

А. В. Тинеков, В. В. Щербинин

Применение методов глобальной оптимизации для решения задачи синтеза антенных решеток

A. V. Tinekov, V. V. Scherbinin

Implementation of Global Optimization Methods for Solving the Antenna Array Synthesis Problem

С точки зрения вычислительной эффективности рассматривается применение алгоритмов глобальной оптимизации — генетических алгоритмов, эволюционных стратегий и метода имитации отжига, — к решению задачи синтеза антенных решеток на примере линейной антенной решетки, состоящей из полуволновых линейных симметричных вибраторов. Показано, что для рассматриваемой задачи наибольшую вычислительную эффективность имеет метод имитации отжига.

Ключевые слова: синтез антенн; генетические алгоритмы; эволюционные стратегии; метод имитации отжига; вычислительная эффективность.

DOI 10.14258/izvasu(2013)1.2-40

Введение. Одной из наиболее важных задач прикладной электродинамики является задача синтеза антенн, т. е. выбор пространственной конфигурации и способа питания излучающей системы, которые обеспечили бы необходимые характеристики излучения антенны (прежде всего, заданное пространственное распределение поля) и ее согласования с фидером [1]. Поскольку геометрические параметры антенны и конфигурация питающих токов связаны с характеристиками излучения достаточно сложным образом, задача синтеза в общем случае неразрешима.

Тем не менее, если тип синтезируемой антенны известен, а задача сводится к оптимизации небольшого числа геометрических параметров антенны, синтез может быть успешно выполнен. В последние годы для решения подобных задач активно и успешно применяются эвристические алгоритмы [2], в их числе генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети, имитация отжига, метод роя частиц, муравьиные алгоритмы и многие другие.

Популярность эвристических алгоритмов обоснована, прежде всего, их универсальностью, т. е. тем, что большинство из них не требуют доработки и каких-либо изменений при переходе с одной задачи на другую. Такая нечувствительность к решаемой задаче объясняется тем, что данные методы включают в себя лишь некоторые правила перебора вариантов решения и абсолютно не зависят от конкретного вида уравнений, описывающих задачу [3]. Второй привлекательной особенностью эвристических алгоритмов является относительная простота их ма-

In this paper the implementation of global optimization methods on antenna array synthesis problem has been carried out in the context of computational efficiency. The linear array of half-wave dipoles has been used as a subject of synthesis. Genetic algorithms, evolution strategies and simulated annealing have been considered. It is shown that for the considered problem the simulated annealing method has maximum performance.

Key words: antenna synthesis; genetic algorithms; evolutionary strategies; simulated annealing; computing performance.

шинной реализации. Обе эти особенности привели к тому, что в настоящее время существует ряд универсальных библиотек, реализующих те или иные эвристические методы, например, Fast Artificial Neural Network Library [4] для искусственных нейронных сетей; galib [5] — для генетических алгоритмов и др. Помимо библиотек, существуют программные продукты, позволяющие применять эвристические алгоритмы пользователям компьютеров, не имеющим навыков программирования.

Независимость эвристических методов от решаемой задачи имеет и недостатки. Наиболее важным из них является то, что среди имеющегося многообразия эвристических методов не представляется возможным априори выделить наиболее эффективный. Один и тот же алгоритм может показывать себя лучше или хуже других в зависимости от решаемой задачи и, более того, от набора начальных условий. Вместе с тем выбор наиболее эффективного алгоритма для решения задачи может значительно уменьшить затраты машинного времени.

Цель данной работы — оценка вычислительной эффективности различных эвристических методов, применяемых для решения задачи синтеза антенн.

1. Постановка задачи синтеза антенн. Задача синтеза антенны по заданной диаграмме направленности теоретически разрешима в силу существования и единственности решения системы уравнений Максвелла. Тем не менее общего метода синтеза до настоящего времени построить не удалось, вследствие чего необходимо искать приближенные ме-

тоды, применимые для различных классов антенн. Наиболее простым случаем является синтез антенной решетки, состоящей из элементов с известными электродинамическими характеристиками. С одной стороны, это не позволяет точно решить поставленную задачу — речь может идти только о приближенном решении, с другой — поиск решения существенно упрощается [1].

В данной работе рассматривается синтез линейных антенных решеток, состоящих из полуволновых линейных симметричных вибраторов. Вводится еще несколько упрощений: ко всем излучателям подводятся ЭДС, равные по амплитуде, диполи в решетке расположены с постоянным шагом, сдвиг фаз между соседними элементами также представляет собой постоянную величину. Неизвестными параметрами остаются расстояние между соседними элементами d , сдвиг фаз ψ и количество элементов n . В качестве характеристики для синтеза антенны используется коэффициент усиления в направлении максимума излучения G_0 . Решение задачи в этом случае сводится к минимизации функционала:

$$J[n, d, \psi] = G(n, d, \psi) - G_0, \quad (1)$$

где G_0 — целевое значение.

Коэффициент усиления антенны по отношению к изотропному излучателю в направлении максимума излучения имеет следующий вид [6]:

$$G(n, d, \psi) = D_0 \eta = \frac{4\pi |E(\theta_0, \varphi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |E(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (2)$$

где D_0 — коэффициент направленного действия, η — коэффициент полезного действия.

Поле $E(\theta, \varphi)$, создаваемое антенной решеткой в данной точке, представляет собой суперпозицию полей всех ее элементов. Распределение поля, создаваемого одиночным линейным симметричным вибратором в дальней зоне, имеет известное решение [7]. Для получения более точного распределения поля в пространстве с помощью метода наводимых ЭДС [8] учитывается перераспределение токов, появляющееся в результате воздействия частей антенны друг на друга.

С помощью программы MMANA [9] была получена оценка зависимости максимально возможного коэффициента усиления от количества элементов для данного типа антенн. Для получения данной оценки были последовательно построены линейные антенные решетки с количеством элементов, увеличивающимся от 1 до 20. Затем была выполнена оптимизация антенны по максимуму коэффициента усиления, путем подбора сдвигов фаз в диапазоне от 0 до 2π и расстояний между элементами в диапазо-

не от 0 до 2 длин волн. Полученные результаты были аппроксимированы логарифмической функцией. Эта оценка позволяет получить минимальное количество элементов антенны, необходимое для достижения заданного КУ еще до запуска методов глобальной оптимизации.

2. Эвристические алгоритмы глобальной оптимизации. Эвристические алгоритмы в своей основе имеют модель поведения человека-оператора. Подобные методы широко применяются для решения задач высокой вычислительной сложности, т. е. вместо полного перебора вариантов, занимающего существенное время, а иногда технически невозможного, применяется значительно более быстрый, но недостаточно обоснованный теоретически, алгоритм; также их применяют в том случае, когда общее решение поставленной задачи получить невозможно. Задача синтеза антенн относится к числу неразрешимых в общем случае, поэтому применение эвристических алгоритмов для ее решения представляется обоснованным.

На решении обратной задачи предлагается протестировать следующие методы глобальной оптимизации: генетические алгоритмы, эволюционные стратегии и имитацию отжига.

Генетический алгоритм — это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию [5]. Общий вид генетического алгоритма представлен на рисунке 1.

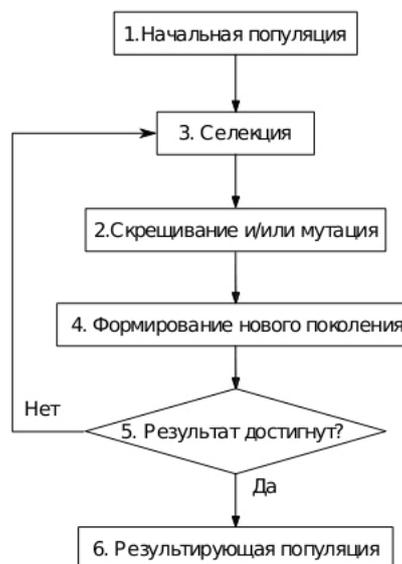


Рис. 1. Общий вид генетических алгоритмов

Алгоритм имитации отжига основан на моделировании физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества из жид-

кого состояния в твердое (к примеру, при отжиге металлов). Процесс протекает при понижающейся температуре, а атомы в веществе уже выстроились в кристаллическую решетку. Однако переходы отдельных атомов из одной ячейки в другую еще возможны [10].

Эволюционные стратегии схожи с генетическими алгоритмами, но существует несколько существенных различий. Во-первых, эволюционные стратегии оперируют векторами действительных чисел, тогда как генетические алгоритмы — двоичными векторами. Во-вторых, при реализации эволюционных стратегий вначале производится рекомбинация, а потом селекция. Такой подход означает равную вероятность для всех особей произвести потомство. В-третьих, вероятности скрещивания и мутации генетических алгоритмов остаются постоянными на протяжении всего процесса эволюции. Для эволюционных стратегий эти параметры подвергаются непрерывным изменениям [9].

Для всех алгоритмов решение представляется как совокупность искомым параметров d, ψ , а функция приспособленности — как функционал (1). Количество элементов антенны определяется из оценочных данных. Таким образом, наиболее приспособленным окажется решение, обеспечивающее коэффициент усиления антенны, наиболее близкий к заданному.

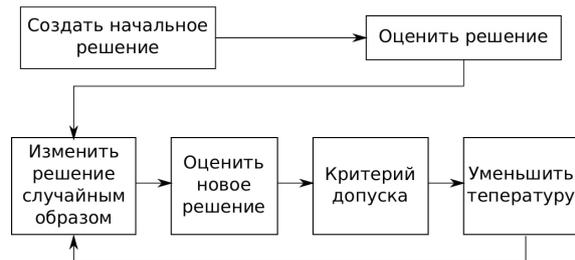


Рис. 2. Общий вид алгоритмов имитации отжига

3. Численные результаты. Были написаны расчетные программы на языке C, которые с помощью вышеперечисленных алгоритмов решают задачу синтеза антенн. Считается, что решение найдено, если коэффициент усиления синтезированной антенны отличается от заданного не более чем на 0,1%. Так как для всех алгоритмов поиск решения производится случайным образом, время выполнения — случайная величина. Измерение времени работы каждой программы проводилось 1000 раз для случайно выбранного коэффициента усиления. При этом гарантировалось, что все синтезируемые антенные решетки состоят из одинакового количества элементов (в данном случае — 3) для того, чтобы исключить систематическую ошибку, связанную с увеличением времени вычислений при анализе и синтезе решеток с большим числом элементов. Распределения плотности вероятности по времени работы программ представлены на рисунках 3–5.

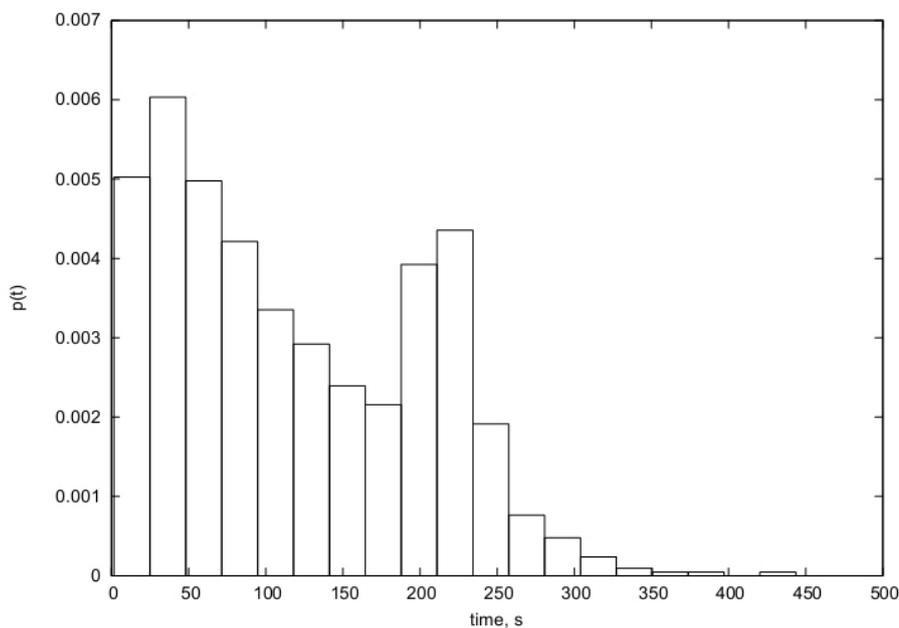


Рис. 3. Распределение времени работы генетических алгоритмов

В среднем время поиска оптимального решения составило: 79.82 с — для эволюционных стратегий, 118.22 с — для генетических алгоритмов, 128.03 с — для имитации отжига. Очевидно, что эволюционные

стратегии являются наиболее подходящим методом для решения данного класса задач. В таблице приведено несколько примеров антенн, сгенерированных с помощью эволюционных стратегий.

Ga вх., dB	N	d, λ	ψ, °	MMANA Ga, dB	Ошибка, %
5.0	2	0.9880	0.77	5.00	0.00
5.5	2	1.8661	328.69	5.50	0.00
6.0	2	1.2904	168.30	6.00	0.00
6.5	3	1.3619	2.29	6.50	0.00
7.0	3	1.1971	259.37	7.00	0.00
7.5	3	1.0739	111.21	7.50	0.00
8.0	3	1.3367	202.43	8.00	0.00
8.5	4	1.6579	94.66	8.50	0.00
9.0	4	1.1232	114.77	9.00	0.00
9.5	4	1.2221	197.67	9.50	0.00
10.0	5	1.0988	174.34	10.01	0.10

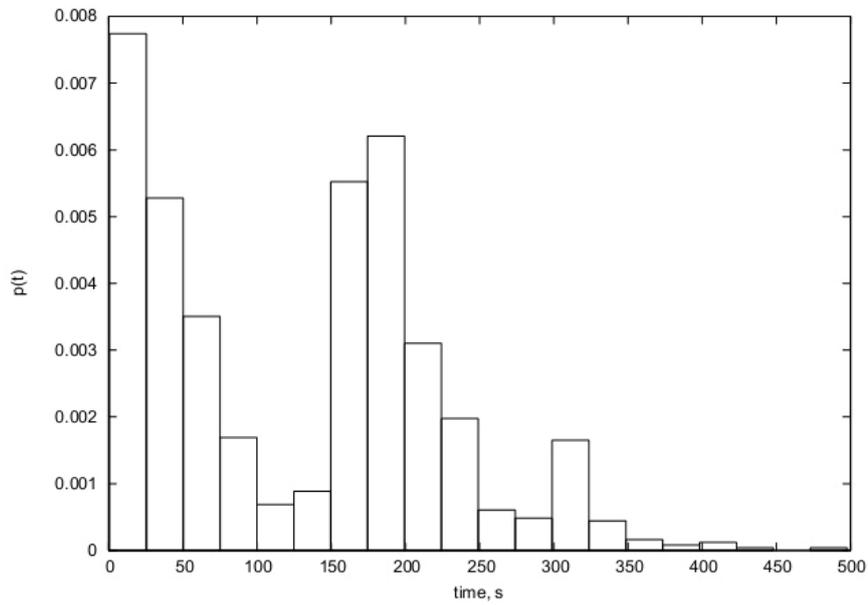


Рис. 4. Распределение времени работы имитации отжига

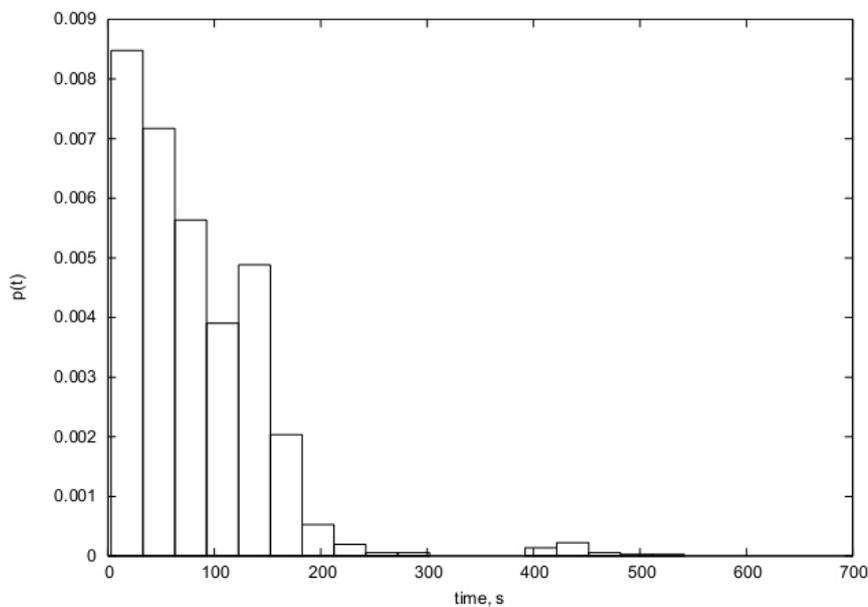


Рис. 5. Распределение времени работы эволюционных стратегий

В первом столбце этой таблицы — коэффициент усиления, который необходимо было получить. Следующие три столбца — параметры антенны, полученные от эвристического алгоритма и необходимые для того, чтобы получить антенну с заданным коэффициентом усиления. Пятый столбец — коэффициент

усиления, полученный при помощи программы MMANA, при построении антенны с данными характеристиками. Последний столбец таблицы — относительная ошибка, с которой было найдено решение. Видно, что допущенные ошибки не превышают заданного значения 0.1%.

Библиографический список

1. Методы синтеза антенн: фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием / Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов. — М., 1980.
2. Газизов Т.Т. Алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками: дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 2008.
3. Королёв Л.Н. Эволюционные вычисления, нейросети, генетические алгоритмы — формальные постановки задач // *Фундаментальная и прикладная математика*. — 2009. — Т. 15, № 3.
4. Fast Artificial Neural Network Library [Электронный ресурс]. — URL: <http://leenissen.dk/fann/wp/>.
5. GAlib: Matthew's Genetic Algorithms Library — MIT [Электронный ресурс]. — URL: <http://lancet.mit.edu/ga/>.
6. Айзенберг Г.З., Белоусов С.С. Коротковолновые антенны. — 2-е изд. — М., 1985.
7. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. — 2-е изд. — М., 1971.
8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учебник для радиотехн. спец. вузов. — М., 1988.
9. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. — М., 2002.
10. Hajek B., Sasaki G. Simulated annealing-to cool or not // *Syst. Control Lett.* — 1989. — Vol. 12, no. 4.