

УДК 621.396

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.Д. Барсуков¹, А.П. Балмаков¹, И.В. Семченко¹, С.А. Хахомов¹,
Т.А. Державская¹, А.П. Слобожанюк², А.Е. Краснок², П.А. Белов²

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DIRECTIONAL ANTENNA BASED ON HELICAL ELEMENTS

S.D. Barsukov¹, A.P. Balmakou¹, I.V. Semchenko¹, S.A. Khakhomov¹,
T.A. Dzerzhavskaya¹, A.P. Slobozhanyuk², A.E. Krasnok², P.A. Belov²

¹F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus

²St. Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Приведены экспериментальные результаты, полученные для одиночного спирального излучателя, а также для системы спиральных элементов, аналогичной направленной антенне Уда – Яги. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для спиральной антенны с оптимизированными параметрами имеется возможность получения эффективного бокового излучения и построения на базе таких спиральных элементов направленной антенны. Однако, требуется оптимизация параметров системы спиральных элементов, образующих антенну, для получения более высокого коэффициента направленности и требуемой поляризации излучения.

Ключевые слова: антенна, поляризация, двухвитковая спираль, коэффициент эллиптичности.

Experimental results obtained for a single helical radiator, as well as for the system of helical elements similar to the directional antenna Yagi – Uda are presented. These results suggest that for a helical antenna with optimized parameters, it is possible to obtain an effective lateral radiation and design of the directional antenna based on such helical elements. However, it is necessary to optimize the system parameters of helical elements forming an antenna for higher directivity and polarization of the radiation required.

Keywords: antenna, polarization, double-turn helix, ellipticity coefficient.

Введение

Развитие различных отраслей техники и радиосвязи требует применения специальных антенн, обладающих необходимыми для практического использования свойствами [1], [2]. Широкое распространение получили спиральные антенны благодаря их выдающимся характеристикам [3]. В частности, такие антенны имеют самый большой показатель по соотношению усиление – размеры и в некоторых областях (связь с космическими аппаратами) просто незаменимы. Спиральные антенны имеют малую чувствительность к погрешностям изготовления, широкую полосу пропускания, составляющую более 10% относительно основной частоты, и позволяют получать круговую поляризацию. Направление поляризации (левая/правая) определяется от разьема в сторону максимального излучения: если спираль уходит по часовой стрелке, то поляризация правая круговая, если против часовой стрелки, то левая круговая. Мы используем определение правой циркулярно поляризованной волны, обычно применяемое в радиофизике: вектор напряжённости

электрического поля такой волны вращается по часовой стрелке, если наблюдатель смотрит вслед волне [4]. Следует отметить, что электрический вектор такой волны формирует в пространстве левый винт в фиксированный момент времени, поэтому во многих случаях такую волну называют левой циркулярно поляризованной. К примеру, при приеме право поляризованной волны на антенну с левосторонней поляризацией или наоборот, происходит значительное ослабление сигнала до 38–40 дБ. При этом, при приеме сигнала с горизонтальной или вертикальной поляризацией на антенну с круговой поляризацией, входной сигнал ослабляется всего на 3 дБ (в два раза) и сила сигнала при этом не зависит от положения приемной антенны [5]. Поэтому применение спиральных антенн круговой поляризации актуально и, в некоторых случаях, может быть единственно возможным решением для практических задач радиосвязи. Спиральные антенны применяются как самостоятельные приемо-передающие антенны, так и в составе сложных антенных систем, в качестве активных и пассивных элементов.

Особый интерес представляет получение направленного излучения от антенны с круговой поляризацией. Такие антенны находят широкое применение в спутниковой, наземной цифровой и радиолокационной связи [6]. В качестве направленных антенн с круговой поляризацией обычно применяют скрещенные под углом 90 градусов антенны Уда – Яги («волновой канал»), при питании этих самых антенн сигналом высокой частоты с разностью фаз $\pi/2$. Однако такие антенные системы имеют свои недостатки. К ним можно отнести громоздкость конструкции, необходимость сложной схемы питания и согласования антенн. Поэтому нами впервые было предложено использование спиральных антенных элементов в качестве излучателей электромагнитных волн с круговой поляризацией, объединенных в антенную систему по принципу антенны Уда – Яги. Предполагается, что если спиральная антенна имеет круговую диаграмму направленности и эллиптическую поляризацию, близкую к круговой, то система из спиральных антенных элементов, созданная по аналогии с антенной Уда – Яги, будет иметь некоторую направленность диаграммы поля электромагнитного излучения с сохранением исходных параметров поляризации излучения.

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований отдельных спиральных элементов с заданными параметрами, а также конструкция антенной системы типа Уда – Яги на спиральных элементах.

1 Экспериментальные исследования антенны на основе спиральных элементов

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Метаматериалы» университета ИТМО, г. Санкт-Петербург. Безэховая камера размером 9 м×5 м×4 м, использовавшаяся во время экспериментов, покрыта высокоэффективными широкополосными пирамидальными поглотителями Eccosorb VHR-12-NRL (рисунок 1.1). Измерения проводились с помощью векторного анализатора электрических цепей Agilent PNA E8362C, в качестве излучателя и приемника СВЧ применялись сверхширокополосные антенны TMA 1.0–18.0 КВ, а также азимутально-поворотное устройство (АПУ) и прецизионный 3-х координатный сканер (X, Y, Z).

С целью получения направленного поляризованного излучения были экспериментально исследованы излучающие спиральные элементы антенны для определения их оптимальных параметров. Также получена диаграмма направленности и поляризация излучаемой волны для отдельного спирального элемента.

Так как нас интересует лишь боковое излучение спиральной антенны, то мы ограничиваемся режимом работы спирали, когда ток на протяжении всего витка спирали имеет одинаковую

фазу (одинаковое направление). Поэтому такой виток эквивалентен магнитному диполю, не излучающему вдоль оси витка. Диаграмма направленности антенны в таком режиме имеет форму тора.



Рисунок 1.1 – Безэховая камера размером (9×5×4) м с пирамидальными поглотителями

Нами был изготовлен двухвитковой спиральный излучатель и получены экспериментальные результаты для него. Излучатель изготовлен из медной проволоки диаметром $D = 1$ мм, радиус спирали $r = 5,27$ мм, шаг спирали $h = 3,67$ мм, угол подъема спирали $\alpha = 6,35^\circ$, длина спирали в развернутом состоянии $L = 66,63$ мм. Спираль разрезана в середине и запитана с помощью согласующего шлейфа $\lambda/4$. Используя согласующий шлейф, можно выделить полуволновой резонанс на длине провода спирального излучателя. С учетом смещения резонанса из-за влияния согласующих элементов экспериментально полученный резонанс лежал в области 2,55 ГГц.

На рисунке 1.2 приведен вид спирали, ее геометрические характеристики и результат экспериментальных измерений коэффициента отражения (S11-параметр).

Основные параметры, которые исследовались в работе – это диаграмма направленности спирального излучателя, а также коэффициент эллиптичности излучаемых электромагнитных волн. На рисунке 1.3 приведена диаграмма направленности одиночного спирального излучателя с согласованием.

Главная ось спирали была расположена в горизонтальной плоскости, что соответствует пространственной ориентации вектора напряженности электрического поля для приемной рупорной антенны. Необходимо отметить сходство диаграммы направленности спирального излучателя с диаграммой классического диполя. Однако есть некоторые отличия, во-первых, это несимметричность диаграммы направленности относительно главного направления излучения, во-вторых, это отклонение диаграммы направленности на некоторый угол относительно перпендикуляра к главной оси симметрии спирального излучателя. В случае обычного дипольного

излучателя наибольшая энергия была бы направлена в перпендикулярном направлении. Такое свойство диаграммы направленности можно объяснить, если рассмотреть положение максимумов тока в спиральном излучателе, которые находятся в середине каждого из витков, с учетом угла подъема витков спирали (рисунок 1.3 (а)). В общем, эта особенность является следствием сложной конфигурации излучающих элементов спиральной антенны.

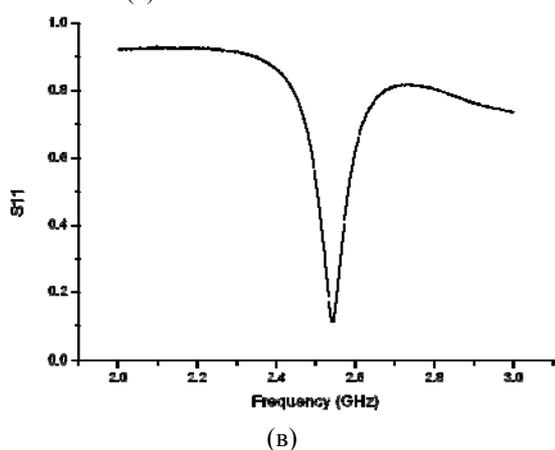
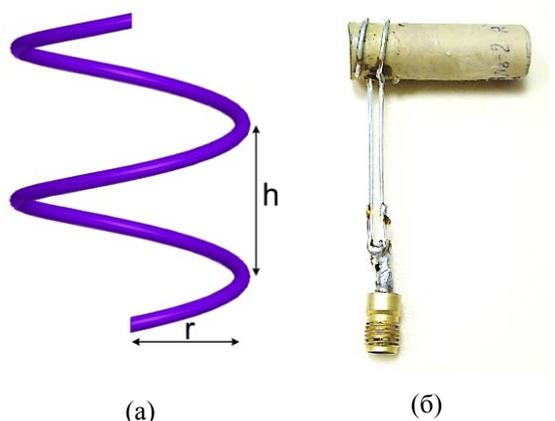


Рисунок 1.2 – Геометрические характеристики двухвитковой спирали (а), общий вид излучателя с согласованием (б), параметр s11 отражения при питании излучателя от коаксиальной линии (в)

Частотная зависимость коэффициента направленности спирального излучателя приведена на рисунке 1.3 (б). Из графика следует, что максимум направленности лежит в области частот резонанса для нашего излучателя, то есть 2,55 ГГц.

Для одиночного двухвиткового спирального излучателя были получены значения эллиптичности электромагнитных волн, измеренные в E (вертикальной) и H (горизонтальной) плоскостях. Значения эллиптичности были рассчитаны по следующему методу:

$$\varepsilon = A / B,$$

где

$$A = \left[\frac{1}{2} \left(E_x^2 + E_y^2 - \left[E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{1/2} \right) \right]^{1/2},$$

$$B = \left[\frac{1}{2} \left(E_x^2 + E_y^2 + \left[E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{1/2} \right) \right]^{1/2}.$$

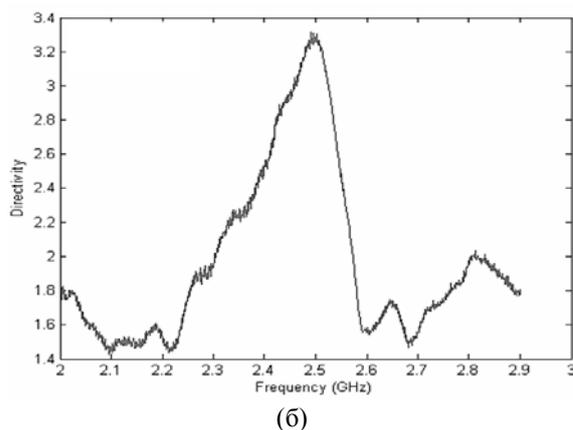
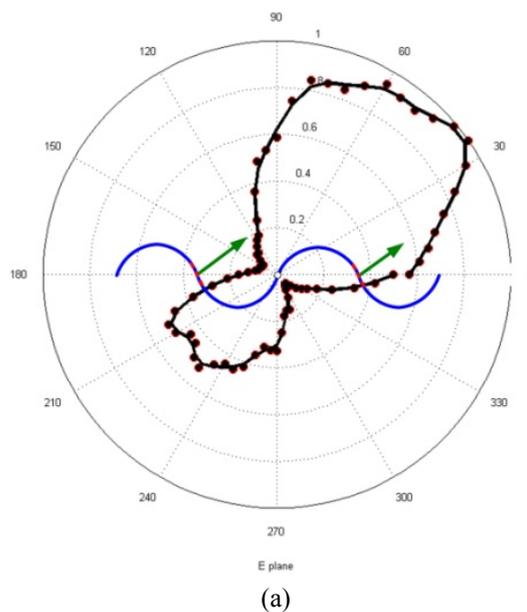


Рисунок 1.3 – Диаграмма направленности одиночного спирального излучателя с согласованием (а), частотная зависимость коэффициента направленности излучателя в относительных единицах (б)

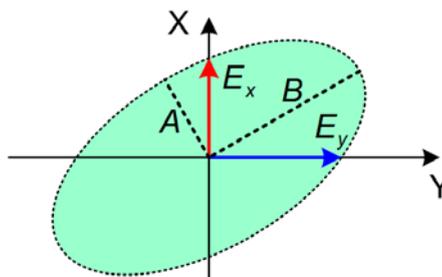


Рисунок 1.4 – К расчету эллиптичности электромагнитной волны

Экспериментальный график зависимости коэффициента эллиптичности от полярного угла приведен на рисунке 1.5.

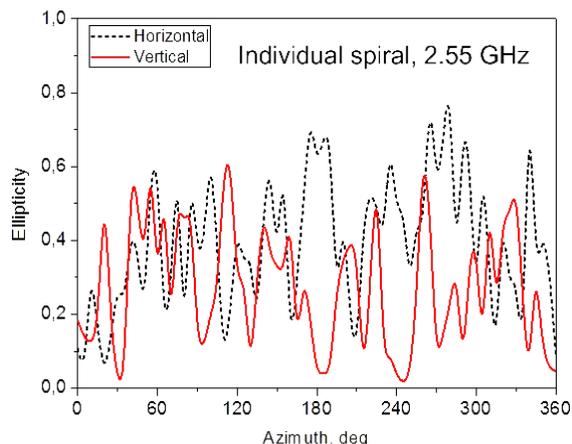


Рисунок 1.5 – Значения коэффициента эллиптичности в полярных координатах для одиночного спирального излучателя

Из графика можно сделать вывод, что во всех направлениях преобладает эллиптическая поляризация.

2 Экспериментальные исследования направленной антенны на основе пяти спиральных элементов

Направленная антенна Уда – Яги построена на основе пяти одинаковых спиральных элементов с установленными ранее оптимальными параметрами спиралей. Конфигурация пятиэлементной направленной спиральной антенны приведена на рисунке 2.1 (а). Расстояние между директорами и излучателем выбрано теоретически, с учетом резонансной частоты $f = 2,4$ ГГц. Таким образом, $a = 0,3 \lambda = 3,5$ см, а расстояние между рефлектором и излучателем чуть меньше: $b = 0,25 \lambda = 3$ см.

Как следует из рисунка 2.1 (б), резонанс спиральной антенны сместился вниз по частоте до 2,4 ГГц, при этом резонанс одиночного излучателя наблюдался на частоте 2,55 ГГц. Это произошло вследствие взаимного влияния активных и пассивных элементов антенны.

Экспериментальные диаграммы направленности пятиэлементной спиральной антенны приведены на рисунке 2.2. Диаграммы направленности построены для двух плоскостей (E и H), при этом антенна расположена в горизонтальной плоскости.

Для направленной спиральной пятиэлементной антенны были получены значения эллиптичности, результаты приведены на рисунке 2.3, откуда следует, что во всех направлениях излучается эллиптически поляризованная волна, которая для угла, приблизительно равного 120 градусам, имеет коэффициент эллиптичности 0,8. В этом случае поляризация волны близка к круговой (рисунок 2.3).

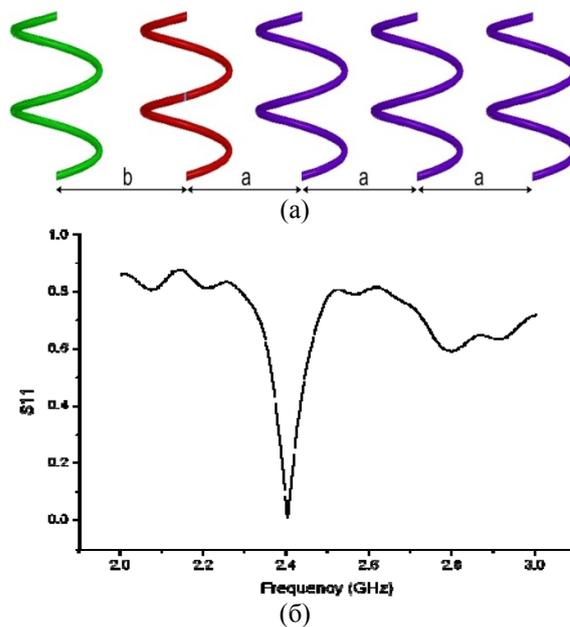


Рисунок 2.1 – Конфигурация направленной антенны из пяти элементов (а), параметр S_{11} отражения при питании антенны от коаксиальной линии (б)

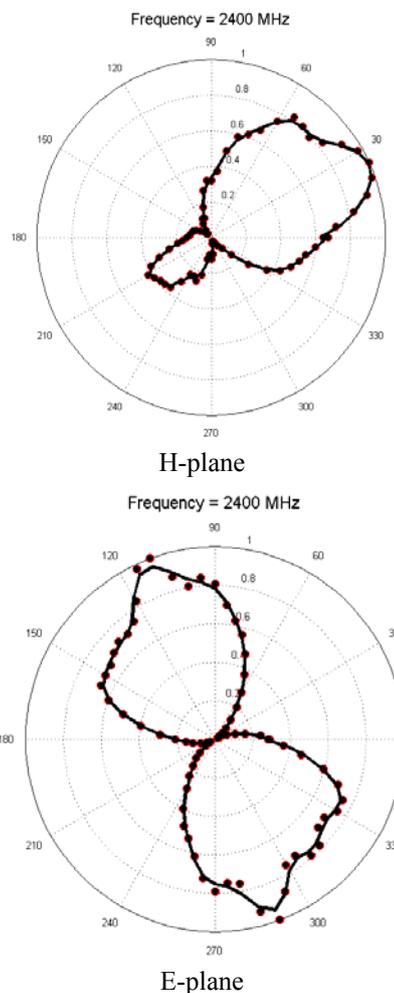


Рисунок 2.2 – Диаграмма направленности спиральной антенны из пяти элементов

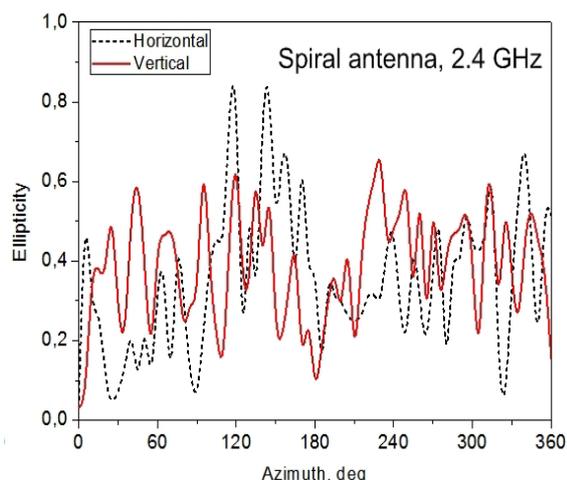


Рисунок 2.3 – Значения коэффициента эллиптичности в полярных координатах для спиральной антенны Уда – Яги

Заключение

Таким образом, в работе приведены экспериментальные результаты, полученные для одиночного спирального излучателя, а также для системы спиральных элементов, аналогичной направленной антенне Уда – Яги. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для спиральной антенны с оптимизированными параметрами имеется возможность получения эффективного бокового

излучения и построения на базе таких спиральных элементов направленной антенны. Однако требуется оптимизация параметров системы спиральных элементов, образующих антенну, для получения более высокого коэффициента направленности и требуемой поляризации излучения. При конструировании антенны на спиральных элементах следует также учитывать направление, в котором излучается наибольшая энергия отдельной спиралью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг, Г.З. Антенны ультракоротких волн / Г.З. Айзенберг. – М. : «Связьиздат», 2007. – 700 с.
2. Лавров, А.С. Антенно-фидерные устройства / А.С. Лавров. – М. : «Ростехн», 2003. – 368 с.
3. Белоцерковский, Г.Б. Основы радиотехники и антенны : в 2 ч. Ч. 2. Антенны / Г.Б. Белоцерковский. – М. : Радио и связь, 2005. – 293 с.
4. Григоров, И. Антенны с круговой поляризацией / И. Григоров // Радио хобби. – 2000. – № 3. – С. 28.
5. Долбик, А.И. Устройства СВЧ и антенны / А.И. Долбик. – М. : «Оборонгиз», 2004. – 368 с.
6. Белоцерковский, Г.Б. Базы радиотехники и антенны : в 2 ч. Ч. 2. Антенны / Г.Б. Белоцерковский. – М. : Радио и связь, 1983. – 296 с.

Поступила в редакцию 21.05.14.