

УДК 621.396.677.3

ШИРОКОПОЛОСНАЯ КОЛЬЦЕВАЯ ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА

Цалиев Т.А.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

ШИРОКОСМУГОВА КІЛЬЦЕВА ЩІЛИННА АНТЕНА

Цалієв Т.А.

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

BROADBAND ANNULAR SLOT ANTENNA

Tsaliev T.A.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kurnechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрены свойства антенны в виде кругового щелевого кольца переменной ширины, прорезанного в плоском экране из хорошо проводящего материала. Внешний радиус щелевого кольца равен четверти длины волны принятой за основу для расчетов. На основе компьютерного моделирования рассчитаны и проанализированы частотные зависимости импеданса, коэффициента направленного действия, модуля коэффициента отражения и КСВ на входе антенн. Отмечены значительные преимущества рассмотренных антенн по отношению к прямоугольной полуволновой щели, которые заключаются в существенно более широкой полосе частот, в пределах которой изменения входного импеданса и КСВ незначительны.

Ключевые слова: широкополосность, щелевые антенны, входной импеданс, КНД, КСВ.

Анотація. Розглянуті властивості антени у вигляді колового щілинного кільця змінної ширини, прорізаного в плоскому екрані з добре провідного матеріалу. Зовнішній радіус щілинного кільця рівний чверті довжини хвилі, прийнятої за основу для розрахунків. На основі комп'ютерного моделювання розраховані й проаналізовані частотні залежності імпедансу, коефіцієнта спрямованої дії, модуля коефіцієнта відбиття й КСХ на вході антен. Відзначені значні переваги розглянутих антен стосовно прямокутної напівхвильової щілини, які полягають в істотно більш широкій смузі частот, у межах якої зміни вхідного імпедансу й КСХ незначні.

Ключові слова: широкосмуговість, щілинні антени, вхідний імпеданс, КСВ, КСХ.

Abstract. The properties of the antenna in the form of a circular ring of variable width slot cut into a flat screen made of highly conductive material. The outer radius of the ring slot is equal to a quarter wavelength adopted as the basis for calculations. On the basis of computer modeling the frequency dependence of the impedance, the directivity of, the module of the reflection coefficient and VSWR at the antenna was calculated and analyzed. Noting the significant advantages of the considered antenna relative to a half-wave of the rectangular slit, which are as much a wider frequency band within which changes the input impedance and VSWR are insignificant.

Key words: Broadband, slot antennas, input impedance, directivity, VSWR.

Антенны, обладающие широкой полосой рабочих частот, представляют особый интерес и, в частности, востребованы в системах с применением широкополосных сигналов [1]. Актуальность разработки новых конструкций и исследование характеристик

широкополосных антенных элементов во многом связана с успешным внедрением широкополосных беспроводных технологий.

Простейшими примерами щелевых излучателей могут служить прямоугольные или кольцевые щели, прорезанные в проводящих поверхностях. Маловыступающие и слабонаправленные излучатели в виде щелей, прорезанных в хорошо проводящем экране, могут применяться, например, в качестве элементов более сложных антенных устройств.

Конструктивные особенности щелевых антенн, а также их характеристики достаточно подробно описаны и исследованы [2-4]. Однако применение их для излучения и приема широкополосных сигналов весьма ограничено, вследствие того, что рабочая полоса частот (определяемая, в частности, по входному импедансу) составляет не более 10...15% от средней частоты выбранного диапазона.

В работе автора [5] были продемонстрированы преимущества в частотных свойствах антенных элементов в виде планарных кольцевых конструкций переменной ширины, выполненных из проводящего материала. Однако такие конструкции обладают и определенными недостатками: при их соединении с несимметричным фидером необходимо применять симметрирующие устройства, которые в большинстве своем весьма узкополосны.

Следует отметить, что до настоящего времени детально не были изучены электродинамические характеристики щелевых антенных элементов в виде кольцевой щели круговой формы с плавно изменяющейся шириной. Такие щелевые излучатели могут соединяться с источником или нагрузкой несимметричной (например, коаксиальной) линией. Соответственно при этом не требуются никакие симметрирующие устройства, ухудшающие их частотные свойства.

Следовательно, определение оптимальных конструктивных параметров и анализ свойств таких щелевых антенн, как потенциально обладающих более широким рабочим диапазоном частот, представляет научный и практический интерес.

Областью применения таких антенн, а также их возможных модификаций, в частности, могут быть терминалы разрабатываемых систем мобильной связи и передачи данных, а также разного рода антенные системы, в том числе антенные решетки, предназначенные для излучения или приема широкополосных сигналов.

Целью настоящей статьи является исследование и анализ частотных зависимостей электродинамических характеристик кольцевой щелевой широкополосной антенны (ША) с плавно изменяющейся шириной щели.

Для определения преимуществ и возможных недостатков этих антенн проведен ряд исследований, основанных на компьютерном моделировании в среде комплекса программ *FEKO* [6], и сравнении рассчитанных электродинамических характеристик с аналогичными характеристиками круговой щелевой эталонной антенны (ЭА) с неизменной шириной щели.

Геометрия антенных элементов. В рассматриваемых конструктивных вариантах исследуемые модели антенн представляют собой круговую щель, прорезанную в плоском бесконечно тонком идеально проводящем экране.

При этом ША (рис. 1, *a*) – это щелевое кольцо, образованное двумя окружностями. При этом радиус внешней окружности щели $R_1 = 0,25\lambda_0$, где λ_0 – расчетная длина волны, а радиус внутренней окружности $R_2 = \tau R_1$. Масштабный коэффициент τ определяет частотные и направленные свойства антенны ($\tau \cong 0,5...0,8$).

Центр малой окружности, ограничивающей щелевое кольцо изнутри, смещен относительно центра внешней окружности на расстояние $\Delta = R_1(1 - \tau) - \delta$, где δ – минимальная ширина щели (примерно 0,5... 3 мм).

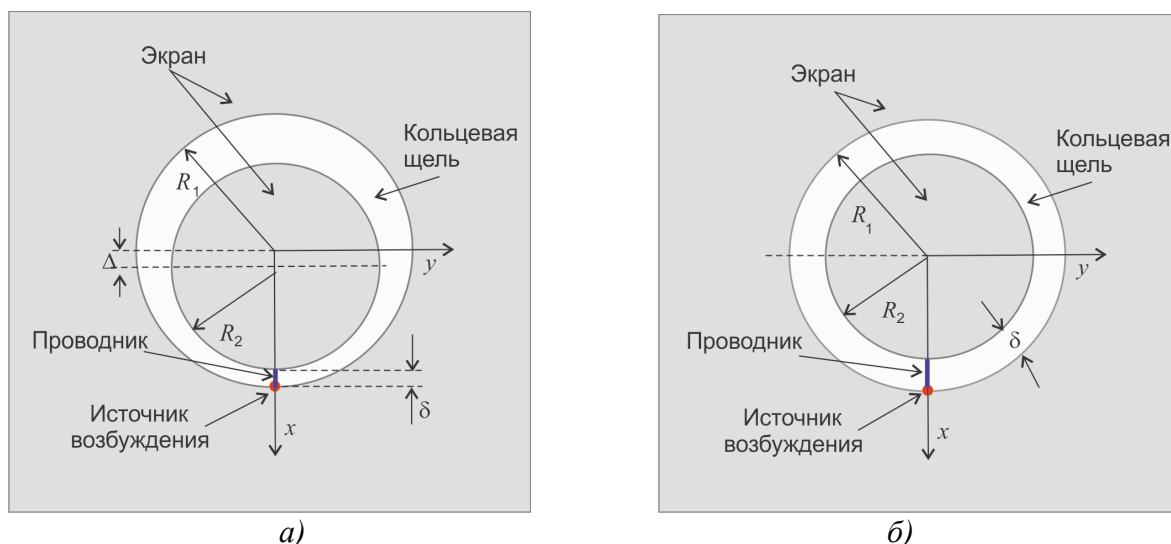


Рисунок 1 – Геометрическая конфигурация исследуемых моделей:
 а) кольцевая щель переменной ширины; б) кольцевая круговая щель

Там, где ширина щелевого кольца минимальна, к его краям с помощью проводника подключен источник возбуждения. Центры упомянутых выше окружностей, а также источник возбуждения, лежат на оси x .

Плоский проводящий экран имеет квадратную форму с размером стороны, равным λ_0 .

Для иллюстрации преимуществ щелевой ША в приводимом ниже сравнении характеристик в качестве эталонной выбрана круговая антенна того же размера, однако в ней центры внешней и внутренней окружностей кольца совмещены (рис. 1,б) и следовательно щель имеет постоянную ширину.

Методика исследования. Электродинамические характеристики представленных моделей щелевых антенн, приводимые далее, основаны на численном решении дифракционной задачи. Края щели, образованной экраном и проводящим диском, соединены тонким проводником, который возбуждается источником (рис. 1). Расчет всех характеристик исследуемых антенн выполнен на дискретных частотах, равномерно распределенных в диапазоне (1 ... 5) ГГц с интервалом 10 МГц.

При расчете характеристик антенн первоначально определялось амплитудно-фазовое распределение поверхностной плотности токов на проводящих элементах для последующего расчета частотных зависимостей входного импеданса, коэффициента стоячей волны, а также коэффициента направленного действия и диаграмм направленности.

В расчетном модуле программного комплекса для решения электродинамической задачи применялся метод моментов, при котором плоские поверхности заменяются совокупностью проволочных треугольных сегментов со сторонами, значительно меньшими минимальной длины волны, анализируемого диапазона частот. В данном случае максимальный размер сегментов был принят равным $\lambda_0 / 60$ (где λ_0 – расчетная длина волны, соответствующая частоте 1 ГГц).

Для оправданного выбора геометрических параметров исследуемых щелевых антенн, при которых достигаются наиболее приемлемые широкополосные свойства, был проведен ряд пробных расчетов, что позволило оценить достоверность и корректность получаемых результатов.

В результате численного моделирования в среде комплекса программ *FEKO* свойства широкополосной кольцевой щелевой антенны представлены характеристиками, расчет которых осуществлен для следующих геометрических параметров:

- $R_1 = 0,25\lambda_0$;
- $\tau = 0,75$;
- $\delta = 2$ мм.

Результаты численного моделирования. Приведенные ниже рисунки иллюстрируют необходимые для последующего сравнения и обсуждения частотные зависимости электродинамических характеристик ША и ЭА.

Особенностями, которые представляют интерес для сравнения частотных зависимостей входного импеданса ША и ЭА, являются положение областей резонанса и особенности вариации значений действительной (рис. 2, а) и мнимой (рис. 2, б) частей входного импеданса.

Цифры на рисунках обозначают принадлежность соответствующих им кривых следующим вариантам исследуемых антенн:

- 1 – щелевая широкополосная антенна (ША);
- 2 – щелевая эталонная антенна (ЭА), $\delta = 5$ мм.

Рассматривая представленную область частот 1...5 ГГц отметим, что на кривой частотной зависимости ЭА (2) наблюдаются множественные регулярно повторяющиеся резкие изменения значений активной и реактивной частей импеданса. При этом чередуются области резонансов ($\text{Im}\dot{Z} \cong 0$) «параллельного» и «последовательного» типов, аналогичных резонансам в колебательном контуре.

В отличие от этого, кривые, отображающие подобные зависимости для ША (1), более «сглажены», и в упомянутой области частот имеется один «параллельный» резонанс, где $\text{Re}\dot{Z} \cong 1500\text{ Ом}$ и область «последовательного» резонанса, в которой $\text{Re}\dot{Z}$ примерно равна 90 Ом. Пробные расчеты, выполненные за пределами указанного диапазона частот, показали, что на более высоких частотах вариации импеданса на входе ША малы.

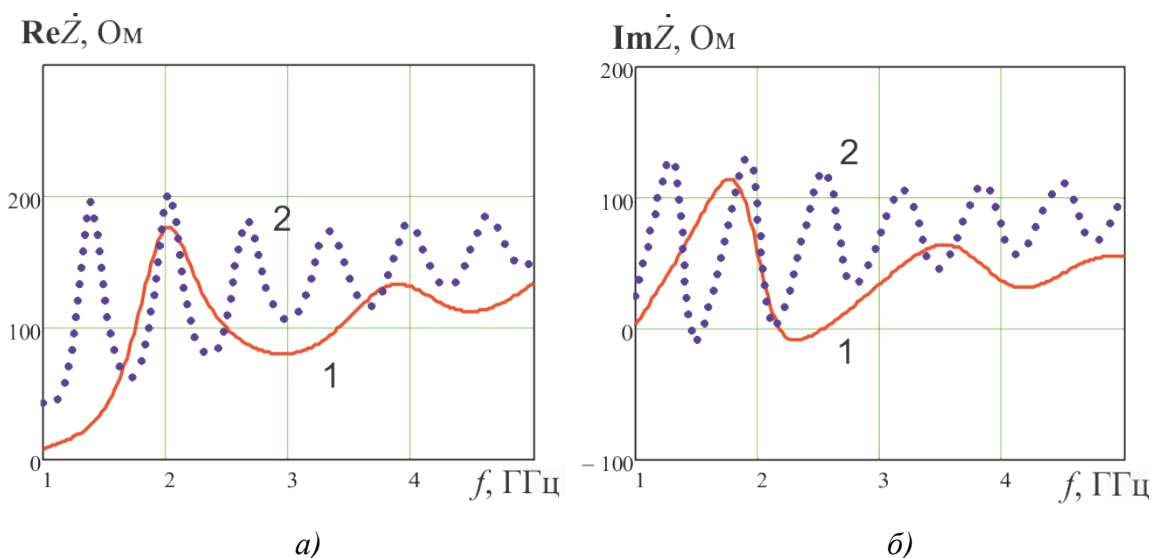


Рисунок 2 – Зависимости входного импеданса ША (1) и ЭА (2)

Следствием этого является более широкая полоса частот (при $\text{КСВ} < 2$), о чем свидетельствуют графики частотной зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ),

изображенные на рис. 3. При этих расчетах внутреннее сопротивление источника выбиралось равным 100 Ом для обеих антенн.

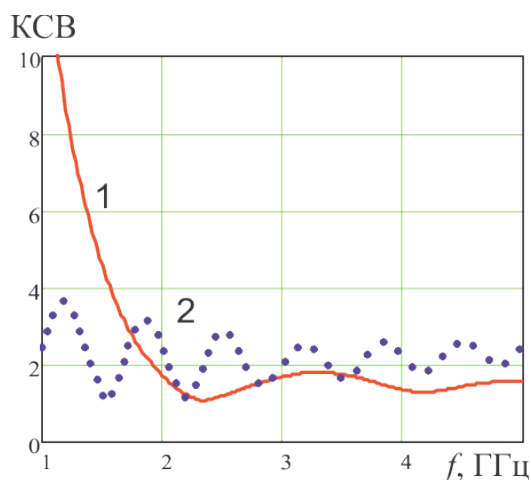


Рисунок 3 – Частотные зависимости КСВ:
1 – щелевая ША; 2 – щелевая ЭА

На графиках частотных зависимостей КСВ, изображенных на рис. 3 и построенных при чисто активном сопротивлении нагрузки, видно, что для ША (кривая 1 на рис. 3) при $КСВ \leq 2$ перекрытие по частоте $f_{max} / f_{min} > 2,5$.

Для сравнения на этом же рисунке приводятся аналогичные данные для щелевой ЭА (кривая 2), на которых можно видеть, что перекрытие по частоте в области первого резонанса при сопротивлении нагрузки не превышает 1,12.

Исходя из данных рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что полоса частот по входному импедансу щелевой антенны с переменной шириной кольца существенно превышает полосу частот щелевой ЭА.

Изменение направленных свойств антенн с частотой можно проанализировать рассмотрев диаграммы направленности (рис. 4).

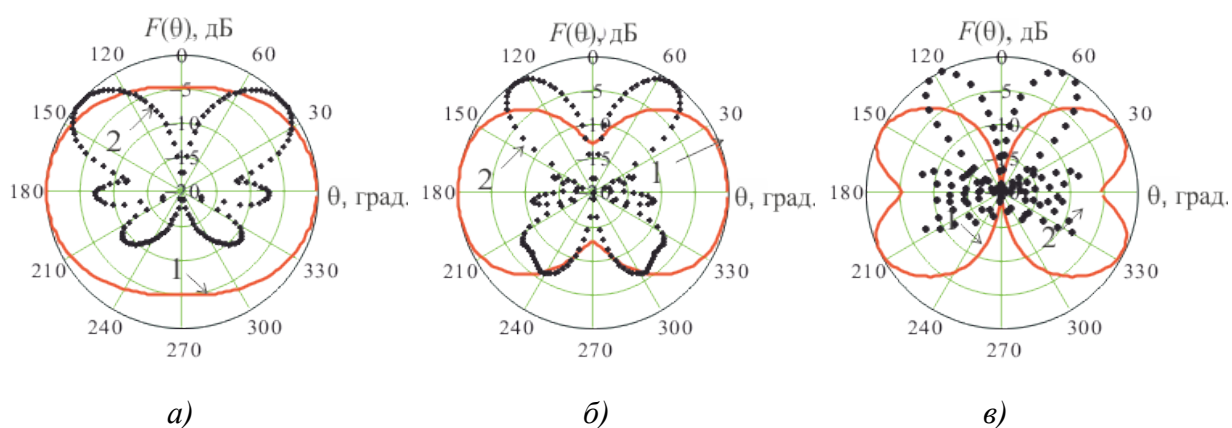


Рисунок 4 – Диаграммы направленности ША (1) и ЭА (2):
а) $f = 2$ ГГц; б) $f = 3$ ГГц; в) $f = 4$ ГГц.

Можно отметить, что диаграмма направленности (ДН) ША в плоскости xOz имеет широкий главный лепесток и симметрична относительно нормали, а ДН ЭА имеет много

боковых лепестков и ее главный лепесток отклонен от нормали на $45^\circ \dots 60^\circ$ (в зависимости от частоты).

Зависимости коэффициента направленного действия (КНД) исследованных моделей щелевых антенн от частоты показаны на рис. 5. На нем видно, что для ША перекрытие в полосе частот, где КНД превышает 3 дБ, составляет примерно 3,45 (кривая 1).

Для ЭА аналогичные зависимости КНД в направлении нормали отмечены на этом рисунке цифрой 2, а в направлении $\theta = 45^\circ$ – цифрой 3.

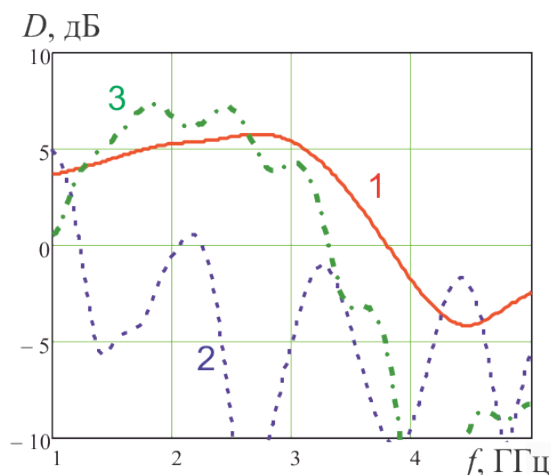


Рисунок 5 – Частотные зависимости КНД ША (1) и ЭА (2,3)

Из них следует, что излучение ЭА в направлении нормали (кривая 2) незначительно, перекрытие по частоте (при том же условии) составляет 2,5 (кривая 3) для КНД, определяемого для направления $\theta = 45^\circ$.

Падение КНД в данном направлении на частотах выше 3 ГГц происходит из-за того, что направление главного лепестка ДН при изменении частоты несколько меняется (см. рис. 4).

Следовательно, ША, имея более широкий главный лепесток ДН, а за счет этого несколько меньший КНД, обладает по сравнению с ЭА большей широкополосностью не только по входному импедансу, но и по свойствам направленности.

Выводы. Приводимые в статье результаты исследования основаны на численном решении дифракционной задачи, при котором в широкой полосе частот определяются амплитудно-фазовое распределение плотности токов на поверхности антенны, входной импеданс и ее поле излучения.

Рассчитаны, анализируются и сравниваются электродинамические характеристики двух щелевых кольцевых антенн: с переменной и постоянной шириной щели.

Отмечаются значительные преимущества ША по сравнению с ЭА, которые состоят в существенно более широкой полосе частот, в пределах которой входной импеданс и КСВ на входе антенны незначительно меняются. Так, по результатам расчетов для ША в полосе частот до 5 ГГц при $КСВ \leq 2$ $f_{\max} / f_{\min} > 2,5$. В то же время в частотной зависимости входного импеданса ЭА, имеющей щель фиксированной ширины, наблюдаются множественные осцилляции и резонансные области, где имеют место резкие изменения входного КСВ и ($f_{\max} / f_{\min} < 1,12$).

По свойствам направленности ША также обладает определенным преимуществом, которое в достаточной мере иллюстрируют графики рис. 4 и 5.

Можно также отметить, что с целью некоторого уменьшения габаритных размеров ША может принять эллиптическую форму. Однако, как показали расчеты, выполненные для планарных кольцевых антенных элементов [5], характеристики широкополосных антенн при круговой либо эллиптической форме отличаются незначительно.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Варакин Л.Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Жук М.С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков – М.-Л.: Энергия, 1966. – 648 с.
3. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / [Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский Г.Н.] – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 491 с.
4. Balanis C. A. Modern antenna handbook / Balanis C. A. – John Wiley & Sons, Canada, 2008. – 1680 с.
5. Цалиев Т.А. Кольцевая широкополосная планарная антенна / Цалиев Т.А. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2015. – № 2. – С. 5–11. – Режим доступа: [www. URL: http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/issue/view/23](http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/issue/view/23)
6. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. - М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.

REFERENCES:

1. Varakin L.E. Communication networks with the similar to noise signals. M.: "Radio and connection", (1985).
2. Zhuk M.S., Molochkov Yu. B. Planning of antenna-feeder devises. Moscow: "Energy", (1966).
3. Yerokhin G.A., Chernyshov O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhevsky G. N. Antenna-feeder devices and distribution of radio waves. Moscow: "Hot line–Telecom", (2004).
4. Balanis C. A. Modern antenna handbook. Canada: John Wiley & Sons, (2008).
5. Tsaliev T.A. Ring broadband planar antenna. Odessa: Pros. of the O.S. Popov ONAT, (2015), № 2. [www. URL: http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/issue/view/23](http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/issue/view/23).
6. Bankov C.E., Kurushin A.A. Calculation of the radiated structures by means of FEKO. Moscow: JSC "NPP " Rodnik", (2008).