

УДК 621.396.677.8

## **ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПЛАНАРНАЯ СПИРАЛЬНО-КОЛЬЦЕВАЯ АНТЕННА**

*Цалиев Т.А., Куцук К.В., Сидень С.В.*

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

## **ШИРОКОСМУГОВА ПЛАНАРНА СПИРАЛЬНО-КІЛЬЦЕВА АНТЕНА**

*Цалієв Т.А., Куцук К.В., Сідень С.В.*

*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)*

## **BROADBAND PLANAR SPIRAL-RING ANTENNA**

*Tsaliev T.A., Kutsuk K.V., Siden S.V.*

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

**Аннотация.** В статье описана топология слабонаправленной планарной антенны круговой поляризации и исследованы ее свойства. Конструктивной особенностью ее является то, что антенна выполнена в виде планарного кольца переменной ширины, во внутреннюю область которого помещена плоская однозаходная спираль Архимеда, с малым числом витков. На основе компьютерного моделирования проведен анализ частотных зависимостей коэффициента направленного действия (КНД), входного импеданса и коэффициента стоячей волны (КСВ) при различном соотношении радиусов кольца и спирали, а также количества витков. Построены диаграммы направленности и рассмотрены направленные свойства таких антенн. Основным преимуществом предложенных в статье конструктивных решений, наряду с планарной конструкцией антенн и удобством возбуждения несимметричной (например, коаксиальной линией), является широкая полоса рабочих частот, определяемая по уровню КСВ $<2$ .

**Ключевые слова:** планарная антенна, круговая поляризация, широкополосность, входной импеданс, КНД, КСВ.

**Анотація.** У статті описана топологія слабоспрямованої планарної антени колової поляризації й досліджені її властивості. Конструктивною особливістю її є те, що антена виконана у вигляді планарного кільця перемінної ширини, у внутрішню область якого поміщена плоска однозахідна спіраль Архімеда, з малим числом витків. На основі комп'ютерного моделювання проведено аналіз частотних залежностей коефіцієнта спрямованої дії (КСД), вхідного імпедансу й коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) за різним співвідношенням радіусів кільця й спирали, а також кількості витків. Побудовані діаграми спрямованості й розглянуті спрямовані властивості таких антен. Основною перевагою запропонованих у статті конструктивних рішень, поряд із планарною конструкцією антен і зручністю збудження несиметричної (наприклад, коаксіальною лінією), є широка смуга робочих частот, визначується за рівнем КСХ $<2$ .

**Ключові слова:** планарна антена, колова поляризація, широкосмуговість, вхідний імпеданс, КСД, КСХ.

**Abstract.** The article describes the topology of omnidirectional planar antenna with circular polarization and studied its properties. Design feature is that the antenna is a planar ring of variable width, the interior of which is placed a single-pass flat Archimedes spiral, with a small number of turns. On the basis of computer simulation analysis of the frequency dependence of the coefficient of directed action (CPV), input impedance and standing wave ratio (VSWR) at various ratios of radii of rings and spirals, as

well as the number of turns. Shown directional pattern and considered directional properties of antennas. The main advantage of the proposed article design solutions, along with the planar antenna design and ease of cart-excitation asymmetrical (for example, a coaxial line), is a broad band of operating frequencies, which is determined by the level of VSWR <2.

**Key word:** planar antenna, circular polarization, broadband, input impedance, directivity, VSWR.

Постоянное совершенствование характеристик радиосредств приводит к необходимости решения ряда актуальных проблем, в том числе касающихся антенн, которые являются важным элементом радиосистем различного назначения. В число таких проблем, в частности, входят требования к широкополосности, как по свойствам направленности, так и по согласованию с нагрузкой.

Как известно [1,2], наиболее распространенный тип антенн, обладающих широкополосными свойствами – это спиральные антенны. Такие антенны обладают свойством излучать (и принимать) поле круговой поляризации в направлении главного лепестка своей диаграммы направленности (ДН). Среди многочисленных разновидностей спиральных антенн можно выделить те, основой которых являются планарные конструкции излучающих элементов: логопериодических либо архимедовых спиралей (для краткости – АС). В большинстве своем это двухзаходные АС (две расходящиеся ветви которых, выполнены из цилиндрического или плоского проводника), возбуждаемые источником, находящимся в области центра спирали.

Известны два способа возбуждения таких антенн (рис. 1). Один из них – противофазный, где источником возбуждения, например, служит симметричная двухпроводная линия (рис. 1,а). Другой – синфазный, где обе ветви (либо одна, как показано на рис. 1,б) соединены с центральным проводником коаксиальной линии питания, а ее внешняя оболочка – с плоским металлическим диском малого диаметра, находящимся на небольшом расстоянии от плоскости спирали [3,4]. При соединении таких антенн с фидером необходимо предусмотреть применение симметрирующих либо согласующих устройств (возможно – трансформаторов), которые увеличат размеры поперечного сечения антенны (следовательно подобные антенны теряют свойство планарности), а наличие симметрирующих устройств из-за их узкополосности существенно сужает полосу рабочих частот всей антенны.

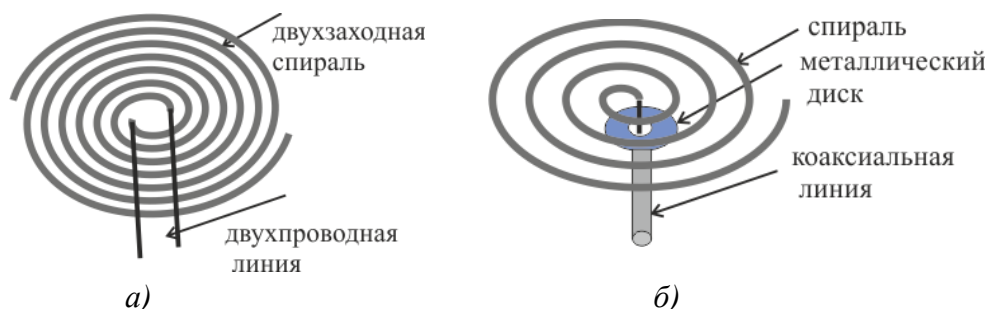


Рисунок 1 – Антенные элементы на основе плоских архимедовых спиралей

Представленная далее спирально-кольцевая конструкция антенны, наряду с ее планарной формой, обладает широкополосными свойствами, как по КСВ, так и по КНД. Однако до настоящего времени электродинамические характеристики таких антенны или образованных на их основе более сложных систем не изучались.

**Цель данной статьи** состоит в представлении новой антенны круговой поляризации, созданной на основе спирально-кольцевой топологии, выборе лучших (с точки зрения широкополосных свойств) геометрических параметров на основе анализа электродинамических характеристик такой антенны путем компьютерного моделирования.

**Геометрические параметры спирально-кольцевой антенны.** На рис. 2,а представлена топология планарной спирально-кольцевой антенны (СКА). Основными элементами ее конструкции, выполненными из хорошо проводящего материала, являются: планарное кольцо, имеющее переменную ширину, и плоская однозаходная АС, помещенная во внутренней области кольца. Радиусы внешней окружности кольца ( $R_1$ ) и его внутренней окружности ( $R_2$ ) связаны соотношением  $R_2 = mR_1$ , где  $m = 0,75$  – масштабный коэффициент. Взаимное расположение всех окружностей, образующих топологию антенны, схематически показано на рис. 2,б.

Отметим, что центр внутренней окружности кольца смещен так, что минимальное расстояние  $t$  между внутренним и внешним краем кольца составляет 2 мм. Планарный спиральный элемент, с начальным радиусом  $R_{\min}$  и конечным (максимальным) радиусом  $R_{\max}$ , выполнен из плоской ленты шириной  $t_s = 1$  мм.

Возбуждение антенны, образованной кольцом и спиралью, может осуществляться несимметричной линией, которая включена в точках «а-а» (например, коаксиальной линией, где центральный проводник подсоединен к концу наибольшего витка спирали, а внешняя оболочка – к ближайшему краю планарного кольца). Расстояние между этими точками подобно ширине ленты спирали, количество витков которой выбирается сравнительно небольшим.

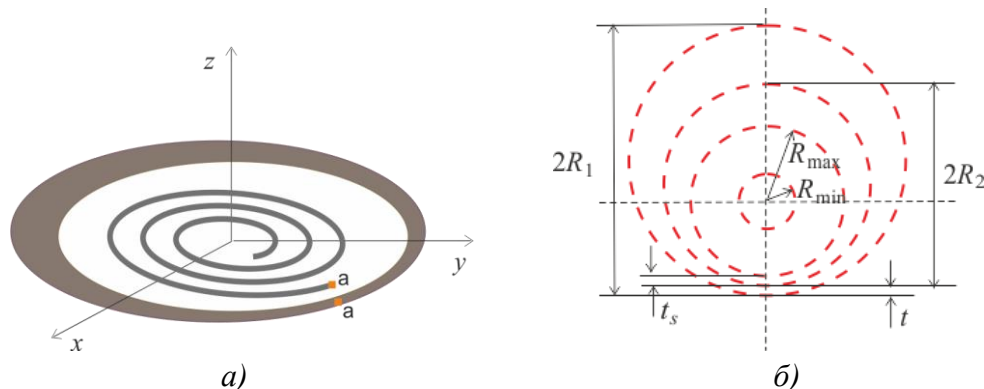


Рисунок 2 – Конструктивные особенности спирально-кольцевой антенны

Для проведения исследований и анализа характеристик СКА были выбраны модели с такими геометрическими параметрами:

- внешний радиус кольца  $R_1 = 0,25\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны на частоте  $f_0 = 2$  ГГц);
- внутренний радиус кольца  $R_2 = mR_1$ ;
- максимальный радиус спирали  $R_{\max} = 0,85R_2$ ;
- минимальный радиус спирали  $R_{\min} = 10$  мм;
- минимальная ширина кольца  $t = 2$  мм;
- расстояние между точками питания «а-а»  $t_s = 1$  мм;
- количество витков  $1,25 \leq n \leq 2$ .

После нескольких проб выбран масштабный коэффициент (определяющий форму планарного кольца)  $m = 0,75$  и анализировались характеристики модели СКА при разном количестве витков спирали и нескольких вариантах конструктивного выполнения спирального элемента в антенне с:

- постоянной шириной ленты,  $t_s = 1$  мм;
- переменной шириной ленты,  $1 \leq t_s \leq 3$  мм;
- переменной шириной ленты,  $1 \leq t_s \leq 5$  мм.

Согласно алгоритму численного моделирования изначально решалась задача определения амплитудно-фазового распределения (АФР) плотности токов на поверхности антенны. Найденное АФР далее позволило рассчитать частотные зависимости входного импеданса, коэффициента стоячей волны и модуля коэффициента отражения на входе антенны, а также коэффициента направленного действия.

В результате многократных пробных расчетов приняты такие сочетания геометрических параметров (топология) исследуемой антенны, при которых достигается наилучшая широкополосность, как по импедансу и коэффициенту отражения на входе антенны, так и по коэффициенту направленного действия.

**Результаты компьютерного моделирования.** На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента направленного действия исследуемых моделей СКА при постоянной (рис. 3, а) и переменной (рис. 3, б и в) ширине ленты спирали. Заметим, что при правовинтовой намотке спирали поле, излучаемое СКА в направлении оси  $z$ , имеет преимущественно левую круговую поляризацию, поскольку ее возбуждение осуществляется с наибольшего витка.

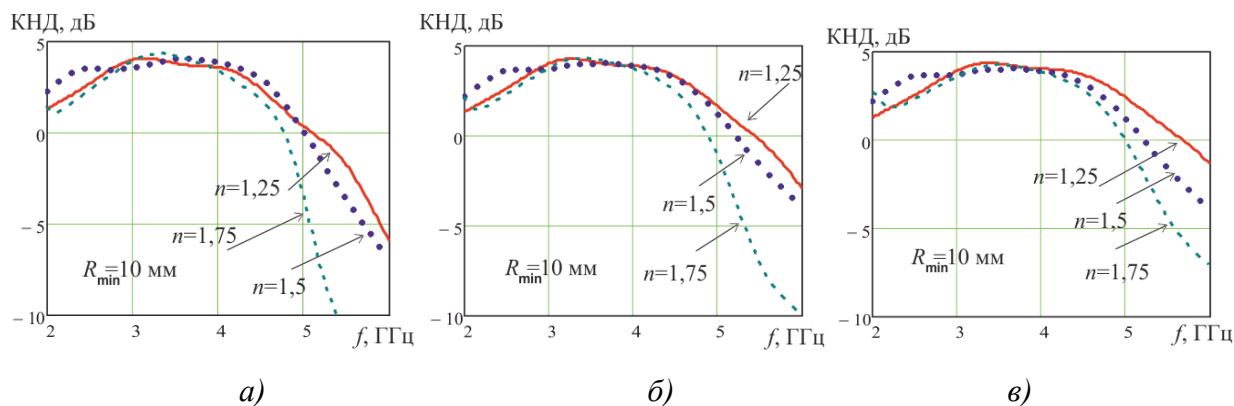


Рисунок 3 – КНД антенн при разной ширине ленты спирали:

а)  $t_s = 1$  мм; б)  $1 \leq t_s \leq 3$  мм; в)  $1 \leq t_s \leq 5$  мм

На этом и других приводимых далее рисунках минимальная ширина ленты ( $t_s = 1$  мм) соответствует конечному участку спирали (точке питания), а максимальная ( $t_s = 3$  либо 5 мм) – начальному участку (центру спирали).

Анализируя зависимости КНД в рассматриваемом диапазоне частот, приведенные на рис. 3, можно отметить следующее:

- значение КНД на среднем участке частотного диапазона практически не зависит от количества витков спирали;

- увеличение количества витков и, соответственно, рост плотности намотки спирали, приводит к более резкому снижению КНД в области высоких частот;
- если лента ширина спирали имеет переменную ширину, то это способствует росту КНД в области высоких частот.

На основе проведенных расчетов и графиков, изображенных на рис. 3, в табл. 1 сведены данные о коэффициенте перекрытия рабочего диапазона по КНД ( $k_D$ ), определенного на уровне  $-3$  дБ относительно его максимального значения ( $D_{\max}$ ). Здесь же для сравнения приводятся аналогичные данные для антенны на основе однозаходной архимедовой спирали, образованной из 5-ти витков с равномерной намоткой (рис. 1, б). Эта спираль также с праввинтовой намоткой, однако в направлении оси  $z$  она излучает поле преимущественно правой круговой поляризации, поскольку возбуждается в центре.

Таблица 1 – Коэффициент перекрытия рабочего диапазона по КНД

Тип антенны	$n$	1,25	1,5	1,5	2,0	$D_{\max}$ , дБ
	$t_s$ , мм	Коэффициент перекрытия, $k_D$				
Спирально-кольцевая	1,0	2,41	<b>2,37</b>	2,1	2,15	4,35
	1 ... 3	2,55	2,61	2,3	2,11	4,3
	1 ... 5	<b>2,85</b>	2,76	2,41	2,15	4,26
Однозаходная АС	$n = 5; t_s = 1$ мм		$k_D = 2,81$			4,0

Видно, что выбор определенного сочетания геометрических параметров спирали дает возможность улучшения ее широкополосных свойств, определяемых по КНД.

Другой важной характеристикой антенны, указывающей на ее широкополосные свойства, является частотная зависимость коэффициента стоячей волны на входе. Рис. 4 иллюстрирует частотные зависимости КСВ на входе СКА нагруженной на активное сопротивление 200 Ом. (В большей части рассматриваемого диапазона частот действительная часть входного импеданса СКА близка к значению 200 Ом).

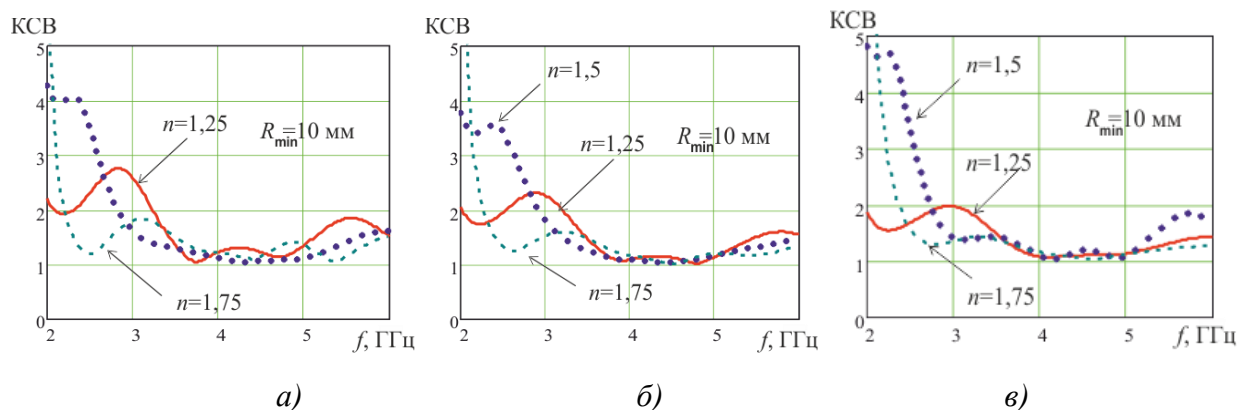


Рисунок 4 – КСВ на входе СКА при разной ширине ленты спирали:

а)  $t_s = 1$  мм; б)  $1 \leq t_s \leq 3$  мм; в)  $1 \leq t_s \leq 5$  мм

Сравнивая зависимости, представленные на рис. 4, можно отметить, что при  $n \geq 1,5$  в большей части диапазона частот  $KCB \leq 2$  и среднее значение  $KCB$  примерно равно 1,3.

На рис. 5 изображены частотные зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) для СКА с постоянной шириной ленты и разным числом витков, там же показана аналогичная зависимость для антенны выполненной на основе пятивитковой однозаходной АС, нагруженной на сопротивление 100 Ом.

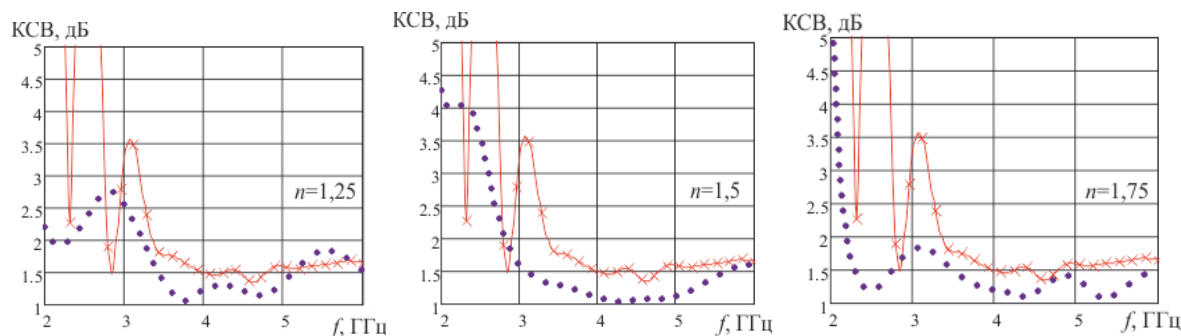


Рисунок 5 – КСВ на входе СКА (•••) и АС (х-х-х) при  $t_s = 1$  мм

Анализируя кривую, отображающую частотную зависимость КСВ на входе АС, принятой для сравнения, видим заметные резонансные осцилляции в низкочастотной области, которые сглаживаются при возрастании частоты и КСВ изменяясь колеблется вокруг значения 1,6. На этих графиках преимущество СКА особенно заметно в области низких частот, где практически нет резких скачков и осцилляций КСВ, обусловленных отражениями в области внешних витков АС.

Все рассмотренные в данной статье конструктивные варианты СКА по сравнению с АС тех же размеров обладают более широкой полосой частот, отсчитываемой по уровню  $KCB \leq 2$ . Об этом же свидетельствуют данные, касающиеся коэффициента перекрытия рабочего диапазона ( $k_{VSWR} = f_{max} / f_{min}$ ), приведенные в табл. 2. Видно, что максимальное значение  $k_{VSWR}$  имеют модели антенны, спираль которых состоит из 1,75 или 2 витков.

Таблица 2 – Коэффициент перекрытия рабочего диапазона по КСВ

Тип антенны	$n$	1,25	1,5	1,75	2,0
	$t_s$ , мм	Коэффициент перекрытия, $k_{VSWR}$			
Спирально-кольцевая	1,0	1,85	2,19	<b>2,73</b>	1,63
	1 ... 3	1,85	2,08	2,63	<b>2,75</b>
	1 ... 5	1,85	1,9	2,52	2,7
Однозаходная АС	$n = 5; t = 1$ мм		$k_{VSWR} = 1,79$		



Положительные свойства СКА также отображает значение  $f_{\min}$ , соответствующее нижней границе полосы частот, в которой  $KCB \leq 2$  (табл. 3).

Таблица 3 – Нижняя граница рабочего диапазона

Тип антенны	$n$	1,25	1,5	1,75	2,0
	$t_s$ , мм	Нижняя граница полосы частот $f_{\min}$ , ГГц			
Спирально-кольцевая	1,0	3,24	2,74	2,2	3,0
	1 ... 3	3,24	2,88	2,28	2,18
	1 ... 5	3,24	3,16	2,38	2,22
Однозаходная АС	$n = 5; t_s = 1$ мм		$f_{\min} = 3,36$ ГГц		

Приведенные в этой таблице значения  $f_{\min}$  свидетельствуют также о том, что при одинаковом размере спирали СКА обладает лучшими свойствами в области низких частот рассмотренного диапазона по сравнению с однозаходной АС.

Различия в характере изменений частотной зависимости входного импеданса при разной ширине ленты спирали СКА можно наблюдать на графиках, изображенных на рис. 6.

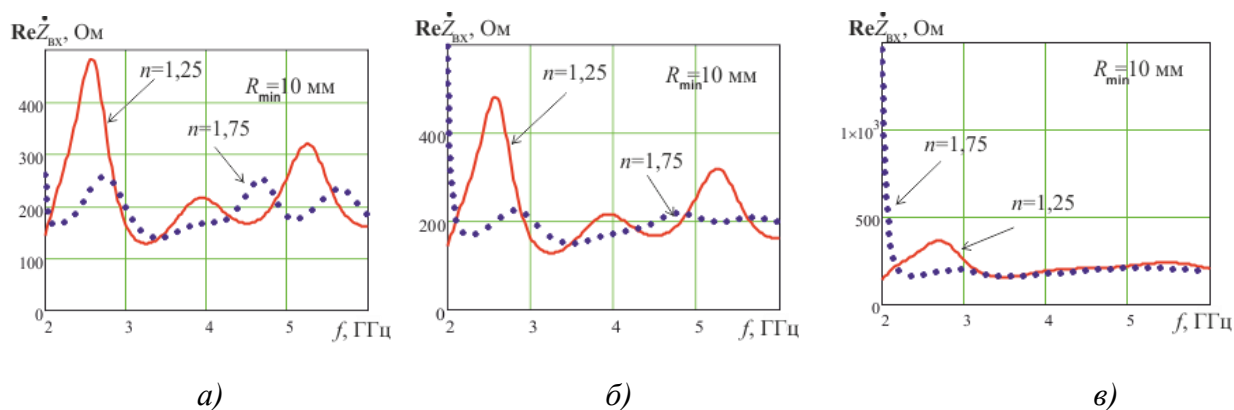


Рисунок 6 – Сравнение частотной зависимости  $Re \dot{Z}_{вх}$  при разной ширине ленты спирали:

а)  $t_s = 1$  мм; б)  $1 \leq t_s \leq 3$  мм; в)  $1 \leq t_s \leq 5$  мм

Основываясь на этих графиках и проведенных расчетах, можно утверждать, что плавное увеличение ширины ленты спирали ведет к выравниванию частотных зависимостей  $Re \dot{Z}_{вх}$  (а также  $Im \dot{Z}_{вх}$ ) на входе СКА и улучшает согласование в более широкой полосе частот.

На рис. 7 приведены диаграммы направленности, нормированные по полю левой круговой поляризации, которые позволяют оценить влияние количества витков спирали СКА на ее свойства направленности.

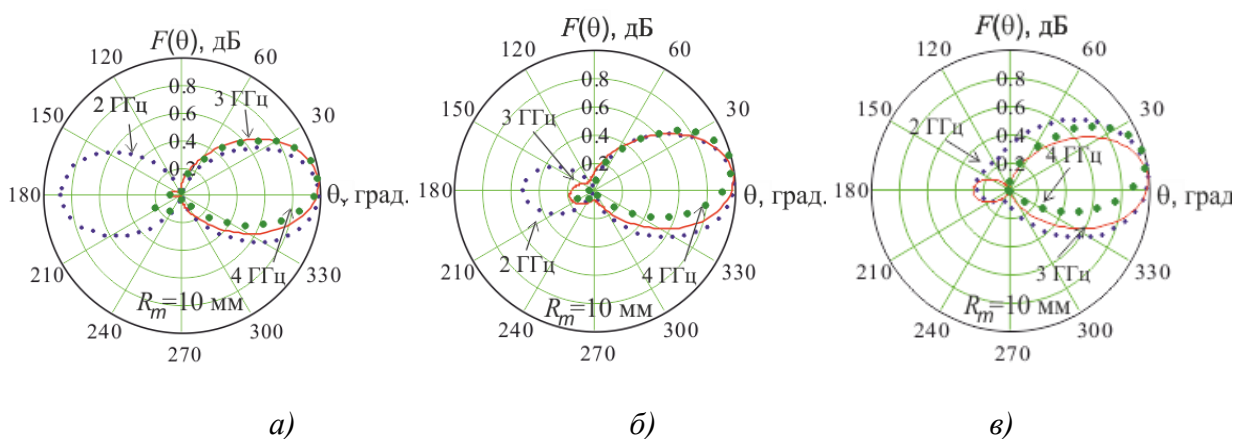


Рисунок 7 – Диаграммы направленности СКА при  $1 \leq t \leq 5$ :

а) – 1,25 витка; б) – 1,5 витка; в) – 1,75 витка

Видно, что на частоте 2 ГГц (нижний край рассматриваемого диапазона) при 1,25 витках излучение СКА в прямом и обратном направлении практически одинаково (поляризация эллиптическая, близкая к линейной). При увеличении числа витков до 1,5 или 1,75 уровень излучения составляющей поля с левой круговой поляризацией в обратном направлении ( $\theta = 180^\circ$ ) заметно падает и становится таким же как и на средней частоте диапазона.

Изменение количества витков спирали СКА приводит к небольшим отклонениям оси главного лепестка ДН от нормали и для слабонаправленных антенн этот эффект существенной роли не играет.

В статье рассмотрены топологические свойства СКА и даны результаты исследования ее электродинамических характеристик, основанных на численном моделировании и корректном решении дифракционной задачи. Проанализированы характеристики планарной спирально-кольцевой антенны, которые сравниваются с аналогичными характеристиками антенны в виде однозаходной архимедовой спирали, возбуждаемой коаксиальной линией.

Исследованы два варианта конструктивного исполнения СКА: с неизменной шириной ленты спирали и с изменяющейся (возрастающей от края к центру) шириной. Показано, что СКА обладает широкополосностью определяемой как по свойствам направленности, так и по КСВ на ее входе. Такие свойства СКА определяются, в частности, ее конструкцией, особенность которой заключается в том, что для питания этой антенны, осуществляемого несимметричной линией, не требуется специальное симметрирующее устройство, которое могло бы существенно ухудшить ее диапазонные свойства. Тот факт, что сама антенна и ее линия питания могут лежать в одной плоскости способствует применению СКА в качестве элемента планарных антенных решеток. При этом относительно высокое входное сопротивление (200 Ом) упрощает сочетание этих элементов в решетках с параллельной схемой питания.

Широкая полоса рабочих частот СКА, определяемая как по направленным свойствам, так и по входному импедансу, является следствием того, что в одной конструкции объединены планарное кольцо переменной ширины и смещенная относительно центра кольца однозаходная спираль с небольшим числом витков.

Основываясь на приведенных выше результатах можно указать возможные направления последующих исследований: это оптимизация геометрических параметров СКА с целью дальнейшего улучшения широкополосности, а также исследования характеристик антенных решеток образованных на основе СКА.



ЛИТЕРАТУРА:

1. Balanis C. A. Modern antenna handbook / C. A. Balanis. – John Wiley & Sons, Canada, 2008. – 1680 с.
2. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник [для вузов] / Г.А. Ерохин [и др.]; под ред. Г.А. Ерохина. – М.: Радио и связь, 1996. – 352 с.
3. Жук М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
4. Джонс Дж. П., Тэйлор П. Е, Морроу С. В. Спиральная малогабаритная антенна, работающая при большой мощности: в сб. Сверхширокополосные антенны; пер. англ.; под.ред к.т.н. Л.С. Бененсона Дж. П. Джонс. – М.: Мир, 1964. – 416 с.
5. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.

REFERENCES:

1. Balanis C. A. Modern antenna handbook. Canada: John Wiley & Sons, (2008).
2. Erokhin G.A. [et al.] Antenna-feeder devices and Propagation of radio waves. – M.: "Radio and Communications", (1996).
3. Zhuk M.S., Molochkov Y.B. Designing of lens, scanning, wide-band antennas and feeders. – M.: "Energy", (1973).
4. Jones. J. P., Taylor P.E, Morrow S.V. Spiral small antennas operating at high power: The collection "Ultra-wideband antennas". – M.: "Mir", (1964).
5. Bankov S.E., Kurushin A.A. Calculation of emitting structures using FEKO. M.: ZAO NPP "Rodnik", (2008).