

ПЛАНАРНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ЩЕЛЕВАЯ ДВУХКОЛЬЦЕВАЯ АНТЕННА ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Введение

За многие годы существования антенной науки и техники предложены различные конструкции слабонаправленных антенн. Имея сравнительно малые размеры, такие антенны используются в микроволновых терминалах мобильной связи стандартов 3G (450 – 1900 МГц) и 4G (750 – 2700 МГц), в адаптерах и роутерах WiFi стандартов IEEE 802.11n (2,4 ГГц), IEEE 802.11ac (5 ГГц). Это, например, такие антенны как четвертьволновый вертикальный монополюс, узкая прямоугольная щель, прорезанная в плоском проводящем экране ([1]), антенны «инверсного» типа [2], а также микрополосковые излучатели.

Наблюдаемое в последние годы развитие и внедрение новых поколений беспроводной мобильной связи (в частности, для сетей пятого поколения рассматривается возможность перехода в область миллиметровых волн – использования диапазонов 24,25 – 27,5 ГГц и 37 – 43,5 ГГц). Предполагается, что в сетях пятого поколения будут применяться активные антенные решетки, способные в конкретных условиях оперативно менять диаграмму направленности в зависимости от особенностей расположения и потребностей абонентов. Для этих целей необходима соответствующая материальная основа, в том числе антенные элементы, обладающие в широкой полосе частот заданными свойствами. Причем, желательно обеспечить такие условия, когда одна антенна способна нормально функционировать одновременно в двух областях частотного диапазона, например 25 и 39 ГГц.

Широко известны конструкции планарных рамочных антенн, в том числе с треугольными и круговыми элементами ([3]). Существует несколько конструктивных вариантов рамочных антенн, образованных из двух копланарных рамок, с улучшенными (в сравнении с одиночной рамкой) характеристиками направленности. Реальные конструкции могут быть выполнены, например, из двух треугольных («Bowtie») [4] или двух круговых («восьмерка») копланарных элементов. На практике также применяется проводная зигзагообразная антенна, иногда называемая «Bi-Quad» [5].

Однако все перечисленные типы антенн не обладают широкополосными свойствами, определяемыми одновременно по двум параметрам: по согласованию с питающей линией и по КНД. Как показывает приведенное ниже сравнение перечисленных типов слабонаправленных антенн, все они характеризуются относительно узкой полосой частот рабочего диапазона, определяемого по коэффициенту отражения на входе.

Результаты расчетов свидетельствуют, что предлагаемая к рассмотрению двухкольцевая антенна, имея планарную конструкцию, может обеспечить (в зависимости от ее геометрических параметров) широкополосные свойства, как по коэффициенту стоячей волны (КСВ) на ее входе, так и по КНД.

В этой антенне сами кольца имеют достаточную ширину, что обеспечивает жесткость и, что важно, конструктивную возможность для выполнения продольной щели в области их пересечения. Такая узкая (но существенно более короткая, в сравнении с половиной длины волны) продольная щель ориентирована своей осью в направлении центров колец, при этом соединяет ближайшие края отверстий в области пересечения колец.

Областью применения этой антенны могут быть разного рода антенные системы, предназначенные для излучения или приема радиоволн как дециметрового, так сантиметрового и даже миллиметрового диапазонов волн, в том числе они могут применяться в качестве элементов планарных антенных решеток, предназначенных для излучения или приема широкополосных [7] сигналов. К настоящему времени топологические и электродинамические

характеристики таких антенн не рассматривались, и сравнение их с возможными аналогами не проводилось.

Строгий анализ характеристик планарных кольцевых антенн, основанный на аналитических методах, сопряжен с определенными трудностями математического характера.

Поэтому результаты, приводимые далее, основаны на численном решении интегрального уравнения относительно плотности поверхностного тока на элементах антенны в процессе компьютерного моделирования в среде комплекса программ FEKO [8].

Цель работы – определение частотных зависимостей электродинамических характеристик щелевой двухкольцевой планарной антенны. В процессе исследований рассчитывались и анализировались такие характеристики этой антенны, как частотные зависимости входного импеданса, коэффициента отражения на входе и КНД в направлении нормали.

Конструктивные особенности исследуемых антенн

При выборе конструктивных особенностей антенны необходимо было добиться согласования входа антенны с линией питания и приемлемой равномерности значений коэффициента направленного действия (КНД) в возможно более широком диапазоне частот.

Антенна образована из двух одинаковых круговых копланарных дисков с круговыми отверстиями (кольцами), выполненных из тонкого проводящего материала. Взаимное расположение их в одной плоскости таково, что эти кольца частично пересекаются. Размер этой области пересечения зависит от выбранной ширины колец и от величины их смещения относительно друг друга. Для того чтобы выявить основные свойства и особенности характеристик такой антенны, ее преимущества и возможные недостатки, аналогичные расчеты осуществлялись применительно к гантельной щелевой модели антенн соответственных размеров (табл. 1).

В основе рассмотренных моделей антенны лежит плоский хорошо проводящий материал толщиной 0,25 мм с подложкой из диэлектрика толщиной 0,5 мм, размеры которой соответствуют модели.

Таблица 1

Параметры	Модели антенн	
	«двухкольцевая» (рис. 1, а)	«гантельная» (рис. 1, б)
Внешний радиус колец, R_1	$0,3\lambda_0$	–
Радиус больших отверстий, R_2	$0,15\lambda_0$	–
Диаметр малых отверстий, D	–	$0,14l_\Sigma$
Радиус экрана, R	–	$1,5\lambda_0$
Суммарная длина щели, l_Σ	$0,8\lambda_0$	$0,5\lambda_0$
Ширина щели, t	0,5 мм	0,5 мм

Топология проводящих элементов указанных моделей антенн изображена на рис. 1.

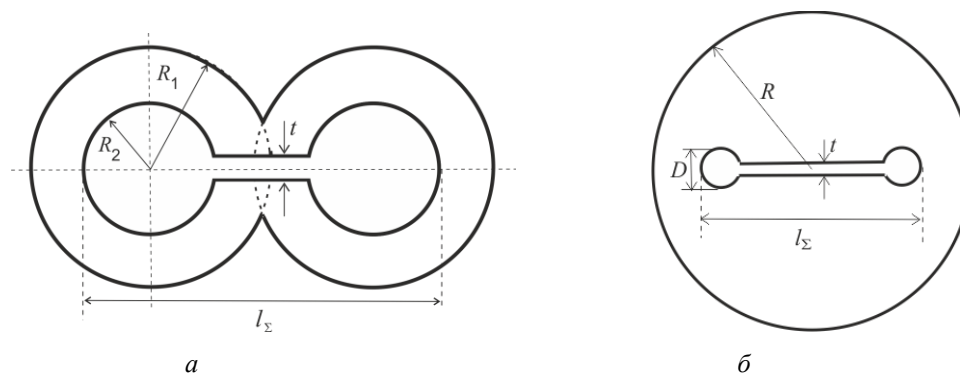


Рис. 1

Методика исследований

В приводимых далее результатах компьютерного моделирования, частота источника возбуждения антенн варьировалась в пределах от 20,0 до 50,0 ГГц (с шагом 250 МГц). При этом щели возбуждались в центре, а длина волны λ_0 , принятая за основу при расчете геометрических параметров, соответствует частоте 30,0 ГГц.

Используемый в процессе численного анализа метод моментов предусматривает для решения интегрального уравнения относительно плотности поверхностного тока разбиение поверхности антенн на малые по сравнению с длиной волны треугольные сегменты, аппроксимацию тока в пределах таких сегментов и решение полученной системы линейных алгебраических уравнений. Для получения приемлемой точности характерный размер Δl стороны сегмента выбран в соответствии с неравенством $\Delta l < \lambda_{\min} / 10$, где λ_{\min} минимальная длина волны в свободном пространстве для исследуемого частотного диапазона.

В результате решения системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса определено, в частности, амплитудно-фазовое распределение плотности токов на элементах модели антенны и на этой основе в последующем рассчитаны частотные зависимости импеданса и модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ на ее входе, а также характеристики поля излучения в дальней зоне и КНД.

Результаты компьютерного моделирования

Одними из наиболее важных параметров, определяющих частотные свойства любой антенны, являются значение входного импеданса, его зависимость от частоты и степень согласования с питающей линией.

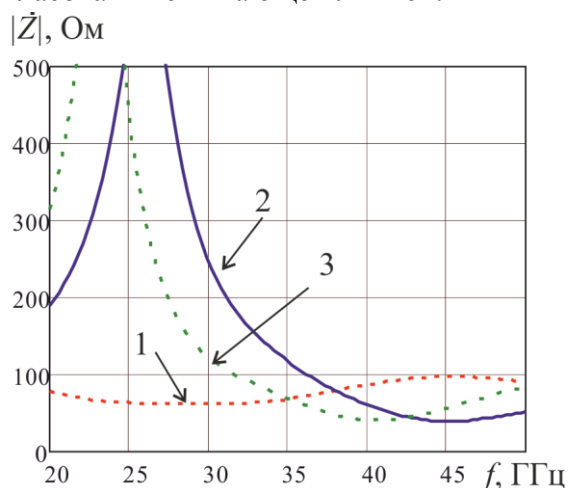


Рис. 2

На графиках рис. 2 показаны результаты расчетов, иллюстрирующие зависимости модуля импеданса $|Z_{in}|$ на входе антенн. Здесь, и далее на последующих рисунках, цифрами отмечены такие модели антенн: 1 – «двухкольцевая»; 2 – «гантельная» без диэлектрической подложки; 3 – «гантельная» с диэлектрической подложкой.

Изображенные на рис. 2 частотные зависимости позволяют, отметить основные особенности частотных свойств рассмотренных моделей антенн при ширине щели $t = 0,5$ мм. Можно отметить, что для двухкольцевой антенны в рассматриваемом диапазоне частот усредненное значение $|Z_{in}|$ лежит в пределах

70 – 80 Ом, в то время как у гантельной антенны на частотах ниже 30 ГГц находится область «параллельного» резонанса, где $|Z_{in}| \geq 600$ Ом и только в области частот выше 40 ГГц величина $|Z_{in}|$ в среднем равна 50 Ом.

Отметим, что рассматриваемая топология двухкольцевой антенны позволяет путем изменения поперечного размера щели в области пересечения колец подбирать наиболее приемлемое для питающей линии значение входного импеданса антенны.

Так, при $t = 0,5$ мм $60 \leq |Z_{in}| \leq 100$ Ом, а при $t = 1$ мм $|Z_{in}| \geq 100$ Ом. Следовательно, путем некоторого изменения поперечного размера щели в области пересечения колец можно подбирать наиболее приемлемое для питающей линии значение входного импеданса антенны.

Зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе антенн при $t = 0,5$ мм изображены на рис. 3. Сравнивая графики этих зависимостей, можно с уверенностью сделать вывод о широкополосных свойствах двухкольцевой антенны, определяемых по ее согласованию с питающей линией. Отметим, что наличие диэлектрической подложки в «гантельной» модели приводит, что и следовало ожидать, к смещению кривой 2 в область более низких частот (обозначения кривых указывались ранее). Показанные на этих двух рисунках графики отличаются величиной сопротивления нагрузки на входе антенн.

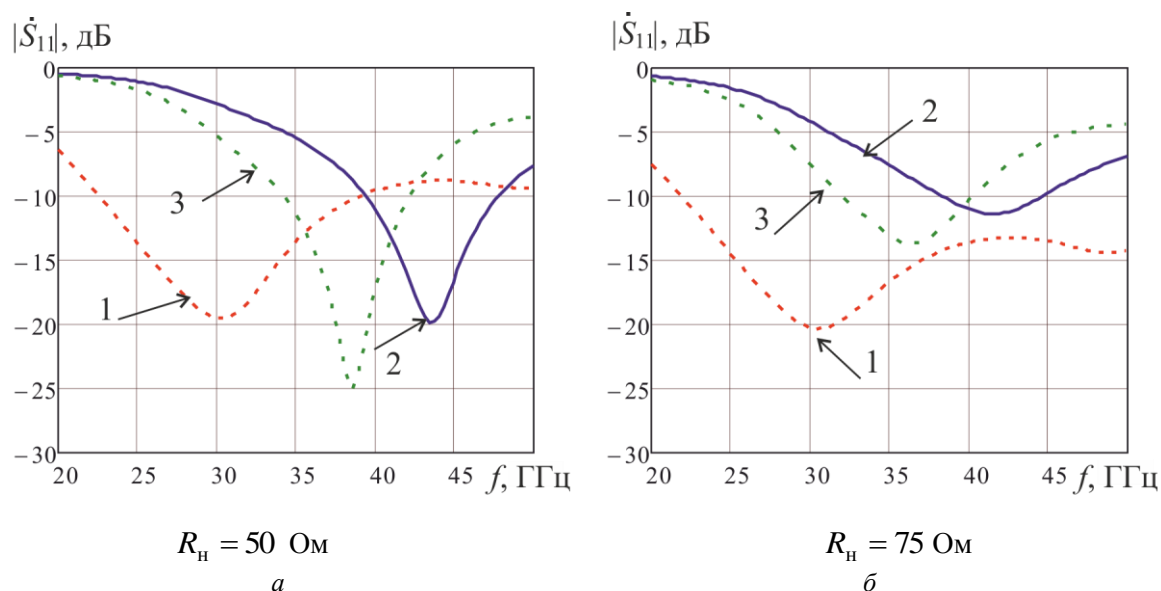


Рис. 3

Представленные графики построены по результатам численного решения дифракционной задачи, и они наглядно иллюстрируют частотные зависимости основных параметров рассмотренных антенн.

Данные о ширине полосы частот определяемой по уровню $|S_{11}| \leq -10$ дБ с применением формулы $\Delta f_S = 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}) \cdot 100$ (%) сведены в табл. 2.

Таблица 2

Модель антенны	Сопротивление нагрузки, Ом	
	50	75
«двухкольцевая»	$\Delta f_S = 53,7$ %	$\Delta f_S = 77,8$ %
«гантельная» без подложки	$\Delta f_S = 20,7$ %	$\Delta f_S = 16,9$ %
«гантельная» с подложкой	$\Delta f_S = 18,6$ %	$\Delta f_S = 22,2$ %

Видим, что для рассматриваемой топологии двухкольцевой антенны при $t = 0,5$ мм (кривая 1) наилучшее согласование и широкая полоса обеспечиваются при активном сопротивлении нагрузки на входе антенны равном 75 Ом. Это позволяет сделать достаточно корректное заключение о преимуществе двухкольцевой антенны.

Расчеты показали, что путем подбора геометрических параметров двухкольцевой антенны и ширины щели можно добиться оптимальных (с точки зрения широкополосного согласования) результатов.

Направленные свойства исследуемых моделей антенн иллюстрируют графики частотных зависимостей коэффициента направленного действия (КНД) в направлении нормали к плоскости экрана, изображенные на рис. 4.

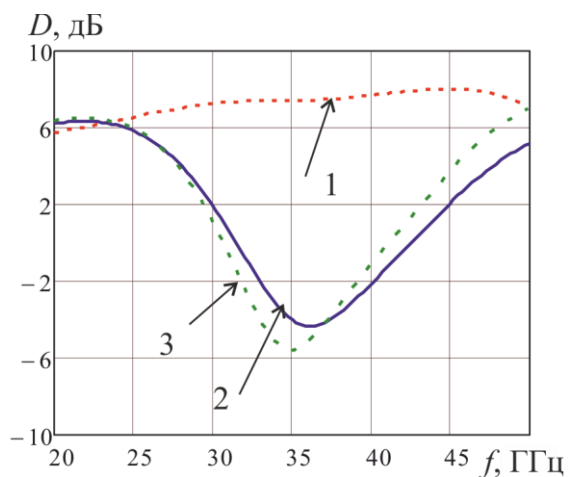


Рис. 4

Рассмотрев эти зависимости, нетрудно заметить сравнительно плавное изменение КНД в пределах всего диапазона частот, характерное для кривой 1 («двухкольцевая» модель) и существенный «провал» кривых 2 и 3 («гантельная» модель) в средней части диапазона.

Причиной этого является «раздвоение» главного лепестка диаграммы направленности «гантельной модели» антенны. Это хорошо видно на рис. 5, где изображены диаграммы обеих моделей на частоте 36 ГГц.

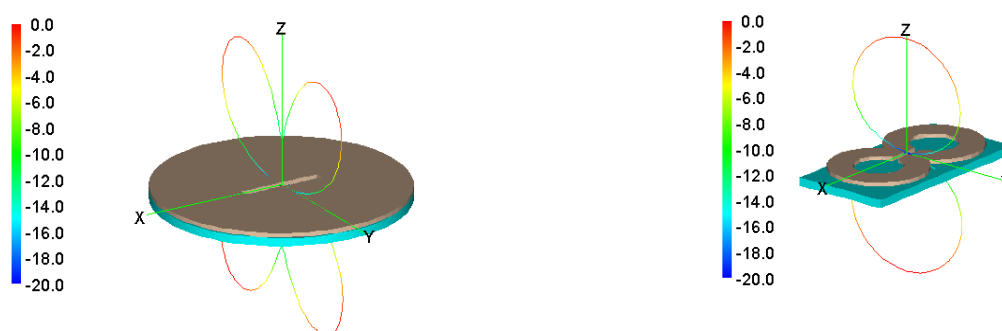


Рис. 5

В процессе исследования было установлено, что путем небольшой вариации размеров колец, их ширины, длины щели и ее ширины возможно в достаточно широком диапазоне менять электродинамические характеристики, устанавливая необходимые значения этих величин.

Выводы

Представлена топология планарной широкополосной щелевой двухкольцевой антенны и приводятся частотные зависимости ее электродинамических характеристик, которые сравниваются с аналогичными характеристиками «гантельной» щелевой антенны. Показаны результаты компьютерного моделирования для этих антенн в виде распределений напряженности электрического поля в ближней зоне. Эти данные позволяют детально рассмотреть и проанализировать особенности формирования поля излучения.

Полученные результаты и выводы основаны на корректном решении дифракционной задачи путем компьютерного моделирования и анализе.

Антенну предлагаемой формы и геометрических размеров можно отнести к классу широкополосных. Рабочая полоса частот, определяемая как по КНД, так и по коэффициенту отражения на входе, содержит в себе одновременно все области перспективных стандартов мобильной связи пятого поколения. Широкополосные свойства этой антенны обусловлены наличием в ее конструкции двух широких частично скрещенных планарных колец и относительно короткой узкой щели в средней части области их пересечения.

Такие особенности обеспечивают ей широкую полосу рабочих частот, как по характеристикам направленности, так и по входному импедансу. При этом входное сопротивление антенны имеет значение примерно 50 – 75 Ом и может корректироваться изменением ширины щели. Это позволяет использовать для питания коаксиальную или копланарную линию,

лежащие в плоскости самой антенны, либо непосредственно подсоединяемый активный модуль, например, как в планарной антенной решетке [9].

Наряду с широкополосностью преимуществами представленного антенного элемента, являются повышенное значение КНД по сравнению с дипольными и щелевыми антеннами, а также технологичность изготовления, дающая определенную выгоду при массовом производстве.

Список литературы:

1. Жук М.С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. 648 с.
2. Chen Z.N. Broadband planar inverted-L antennas / Z.N. Chen, M.Y.W. Chia // IEE Proceedings. Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 148, No. 5, October 2001. P.: 339342.
3. Жук М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. Москва : Энергия, 1973. 440 с.
4. Слюсар В.И. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: НТБ. 2006. № 7. С.10–19.
5. Харченко К. П. УКВ антенны. Москва : ДОСААФ, 1969. 113 с.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Москва : Радио и связь, 1985. 384 с.
7. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. Москва : ЗАО «НПП «Родник», 2008. 245 с.
8. Phased Array Antennas & The Roadmap to 5G Wireless / Jul. 11, 2017. Режим доступа: [:https://www.macom.com/blog/phased-array-antennas--the-roadm](https://www.macom.com/blog/phased-array-antennas--the-roadm)

*Одесская национальная
академия связи имени А.С. Попова*

Поступила в редколлегию 15.12.2018