

УДК 621.396.67

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_9

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА
РАДИОЛИНИИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ БАЗОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ
С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ**

**A TECHNIQUE FOR INCREASING THE ENERGY POTENTIAL OF A RADIO
LINK BY USING A BASE EMITTER WITH CONCENTRATED LOADS**

А.А. Шмидт

A.A. Shmidt

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В настоящей работе представлен усовершенствованный методический аппарат синтеза антенных систем с сосредоточенными нагрузками, основанный на применении адаптивных генетических алгоритмов. Для оценки характеристик излучателей, получаемых в процессе выполнения генетического алгоритма, используется метод моментов, где сосредоточенные нагрузки учтены дельта-функцией Дирака. Предложена методика кодирования антенн с нагрузками, механизмы адаптивной настройки параметров генетического алгоритма и специализированные операторы для работы с антенными системами. Теоретически обоснована возможность расширения рабочей полосы частот антенных систем при сохранении требуемых характеристик излучения за счет использования предложенного методического аппарата. Результатом применения данного методического аппарата может быть оптимизация как отдельных излучателей, так и излучателей в составе фазированная антенная решетка (ФАР) и активная ФАР (АФАР).

Ключевые слова: сеть радиосвязи, генетический алгоритм, широкополосность антенн, метод моментов, адаптивные генетические операторы.

This paper presents an improved methodological apparatus for the synthesis of antenna systems with concentrated loads, based on the use of adaptive genetic algorithms. To evaluate the characteristics of the radiators obtained during the execution of the genetic algorithm, the method of moments is used, where concentrated loads are taken into account by the Dirac delta function. A method for encoding antennas with loads, mechanisms for adaptive parameter tuning of the genetic algorithm, and specialized operators for working with antenna systems are proposed. Theoretically, the possibility of expanding the operating frequency band of antenna systems while maintaining the required radiation characteristics is substantiated through the use of the proposed methodological framework. The result of the application of this methodological apparatus can be both optimization of individual radiators and radiators as part of headlamps and arrays.

Keywords: radio communication network, genetic algorithm, antenna broadband, method of moments, adaptive genetic operators.

В современных сетях радиосвязи существует потребность в широкополосных антеннах с улучшенными относительно выпускаемых серийно изделий характеристиками. Особый интерес представляют антенны с сосредоточенными нагрузками, позволяющие достичь широкополосности при сохранении компактных размеров и без существенного повышения сложности их производства. Однако проектирование таких антенн представляет собой достаточно сложную многопараметрическую задачу оптимизации, требующую эффективных методов поиска оптимальных решений [1].

Традиционные методы оптимизации, основанные на градиентных алгоритмах или прямом поиске, зачастую оказываются неэффективными при решении подобных задач из-за их многоэкстремальности и сложной топологии пространства поиска. В связи с этим все большее распространение получают эволюционные методы оптимизации, в частности генетические алгоритмы (ГА), способные осуществлять глобальный поиск в сложных многомерных пространствах [1–3].

Однако применение классических генетических алгоритмов к задачам оптимизации антенн сопряжено с рядом существенных проблем. Во-первых, существующие методы кодирования антенных структур не в полной мере учитывают специфику задачи, что снижает эффективность эволюционного поиска. Во-вторых, использование фиксированных параметров алгоритма не позволяет адекватно реагировать на изменение ландшафта целевой функции в процессе оптимизации. В-третьих, стандартные операторы генетического алгоритма не учитывают особенности проектирования антенных систем.

Целью настоящей работы является повышение эффективности процесса оптимизации антенных систем путем разработки и применения усовершенствованного методического аппарата на основе адаптивных генетических алгоритмов. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка эффективного и однозначно воспринимаемого ЭВМ представления излучателей с сосредоточенными нагрузками для применения генетических алгоритмов;

- создание адаптивных операторов генетического алгоритма с учетом специфики оптимизации антенн;

- уточнение способов проверки особей на соответствие значениям целевой функции.

Генетические алгоритмы представляют собой эффективный метод оптимизации, основанный на принципах эволюции и естественного отбора.

В контексте проектирования антенн задача оптимизации состоит в определении оптимальных типов, значений и расположения нагрузок, а также параметров согласующей цепи для достижения требуемых характеристик в заданном диапазоне частот (рис. 1).

Классические генетические алгоритмы могут сталкиваться с проблемами преждевременной сходимости или медленной конвергенции при решении сложных задач оптимизации антенн [2]. Для преодоления этих ограничений разработан адаптивный ГА, увеличивающий вероятность скрещивания и мутации для особей с низкой приспособленностью, способствуя исследованию пространства поиска, и уменьшает их для особей с высокой приспособленностью, сохраняя хорошие решения.

С целью создания наглядного отображения всех параметров излучателя с сосредоточенными нагрузками, а также для обеспечения взаимнооднозначного соответствия между физическими параметрами антенны и их генетическим представлением, уточнена методика кодирования особей в виде битовой последовательности.

Процесс кодирования реализуется тремя уровнями. На самом нижнем уровне находятся гены — элементарные единицы наследственной информации, кодирующие отдельные характеристики нагрузок. Под описание каждого параметра (тип нагрузки, тип контура и номиналы компонентов) выделяется трехбитовое поле.

Следующий уровень формирует хромосомы, описывающие отдельные узлы антенной структуры. Каждая хромосома представляет собой упорядоченную последовательность генов, полностью характеризующую параметры нагрузки в конкретном узле. Например, для параллельного RLC-контура хромосома будет содержать информацию о типе контура, значениях сопротивления, индуктивности и емкости.

На высшем уровне формируется особь — полное описание антенной структуры, включающее информацию о количестве узлов и последовательность хромосом, описывающих каждый узел. Бинарное представление особи начинается

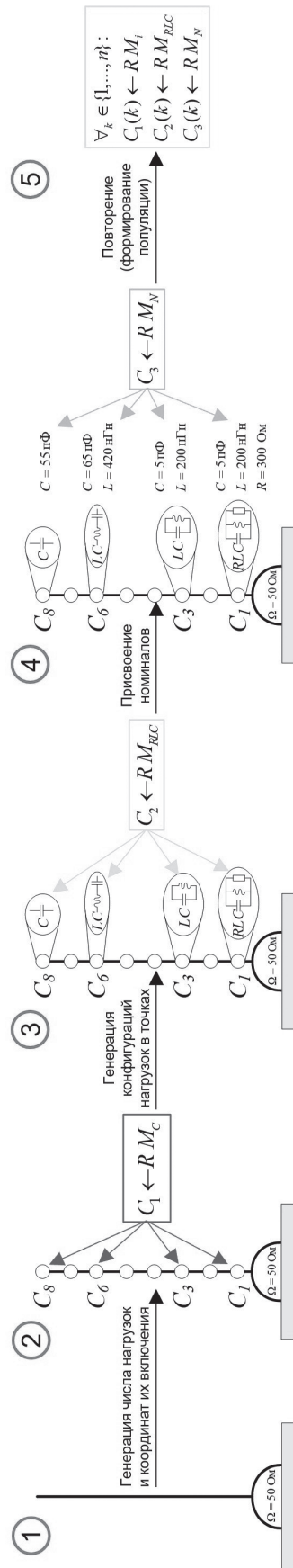


Рис. 1. Формирование особи и механизм формирования популяции

с указания числа узлов, за которым следуют закодированные параметры всех нагрузок. При этом суммарная длина битовой строки, описывающей одну особь, определяется количеством и типом используемых нагрузок (рис. 2).

Такая иерархическая организация генетического кода обеспечивает эффективную работу операторов скрещивания и мутации, позволяя им корректно обрабатывать структурированную информацию об антенной системе в процессе оптимизации.

Механизм формирования начальной популяции для генетического алгоритма изображен на блок-схеме (рис. 3).

В рамках данной работы существенное значение имеет корректное формирование целевой функции и реализация механизмов селекции, обеспечивающих эффективное исследование пространства возможных решений.

При решении задачи оптимизации широкополосного базового излучателя необходимо учитывать комплексный характер требований к его характеристикам [3]. Задача оптимизации учитывает несколько критериев, таких как ко-

эффициент стоячей волны (КСВ) излучателя, его коэффициент усиления G и ширину полосы пропускания BW :

$$\begin{cases} Q_1(x) = \frac{1}{КСВ_{расч}} \rightarrow \max Q_1(x), КСВ \in (1; +\infty); \\ Q_2(x) = G_{ШПБИ} \rightarrow \max Q_2(x); \\ Q_3(x) = BW_{ШПБИ} \rightarrow \max Q_3(x). \end{cases}$$

Для определения приоритетного критерия в каждом конкретном случае предлагается использовать интегральный критерий качества, формируемый на основе взвешенной суммы частных показателей:

$$f(x_i) = w_1 Q_1(x) + w_2 Q_2(x) + w_3 Q_3(x).$$

Для оценки характеристик излучателей, получаемых в процессе генетической оптимизации, используется модифицированный метод моментов, основанный на решении интегрального уравнения электрического поля [4, 5]. Принципиальной особенностью предложенного подхода является введение дополнительного члена,

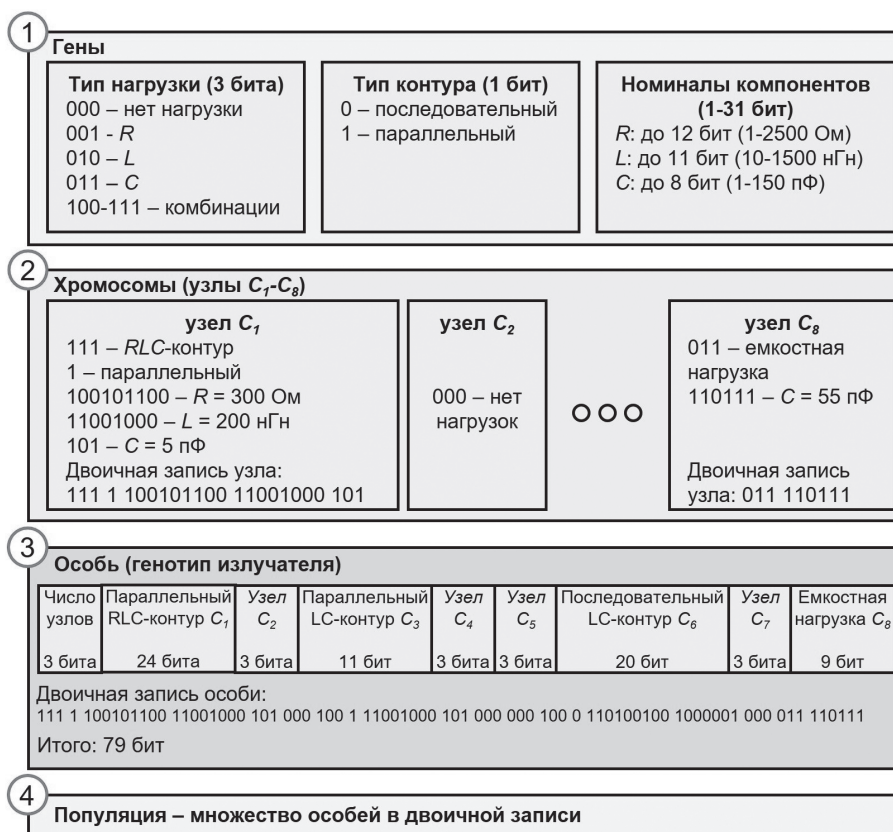


Рис. 2. Генетическое кодирование особи, изображенной на рис. 1



Рис. 3. Механизм формирования начальной популяции для генетического алгоритма

строго описывающего влияние сосредоточенных нагрузок:

$$\vec{E}_i(\vec{r}) = \vec{A}(\vec{r}) + \nabla\Phi(\vec{r}) + \sum_{i=1}^M Z_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) I(\vec{r}) \hat{l},$$

где $\vec{A} = -j\omega\mu_0 \int \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} I(\vec{r}') \hat{l} dl'$ — векторный магнитный потенциал;

$$\Phi = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \cdot \int \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} I(\vec{r}') \hat{l} dl' \quad \text{— скалярный электрический потенциал;}$$

$\sum_{i=1}^M Z_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) I(\vec{r}) \hat{l}$ — влияние сосредоточенных нагрузок.

Использование дельта-функции Дирака для описания вклада сосредоточенных нагрузок в интегральное уравнение не только обеспечивает математическую строгость решения, но и приводит к более точным результатам при численном моделировании, особенно в случаях с множественными нагрузками различных типов (R , L , C и

их комбинации) [6]. В отличие от кусочно-постоянных аппроксимаций или методов эквивалентных схем, использование дельта-функции позволяет избежать искусственного «размазывания» нагрузок по длине антенны и связанных с этим погрешностей в расчете входного импеданса и распределения тока. Более того, такой подход естественным образом интегрируется в метод моментов, что упрощает численную реализацию и повышает вычислительную эффективность алгоритма при сохранении высокой точности результатов.

При решении интегрального уравнения методом моментов, ток в структуре антенны представляется в виде разложения по базисным функциям:

$$I(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N I_n f_n(\vec{r}).$$

Для получения системы линейных уравнений применяется процедура тестирования ме-

тодом Галеркина, при которой в качестве тестовых функций используются те же функции, что и в разложении тока:

$$f_m = f_n;$$

$$\int f_m(\vec{r}) \cdot \vec{E}_1(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N I_n \left(\int f_m(\vec{r}) \cdot [A_n - \nabla\Phi] dl \right).$$

Применение такого подхода позволяет свести интегральное уравнение к системе линейных алгебраических уравнений, записанной в матричной форме:

$$[Z_{mn}] [I_n] = [V_m].$$

При этом матрица импедансов включает две составляющих: электромагнитную составляющую и составляющую, обусловленную наличием сосредоточенных нагрузок в полотне излучателя:

$$[Z_{mn}] = [Z_{mn}^{EM}] + [Z_{mn}^{нагр}].$$

После решения системы линейных алгебраических уравнений и определения распределения тока вдоль полотна излучателя становится возможным вычисление основных характеристик антенны, необходимых для оценки качества полученного решения.

Входной импеданс антенны в точке питания определяется отношением напряжения к току:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in},$$

где R_{in} и X_{in} — активная и реактивная составляющие входного импеданса соответственно.

Коэффициент отражения на входе излучателя определяется по формуле:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0},$$

где Z_0 — характеристическое сопротивление питающей линии (обычно 50 или 75 Ом).

Коэффициент стоячей волны излучателя вычисляется как:

$$КСВ = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}.$$

Коэффициент усиления излучателя вычисляется следующим образом:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{in}},$$

где $U(\theta, \varphi)$ — интенсивность излучения в заданном направлении, а P_{in} — мощность, подводимая к излучателю.

Критерий широкополосности излучателя оценивается как:

$$BW = \frac{2(f_2 - f_1)}{f_2 + f_1},$$

где f_1 — нижняя граничная частота рабочего диапазона;

f_2 — верхняя граничная частота рабочего диапазона при выполнении условий:

$$\begin{cases} \text{КСВ}(f) \leq \text{КСВ}_{\text{доп}}, f \in [f_1, f_2]; \\ G(f) \geq G_{\text{мин}}, f \in [f_1, f_2]. \end{cases}$$

Эффективность генетического алгоритма во многом определяется корректной реализацией генетических операторов и их адаптацией к специфике решаемой задачи. В контексте оптимизации антенных систем особую важность приобретает сохранение физического смысла производимых изменений при одновременном обеспечении достаточного разнообразия генетического материала [6].

Процесс оптимизации реализуется как итеративная процедура, включающая 7 этапов.

1 этап заключается в оценке приспособленности популяции. Для каждой особи вычисляется значение целевой функции $f(x_i)$.

На 2 этапе осуществляется проверка критериев останова генетического алгоритма. Такими критериями могут быть: достижение максимального числа поколений, достижение требуемого значения целевой функции, отсутствие улучшений особей в течение определенного числа поколений.

При невыполнении критерия останова реализуется 3 этап — инициализируется счетчик пар родителей и начинается процесс формирования нового поколения. Вероятность выбора особи для скрещивания определяется ее приспособленностью:

$$P(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_j)},$$

где $f(x_j)$ — функция приспособленности j -й особи.

На 4 этапе происходит применение к получившимся парам генетических операторов скрещивания и мутации.

Вероятность скрещивания и мутации в классических генетических алгоритмах задается заранее и неизменна на протяжении как минимум одной его итерации. Однако в данной работе предлагается применить динамическое управление вероятностью скрещивания и мутации в зависимости от степени приспособленности особей. Реализовать такой подход можно следующим образом. Для особей с высокой приспособленностью (элитная группа) вероятность скрещивания вычисляется по формуле:

$$P_c = k_1 \frac{f_{\max} - f'}{f_{\max} - f_{\text{cp}}},$$

где f_{\max} — максимальное значение целевой функции в текущей популяции;

f' — большее из значений целевой функции родительской пары;

f_{cp} — среднее значение целевой функции по популяции;

k_1 — коэффициент настройки, который выбирается исследователем.

Физический смысл такой адаптации заключается в том, что чем ближе родительские особи к оптимальному решению, тем меньше вероятность их скрещивания. Это позволяет сохранить хорошие решения от разрушения при скрещивании.

Для особей со средней и низкой приспособленностью применяется фиксированная вероятность скрещивания:

$$P_c = k_2,$$

где k_2 — коэффициент настройки, обычно принимается равным 0,5. Это обеспечивает активное исследование пространства поиска для менее успешных решений.

Схожим образом в работе реализован механизм адаптивной корректности вероятности мутации. Для особей с высоким уровнем приспособленности мутация не требуется. Для особей со средним уровнем приспособленности:

$$P_m = k_3 \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{cp}}},$$

где f — значение целевой функции для мутирующей особи;

k_3 — коэффициент настройки (обычно выбираются значения в пределах 0,02–0,1).

Для особей с низкой приспособленностью применяется повышенная вероятность мутации:

$$P_c = k_4,$$

где k_4 — коэффициент настройки (обычно выбирается равным 0,2).

5 этап представляет собой реализацию механизма контроля за разнообразием популяции, который в данной работе реализуется как:

$$D(t) = -\sum_{i=1}^M p_i(t) \log_2 p_i(t), \quad (1)$$

где $p_i(t)$ — относительная частота встречаемости i -го генотипа в популяции на момент времени t .

На основе (1) производится динамическая коррекция размера популяции:

$$N(t+1) = N(t) \cdot \left[1 + \beta \frac{D_0 - D(t)}{D_0} \right],$$

где $N(t)$ — размер популяции в момент времени t ;

D_0 — целевое значение разнообразия популяции;

β — коэффициент адаптации.

Такой комплексный подход к адаптивной настройке параметров генетического алгоритма обеспечивает баланс между использованием найденных хороших решений и исследованием новых областей пространства поиска, что особенно важно при решении задачи оптимизации с множеством локальных экстремумов целевой функции.

Механизм предотвращения преждевременной сходимости реализуется на 6 этапе оптимизации.

Преждевременная сходимость является одной из ключевых проблем генетических алгоритмов при решении многоэкстремальных за-

дач. Для решения этой проблемы в работе реализован комплекс мер, ее минимизирующих.

В процессе эволюции популяция автоматически разбивается на кластеры на основе генетического расстояния между особями. Для каждой пары особей вычисляется мера их различия:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^L w_k (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (2)$$

где L — длина генетического кода;

w_k — весовые коэффициенты, учитывающие значимость различных участков кода;

x_{ik}, x_{jk} — значение k -го гена в особях i и j соответственно.

На основе этих расстояний формируются кластеры с помощью метода k -средних, причем число кластеров k адаптивно меняется в зависимости от состояния популяции:

$$k(t) = k_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right) + k_{\min}, \quad (3)$$

где k_0 — начальное число кластеров;

T_{\max} — максимальное число поколений;

k_{\min} — минимально допустимое число кластеров.

Формирование нового поколения происходит на 7 этапе, и этот этап во многом определяет эффективность генетического алгоритма в целом, поскольку именно здесь реализуется баланс между сохранением найденных перспективных решений и поддержанием необходимого уровня разнообразия популяции в последующих поколениях.

В основу механизма формирования нового поколения легла стратегия элитарного отбора. Суть ее заключается в безусловном сохранении определенной доли наиболее приспособленных особей текущей популяции. Математически это может быть представлено следующим образом:

$$E = \{x_i : f(x_i) \geq f_{\text{пор}}\},$$

где E — множество элитных особей;

$f(x_i)$ — значение целевой функции для i -й особи;

$f_{\text{пор}}$ — пороговое значение, определяемое как:

$$f_{\text{пор}} = f_{\max} - \alpha(f_{\max} - f_{\text{ср}}),$$

где α — коэффициент элитарности, принимаемый за 0,1.

Теоретические исследования и практический опыт [7] показывают, что сохранение именно 10 % лучших особей обеспечивает оптимальный баланс между скоростью сходимости алгоритма и сохранением генетического разнообразия популяции. Меньшее значение может привести к потере ценного генетического материала, в то время как большее значение способно вызвать преждевременную сходимость алгоритма к локальному экстремуму.

Далее происходит включение в популяцию особей, полученных в результате применения операторов скрещивания и мутации. Данный процесс реализуется на основе принципа пропорционального замещения [8, 9].

Завершающим этапом формирования нового поколения является реализация механизма поддержания генетического разнообразия популяции. Данный механизм предполагает включение в новую популяцию небольшого числа особей с относительно низкими значениями целевой функции, но обладающих уникальными генетическими характеристиками.

Отбор таких особей производится на основе критерия уникальности, описанного формулами (2), (3).

Такой подход обеспечивает сохранение в популяции потенциально перспективных комбинаций генов, которые могут оказаться полезными на последующих этапах оптимизации.

В рамках проведенного исследования был разработан и теоретически обоснован усовершенствованный методический аппарат синтеза широкополосных антенных систем с сосредоточенными нагрузками на основе адаптивных генетических алгоритмов. Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории эволюционных вычислений применительно к задачам электродинамики. Практическая ценность состоит в совершенствовании основы для программно реализуемого автоматизированного проектирования широкополосных антенных систем.

Полученные результаты могут найти применение при разработке современных антенных систем различного назначения, в первую очередь — широкополосных антенн для систем связи.

Список источников

1. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 431 с.
2. Газизов Т.Т. Алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2008. 144 с.
3. Бородулин Р.Ю. Численные методы электродинамики: монография. СПб.: Военная академия связи им. С.М. Буденного, 2016. 180 с.
4. Бородулин Р.Ю. Конструкционный синтез электрически малых антенн: монография. СПб.: Военная академия связи им. С.М. Буденного, 2020. 179 с.
5. Вычислительные методы в электродинамике; под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977. 485 с.
6. Altman Z., Mittra R., Boag A. New designs of ultra wide-band communication antennas using a genetic algorithm // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1997. Vol. 45. Oct. Pp. 1494–1501.
7. Mattioni L., Marrocco G. Blade: A Broad-band Loaded Antenna Designer // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2006. Vol. 48. Oct. Pp. 120–129.
8. Mittra R., Chakravarty S., Yeo J. Application of micro-genetic algorithm (MGA) to a class of electromagnetic analysis and synthesis problems // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002. Vol. 1. Pp. 306–309.
9. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python. М.: ДМК Пресс, 2020. 286 с.

Resources

1. Yemelyanov V.V., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Theory and practice of evolutionary modeling. M.: FIZMATLIT, 2003. 431 p.
2. Gazizov T.T. Algorithmic and software for modeling wired antennas with concentrated loads: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2008. 144 p.
3. Borodulin R.Y. Numerical methods of electrodynamics: monograph. Saint Petersburg: S.M. Budyonny Military Academy of Communications, 2016. 180 p.
4. Borodulin R.Y. Structural synthesis of electrically small antennas: monograph. Saint Petersburg: S.M. Budyonny Military Academy of Communications, 2020. 179 p.
5. Computational methods in electrodynamics; edited by R. Mitra. Moscow: Mir Publ., 1977. 485 p.
6. Altman Z., Mittra R., Boag A. New designs of ultra wide-band communication antennas using a genetic algorithm // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1997. Vol. 45. Oct. Pp. 1494–1501.
7. Mattioni L., Marrocco G. Blade: A Broad-band Loaded Antenna Designer // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2006. Vol. 48. Oct. Pp. 120–129.
8. Mittra R., Chakravarty S., Yeo J. Application of micro-genetic algorithm (MGA) to a class of electromagnetic analysis and synthesis problems // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002. Vol. 1. Pp. 306–309.
9. Virsansky E. Genetic algorithms in Python. M.: DMK Press, 2020. 286 p.