

ISSN 0320-9601

Антенны

www.radiotec.ru

Выпуск 9 (172)
2011

В НОМЕРЕ:

Квазиоптимальный метод обработки широкополосных сигналов в условиях радиопомех

Электродинамическое моделирование системы «тонкий провод – тело сложной формы» с учетом омических потерь

и др.



Тел./факс: (495) 625-92-41
E-mail: info@radiotec.ru
<http://www.radiotec.ru/>

Слабонаправленные антенны

УДК 621.396.677; 621.397.671

Статистические характеристики малогабаритной резонансной антенны

© Авторы, 2011,

О.Н. Маслов – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Экономические информационные системы»,

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (г. Самара). E-mail: maslov@psati.ru

Рассмотрены статистические характеристики и параметры малогабаритной резонансной антенны (МРА) конденсаторного типа (С-антенны). В рамках статистической теории антенн (СТА) с помощью метода статистического имитационного моделирования (СИМ) определены частотная зависимость излученной мощности, волновое сопротивление, ширина полосы частот и добротность С-антенны.

Ключевые слова: малогабаритная резонансная антенна, статистическая теория антенн, метод статистического имитационного моделирования, излученная мощность, волновое сопротивление, ширина полосы частот, добротность.

This article discusses the statistic characteristics and parameters of small the resonant antenna (SRA) of capacitor type (C-antenna). In the ranks of antenna theory statistics (ATS) with the help of statistic imitation modeling (SIM) method frequency characteristics of transmitted power and statistic characteristics of wave impedance, bandwidth and quality of the SRA.

Keywords: small resonant antenna, statistical antenna theory, statistic imitation modeling method, transmitted power, wave impedance, bandwidth, quality.

Введение. Перспективы дальнейшего развития СТА во многом обусловлены расширением круга практических задач, решаемых ее методами и средствами. В этой связи представляют интерес два научных направления: применение компьютерного метода СИМ в интересах СТА и, как частный вариант, исследование случайных антенн (СА) разного типа с помощью метода СИМ в рамках СТА [1, 2].

В прямых внешних задачах СТА эффективность СИМ показана в [1–3]. В [4] рассмотрены возможности СИМ для решения внутренних задач СТА, связанных с моделированием законов распределения случайных факторов, влияющих на работу СА в разных режимах ее работы (амплитудных, фазовых, частотных, временных и геометрических или пространственных ошибок). Метод СИМ может быть адаптирован также для решения других задач из области СТА.

Цель работы – применение СИМ для анализа статистических характеристик МРА конденсаторного типа (С-антенны) [5].

Концепция и аналоги МРА. Конструкцию и схему возбуждения С-антенны иллюстрирует рис. 1. Элементами МРА на рис. 1 являются развернутые обкладки конденсатора, емкость между которыми

равна C , а также катушка индуктивности L с частичным подключением к ней в точках $A-A$ фидерной линии с волновым сопротивлением W_ϕ , вход которой возбуждается генератором с ЭДС e_Γ и внутренним сопротивлением R_Γ . Отметим, что интерес к резонансным системам электромагнитного излучения (ЭМИ) на сосредоточенных LC -элементах сегодня существенно возрос, в том числе благодаря изданному в Самаре фундаментальному трехтомнику трудов Н. Теслы [6].

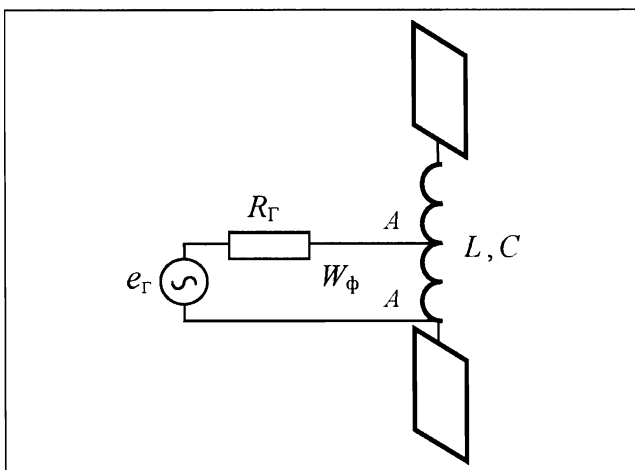


Рис. 1. Схема возбуждения С-антенны

Рассматриваемая *C*-антенна относится к электрически малым антенно-фидерным устройствам (АФУ) наряду с вибраторными антеннами с удлиняющими катушками индуктивности и магнитными резонансными антеннами, размеры которых не превышают 0,1 длины волны λ . По принципу действия к *C*-антенне близки *EH*-антенны (такое название авторы [9, 10] объясняют тем, что процессы формирования электрической *E*-составляющей и магнитной *H*-составляющей ЭМИ в них конструктивно разделены), а также *SFRT*-антенны [11], реализующие технологию излучения синхронных полей (Simultaneous Field Radiation Technology) и Crossed Field Antennas (*CFA* или антенны пересекающихся полей) [12]. Передающие *CFA* в настоящее время используются для радиовещания на средних волнах, более 20 видов *EH*-антенн для диапазона декаметровых волн выпускаются в США, Италии и Японии [10].

На конструкции данных АФУ оформлены патенты, где сформулированы технические идеи и описаны основные варианты их конструкций. Например, [13] содержит концепцию *EH*-антенны, которая состоит в том, что ток и напряжение радиосигнала в ней сфазированы так, чтобы фазовый сдвиг между *E*- и *H*-составляющими ЭМИ отсутствовал, рассматривается цилиндрическая *EH*-антенна и возможный принцип ее работы. В [14] аналогичным образом патентуются схема фазирования цилиндрической *EH*-антенны и варианты конструкции биконусной *EH*-антенны, предлагаются способы практического применения *EH*-антенн. Патент [15] защищает конструкцию *CFA*, предложенную специалистами из Великобритании и Египта. Согласно [15] принцип работы *CFA* основан на раздельном формировании *E*- и *H*-составляющих ЭМИ и создании уже в самом АФУ структуры ЭМИ, соответствующей дальней зоне излучения у традиционных антенн. Наиболее широкое применение *CFA* нашли в Египте, где их строительством занимается фирма KAT Company. На Internet-сайте KAT Company приводились сравнительные результаты измерения уровней ЭМИ для *CFA* (с максимальными размерами 1–5 % от λ) и традиционных антенн (вертикальные мачты и башни высотой $\lambda/4$). Согласно этим результатам *CFA* (для которой к тому же не требуется система противовесов или сложное заземление) в ряде случаев имела здесь преимущество.

В начале 1990-х годов к разработке электрически малых АФУ подключился американский инженер и предприниматель R.T. Hart, который

предложил собственные оригинальные конструкции, названные им *EH*-антеннами, проще и удобнее в реализации по сравнению с *CFA* [13, 14]. Для некоммерческого использования *EH*-антенны Hart опубликовал в Internet программу расчета элементов ее конструкции и подробную инструкцию по настройке. Хотя основной рыночный спрос приходится на *EH*-антенны для радиолюбителей, в настоящее время им предлагаются также передающие АФУ на СВ- и ДВ-диапазоны. Интерес к *SFRT*-антеннам проявляют также компании США, работающие в военно-технической сфере [11].

В отечественном секторе Internet действуют сайты [16, 17], где энтузиасты в области антенной техники делятся опытом изготовления и исследования эффективности применения разных вариантов *EH*-антенн. В то же время АФУ данного типа пока не привлекли у нас внимание широкого круга научно-технических специалистов.

Сопротивление излучения и добротность МРА.

Схеме *C*-антенны на рис. 1 соответствует модель МРА в виде контура вида II с потерями [18], показанная на рис. 2. В состав контура вида II с реактивными элементами $L = L_1 + L_2$ и C здесь входит также сопротивление активных потерь R , которое состоит из тепловых потерь r в проводниках L и диэлектрике C , а также (в подавляющей мере) сопротивления излучения МРА R_{Σ} . Частичное подключение индуктивности $p = L_2 / L$ обеспечивает согласование *C*-антенны, критерием которого является значение

$$K_{CB} = \frac{1 + K_{отр}}{1 - K_{отр}}$$

где $K_{отр}$ – модуль коэффициента отражения по напряжению (току) от конца фидерной линии в точках *A-A*.

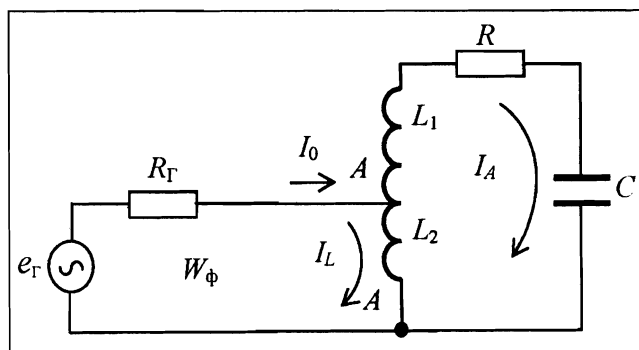


Рис. 2. Эквивалентная схема *C*-антенны в виде контура вида II с потерями

Теоретический анализ МРА состоит из двух задач: о широкополосном согласовании генератора с антенной (с учетом резонансных свойств

МРА) и об исследовании частотной зависимости уровней ЭМИ, создаваемых МРА в окружающем пространстве. При решении первой задачи с использованием схемы на рис. 2 будем исходить из того, что имеет место согласование фидера по входу ($R_{\Gamma} = W_{\Phi}$). Тогда условие максимальной «нагрузки» генератора на МРА (максимальное согласование МРА с фидерной линией) требует $R_{AA} = W_{\Phi}$, $X_{AA} = 0$, критерием чего является экспериментально подтверждаемое условие КСВ = 1 [5, 7,8]. Для упрощения выкладок введем на рис. 2 следующие обозначения: $X_L = \omega L_2 = p\omega L$, $X_C = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C} =$

$$= \omega(1-p)L - \frac{1}{\omega C},$$

после чего выражение для входного сопротивления МРА в точках А-А приобретает вид

$$R_{AA} + jX_{AA} = \frac{RX_L^2}{R^2 + (X_L + X_C)^2} + jX_L \frac{R^2 + X_C(X_L + X_C)}{R^2 + (X_L + X_C)^2}. \quad (1)$$

Условием параллельного резонанса на частоте $\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ в контуре вида II [18] является

$$X_L + X_C = 0, \text{ откуда из (1) получаем } R_{AA} = \frac{X_L^2}{R},$$

$X_{AA} = X_L$. Аналогичным образом условием последовательного резонанса на частоте

$$\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{LC(1-p)}} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{1-p}}$$

является $X_C = 0$, откуда следует $R_{AA} = \frac{RX_L^2}{R^2 + X_L^2}$; $X_{AA} = \frac{R^2 X_L}{R^2 + X_L^2}$. Ус-

ловию максимального согласования МРА с фидером на неизвестной частоте ω_0 согласно (1) соответствуют равенства

$$W_{\Phi} = \frac{RX_L^2}{R^2 + (X_L + X_C)^2}, \quad (2)$$

$$R^2 + X_C(X_L + X_C) = 0. \quad (3)$$

Распишем знаменатель (2) как $(R^2 + X_C X_L + X_C^2) + X_L(X_L + X_C)$ и используем (3), после чего на частоте ω_0 получим (2) в виде

$$W_{\Phi} = \frac{RX_L}{X_L + X_C}. \quad (4)$$

Выразим из (4) сопротивление потерь R и после подстановки его в (3) и элементарных преобразований выведем биквадратное уравнение, в котором единственным неизвестным является частота ω_0 :

$$\omega_0^4 p^2 (1-p)L^3 C + \omega_0^2 (W_{\Phi}^2 LC - p^2 L^2) - W_{\Phi}^2 = 0, \quad (5)$$

решение которого имеет вид

$$\omega_0^2 = \frac{p^2 L - W_{\Phi}^2 C \pm \sqrt{p^4 L^2 + 2LCp^2 W_{\Phi}^2 (1-2p) + W_{\Phi}^4 C^2}}{2p^2 (1-p)L^2 C}. \quad (6)$$

В случае $2p \ll 1$ (при достаточно малом частичном подключении фидера к С-антенне) из (6) следует $\omega_0 \approx 1/\sqrt{LC(1-p)} = \omega_{02}$, т.е. частота максимального согласования близка к частоте последовательного резонанса. Полученные результаты позволяют интерпретировать «физический смысл» сопротивления R следующим образом. Поскольку на частоте ω_0 значение КСВ = 1, $X_{AA} = 0$ и $R_{AA} = W_{\Phi}$, С-антенна для фидерной линии представляет собой согласованную нагрузку, коэффициент отражения $K_{отр} = 0$ и вся активная мощность, развиваемая генератором, делится поровну между его внутренним сопротивлением R_{Γ} и сопротивлением R , значение которого учитывает потери в контуре вида II.

Если считать, что $r \ll R_{\Sigma}$, приходим к выводу, что в данном случае, во-первых, $R \approx R_{\Sigma}$, а во-вторых, КПД у С-антенны $\eta \approx 1$. Отсюда следует, что теория электрически малых АФУ, по видимому, неприменима к работе согласованной С-антенны: так как всегда считалось, что эффективность таких антенн не может быть высокой, поскольку у них сопротивление излучения R_{Σ} при $d \ll \lambda$ не превышает 1–2 Ом [7, 8], что соизмеримо с сопротивлением активных потерь r , а вследствие этого КПД $\eta = \frac{R_{\Sigma}}{r + R_{\Sigma}}$ заметно меньше единицы,

что является «платой» за малые габариты АФУ.

Добротность частично подключенного к фидерной линии контура вида II с потерями определяется как

$$Q = \frac{W_K}{R + pW_{\Phi}} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}, \quad (7)$$

где $W_k = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление контура; $\Delta\omega = \omega_0/Q$ – ширина полосы пропускания, поскольку $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = (R + pW_\phi) \sqrt{C/L}$ [19].

Таким образом, коэффициент $p = L_2/L$ является одним из возможных параметров регулировки широкополосности МРА наряду с величиной отношения C/L , в котором для увеличения относительной полосы $\Delta\omega/\omega_0$ целесообразно увеличивать емкость C -антенны, тем более, что для сохранения резонансной частоты $\omega_{01} = 1/\sqrt{LC}$ в данном случае требуется уменьшение индуктивности L (если это возможно по конструктивным причинам [8, 17]).

Частотная зависимость мощности излучения МРА. При решении второй задачи для исследования уровней ЭМИ, создаваемых МРА в окружающем пространстве, необходимо проанализировать частотные свойства сопротивления излучения $R_\Sigma = R$ и активной мощности излучения $P_A = \frac{1}{2} I_A^2 R_\Sigma$, если считать, что последующий расчет уровней E - и H -составляющих ЭМИ в окружающем пространстве не представляет труда.

Комплексное напряжение на входе МРА в обозначениях (1) и рис. 2

$$\dot{U}_{AA} = j\dot{I}_L X_L = \dot{I}_A (R + jX_C),$$

где ток $\dot{I}_L = \dot{I}_0 - \dot{I} \rightarrow_A$.

После перехода к амплитудам токов отсюда получаем

$$I_A = \frac{I_0 X_L}{\sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что при параллельном резонансе на частоте ω_{01} имеет место $I_A = I_0 X_L/R$, а при последовательном резонансе на частоте ω_{02} ток

$I_A = I_0 X_L / \sqrt{R^2 + X_L^2}$, где оценку соотношения между токами осложняет неизвестная частотная зависимость $R(\omega)$. Общее выражение для частотной зависимости излученной мощности имеет вид

$$P_A = \frac{1}{2} \frac{I_0^2 R X_L^2(\omega)}{R^2 + [X_L(\omega) + X_C(\omega)]^2}. \quad (9)$$

На частоте последовательного резонанса ω_{02} согласно (9) излученная мощность $P_{A2} =$

$$= \frac{1}{2} \frac{I_0^2 R X_L^2(\omega_{02})}{[R^2 + X_L^2(\omega_{02})]}.$$

Частотные свойства P_A будем исследовать путем анализа отношения

$$\frac{P_A}{P_{A2}} = \frac{X_L^2(\omega) [R^2 + X_L^2(\omega_{02})]}{\{R^2 + [X_L(\omega) + X_C(\omega)]^2\} X_L^2(\omega_{02})}, \quad (10)$$

которое является более точным по сравнению с представленным в [5], поскольку фиксирует соответствие мощности P_{A2} частоте ω_{02} в явном виде и допускает лишь $R(\omega) \approx R$ (правомерность чего следует проверить экспериментально). Общий вывод [5] при этом остается неизменным: частота ω_{03} , где отношение $P_A/P_{A2} > 1$ для разных вариантов реализации МРА достигает максимума, во-первых, существует, а во-вторых, располагается на оси частот ниже ω_{01} и ω_{02} . Поэтому максимум согласования МРА с фидерной линией (на частоте ω_0) не совпадает с максимумом излученной мощности (на частоте ω_{03}), хотя при ожидаемых значениях добротности $Q = 10 \dots 15$ это несовпадение может не иметь особого значения. Тем не менее, настройка C -антенны по максимальному согласованию ($KCB = 1$ на частоте ω_0) не соответствует условию обеспечения максимума уровней ЭМИ в окружающей среде, о чем известно специалистам, занятым проектированием и эксплуатацией C -антенн [16, 17].

Результаты макетирования МРА. Для исследования МРА, предваряющего СИМ, был применен экспериментально-аналитический метод, сочетающий использование результатов расчетов и непосредственных измерений, выполненных на макете (физической модели) МРА [5]. Макет плоской C -антенны из фольгированного стеклотекстолита с размерами 85×15 мм был предварительно рассчитан на среднюю частоту рабочего диапазона 100 МГц, которой соответствуют значения $C = 1,25$ пФ, $L = 2,0$ мкГн. После учета собственной емкости катушки индуктивности (длина 22,5 мм, диаметр витка 17 мм, число витков 12) емкость $C \approx 2,95$ пФ, что дает $L \approx 0,9$ мкГн с соответствующим уменьшением числа витков.

В табл. 1 представлены результаты измерения $KCB \leq 2,3$ в полосе частот $f = 93-100,4$ МГц для рассматриваемого макета плоской C -антенны с параметрами: емкость $C = 3$ пФ, индуктивность $L = 1$ мкГн, коэффициент $p = 0,1$, частота параллельного резонанса $f_1 = 91,9$ МГц, частота после-

Таблица 1. Частотная зависимость КСВ для макета С-антенны ($f_0 = 97$ МГц)

Частота, МГц	93,0	93,2	93,3	93,5	93,8	94,1	94,4	94,7	95,2	95,7	97,0
	100,4	100,1	99,8	99,5	99,3	99,1	98,7	98,5	98,2	97,8	
КСВ	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3

Таблица 2. Уровни напряженности поля для С-антенны и $\lambda/2$ -диполя при фиксированных азимутальных углах φ , град, в Е-плоскости

Азимут φ , град	0 (360°)		90°		180°		270°	
АФУ	С-антенна	$\lambda/2$ -диполь	С-антенна	$\lambda/2$ -диполь	С-антенна	$\lambda/2$ -диполь	С-антенна	$\lambda/2$ -диполь
Уровень Е, дБ	-50,1	-51,4	-52,5	-50,6	-52,8	-53,0	-53,1	-50,0

довательного резонанса (близкая к частоте максимального согласования АФУ) $f_2 \approx f_0 = 96,9$ МГц. Ожидаемое значение частоты максимума излученной мощности $f_3 < f_1$ находится за пределами области частот, указанной в табл. 1. Минимальный КСВ на частоте 97 МГц равняется 1,3, ширина полосы частот 7 МГц по уровню КСВ = 2. Результаты сравнения макета С-антенны и стандартного полуволнового диполя, приведенные в табл. 2, показывают, что в лабораторных условиях на расстоянии 3 м и на высоте 1,22 м уровни их ЭМИ соизмеримы друг с другом [5].

Экспериментальные значения КСВ и коэффициента отражения $K_{отр}$ от входа С-антенны в точках А-А по напряжению (току), соответствуют формуле

$$K_{отр} = \sqrt{\frac{(R_{AA} - W_\phi)^2 + X_{AA}^2}{(R_{AA} + W_\phi)^2 + X_{AA}^2}} = \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1}. \quad (11)$$

На основании (11) с учетом (1) можно построить итерационную процедуру определения сопротивления излучения $R_\Sigma = R$ на каждой из частот, приведенных в табл. 1, которая предусматривает следующие действия.

Задавая на каждой частоте первоначальное значение $R = W_\phi \sqrt{1 - K_{отр}^2}$, где $K_{отр}$ соответствует данным табл. 1, производим расчет R_{AA} и X_{AA} согласно (1), подставляем их в (11) и получаем расчетные значения $K_{отр}$ и КСВ, которые сравниваем с их табличными значениями, и в случае расхождения между ними изменяем значение R , после чего повторяем цикл до тех пор, пока расчетные и экспериментальные значения $K_{отр}$ и КСВ будут отличаться друг от друга не более чем на заданную величину $\varepsilon \ll 1$. Найденное таким образом значение $R = R_\Sigma$ считаем сопротивлением излучения С-антенны на данной частоте. Практика пока-

зала, что после двух-трех компьютерных итераций в диалоговом режиме, во-первых, удается получить $\varepsilon < 0,1$ для КСВ, во-вторых, что самое важное для анализа (9), (10), значение R_Σ , найденное на частоте $f_0 = 97$ МГц, в полосе частот $f = 93-100,4$ МГц меняется мало, что подтверждает $R(\omega) \approx R$.

На рис. 3 экспериментальные значения КСВ показаны точками, график в виде сплошной линии соответствует расчету с помощью (11) при $R_\Sigma = 63$ Ом, $C = 2,75$ пФ, $L = 1,96$ мкГн график в виде штриховой линии – расчету при $R_\Sigma = W_\phi = 50$ Ом, $C = 2,9$ пФ, $L = 1,86$ мкГн. Сравнение данных на рис. 3 показывает, что степень различия между ними не превышает общей суммарной (методической и инструментальной) погрешности измерений, проводимых на макете МРА в лабораторных условиях. При этом путем корректировки параметров R_Σ и C в довольно малых пределах можно достаточно точно описать экспериментальную зависимость КСВ реальной С-антенны от частоты.

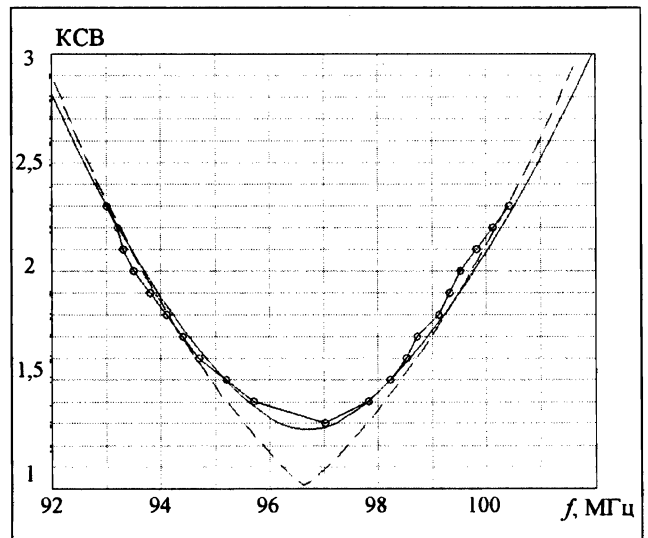


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения КСВ для макета С-антенны

Целью первого этапа конструирования S -антенны является выбор приемлемой конфигурации пластин конденсатора, при которой может быть реализована контурная катушка индуктивности на заданную резонансную частоту. На втором этапе при настройке МРА методом последовательных приближений добиваются необходимых резонансов и полосы излучения АФУ, изменяя либо C , либо L и место отвода (значение коэффициента p) в S -антенне. Рекомендации по настройке разных вариантов МРА приводятся в [9,10, 16,17].

Методика и результаты СИМ. Первый опыт применения EH -, CFA - и $SFRT$ -антенн показывает, что одним из слабых мест МРА является нестабильность рабочих характеристик в процессе эксплуатации, когда под воздействием погодных условий, деформаций конструкции, изменений инфраструктуры внешней среды и других случайных факторов параметры АФУ «уходят» от номинальных значений. Поэтому построенные МРА могут быть то лучше, то хуже своих традиционных конкурентов. Причину этого помогают понять лабораторные исследования макета S -антенны: при $C \approx 2-3$ пФ и $L \approx 1-2$ мкГн влияние соизмеримых с ними паразитных реактивностей ΔC и ΔL должно быть весьма заметным. Для проверки этого воспользуемся методом СИМ [2-4].

Пусть значение емкости в МРА соответствует $C + \Delta C$ и после настройки АФУ согласно [9, 10, 16, 17] индуктивность $L + \Delta L$ обеспечивает первоначальное соответствие каждого экземпляра МРА всем заданным резонансным частотам при индивидуальном сочетании C и L , ΔC и ΔL . Рассматривая теперь либо ансамбль МРА, либо одну МРА в изменяющихся условиях, получаем разные реализации емкости и индуктивности, которые определяют случайные значения волнового сопротивления антенны

$$W_k = \sqrt{\frac{L + \Delta L}{C + \Delta C}} \text{ и сопротивлений } X_L = p\omega(L + \Delta L),$$

$$X_C = \omega(1 - p)(L + \Delta L) - \frac{1}{\omega(C + \Delta C)}, \text{ результатом}$$

чего являются случайные реализации согласно (7) добротности Q и относительной полосы частот $\Delta\omega/\omega_0$, а согласно (10) – частотной зависимости относительной излученной мощности S -антенны P_A/P_{A2} . Это вызвано тем, что для разных экземпляров МРА или для одного экземпляра МРА с течением времени исходные случайные значения ΔC

и ΔL ведут себя по-разному и на эффективность МРА влияют различным образом.

Ансамбль из N экземпляров МРА. При первом подходе стратегия СИМ-эксперимента следующая: по методу Монте-Карло «разыгрываются» N случайных значений емкости $C + \Delta C$. Для них в соответствии с (6) определяются N значений $L + \Delta L$, что соответствует настройке каждого экземпляра МРА на частоту ω_0 . Далее для найденных $N = 10^2 \dots 10^5$ пар $C + \Delta C$ и $L + \Delta L$ определяются N реализаций W_k , Q , $\Delta\omega/\omega_0$, подлежащих статистической обработке, а также нужное число частотных зависимостей P_A/P_{A2} .

Проведение СИМ по методике [3] затруднений не вызывает. Для СИМ вообще характерна довольно продолжительная и трудоемкая предварительная проработка всех обстоятельств предстоящего моделирования (описание предметной области СИМ и построение вербальных моделей; определение исходных данных; выбор критериев для оценки прогнозируемых результатов и др., заметим, что эти этапы отражены в статье лишь частично), связанная с обеспечением его требуемой точности и адекватности. Процесс моделирования, напротив, существенно упрощается и ускоряется по сравнению с аналитическими и численными методами [2, 3].

При проведении СИМ номинальные значения реактивностей примем равными $C = 3$ пФ и $L = 2$ мкГн, что соответствует частоте параллельного резонанса МРА $f_1 = 65$ МГц и частоте последовательного резонанса $f_2 = 68,5$ МГц при $p = 0,1$. Ограничимся анализом влияния ΔC , поскольку согласно данным [16, 17] на работу МРА наиболее существенно влияет эта паразитная реактивность.

Пусть случайная величина $C + \Delta C$ подчиняется равномерному распределению в пределах [2,5; 3,5] пФ, т.е. $\Delta C = \pm 0,5$ пФ (что вполне реально для макета МРА). Качество компьютерного теста при этом характеризует рис. 4, где по оси ординат отложены значения N_C числа случайных значений $C + \Delta C$, попадающих в интервалы, границы которых указаны на оси абсцисс. Из рис. 4 видно, что реализованная модель емкости МРА, ввиду рационального выбора программного продукта [2, 3], достаточно хорошо соответствует заданным исходным условиям.

Пересчет данных рис. 4 согласно (6) приводит к распределению значений $L + \Delta L$ в пределах [1,7; 2,4] мкГн, закон которого существенно отли-

чается от равномерного (рис. 5,а). Полученные ненормированные гистограммы волнового сопротивления W_k представлены на рис. 5,б, добротности Q – на рис. 5,в (отличается от гистограммы на рис. 5,б только масштабом по оси абсцисс), относительной полосы частот $\Delta\omega/\omega_0$ – на рис. 5,г. Выбор $N = 10^5$ призван гарантировать репрезентативность результатов СИМ, поскольку качество теста (рис. 4) обеспечивает это.

Статистические оценки числовых характеристик распределений, показанных на рис. 4 и 5, содержит табл. 1, в столбцах которой указаны их

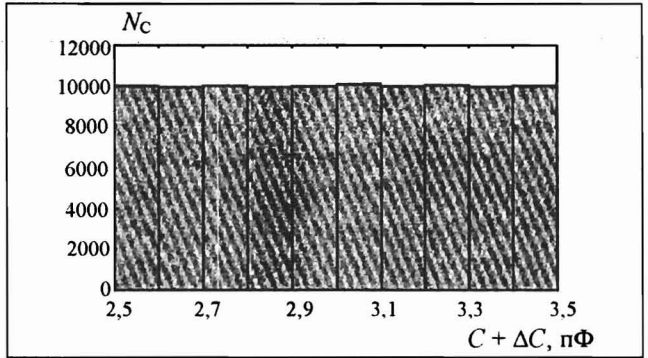


Рис. 4. Гистограмма распределения $N = 10^5$ тестовых значений емкости МРА $C + \Delta C$, разыгрываемой по равномерному закону в пределах $[2,5; 3,5]$ пФ

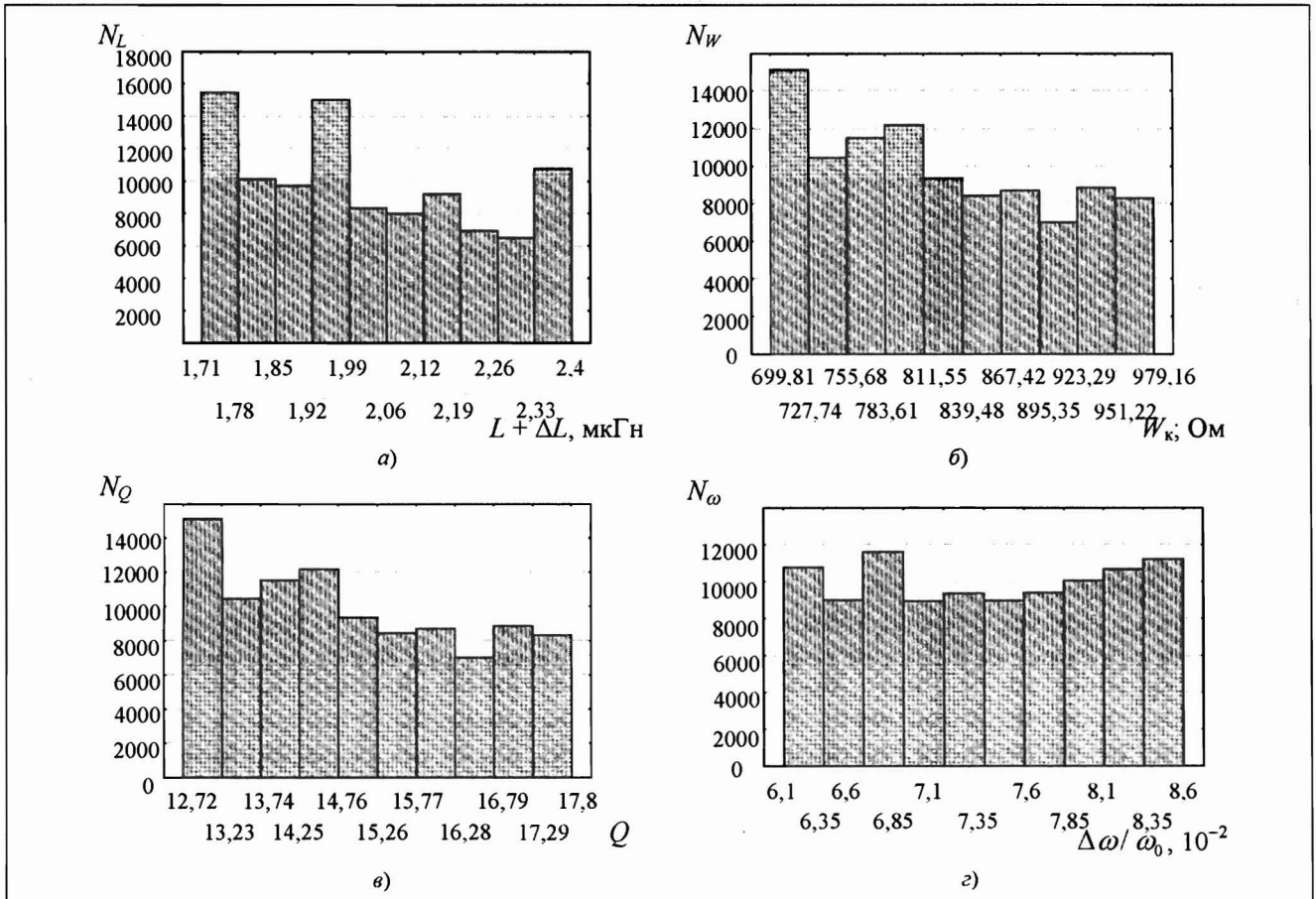


Рис. 5. Ненормированные гистограммы распределения случайных значений: а – индуктивности $L + \Delta L$; б – волнового сопротивления W_k ; в – добротности Q ; г – относительной полосы частот $\Delta\omega/\omega_0$ для ансамбля из N экземпляров МРА

Таблица 3. Статистические оценки параметров для ансамбля из N экземпляров МРА

Характеристика	Среднее	Минимум	Максимум	5% квантиль	95% квантиль	СКО
C , пФ	3,0	2,5	3,5	2,55	3,45	0,289
L , мкГн	2,02	1,7	2,4	1,74	2,37	0,205
W_k , Ом	824,4	699,8	979,2	710,9	963,5	81,89
Q	14,99	12,72	17,80	12,93	17,52	1,49
$\Delta\omega/\omega_0$	$7,35 \cdot 10^{-2}$	$6,13 \cdot 10^{-2}$	$8,57 \cdot 10^{-2}$	$6,23 \cdot 10^{-2}$	$8,44 \cdot 10^{-2}$	$7,22 \cdot 10^{-3}$

средние, минимальные и максимальные значения, СКО, а также значения квантилей, не превышаемые с вероятностью 5 и 95 %. Анализ данных, представленных на рис. 4, 5 и в табл. 3, показывает, что для ансамбля МРА, настроенных при изготовлении на одну и ту же частоту ω_0 , параметры АФУ при флуктуациях емкости C -антенны в пределах $\pm 0,5$ пФ изменяются достаточно заметно.

Выборка объемом T отсчетов параметров МРА. При втором подходе рассматривается единственный экземпляр МРА на протяжении T дискретных временных отсчетов. Стратегия СИМ эксперимента при этом имеет в виду определение исходных значений C и L для частоты ω_0 , соответствующих паспортным W_k , Q , $\Delta\omega/\omega_0$ и P_A/P_{A2} . Далее «разыгрываются» $T = 10^2 \dots 10^5$ случайных пар взаимно независимых значений емкости $C + \Delta C$ и при необходимости индуктивности (на практике это менее важно) $L + \Delta L$, для которых определяются T реализаций параметров

МРА (включая частоту максимального согласования МРА f_0 и резонансные частоты f_{01} и f_{02}) с тем, чтобы оценить их возможные временные отклонения (флуктуации) от паспортных значений.

Полученные гистограммы для $T = 10^5$ случайных значений частоты максимального согласования МРА f_0 представлены на рис. 6,а; относительной полосы частот $\Delta\omega/\omega_0$ – на рис. 6,б. Как и в предыдущем случае, значение $C + \Delta C$ предполагалось распределенным по равномерному закону в пределах [2,5; 3,5] пФ, однако всегда $L = 2$ мкГн. Поскольку гистограммы частоты параллельного резонанса f_{01} ; частоты последовательного резонанса f_{02} ; волнового сопротивления W_k и добротности Q аналогичны гистограмме, показанной на рис. 6,а, и отличаются только масштабом по оси абсцисс, на рис. 6 они не приведены. Статистические оценки числовых характеристик распределений, показанных на рис. 6, содержит табл. 5, аналогичная табл. 3. Анализ данных, представленных на рис. 6 и в табл. 4, показывает, что в процессе

Таблица 4. Статистические оценки параметров МРА для выборки из T временных отсчетов

Характеристика	Среднее	Минимум	Максимум	5% квантиль	95% квантиль	СКО
f_0 , МГц	67,77	62,41	74,11	62,87	73,37	3,36
f_{01} , МГц	65,20	60,15	71,18	60,59	70,48	3,17
f_{02} , МГц	68,73	63,41	75,03	63,87	74,29	3,34
W_k , Ом	819,3	755,9	894,4	761,4	885,7	39,8
Q	14,90	13,74	16,26	13,84	16,10	0,72
$\Delta\omega/\omega_0$	$6,73 \cdot 10^{-2}$	$6,15 \cdot 10^{-2}$	$7,28 \cdot 10^{-2}$	$6,21 \cdot 10^{-2}$	$7,22 \cdot 10^{-2}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$

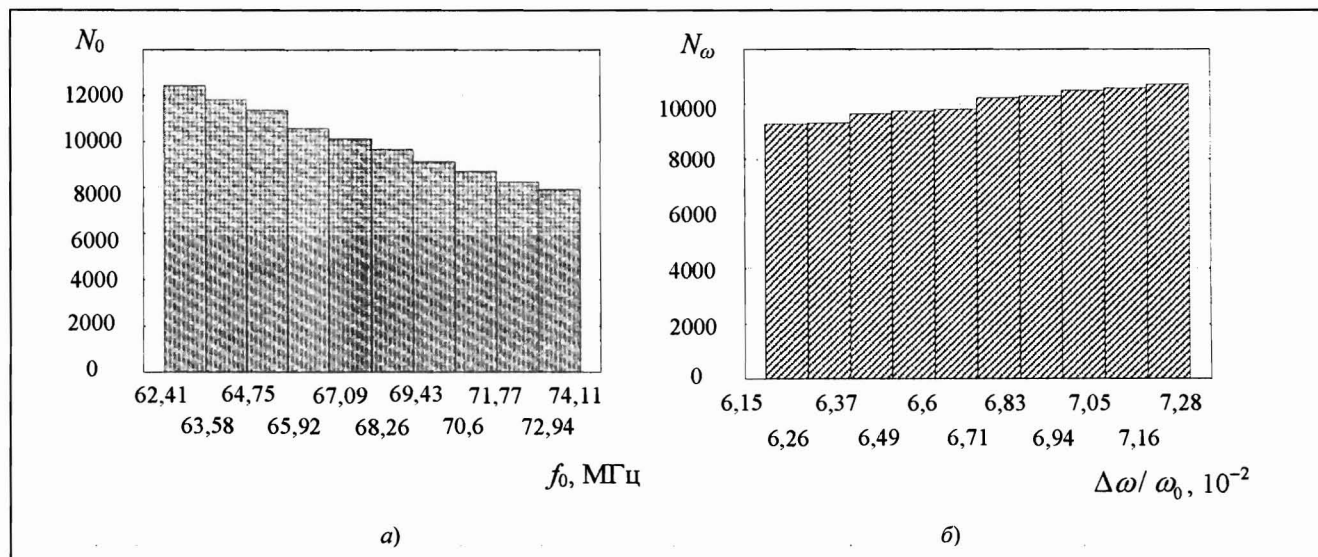


Рис. 6. Ненормированные гистограммы распределения случайных значений: а – частоты максимального согласования f_0 (аналогично частоте параллельного резонанса f_{01} ; частоте последовательного резонанса f_{02} ; волновому сопротивлению W_k и добротности Q); б – относительной полосы частот $\Delta\omega/\omega_0$ для выборки из T отсчетов параметров экземпляра МРА

эксплуатации МРА, настроенной при изготовлении на частоту ω_0 , при флуктуациях емкости антенны в пределах $\pm 0,5$ пФ частоты настройки и другие параметры АФУ весьма существенно «уходят» от своих номинальных значений $f_{01} = 65$ МГц, $f_{02} = 68,5$ МГц, $W_k = 816,5$ Ом, $Q = 14,85$.

Частотные зависимости излученной мощности и КСВ. Приведенные расчетные и экспериментальные данные показывают, что простая по конструкции МРА в виде С-антенны является на деле достаточно сложной резонансной системой, достаточно трудной в настройке и эксплуатации ввиду влияния на нее ряда внешних и внутренних факторов как детерминированных, так и случайных. Это наглядно подтверждают результаты совместного расчета частотных зависимостей относительной излученной мощности P_A / P_{A2} согласно

(10) и КСВ согласно (11), примеры которых представлены на рис. 7 (графики с максимумами соответствуют зависимости P_A / P_{A2} ; графики с минимумами – зависимости КСВ).

Кривые на рис. 7,а получены для двух экземпляров МРА, настроенных на одну и ту же частоту $f_0 = 68,6$ МГц, они соответствуют $C = 3,46$ пФ, $L = 1,67$ мкГн, $f_{01} = 66,3$ МГц, $f_{02} = 69,9$ МГц (сплошные линии) и $C = 2,51$ пФ, $L = 2,33$ мкГн, $f_{01} = 65,8$ МГц, $f_{02} = 69,4$ МГц (штриховые линии). Аналогичные кривые на рис. 7,б получены для одного экземпляра МРА с параметрами $C = 3,5$ пФ, $L = 2,5$ мкГн, настроенного на частоту $f_0 = 68,6$ МГц, которой соответствуют резонансные частоты $f_{01} = 60,2$ МГц, $f_{02} = 63,4$ МГц (сплошные линии), в процессе эксплуатации которой изменилась емкость: $C = 2,59$ пФ, что при неизменном значении L привело к $f_0 = 72,8$ МГц, $f_{01} = 70,0$ МГц; $f_{02} = 73,7$ МГц (штриховые линии).

Из анализа кривых на рис. 7 следует: 1) что МРА требует тщательной настройки (рис. 7,а) и подстройки в процессе эксплуатации (если это возможно), поскольку ее частотные характеристики довольно нестабильны (см. рис. 7,б); 2) что сблизить на оси частот максимум излученной мощности и минимум КСВ можно, варьируя коэффициент подключения индуктивности p , значения волнового сопротивления W_k и добротности Q , если это допустимо по технологическим причинам, а также, вводя в схему МРА дополнительные реактивности.

● Представленные в статье результаты теоретического и экспериментального анализа МРА конденсаторного типа (С-антенны) демонстрируют как традиционные, так и некоторые новые, малоизученные свойства данных АФУ. В рамках СТА с помощью метода СИМ исследованы резонансные параметры, частотные зависимости излученной мощности и КСВ, статистические характеристики волнового сопротивления, полосы частот и добротности С-антенны.

Платой за привлекательные качества МРА (простота конструкций, малые размеры, повышенные широкополосность и внеполосная помехозащищенность) является сложность их настройки и эксплуатации ввиду существенного влияния на них ряда внешних и внутренних факторов, детерминированных и случайных. Нельзя утверждать, что данные трудности непреодолимы, но МРА вряд ли будут обладать столь же надежной повторяе-

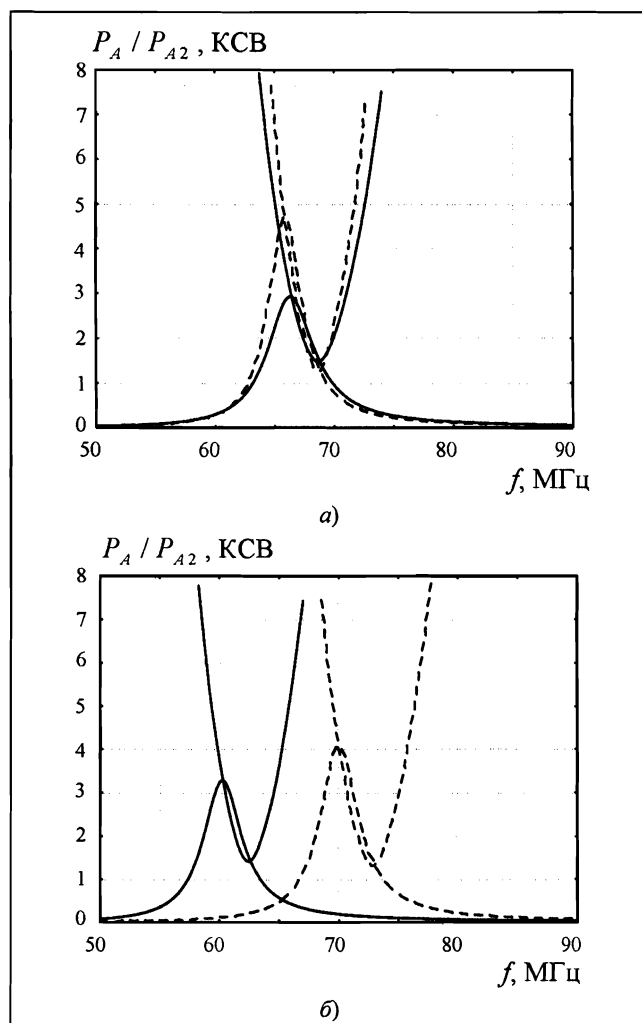


Рис. 7. Частотные зависимости относительной излученной мощности P_A / P_{A2} и КСВ: а – ансамбль из $N = 2$ экземпляров МРА; б – $T = 2$ временных отсчетов параметров для одного экземпляра МРА

мостью параметров при тиражировании, как, например, дипольные или рупорные АФУ.

Литература

1. Маслов О.Н. Случайные антенны // Электросвязь. №7. 2006. С. 12–15.
2. Альшев Ю.В., Маслов О.Н., Рябушкин А.В. Методы и средства исследования эффективности случайных антенн // Антенны. 2008. №4 (131). С. 59–65.
3. Альшев Ю.В., Маслов О.Н., Раков А.С., Рябушкин А.В. Исследование случайных антенн методом статистического имитационного моделирования // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 7. С. 3–41.
4. Маслов О.Н. Возможности и перспективы применения метода СИМ при решении внутренних задач СТА // Инфокоммуникационные технологии. 2010. Т. 8. № 2. С. 8–22.
5. Маслов О.Н., Рябушкин А.В., Шащенко В.Ф. Малогабаритные резонансные антенны // Инфокоммуникационные технологии. 2010. Т. 8. № 2. С. 57–67.
6. Тесла Н. Статьи. Лекции. Колорадо-Спрингс. Дневники. 1899–1900. Самара: Агни. 2007–2009.
7. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. М.: Связь-издат. 1962.
8. Наденко С.И. Антенны. М.: Связьиздат. 1959.
9. <http://www.eh-antenna.com/>
10. <http://www.eh-antenna.net/>
11. <http://www.dtirfsolutions.com/>
12. <http://www.crossedfieldantenna.com/>
13. EH Antenna. US Patent 6,486,846. R.T. Hart. Nov. 26 2002. Appl. No.: 09/576,449. Filed: May 23, 2000.
14. Method and Apparatus for Creating an EH Antenna. R.T. Hart. June 12, 2003. Serial No.: 302952 ~ Series Code: 10. Filed: Nov. 22, 2002. US Current Class: 343/860; 343/773; 343/870. US Class at Publication: 343/860; 343/773; 343/870. Intern. Class: H01Q001/50; H01Q 0123/00 Description.
15. Radio Antennas. US Patent No 5,155,495. Maurice C. Hately, Fathi M. Kabbary. October 13, 1992. Appl. No 543,768. Filed: Jan. 27, 1989.
16. <http://www.ehant.narod.ru/>
17. <http://flath.narod.ru/>
18. Зернов Н.В., Карнов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия. 1972.

Поступила 20 марта 2011 г.

Statistic Characteristics of Small Resonant Antenna

© Authors, 2011

O. N. Maslov

This article discusses the statistic characteristics and parameters of small the resonant antenna (SRA) of capacitor type (C-antenna). In the ranks of antenna theory statistics (ATS) with the help of statistic imitation modeling (SIM) method frequency characteristics of transmitted power and statistic characteristics of wave impedance, bandwidth and quality of the SRA. Theoretical and experimental SRA analyses results are introduced both traditional as well, as new ones, irregularly qualities of antennas of this category.

Extremely simple by structure C-antenna is, in practice, rather complicated resonance system, the qualities of this system are defined by four frequency parameters:

- parallel resonance frequency;
- serial resonance frequency;
- maximum conditioned frequency or minimum Standing Wave Ratio (SWR) frequency;
- maximum transmitted power frequency.

In order to coordinate the maximum frequency of transmitted power and minimum of SWR, the p – switching coefficient of inductivity is supposed to be variable as well as wave impedance W_K , quality Q of the SRA (if technology permits). The SRA system can be added with extra patch reactivity. Alongside with perfect features of simple structure, small size, broadband-width, out-of-band-antijamming, there are some negative features: difficulty of tuning and operating due to both determined and occasional factors of interference, external and inner. The investigation of statistic characteristics of SRA is an example of SIM practical application for further ATS development.

Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» вышла в свет книга



Панченко Б.А., Гизатуллин М.Г.

Нано-антенны

ISBN 978-5-88070-247-3

Первая в отечественной технической литературе книга, посвященная классу антенн, отличающихся нано-размерами и повышенным коэффициентом усиления. Оба отличительных качества нано-антенн достигается благодаря использованию метаматериалов.

Приведена методика определения основных антенных характеристик устройств с метаматериалами. Численные результаты имеют практическую направленность.

Предназначена для инженеров, научных работников радиотехнических, радиофизических и связанных специальностей.

По вопросам заказа и приобретения книг обращаться по адресу:

107031 г. Москва, Кузнецкий мост, 20/6.

Тел./факс: (495) 625-92-41, тел.: (495) 625-78-72, 621-48-37 <http://www.radiotec.ru>; e-mail: info@radiotec.ru