

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА НА БАЗЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ СИНТЕЗА АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С СЕКТОРНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: alexey.galan@gmail.com*

Разработан эффективный численный алгоритм глобальной оптимизации на базе метода роя частиц. Описана схема построения алгоритма и факторы, определяющие эффективность его применения для решения многопараметрических задач, типичных для электромагнитного синтеза. В качестве примера решена задача синтеза линейной антенной решетки с секторной диаграммой направленности. Определены оптимальные параметры алгоритма (тип граничных условий и весовые коэффициенты) для решения рассматриваемой задачи. Ил. 9. Табл. 2. Библиогр.: 26 назв.

Ключевые слова: глобальная оптимизация, метод роя частиц, электромагнитный синтез, антенные решетки.

Электромагнитный синтез является одним из наиболее актуальных и перспективных направлений вычислительной электродинамики, поскольку открывает кратчайший путь к созданию устройств и систем с уникальными рабочими характеристиками. С математической точки зрения электромагнитный синтез является поиском глобального экстремума функции многих переменных, описывающей «качество» найденного решения поставленной задачи. Сложность решения такой задачи связана с большим количеством параметров, как правило, необходимым для описания реалистичных моделей радиотехнических устройств, а также со сложным рельефом пространства решений целевых функций, соответствующих электромагнитным задачам.

Для решения подобных задач ученые обратились к природе. Имитация природных механизмов эволюции позволила создать алгоритмы, не требующие начальных приближений и защищенные от «зависания» в локальных экстремумах [1]. Среди них различают несколько основных разновидностей: генетический алгоритм [2–6], алгоритм на базе методов роя частиц (МРЧ) [7–10], муравьиной колонии [11] и плавления [12]. В основе этих алгоритмов лежат различные модели, заимствованные у природы, однако все они опираются на принцип манипулирования вероятностью с целью управления квазислучайным поиском в областях пространства решений, которые определяются как наиболее перспективные с точки зрения близости к глобальному экстремуму.

В последнее время все большей популярностью пользуется оптимизация с помощью МРЧ – в англоязычной литературе *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Этот метод имитирует рой пчел, исследующий незнакомое поле в поисках пищи [8]. В процессе поиска пчелы обмениваются информацией об увиденном, в результате чего весь рой устремляется в область наибольшего из найденных скоплений цветов. Имитация поведе-

ния пчелиного роя позволяет создать простой интуитивно понятный алгоритм, который на начальном этапе обеспечивает равномерное исследование всего заданного пространства решений (соответствующего рассматриваемой задаче оптимизации), а на более позднем – быструю сходимость к лучшему из найденных решений. При этом участие конечного числа частиц (виртуальных пчел) в процессе поиска, а также обмен информацией между ними гарантируют защищенность алгоритма от преждевременного «зависания» в локальных экстремумах.

МРЧ является идеально приспособленным к решению задач с непрерывно меняющимися параметрами, что делает его привлекательным для решения широкого класса задач электродинамики, в частности синтеза антенн [8, 13, 14] и антенных решеток (АР) [15–17], частотно-селективных поверхностей [18], а также задач дистанционного зондирования [19, 20].

В данной работе описывается схема построения алгоритма на базе МРЧ, а также обсуждаются факторы, влияющие на эффективность его работы. В качестве примера рассмотрена задача синтеза линейной АР с секторной диаграммой направленности (ДН), характерной для базовых станций систем связи.

Целью работы является апробация разработанного алгоритма для решения многопараметрических задач, типичных для электромагнитного синтеза, изучение влияния граничных условий (ГУ) на скорость сходимости решения, а также определение оптимальных значений весовых коэффициентов, обеспечивающих эффективную работу алгоритма при решении задачи синтеза АР с секторной ДН.

Следует отметить, что, в отличие от задачи синтеза АР с игольчатой ДН, синтез АР с секторной ДН не может быть решен аналитическими методами [21]. Это объясняет актуальность и важность разработки алгоритмов численной оптимизации для решения рассматриваемой задачи.

1. Алгоритм оптимизации на базе МРЧ.

Классическая схема построения алгоритма на базе МРЧ представлена на рис. 1.

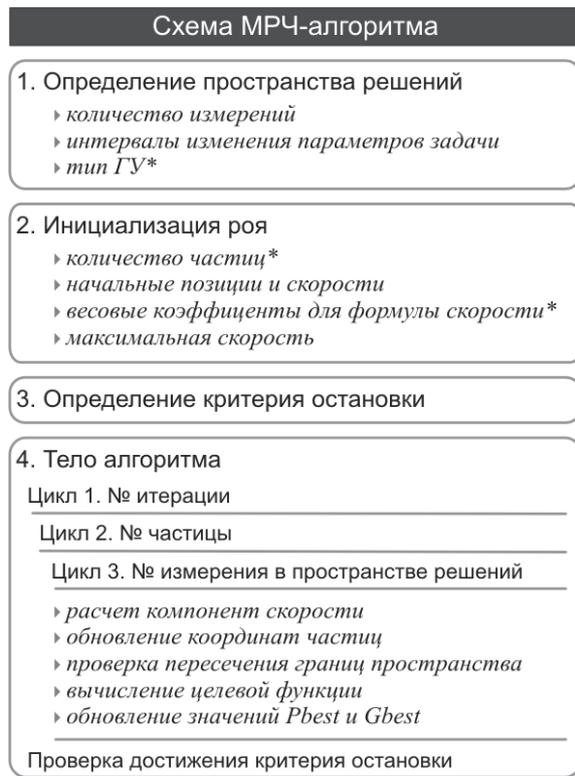


Рис. 1. Схема МРЧ-алгоритма. Знаком «*» отмечены факторы, влияние которых на работу алгоритма исследуется в данной работе

Для описания алгоритма используется следующая терминология. Пространство решений – объем в N -мерном пространстве (N – количество параметров задачи, подлежащих оптимизации), который содержит все допустимые комбинации физических параметров задачи. Каждая точка пространства определяется набором координат, которые однозначно определяют одну из допустимых конфигураций оптимизируемого устройства. При этом целью оптимизации является нахождение лучшего (или приемлемого) решения в заданном пространстве решений заданной целевой функции.

Целевая функция – это функция всех физических параметров задачи, возвращающая число, которое характеризует «качество» решения, например соответствие ДН оптимизируемой антенны заданному шаблону.

Граничные условия. Как правило, физические параметры имеют допустимый интервал изменения значений, определяемый технологическими и/или физическими особенностями решаемой задачи. Для их описания в МРЧ вводится понятие ГУ. При пересечении частицей любой из границ пространства решений частица возвращается

ся в пространство решений (т. е. в область допустимых значений соответствующего параметра), а соответствующая компонента скорости изменяется в зависимости от типа выбранного ГУ (рис. 2).



Рис. 2. Различные типы границ и правила изменения величин компонент скорости при пересечении границы

Классифицируются ГУ по аналогии с классической механикой как отражающее, поглощающее и демпфирующее [8, 22]. Кроме этого, иногда применяется прозрачная граница [23], при пересечении которой частица продолжает свое движение, не изменяя траекторию, однако целевая функция в точках за пределами пространства решений не вычисляется, что приводит к быстрому возвращению частицы в область допустимых значений под действием «притяжения» со стороны персонального и глобального максимумов. Влияние ГУ на эффективность алгоритма зависит от рельефа пространства решений: чем больше локальных экстремумов расположено вблизи границы, тем больше частиц они притягивают и тем выше вероятность столкновения частиц с границами, что, в свою очередь, увеличивает влияние ГУ на скорость сходимости и стабильность обнаружения оптимального решения задачи. В большинстве случаев поглощающее и отражающее ГУ стимулируют исследование периферийной и внутренней областей пространства решений, соответственно, в то время как демпфирующая и прозрачная границы обеспечивают равномерное исследование всей области допустимых значений.

Простейший способ визуализации влияния ГУ на работу алгоритма состоит в контроле количества соударений частиц с границами на каждом шаге оптимизации. Такая информация позволяет косвенно оценить рельеф целевой функции, определить степень важности выбора ГУ, а также построить адаптивный алгоритм, способный к изменению пространства решений с целью скорейшего поиска глобального экстремума (подобная модификация МРЧ-алгоритма описана в работе [24]).

Рой частиц представляет собой конечный набор виртуальных частиц, каждая из которых характеризуется положением и скоростью.

Как правило, частицы начинают движение из произвольно выбранных положений со случайными скоростями.

Количество частиц варьируется в зависимости от количества параметров задачи. Бóльшее количество частиц ($K > 10$) позволяет более полно исследовать пространство решений, но приводит к увеличению количества вызовов целевой функции. Использование же небольшого количества частиц ($K \leq 10$) позволяет сократить вычисления, однако может приводить к «зависанию» в локальных экстремумах.

Скорость частицы. Ключевым понятием алгоритма на базе МРЧ является адаптивный вектор скорости $\vec{v} = (v_1, v_2, \dots, v_N)$, определяемый для каждой частицы на каждом шаге алгоритма с учетом трех факторов:

- инерции движения частицы;
- местонахождением точки соответствующей лучшему из решений, найденному частицей (такое решение именуется персональным максимумом, или $Pbest$);
- местонахождением точки, которое соответствует лучшему из решений, найденному роem на текущий момент времени (такое решение именуется глобальным максимумом, или $Gbest$).

При этом скорость и координата каждой частицы на любом шаге оптимизации определяется итеративным образом:

$$\left\{v_n^{i+1}\right\}_k = w\left\{v_n^i\right\}_k + c_1 r_1 \left(\left\{p_n^i\right\}_k - \left\{x_n^i\right\}_k\right) / \Delta t + c_2 r_2 \left(g_n^i - \left\{x_n^i\right\}_k\right) / \Delta t; \quad (1)$$

$$\left\{x_n^{i+1}\right\}_k = \left\{x_n^i\right\}_k + \left\{v_n^{i+1}\right\}_k \Delta t, \quad (2)$$

где $\left\{v_n^i\right\}_k$ и $\left\{x_n^i\right\}_k$ – скорость и координата k -й частицы в n -м измерении на i -м шаге; Δt – единичный интервал времени; p_n^i и g_n^i – текущие значения компонент $Pbest$ и $Gbest$; w , c_1 и c_2 – весовые коэффициенты; r_1 и r_2 – независимые случайные величины в интервале $[0,1]$.

Такое определение скорости, предложенное в работе [6], обеспечивает квазислучайное блуждание частиц под действием притяжения со стороны $Pbest$ и $Gbest$ [17]. При этом величина весового коэффициента w определяет подвижность частиц, а величины коэффициентов c_1 и c_2 – восприимчивость к притяжению: чем легче частица (меньше инерционный вес), тем резче изменяется траектория ее движения и тем прямолинейней становится ее движение в направлении $Pbest$ и $Gbest$. Наличие в формуле случайных величин вносит случайное отклонение от прямолинейной траектории движения, что обеспечивает большую область захвата.

Следует отметить, что неверный баланс весовых коэффициентов может приводить к «метанию» частиц (скачкообразному перемещению с большой скоростью), что негативно сказывается на скорости сходимости алгоритма. Чтобы избежать этого, подвижность частиц может быть ограничена вводом дополнительного параметра максимально допустимой скорости. При этом индикатором правильного баланса весовых коэффициентов может служить поведение нормированной средней скорости, определяемой на любом шаге оптимизации как

$$\bar{v}_i = \frac{1}{NK} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{\left\{v_n^i\right\}_k}{v_{\max}^n}, \quad (3)$$

где N – количество измерений, равное количеству параметров задачи; K – количество частиц; v_{\max}^n – максимально допустимая скорость в n -м измерении.

В случае правильно выбранного баланса средняя скорость частиц должна постепенно снижаться в процессе счета и стремиться к нулю на последнем этапе оптимизации.

Проверка и при необходимости обновление значения $Gbest$ (единого для всего роя) может выполняться после вычисления нового значения координаты каждой из частиц и соответствующего ей значения целевой функции или в конце цикла по всем частицам. Первый вариант сокращает время реагирования роя на обнаружение нового $Gbest$; второй позволяет естественным образом реализовать «пошаговую стратегию» удобную при организации параллельных вычислений на многопроцессорных машинах, поскольку не требует обновления $Gbest$ в «реальном времени» [17, 25].

В качестве критерия остановки может использоваться заданное число итераций, значение целевой функции или дополнительное условие, например отсутствие дальнейшего улучшения значения $Gbest$ на продолжении заданного количества итераций (стагнация).

Адаптация параметров. Как и любой другой эволюционный метод глобальной оптимизации, МРЧ исследует пространство решений в поисках перспективного начального приближения для дальнейшего псевдоглобального поиска. При этом на начальном этапе более важным является исследование всего доступного пространства решений, а на более позднем – локальный поиск в окрестности лучшего из найденных решений. Изменение значений весовых коэффициентов в процессе работы алгоритма позволяет адаптировать его способность к глобальному и локальному поиску, что является ключевым фактором эффективной работы алгоритма. Наиболее часто применяемая адаптивная схема предполагает линейное снижение значения весового коэффициента w в процесс счета в заданном интервале $[w_1, w_2]$, что

приводит к постепенному замедлению движения частиц. Отметим, что в случае $c_1 = c_2 = 0$ значение $w > 1$ соответствует равноускоренному движению, а $w < 1$ – равнозамедленному.

2. Постановка задачи. Ключевыми элементами современных систем связи и радаров являются АР. С их помощью можно удовлетворить разнообразные требования, предъявляемые к современным радиотехническим системам, включая формирование игольчатых и секторных диаграмм, электронное сканирование и перестройку и др. [21]. Как правило, задача синтеза АР сводится к определению амплитудно-фазового распределения, обеспечивающего требуемые характеристики излучения (форму ДН, значение коэффициента направленного действия, пр.).

Нами рассматривается задача синтеза линейной симметричной эквидистантной АР с секторной ДН (рис. 3).

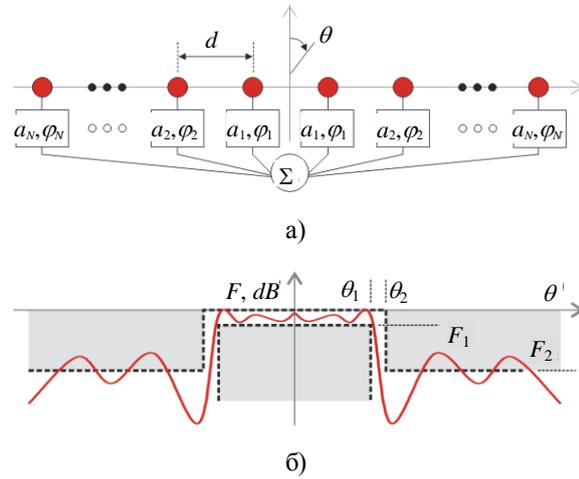


Рис. 3. Симметричная линейная АР с четным числом элементов: а) – геометрия и принятые обозначения; б) – шаблон для множителя решетки

Решетка состоит из $2N$ изотропных излучателей, расположенных вдоль одной прямой на расстоянии $d = 0,5\lambda$, где λ – длина волны. Поле такой решетки в дальней зоне может быть записано в виде

$$E_{\theta} = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} F(\theta), \quad (4)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $F(\theta)$ – множитель решетки, определяемый для случая симметричной решетки с четным количеством элементов формулой

$$F(\theta) = 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos\left((2n-1)\frac{kd}{2} \cos\theta\right) e^{i\varphi_n}, \quad (5)$$

где a_n и φ_n – амплитуда и фаза n -го элемента соответственно [21].

Целью оптимизации является определение амплитудно-фазового распределения, которое обеспечит требуемую форму множителя решетки. Поскольку решетка является симметричной, оптимизации подлежат параметры только половины элементов решетки.

Целевая функция, соответствующая поставленной задаче, может быть задана как

$$F_{cost} = \sum_{m=1}^M \left[\left((F_1 - F(\theta_m)) \Delta\theta \right) \Big|_{\theta_m \in [0, \theta_1]} \cup (F < F_1)^+ + \left((F(\theta_m) - F_2) \Delta\theta \right) \Big|_{\theta_m \in [\theta_2, \pi/2]} \cup (F > F_2)^- \right] \quad (6)$$

где M – количество точек разбиения интервала $[0, \pi/2]$; $\theta_m = m\Delta\theta$; $\Delta\theta = \pi/2M$; θ_1, θ_2, F_1 и F_2 – параметры шаблона (см. рис. 3, б).

Определенная таким образом целевая функция равняется сумме пени, начисляемой за нарушение заданного шаблона.

3. Численные результаты. Для решения поставленной задачи был разработан МРЧ-алгоритм, архитектура которого соответствует классической схеме, приведенной на рис. 1. Алгоритм предусматривает возможность выбора любого типа граничного условия (рис. 2). При вычислениях максимальная скорость в каждом измерении ограничивается значением

$$v_{max}^n = \frac{1}{2} (x_{max}^n - x_{min}^n) / \Delta t, \quad (7)$$

где x_{max}^n и x_{min}^n – максимально и минимально допустимые значения n -го параметра задачи.

Для оценки эффективности работы алгоритма мы будем контролировать значение целевой функции и средней скорости частиц на каждом шаге. При этом целью исследования будет определение оптимальных значений параметров алгоритма с точки зрения скорости сходимости и стабильности нахождения оптимального решения поставленной задачи.

Поскольку оптимизационный алгоритм на базе МРЧ имеет стохастическую природу, судить об эффективности его работы можно, опираясь только на статистику многократных независимых запусков (все приводимые в работе результаты являются усредненными по 50 запускам).

В качестве примера рассмотрим АР, состоящую из 30 элементов. С учетом симметрии оптимизации подлежат 29 параметров: амплитуды 15 элементов и фазы 14 из них (фаза центрального элемента подразумевается равной нулю, $\varphi_1 = 0$). Задача оптимизации состоит в нахождении амплитудно-фазового распределения, обеспечивающего форму множителя решетки, которая определяется шаблоном (рис. 3, б); его параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры шаблона для множителя АР			
θ_1	θ_2	F_1	F_2
28°	30°	-2 дБ	-17 дБ

Диаграмма множителя решетки, а также соответствующие ей значения амплитуды и фазы, найденные в результате оптимизации, приведены на рис. 4.

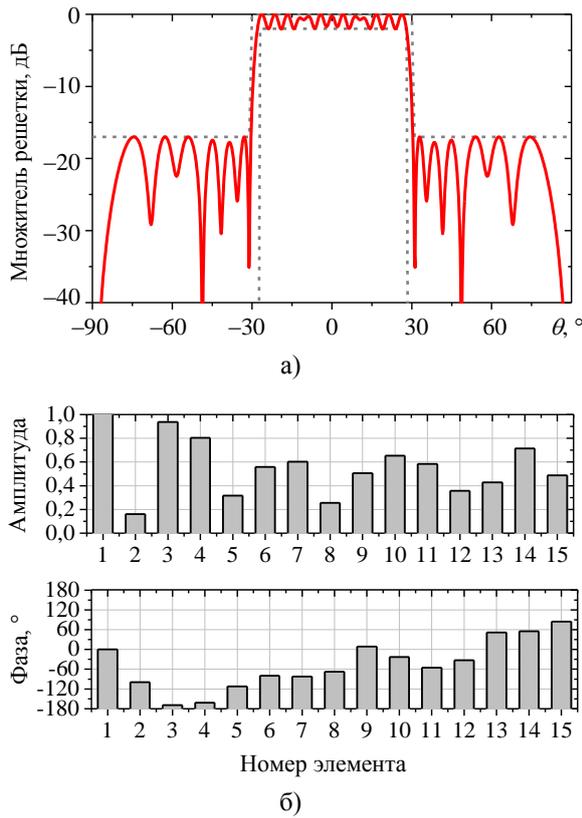


Рис. 4. Характеристики оптимизированной АР: а) – нормированный множитель решетки; б) – амплитудно-фазовое распределение

Как видно, поставленная задача формирования широкоугольной секторной ДН может быть успешно решена при условии обеспечения правильного амплитудно-фазового распределения на элементах АР. Отметим, что данное решение не является единственно возможным, что оставляет возможность выбора оптимальной конфигурации АР с учетом дополнительных технологических критериев. Поскольку целью данной работы в первую очередь является изучение особенностей использования МРЧ-алгоритма при решении задач синтеза линейных АР, мы ограничимся демонстрацией существования решения поставленной задачи и уделим более пристальное внимание процессу его поиска.

Как было отмечено в разд. 1, одним из факторов, определяющих эффективность работы МРЧ-алгоритма, является выбор ГУ. Для определения оптимального типа ГУ для решения рассматриваемой задачи была выполнена серия вычислений с использованием различных типов ГУ и следующего набора параметров: $K = 40$, $w_1 = 1,1$, $w_2 = 0,5$, $c_1 = c_2 = 1,5$, что соответствует общим рекомендациям, данным в работе [8]. При этом критерий остановки был определен как заданное число итераций (300).

Исследование показало, что при решении задачи синтеза АР с секторной ДН лучшая скорость сходимости и качество финального решения достигаются при использовании демпфирующего ГУ (рис. 5).

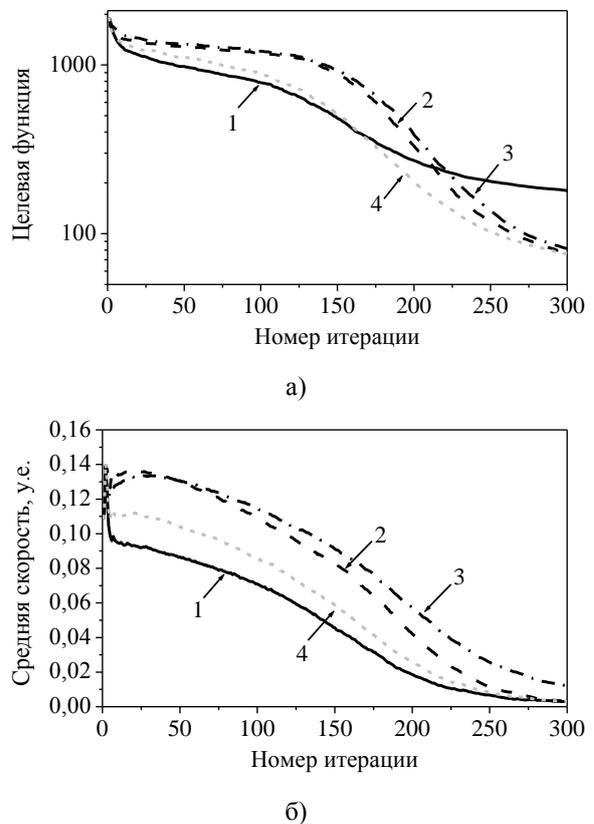


Рис. 5. Зависимость усредненных значений: а) – целевой функции и б) – средней скорости от номера итерации для различных типов ГУ: 1) – поглощающее; 2) – отражающее; 3) – прозрачное; 4) – демпфирующее

Это объясняется значительным разбросом оптимальных значений амплитуды и фазы (см. рис. 4, б), обнаружение которых требует равномерного исследования всего пространства решений, что достигается при использовании демпфирующего ГУ.

Сравнение графиков представленных на рис. 5 позволяет сделать вывод о том, что резкое

снижение средней скорости частиц на начальном этапе, наблюдаемое при использовании поглощающего ГУ, приводит к «зависанию» алгоритма в локальных экстремумах. В то же время отсутствие демпфирующего эффекта на границе (для отражающей и прозрачной границ) может приводить к чрезмерной подвижности частиц, что отрицательно сказывается на их способности к локальному поиску. Именно поэтому наиболее стабильная работа алгоритма достигается при использовании демпфирующего ГУ.

Другими ключевыми параметрами МРЧ-алгоритма являются количество частиц роя и значения весовых коэффициентов в формуле скорости (1). При исследовании влияния этих параметров ограничимся использованием демпфирующего ГУ.

Как видно на рис. 6, для выбранного набора параметров ($w_1 = 1,1$, $w_2 = 0,5$, $c_1 = c_2 = 1,5$) и критерия останова (300 итераций) увеличение количества частиц роя более 30, что примерно совпадает с количеством параметров задачи, не дает существенного улучшения результата. Интересно отметить, что увеличение количества итераций для роя, состоящего из меньшего числа частиц, не гарантирует достижения эквивалентного результата (рис. 7).

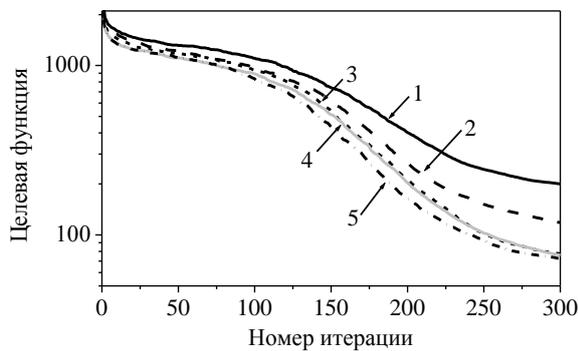


Рис. 6. Зависимость усредненного значения целевой функции от номера итерации для различного количества частиц, K : 1) – 10; 2) – 20; 3) – 30; 4) – 40; 5) – 50

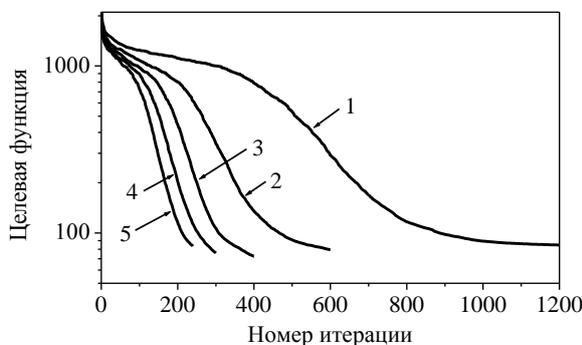


Рис. 7. То же, что на рис. 6 для критерия останова заданного как 12 000 вызовов целевой функции. Конечные значения целевой функции для каждой кривой приведены в табл. 2

Таблица 2
Финальные значения целевой функции для кривых, приведенных на рис. 7

Номер кривой	1	2	3	4	5
Кол-во частиц	10	20	30	40	50
Целевая функции	84,7	79,4	72,4	75,9	83,5

Как видно, при равном количестве вызовов целевой функции оптимальный результат был получен для роя, состоящего из 30 частиц. Тем не менее, принимая во внимание, что в качестве критерия останова мы в дальнейшем вновь будем использовать заданное число итераций (300), а также отдавая предпочтение качеству финального результата и учитывая быстроту вычисления используемой целевой функции, мы будем использовать в дальнейшем 40 частиц.

Анализ работ других авторов [7, 8, 13, 14, 26] позволяет сделать вывод, что наиболее стабильная работа МРЧ-алгоритма наблюдается при $c_1 = c_2 = 1 \sim 2$. Наше исследование показало, что для решения задачи синтеза линейной АР (с использованием следующего набора параметров: демпфирующее ГУ, $K = 40$, $w_1 = 1,1$, $w_2 = 0,5$, критерий останова 300 итераций) лучшая сходимость и качество решения достигаются при $c_1 = c_2 = 1,5$ (рис. 8).

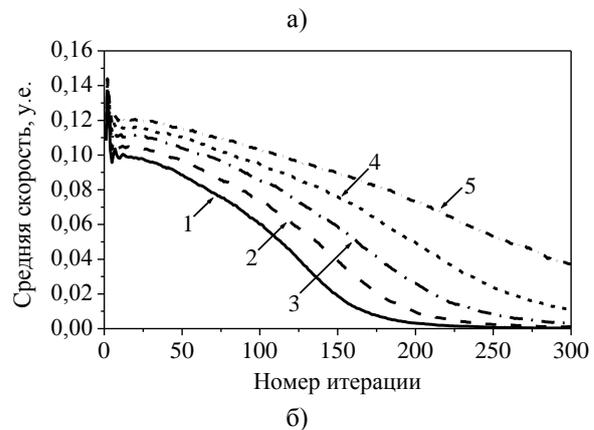
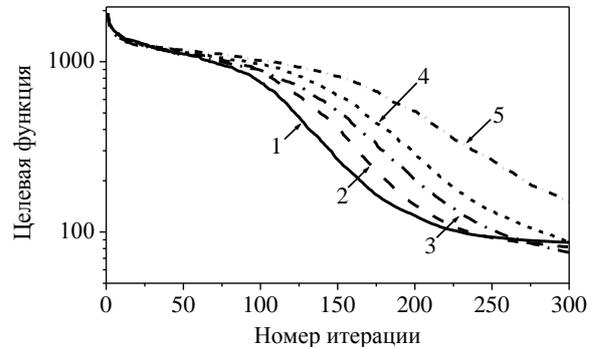


Рис. 8. Зависимость усредненных значений целевой функции и средней скорости от номера итерации для следующих наборов весовых коэффициентов $c_1 = c_2$: 1) – 1,0; 2) – 1,25; 3) – 1,5; 4) – 1,75; 5) – 2,0

Отметим, что при большем значении параметров c_1 и c_2 частицы оказываются слишком быстрыми, что затрудняет группировку частиц и локальный поиск в области лучшего из найденных решений (рис. 8, б). При меньших значениях – скорость снижается слишком резко, что препятствует дальнейшему исследованию пространства решений и, как следствие, приводит к преждевременному «зависанию» частиц в локальных экстремумах.

Рекомендации других авторов относительно оптимального значения инерционного коэффициента w противоречивы. В некоторых работах, например [15, 26], используется $w = \text{const} < 1$, что соответствует равнозамедленному движению. В более поздних работах [8, 16], предлагается выбирать начальное значение параметра w в интервале $1,5 \div 1,0$ и изменять его линейно в процессе счета до уровня $w_2 = 0,5$.

Из приведенных на рис. 9 результатов (полученных для следующих параметров: демпфирующее ГУ, $K = 40$, $w_2 = 0,5$, $c_1 = c_2 = 1,5$, критерий остановки 300 итераций), видно, что для рассматриваемой задачи лучшая скорость сходимости и качество финального решения обеспечиваются при использовании частиц с весом w линейно изменяемом в интервале $0,9 \div 0,5$ или $0,8 \div 0,5$, что несколько ниже значений, рекомендуемых в литературе [7, 8].

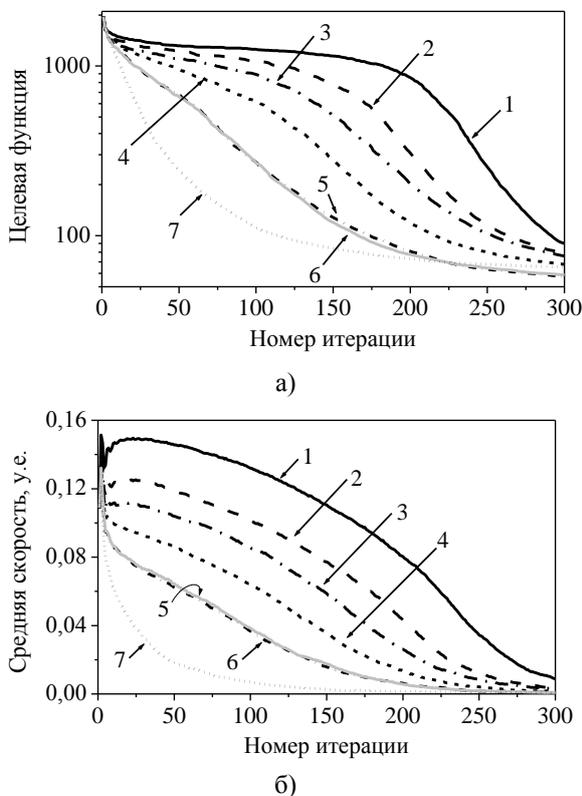


Рис. 9. Зависимость усредненных значений целевой функции и средней скорости от номера итерации для следующих значений весового коэффициента w_1 : 1) – 1,5; 2) – 1,2; 3) – 1,1; 4) – 1,0; 5) – 0,9; 6) – 0,8; 7) – 0,7

Сравнение графиков, представленных на рис. 9, показывает, что в данном случае снова имеет место корреляция между поведением целевой функции и средней скорости частиц. Так, наиболее стабильная работа алгоритма обеспечивается при равномерном снижении средней скорости частиц. Выбор большего (или меньшего) начального значения параметра w приводит к чрезмерной (или недостаточной) подвижности частиц, что негативно сказывается на работе алгоритма.

В заключение хочется еще раз подчеркнуть, что эффективность МРЧ-алгоритма зависит от правильного баланса между всеми параметрами алгоритма, определяющими подвижность частиц, а также рельефом пространства решений рассматриваемой задачи.

Выводы. Таким образом, описана схема построения численного алгоритма глобальной оптимизации на базе МРЧ, а также проанализированы факторы, определяющие эффективность его работы. Разработанный алгоритм апробирован на примере задачи синтеза линейной симметричной эквидистантой АР с секторной ДН, что позволило продемонстрировать эффективность МРЧ-алгоритма при решении многопараметрических задач, типичных для электродинамики.

Систематический анализ влияния параметров МРЧ-алгоритма на скорость сходимости и качество решения позволил определить оптимальные значения параметров алгоритма для решения задачи синтеза линейной АР с широкоугольной секторной ДН. Показано, что наиболее стабильная работа алгоритма при решении данной задачи обеспечивается при использовании демпфирующего ГУ и следующего набора весовых коэффициентов: $w_1 = 0,9$, $w_2 = 0,5$, $c_1 = c_2 = 1,5$.

Следует отметить, что методика определения оптимальных значений параметров алгоритма, а также выводы о влиянии различных параметров на подвижность частиц и приоритетные области поиска являются универсальными и могут использоваться для адаптации МРЧ-алгоритма для решения произвольных задач оптимизации.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины (программа «DNIPRO») и Североатлантического Альянса (грант RIG983313).

1. Hoorfar A. Evolutionary programming in electromagnetic optimization: a review / A. Hoorfar // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2007. – 55, N 3. – P. 523–537.
2. Weile D. S. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: a review / D. S. Weile, E. Michielssen // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1997. – 45, N 3. – P. 343–353.
3. Johnson J. M. Genetic algorithms in engineering electromagnetics / J. M. Johnson, Y. Rahmat-Samii // IEEE Antennas Propag. Mag. – 1997. – 39, N 4. – P. 7–21.
4. Haupt R. L. Genetic algorithms in electromagnetic / R. L. Haupt, D. H. Werner. – New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2007. – 301 p.

5. *Boriskin A. V.* Hybrid genetic algorithm for fast electromagnetics synthesis / A. V. Boriskin, R. Sauleau // *Int. Symp. Physics Engineering mm and sub-mm waves (MSMW): Proc.* – Kharkiv, 2010. – P. ID#E1.
6. *Субботин С. А.* Сравнительный анализ методов эволюционного поиска / С. А. Субботин, А. А. Олейник // *Искусственный интеллект: науч.-теор. журнал.* – 2008. – № 2. – С. 44–49.
7. *Kennedy J.* Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. C. Eberhart // *IEEE Conf. Neural Networks IV: Proc.* – Piscataway, 1995. – 52. – P. 1942–1948.
8. *Robinson J.* Particle swarm optimization in electromagnetics / J. Robinson, Y. Rahmat-Samii // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2004. – 52, N 2. – P. 397–407.
9. *Олійник О. О.* Оптимізація на основі колективного інтелекту рою часток з керуванням змінною їхньою швидкістю / О. О. Олійник, С. О. Субботін // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління: наук. журн.* – 2009. – № 2. – С. 96–101.
10. *Карпенко А. П.* Обзор методов рою частиц для задачи глобальной оптимизации (Particle Swarm Optimization) / А. П. Карпенко, Е. Ю. Селиверстов // *Наука и образование: электрон. науч.-тех. изд.* – 2009. – № 3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.technomag.edu.ru](http://www.technomag.edu.ru). – Загл. с экрана.
11. *Rajo-Iglesias E.* Linear array synthesis using an ant-colony-optimization-based algorithm / E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel // *IEEE Antennas Propag. Mag.* – 2007. – 49, N 2. – P. 70–79.
12. *Kirkpatrick S.* Optimization by simulated annealing / S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., M. P. Vecchi // *Science.* – 1983. – 220. – P. 671–680.
13. *Liu W. - C.* Design of a multiband CPW-fed monopole antenna using a particle swarm optimization approach / W. - C. Liu // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2005. – 53, N 10. – P. 3273–3279.
14. *Jin N.* Parallel particle swarm optimization and finite-difference time-domain (PSO/FDTD) algorithm for multiband and wide-band patch antenna designs / N. Jin, Y. Rahmat-Samii // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2005. – 53, N 11. – P. 3459–3468.
15. *Boeringer D. W.* Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array synthesis / D. W. Boeringer, D. H. Werner // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 52, N 3. – P. 771–779.
16. *Donelli M.* An innovative computational approach based on a particle swarm strategy for adaptive phased-arrays control / M. Donelli, R. Azaro, F. G. B. De Natale, A. Massa // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2006. – 54, N 3. – P. 888–898.
17. *Jin N.* Advances in particle swarm optimization for antenna designs: real-number, binary, single-objective and multiobjective implementations / N. Jin, Y. Rahmat-Samii // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2007. – 55, N 3. – P. 556–567.
18. *Genovesi S.* Particle swarm optimization for the design of frequency selective surfaces / S. Genovesi, R. Mittra, A. Monorchio, G. Manara // *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* – 2006. – 5, N 1. – P. 277–279.
19. *Pastorino M.* Stochastic optimization methods applied to microwave imaging: a review / M. Pastorino // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2007. – 55, N 3. – P. 538–548.
20. *Donelli M.* Computational approach based on a particle swarm optimizer for microwave imaging of two-dimensional dielectric scatterers / M. Donelli, A. Massa // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2005. – 53, N 5. – P. 1761–1776.
21. *Hansen R. C.* Phased array antennas / R. C. Hansen. – New York: Wiley, 2009. – 547 p.
22. *Huang T.* A hybrid boundary condition for robust particle swarm optimization / T. Huang, A. S. Mohan // *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* – 2005. – 4. – P. 112–117.
23. *Xu S.* Boundary conditions in particle swarm optimization revisited / S. Xu, Y. Rahmat-Samii // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2007. – 55, N 3. – P. 760–765.
24. *Galan A. Yu.* Particle swarm optimization algorithm with moving boundaries as a powerful tool for exploration research / A. Yu. Galan, R. Sauleau, A. V. Boriskin // *European Conf. Antennas Propag. (EuCAP): Proc.* – Rome, 2011, ID1569370283.
25. *Carlisle A.* An off-the-shelf PSO / A. Carlisle, G. Dozier // *Workshop Particle Swarm Optimization: Proc.* – Indianapolis, 2001. – P. 1–6.
26. *Shi Y.* Parameter selection in particle swarm optimization / Y. Shi, R. C. Eberhart // *EP'98 VII: Proc.* – New York, 1998. – P. 591–600.

A. Yu. Galan, A. V. Boriskin

PARAMETER SELECTION IN PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF LINEAR ARRAYS WITH FLAT-TOP BEAMS

An efficient global optimization algorithm based on the Particle Swarm Optimization approach is developed and applied for synthesis of a linear antenna array with a flat-top beam. A flowchart of the algorithm is provided along with a discussion on the impacts of different factors affecting the algorithm performance, namely its convergence rate and stability in hitting the global extremum. Finally, the optimal values of the algorithm parameters (weight coefficients and boundary condition type) for the considered problem are determined via systematic study.

Key words: global optimization, particle swarm optimization, electromagnetic synthesis, antenna arrays.

О. Ю. Галан, А. В. Борискин

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ АЛГОРИТМУ НА БАЗІ МЕТОДУ РОЮ ЧАСТОК ДЛЯ СИНТЕЗУ АНТЕННИХ ҐРАТОК ІЗ СЕКТОРНОЮ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНОСТІ

Розроблено ефективний числовий алгоритм глобальної оптимізації на базі методу рою часток. Описано схему побудови алгоритму і чинники, що визначають ефективність його застосування для вирішення багатопараметричних задач, типових для електромагнітного синтезу. Як приклад розглянуто задачу синтезу лінійної антенної ґратки з секторною діаграмою спрямованості. Визначено оптимальні параметри алгоритму (тип граничних умов і вагові коефіцієнти) для розв'язання розглянутої задачі.

Ключові слова: глобальна оптимізація, метод рою часток, електромагнітний синтез, антенні ґратки.

Рукопись поступила 26.11.10 г.