

УДК 621.396.67

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ РАМОЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Посный О.А., Громоздин В.В., Толкачев А.В.

На основе обобщенного метода наводимых ЭДС рассчитано входное сопротивление эллиптического рамочного излучателя. Проанализировано влияние сжатия эллиптической рамки на ее входные характеристики. Представлены результаты экспериментальных исследований и оптимизации геометрических параметров эллиптической рамки.

Одним из направлений совершенствования замкнутых излучающих структур является поиск оптимального варианта конфигурации антенны. В качестве критерия оптимизации в ряде задач (когда характеристики излучения не претерпевают значительных изменений при трансформации геометрии вибратора) выбираются частотные свойства входного сопротивления антенны с целью полноценной реализации потенциальных свойств антенной системы. Управление входным сопротивлением вибраторов имеет важное значение при построении малоэлементных антенных решеток. Моделирование характеристик эллиптических рамочных излучателей позволяет охватить широкий спектр конфигураций - от круглой рамки до петлевого вибратора - и проанализировать поведение входных характеристик рамки при изменении ее геометрии.

Входное сопротивление эллиптической рамки определяется на основе обобщенного метода наводимых ЭДС [1]: пространственная проволочная конструкция рассматривается как система j связанных вибраторов с синусоидальным распределением тока по плечам. Каждый вибратор состоит из двух соседних сегментов, в точке соприкосновения которых ток достигает некоторого максимального значения, равного I_j , а на противоположных концах этих сегментов ток уменьшается до нуля. В общем случае вибраторы являются несимметричными с согнутыми под произвольными углами плечами, а их ориентация в пространстве друг относительно друга также произвольна.

Выбор такой методологии в большей степени обусловлен наличием аналитических выражений [1] для компонент электрического поля, создаваемого током $I \sin[k(l-z)]$, протекающим в одном плече вибратора

$$E_z = -j30I \left[\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - \cos(kl) \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} - j \sin(kl) \left(1 + \frac{1}{jkr_0} \right) \frac{z}{r_0} \cdot \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \right],$$
$$E_\varphi = \frac{j30I}{\rho} \left\{ (z-l) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - z \cdot \cos(kl) \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} + \frac{1}{k} \sin(kl) \cdot \left[1 - jkz \left(1 + \frac{1}{jkr_0} \right) \frac{z}{r_0} \right] \cdot \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \right\},$$

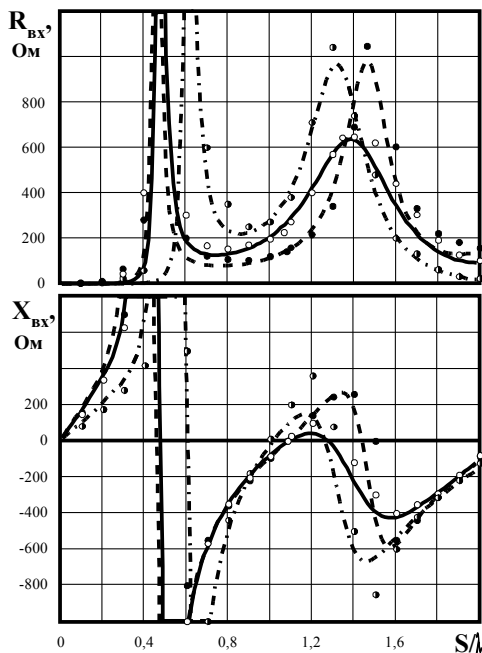
где I - амплитуда тока; $k=2\pi/\lambda$ - волновое число, λ - длина волны в свободном пространстве; l - длина плеча вибратора; z - продольная координата в цилиндрической системе координат, связанной с вибратором, отсчитываемая от зажимов; ρ - радиальная координата точки пространства, в которой определяется поле; r_0 и r_1 - расстояния соответственно от зажимов и конца вибратора до этой точки.

Входное сопротивление антенны однозначно определяется подводящим напряжением и током на зажимах, который может быть получен в результате решения системы уравнений Кирхгофа для выделенной совокупности вспомогательных вибраторов.

Результаты расчета входного сопротивления, проведенного по описанной методике для круглой рамки, хорошо согласуются с результатами, имеющимися в литературе [2,3]. Программа расчета написана на языке Си (Borland C++ 5.0).

На основе обобщенного метода наводимых ЭДС произведен расчет входного сопротивления эллиптических рамок, состоящих из однородного проводника, со значениями эксцентриситетов $\epsilon=0$; 0,736; 0,893; 0,961; 0,991; 0,997. Отдельные результаты теоретических расчетов изображены в виде графических зависимостей активной и реактивной составляющих входного сопротивления от относительного периметра рамки S/λ на рисунке 1. Периметр $S=4aE(\epsilon)$, где a - большая полуось эллипса, $E(\epsilon)$ - полный эллиптический интеграл второго рода.

В диапазоне изменения относительного периметра круглой рамки ($\epsilon=0$) S/λ от 0 до 2 наблюдаются три резонанса (рисунок 1):



$\epsilon=11,98$	Теория	Эксперимент
$\epsilon=0,0$	--- --	● ● ● ●
$\epsilon=0,893$	— — —	○ ○ ○ ○
$\epsilon=0,997$	- · - · -	● ● ● ●

Рисунок 1 - Зависимость активной и реактивной составляющих входного сопротивления эллиптической рамки от ее относительного периметра

два параллельных ($S/\lambda \approx 0,45$ и $1,45$) и один последовательный ($S/\lambda \approx 1,1$). Область первого параллельного резонанса ($S/\lambda \approx 0,45$) характеризуется высокой добротностью. Активная часть входного сопротивления при резонансе превышает 3000 Ом и практически не снижается при увеличении толщины проводника рамки. Работать в области первого параллельного резонанса затруднительно в связи с наличием резких перепадов реактивной составляющей входного сопротивления и высокой крутизной характеристик.

Область низкоомного последовательного резонанса занимает широкую полосу частот и соответствует в значительной степени режиму осевого излучения, который занимает полосу $0,717 \dots 1,525 S/\lambda$. Средний уровень активной части входного сопротивления в этой области составляет порядка 80...100 Ом и не испытывает больших изменений при вариациях толщины проводника (относительное изменение среднего уровня активной составляющей входного сопротивления при изменении толщины проводника в 10 раз не превышает 20 %).

За счет изменения толщины проводника можно эффективно управлять уровнями активной и реактивной составляющих входного сопротивления рамки в области второго параллельного резонанса ($S/\lambda \approx 1,45$). Так, например, изменение относительного радиуса проводника t/S от 0,00125 ($\Omega = 2 \cdot \ln(S/t) = 13,37$) до 0,0075 ($\Omega = 9,79$) приводит к снижению резонансного значения активной составляющей с 1400 до 650 Ом, что сопровождается сужением диапазона изменения реактивной составляющей в этой области.

Такая зависимость позволяет в некоторых пределах расширить область стабильных значений активной части входного сопротивления и снизить влияние реактивной части входного сопротивления на согласование с фидерными линиями за счет применения более «толстых» проводников.

При введении в схему антенны элементов, компенсирующих реактивную составляющую входного сопротивления, можно добиться хорошего согласования в режиме осевого излучения.

Однако не всегда имеется возможность реализовать «толстый» проводник, что связано не только с технологическими трудностями, но и материалоемкостью таких конструкций.

В этом случае эффективно управлять входными характеристиками рамочной антенны можно за счет изменения эксцентриситета эллипса рамки. Как видно из графиков на рисунке 1, изменение эксцентриситета эллипса приводит к смещению положений резонансов и изменению добротностей (уровней активной и реактивной составляющих). Так, например, при увеличении эксцентриситета первый параллельный резонанс смещается в высокочастотную область (от $S/\lambda \approx 0,45$ до $S/\lambda \approx 0,6$), а последовательный и второй параллельный резонансы смещаются в низкочастотную область (соответственно $S/\lambda \approx 1,1 \rightarrow S/\lambda \approx 1,0$ и $S/\lambda \approx 1,45 \rightarrow S/\lambda \approx 1,3$).

В то время как уровень первого параллельного резонанса не претерпевает значительного снижения, в области последовательного резонанса увеличение эксцентриситета приводит к росту среднего значения активной части входного сопротивления, и, что очень важно, мало изменяется частотная полоса этой области. И, наконец, в области второго параллельного резонанса при изменении эксцентриситета от 0 (круглая рамка) до 1 (петлевой вибратор) наблюдается экстремум резонансного значения активной составляющей и экстремум диапазона изменения амплитуды реактивной составляющей входного сопротивления эллиптической рамки. Минимумы этих величин достигаются при значениях эксцентриситета порядка 0,89...0,96.

На рисунке 1 кружками изображены отдельные результаты экспериментальных исследований входного сопротивления эллиптических рамок, которые в целом подтверждают адекватность принятых математических моделей. Заметим, что наилучшее совпадение теории и эксперимента наблюдается для «более тонких» проводников. Объясняется это используемой методологией: ток считается текущим по оси проводника, а поле определяется на его поверхности.

Описанные эффекты изменения входного сопротивления целесообразно использовать для управления входными характеристиками эллиптической рамки за счет изменения эксцентриситета эллипса, что позволяет сжать диапазон изменения входного сопротивления рамочного излучателя, что, в свою очередь, положительно сказывается на широкополосных свойствах входных характеристик. Кроме того, управление входными характеристиками излучателей дает возможность получить требуемые уровни согласования со стандартными фидерными линиями как в случае одиночных рамок, так и в составе малоэлементных решеток (при этом необходимо следить за тем, чтобы обеспечивались требуемые направленные свойства).

В ходе анализа характеристик круглых рамочных излучателей определена связь толщины проводника рамки с ее входным сопротивлением. Следовательно, оптимизацию геометрических параметров эллиптического излучателя с целью получения максимальной широкополосности по входным характеристикам в частотной полосе режима осевого излучения достаточно проводить по одному параметру - эксцентриситету рамки, зафиксировав толщину проводника.

Получение максимальной широкополосности по входным характеристикам в частотной полосе режима осевого излучения сводится к поиску оптимального значения эксцентриситета эллиптической рамки, соответствующего минимальному диапазону изменения активной части входного сопротивления рамки и минимальному отношению абсолютного значения реактивной составляющей к уровню активной.

Опираясь на результаты анализа входного сопротивления эллиптиче-

ских рамочных излучателей и замечания, изложенные выше, построим целевую функцию

$$F(\varepsilon) = \left(\frac{R_{ex\max}}{R_{ex\min}} \right) \bigg|_{\Delta f},$$

где $R_{ex\max}$ и $R_{ex\min}$ - соответственно максимальное и минимальное значения активной части входного сопротивления эллиптической рамки в диапазоне частот Δf , соответствующем режиму осевого излучения.

Таким образом, задача оптимизации сводится к поиску ε_{opt} , при котором достигается $\min[F(\varepsilon_{opt})]$. Ее решение производилось методом золотого сечения. В результате оптимизации для фиксированного параметра толщины проводника $\Omega=11,98$ и $\Delta f \equiv (0,7...1,6)S/\lambda$ получено минимальное отношение $R_{ex\max}/R_{ex\min}$ при значении эксцентриситета $\varepsilon_{opt} = 0,94$.

Эллиптические рамки с $\varepsilon = 0,94$ использованы при построении широкополосной телевизионной антенны дециметрового диапазона волн, содержащей два излучателя и апериодический экран. При этом получены следующие характеристики антенны: рабочая полоса частот - 470...930 МГц; коэффициент усиления в рабочей полосе: максимальный 10,4 дБ; минимальный 9 дБ; КСВ входа антенны ($\rho_{\phi}=75$ Ом) в рабочей полосе - не более 1,8; уровень бокового излучения - не более минус 16 дБ; уровень кросс-поляризации - не более минус 18 дБ; уровень излучения в заднее полупространство - не более минус 16 дБ.

Таким образом, моделирование характеристик эллиптических рамочных излучателей позволило выявить эффекты, наблюдаемые при изменении геометрии рамочного излучателя, а также использовать эти эффекты при построении широкополосных антенн.

Библиография

- 1 Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко; Под ред. Г.З. Айзенберга. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1985. — 536 с.
- 2 Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства: Учеб. пособие для вузов связи / А.З.Фрадин. — М.: Связь, 1977. — 440 с.
- 3 Кинг Р. Антенны в материальных средах / Р.Кинг, Г.Смит. — М.: Мир, 1984. — 824 с.

Поступила в редакцию 17.11.2000 г.