G(H,U)$, построенному на предыдущем шаге алгоритма, ставится в соответствие вариант размещения элементов на печатной плате. При этом порядок размещения элементов на монтажной плоскости печатной платы определяется последовательностью вершин в маршруте муравья. Заполнение монтажной области печатной платы выполняется по уровням, с учетом: габаритов и ориентации элементов, фиксированных элементов, запрещенных зон, расстояний между элементами, а также других конструктивных ограничений. Нечетные уровни заполняются в направлении слева направо, а четные – справа налево. На рис. 2 представлен вариант размещения элементов на печатной плате, соответствующий следующей последовательности обхода вершин: 3, 6, 9, 4, 7, 1, 8, 2, 5.

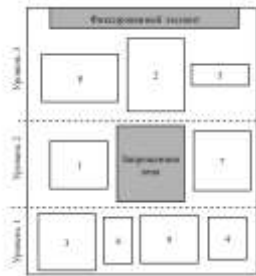


Рис. 2. Пример размещения элементов на печатной плате

Шаг 4. Маршрут, сформированный каждым k -ым муравьем и соответствующий ему вариант размещения, оцениваются некоторым значением показателя качества F_k , вычисляемым в соответствии с аддитивной целевой функции задачи [8]:

$$F_k = \sum_{i=1}^q \lambda_i \cdot f_i \rightarrow \min; \forall i = \overline{1..5}, 0 < \lambda_i < 1, \sum_{i=1}^q \lambda_i = 1;$$

где λ_i – весовые коэффициенты, определяющие важность учета i -го критерия оптимизации при решении задачи (устанавливаются лицом, принимающим решение); f_i –

нормированное значение целевой функций, соответствующей i -ому критерию задачи, q – количество критериев задачи. Определяется маршрут, обладающий наилучшим значением показателя качества F_{best} , среди всех решений, построенных муравьями в процессе работы алгоритма. Лучший маршрут и соответствующий ему вариант размещения сохраняются.

Шаг 5. Для каждого маршрута обхода графа, сформированного k -ым муравьем, вычисляется величина изменения уровня феромона $\Delta\rho_{i,j}^k$ на всех ребрах графа. Величина $\Delta\rho_{i,j}^k = Q/F_k$, если ребро $\{i,j\}$ принадлежит пути k -го муравья и $\Delta\rho_{i,j}^k = 0$ в противном случае, $\forall i, j \in H, i \neq j, k = \overline{1..N}$ (где Q – константа, определяющая порядок цены оптимального решения; N – количество муравьев в популяции).

Аналогичным образом, определяется величина изменения уровня феромона $\Delta w_i^k(st)$, откладываемого на вершинах графа, для каждого из двух их состояний. Величина $\Delta w_i^k(st) = Q/F_k$, если i -ая вершина с состоянием st включена в маршрут k -го муравья и $\Delta w_i^k(st) = 0$ в противном случае, $st \in \{0,1\}, \forall i \in H, k = \overline{1..N}$.

Таким образом, чем лучше оказывается маршрут k -го муравья, с точки зрения его показателя качества F_k , тем больше феромона откладывается на его вершинах и в их активных состояниях и ребрах графа.

Шаг 6. Происходит обновление уровня феромона на всех ребрах графа $G(H,U)$ по формуле:

$$\rho_{i,j}^{t+1} = (1 - \mu)\rho_{i,j}^t + \sum_{k=1}^N \Delta\rho_{i,j}^k, i, j \in H;$$

где $\rho_{i,j}^t$ – текущий уровень феромона на ребре $\{i, j\}$; $\rho_{i,j}^{t+1}$ – обновленный уровень феромона на ребре $\{i, j\}$; μ – коэффициент испарения, $\mu \in [0;1]$.

Аналогичным образом, происходит обновление уровня феромона на всех вершинах графа, для каждого из их возможных состояний:

$$w_i^{t+1}(st) = (1 - \mu)w_i^t(st) + \sum_{k=1}^N \Delta w_i^k(st), st \in \{0,1\}, i \in H;$$

где $w_i^t(st)$ – текущий уровень феромона на i -ой вершине в состоянии st ; $w_i^{t+1}(st)$ – обновленный уровень феромона на i -ой вершине в состоянии st .

Шаг 7. Осуществляется переход к шагу 2 до тех пор пока величина изменения показателя качества наилучшего маршрута $\Delta F = F^{t-1}_{best} - F^t_{best}$ (где F^{t-1}_{best} – показатель качества наилучшего решения, найденного на предыдущих итерациях алгоритма) не будет превышать некоторого порогового значения ε на протяжении определенного количества последних итераций алгоритма.

На последних итерациях алгоритма, как правило, большинство муравьев выстраиваются в колонию, следуя по одному оптимальному пути. Наилучший маршрут, построенный муравьями в процессе работы алгоритма,

соответствует результирующему оптимальному варианту размещения элементов на печатной плате.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленный муравьиный алгоритм решения задачи размещения элементов на печатной плате был реализован в среде программирования MS Visual Studio, на языке C#. С использованием разработанной программы были проведены экспериментальные исследования эффективности разработанного алгоритма. В качестве исходных данных, для проведения экспериментальных исследований, использовались принципиальные схемы реальных цифровых электронных средств, обладающие различным количеством элементов. В данной работе были проведены следующие экспериментальные исследования муравьиного алгоритма решения задачи размещения:

1. Сравнительные исследования качества решений задачи размещения элементов на печатной плате, полученных с использованием муравьиного, эволюционного алгоритмов [9, 10, 11, 12], жадного алгоритмов, а также алгоритма слепого поиска. В рамках данного экспериментального исследования, оценивался показатель качества решений, полученных с использованием различных алгоритмов размещения. Показатель качества решений определялся по значению аддитивной целевой функции. В таблице представлены результаты экспериментальных исследований различных алгоритмов решения задачи размещения, с учетом критериев ЭМС и тепловой совместимости.

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№	Количество размещаемых элементов	Показатель качества решений, полученных с использованием алгоритмов			
		Муравьиный алгоритм	Эволюционный алгоритм	Жадный алгоритм	Алгоритм слепого поиска
1	27	13578,95	14374,34	14548,21	14492,68
2	32	38367,62	40119,76	43062,33	45669,02
3	46	61233,44	63234,61	65539,45	64906,98
4	51	99645,32	103526,42	109660,65	112623,71
5	63	393848,12	413234,22	425437,52	428478,98

2. Исследование зависимости параметров эффективности муравьиного алгоритма решения задачи размещения от значений его управляемых параметров. Эффективность муравьиного алгоритма определяется его показателем сходимости. Для оценки сходимости муравьиного алгоритма регистрировалось количество поколений (итераций), в течение которых величина изменения показателя качества наилучшего решения задачи ΔF превосходит некоторое пороговое значение ε . Исследуемым управляемым параметром муравьиного алгоритма являлась размерность популяции муравьев. На рис. 2 представлена полученная зависимость значений показателя сходимости муравьиного алгоритма от размерности популяции.

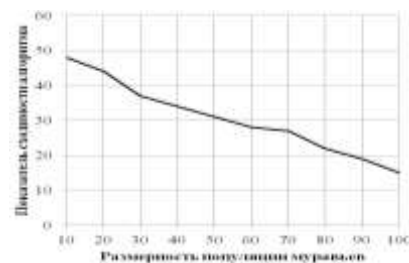


Рис. 3. Зависимость показателя сходимости муравьиного алгоритма от размерности популяции.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований, в работе предлагаются следующие выводы:

1. Муравьиные алгоритмы превосходят другие рассмотренные алгоритмы размещения (эволюционные, жадные алгоритмы и алгоритмы слепого поиска) на 5–7% по качеству получаемых решений.

2. Скорость сходимости муравьиного алгоритма размещения увеличивается с ростом размерности популяции муравьев.

Экспериментальная оценка временной сложности разработанного муравьиного алгоритма находится в пределах $O(n^2) - O(n^3)$. Использование аддитивной целевой функции для свертки частных критериев задачи и муравьиного алгоритма обеспечивает приемлемое качество Парето-аппроксимации решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 448 с.
- [2] Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Immunity Research of the Electronic Systems Elements at the Influence of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses // Proceedings of 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM - 2016). Erlagol, 2016. P. 214-218.
- [3] Chermoshentsev S.F., Gaynutdinov R.R. Modeling the External Electromagnetic Influences on the Complex Electronic Equipment // Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM' 2015, St. Peterburg, 2015, P. 90-92.
- [4] Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to Ensure the Intrasystem Electromagnetic Compatibility of UAV Avionics // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59, Iss. 4. P. 613–618.
- [5] Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева О.М. Модернизированный муравьиный алгоритм синтеза идентифицированного дерева гильотинного разреза при планировании СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 7 (192). С. 15-28.
- [6] Лебедев О.Б., Зорин В.Ю. Упаковка на основе метода муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 12 (113). С.25-29.
- [7] Ванидовский В.А., Лебедев О.Б. Двумерная упаковка в полугораниченную полосу на основе моделирования адаптивного поведения муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 7 (156). С. 34-42.
- [8] Карпенко А.П., Савелов А.С., Семенхин А.С. Метод адаптивных взвешенных сумм в задаче Парето-аппроксимации // Наука и образование. 2012. № 6. С. 211-230.

- [9] Жиленков В.А., Курейчик В.В. Модификация вероятностного генетического алгоритма решения задачи размещения элементов ЭВА с учетом электромагнитной совместимости // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 7 (192). С. 6-15.
- [10] Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F., Bogula N.Yu. Genetic Algorithm for Onboard Equipment Placement Inside the Unmanned Aerial Vehicle Fuselag // Proceedings of the XIX International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM'2016. St. Petersburg, 2016. P. 262-264.
- [11] Bogula N.Y., Chermoshencev S.F., Suzdaltsev I.V. Evolutionary Algorithms for Digital Electronic Printed Circuit Board Design // Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM' 2015. St. Peterburg, 2015. P. 153-156.
- [12] Suzdaltsev I.V., Chermoshencev S.F., Bogula N.Yu. Bionic Algorithms for Multi-Criteria Design of Electronic Equipment Printed Circuit Board // Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Peterburg, 2017. P. 394– 396.