

СИНТЕЗ АНТЕНН

НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Казалось бы, что может быть проще и традиционнее, чем антенна? Однако, как и все сферы телекоммуникации, это направление бурно прогрессирует, особенно в области электрически малых антенн. Применение наиболее передовых методов моделирования и оптимизации позволяет получать удивительные результаты. В частности, один из таких методов – генетические алгоритмы. Посмотрим, что дает их использование для синтеза конструкций антенн.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ В ТЕОРИИ АНТЕНН

Теория фрактальных антенн, использующих геометрию пространственно заполняющих кривых, подтолкнула исследователей к применению в антенных конструкциях аналогичных по свойствам объектов обычной геометрии. В результате подобных изысканий многим фрактальным решениям уже противопоставляются превосходящие их по ряду параметров серпантинные и зигзагообразные антенны (рис.1) [1]. Другим направлением поиска явилось использование для синтеза пространственно заполняющих линий так называемых генетических алгоритмов оптимизации.

Генетические алгоритмы появились в антенной теории в прошлом десятилетии как важный инструмент для проектирования разнообразных антенных конструкций – от электрически малых антенн (ЭМА) до нагруженных монополей и крайне широкополосных антенн [1–5]. В результате были синтезированы новые типы неинтуитивных решений, расширивших существовавшие представления о столь специфической области техники. Общий принцип синтеза оптимальных решений на такой основе подробно рассмотрен автором в работе [2]. Однако реализация генетического подхода уже на ранней стадии выбора геометрической формы антенны позволила исследователям синтезировать новый класс антенных устройств, получивших наименование **генетических** или **эволюционных (evolved) антенн**. Рассмотрим

состояние работ, ведущихся в этом направлении, применительно к технике ЭМА.

Генетический алгоритм [3] – это вероятностный алгоритм поиска, который многократно преобразовывает исходный набор (популяцию) математических объектов, связанных с заданной функцией стоимости неким соответствием, в новую популяцию объектов потомства. При этом используются дарвинистский принцип естественного отбора и действия, скопированные из встречающихся в природе генетических операций типа перехода (перекombинации) и мутации.

Процесс генетической оптимизации состоит из трех основных этапов: компьютерное моделирование антенны; формирование функции стоимости и расчет ее значения по результатам компьютерного моделирования; минимизация или максимизация заданной функции стоимости.

Определение функции стоимости в оптимизации на основе генетического алгоритма – ключевой пункт итерационной процедуры. Ее роль может выполнять полоса пропускания

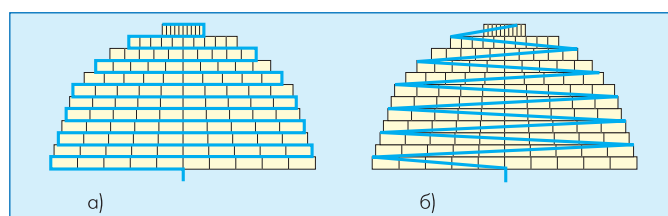


Рис. 1 Серпантинная (а) и зигзагообразная (б) антенны

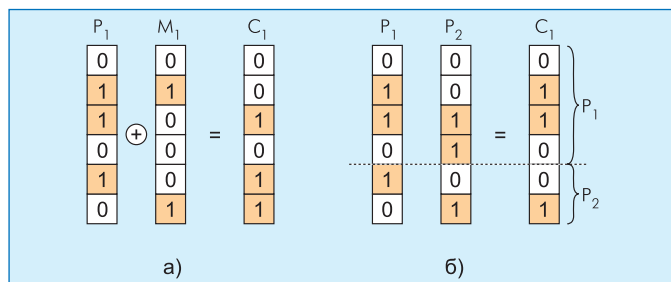


Рис.2 Принцип процедур мутации (а) и рекомбинации (б) генов

антенны, которая, например, оценивается для каждого возможного варианта антенной конструкции путем численного моделирования электродинамических процессов [2]. Могут использоваться и другие критерии оптимальности искомой конфигурации антенн. Наиболее распространенным является среднеквадратический критерий, когда минимизируется квадрат разницы между средним или заданным значением параметра оптимизации $g_0(x)$ и его текущей величиной $g_j(x)$:

$$L(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [g_j(x) - g_0(x)]^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

В частности, если в качестве функции $g_j(x)$ рассматривать частотную характеристику антенны, полученную в результате ее моделирования для вектора конструктивных параметров x на j -й частоте, то N можно трактовать как заданное множество частот, на которых должны контролироваться свойства антенны.

Реже используется критерий Чебышева, сводящийся к минимизации модуля отклонения:

$$L(x) = |g_j(x) - g_0(x)| \rightarrow \min. \quad (2)$$

При оптимизации сразу нескольких характеристик антенны применяется функция стоимости в виде взвешенной суммы частных показателей (1) или (2):

$$L(x) = \sum_{k=1}^K [d_k L_k(x)].$$

Основной элемент генетического алгоритма – "хромосома" – составляется из "генов", описанных в виде двоичных последовательностей. При этом каждый ген связывают с дискретным параметром, подлежащим оптимизации. Например, для рассмотренной в работе [2] F-образной планарной антенны (PIFA) использовался поиск оптимальной геометрии

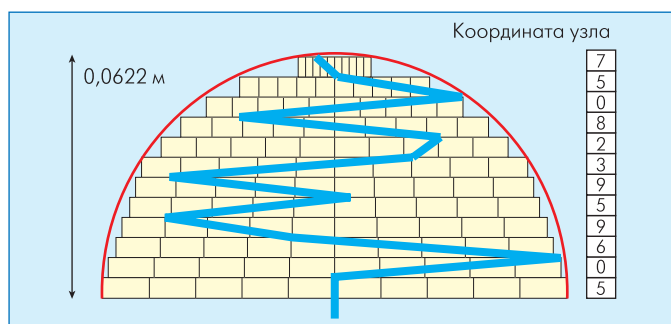


Рис.3 Проводная генетическая антенна

ческой конфигурации в пространстве трех контролируемых величин: координат фидерного провода и высоты горизонтально расположенной над экраном пластины.

Процедура мутации генов описывается операцией их векторного сложения (при двоичном представлении генов может интерпретироваться как операция "исключающее ИЛИ") (рис.2а). При рекомбинации генов новые хромосомы синтезируются путем объединения взаимно дополняющих фрагментов пары исходных ("родительских") генов (рис.2б). Данная операция может затрагивать не один, а несколько фраг-

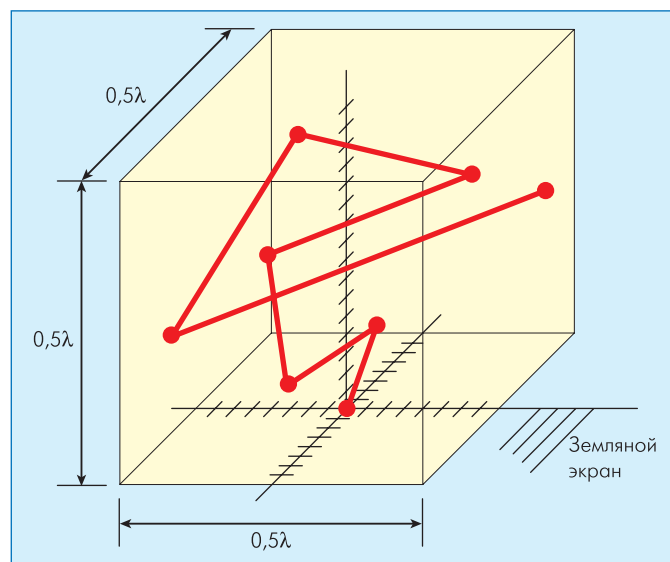


Рис.4 Оптимальный вариант 7-сегментной генетической антенны

ментов родительских хромосом.

ПРОВОДНЫЕ АНТЕННЫ

Сегодня наиболее исследованный класс генетических конструкций – проводные антенны. В их отношении известно уже несколько различных подходов к выбору параметров, определяющих процесс синтеза. Так, вариант *плоского монополя* (рис.3) получен путем выбора координат узловых точек 12-сегментного монополя в плоской системе координат, описываемой матрицей размерностью 10×12 .

Координаты узлов 7-сегментной антенны ([5] с исправлением двух опечаток)

Координаты начальной точки, м			Координаты конечной точки, м		
X	Y	Z	X	Y	Z
0,0000	0,0000	0,0000	-0,0166	0,0045	0,0714
-0,0166	0,0045	0,0714	-0,0318	-0,0166	0,0170
-0,0318	-0,0166	0,0170	-0,0318	-0,0287	0,0775
-0,0318	-0,0287	0,0775	-0,0318	0,0439	0,0140
-0,0318	0,0439	0,0140	-0,0318	0,0045	0,0624
-0,0318	0,0045	0,0624	-0,0106	0,0373	0,0866
-0,0106	0,0373	0,0866	-0,0106	0,0257	0,0230

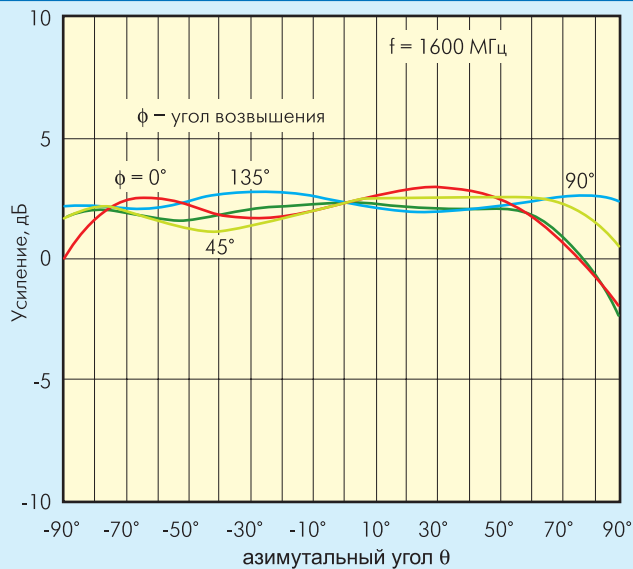
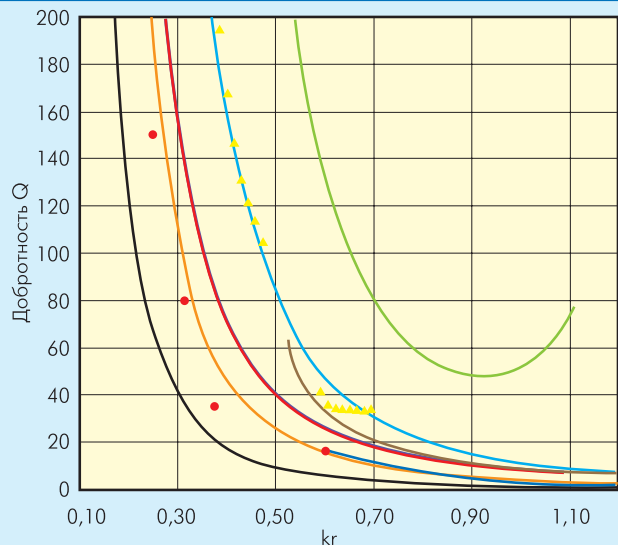


Рис.5 Зависимость коэффициента усиления 7-сегментной генетической антенны от азимутального направления (θ) для выборочных углов возвышения ϕ

Первой известной публикацией, посвященной вопросам синтеза *трехмерных* проволочных монополей на основе генетических алгоритмов, был патент на изобретение [5], заявленный в 1995 году Эдвардом Альтшулером и Дерекком Линденом. В нем были изложены результаты генетической оптимизации 5-, 6-, 7- и 8-сегментных версий проводного монополя в виде прямолинейных проводных сегментов, соединенных последовательно в их конечных точках (узлах). Положения узловых точек определялись тремя декартовыми координатами (X, Y, Z) с таким расчетом, чтобы антенна конечной длины с заданным числом последовательных проводных сегментов удовлетворяла некоторым требованиям. Начало первого провода (точка подключения фидера питания) находилось в точке с координатами $(0, 0, 0)$ в центре плоского земляного экрана. Все возможные варианты антенн должны были вписываться в куб с размерами сторон $0,5\lambda$ (рис.4), где λ – длина волны излучения (центр рабочей полосы частот).

Представление хромосомы состояло из последовательности координат каждого из узлов (X_i, Y_i, Z_i). Каждой координате ставились в соответствие хромосомы длиной 5 бит (один бит – знаковый). В итоге полная длина хромосомы (геном) 7-сегментной антенны составила, например, $3 \cdot 5 \cdot 7 = 105$ бит.

Поскольку синтезируемые антенны предназначались для телекоммуникаций по линии "земля-спутник" посредством мобильных устройств (в том числе телефонов) [10], общее требование состояло в достижении почти однородного усиления антенны при углах возвышения более 10° над горизонтом. Качество антенной конструкции оценивалось по ее диаграмме направленности в режиме излучения, смоделированном в пакете NEC. Функция стоимости рассчитывалась как сумма квадратов отклонений текущего значения коэффициента усиления от среднего значения этого параметра для углов возвышения от -90° до $+90^\circ$ и азимутального сектора от



- Фундаментальный предел
- 5-сегментная генетическая антенна Альтшулера
- Дискагруженный монополю
- Рамка Минковского
- 3D-древовидный фрактальный монополю
- Круглая рамка
- 3D-рамочная антенна из 4 рамок
- Диполь ($h/a=50$)
- Полусферический монополю
- ▲ 3D-рамка Минковского

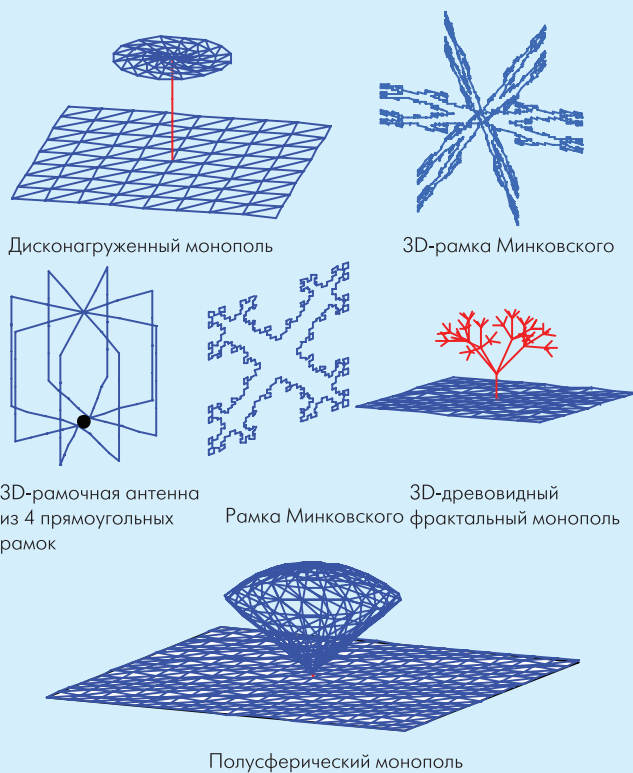


Рис.6 Зависимости добротности некоторых типов ЭМА [6]

от 0 до 180° . Считалось, что минимум функции стоимости соответствует наилучшей конструкции антенны.

В результате оптимизации было выяснено, что наилучшими свойствами обладает 7-сегментная антенна, координаты узловых точек которой представлены в таблице и на рис.4. Как видно из зависимости коэффициента усиления такой антенны от азимутального угла для различных углов возвышения (рис.5), разработчики добились приемлемого варианта конструкции.

Даже на таком простом примере видно, что генетические алгоритмы синтеза порождают конструкции, не укладывающиеся в привычные рамки. Возможно, такая структура вряд ли была бы получена другими методами синтеза. Конечно, подобная задача могла решаться и обычным перебором всех возможных значений параметров антенны. Однако генетический алгоритм позволяет сократить время их поиска до разумных пределов, поскольку общее число возможных вариантов антенной конструкции, соответствующее, например, заданному представлению 105-битной хромосомы, составляет 2^{105} . Если предположить, что на проверку эффективности каждого варианта требуется лишь 1 пс, то перебор всех комбинаций займет 1,286 триллиона лет.

Генетические алгоритмы доказали свою результативность при проектировании ЭМА и во многих других случаях. Так, синтезированные с их помощью антенные решения отличаются повышенной широкополосностью по сравнению с другими конструкциями, в том числе – фрактальными. На рис.6 [6] для наиболее характерных типов конструкций антенн представлены зависимости добротности ЭМА от произведения волнового числа k на радиус сферы r , описанной вокруг ЭМА (радианной сферы). Как видно, в области $kr < 0,5$ добротность проводной 5-сегментной генетической антенны Альтшулера наиболее близко приближается к фундаментальному пределу добротности.

Однако эффективность оптимизации зависит как от внутренних механизмов самого генетического алгоритма, так и от формализованного представления задачи синтеза антенны на языке генетического описания. По сути, выбор модели самой хромосомы во многом является искусством и служит важным фактором в успешном генетическом проектировании антенной системы. Опирируя генетическими алгоритмами, зачастую трудно или невозможно определить, достигнуто ли *оптимальное решение*. На практике нередко остаются без ответа два вопроса: "генетический алгоритм сходится к действительно оптимальной версии?" и "действительно ли генетическое представление хромосомы охватывает все возможные варианты, или оптимальная конструкция находится за рамками подмножества решений, которые хромосома в состоянии представить?" В работе [7] были рассмотрены три генетических представления хромосомы для синтеза ЭМА с наиболее низким коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН). При этом, в отличие от [5], в работе [7] анализировался 12-сегментный вариант антенны, при оптимизации которого гены (координаты) кодировались не только 5-разрядными целыми числами, но и вещественными. Рассматривались варианты представления хромосомы на основе прямоугольных декартовых координат, а также угловых – абсолютных и относительных.

Достоинство представления хромосомы на основе прямоугольных координат состоит в том, что не нужно *априори* на-

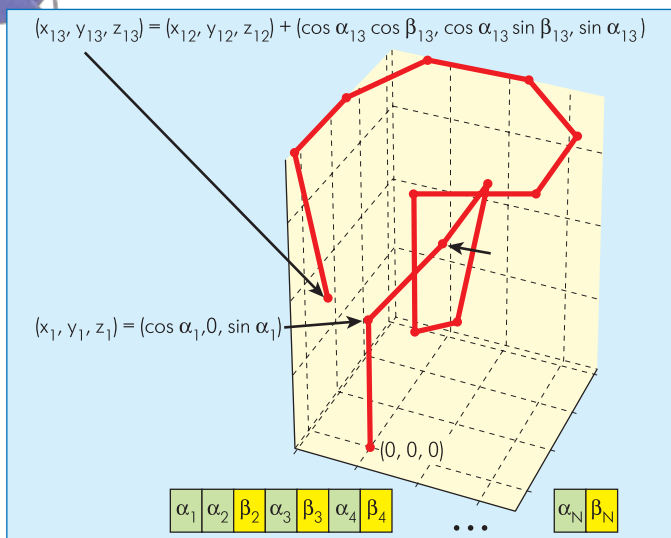


Рис.7 Антенна, синтезированная в пространстве абсолютных угловых координат [9]

значать полную длину провода антенны. Альтшулер отметил [8], что общая длина антенны, составленной из линейных сегментов, находилась в интервале $0,25\lambda - 0,35\lambda$ и существенно не изменялась при вариациях конфигурации антенны. При этом длина прямолинейных сегментов произвольна (в заданных пределах). Но она должна превышать минимально допустимый размер элементарного отрезка, которым оперирует пакет моделирования NEC для выбранного диаметра проводника.

Недостаток декартовой метрики заключается в том, что число прямолинейных проводных сегментов должно быть определено до начала работы генетического алгоритма. Это не позволяет рассматривать конструкции с плавными формами (типа обычной спирали), существенно не увеличивая число узлов. Следовательно, координатное представление хромосомы ограничивает набор решений исключительно антеннами с n дискретными сегментами. Однако Альтшулер обнаружил отсутствие заметного улучшения параметров антенны при увеличении n по сравнению с вписанной в тот же объем резонансной антенной, имеющей меньшее число составных частей [8]. Другое ограничение состоит в том, что для устойчивой работы генетического алгоритма необходимо размещать начало первого провода в начале координат, а затем оперировать лишь положительным полупространством значений Z . Это ограничивает подмножество конструкций только асимметричными антеннами, питаемыми у основания (см. рис.4).

Чтобы устранить ряд ограничений, присущих применению декартовых координат при описании узловых точек, авторы [7] предложили использовать сферическую координатную систему. При этом возможны два варианта описания угловых координат – с абсолютными значениями углов в глобальной сферической координатной системе (рис.7) и с относительными углами в локальной координатной системе, начало которой находится в конечном узле предыдущего проводного сегмента, а ось Z является его продолжением (рис.8). В обоих случаях полагается, что общая длина антенны фиксирована, а длины всех ее сегментов равны.

Отметим, что при целочисленном представлении угловые координаты в описании хромосомы кодировались авторами [7] циклическим двоичным кодом Грея, чтобы устранить скачки при смене отдельных битов и обеспечить "бесшовный" переход угловых координат от 0 к 360° . Например, переход между последовательными величинами от 7 (0111) к 8 (1000) требует трансформации сразу четырех битов в геноме, что может рассматриваться как маловероятная случайная мутация. Последовательные же состояния, описанные кодом Грея, всегда отличаются на 1 бит, в том числе при переходе от максимального значения к минимальному.

Существенно, что в сферической системе координат положение начальной точки произвольно в верхнем полушарии, поэтому возможны симметричные антенные решения. Кроме того, благодаря использованию множества коротких сегментов, относительно-угловая модель способна представлять гладкие по структуре антенны типа спирали.

Недостатком угловых моделей хромосом является *априорное* назначение полной длины антенны. Второе ограничение состоит в равенстве длин всех ее сегментов. Использование же очень коротких сегментов влечет рост времени моделирования. Ясно, что и такое представление хромосом ограничивает подмножество возможных решений.

Предварительные результаты синтеза антенн на основе декартовых, абсолютных и относительных угловых координат хромосом приведены на рис.9. В пределах области, ограниченной кубом с ребром $0,05\lambda$, хромосома на основе абсолютных угловых координат произвела "лучшую" антенну с КСВН, аналогичным "лучшей" антенне, синтезированной на основе хромосомы в пространстве декартовых координат [7, 9]. Использование же относительных угловых координат позволило получить вариант оптимизированной антенны (см. рис.8), КСВН которой на треть ниже, чем генетические антенны на основе двух других подходов.

Важное наблюдение – резонансные частоты всех антенн на основе относительной угловой хромосомы отличаются от

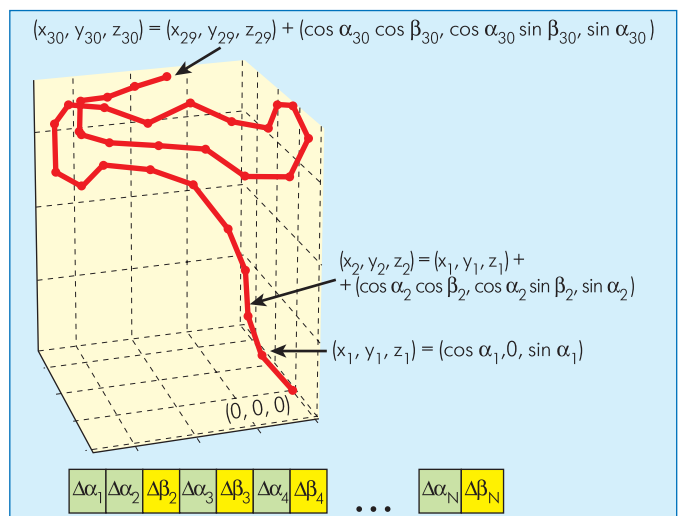


Рис.8 Антенна, синтезированная в пространстве относительных угловых координат [9]

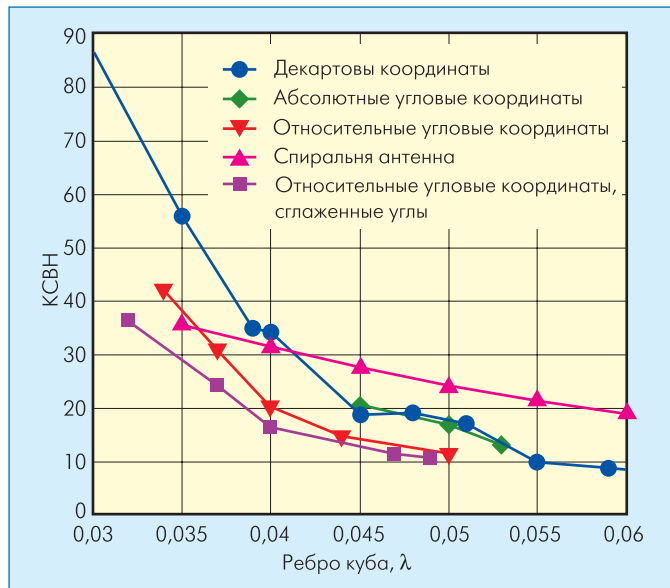


Рис.9 Зависимости КСВН для различных типов антенн [9]

заданной частоты менее чем на 1%. Тогда как оптимизация в декартовом пространстве и абсолютной сферической системе координат порождали конструкции с резонансными частотами, которые отличались от требуемых на 40%.

В целом же сходимость генетических алгоритмов к оптимальным решениям базируется на комбинации в одной хромосоме удачных фрагментов хромосом (названных *стандартными блоками* или *схемой*) из других хороших решений. Раз-

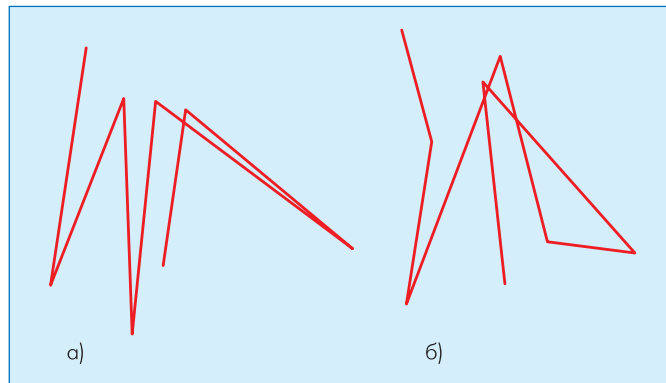


Рис.10 Различия в форме антенн при двоичном (а) и вещественном (б) представлении хромосомы [10]

ные результаты позволяет получить также ограничение описания хромосомы бинарным кодом или же вещественными числами (рис.10) [10].

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о целесообразности комбинации при описании хромосомы как координатного, так и углового способов ее представления. При этом поиск оптимального решения должен проводиться пошагово, исходя из утверждения, что каждый фрагмент оптимальной конфигурации является оптимальным решением. В этом смысле интересно исследование варианта хромосомы, в котором положение некоторых узлов (опорных) описано декартовыми координатами, а промежуточных узлов между ними – на основе углового метода.

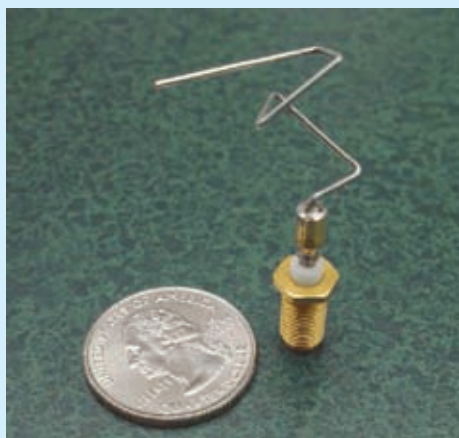


Рис. 11 Прототип 6-сегментной генетической антенны ST5-33-142-7 для спутников программы НАСА Space Technology-5 [11]

Проводные антенны, синтезированные на основе генетических алгоритмов, использовались на борту трех американских микроспутников в рамках программы Space Technology-5 (ST5) (полет проходил с 22 марта по 30 июня 2006 года). Шестисегментные генетические антенны круговой поляризации ST5-33-142-7 [11] (рис.11) входили в состав миниатюрных бортовых радиотранспондеров. При синтезе антенны было выдвинуто требование, чтобы КСВН в режиме передачи (8470 МГц) составлял 1,2, а в режиме приема (7209,125 МГц) – 1,5. В качестве функции стоимости использовался среднеквадратический критерий (1) относительно коэффициента усиления антенны.

Развитием генетических алгоритмов в сфере проводных антенн может стать их синтез на мультихромосомной основе. В генетической системе всех живых существ более одной хромосомы. Если следовать такой концепции при синтезе антенны, то в рамках мультихромосомной модели можно объединить вещественные и двоичные описания генотипов, реализовать рекомбинацию генов независимых хромосом, значительно расширить возможности самого процесса синтеза.

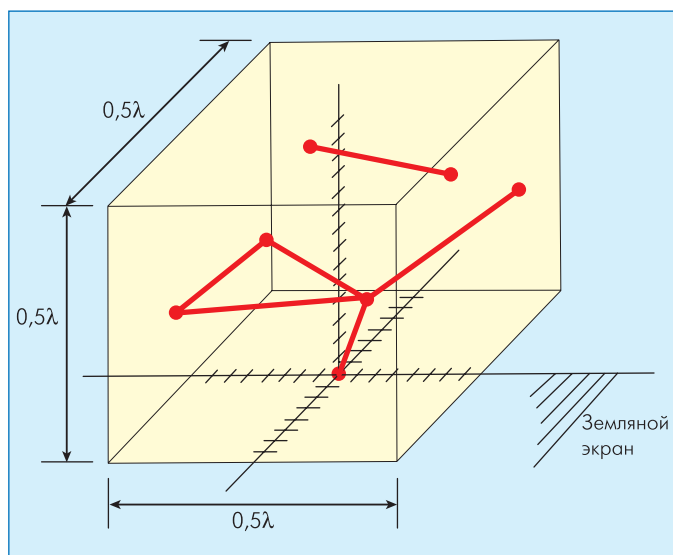


Рис. 12 Вариант антенны, полученной с помощью двуххромосомной модели [10]

Впервые мультихромосомная конфигурация антенн была поверхностно исследована в работе [10] на примере двуххромосомной модели. Первая из хромосом описывала набор из семи узловых точек в декартовом координатном пространстве, используя 5-битное представление каждой из координат (аналогично варианту на рис.4). Вторая хромосома содержала информацию о соединениях проводных сегментов. Она была представлена в виде 6-битных последовательностей, в которых для каждого сегмента первые три бита обозначали номер начальной точки, а три других – номер конечной точки данного сегмента. Такое описание позволило генотипу антенны охватить несравнимо большее число конфигураций, с последовательно и параллельно расположенными проводниками. Предполагалось, что узловые точки могут включать все сегменты или не быть связанными ни с каким проводником вообще. Проводные сегменты могли быть соединены с активной цепью сигнала или располагаться без подключения к цепи фидера как вспомогательные элементы.

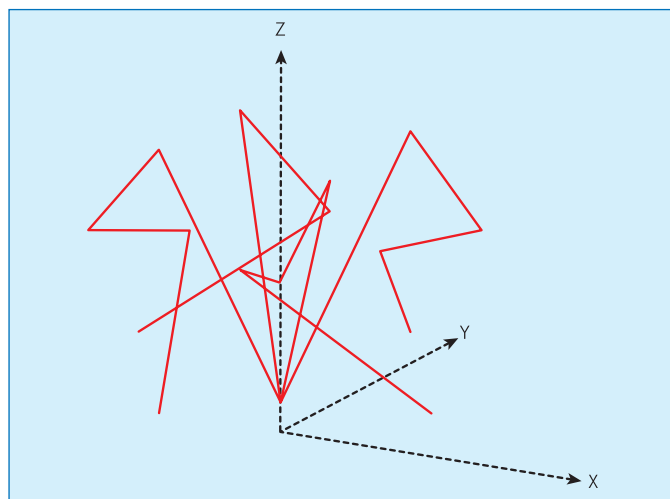


Рис. 13 Неветвящаяся древовидная антенна [11]

При генетическом синтезе антенны выдвигалось три требования: начальная точка первого сегмента обязательно должна находиться в точке подключения фидера (по крайней мере один из проводников должен быть связан с подачей сигнала); сегменты с одинаковыми начальной и конечной точками исключались из рассмотрения; не должен рассматриваться сегмент, пересекающий любой другой сегмент (пакет моделирования NEC2 не может работать с пересекающимися проводниками). В результате была синтезирована антенна с правосторонней вращающейся поляризацией (рис.12). Ее характеристики были подобны антенне на рис.4, хотя формы обеих антенн весьма различны. Для работы с сигналами линейной поляризации представлена аналогичная версия антенны, в которой все сегменты находятся строго в одной плоскости [10].

Особый класс генетических проводных антенн образуют **древовидные** конструкции. От фрактальных деревьев [1] они отличаются существенно более произвольной геометрией и отсутствием регулярной структуры. В данном классе

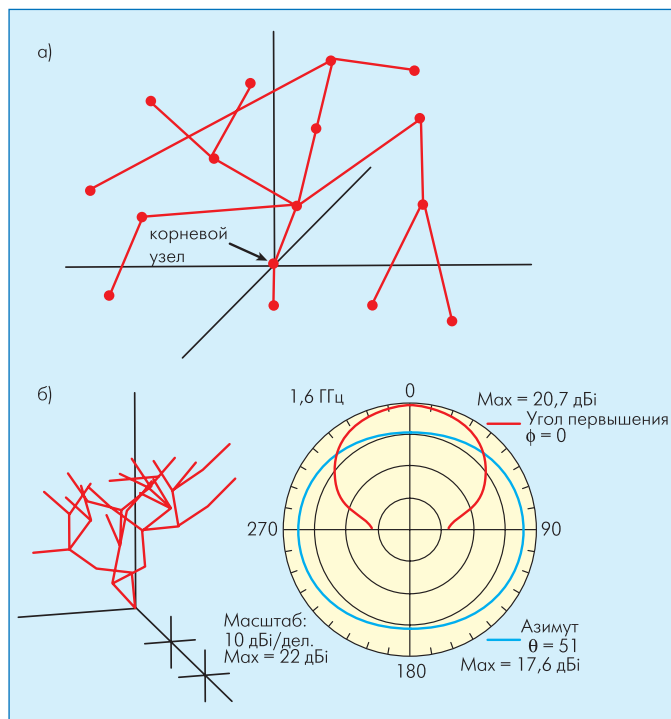


Рис. 14 Пример древовидной генетической антенны (а) и ее оптимизированный вариант (б) [10]

генетических антенн можно выделить неветвящиеся и ветвящиеся конструкции. Неветвящиеся древовидные антенны могут быть получены путем комбинации нескольких изогнутых проводных антенн [11], подключенных к общему фидеру. Именно такая конструкция первоначально предлагалась для проекта ST5 (рис.13).

Ветвящиеся древовидные антенны отличаются наличием узловых точек, в которых берут начало несколько проводных сегментов (рис.14). Попытка оптимизации ветвящихся древовидных антенн с помощью генетического подхода была впервые предпринята в работе [10]. Однако в этой работе в отношении антенн с линейной поляризацией допускалось пересечение проводных сегментов, что, как указывают авторы монографии [12], привело к завышению реальных свойств антенны. В частности, для приведенной на рис.14б антенны довольно неправдоподобно выглядит коэффициент усиления 20,7 дБ в угломестной плоскости и свыше 17,6 дБ – в азимутальной.

Продолжение следует.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Слюсар В.** Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. Часть 2. – Электроника: НТБ, 2007, № 6, с. 82–89.
2. **Слюсар В.** Антенны PIFA для мобильных средств связи: многообразие конструкций. – Электроника: НТБ, 2007, № 1, с. 64–74.
3. **John R. Koza.** Topic "Genetic Algorithms and Genetic Programming". – Department of Electrical Engineering. Stanford University Stanford, California. <http://www.genetic-programming.com/c2003lecture1modified.ppt>.
4. **Darryn J. Reid.** Feasibility and Genetic Algorithms: the Behaviour of Crossover and Mutation. – Land Operations Division of DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, 2000. <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=A387595&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.
5. US Patent № 5719794. Приоритет от 19 июля 1995 года.
6. **John P. Gianvittorio, Yahya Rahmat-Samii.** Fractals in the Design of Efficient Broadband Antennas.// UCLA Electrical Engineering Annual Research Review. – UCLA Antenna Research, Analysis and Measurement Laboratory, 2002. www.ee.ucla.edu/~johng/research/fractals/2002UCLAARRfractalq.pdf.
7. **Terry H. O'Donnel, Edward E. Altshuler, Steven R. Best.** The Significance of Genetic Representation in Genetic Antenna Design. – 2003. – <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=A418160&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.
8. **E. Altshuler.** Electrically Small Self-Resonant Wire Antennas Optimized Using a Genetic Algorithm. – IEEE Trans. Ant & Prop., Vol. 50, No 3, March 2002, pp. 297–300.
9. **Edward Altshuler et al.** Military Antenna Design Using Simple and Competent Genetic Algorithms. – Illinois Genetic Algorithms Laboratory, Report No 2005013, April, 2005. [ftp://ftp-illgal.ge.uiuc.edu/pub/papers/IlIiGALs/2005013.pdf](http://ftp-illgal.ge.uiuc.edu/pub/papers/IlIiGALs/2005013.pdf).
10. **Derek S. Linden.** Automated Design and Optimization of Wire Antennas Using Genetic Algorithms. – The Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, 10 Sep. 1997. <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=A329257&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.
11. **Gregory S. Hornby, Al Globus, Derek S. Linden, Jason D. Lohn.** Automated Antenna Design with Evolutionary Algorithms. – AIAA SPACE 2006 Conference, 19–21 September, 2006. – <http://alglobus.net/NASAWork/papers/Space2006Antenna.pdf>.
12. **David W. Corne, Peter J. Bentley.** Creative Evolutionary Systems. – Published Morgan Kaufmann, 2001.