

## РАДИОТЕХНИКА, ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЯ ТА ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.396.677.8

### АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНАРНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ДВУХКОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННЫ

*Цалиев Т. А.*

*Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[tamerlan.tsaliev@gmail.com](mailto:tamerlan.tsaliev@gmail.com)*

### АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНАРНОЇ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДВОКІЛЬЦЕВОЇ АНТЕНИ

*Цалиєв Т. А.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[tamerlan.tsaliev@gmail.com](mailto:tamerlan.tsaliev@gmail.com)*

### ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF A PLANAR BROADBAND DOUBLE RING ANTENNA

*Tsaliev T. A.*

*O. S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[tamerlan.tsaliev@gmail.com](mailto:tamerlan.tsaliev@gmail.com)*

**Аннотация.** Представлена топология и рассматриваются электродинамические характеристики антенны линейной поляризации в виде двух планарных частично пересекающихся круговых дисков. Каждый из таких дисков имеет отверстие в центре, а в области их пересечения расположена узкая продольная прямоугольная щель, ось которой ориентирована в направлении центров отверстий. Приведены, обсуждаются и сравниваются результаты численного моделирования характеристик такой антенны. Широкополосные свойства этой антенны объясняются наличием в ее конструкции двух широких частично скрещенных планарных колец и относительно короткой узкой щели, которая возбуждается в области их пересечения. Такая особенность обеспечивает достаточно широкую полосу рабочих частот, как по характеристикам направленности, так и по входному импедансу. При этом антенна имеет значение входного сопротивления 50...60 Ом, которое может корректироваться путем изменения ширины щели и колец. Для сравнения в данной статье рассмотрены также аналогичные характеристики малоразмерных слабонаправленных антенн, таких как вертикальный монополюс, щелевые полуволновые антенны и зигзагообразная антенна (антенна Харченко или «Z-antenna»). Показано, что рассматриваемая антенна обладает, в сравнении с ними, улучшенными частотными свойствами, как по согласованию на входе, так и по коэффициенту направленного действия. Наряду с широкополосностью, преимуществами такой антенны являются: повышенное значение КНД по сравнению с монополюсными и дипольными проволочными конструкциями, а также несложная технология изготовления, дающая определенную выгоду при массовом производстве.

**Ключевые слова:** кольцевые антенны, щелевые антенны, планарные антенны, частотные свойства, широкополосность.

**Анотація.** Надана топологія й розглядаються електродинамічні характеристики антени лінійної поляризації у вигляді двох планарних частково пересічних колових дисків. Кожний з таких дисків має отвір у центрі, а в області їх пересічення розташована вузька поздовжня прямокутна щілина, вісь якої орієнтована в напрямку центрів отворів. Приведені, обговорюються й порівнюються результати чисельного моделювання характеристик такої антени. Широкопосмугові властивості цієї антени

---

*Цалиев Т. А.*

5

пояснюються наявністю в її конструкції двох широких частково схрещених планарних кілець і відносно короткої вузької щілини, яка збуджується в області їх пересічення. Така особливість забезпечує достатньо широку смугу робочих частот, як за характеристиками спрямованості, так і за вхідним імпедансом. При цьому антена має значення вхідного опору 50...60 Ом, яке може коректуватися шляхом зміни ширини щілини й кілець. Для порівняння в даній статті розглянуті також аналогічні характеристики малорозмірних слабкоспрямованих антен, а саме: вертикальний монополь, щілинні напівхвильові антени й зигзагоподібна антена (антена Харченко або «Z-antenna»). Показано, що розглянута антена має, порівняно з ними, поліпшені частотні властивості, як за узгодженням на вході, так і за коефіцієнтом спрямованої дії. Поряд із широкопосмуговістю, перевагами такої антени є: підвищене значення КСД порівняно з монопольними й дипольними дровотними конструкціями, а також нескладна технологія виготовлення, що дає певну вигоду при масовому виробництві.

**Ключові слова:** кільцеві антени, щілинні антени, планарні антени, частотні властивості, широкопосмуговість.

**Abstract.** The topology is presented and the electrodynamic characteristics of the linear polarization antenna in the form of two planar partially intersecting circular disks are considered. Each of these discs has a hole in the centre, and in the area of their intersection there is a narrow longitudinal rectangular slot whose axis is oriented in the direction of the centres of the holes. Results of numerical simulation of the characteristics of such an antenna are presented, discussed and compared. Broadband properties of this antenna are explained by the presence in its design of two broad partially crossed planar rings and a relatively short narrow slot, which is excited in the region of their intersection. This feature provides a sufficiently wide band of operating frequencies, both in directivity characteristics and in input impedance. In this case, the antenna has an input resistance about 50 ... 60 Ohm, which can be adjusted by changing the width of the slot and rings. For comparison, similar characteristics of small-size low-directional antennas, such as vertical monopole, slot half-wave antennas and a zigzag antenna (the Kharchenko antenna or the "Z-antenna") are also considered in this paper. It is shown that the antenna under consideration possesses, in comparison with them, improved frequency properties, both in matching at the input and in the directivity. Along with broadband, the advantages of such an antenna are: an increased value of the directivity as compared to the monopole and dipole wire structures, and also a simple manufacturing technology that gives a certain benefit in mass production.

**Key words:** ring antennas, slot antennas, planar antennas, frequency properties, broadband.

Наблюдаемое в последние годы развитие и внедрение новых поколений беспроводной мобильной связи и связанное с этим освоение новых частотных диапазонов требует соответствующего аппаратного обеспечения, в частности, создания антенных элементов, обладающих заданными свойствами в более широкой полосе частот.

За многие годы существования антенной науки и техники предложены различные конструкции слабонаправленных антенн линейной поляризации. К антеннам такого типа могут быть отнесены: вертикальный монополь, узкая прямоугольная щель, прорезанная в плоском проводящем экране [1], антенны «инверсного» типа [2], обладающие невысоким значением КНД.

Имея сравнительно малые размеры, такие антенны используются в микроволновых терминалах стандартов мобильной связи 2G, 3G (450...1900 МГц) и 4G (750...2700 МГц), а также стандартов IEEE 802.11n (2,4 ГГц), IEEE 802.11ac (5 ГГц) в адаптерах и роутерах WiFi. Причем одна антенна способна обслуживать лишь один, реже два, отдельно взятых участка ограниченного частотного диапазона.

Известны также планарные рамочные антенны, 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, иногда называемая «Vi-Quad», антенна [5].

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

Сравнительно недавно автором были предложены низкопрофильные кольцевые планарные антенны [6], которые, обладая необходимой равномерностью входного импеданса в достаточно широкой полосе частот, в силу асимметричной топологии имеют меньшую широкополосность, определяемую по коэффициенту направленного действия (КНД) в главном направлении.

При выборе конструктивных особенностей антенны, рассматриваемой в данной статье, необходимо было наряду с улучшением свойств направленности, обеспечить согласование входа антенны с линией питания и приемлемую равномерность значений коэффициента направленного действия (КНД) в более широком диапазоне частот.

Такая антенна образована из двух одинаковых круговых копланарных колец с круговыми отверстиями, выполненных из тонкого проводящего материала. Они рас положены в одной плоскости так, что эти кольца частично пересекаются. Размер области пересечения зависит от выбранной ширины колец, а также их смещения относительно друг друга.

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

Такая двухкольцевая антенна, имея планарную конструкцию, может обеспечить (в зависимости от соотношения ее геометрических параметров) широкополосные свойства, как по коэффициенту стоячей волны (КСВ) на ее входе, так и по КНД. При этом главный лепесток ее диаграммы направленности ориентирован в направлении нормали к плоскости антенны, в отличие от проводных копланарных двухкольцевых рамок противофазного питания [3].

Областью применения этой антенны могут быть разного рода антенные системы, предназначенные для излучения или приема радиоволн как дециметрового, так и сантиметрового диапазонов волн, в том числе они могут применяться в качестве элементов планарных антенных решеток, предназначенных для излучения или приема широкополосных сигналов [7]. К настоящему времени топологические и электродинамические характеристики таких антенн не рассматривались, а сравнение их с возможными аналогами не проводилось.

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

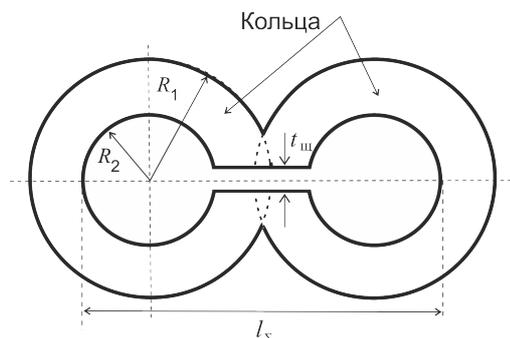
Поэтому результаты исследования таких характеристик, приводимые далее, основаны на численном решении интегрального уравнения относительно плотности поверхностного тока на элементах антенны в процессе компьютерного моделирования в среде комплекса программ *FEKO* [8].

Во многих научных исследованиях при анализе характеристик антенн широко используется численный алгоритм решения интегральных уравнений. В качестве базового метода решения дифракционной задачи в пакете программ *FEKO* реализуется метод моментов (метод Бубнова-Галеркина) с последующим расчетом и анализом характеристик антенных элементов либо рассеивателей.

**Цель данной статьи** состоит в определении частотных зависимостей электродинамических характеристик целевой двухкольцевой планарной антенны. В процессе проведенных исследований рассчитывались и анализировались такие характеристики этой антенны, как частотные зависимости входного импеданса, коэффициента отражения на входе и КНД в направлении нормали.

В приводимых далее результатах компьютерного моделирования частота источника возбуждения антенн варьировалась в пределах от 1,0 до 5,0 ГГц (с шагом 50 МГц). Длина волны  $\lambda_0$ , принятая за основу при расчете геометрических параметров, соответствует частоте 2,5 ГГц.

В основе всех рассмотренных конструкций лежит плоский хорошо проводящий экран толщиной 0,25 мм. Предлагаемая топология планарной щелевой двухкольцевой изображена на рис. 1.



- радиус внешней окружности колец  $R_1 = 0,3\lambda_0$ ;
- радиус отверстий  $R_2 = 0,15\lambda_0$ ;
- общий размер отверстий со щелью  $l_\Sigma = 0,8\lambda_0$ ;
- поперечный размер щели  $t_{щ} = 3...5$  мм

Рисунок 1 – Топология модели двухкольцевой антенны

Для того, чтобы выявить основные свойства и особенности характеристик такой антенны, ее преимущества и возможные недостатки также осуществлялись аналогичные расчеты применительно к широко известным щелевым моделям антенн соответствующих размеров (табл. 1).

Таблица 1 – Геометрические параметры моделей щелевых антенн

Тип модели	Диаметр отверстий, $D$	Поперечный размер щели, $t_{щ}$	Общая длина щели, $l_\Sigma$	Радиус экрана, $R_s$
Полуволновая щель (рис. 2, а)	–	3,0 мм	$0,5\lambda_0$	$0,75\lambda_0$
«Гангельная» щель (рис. 2, б)	$0,073\lambda_0$	3,0 мм	$0,5\lambda_0$	$0,75\lambda_0$

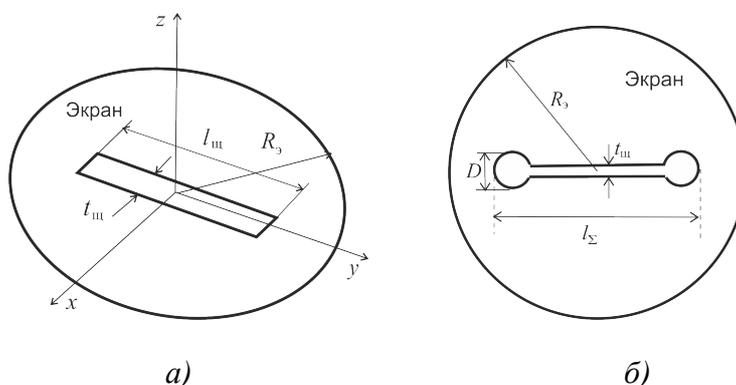


Рисунок 2 – Топология моделей щелевых антенн

Помимо них для расчетов характеристик и сравнения также выбраны такие слабонаправленные антенны.

Четвертьволновый монополь (рис. 3): радиус экрана  $R_s = 0,75\lambda_0$ ; высота вибратора  $h = 0,25\lambda_0$ ; радиус вибратора  $r = 0,5$  мм и зигзагообразная антенна (рис. 4): длина стороны квадрата  $l = 0,375\lambda_0$ ; толщина стороны квадрата  $t = 0,033\lambda_0$ ; расстояние в точке питания 3...5 мм.

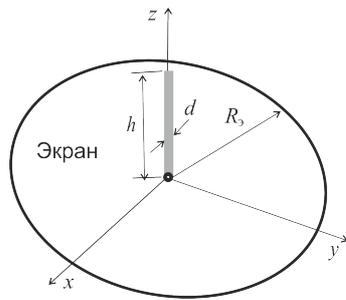


Рисунок 3 – Топология модели вертикального монополя

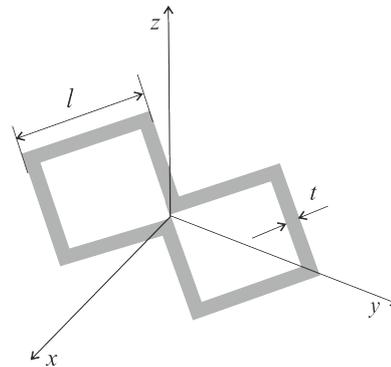


Рисунок 4 – Топология модели зигзагообразной антенны

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.

При этом характерный размер  $\Delta l$  стороны сегмента для получения приемлемой точности должен соответствовать неравенству  $\Delta l < \lambda_{\min} / 10$ , где  $\lambda_{\min}$  – минимальная длина волны в свободном пространстве применительно к исследуемому частотному диапазону.

В результате численного решения системы линейных алгебраических уравнений определяется амплитудно-фазовое распределение плотности поверхностных токов на поверхности модели антенны и на этой основе далее рассчитываются частотные зависимости импеданса и модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  на ее входе, а также характеристики поля излучения в дальней зоне и КНД.

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

Так, на рис. 5 показаны графики, иллюстрирующие зависимости модуля импеданса на входе антенн. Здесь, а также на последующих рисунках, цифрами отмечены кривые: 1 – прямоугольная щель; 2 – «гантельная» щель; 3 – двухкольцевая антенна; 4 – монополяр; 5 – зигзагообразная антенна.

Изображенные на рис. 5 частотные зависимости, позволяют для всех рассмотренных моделей антенн сравнить изменения, происходящие при вариации поперечного размера щели.

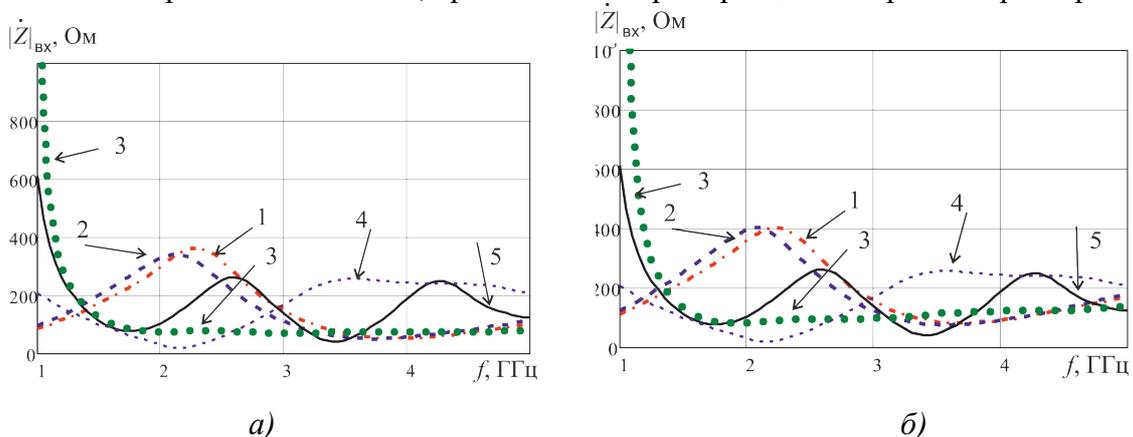


Рисунок 5 – Зависимости модуля импеданса на входе антенны:

а)  $t_{щ} = 3$  мм; б)  $t_{щ} = 5$  мм

И здесь очевиден тот факт, что в полосе частот от 1 до 5 ГГц минимальные осцилляции испытывает кривая, соответствующая двухкольцевой антенне. Для нее увеличение ширины щели приводит к некоторому возрастанию входного импеданса.

Следовательно, рассматриваемая топология таких антенн позволяет путем некоторого изменения поперечного размера щели в области пересечения колец подбирать наиболее приемлемое для питающей линии значение входного импеданса антенны.

Можно отметить, что для двухкольцевой антенны при  $t_{щ} = 3...5$  мм усредненное значение  $|Z_{вх}|$  лежит в пределах 50...75 Ом, в то время как для щелевых антенн характерным является значение 350...400 Ом (в области резонанса).

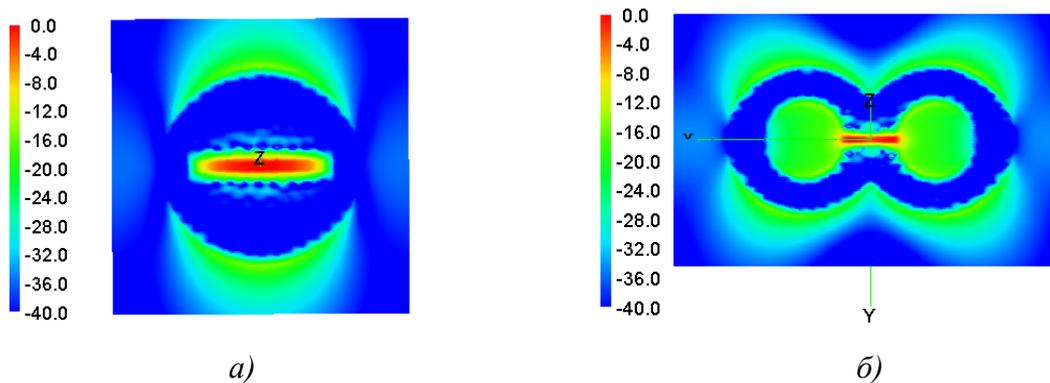


Рисунок 6 – Распределение ближнего поля:  
а) прямоугольная щелевая антенна; б) двухкольцевая антенна

На рис. 6 показаны результаты компьютерного моделирования для всех этих антенн в виде распределений напряженности электрического поля в ближней зоне на расстоянии 1 мм от поверхности антенн на частоте 2,5 ГГц. Эти данные позволяют рассмотреть и проанализировать особенности формирования поля излучения этими антеннами.

Зависимости модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  на входе антенны изображены на рис. 7. Показанные здесь варианты отличаются величиной сопротивления нагрузки на входе антенн:

- для всех типов антенн  $R_n = 50$  Ом, кроме монополя для него  $R_n = 37$  Ом (рис. 7, а);
- для щелевых антенн  $R_n = 350$  Ом, для остальных типов  $R_n = 75$  Ом (рис. 7, б).

Рассмотрев графики этих зависимостей модуля коэффициента отражения для антенн всех типов, также можно сделать вывод о широкополосных свойствах двухкольцевой антенны по согласованию ее с питающей линией.

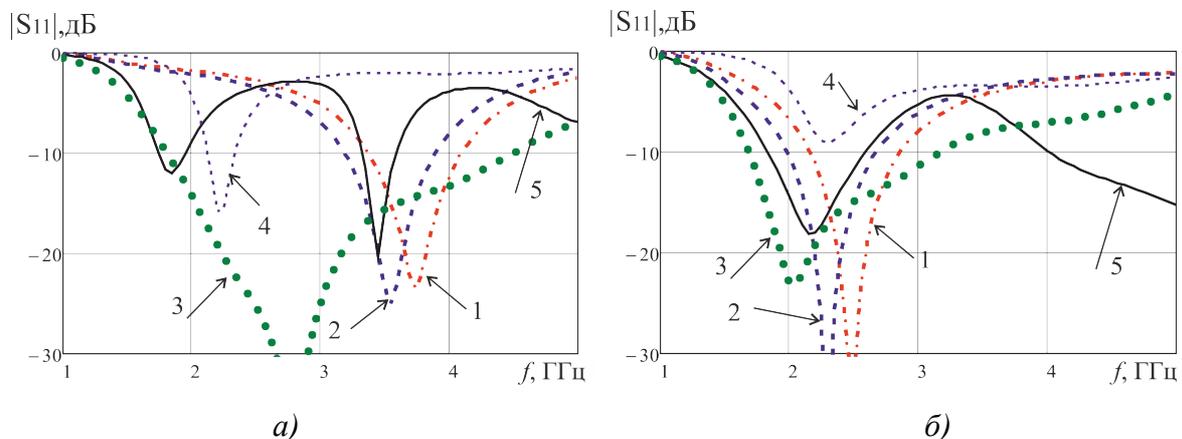


Рисунок 7 – Сравнение частотных зависимостей  $|S_{11}|$  на входе антенн:  
а)  $t_{щ} = 3$  мм; б)  $t_{щ} = 5$  мм

Представленные графики построены по результатам расчетов, и они наглядно иллюстрируют частотные зависимости основных параметров рассмотренных антенн. Результаты анализа этих зависимостей позволяют делать корректное заключение о лучших широкополосных свойствах двухкольцевой антенны по сравнению со всеми остальными рассмотренными антеннами.

Данные о ширине полосы частот, определяемой по уровню  $|S_{11}| \leq -10$  дБ, сведены в табл. 2. Относительная ширина рабочей полосы частот в данном случае определялась по формуле:

$$\Delta f_S = 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}) 100 (\%).$$

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

Таблица 2 – Ширина рабочей полосы частот антенн, определяемая по  $|S_{11}|$ .

Ширина щели и сопротивление нагрузки		Обозначение кривой на рис. 7				
		1	2	3	4	5
$t_{щ} = 3$ мм; $R_H = 50$ Ом		$\Delta f_S = 14,7\%$	$\Delta f_S = 17,1\%$	$\Delta f_S = 89,3\%$	$\Delta f_S = 9,1\%$	$\Delta f_S = 11\%$
$t_{щ} = 5$ мм	$R_H = 75$ Ом	–	–	$\Delta f_S = 67\%$	–	$\Delta f_S = 36,4\%$
	$R_H = 350$ Ом	$\Delta f_S = 28,0\%$	$\Delta f_S = 28\%$	–	–	–

Видим, что представленной топологии двухкольцевой антенны при  $t_{щ} = 3$  мм (кривая 3) наилучшее согласование и широкая полоса обеспечивается при активном сопротивлении нагрузки на входе антенны, равном 50 Ом.

Направленные свойства исследуемых моделей антенн иллюстрируют графики частотных зависимостей коэффициента направленного действия (КНД) в направлении нормали к плоскости экрана, изображенные на рис. 8. Анализируя эти зависимости, нетрудно заметить сравнительно плавное изменение, характерное для кривых 1...4 и резкие изменения КНД для кривой 5 в высокочастотной части диапазона. В низкочастотном участке рассматриваемого диапазона КНД двухкольцевой антенны превышает КНД щелевых антенн, совпадая с КНД зигзагообразной антенны. Поскольку диаграмма направленности монополя в горизонтальной плоскости имеет круговую форму, поэтому КНД монополя заметно меньше, чем у всех остальных типов антенн.

Все рассмотренные типы антенн являются слабонаправленными, и поэтому обладают хорошими широкополосными свойствами, определяемыми по КНД. Исключение составляет зигзагообразная антенна, у которой полоса рабочих частот по этому параметру почти в два раза меньше.

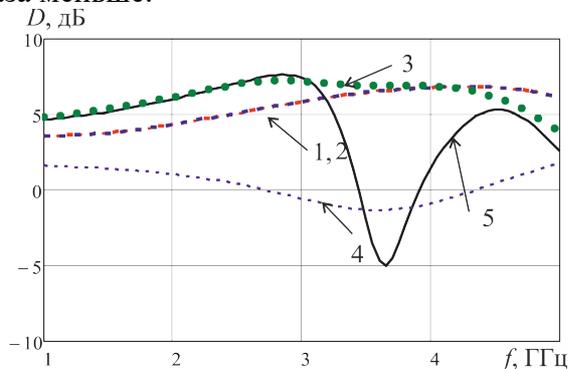


Рисунок 8 – Зависимости КНД от частоты

В процессе исследования было установлено, что путем вариации размеров колец, их ширины, длины щели и ее ширины можно в достаточно широком диапазоне менять ее электродинамические характеристики, устанавливая необходимые размеры.

В заключение можно отметить, что в данной работе рассмотрены особенности малоразмерных слабонаправленных антенн, таких как вертикальный монополяр, щелевые полуволновые антенны и зигзагообразная антенна (антенна Харченко или «Z-antenna»).

Представлена топология предложенной конструкции планарной широкополосной

двухкольцевой антенны и впервые приводятся частотные зависимости ее электродинамических характеристик. Представленные результаты основаны на корректном решении и анализе дифракционной задачи путем компьютерного моделирования.

Данную антенну можно отнести к классу широкополосных. Полоса рабочих частот, определяемая, как по КНД, так и по коэффициенту отражения на входе, содержит в себе одновременно все участки диапазонов стандартов мобильной связи 3G, 4G и намечающегося в перспективе 5G (3600 МГц, возможно и 6 ГГц), а также стандартов *IEEE 802.11n*, *IEEE 802.11ac* в современных мобильных терминалах и роутерах *WiFi*.

Широкополосные свойства этой антенны объясняются наличием в ее конструкции двух широких частично скрещенных планарных колец и относительно короткой узкой щели, которая возбуждается в центре области их пересечения. Такая особенность обеспечивает достаточно широкую полосу рабочих частот, как по характеристикам направленности, так и по входному импедансу. При этом антенна имеет значение входного сопротивления 50...60 Ом, которое может корректироваться путем изменения ширины щели и колец.

Наряду с широкополосностью, преимуществами такой антенны являются: повышенное значение КНД по сравнению с монополярными и дипольными проволочными конструкциями, а также несложная технология изготовления, дающая определенную выгоду при массовом производстве.

К дальнейшим направлениям исследований свойств таких антенн можно отнести исследование свойств антенных решеток на их основе.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Жук М.С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 648 с.
2. Z.N. Chen. Broadband planar inverted-L antennas / Chen Z.N., Chia M.Y.W. // IEE Proceedings. – Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 148, No. 5, October 2001. – P. 339 – 342.
3. Жук М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
4. Слюсар В. И. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги / В.И. Слюсар // Электроника: НТБ. – 2006. – № 7. – С.10–19.
5. Харченко К. П. УКВ антенны / Харченко К. П. – М.: ДОСААФ, 1969. – 113 с.
6. Цалиев Т.А. Кольцевая широкополосная планарная антенна / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2015, № 2. – С. 2-11. – Режим доступа: [www URL: https://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik\\_onat/article/view/897/894](https://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/897/894).
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Варакин Л.Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
8. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.

#### REFERENCES:

1. Zhuk M. S., Molochkov Yu. B. Planning of antenna-feeder devises. Moscow: "Energy", (1966).
2. Z. N. Chen. Chia M.Y.W. Broadband planar inverted-L antennas. IEE Proceedings. – Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 148, No. 5, October (2001).
3. Zhuk M.S., Molochkov Yu. Planning of lens, scanning, wide-range antennas and feeder devises Moscow: "Energy", (1973).
4. Slyusar V.I. 60 years of the theory of electrically small antennas. Some results. Electronics: NTB, No. 7, (2006).
5. Kharchenko K.P UHF antennas. Moscow: DOSAAF, (1969).
6. Tsaliyev T.A Circular broadband planar antenna. Odessa: Proceedings of O.S. Popov ONAS, No. 2, (2015).
7. Varakin L. E. Communication networks with the similar to noise signals. M.: "Radio and svyaz", (1985).
8. Bankov C. E., Kurushin A. A. Calculation of the radiated structures by means of FEKO. Moscow: JSC "NPP "Rodnik", (2008).

DOI 10.33243/2518-7139-2018-1-2-5-12