

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЛОСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН**

**ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЛОСКО-ЦИЛІНДРИЧНИХ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН**

**THE NUMERICAL ANALYSIS OF CHARACTERISTICS
PLANAR-CYLINDRICAL HELIX ANTENNAS**

Аннотация. Предложена новая конструкция антенны круговой поляризации в виде комбинации плоской спирали Архимеда и короткой по сравнению с максимальной длиной волны рабочего диапазона цилиндрической спирали. Приведены и обсуждаются результаты численного моделирования характеристик такой антенны и сравнение их с аналогичными характеристиками плоской спирали с экраном и без него. Показано, что плоско-цилиндрические спиральные антенны, обеспечивая однонаправленное излучение, обладают (при аналогичных габаритных размерах) улучшенными частотными свойствами как по входному сопротивлению, так и по коэффициенту усиления по сравнению с плоской спиралью

Анотація. Запропонована нова конструкція антени кругової поляризації у вигляді комбінації плоскої спіралі Архімеда й короткої порівняно з максимальною довжиною хвилі робочого діапазону циліндричної спіралі. Наведені й обговорюються результати чисельного моделювання характеристик такої антени й порівняння їх з аналогічними характеристиками плоскої спіралі з екраном і без нього. Показано, що плоско-циліндричні спіральні антени забезпечуючи односпрямоване випромінювання, мають (при аналогічних габаритних розмірах) поліпшені частотні властивості, як за вхідним опором, так і за коефіцієнтом посилення порівняно з плоскою спіраллю.

Summary. The new design of the antenna of circular polarization as a combination of flat Archimedean spiral and short in comparison with the maximal wavelength of a working range of a cylindrical spiral. Results of numerical modeling of characteristics of such aerial and their comparison with similar characteristics of a flat spiral with the screen and without it are resulted and are discussed. It is shown, that planar-cylindrical spiral aeriels providing the unidirectional radiation, possess (at similar overall dimensions) the improved frequency properties, both on input impedance, and on gain in comparison with a flat spiral

Создание новых конструкций антенных устройств с улучшенными характеристиками, основанное на исследовании их электродинамических параметров и свойств, является одной из основных проблем, встречающихся в процессе разработки и практического применения радиоэлектронных средств и систем различного назначения.

Одним из наиболее распространенных типов широкополосных антенн, обеспечивающих прием и излучение волн с круговой, эллиптической и управляемой поляризацией, являются разнообразные конструкции антенн в виде нерегулярных спиральных систем, отличающиеся, в частности, формой поверхности, способом намотки, числом заходов [1].

Различные типы спиральных антенн различаются по габаритам. Минимальные продольные размеры имеют плоские спиральные антенны, такие, как антенны с постоянным шагом намотки спирали, так называемые «архимедовы» спирали (рис. 1, а), которые относятся к нерегулярным спиральным системам [1].

Диаграмма направленности (ДН) плоских спиральных антенн содержит два взаимно противоположных по направлению главных лепестка, что является определенным недостатком. Устраняют этот недостаток, дополняя конструкцию антенны плоским проводящим экраном, расположенным на определенном расстоянии параллельно плоскости спирали (рис. 1, б, в), что неизбежно ухудшает частотные свойства антенны и приводит к некоторому увеличению ее продольного и поперечного (вследствие необходимости применения экрана, размеры которого превышают размер спирали, рис. 1, в) – габаритных размеров.

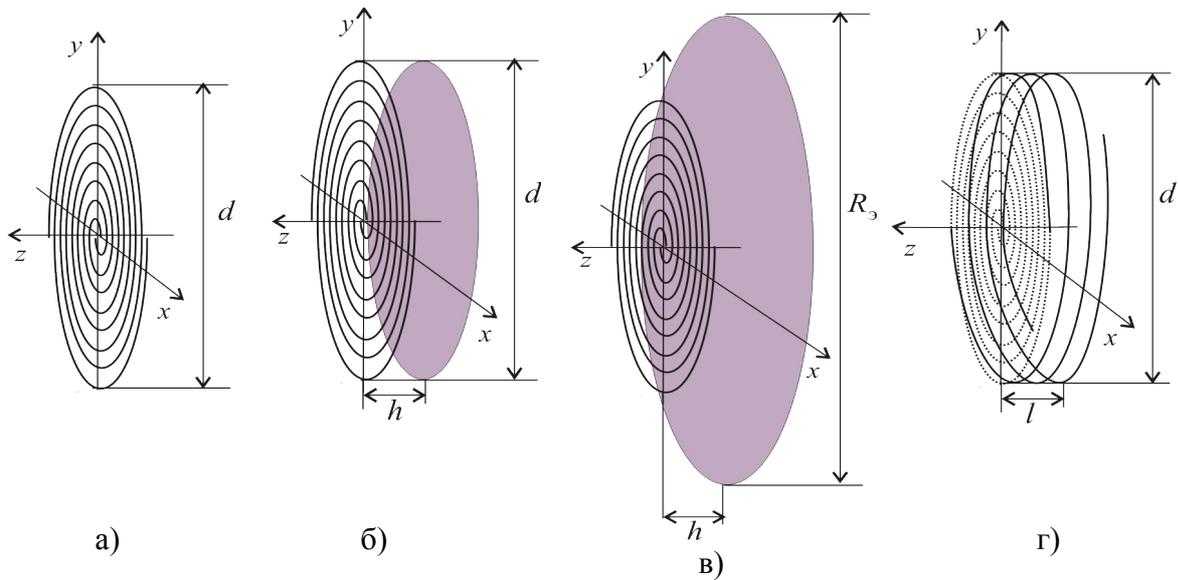


Рисунок 1 – Геометрическая конфигурация рассматриваемых антенн

Анализ характеристик проволочных спиральных антенн, основанный на строгих аналитических методах, сопряжен с существенными трудностями математического характера, что приводит к необходимости использования иных электродинамически корректных процедур.

Поэтому в последние десятилетия в процессе анализа пространственных и импедансных характеристик антенн и антенных систем все шире используются процедуры компьютерного моделирования с применением адекватных численных методов решения электродинамических задач.

Так, в частности, при анализе характеристик антенн широко используется метод интегральных уравнений, для решения которых применяется метод моментов (иногда его называют методом Галеркина или Бубнова-Галеркина) [2]. Например, численный алгоритм этого метода реализован в качестве базового в пакете компьютерных программ FEKO [3] для анализа характеристик различного рода проволочных антенн.

Однако к настоящему времени не изучены электродинамические характеристики антенн, излучающий элемент которой сочетает в своей конструкции плоскую и цилиндрическую спирали.

Целью данной работы является исследование направленных и импедансных свойств новой конструкции плоско-цилиндрической спиральной антенны (рис. 1, з).

1. Методика решения задачи. В процессе проведенных расчетов исследовались характеристики нескольких разновидностей антенн, конструктивные особенности которых и расположение их в системе координат изображены на рис. 1.

В основе всех этих конструкций находится основной излучающий элемент в виде двухзаходной плоской архимедовой спирали противофазного возбуждения (рис. 1, а), помещенной в однородную безграничную изотропную среду с параметрами ϵ_0, μ_0 . Каждое плечо такой спирали состоит из пяти витков цилиндрического проводника радиусом $r = 0,15$ мм, при этом минимальный радиус спирали $R_{\min} = 0,5$ мм, максимальный радиус $R_{\max} = d/2 = 6$ мм.

Для обеспечения однонаправленного излучения такая спираль может дополняться плоским круговым экраном, ориентированным параллельно плоскости спирали, который располагается на расстоянии $0,125\lambda_0 \leq h \leq 0,25\lambda_0$ от нее (λ_0 – расчетная длина волны, соответствующая частоте $f_0 = 10$ ГГц). Радиус экрана R_3 для первого конструктивного варианта антенны выбирался равным R_{\max} (рис. 1, б), для второго варианта – равным $1,5R_{\max}$ (рис. 1, в).

Особенность конструкции антенны в виде плоскоцилиндрической спирали, для удобства назовем ее «*plc-спираль*» (рис. 1, з), состоит в том, что вместо экрана основная плоская спираль дополняется элементом в виде цилиндрической двухзаходной спирали, также образованной проводниками радиусом $r = 0,15$ мм, которые являются продолжением ветвей плоской спирали и повторяют

направление их разворота. Диаметр d цилиндрической спирали равен $2R_{\max}$, продольный ее размер l и шаг s в процессе расчетов изменялись в пределах $0,1\lambda_0 \leq l \leq 0,2\lambda_0$ и $0,025\lambda_0 \leq s \leq 0,05\lambda_0$.

Отметим, что используемый в процессе данных исследований метод моментов предусматривает создание сетки (mesh) путем разбиения линейных и плоских проводящих элементов на малые по сравнению с длиной волны сегменты и аппроксимацию электрического тока в пределах таких сегментов с последующим решением системы линейных алгебраических уравнений.

Причем точность метода тем выше, чем меньше размер Δ сегмента разбиения. Обычно считается, что для получения приемлемой точности этот размер должен удовлетворять условию $\Delta < \lambda / 10$, где λ – длина волны в свободном пространстве.

Такой подход позволяет определить амплитудно-фазовое распределение токов на сегментных элементах с приемлемой точностью, что, в свою очередь, дает возможность корректно рассчитать входное сопротивление и коэффициент отражения от входа антенн, характеристики ближнего и дальнего полей, коэффициент направленного действия, построить диаграмму направленности.

В описываемых далее результатах компьютерного моделирования, частота источника возбуждения антенн варьировалась в пределах от 5 до 15 ГГц, при этом длина сегмента разбиения Δl выбрана равной $\lambda_0 / 50$, что обеспечило нужную точность даже на максимальной частоте.

2. Результаты расчетов. Одними из наиболее важных параметров любой антенны является ее *входной импеданс* и его *зависимость от частоты*, определяющие степень ее согласования с питающей линией. Зависимости входного импеданса, приведенные на рис. 2 и 3 позволяют сопоставить частотные свойства различных спиральных антенн.

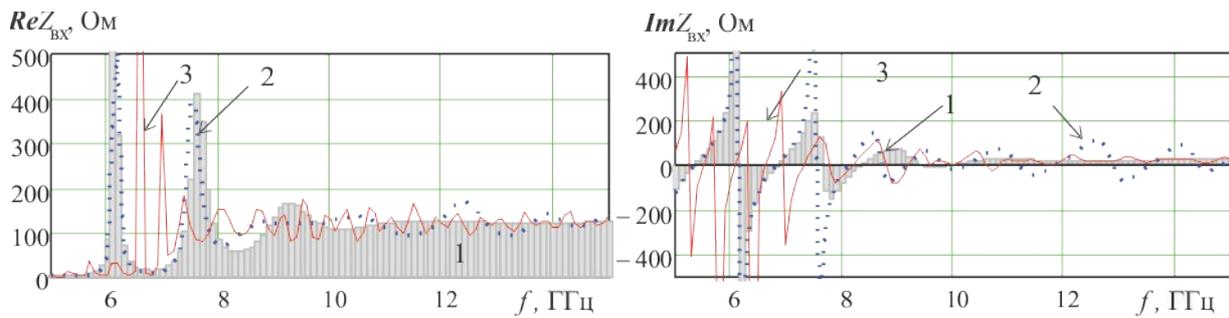


Рисунок 2 – Зависимости входного импеданса спиральных антенн от частоты

Так, рис. 2 иллюстрирует частотные зависимости действительной и мнимой частей входного импеданса, в нем заштрихованная область (1) соответствует плоской архимедовой спирали без экрана, пунктирная кривая (2) отображает указанную зависимость для спирали с экраном ($R_0 = 1,5R_{\max}$, $h = 0,25\lambda_0$), а сплошная кривая (3) – для «*plc*-спирали» с параметрами $l = 0,2\lambda_0$, $s = 0,035\lambda_0$.

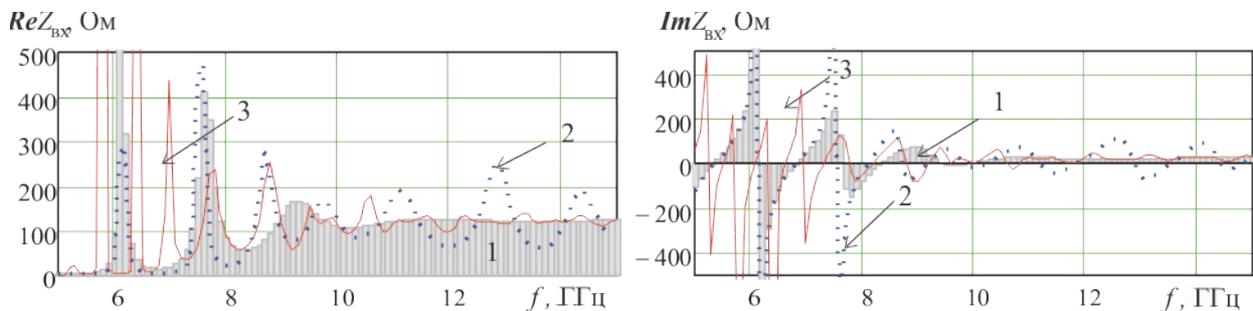


Рисунок 3 – Зависимости действительной и мнимой части входного импеданса

На рис. 3 отобразены аналогичные частотные зависимости, причем здесь пунктирная кривая (2) соответствует спирали с экраном ($R_3 = R_{\max}$, $h = 0,125\lambda_0$), а сплошная кривая (3) отображает зависимость входного импеданса для «*plc*-спирали» с параметрами $l = 0,15\lambda_0$, $s = 0,035\lambda_0$.

Сравнивая кривые, приведенные на этих рисунках, можно выделить две частотные области:

- в первой ($f < 8$ ГГц), назовем его «областью рассогласования», хорошо заметны участки резонанса (6 и 7,5 ГГц), как в двухпроводной линии разомкнутой на конце;
- во второй ($f > 8$ ГГц), назовем его «областью излучения», осцилляции импеданса незначительны.

Наличие плоского экрана при $h = 0,25\lambda_0$ (рис. 2) практически не оказывает заметного влияния на зависимость входного импеданса антенн. Однако приближение экрана к спирали ($h = 0,125\lambda_0$) приводит заметным его осцилляциям в частотном интервале, соответствующем «области излучения» (рис. 3).

Сравнивая приведенные выше характеристики «*plc*-спирали» и спирали с экраном можно указать на следующие особенности:

- верхняя граница области рассогласования «*plc*-спирали» смещена в область низких частот, а резонансных частот примерно в два раза больше;
- в области излучения «*plc*-спирали» количество осцилляций увеличено, а их уровень понижен.

Характер влияния изменений входного импеданса на величину *коэффициента отражения* на входе антенн при нагрузке 120 Ом иллюстрируют графики, приведенные на рис. 4. Здесь можно отметить тот факт, что наличие экрана отражается на графике частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|\rho|$ в области $f > 9$ ГГц в виде чередующихся максимумов и минимумов.

При этом для экрана, размер которого равен размеру спирали (кривые отмеченные цифрой 1), максимальные значения составляют около 0,6...0,7, а минимальные – примерно 0,1. Увеличение размера экрана в полтора раза (кривые отмеченные цифрой 2) сглаживает зависимости, понижая максимумы до величины 0,3...0,4.

В низкочастотной области $7,5 \text{ ГГц} \leq f \leq 9 \text{ ГГц}$ максимумы $|\rho|$ могут достигать значений 0,7...0,85. Иная картина наблюдается в случае «*plc*-спирали»: для нее кривая частотной зависимости (3) практически во всем частотном диапазоне находится ниже зависимостей обозначенных цифрами 1 и 2. Приведенные факты свидетельствует о том, что сочетание плоской спирали и короткой цилиндрической спирали может обеспечить лучшую степень согласования антенны с нагрузкой по сравнению с экранированной спиралью.

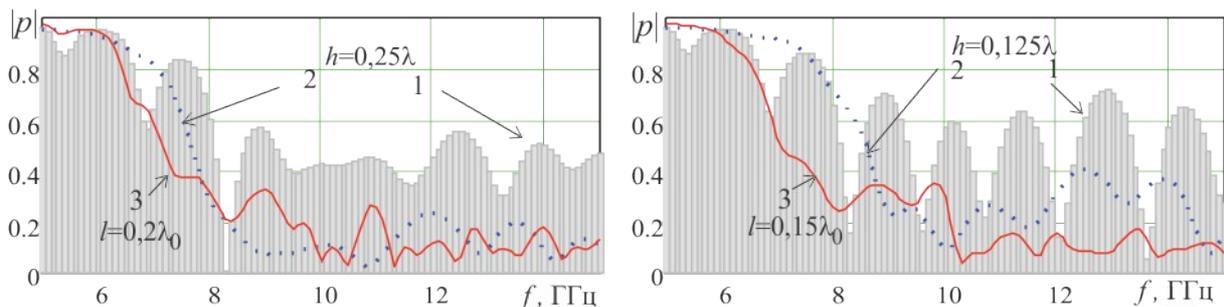


Рисунок 4 – Зависимости модуля коэффициента отражения на входе антенны, 1 и 2 спираль с экраном: 1 – $R_3 = d$; 2 – $R_3 = 1,5d$; 3 – «*plc*-спираль»

Как известно, плоская двухзаходная спираль Архимеда в направлении нормали к плоскости спирали способна формировать поле круговой поляризации, т. е. коэффициент эллиптичности k_3 в этом направлении должен быть близок к единице.

Однако результаты, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что в случае одиночной спирали (кривая 1) k_3 в направлении $\theta = 0^\circ$ на средней частоте рассматриваемого диапазона составляет около 0,5 и с ростом частоты достигает значения 0,9 на краю диапазона (как обычно приня-

то, координатный угол θ отсчитывается от оси z). В то же время при уменьшении частоты k_3 снижается.

Наличие плоского экрана (кривая 2) ухудшает поляризационные свойства антенны в высокочастотной части диапазона. Если с такой антенной сравнить «*plc*-спираль» (кривая 3), то заметно возрастание k_3 , причем, не только в низкочастотной области (и это можно считать ее достоинством по отношению и к одиночной спирали), но и на частотах выше 10 ГГц, где величина k_3 колеблется в пределах 0,4 ... 0,9.

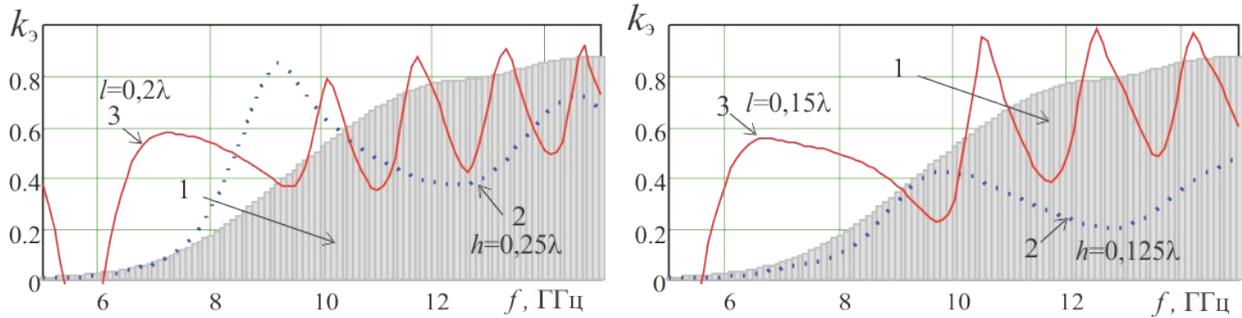


Рисунок 5 – Коэффициент эллиптичности:

1 – спираль без экрана; 2 – спираль с экраном $R_3 = 1,5d$; 3 – «*plc*-спираль»

Графики, приведенные на рис. 6, иллюстрируют частотные зависимости коэффициента усиления антенн $G(f) = (1 - |\dot{p}(f)|^2) \times D(f)$, где D – КНД антенны, в переднем и заднем полупространстве, где в первом случае преобладает поле правой круговой поляризации ($\theta = 0^\circ$, G_R), а во втором – поле левой круговой поляризации ($\theta = 180^\circ$, G_L).

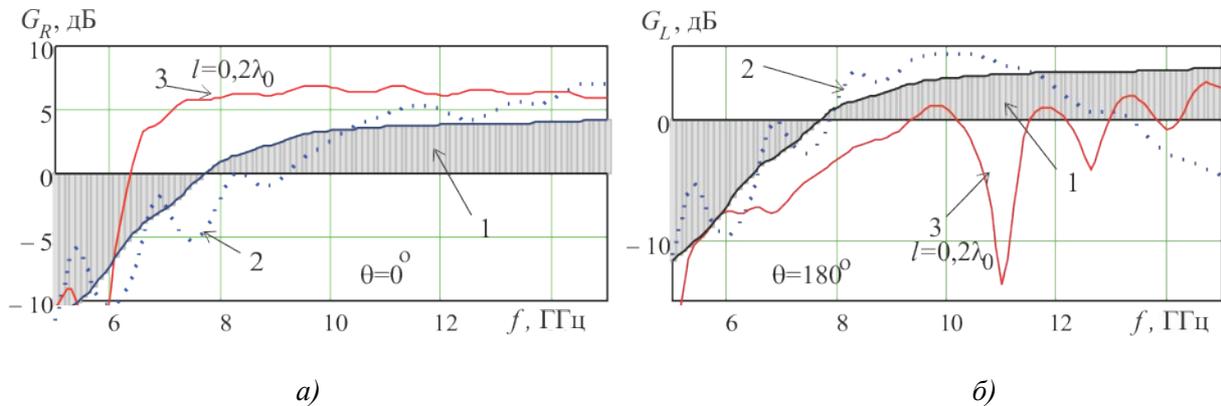


Рисунок 6 – Коэффициент усиления спиральных антенн:

1 – без экрана; 2 – с экраном $R_3 = d$; $h = 0,125\lambda_0$; 3 – «*plc*-спираль» $l = 0,2\lambda_0$

Приведенные результаты отображают частотные свойства коэффициента усиления для трех моделей спиральных антенн с одинаковыми поперечными размерами, изображенных на рис. 1 а) (1), б) (2) и в) (3).

Можно отметить, что практически во всем рассмотренном диапазоне частот «*plc*-спираль», снижая усиление антенны в обратном направлении (кривые 1 и 3, рис. 6, б), тем самым увеличивает его в прямом (рис. 6, а) направлении примерно на 2... 8 дБ. Причем максимальный выигрыш достигается «*plc*-спиралью» в той области частотного диапазона, которая была названа раньше «областью рассогласования», а именно – за счет лучшего согласования антенны с нагрузкой. Аналогичные закономерности наблюдаются, если сравнить (рис. 6, кривые 2 и 3) свойства «*plc*-спираль» со свойствами экранированной спиральной антенны. Здесь, на частотах ниже 13 ГГц также хорошо заметны преимущества плоскоцилиндрической спиральной антенны.

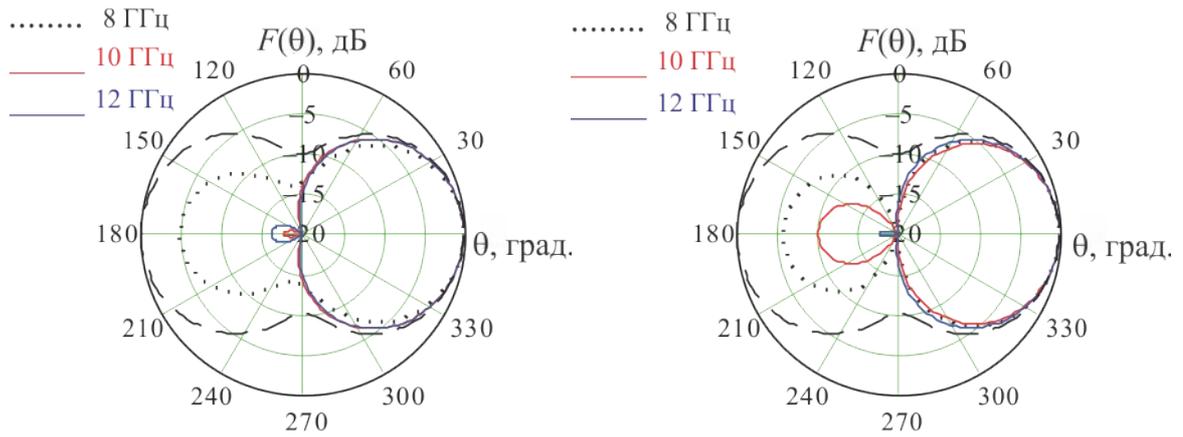


Рисунок 7 – Диаграммы направленности спиральных антенн:
 а) шаг цилиндрической части спирали $s = 0,025\lambda_0$; б) $s = 0,05\lambda_0$

На рис. 7 приведены нормированные амплитудные диаграммы направленности полного поля: одиночной плоской спирали на частоте 10 ГГц (пунктир) и, для сравнения, аналогичные диаграммы направленности «*plc*-спирали» ($l = 0,15\lambda_0$) на трех частотах.

Видно, что наличие короткого, по сравнению с длиной волны цилиндрического, элемент в «*plc*-спирали» приводит к снижению излучения антенны в обратном направлении. Такой элемент исполняет роль рефлектора, подавляя излучение в обратном направлении до уровня -18 дБ на частоте 10 ГГц.

Как видно из рис. 4 ... 7, изменяя шаг «*plc*-спирали» в ее цилиндрической части, а также длину, можно изменять, улучшая в определенной мере, частотные зависимости коэффициента усиления и направленные свойства такой антенны.

В заключение нужно отметить, что в данной работе проведено сравнение электродинамических характеристик спиральных антенн выполненных в виде плоских и плоскоцилиндрических конструкций. При этом проиллюстрированы преимущества плоскоцилиндрических спиральных антенн, обладающих улучшенными частотными свойствами и при этом обеспечивающих однонаправленное излучение.

Основываясь на результатах данной работы можно указать возможное направление дальнейших исследований, например, такие как оптимизация характеристик «*plc*-спирали» путем вариации геометрических параметров ее цилиндрического элемента.

Література

1. Юрцев Ю.А. Спиральные антенны / Юрцев Ю.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. – М.: Сов. радио, 1974. – 223 с.
2. Банков С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М., 2008. – 276 с.
3. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью ФЕКО / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.