

РАДИОТЕХНИКА, ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЯ ТА ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.396.677.3

Цалиев Т.А.
Цалиев Т.А.
Tsaliev T.A.

ПЛАНАРНЫЕ НИЗКОПРОФИЛЬНЫЕ ИНВЕРСНЫЕ L- И C-АНТЕННЫ

ПЛАНАРНІ НИЗЬКОПРОФІЛЬНІ ІНВЕРСНІ L- ТА C-АНТЕННИ

PLANAR LOW PROFILE INVERSE L- AND C- ANTENNAS

Аннотация. Приведены результаты расчетов и сравнения частотных зависимостей входного импеданса, коэффициента стоячей волны (КСВ), коэффициента направленного действия (КНД) и диаграмм направленности антенн в виде «перевернутых» L и Собразных элементов.

На основе компьютерного моделирования для нескольких вариантов соотношения геометрических параметров и длины волны рассмотрены указанные характеристики таких антенн.

Анотация. Наведені результати розрахунків і порівняння частотних залежностей вхідного імпедансу, коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ), коефіцієнта спрямованої дії (КСД) і діаграм спрямованості антен у вигляді «перевернутих» L та Собразних елементів. На основі комп'ютерного моделювання для кількох варіантів співвідношення геометричних параметрів і довжини хвилі розглянуто зазначені характеристики таких антен.

Summary. The data of calculations and comparisons of frequency dependences of an input impedance, voltage standing wave ratio (VSWR), directivity and patterns of antennas as the “turned” L and C-figurative elements are resulted. On the basis of computer simulation, for several variants of a ratio of geometrical parameters to the wavelength the specified characteristics of such antennas as a thin wire and planar designs were considered.

Повсеместное развитие и внедрение беспроводных технологий, общее стремление к миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры бытового и промышленного назначения, определяют научный интерес и актуальность исследования характеристик вновь разрабатываемых конструкций антенных элементов. В предыдущей статье автора [1] показана принципиальная возможность существенного расширения рабочей полосы частот планарного симметричного вибратора, располагаемого на относительно небольшой высоте над проводящим экраном с прямоугольными щелями.

Такая конструкция предполагает симметричное возбуждение диполя, что приводит к определенным трудностям. От такого недостатка свободны несимметричные вибраторные конструкции, что позволяет реализовать возбуждение коаксиальной или полосковой линией и одновременно сократить размер антенных элементов.

Несимметричные инверсные Lобразные антенные элементы (далее Lантенны), в виде проводочных или планарных конструкций, расположенных на относительно небольшой высоте над плоским хорошо проводящим экраном, в последние годы были описаны и исследовались различными авторами (см., например, [2...5] и библиографические ссылки к ним). Областью применения таких антенн, а также их многочисленных модификаций, преимущественно являются различного рода терминалы систем GSM, CDMA, WiFi, WiMAX. Основными их недостатками являются: относительно узкая полоса рабочих частот и низкое активное входное сопротивление на частоте первого резонанса, поскольку зависимость входного импеданса Lантенны подобна аналогичной зависимости двухпроводной линии разомкнутой на конце.

Нетрудно предположить, что для Lантенны с замкнутым на экран вторым концом (назовем ее «инверсная Сантенна») аналогичная зависимость будет похожей на характеристику короткозамкнутой двухпроводной линии, при этом величина ее входного импеданса сопротивление на частоте первого резонанса будет большим.

Однако до настоящего времени свойства этой разновидности антенн в достаточной мере не изучались. В том числе совсем не исследован конструктивный вариант (инверсная Сантенна в сочета-

нии со щелевым элементом), заметно расширяющий практические возможности низкопрофильных антенн.

Целью данной статьи является изучение электродинамических свойств планарных Сантенн, определяющих их рабочий диапазон: частотные зависимости входного импеданса, коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента стоячей волны (КСВ), и сравнение их с аналогичными характеристиками щелевого излучателя и Лантенны.

1. Геометрия исследуемых антенн. Во всех рассмотренных далее конструктивных вариантах излучающий элемент антенн представляет собой планарный несимметричный вибратор (монополю), располагаемый на высоте h над экраном и ориентированный параллельно ему.

Профиль элементов планарного монополя может иметь форму «перевернутой» буквы L (*Inverted L Antenna* или *ILA*, рис. 1, а), либо «перевернутой» буквы С (*Inverted C Antenna* или *ICA*, рис. 1, б). Наличие в экране прямоугольной щели, ориентированной перпендикулярно оси вибратора, соответствует новому конструктивному варианту антенны *ICA*, который назовем «щелевой» *ICA* (*Slot Inverted C Antenna* или *SICA*, рис.1, в).

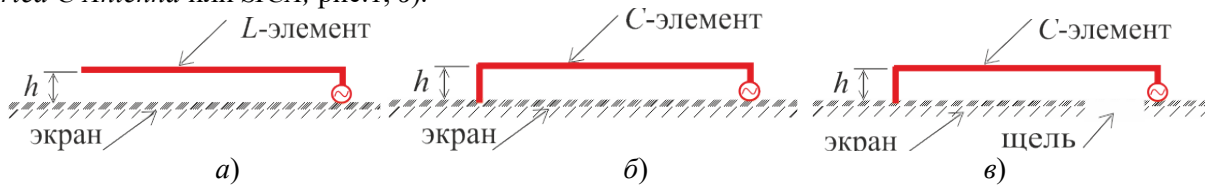


Рисунок 1 Профили излучателей антенн типа: *ILA* (а); *ICA* (б); *SICA* (в)

В исследованных моделях антенн плоская горизонтальная часть вибратора ориентирована параллельно плоскости кругового экрана радиусом $0,375 \lambda_0$ (рис. 2), длина этой горизонтальной части $l_B = 0,25 \lambda_0$, ширина $t_B = 30 \text{ мм}$ (здесь и далее λ_0 длина волны, соответствующая частоте 1 ГГц).

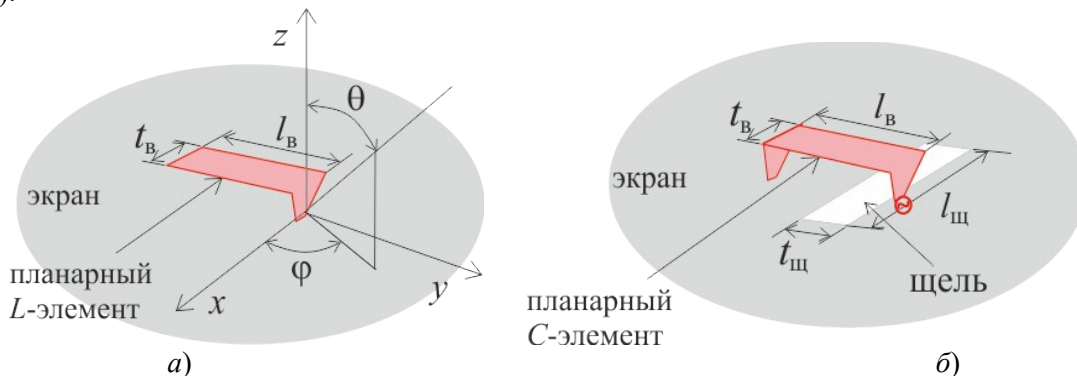


Рисунок 2 Схематическое изображение антенн типа *ILA* (а) и *SICA* (б)

Плавный переход от горизонтальной части монополя к источнику питания имеет вид трапеции, верхняя сторона которой соответствует его поперечному размеру (t_B), а длина нижней стороны равна 1 мм. Возбуждение вибратора в такой конструкции осуществляется с одной (в данном случае правой) стороны так, как показано на рис. 1. Эта конструктивная особенность должна способствовать лучшему согласованию вибратора с источником питания.

В варианте, названном нами *ICA*, левый край излучателя соединен с экраном, а вариант *SICA* дополнен щелевым элементом. Этот элемент представляет собой относительно широкую $t_{щ} = 0,1 \lambda_0$ щель (рис. 2, б) длиной $l_{щ} = 0,375 \lambda_0$, прорезанную в экране вблизи источника возбуждения и ориентированную перпендикулярно к оси горизонтальной части вибратора.

При таком расположении элементов антенны поле, излучаемое вибратором, эффективно возбуждая щель, одновременно наводит токи в поверхности в самого экрана. Все элементы рассмотренных в данной работе моделей антенн обладают электрическими свойствами хорошо проводящего материала ($\sigma = 10^7 \text{ С/м}$) толщиной 0,5 мм.

2. Методика исследования. Описываемое ниже исследование проводилось методом компьютерного моделирования в среде программного комплекса *FEKO* [6], при этом решалась задача определения амплитудно-фазового распределения (АФР) токов на поверхности антенных элементов в за-

данной полосе частот при разных значениях параметра h . Найденное АФР токов дает возможность далее, путем численного интегрирования, рассчитать требуемые характеристики излучения.

В расчетном модуле *FEKO* для решения таких задач применен метод моментов, который в конечном итоге сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, при этом все плоские поверхности представляются как совокупность элементарных проволочных треугольных сегментов, размер стороны которых значительно меньше минимальной длины волны, что в определенной мере обеспечивает корректность получаемого решения. В данном исследовании размер стороны треугольных сегментов выбран равным $\lambda_0 / 50$.

3. Результаты компьютерного моделирования. На приводимых ниже рисунках проиллюстрированы и далее обсуждаются частотные зависимости электродинамических характеристик антенн, причем цифры на всех графиках обозначают принадлежность соответствующих кривых таким конструктивным вариантам:

- 1 щелевая антенна (*Slot Antenna, SA*);
- 2 инверсная Сантенна (*Inverted C Antenna, ICA*);
- 3 инверсная Лантенна (*Inverted L Antenna, ILA*);
- 4 щелевая инверсная Сантенна (*Slot Inverted C Antenna, SICA*).

Рассмотрим вначале частотные зависимости входного импеданса, рассчитанные для излучающих элементов типа *ILA* и *ICA* при $h = 6$ мм, которые представлены на рис. 3. Для того чтобы детальнее рассмотреть низкочастотную область кривые только на этих двух рисунках построены для случая, когда частота возбуждения варьировалась в пределах от 0,2 до 2,2 ГГц.

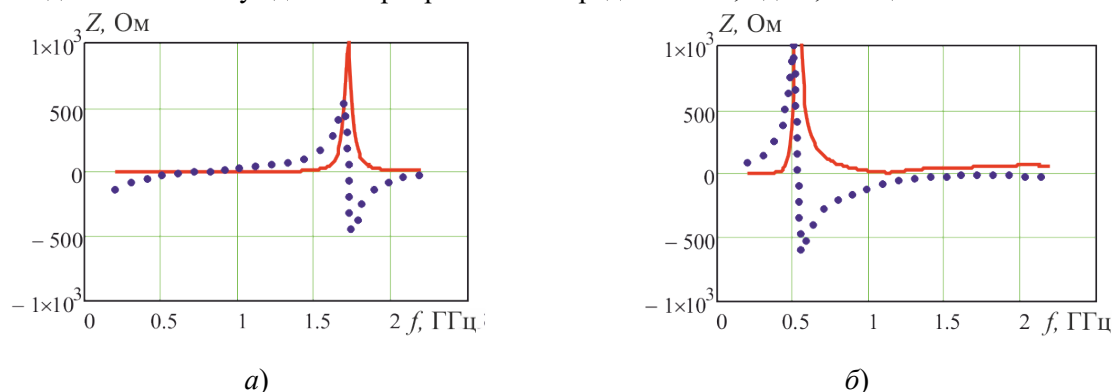


Рисунок 3 Импеданс на входе антенн, $h = 6$ мм: *ILA* (а); *ICA* (б)

Характерными особенностями представленных зависимостей являются, как положения областей резонанса ($\text{Im } Z \cong 0$), так и величины активного сопротивления ($\text{Re } Z$) в них. Видно, что поскольку суммарная длина монополей превышает величину $0,25 \lambda_0$, а сами они достаточно широкие, частоты *первых* резонансов лежат ниже 1 ГГц.

Причем *первый* (низкочастотный) резонанс для *ILA* последовательного типа и здесь величина $\text{Re } Z$ составляет единицы Ом, тогда как для *ICA* это резонанс параллельного типа и здесь $\text{Re } Z$ около 1000 Ом.

Другая закономерность наблюдается, если сравнивать характеристики антенн при разных значениях высоты вибраторов над экраном. Это иллюстрируют рис. 4 и 5, на которых показаны зависимости импеданса *SA*, *ILA* и *ICA*, причем частота *первого* резонанса находится (как для *ILA*, так и для *ICA*) практически за пределами этих рисунков. В приводимых результатах частота возбуждения варьировалась в пределах от 0,8 до 3,8 ГГц с интервалом 15 МГц.

При малой высоте ($h = 6$ мм, или $0,02 \lambda_0$) вибратора над экраном (рис. 4) наблюдаются более резкие изменения входного импеданса в области параллельного резонанса, чем при $h = 10$ мм, или $0,033 \lambda_0$ (рис. 5). Этим высотам соответствуют максимальные значения $\text{Re } Z$ в области *второго* резонанса 1 кОм и 800 Ом (для *ILA*), 500 и 400 Ом (для *ICA*).

Увеличение высоты приводит к снижению добротности вибраторных антенн, одновременно с этим наблюдается смещение резонансов в область более низких частот. Такой эффект обусловлен тем, что с увеличением высоты над экраном растет суммарная длина вибратора, причем этот фактор более выражен для *ICA*.

Частотные зависимости входного импеданса *SA* на рис. 4 и 5 имеют плавный характер, поскольку добротность широкой щели возбуждаемой в центре относительно невелика (поперечный размер щели равен $0,1 \lambda_0$).

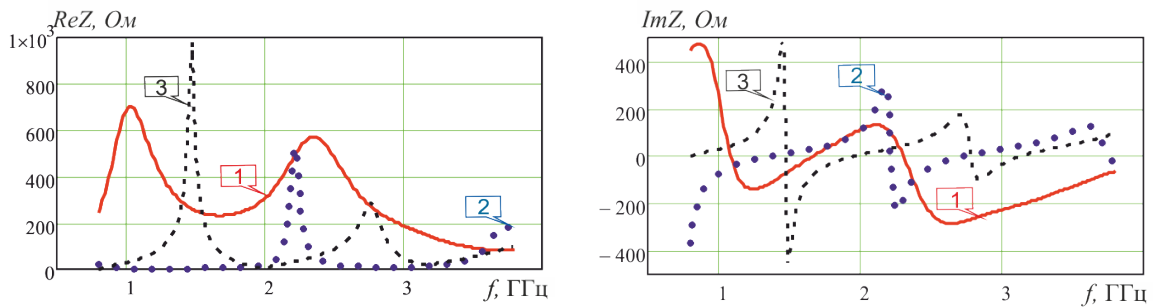


Рисунок 4 Импеданс на входе антенн: 1 SA; 2 ICA; 3 ILA; $h = 6$ мм

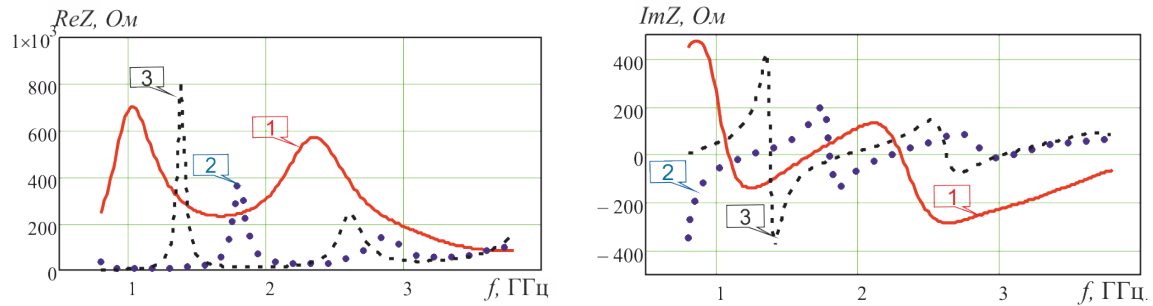


Рисунок 5 Импеданс на входе антенн: 1 SA; 2 ICA; 3 ILA; $h = 10$ мм

В конструкции типа *SICA*, где одновременно сочетаются элементы *SA* и *ICA*, используются характерные различия частотных зависимостей импеданса. При этом, изменяя соотношения между длиной и шириной щели, продольным и поперечным размером планарного вибратора, можно существенным образом менять характер поведения входного импеданса *SICA* в необходимой полосе частот.

Преимущества конструкции *SICA* в сравнении с инверсными *L* Сантеннами иллюстрируют рис. 6 и 7. Здесь видно, что наличие щели приводит к резкому «сглаживанию» частотных зависимостей (диапазон частот 0,8... 4,8 ГГц) при малой высоте монополя над экраном (как при $h = 6$ мм, так и при $h = 10$ мм). При этом величина активного входного сопротивления (**ReZ**) в том же диапазоне частот мало меняется, составляя при выбранных геометрических параметрах примерно 50...60 Ом.

Такой характер частотной зависимости иллюстрирует тот факт, что наличие щели, наряду с ее влиянием на величину входного импеданса, существенно снижает запас «реактивной» энергии в пространстве между вибратором и экраном, уменьшая тем самым добротность антенны. Наличие антенных элементов разных типов (щель и вибратор) позволяет реализовать уникальную возможность для создания планарных низкопрофильных конструкций антенн с широким рабочим диапазоном частот (по входному импедансу).

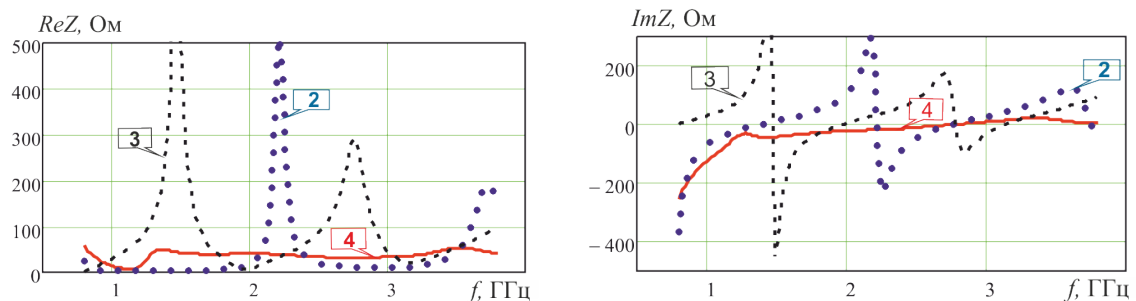


Рисунок 6 Импеданс на входе антенн: 2 ICA; 3 ILA; 4 SICA; $h = 6$ мм

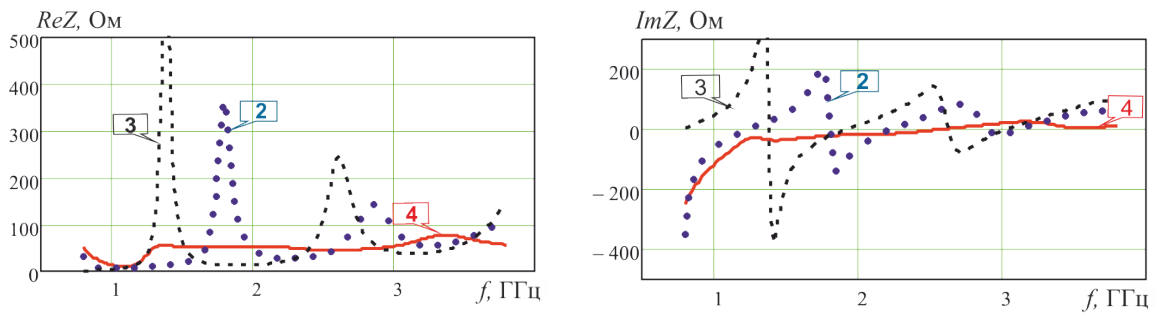


Рисунок 7 Импеданс на входе антенн: 2 ICA; 3 ILA; 4 SICA $h = 10$ мм

На этот же факт указывают и зависимости КСВ на входе антенн от частоты, приведенные на рис. 8 и 9. Эти графики построены для случая, когда чисто активное сопротивление нагрузки равнялось активной части входного импеданса антенн (на выбранной резонансной частоте).

Для сравнения на этих же рисунках приводятся аналогичные зависимости для одиночной щели (отмечена цифрой 1). Сравнивая графики на рис. 8 можно отметить, что при уменьшении высоты вибратора над экраном полоса частот (при $КСВ < 2$) в резонансных областях резко сужается. Эту ситуацию существенно меняет наличие щели в экране: полоса заметно расширяется незначительно в низкочастотную область и существенно в область высших частот (рис. 9). КСВ в пределах широкого частотного диапазона мало меняется, при этом его верхняя граница расположена за пределами рассматриваемого участка.

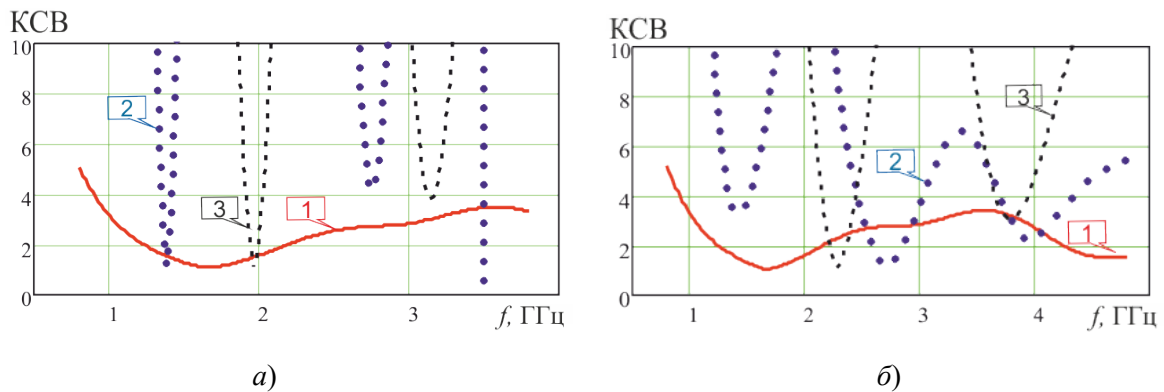


Рисунок 8 Графики зависимостей КСВ на входе антенн: $h = 6$ мм (а); $h = 10$ мм (б)

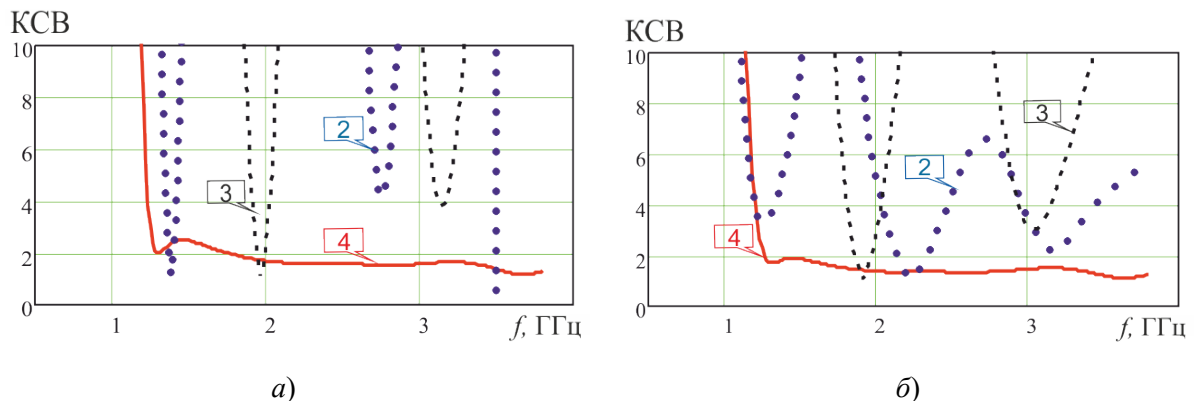


Рисунок 9 КСВ на входе антенн: 2 ICA; 3 ILA; 4 SICA, $h = 6$ мм (а); $h = 10$ мм (б)

Об изменении направленных свойств антенн можно судить, рассматривая графики, изображенные на рис. 10. На них отображена частотная зависимость КНД в направлении нормали к плоскости экрана ($\theta = 0^\circ$).

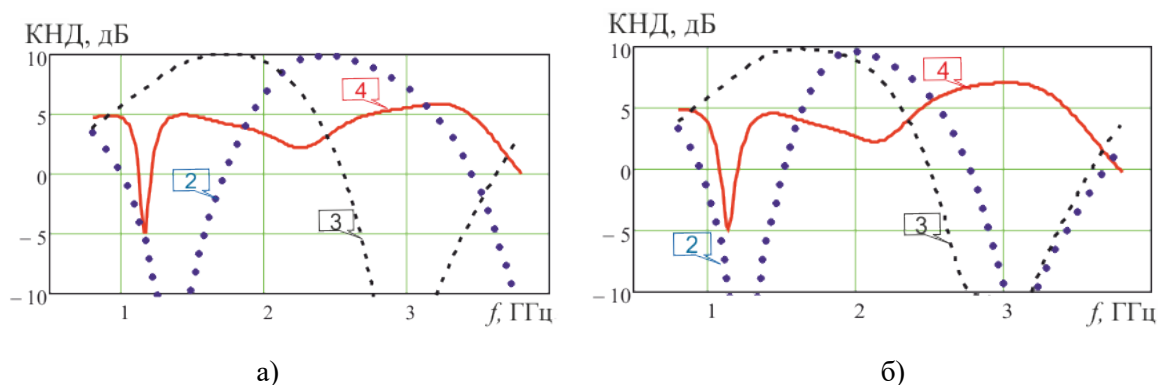


Рисунок 10 КНД антенн: 2 *ICA*; 3 *ILA*; 4 *SICA*, $h = 6$ мм (а); $h = 10$ мм (б)

На них видно, что максимальные значения КНД для *SICA* меньше, чем для *ILA* и *ICA* и это объясняется тем, что наличие щели приводит к перераспределению части излучаемой энергии в нижнее полупространство. С другой стороны, на этих рисунках можно отметить положительные качества *SICA* – заметное выравнивание значений КНД в пределах рассматриваемого диапазона частот. Незначительные осцилляции этих значений трудно отнести к недостаткам *SICA* поскольку (как и все рассматриваемые здесь антенны) это слабонаправленная антенна.

Как показали расчеты, резкий скачок КНД *SICA* в районе 1,2 ГГц связан с наличием провала в главном лепестке ДН в направлении нормали (в относительно малом секторе углов).

В табл. 1 приведены данные, характеризующие рабочую полосу частот Δf при $\hat{E}\hat{N}\hat{A} \leq 2$ для различных конструктивных вариантов антенн. Поскольку вблизи первого резонанса ширина этой полосы для *L* и *C* антенн весьма мала, то в данную таблицу сведены значения более широкой полосы вблизи частоты второго резонанса f_{02} .

Таблица 1 Полоса рабочих частот при разных высотах вибратора над экраном

Конструкция антенны	$f_{02}, \text{ГГц}$		$R_H, \text{Ом}$		$\Delta f, \text{ГГц}$	
	$h = 6 \text{ мм}$	$h = 10 \text{ мм}$	$h = 6 \text{ мм}$	$h = 10 \text{ мм}$	$h = 6 \text{ мм}$	$h = 10 \text{ мм}$
Щель в экране	1,65		250		0,95	
<i>ILA</i>	1,72	1,6	1000	845	0,02	0,05
<i>ICA</i>	1,35	1,28	2,5	6	0,026	0,05
<i>SICA</i>			50	50	>2	>3

Исходя из данных приведенных на рис. 6,7,9 и 10 можно предполагать, что граница частотного диапазона *SICA* (определяемая как по входному импедансу, так и направленным свойствам) находится заметно выше границы диапазона частот показанного на этих рисунках.

В заключение отметим, что результаты исследования, приведенные в данной статье, основаны на корректном численном решении дифракционной задачи. Детально рассмотрены электродинамические характеристики антенн, состоящих из планарного несимметричного вибратора (монополя), расположенного над плоским круговым хорошо проводящим экраном, в том числе при наличии прямоугольной щели, прорезанной в нем.

Особенностью рассмотренных конструкций является относительно малое, по сравнению с длиной волны, расстояние между монополем и экраном. Сделать выводы о преимуществах и свойствах различных конструкций низкопрофильных планарных антенн, позволяет сравнение их характеристик между собой и с аналогичными характеристиками щелевого излучателя. Интересным, с практической точки зрения, представляется принцип, примененный для существенного расширения рабочего диапазона частот. Применительно к низкопрофильным инверсным антенным элементам он заключается в сочетании в антенне нескольких элементов, имеющих различный характер частотной зависимости входного импеданса.

Примером является *SICA*, элементами которой являются планарный монополь и щель, прорезанная в экране перпендикулярно его оси. Отличительными свойствами такой антенны являются

относительно большие размеры щели, соизмеримые с размерами планарного излучателя. Широкая полоса частот в пределах которого мнимая часть входного импеданса $SICA$ мала и $KCB < 2$, по всей вероятности, обусловлена одновременным влиянием следующих причин:

различиями закономерностей изменения входного импеданса вибратора и щели при вариации частоты;

наличием сильной взаимной связи между вибратором и щелью.

Основываясь на полученных результатах, можно очертить возможные направления для дальнейших исследований такие, например, как оптимизация форм-фактора ICA и $SICA$ с целью уменьшения их размеров и дальнейшего расширения полосы рабочих частот, создание многоэлементных систем на этой основе, видоизменение конструкций антенн с целью достижения однонаправленного излучения.

Литература

1. Цалиев Т.А. Широкополосная дипольно-щелевая антенна / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 2. – С. 10-17.
2. Слюсар В. И. Многодиапазонные антенны мобильных средств связи / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 8. – С. 9096.
3. Wong Kin_Lu. Planar Antennas for Wireless Communications / Wong Kin_Lu // New York: Wiley-Interscience. – 2003. – 299 p.
4. Karmokar D. K. Wideband Low Profile Double Inverted-F Antenna for 5.2/5.8 GHz WLAN and 5.5 GHz WiMAX Applications / D. K. Karmokar, K. M. Morshed, Md. S. Hossain, Md. N. Mollah // ACEEE Int. J. on Communication. – Vol. 02. – No. 01, Mar 2011. – P. 28-32.
5. Pragma J. Comparative Study, Design and Performance Analysis of Wide Slot Antenna with Patch-Feed for Bandwidth Enhancement / Pragma Jain, Sunil Kumar Singh // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – Vol. 3, Issue. 3, May.-June, 2013. – P. 1470-1474.
6. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.