

Литература

1. Потокное мультимедиа [Электронный ресурс] / Википедия – режим доступа : \www/ URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Потоковое_мультимедиа.
2. Журнал «КомпьютерПресс» [Электронный ресурс] – режим доступа : \www/ URL: <http://www.compress.ru/>.
3. Морозов Ю. Сделай web-камеру своим помощником, [Электронный ресурс] / КомпьютерПресс – режим доступа : \www/ URL: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=17485&iid=810>.
4. Видеонаблюдение [Электронный ресурс] / Википедия – режим доступа : \www/ URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Видеонаблюдение>.
5. Программирование с использованием Adobe Flex. [Текст]: Ч. Кейзоун, Дж. Лотт – СПб: Издательство «Питер», 2009. – 574с.

Розглянуто задачу вибору оптимальної структури випромінюючої системи реконфігурованої антени. Описано пакет програм, що реалізує наведений метод синтезу. Наведено результати синтезу провідової антени

Ключові слова: синтез, реконфігурована антена, вектор змінюваних параметрів, критерій якості

Рассмотрена задача выбора оптимальной структуры излучающей системы реконфигурируемой антенны. Описан пакет программ, реализующий представленный метод синтеза. Приведены результаты синтеза проволочной антенны

Ключевые слова: синтез, реконфигурируемая антенна, вектор варьируемых параметров, критерий качества

A reconfigurable antenna optimal radiating system structure selection problem is examined. A software package realizing the synthesis method introduced is described. The results of wire antenna synthesis are presented

Key words: synthesis, reconfigurable antenna, vector of parameters, performance criterion

УДК 621.396.67

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ РЕКОН- ФИГУРИРУЕМЫХ АНТЕНН

А.И. Лучанинов

Доктор физико-математических наук, профессор*
E-mail: luchan@kharkov.ua

Д.С. Гавва

Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: GavvaDS@gmail.com

Е.В. Крикун

Ассистент*
E-mail: elena-krikyn@rambler.ru

Ю.В. Скорикова*

E-mail: jvalort@gmail.com
*Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
пр. Ленина 14, г. Харьков, Украина, 61166
Контактный тел.: (057) 702-14-30

1. Введение

К настоящему времени созданы достаточно универсальные пакеты программ анализа проволочных и микрополосковых антенн. Однако, дальнейшее повышение уровня требований к параметрам и характеристикам антенных систем, развитие техники активных интегрированных антенн (в частности, реконфигури-

руемых), привели к необходимости усложнять конфигурацию излучателей, учитывать наличие включенных в их структуру сосредоточенных элементов, как с линейными, так и с нелинейными характеристиками, и, как результат, к необходимости решения задач структурного синтеза таких антенн.

Задачи синтеза геометрии излучающей структуры (ИС) являются наиболее трудными и поэтому

наименее разработанными. В результате их решения определяются форма и размеры излучающей системы, влияющие на выходные параметры и электрические характеристики ИС, и, таким образом, решение можно довести до технической документации на устройство. Эти задачи, по-сути, составляют основу автоматизированного проектирования ИС, которое является наиболее перспективным способом их разработки.

В настоящее время можно говорить лишь об отдельных успехах в решении данного класса задач. Усилия разработчиков были направлены на синтез наиболее простых по конструкции и технологии изготовления ИС. В частности, наиболее простой является задача нахождения реактивных сопротивлений нагрузок при неизменной геометрии директорных антенн для обеспечения максимального КНД в осевом направлении [1]. Следующей по сложности является задача подбора длин директоров при фиксированном их расположении [2, 3]. Однако полным исследованием возможностей директорной антенны является одновременный подбор всех длин вибраторов и расстояний между ними [4]. Во всех подобных работах для поиска экстремума целевой функции использовались классические методы нелинейного программирования [5].

Новый этап в решении задач структурного синтеза ИС начался с появлением эволюционных методов поиска оптимальных решений и, в частности, методов, использующих генетические алгоритмы [6]. Так, например, в работе [7] решена задача синтеза двухчастотной тонкопроволочной фрактальной антенны. В качестве вектора внутренних параметров рассматривались геометрические параметры фрактальных структур Коха различных поколений, а выходным параметром являлось значение КСВН на входе антенны. В работах [8, 9 и др.] представлены результаты синтеза тонкопроволочных излучателей сложной геометрии. При этом основное отличие этих работ, с точки зрения задачи структурного синтеза, заключалось в выборе варьируемой части вектора внутренних параметров. Например, предполагалось, что синтезируемый излучатель представляет собой проволочную структуру, состоящую из фиксированного числа соединенных между собой прямолинейных отрезков проводников, а изменение конфигурации ИС происходит только за счет варьирования длин этих отрезков [8, 9, 10]. Иными словами, элементами вектора внутренних параметров являлись координаты точек соединения отрезков проводников.

Принципиально иной подход к формированию вектора внутренних параметров синтезируемой ИС применен в работе [11]. Авторы данной работы использовали в качестве элементов вектора внутренних параметров некоторый набор конечного числа «элементарных» проволочных структур различной конфигурации, путем произвольного соединения которых варьировалась геометрия ИС в процессе синтеза. Несколько отличается и подход авторов работы [12] к формированию вектора внутренних параметров. Они предполагали, также как и в работах [8, 9 и др.], что излучатель образован соединенными между собой прямолинейными отрезками проводников, однако при синтезе структуры варьировались как длины отрезков, так и их число.

Несмотря на кажущееся разнообразие решенных задач структурного синтеза излучателей, все они решались в классической постановке. Отличие заключалось лишь в выборе элементов векторов внутренних и выходных параметров ИС, а особенностью решенных задач структурного синтеза ИС было следующее.

Во-первых, при структурном синтезе излучающей системы определяются форма и размеры ИС, обеспечивающие требуемые ее выходные параметры и характеристики. Это значит, что математическая модель, описывающая связь выходных характеристик ИС с ее конструктивным выполнением должна основываться на строгих электродинамических методах анализа излучающих структур. На наш взгляд, в настоящее время наиболее перспективными представляются метод интегральных уравнений и различные разновидности метода моментов [13].

Во-вторых, при решении задач структурного синтеза используются поисковые методы определения экстремума целевой функции, которые требуют задания некоторой исходной структуры ИС. В качестве исходной обычно выбиралась наиболее простая структура ИС, которая затем усложняется в ходе итерационного процесса с целью обеспечения требуемых критериев качества. Это требует многократного моделирования ИС, то есть многократного решения электродинамической задачи, причем сложность ее растет по мере усложнения конфигурации ИС.

И, наконец, в рассмотренных задачах (за исключением синтеза реактивных нагрузок АР) не учитывается наличие в структуре ИС управляемых (в частности, переключаемых) элементов с сосредоточенными параметрами. Поэтому необходимое для получения требуемых критериев качества распределение тока достигается только за счет изменения геометрической формы ИС, а не за счет изменения ее электрической конфигурации.

Эти особенности были учтены авторами при разработке одного из методов синтеза реконфигурируемых антенн (РА), которому и посвящена данная статья. При этом, под РА понимается устройство, в состав которого входят излучающая структура и сосредоточенные элементы с управляемыми характеристиками, наличие которых позволяет изменять распределение тока в ИС и, как результат, характеристики антенны (входной импеданс, характеристику направленности, рабочую полосу частот и т.п.).

2. Постановка задачи и алгоритм решения структурного синтеза РА

При математической постановке задачи синтеза излучающую систему будем описывать векторами внутренних $\vec{X}(x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$, выходных $\vec{Y}(y_1, y_2, \dots, y_M)$ и внешних $\vec{Q}(q_1, q_2, \dots, q_L)$ параметров (N_x , M , L – число выходных, внутренних и внешних параметров, соответственно) [14].

В качестве компонентов вектора внутренних параметров в общем случае выбираются параметры, характеризующие структуру ИС: положение и состояние переключающих элементов, размеры и положение про-

водников ИС и т.д. При этом стоит обратить внимание, что вектор \bar{X} , при реализации традиционного метода синтеза антенн, подвергается изменению. Однако при синтезе РА существует возможность зафиксировать часть его переменных, так как геометрия РА остается неизменной, меняется лишь состояние переключающих элементов ИС. Учет данной особенности может позволить существенно сократить время, отводимое на синтез антенны.

Это позволяет излучающую структуру характеризовать математической моделью, которая описывает связь вектора выходных параметров \bar{Y} с векторами внутренних \bar{X} и внешних \bar{Q} параметров

$$\bar{Y} = \mathfrak{Z}(\bar{X}, \bar{Q}), \tag{1}$$

где \mathfrak{Z} – некоторый оператор, определяющий свойства излучающей системы.

Разделим все внутренние параметры на две группы: варьируемые (x_1, x_2, \dots, x_N) , то есть те, которые изменяются в процессе синтеза (в нашем случае это состояние переключающих элементов РА), и неизменные $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{N_1})$ – геометрия ИС антенны. Объединим варьируемые параметры в вектор $\bar{X}(x_1, x_2, \dots, x_N)$, неизменные – в вектор $\hat{\bar{X}}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{N_1})$ и запишем (1) в виде:

$$\bar{Y} = \mathfrak{Z}(\bar{X}, \bar{Q}) = \mathfrak{Z}(\bar{X}, \hat{\bar{X}}, \bar{Q}) = \mathfrak{Z}(\bar{X}). \tag{2}$$

Соотношение (2) отражает только наиболее существенную с точки зрения синтеза зависимость – зависимость вектора выходных параметров проектируемой антенны от параметров, которыми можно варьировать при ее синтезе.

Важной стороной синтеза является выбор критерия, по которому определяются свойства устройства и который позволяет количественно оценить, какое из устройств данного класса является наилучшим. Эти критерии в зависимости от назначения устройства могут быть самыми разными. В большинстве случаев частные критерии качества формулируются следующим образом:

$$\varphi_i(\bar{X}) = \begin{cases} d(y_i(\bar{X}) - y_{0i}) & \text{при } \delta > \delta_i \\ 0 & \text{при } \delta \leq \delta_i \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, N}, \tag{3}$$

где: d – функция, определяющая отличие расчетного значения i -го выходного параметра синтезируемого устройства $y_i(\bar{X})$ от его требуемого значения y_{0i} ; δ_i – допуск на выполнение требований к точности поиска минимума i -го критерия; N – число частных критериев качества. Зачастую [15] функцию d выбирают в виде расстояния между двумя точками определяемыми векторами $\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ и $\bar{Y}_0 = (y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0n})^T$.

Таким образом, частный критерий является функционалом той или иной выходной характеристики. В то же время он является функцией многих переменных, которыми являются варьируемые части вектора внутренних параметров устройства (в нашем случае вектора \bar{X}).

Поскольку проектируемая излучающая система РА одновременно характеризуется несколькими выходными параметрами, определяющими её качество функционирования, то частные критерии качества образуют векторный критерий качества $\bar{\Phi}(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N)$ и

задача синтеза является многокритериальной. В этих случаях для формирования единой целевой функции $F(\bar{X})$ используют ряд формальных приёмов: осуществляют свёртку частных критериев качества в единую целевую функцию на основе аддитивного объединения с соответствующими весовыми коэффициентами, либо применяют систему ранговых критериев; приводят размерные выходные параметры к безразмерным величинам для дальнейшего их сравнения [16]. Чаще всего в задачах синтеза антенн используется аддитивное объединение частных критериев качества и в этом случае целевая функция имеет вид

$$F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^N W_i \varphi_i(\bar{X}), \tag{4}$$

где $\varphi_i(\bar{X})$ – частные критерии, значения которых контролируются при синтезе; W_i – весовые коэффициенты.

Использование аддитивного способа построения целевой функции (4) дает возможность учитывать вклад каждого из частных критериев в целевую функцию с помощью весовых коэффициентов, так как целевая функция является линейной композицией частных критериев качества, имеющих различную чувствительность при изменении внутренних параметров устройства.

В результате, задача структурного синтеза формулируется в следующей постановке: необходимо определить значение вектора \bar{X} , при котором:

$$F(\bar{X}) = \text{extr} \left. \begin{matrix} G_j^{(1)}(\bar{X}) \leq G_{j0}^{(1)} \\ G_j^{(2)}(\bar{X}) \geq G_{j0}^{(2)} \\ G_j^{(3)}(\bar{X}) = G_{j0}^{(3)} \end{matrix} \right\}, \quad j = \overline{1, K}. \tag{5}$$

Здесь: \bar{X} – вектор варьируемых параметров, элементами которого являются внутренние параметры синтезируемого устройства; K – число ограничений в виде равенств или неравенств; $G_j^{(1)}(\bar{X})$, $G_j^{(2)}(\bar{X})$, $G_j^{(3)}(\bar{X})$ – расчетные значения j -го ограничения в виде неравенств или равенств; $G_{j0}^{(1)}$, $G_{j0}^{(2)}$, $G_{j0}^{(3)}$ – требуемые значения j -го ограничения в виде неравенств или равенств. Такая постановка задачи синтеза дает возможность управлять процессом синтеза путем включения, если это необходимо, части ограничений в целевую функцию и наоборот.

Однако отмеченные во вводной части статьи особенности не позволяют применить существующий подход для решения задачи структурного синтеза реконфигурируемых антенн, заключающейся в определении оптимальной геометрии ИС и выборе места включения переключающих элементов, необходимых для изменения электрической конфигурации РА. Поэтому в настоящей работе предлагается альтернативный подход к синтезу РА, и, прежде чем перейти к его описанию, приведем математическую постановку задачи.

Вначале введем понятие состояния РА. Под ним будем понимать конкретную электрическую конфигурацию ИС, которая устанавливается за счет определенного состояния переключающих элементов. Задача синтеза – определить те состояния РА, при которых выходные параметры антенны удовлетворяют поставленным требованиям. Следует учесть, что в

отличие от традиционных антенн к выходным параметрам РА требования формулируются для каждого m -го состояния в виде некоторого множества векторов \bar{Y}_0^m ($m = \overline{1, M}$; M – число состояний РА), элементы которых y_{0i}^m определяют требования к i -му параметру антенны.

Таким образом, РА необходимо характеризовать набором частных критериев качества по каждому из контролируемых выходных параметров для каждого состояния:

$$\varphi_i^m(\bar{X}) = \begin{cases} d(y_i^m(\bar{X}) - y_{0i}^m) & \text{при } \delta > \delta_i^m \\ 0 & \text{при } \delta \leq \delta_i^m \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, N}; m = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Это значит, что необходимо образовать столько целевых функций, сколько состояний должна иметь РА, то есть:

$$F^m(\bar{X}) = \sum_{i=1}^N W_i^m \varphi_i^m(\bar{X}) \quad \forall m = \overline{1, M}. \quad (7)$$

Состояния РА определяются только переключающими элементами, следовательно, они независимы друг от друга. Поэтому определять векторы внутренних параметров следует из решения M задач

$$F^m(\bar{X}^m) = \text{extr} \left. \begin{cases} G_j^{(1,m)}(\bar{X}^m) \leq G_{j_0}^{(1,m)} \\ G_j^{(2,m)}(\bar{X}^m) \geq G_{j_0}^{(2,m)} \\ G_j^{(3,m)}(\bar{X}^m) = G_{j_0}^{(3,m)} \end{cases} \right\} \quad j = \overline{1, K^m}; m = \overline{1, M}. \quad (8)$$

Здесь: \bar{X}^m – вектор варьируемых параметров, элементами которого являются внутренние параметры синтезируемого устройства, соответствующие m -му состоянию РА; K^m , $G_j^{(1,m)}(\bar{X}^m)$, $G_j^{(2,m)}(\bar{X}^m)$, $G_j^{(3,m)}(\bar{X}^m)$, $G_{j_0}^{(1,m)}$, $G_{j_0}^{(2,m)}$, $G_{j_0}^{(3,m)}$ – обозначают те же величины, что и в (3).

Сравнивая (8) и (5) видим, что задача структурного синтеза в традиционной постановке (5) является частным случаем задачи синтеза реконфигурируемых антенн.

Главное отличие предлагаемого подхода к синтезу РА от существующих состоит в том, что в качестве элементов варьируемой части вектора внутренних параметров выбираются переменные, характеризующие состояние переключающих элементов. В силу того, что в дальнейшем рассматриваются только переключающие элементы с двумя состояниями – «включен» и «выключен», элементы вектора внутренних параметров являются дискретными двоичными переменными. Это позволяет путем выбора вектора внутренних параметров изменять конфигурацию ИС за счет исключения отдельных ее элементов, то есть, при таком подходе изменение конфигурации ИС возможно только в сторону ее упрощения. Следовательно, если для нахождения экстремума целевой функции задачи синтеза используются поисковые методы, то в качестве исходной структуры ИС необходимо выбрать структуру достаточно сложной конфигурации. Кроме этого, задача синтеза в такой постановке заключается в поиске экстремума некоторой целевой функции, зависящей от дискретных переменных. Для решения задач такого типа нельзя применять традиционные методы нелинейного программирования. В связи с этим необходимо использовать такие

методы, которые были бы ориентированы на решение задач поиска экстремума функций дискретных переменных и, в частности, функций, зависящих от двоичных переменных.

Наиболее перспективными для решения таких задач являются так называемые эволюционные методы поиска и, в частности, генетические алгоритмы (ГА) [6], моделирующие процессы природной эволюции; методы, основанные на моделировании поведения роя пчел (МРП) [17]; методы, основанные на моделировании поведения колонии муравьев (МКМ) [18]. В настоящее время эволюционные методы широко используются при решении задач синтеза радиоэлектронных устройств различных типов [19].

Анализ результатов применения эволюционных методов для решения задач синтеза устройств различных типов позволил сделать их сравнительную оценку. На основании сравнения эффективности применения МРП и ГА можно утверждать следующее.

1). Одним из преимуществ МРП перед ГА является его алгоритмическая простота. Генетический алгоритм состоит из трёх основных операций: отбор, кроссинговер и мутация. В составе этих операций он имеет несколько вариантов реализации. Например, может быть выбран турнирный или пропорциональный отбор; может быть выбран одно- или двухточечный кроссинговер. В МРП, напротив, содержится только одна простая операция: расчет скорости частиц, что исключает необходимость выбора лучших операций для решения той или иной конкретной задачи.

2). Каждый из этих алгоритмов имеет различные численные параметры, которые должны тщательно выбираться. В случае ГА должны быть выбраны объём совокупности, а также вероятности кроссинговера и мутаций. В случае МРП должны быть выбраны объём совокупности и инерционный вес для отдельных частиц. Манипулировать этими параметрами, однако, легче, чем изменять различные операторы. Кроме того, уже сделано достаточно много всесторонних исследований влияния этих параметров, что облегчает их выбор.

3). ГА и МРП различаются также и возможностью контроля сходимости. В ГА вероятность кроссинговера и мутации может целенаправленно влиять на сходимость алгоритма, но в МРП контроль сходимости, осуществляемый за счет изменения инерционных весов, гораздо более эффективен, чем в ГА. Такой тип контроля позволяет пользователю определить степень сходимости и контролировать, в конечном счете, критерий преждевременного окончания итерационного процесса. Этот случай возникает в ГА тогда, когда все индивидуумы обладают одинаковым генетическим кодом (являющимся лучшим для индивидуума), таким же, как и для индивидуума начального поколения. В МРП данный эффект может контролироваться либо предотвращаться.

4). Наконец, концептуальные основы этих двух методов оптимизации опираются на две полностью различные парадигмы. МРП основывается на социальном поведении роя, а ГА, основанный на кодировании генов и естественном отборе, имеет взаимную исключительность. Это дает возможность интеграции двух методов. Попытки объединения этих двух методов

показали, что МРП и ГА могут успешно применяться в задачах, использующих найденное с использованием алгоритма МРП решение, как начальное приближение для ГА и наоборот. Эти совместные алгоритмы в некоторых задачах превосходили и ГА и МРП, работающие по отдельности.

Анализ методов МКМ показал, что они эффективнее по сравнению с ГА (в процессе поиска используются сведения о всех предыдущих итерациях, тогда как в ГА используются данные только о предыдущей), методы МКМ меньше подвержены неоптимальным начальным решениям (из-за случайного выбора пути и памяти о предыдущих шагах поиска), они могут применяться для решения динамических задач. В то же время методы МКМ имеют и существенные недостатки.

Во-первых, несмотря на то, что в методах МКМ гарантируется сходимость итерационного процесса, однако время сходимости не определено. Во-вторых, обычно требуется применение дополнительных методов локального поиска. И, в-третьих, эти методы сильно зависят от параметров настройки, которые подбираются только на основе повторных решений одной и той же задачи.

На основе этих сравнительных характеристик эволюционных алгоритмов можно утверждать, что при выборе оптимальной конфигурации излучающей системы РА и определении мест включения управляющих элементов, принимая во внимание специфику этой задачи, наиболее целесообразно использовать либо генетический алгоритм, либо алгоритм поведения роя пчел. В дальнейшем, при реализации программы для поиска оптимальной структуры излучающей системы РА, авторами выбран бинарный генетический алгоритм. Определяющим аргументом в пользу такого выбора послужило то, что ГА изначально предназначен для поиска экстремума функций, аргументами которых являются двоичные переменные.

Описанный подход к синтезу реконфигурируемых антенн был реализован в виде комплекта прикладных программ, который является хорошо структурируемым и предназначен для синтеза РА с тонкопроволочными излучающими системами. Основные этапы синтеза РА при этом заключаются в следующем.

1). Выбирается исходная структура ИС, обладающая некоторой избыточностью относительно возможности реализации различных распределений тока, необходимых для получения требуемых значений критериев качества.

2). Для этой структуры выбираются исходное (достаточно большое) количество переключающих элементов и координаты их включения. Формируется вектор внутренних параметров \bar{X} .

3). Проводится электродинамический анализ исходного варианта ИС, то есть определяются все характеристики излучающей системы, не зависящие от состояния переключающих элементов. Например, если математическая модель ИС реализована с использованием метода интегральных уравнений, то такими характеристиками являются матрица собственных и взаимных сопротивлений относительно клемм подключения управляющих элементов и входных клемм

антенны, а также система парциальных диаграмм направленности относительно тех же клемм.

4). Из решения задачи (8) определяются векторы внутренних параметров РА \bar{X}^m , определяющие ее конфигурацию в определенных условиях функционирования РА решается задача структурного синтеза (5). Следует иметь в виду, что решение каждой из задач (5), как и любой задачи синтеза, не является единственным, то есть для одного и того же состояния РА может быть получено несколько решений \bar{X}^m , которые обозначим как \bar{X}_v^m ($v = 1, N_m, N_m$ - полученное число решений для m-го состояния РА). Это значит, что требуемые выходные параметры одного конкретного состояния РА могут быть реализованы при нескольких различных комбинациях переключающих элементов.

5). На последнем этапе синтеза выбирается по одному вектору из каждого m-го набора \bar{X}_v^m ($v = 1, N_m$), таким образом, чтобы выбранные вектора \bar{X}^m имели бы наибольшее количество совпадающих компонентов. Этим обеспечивается выбор таких наборов состояний переключающих элементов, при которых число требуемых для реконфигурации переключающих элементов оказывается минимальным.

В качестве выходных параметров рассмотрены следующие характеристики поля излучения: диаграмма направленности

$$\bar{f}(\theta, \phi) = \bar{f}_2(\theta, \phi) - \bar{Z}_{r21}^7 \cdot (\bar{Z}_{r11}^7 + \bar{Z}_L^7(\bar{X}))^{-1} \bar{f}_1^7(\theta, \phi), \quad (9)$$

коэффициент усиления

$$G_{\theta, \phi}(\theta_0, \phi_0) = \frac{[\bar{f}_{\theta, \phi 2}(\theta_0, \phi_0) - \bar{Z}_{r21}^7 \cdot (\bar{Z}_{r11}^7 + \bar{Z}_L^7(\bar{X}))^{-1} \bar{f}_{\theta, \phi 1}^7(\theta_0, \phi_0)]^2}{30 \operatorname{Re}[Z_{r22} - \bar{Z}_{r21}^7 \cdot (\bar{Z}_{r11}^7 + \bar{Z}_L^7(\bar{X}))^{-1} \bar{Z}_{r12}^7]} \quad (10)$$

а также частотная зависимость входного сопротивления ИС

$$Z_{2E} = Z_{r22} - \bar{Z}_{r21}^7 \cdot (\bar{Z}_{r11}^7 + \bar{Z}_L^7(\bar{X}))^{-1} \bar{Z}_{r12}^7, \quad (11)$$

выражения для которых были получены авторами при формировании математической модели тонкопроволочных РА методом моментов [20]. В приведенных соотношениях: $\bar{f}_2(\theta, \phi)$ – векторная комплексная характеристика направленности базисной функции, аппроксимирующей распределение тока в окрестности входных клемм РА; $\bar{f}_1(\theta, \phi)$ – матрица-столбец, элементами которой являются векторные комплексные характеристики токов, описываемых базисными функциями; \bar{Z} – элементы матрицы обобщенных импедансов РА.

В алгоритме для моделирования ИС использован метод интегральных уравнений. Это позволило основные вычисления, требующие значительного времени, такие как обработка информации о геометрических свойствах излучающей структуры, выбор и формирование системы базисных функций для решения интегральных уравнений, вычисление

обобщенной матрицы собственных и взаимных сопротивлений выполняются только один раз перед процедурой синтеза.

В процессе синтеза все требуемые для анализа ИС значения выбираются из уже вычисленных и повторно не вычисляются. Данное обстоятельство позволило реализовать достаточно эффективный пакет программ выбора оптимальной геометрии ИС и места включения управляющих элементов при минимальном их количестве.

Стоит также отметить, что созданный пакет программ допускает дальнейшее его расширение путем включения дополнительных модулей моделирования других типов излучающих систем, например, микрополосковых ИС. Для этого предусмотрено задание исходных данных для синтеза в файлах формата Touchstone. Вследствие этого при синтезе РА имеется возможность использовать результаты моделирования, полученные с использованием других пакетов моделирования, например, Microwave Office или HFSS.

В разработанном программном продукте вычислительный модуль моделирования тонкопроволочных ИС был реализован в виде четырех отдельных вычислительных модулей. Обмен данными между ними осуществляется при помощи временных файлов данных, которые хранятся на внешних накопителях. Первый модуль предназначен для вычисления геометрических параметров исходного варианта проволочной ИС и определения систем базисных и весовых функций. Второй модуль предназначен для вычисления элементов матрицы обобщенных импедансов исходной излучающей системы. Результатом вычислений третьего модуля является матрица импедансов излучателя относительно его внешних узлов, т.е. узлов, посредством замыкания и размыкания которых проводится изменение структуры антенны. И, наконец, четвертый модуль предназначен для вычисления внешних параметров излучающей структуры (входного сопротивления, ДН, и т.д.), моделируемой в процессе синтеза. Такая структура позволяет оперативно изменять в ходе вычислений число ветвей излучателя, количество и место расположения узлов, определяющих структуру излучателя, что необходимо в процессе поиска оптимальной конфигурации антенны. Во-вторых, с учетом наличия внешних узлов, посредством которых изменяется структура излучателя, был разработан быстродействующий алгоритм обращения матрицы обобщенных импедансов, который позволил значительно увеличить эффективность всей процедуры синтеза.

Для верификации комплекта программ с его помощью была решена задача синтеза реконфигурируемой антенны обеспечивающей на частотах $f_1 = f_0$ и $f_2 = 1,5f_0$ ненаправленную в горизонтальной плоскости характеристику направленности и входное сопротивление $Z_{вх} = 50 \text{ Ом}$.

В качестве исходной использована излучающая система, показанная на рис. 1, в структуру которой было включено 26 переключателей. В результате синтеза наилучшие результаты критериев качества получены для четырех вариантов РА, которые показаны на рис. 2.

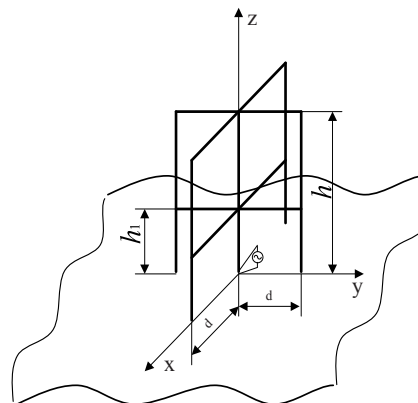


Рис. 1. Исходная излучающая структура

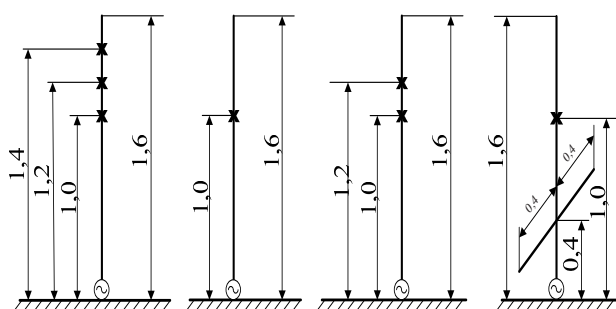


Рис. 2. Синтезированные антенны

Эти излучатели имеют от одного до трёх переключателей, координаты расположения которых приведены на рисунке (координаты нормированы умножением на волновой коэффициент $k = 2\pi / \lambda_0$). Реализованные значения входного сопротивления приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, при замкнутых переключателях входное сопротивление излучателей близко к заданному на частоте f_1 , а при разомкнутых – на частоте f_2 .

Таблица 1

f / f_0	1,0		1,5	
№ структуры	переключатели замкнуты	переключатели разомкнуты	переключатели замкнуты	переключатели разомкнуты
1	51,84 + j26,34	10,92 – j83,21	308,1 – j84,52	41,9 + j6,85
2	51,84 + j26,34	12,84 – j77,72	308,1 – j84,52	53,86 + j14,5
3	51,84 + j26,34	11,1 – j82,92	308,1 – j84,52	42,74 + j6,96
4	46,54 + j29,86	98,77 – j42,05	169,24 – j114,07	40,72 – j3,717

3. Выводы

В настоящее время стремительно развивается направление структурного синтеза ИС, доводящее синтез до полного представления о ее конструкции. Именно это направление должно стать основой автоматизированного проектирования ИС, а одной из задач этого направления для реконфигурируемых антенн является задача выбора оптимальной структуры ИС и мест включения управляющих элементов в структуру ИС.

В некоторой степени данные вопросы были решены авторами. Полученные ими результаты показывают, что предложенный подход к синтезу ИС, алгоритм

и разработанный на его основе комплект программ могут быть использованы для структурного синтеза реконфигурируемых антенн.

Литература

1. Lindenmeier H. Diagram optimization of arrays with reactively loaded arbitrary linear elements // H. Lindenmeier, A. Schwab / Int. Symp. Dig. Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. 22. – P. 443-446.
2. Hojsten J. H. Maximum gain of Yagi-Uda arrays // J. H. Hojsten, H. Schjaer-Jacobsen, E. Nilsson, J. Bach Andersen / Electronic Letters. – 1971. – Vol. 7, № 18. – P. 531-532.
3. Chen C. A. Optimum element lengths of Yagi-Uda arrays // C. A. Chen, D. K. Chen / IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1975. – Vol. 23, № 1. – P. 8-15.
4. Kajfez D. Non-linear optimization extends the bandwidth of Yagi antenna // D. Kajfez / IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1975. – Vol. 23, № 2. – P. 287-289.
5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
6. Back T. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice / T. Back. – N.Y.: Oxford University Press, 1996. – 314 p.
7. Werner D. H. Genetically engineered dual-band fractal antennas / D. H. Werner, P.L. Werner, K. H. Church et al. // Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2001. м Vol. 3. – P. 628-631.
8. Altshuler E. E. Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm / E. E. Altshuler // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50, № 3. – P. 297-300.
9. Altshuler E. E. An ultrawide-band impedance-loaded genetic antenna / E. E. Altshuler, D. S. Linden // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - 2004. – Vol. 52, № 11. – P. 3147-3150.
10. Pantoja M. F. GA design of small wire antennas / M. F. Pantoja, F. G. Ruiz, A. R. Bretones et al. // Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2004. – Vol. 4. – P. 4412-4415.
11. Pantoja M. F. GA design of small thin-wire antennas: comparison with sierpinsky-type prefractional antennas / M. F. Pantoja, F. G. Ruiz, A. R. Bretones et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. – Vol. 54, № 6. – P. 1879-1882.
12. Werner P. L. Novel design techniques for miniature circularly-polarized antennas using genetic algorithms // P. L. Werner, M. J. Wilhelm, R. T. Salisbully et al. / Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2003. – Vol. 1. – P. 145-148.
13. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике / Р. Митра. – М.: Мир, 1977. – 485 с.
14. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
15. Аоки М. Введение в методы оптимизации / М. Аоки. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
16. Безрук В.М. Методы решения многокритериальных задач оптимизации информационных систем // В.М. Безрук / Радиоэлектроника и Информатика. – 1999. – №2. – С. 63-68.
17. Bonabeau E. Swarm intelligence: from natural to artificial systems / E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. – N.Y.: Oxford University Press, Inc., 1999. – 307 p.
18. Dorigo M. Ant colony optimization / M. Dorigo, T. Stutzle. – Cambridge, MA: MIT Press, 2004. – 319 p.
19. Zebulum R.S. Evolutionary Electronics: Automatic Design of Electronic Circuits and Systems by Genetic Algorithms / R.S. Zebulum, M.A. Pacheco, Marley Maria B.R. Vellasco. – N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2002. – 306 p.
20. Лучанинов А.И. Математическая модель реконфигурируемых антенн // А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Скорикова / Радиотехника. – 2010. – №161. – С. (в печати).