

УДК 621.396.674.1

В.В. Головин, канд. техн. наук; Е.Ю. Толокнова; О.А. Куликова; А.Д. Матершова*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053**E-mail: v_golovin@mail.ru***АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С
КОНИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДОМ**

В статье представлена конструкция модифицированной плоской спиральной антенны с полем излучения круговой поляризации. Проведено исследование характеристик поля излучения и входного сопротивления антенны в широкой полосе частот. Показано, что исследованная антенна является широкополосной по входным характеристикам.

Ключевые слова: спиральная антенна, широкополосное согласование.

В настоящее время интенсивно развивается направление, связанное с разработкой малогабаритных антенных систем для передачи (приема) широкополосных сигналов. Выбор антенных систем осуществляется на основе комплекса требований, среди которых: круговая поляризация излучения; широкополосное согласование, стабильность характеристик излучения, минимальные массогабаритные параметры, высокая надежность работы. Используемая антенна должна быть слабонаправленной. Перспективным для таких систем является использование плоских спиральных антенн (ПСА). В диапазонах частот, используемых для малогабаритных локаторов, ПСА обладают малыми габаритными размерами. Целью данной работы является разработка конструкции антенны, обеспечивающей в диапазоне частот 2...4 ГГц согласование с питающей линией с коэффициентом стоячей волны (КСВ) не более 1,5 и круговую поляризацию излучения с коэффициентом эллиптичности не менее 0,95. Для этого воспользуемся модифицированной структурой двухзаходной равноугольной плоской спиральной антенны (ПСА).

Геометрия спиральных излучателей задается в декартовой системе координат в параметрической форме (см. рисунок 1, а):

$$x = \rho_{sp}(\alpha) \cdot \cos(\alpha);$$

$$y = \rho_{sp}(\alpha) \cdot \sin(\alpha),$$

где $\rho_{sp}(\alpha) = \rho_1 \exp(\tan(\beta_{sp})\alpha)$; ρ_1 — начальный радиус; β_{sp} — угол наклона витков плоской спирали, угол α в пределах одного витка изменяется на 2π и вдоль каждого из заходов — от 0 до 2π ; n — количество витков.

Среди многообразия ПСА остается открытым вопрос разработки конструкции малогабаритных антенн, для которых во всем диапазоне частот для согласования с питающей линией передачи достаточно простых широкополосных согласующих устройств (СУ) с минимальными потерями. Упростить эту задачу можно за счет некоторого увеличения начального радиуса ρ_1 спиральных излучателей, что позволяет также перестраивать антенну в более длинноволновый диапазон. В связи с этим возникает дополнительная трудность построения СУ и симметрирующих устройств, так как требуется построение линии с переменными параметрами (с изменяющимся расстоянием между проводниками и, следовательно, с изменением ширины проводников для обеспечения постоянства волнового сопротивления линии передачи). Практический интерес представляет разработка конструкции антенны, которая при увеличении ρ_1 позволит упростить согласование антенны.

Для расширения начального радиуса ПСА и сохранения малого радиуса вблизи точек подключения излучающей структуры к питающей линии воспользовались на входе двухзаходной ПСА приставкой в виде двухзаходной конической спирали (рисунок 1, б), в вершине которой подключается линия передачи, а у широкого основания размещаются плоские спирали (см. рисунок 1, в). Применение двухзаходной конической спиральной структуры оправдано в том случае, если количество витков на конической спирали не превышает 2...3, когда эта структура выполняет функцию трансформатора тока и позволяет в широком диапазоне частот поддерживать практически постоянное входное сопротивление и обеспечить режим осевого излучения ПСА поля с поляризацией близкой к круговой. Возможности настройки такого перехода определяются выбором закона намотки конической спирали, изменением ее геометрических параметров и выбором формы образующего спираль конуса. После ряда проведенных теоретических исследований была подобрана геометрия конического перехода (см. рисунок 1,б), которая в параметрической форме представлена выражениями

$$x = \rho_k(\alpha) \cdot \cos(\alpha);$$

$$y = \rho_k(\alpha) \cdot \sin(\alpha);$$

$$z = \rho_k(\alpha) \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_1)},$$

где $\rho_k(\alpha) = \rho_{0kon} \left[1 + \frac{2 \sin \beta_{kon} \sin \theta_1}{\cos(\beta_{kon} - \theta_1)} \right]^{am}$, ρ_{0kon} — радиус при вершине конуса; β_{kon} — угол наклона витков; θ_1 — угол конусности; m — константа; ρ_1 — радиус основания конуса.

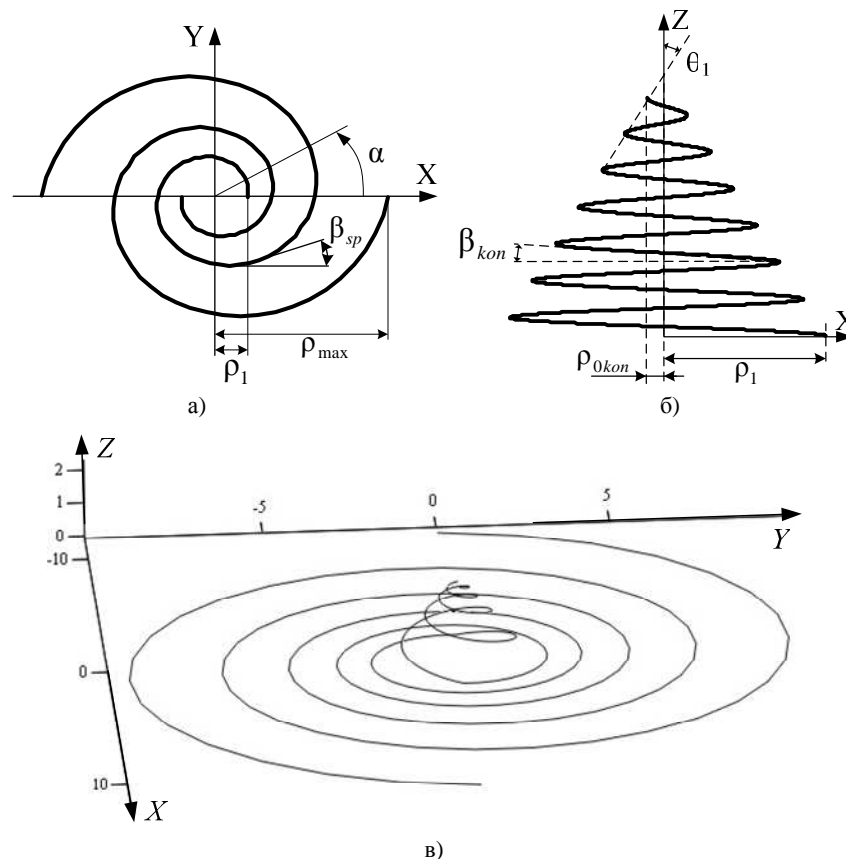


Рисунок 1 – Геометрия антенны: а) ПСА; б) конический переход; в) общий вид

Для ПСА с коническим переходом входное сопротивление и распределение тока на проводниках рассчитывалось с применением метода обобщенных наводимых ЭДС. Далее использовался метод векторного потенциала [1] для анализа поляризационной структуры поля излучения ПСА.

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \vec{J} G(R) dS; \quad (1)$$

где \vec{A} – векторный потенциал в произвольной точке наблюдения, определяемый на основании известного (предварительно вычисленного) распределения возбуждающего тока, \vec{J} – вектор комплексной амплитуды объемной плотности стороннего электрического тока; $G(R) = \exp(-jkR)/R$ – функция Грина для свободного пространства; R – расстояние между точками наблюдения и интегрирования; S – объем, занимаемый токами излучающей системы; k – волновое число; ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Распределение тока на проводниках конического перехода и плоских спиралей определялось с применением метода обобщенных наводимых ЭДС. Интегрирование (1) с применением рассчитанного тока проводилось отдельно по двум структурам:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S_1} \vec{J}' G(R) dS + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S_2} \vec{J}'' G(R) dS,$$

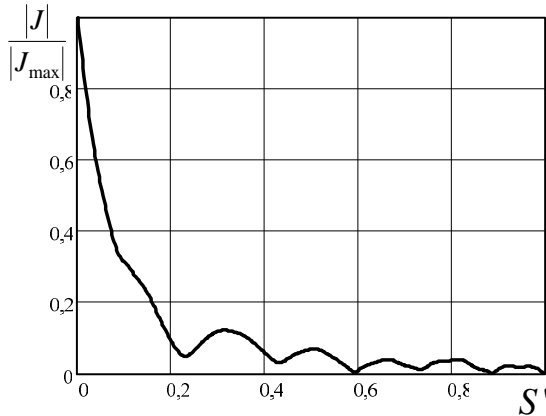


Рисунок 2 – Распределение тока на плоской спиральной антенне с коническим переходом

где S_1, S_2 — длина конического перехода и плоской спирали, соответственно; \vec{J}' и \vec{J}'' — рассчитанные ранее распределения плотности тока на проводниках конического перехода и плоской спирали.

На рисунке 2 представлено распределение тока в зависимости от относительной длины проводника $S' = \frac{S}{S_1 + S_2}$. Распределение токов на двух заходах совпадают, поэтому представлено распределение плотности тока только для одного из заходов.

В сферической системе координат \vec{A} можно представить в виде

$$\vec{A} \approx A_\theta \cdot \vec{\theta} + A_\phi \cdot \vec{\phi}. \quad (2)$$

Известно, что в дальней зоне излучения $A_r \approx 0$, тогда для расчета \vec{E} можно из (2) получить формулу

$$\vec{E} \approx -j\omega(A_\theta \vec{\theta} + A_\phi \vec{\phi}), \quad (3)$$

где $\omega = \sqrt{\mu/\xi}$.

Анализ (1) – (3) для случая спиральных антенн подробно рассмотрен в [2].

Для поляризационных исследований в настоящее время широко используются два метода, которые определены видом разложения электромагнитной волны (ЭМВ) [3]: на две волны с ортогональными линейными поляризациями и на две волны с круговыми поляризациями противоположного направления вращения.

Известно, что коэффициент эллиптичности (K_Σ) по полю определяется как отношение амплитуд поля E_{\min} и E_{\max} , соответствующих малой и большой полуосям поляризационного эллипса: $K_\Sigma = E_{\min}/E_{\max}$. В декартовой системе координат эллиптически поляризованную волну можно разложить на две составляющие

$$\begin{aligned} E_x(\omega t) &= E_x(t) \cdot \exp\{j[\omega t + \varphi_x(t)]\}; \\ E_y(\omega t) &= E_y(t) \cdot \exp\{j[\omega t + \varphi_y(t)]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $\varphi_x(t)$, $\varphi_y(t)$ — есть, соответственно, амплитуды и фазы декартовых компонент поля $E_x(\omega t)$ и $E_y(\omega t)$, соответственно.

Как показано в [3] разложение поля в круговом поляризационном базисе на составляющие с правосторонним $E_{\text{пр}}(\omega t)$ и левосторонним $E_{\text{лев}}(\omega t)$ вращением можно выразить через линейные составляющие следующим образом:

$$\begin{cases} E_{\text{пр}}(\omega t) = \frac{E_x(\omega t) + j \cdot E_y(\omega t)}{\sqrt{2}}; \\ E_{\text{лев}}(\omega t) = \frac{E_x(\omega t) - j \cdot E_y(\omega t)}{\sqrt{2}}. \end{cases} \quad (5)$$

Необходимые для определения K_Σ значения амплитуд поля E_{\min} и E_{\max} можно определить из выражений:

$$\begin{cases} E_{\min}(t) = \frac{E_{\text{пр}}(t) - E_{\text{лев}}(t)}{2}; \\ E_{\max}(t) = \frac{E_{\text{пр}}(t) + E_{\text{лев}}(t)}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

В ходе теоретических исследований характеристик двухзаходной ПСА с коническим переходом исследовались входное сопротивление, амплитудные диаграммы направленности (ДН), осевой

коэффициент эллиптичности и его значение в пределах ширины главного лепестка ДН, КНД и КСВ при непосредственном подключении ко входу антенны линии с волновым сопротивлением на конце равным 150 Ом. Для проведения расчетов был выбран диапазон частот (2...6) ГГц.

Определены геометрические параметры излучающей структуры (см. рисунок 1):

— плоская спиральная антенна: количество заходов — 2; начальный радиус $\rho_1 = (2...2,5)$ см; угол наклона витков спирали $\beta = (5...7)^\circ$, количество витков $n = 2...3$;

— конический переход: количество заходов — 2; радиус при вершине конуса $\rho_0 = 2,5$ мм, углы $\beta_1 = (6...8)^\circ$ и $\theta_1 = (35...40)^\circ$, $m = 1$, количество витков $n = 2$.

На рисунках 3, 4 представлены характеристики разработанной антенны. Применение конического перехода на входе антенны позволяет существенно улучшить входные характеристики антенны. Входное сопротивление антенны в полосе частот $\frac{\Delta f}{f_0} = 100\%$ близко к 160 Ом (см. рисунок 3,а), а коэффициент

стоячей волны (КСВ) составляет не более 1,5 (см. рисунок 3,б) при согласовании с линией с волновым сопротивлением 150 Ом.

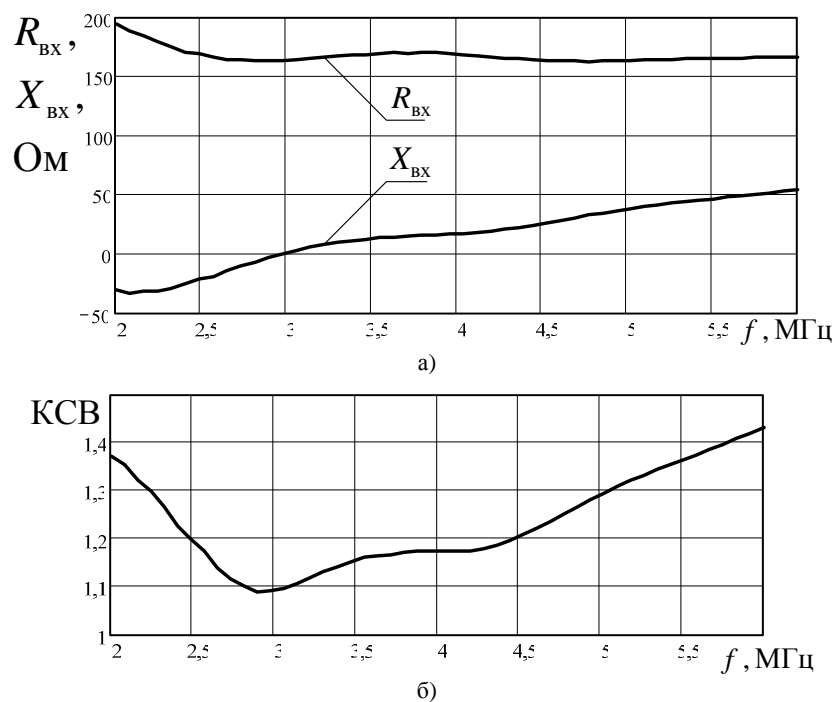


Рисунок 3 — Характеристики входного сопротивления антенны:
а) входное сопротивление в диапазоне частот; б) зависимость КСВ от частоты

Применение конического перехода позволяет также улучшить и характеристики излучения плоской спиральной антенны. Как показано на рисунке 4,а антенна без использования экрана формирует ДН с подавленным в 1,5...2 раза задним излучением. Это объясняется тем, что в прямом направлении ($\theta = 0^\circ$) двухзаходная плоская спиральная антенна формирует поле с правосторонней круговой поляризацией, а в обратном направлении ($\theta = 180^\circ$) поляризация излучения — с левосторонним вращением. Коническая спираль, используемая на входе антенны, слабо излучает поле в направлении ($\theta = 180^\circ$) с правосторонней поляризацией. Это приводит к тому, что поле конического излучателя в этом направлении частично компенсирует поле ПСА.

В полосе частот (2...4) ГГц ДН изменяются незначительно и коэффициент направленного действия (КНД) составляет $D = (6,5...5,5)$ дБ (см. рисунок 4,б) при ширине главного лепестка ДН $2\Delta\theta = (70...80)^\circ$.

Анализ поляризации поля проводился на основании (4), (5) по коэффициенту эллиптичности K_e и относительному уровню кроссполяризованной составляющей $E_{лев}^{норм}(\theta) = \frac{E_{лев}(\theta)}{E_{пр}(\theta)}$.

Результаты расчетов представлены на рисунке 4, а (штрихпунктирная линия). Для ДН, представленных на рисунке 4,а, в секторе углов, разность фаз δ между компонентами поля составляет около 90° .

Поскольку при этом отношение амплитуд компонент поля E_{\min} и E_{\max} близко к единице, то поляризация излучения в осевом направлении и в пределах главного лепестка близка к круговой. В рассматриваемом диапазоне частот уровень кроссполяризационной составляющей (в данном случае с левосторонним вращением) в пределах главного лепестка ДН не превышает ($-30\dots-40$) дБ относительно уровня главной составляющей поля, направление вращения которой определяется законом намотки ПСА.

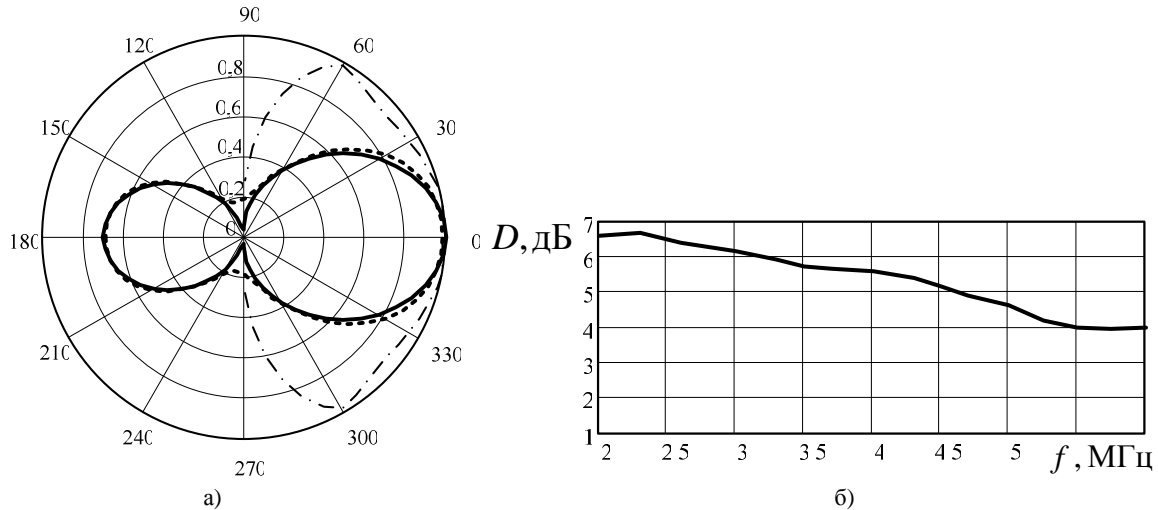


Рисунок 4 — Характеристики поля излучения антенны: а) ДН на $f = 3$ ГГц в пл. XOZ по E_{θ} (сплошная линия) и E_{ϕ} (пунктирная линия) составляющим и угловая зависимость коэффициента эллиптичности (штрихпунктирная линия); б) зависимость КНД от частоты

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Предложена конструкция плоской спиральной антенны с коническим переходом, которая в диапазоне частот $\frac{\Delta f}{f_0} = 100\%$ имеет активное входное сопротивление близкое к 160 Ом, а реактивное мало и составляет ($-20\dots50$) Ом, что обеспечивает возможность широкополосного согласования с линией с волновым сопротивлением 150 Ом.

В диапазоне частот (2...4) ГГц ДН антенны имеет характеристики: ширина главного лепестка $2\Delta\theta = (70\dots80)^\circ$; КНД = (6,5...5,5) дБ; поляризация излучения — круговая, кроссполяризационная составляющая не превышает -30 дБ в пределах главного лепестка ДН.

На частотах более 4 ГГц наблюдается снижение КНД, обусловленное расширением главного лепестка ДН и ростом заднего излучения. Повысить стабильность диаграммы направленности в коротковолновой части рассмотренного диапазона частот можно при построении на основе разработанной ПСА фазированной антенной решетки.

Дальнейшее улучшение характеристик разработанной антенны возможно за счет уточнения закона намотки проводников плоских спиральных излучателей и изменения ширины проводников антенны от входных зажимов до их внешнего края.

Бibliографический список

1. Ільницький Л.Я. Антени: уавчальний посібник / Л.Я Ільницький, Л.В. Сібрук. — К.: Изд-во «КМУЦА», 1996. — 216 с.
2. Лобкова Л.М. Математическая модель поля излучения спиральных антенн с заданной геометрией / Л.М. Лобкова, М.Б. Проценко, М.В. Ивашина // Вестник СевГТУ: Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 1999. — Вып. 18. — С. 31–37.
3. Лобкова Л.М. Анализ поля излучения антенн с вращающейся поляризацией / Л.М. Лобкова, М.Б. Проценко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — К., 2002. — Т. 45. — № 5. — С. 14–20.

Поступила в редакцию 20.03.2009 г.