

УДК 621.372

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРОВ МНОГОРОДИТЕЛЬСКОГО СКРЕЩИВАНИЯ К ЭВОЛЮЦИОННОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН\*

С.Н.Сорокин<sup>1</sup>

В докладе рассматривается применение многородительских генетических алгоритмов для автоматизированного проектирования вибраторных антенн. Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод, что увеличение числа родителей приводит к генерации лучших альтернативных решений.

### Введение

В связи с развитием новых технологий обострился интерес к использованию в связных и радиовещательных системах электромагнитных волн декаметрового диапазона, поскольку они оказываются конкурентоспособными со спутниковыми системами связи и радиовещания. Работа связных и радиовещательных систем в декаметровом диапазоне требует применения антенн с повышенным коэффициентом усиления. Для обеспечения связи и вещания в рассматриваемом диапазоне используют различные разновидности дипольных антенн: антенны Яги-Уда, логопериодические антенны и решетки дипольных антенн. При их проектировании необходимо учитывать множество факторов, влияющих на параметры антенны: количество элементов антенны, диаметр каждого из элементов антенны, длина элементов антенны, расстояние между соседними элементами антенны и т.д. Таким образом, задача проектирования вибраторных антенн декаметрового диапазона относится к задачам многокритериальной оптимизации.

Генетические алгоритмы (ГА) нашли широкое применение при решении задач многокритериальной оптимизации. Это связано с отсутствием необходимости вычисления частных производных от

---

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-01-00174)

<sup>1</sup> 124365, Москва, ИИИСТ, [SNSorokin@yandex.ru](mailto:SNSorokin@yandex.ru)

функции пригодности и высокой вероятностью выхода из локальных экстремумов поверхности функции пригодности. В работах [Correia et al, 1999], [Jones et al, 1997], [Altshuller et al, 1997], [Lohn et al, 2001], [Linden et al, 2002] [Сорокин и др., 2003] приведены примеры использования ГА к решению задач проектирования дипольных антенн.

Анализ работ [Correia et al, 1999], [Jones et al, 1997], [Altshuller et al, 1997], [Lohn et al, 2001], [Linden et al, 2002] [Сорокин и др., 2003] показывает, что при проектировании антенн, как правило, используется простой генетический алгоритм в совокупности с односточечным оператором кроссинговера. Вместе с тем применение такого ГА может привести к преждевременной сходимости процесса проектирования в точках локальных экстремумов используемой функции пригодности. Увеличение вероятности мутации не позволяет устранить эффект преждевременной сходимости, так как процесс проектирования вырождается в случайный перебор возможных решений. В данной статье рассматривается возможность применения оператора многородительского скрещивания для повышения эффективности проектирования вибраторных антенн. Оценка эффективности применения оператора многородительского скрещивания проведена на примере проектирования пятиэлементной вибраторной антенны.

## 1. Выбор функции пригодности

Пусть в свободном пространстве  $V$  расположена вибраторная антенна, состоящая из одного активного вибратора, одного рефлектора и нескольких директоров. Все элементы антенны имеют одинаковый диаметр  $d$ . Необходимо определить длину элементов антенны и расстояния между ними, обеспечивающие максимальный коэффициент усиления при наилучшем согласовании антенны с линией питания и ограниченной величине коэффициента помехозащищенности.

Для решения задачи введем локальную систему координат, центр которой совместим с точкой питания антенны, а ось  $z$  направим вдоль активного вибратора. В этом случае ось  $x$  локальной системы координат совпадает с продольной осью антенны. Будем полагать, что распределение тока на элементах антенны можно представить в виде усеченного степенного ряда [Марков и др., 1975]:

$$J_z^3(z') = \sum_{p=1}^P J_p \left(1 - \frac{|z'|}{l}\right)^p, \quad (1)$$

где:  $J_p$  - комплексная амплитуда элемента разложения тока со степенью  $p$ ,

$l$  - длина плеча вибратора

В выбранной системе координат ее характеристики направленности в обеих главных плоскостях описываются следующими соотношениями:

- плоскости E:

$$F_E(\Psi) = \cos(\Psi) \sum_{m=1}^M e^{ib x_m \cos \Psi} \times \int_{-l_m}^{l_m} \sum_{p=1}^3 f_{pm}(z') e^{ib z'_m \sin \Psi} dz'_m \quad (2)$$

- в плоскости H:

$$F_H(\Psi) = \sum_{m=1}^M e^{ib x_m \cos \Psi} \int_{-l_m}^{l_m} \sum_{p=1}^3 f_{pm}(z') dz' \quad (3)$$

где  $f_{pm}(z')$  - базисная функция с номером  $p$ , определяемая уравнением (1), на вибраторе с номером  $m$ ,

$x_m$  - продольная координата вибратора с номером  $m$ ,

$\Psi$  - угол, отсчитываемый от оси  $x$  в горизонтальной или вертикальной плоскости.

Комплексные амплитуды элементов разложения токов на вибраторах антенны могут быть легко найдены из системы уравнений Халлена относительно распределения токов на вибраторах проектируемой антенны. Тогда выражения (2) и (3) могут быть использованы для определения таких параметров проектируемой антенны, как коэффициент усиления  $G$  (КУ) и коэффициент помехозащищенности  $Fbr$ .

В [Alander et al, 2002], [Alander et al, 2004] был проанализирован ряд функций пригодности, используемых при проектировании антенн и было показано, что для решения задач в указанной постановке целесообразно применять функции пригодности следующего вида:

$$FF = -a \cdot G - b \cdot Fbr + c \cdot Vswr, \quad (4)$$

где  $a, b, c$  - штрафные коэффициенты,

$G$  – коэффициент усиления проектируемой антенны,

$Fbr$  – коэффициент помехозащищенности,

$Vswr$  – коэффициент стоячей волны в тракте питания антенны.

Изменение штрафных коэффициентов в функции пригодности (4) позволяет управлять результатами эволюционного проектирования антенны. Для определения штрафных коэффициентов на характеристики проектируемой антенны были наложены следующие ограничения: коэффициент усиления по отношению к полуволновому вибратору не худший, чем 6.8 дБ,  $Vswr$  в тракте питания, не превышающий 1.4 и коэффициенте помехозащищенности, не превышающем 34 дБ. Используя методы оценки поисковых поверхностей [Alander et al, 2004], [Stadler et al, 2003] для эволюционного проектирования были использованы следующие штрафные коэффициенты:

$$a = \begin{cases} 0,0, & G < 6,8 \text{ дБ}, \\ 30, & 6,8 \leq G \leq 9,5 \text{ дБ}, \\ 45, & G > 9,5 \text{ дБ}; \end{cases} \quad b = \begin{cases} 1,0, & Fbr \leq 18,0 \text{ дБ}, \\ 8,0, & 18,0 < Fbr \leq 31,8 \text{ дБ}, \\ 18,0, & 31,8 < Fbr \leq 50,0, \\ -1,0, & Fbr > 34,0 \text{ дБ}, \end{cases} \quad c = \begin{cases} 0,0, & Vswr \leq 1,1, \\ 15,0, & 1,1 < Vswr \leq 1,4, \\ 85,0, & Vswr > 1,4. \end{cases}$$

## 2. Экспериментальные результаты

### 2.1. Исследование влияния параметров алгоритма

Для решения задачи проектирования были использованы алгоритмы трех-, четырех- и шести- родительского скрещивания и простой генетический алгоритм с одноточечным оператором кроссинговера. На рис. 1 показана зависимость величины усредненной функции пригодности от номера итерации. Усреднение величины функции пригодности проводилось по 30 реализациям поискового алгоритма. Расчеты проведены для популяции, составляющей 100 особей и генетического давления, равного 60% от размера популяции. Вероятность мутации была выбрана равной 1%.

В процессе проектирования были наложены дополнительные ограничения на возможную область изменения параметров отдельных элементов антенны: длина любого вибратора антенны изменялась в пределах  $(0.3-0.6)\lambda$ , расстояние между элементами антенны изменялось в пределах  $(0.08-0.3)\lambda$ , где  $\lambda$  - рабочая длина волны. Указанные ограничения были использованы для устранения из популяции решений, заведомо не обладающих заданными свойствами. Указанные ограничения были наложены на популяцию, исходя из существующих результатов исследования свойств дипольных антенн.

На рис. 1 кривая 1 соответствует оператору двухродительского скрещивания, использующему одноточечный кроссинговер, кривая 2 соответствует применению оператора трехродительского скрещивания, кривая 3 – четырехродительского скрещивания и кривая 4 соответствует применению оператора шестиродительского скрещивания. Анализ представленных данных показывает, что увеличение объема генетического материала, являющееся результатом увеличения числа родительских особей, приводит к улучшению достижимого значения величины усредненной функции пригодности.

В процессе проектирования было исследовано влияние генетического давления на результаты проектирования. На рис. 2 показано влияние генетического давления в процентах от величины популяции на величину средней функции пригодности.

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показывает, что для всех рассмотренных вариантов эволюционного проектирования, оптимальная величина генетического давления находится в интервале 60-

72%. Как уменьшение, так и дальнейшее увеличение генетического давления приводят к ухудшению характеристик проектируемой антенны, что выражается в возрастании величины усредненной функции пригодности.

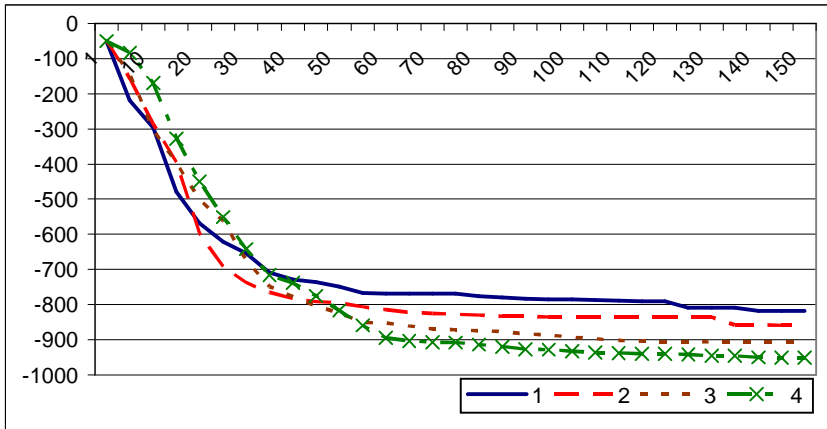


Рис. 1. Зависимость усредненной функции пригодности от номера шага эволюционного проектирования

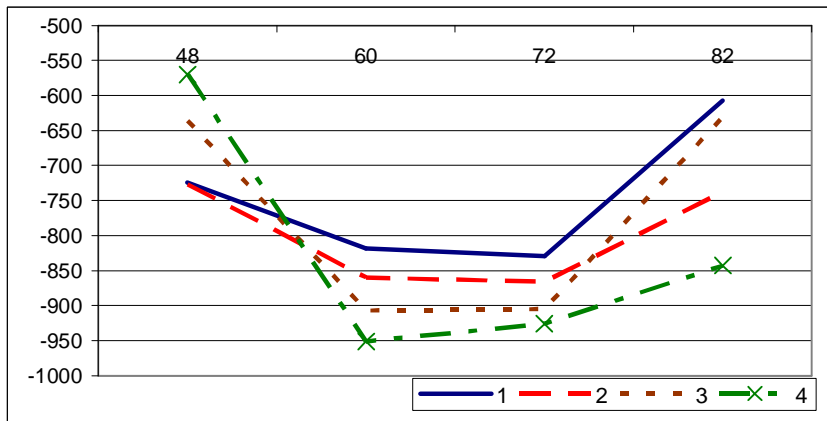


Рис. 2. Влияние генетического давления на среднюю величину функции пригодности

Было также исследовано влияние вероятности мутации на результаты эволюционного проектирования. Для выбранных операторов многородительского скрещивания вероятность мутации изменялась в

интервале от 0,1% до 10% при постоянном генетическом давлении, величина которого была выбрана равной 60% от размера популяции. Результаты моделирования представлены на рис. 3. На этом рисунке кривая 1 соответствует эталонному случаю применения оператора двухродительского скрещивания, кривая 2 – оператору трехродительского скрещивания, кривая 3 – оператору четырехродительского скрещивания и кривая 4 – оператору шестиродительского скрещивания.

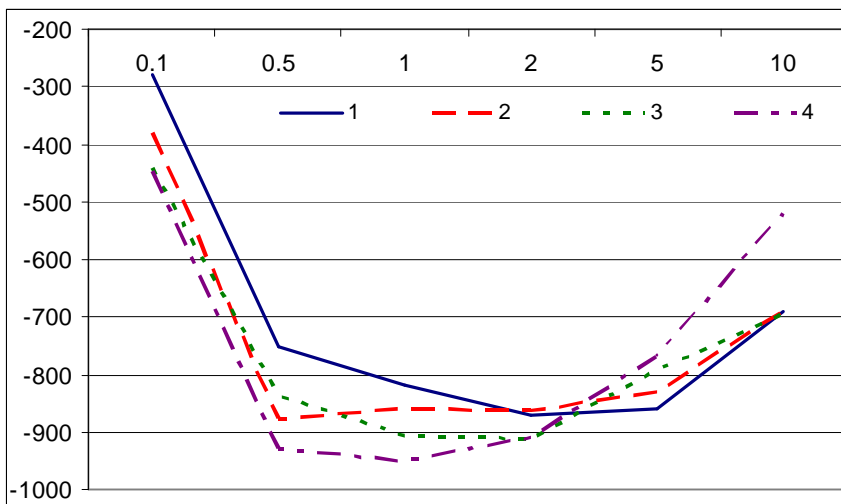


Рис. 3. Влияние вероятности мутации на усредненное значение функции пригодности

Анализ полученных результатов показал, что наилучшие результаты удастся получить, если вероятность мутации находится в интервале 1%-5%. Уменьшение вероятности мутации приводит к существенному замедлению процесса проектирования, а увеличение вероятности мутации приводит к тому, что процесс эволюционного проектирования вырождается в случайный перебор возможных вариантов.

Таким образом было установлено существование оптимальных значений параметров эволюционного проектирования, обеспечивающих максимальную скорость сходимости процесса проектирования и уменьшение вычислительных затрат на решение поставленной задачи.

## 2.2. Результаты эволюционного проектирования

При проектировании антенны были выбраны следующие параметры алгоритмов:

- размер популяции – 100 возможных решений;

- генетическое давление – 60-72% от размера популяции;
- вероятность мутации – 1%.

На область возможных значений параметров проектируемой антенны были наложены те же ограничения, что и при определении приведенных выше параметров алгоритмов. В результате были получены антенны с характеристиками, представленными в табл. 1.

Табл. 1

| Число родителей | G (КУ), дБ | $2q_{0,5}^E$ , град | $2q_{0,5}^H$ , град | УБЛЕ, дБ | УБЛH, дБ | $V_{swr}$ | $Fbr$ , дБ | $B$ , % |
|-----------------|------------|---------------------|---------------------|----------|----------|-----------|------------|---------|
| 2               | 8,9        | 54                  | 70                  | -17,3    | -5,25    | 1,26      | 33,9       | 14      |
| 3               | 9,6        | 53                  | 68                  | -17,2    | -6,3     | 1,35      | 33,8       | 10      |
| 4               | 9,6        | 56                  | 74                  | -18,3    | -6,7     | 1,4       | 34,0       | 12      |
| 6               | 10,5       | 52                  | 64                  | -18,3    | -7,4     | 1,39      | 33,9       | 10      |

В этой таблице приняты следующие обозначения:

$2q_{0,5}^E$  - ширина ДН проектируемой антенны в плоскости E;

$2q_{0,5}^H$  - ширина ДН проектируемой антенны в плоскости H;

УБЛЕ – уровень боковых лепестков ДН проектируемой антенны в плоскости E;

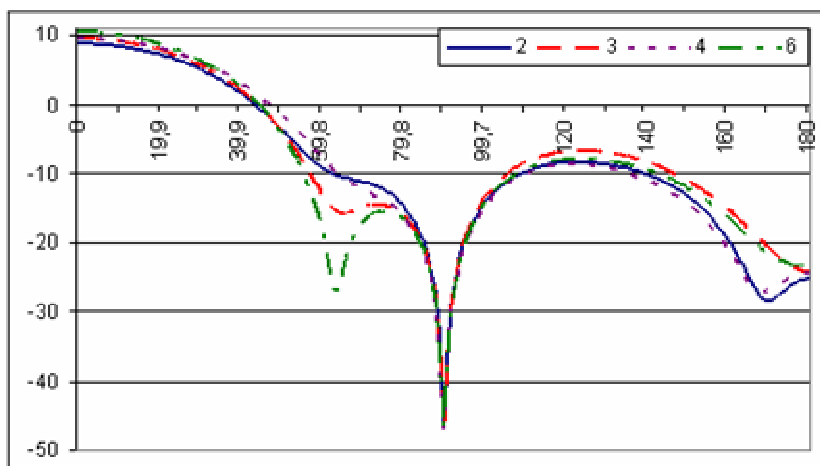
УБЛH – уровень боковых лепестков ДН проектируемой антенны в плоскости H;

$B$  – ширина полосы пропускания антенны.

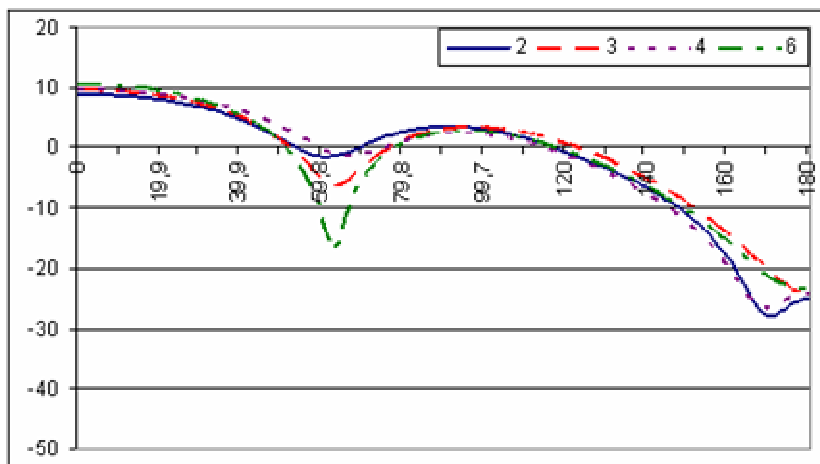
Характеристики полученных антенн в плоскостях E- и H- показаны на рис. 4, а и рис. 4, б соответственно.

Анализ данных, представленных в табл. 1 и кривых, показанных на рис. 4, показывает, что все антенны, конструкции которых получены в результате эволюционного проектирования, обладают высоким коэффициентом усиления, низким УБЛ в плоскости E и относительно широкой рабочей полосой. Тем не менее, применение оператора шестиродительского скрещивания позволило увеличить КУ проектируемой антенны на 1,6 дБ по сравнению с конструкцией, полученной в результате применения простого генетического алгоритма.

Анализ частотных свойств полученных конструкций антенн показал, что антенна, полученные в результате применения трехродительского алгоритма, имеет максимум АЧХ, смещенный в стороны более коротких волн. Это смещение составляет 2% от рабочей длины волны. Остальные антенны имеют максимум АЧХ на рабочей длине волны.



а)



б)

Рис. 4. Характеристики направленности антенн в плоскостях Е и Н

Антенна, полученная в результате применения шестиродительского скрещивания, имеет наилучшие УБЛ в обеих главных плоскостях по сравнению с другими конструкциями, полученными в ходе решения задачи.



## Заключение

Хотя все рассмотренные методы решения задачи проектирования приводят к приемлемым результатам, увеличение числа родителей, участвующих в процессе эволюционного проектирования, позволяет успешнее преодолевать преждевременную сходимости процесса проектирования в локальном экстремуме функции пригодности и получать лучшие решения задачи для выбранной функции пригодности.

Для всех рассмотренных выше алгоритмов эволюционного проектирования существуют оптимальные генетическое давление и вероятность мутации, позволяющие найти решение задачи с минимальными вычислительными затратами. Оптимальное генетическое давление составляет 60%-72% от размера популяции, а оптимальная вероятность мутации находится в пределах 1%-2%.

## Список литературы

- [Марков и др., 1975] Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. - М.: Энергия, 1975.
- [Сорокин и др., 2003] Сорокин С.Н., Зинченко Л.А., Олейник М.П. Эволюционное проектирование антенн Яги-Уда с улучшенными характеристиками. // Труды конференции «ИСАПР 2003» ICAD 2003. М. Физматлит, 2003.
- [Alander et al, 2002] Alander J.T., Zinchenko L.A., Sorokin S.N. Analysis of Fitness Landscape Properties for Evolutionary Antenna Design // Proc. of the IEEE conference ICAIS 2002.
- [Alander et al, 2004] Alander J.T., Zinchenko L. A., Sorokin S.N. A comparison of fitness landscapes in evolutionary design of dipole antennas. // IEEE Trans. on antennas and propagation. 2004. №52(11).
- [Altshuller et al, 1997] Altshuller E. E., Linden D. S. Wire-Antenna Design Using Genetic Algorithm. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1997. №39 (2).
- [Correia et al, 1999] Correia D., Soares A. J. M., Terada M. A. B. Optimization on gain, impedance and bandwidth in Yagi-Uda antennas using genetic algorithm // Proc. of International Microwave and Optoelectronics Conference SBMO/IEEE MTT-S, APS and LEOS –IMOC'99, Vol. 1, 1999.
- [Jones et al, 1997] Jones E. A., Joines W. T. Design of Yagi-Uda antennas using genetic algorithm. // IEEE Transactions Antennas and Propagation. 1997. №45.
- [Linden et al, 2002] Linden D. S. Optimizing Signal Strength in-Situ Using an Evolvable Antenna System // Proceedings of the 2002 NASA DoD Conference on Evolvable Hardware EH 2002, 2002.
- [Lohn et al, 2001] Lohn J. D., Kraus W.F., Linden D.S., Colombano S.P. Evolutionary Optimization of Yagi – Uda Antenna // Proc. of the Fourth International Conference on Evolvable Systems, Tokyo, 2001.
- [Stadler et al, 2003] Stadler P.F., Flamm Ch. Barrier Trees on Poset-Valued Landscapes. // Genet. Prog. and Evolv. Mach. 2003. №4.