

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО
ФАЗОВОГО ЦЕНТРА АНТЕННЫ С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

**CALCULATION PECULIARITIES AND ANALYSIS OF POSITION
OF THE LOCAL PHASE CENTER OF ANTENNA WITH ELLIPTICAL POLARIZATION**

Аннотация. В статье представлены результаты исследований фазовых характеристик направленности антенны с эллиптической поляризацией излучения, выполненной в виде тонкопроволочной цилиндрической спирали. Предлагается также метод вычисления локального фазового центра антенны и анализируется его изменение в зависимости от координат точки наблюдения, а также от частоты возбуждения.

Summary. The results of the phase characteristics research of antenna with elliptical polarization are presented in the article. Thin-wire helical antenna was considered. A method for local phase center position calculation is suggested as well. The displacement of the local phase center dependent on the coordinates of the observation point and the frequency of excitation is analyzed.

Одной из основных проблем на современном этапе развития радиосистем различного назначения является повышение их эффективности, включая повышения качества и надежности радиоканала, увеличение скорости передачи информации и др. При этом на первый план выходят задачи пространственно-временной обработки сигналов [1], учитывающие векторный характер электромагнитного поля. Особая роль при этом отводится созданию оптимальных антенных систем. Такой подход требует более детального исследования характеристик направленности антенн, особенно фазовых и поляризационных. Традиционно вопросам исследования этих характеристик для антенн с эллиптической поляризацией излучения уделяется мало внимания, ограничиваясь предположением о формировании антенной в дальней зоне сферического фронта и выделением ортогональных линейных и круговых поляризационных составляющих [2].

С целью восполнить указанный пробел в данной работе исследуются фазовые характеристики антенны с эллиптической поляризацией излучения, включая определение локального фазового центра антенны и анализ его изменения в зависимости от координат точки наблюдения, а также от частоты возбуждения.

Анализ характеристик излучения произвольной антенны основан на исследовании формируемого ею электромагнитного поля, которое, в общем случае, пропорционально ее векторной комплексной характеристике направленности $\vec{E} \sim \vec{F}(R, \varphi, \theta)$, где $\vec{F}(R, \varphi, \theta) = f(R, \varphi, \theta) \vec{p}(R, \varphi, \theta) \exp[j\Psi(R, \varphi, \theta)]$ – описывает соответственно амплитудную, поляризационную и фазовую характеристики направленности антенны в зависимости от сферических координат точки наблюдения $Q(R, \varphi, \theta)$ [3]. Для антенн с эллиптической поляризацией излучения вектор $\vec{p}(R, \varphi, \theta)$ в точке $Q(R, \varphi, \theta)$ обычно раскладывается на ортогональные поляризационные составляющие, например, в линейном $\vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi$ или круговом $\vec{e}_{пр}, \vec{e}_{лев}$ поляризационном базисе. С учетом вышесказанного поле излучения произвольной антенны на расстоянии R , при котором возможно пренебречь продольной составляющей вектора \vec{E} , можно записать в виде [2]

$$\vec{E} \approx E_\theta \vec{e}_\theta + E_\varphi \vec{e}_\varphi = E_{пр} \vec{e}_{пр} + E_{лев} \vec{e}_{лев}, \quad (1)$$

где $E_e \sim f_e(R, \varphi, \theta) \exp[j\Psi_e(R, \varphi, \theta)]$ – амплитудно-фазовая характеристика направленности антенны на соответствующей поляризационной составляющей поля излучения.

Представление электромагнитного поля в виде (1) позволяет для каждой поляризационной составляющей выделить фазовую характеристику направленности $\Psi_e(R, \varphi, \theta)$ и на ее основе произвести расчет фазового центра (локального фазового центра) антенны, а также исследовать его изменение в пространстве.

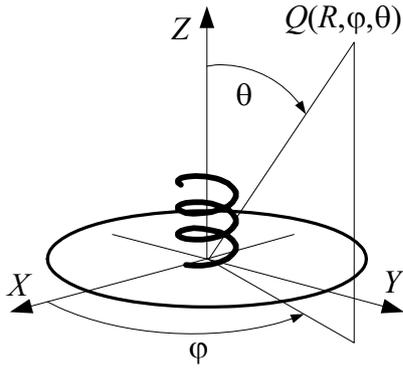


Рисунок 1 – Цилиндрическая спиральная антенна

В качестве исследуемой антенны с эллиптической поляризацией излучения выбрана эквиугольная цилиндрическая спираль, ортогонально расположенная над проводящем экраном, как изображено на рис. 1. Данная спираль описывается следующими геометрическими параметрами: n – количество витков спирали; β – угол намотки спирали; $d_{ц}$ – диаметр цилиндра, вокруг которого намотана спираль; $r_{пр}$ – радиус цилиндрического проводника спирали. В научной литературе представлено достаточно большое количество теоретических и экспериментальных результатов, описывающих амплитудные характеристики направленности такой антенны, а также оптимальные соотношения между геометрическими параметрами антенны (см., например, [4]).

В данной работе анализ характеристик излучения антенны (поляризационных, амплитудных и фазовых диаграмм направленности) основан на предварительном вычислении функции амплитудно-фазового распределения тока $I(s)$ вдоль излучающего проводника. Для этого использовано интегродифференциальное уравнение Харрингтона [5], позволяющее определить $I(s)$ на произвольно расположенном в пространстве криволинейном проводнике. Излучающий проводник имеет цилиндрическую форму, является тонким, идеально проводящим. Тогда уравнение, на основании которого может быть вычислена неизвестная функция $I(s)$, может быть записано в виде

$$-j30k \int_S I(s') G(s, s') \vec{s}' \vec{s} + \frac{\partial I(s')}{\partial s'} \frac{\partial G(s, s')}{\partial s} ds' = -E(s), \quad s, s' \in S, \quad (2)$$

где $E(s)$ – электромагнитное поле, описывающее возбуждения антенны; S – осевой контур проводника; s, s' – текущие точки на проводнике S ; \vec{s}, \vec{s}' – единичные векторы, касательный к кривой S соответственно в точках s, s' ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; $G(s, s')$ – функция Грина,

$$G(s, s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\exp(-jkr)}{r} d\phi',$$

где r – расстояние между точками s, s' ; ϕ' – текущий угол, описывающий цилиндрическую поверхность излучающего проводника.

Для численного решения (2) относительно $I(s)$ использован обобщенный метод наводимых ЭДС полностью эквивалентный методу моментов с синусоидальными базисными и весовыми функциями [6]. Тангенциальная составляющая возбуждающего электромагнитного поля $E(s)$ на поверхности проводника принималась равной нулю за исключением первого сегмента (вблизи точки возбуждения). Дальнейший расчет характеристик излучения антенны на основе вычисленной функции амплитудно-фазового распределения тока $I(s)$ осуществлен также с использованием (2), но при перемещении точки s в произвольную точку пространства $Q(R, \phi, \theta)$ и выделении ортогональных поляризационных составляющих электромагнитного поля в виде (1). Это позволило на основе единой методики произвести численное моделирование внутренних и внешних характеристик антенны.

Типичные характеристики направленности цилиндрической спиральной антенны в виде амплитудных $f_{\theta}(\theta), f_{\phi}(\theta), f_{лев}(\theta), f_{пр}(\theta)$ и фазовых $\Psi_{\theta}(\theta), \Psi_{\phi}(\theta), \Psi_{лев}(\theta)$ диаграмм направленности (ДН) для основных ортогональных поляризационных составляющих изображены на рис. 2. Данные зависимости получены при оптимальном выборе соотношений между геометрическими параметрами цилиндрической спирали и частоты ее возбуждения, соответствующие формированию в осевом направлении антенны в дальней зоне ($R \rightarrow \infty$) электромагнитного поля с максимальным

коэффициентом эллиптичности (поляризация близкая к круговой). Согласно рис. 2 характеристики излучения антенны описывают сложную векторно-пространственную структуру электромагнитного поля, причем фазовые характеристики направленности по всем поляризационным составляющим $\Psi_e(R, \varphi, \theta)$ не соответствуют сферическому фронту электромагнитной волны. Поэтому такие антенны не обладает фазовым центром в строгом понимании этого термина и следует искать положение локального фазового центра в ограниченном секторе углов.

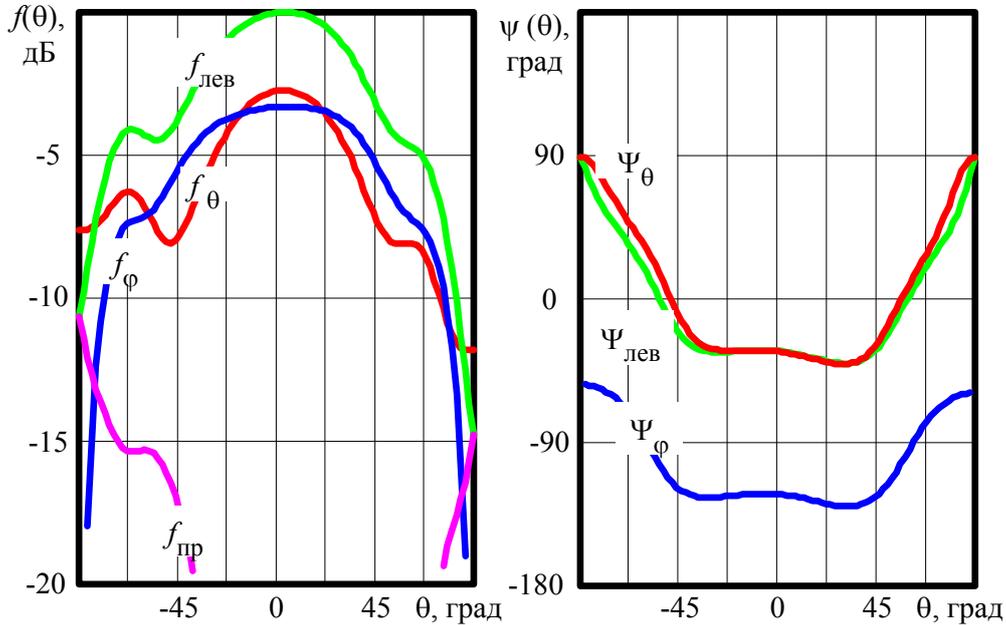


Рисунок 2 – Амплитудные $f(\theta)$ и фазовые $\Psi(\theta)$ ДН спирали основных поляризационных составляющих

Традиционный метод расчета фазового центра [2] основан на аппроксимации фазовой характеристики направленности окружностью, центр которой и определяет фазовый центр антенны. Однако при значительном угловом изменении фазовой характеристики направленности, как в рассматриваемом случае, данный метод малопригоден, поскольку в пределах ширины главного лепестка ДН фазовая характеристика направленности аппроксимируется окружностью с большой погрешностью.

Для нахождения локального фазового центра антенны в работе предлагается новый метод расчета, суть которого состоит в последовательном построении аппроксимирующих окружностей, но не по всей фазовой характеристике направленности, а по трем близко расположенным точкам. На основании рассчитанных значений $\Psi_e(R, \varphi, \theta)$ формируются массивы данных x_i, z_i и y_i, z_i , например, для анализа положения локального фазового центра от угла наблюдения

$$\begin{aligned} x_i, z_i &\leftarrow \Psi_{e_i}(R = \text{const}, \varphi = 0, \theta_i); \\ y_i, z_i &\leftarrow \Psi_{e_i}(R = \text{const}, \varphi = \pi/2, \theta_i). \end{aligned}$$

Далее, составляются и решаются системы уравнений, относительно неизвестных параметров окружности x_0, z_0, R_0^x и y_0, z_0, R_0^y , где x_0, y_0, z_0 – координаты локального фазового центра, а R_0^x, R_0^y – проекции радиуса кривизны фазовой характеристики направленности на соответствующие плоскости ZX и ZY

$$\begin{cases} (x_i - x_0)^2 + (z_i - z_0)^2 = (R_0^x)^2; \\ (x_{i+1} - x_0)^2 + (z_{i+1} - z_0)^2 = (R_0^x)^2; \\ (x_{i+2} - x_0)^2 + (z_{i+2} - z_0)^2 = (R_0^x)^2, \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} (y_i - x_0)^2 + (z_i - z_0)^2 = (R_0^y)^2; \\ (y_{i+1} - x_0)^2 + (z_{i+1} - z_0)^2 = (R_0^y)^2; \\ (y_{i+2} - x_0)^2 + (z_{i+2} - z_0)^2 = (R_0^y)^2. \end{cases} \quad (3)$$

На основании (3) проведены расчеты локального фазового центра антенны в зависимости от координат точки наблюдения, геометрических параметров спирали и частоты возбуждения. Наиболее значимые результаты численного моделирования, полученные для основной поляризационной компоненты электромагнитного поля $E_{\text{лев}}$, в виде графических зависимостей изображены на рис. 3 и 4.

В частности, на рис. 3,а изображены кривые, характеризующие изменение координаты z_0 локального фазового центра спиральной антенны в зависимости от угла θ при различных частотах возбуждения. Согласно этому рисунку положение локального фазового центра в пределах ширины главного лепестка ДН изменяется более чем $0,5\lambda$, где λ – длина волны. Причем надо отметить, что с увеличением частоты возбуждения антенны диапазон изменения координаты z_0 увеличивается.

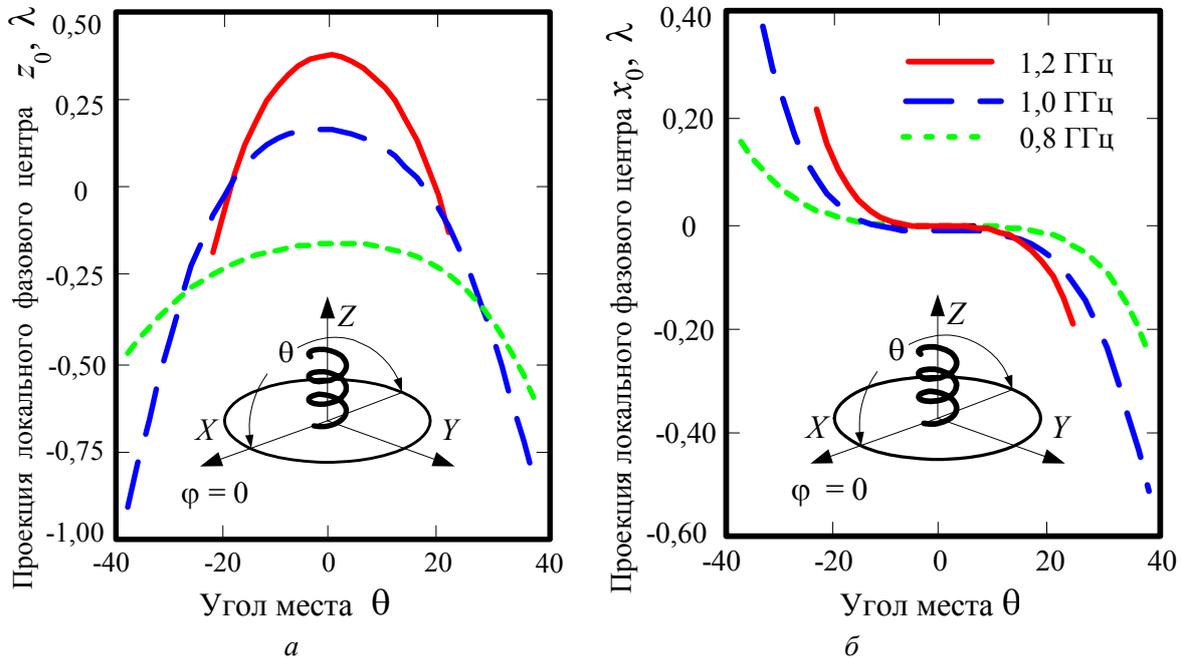


Рисунок 3 – Угловое и частотное смещение локального фазового центра спиральной антенны

Однако, принимая во внимание то, что главный лепесток ДН с увеличением частоты сужается, область изменения положения локального фазового центра также ограничена. На рис. 3,б изображены соответствующие кривые, описывающие изменение координаты x_0 локального фазового

центра также в зависимости от угла θ для различных частот возбуждения антенны. Аналогичный характер носят изменения координаты y_0 локального фазового центра. Из рисунка видно, что локальный фазовый центр перемещается практически симметрично относительно точки возбуждения в рассматриваемой полосе частот. Кроме этого отмечается та же особенность, которая характерна для координаты z_0 – диапазон изменения локального фазового центра тем больше, чем больше угол отклонения от оси антенны.

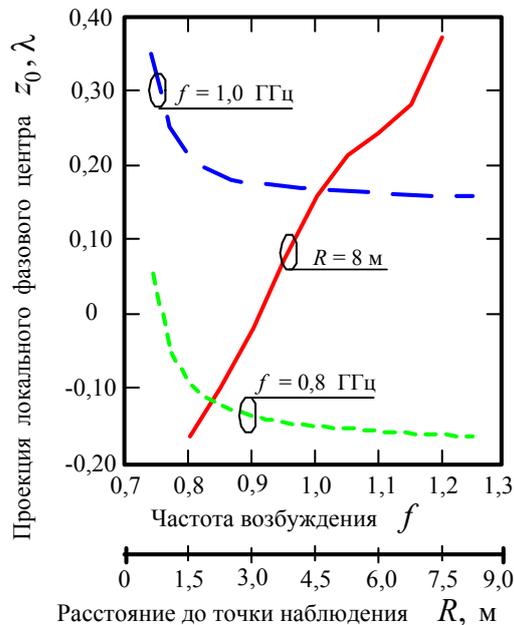


Рисунок 4 – Смещение локального фазового центра антенны от частоты и расстояния до точки наблюдения

На рис. 4 изображены графики, характеризующие изменение координаты z_0 локального фазового центра от частоты возбуждения и от расстояния R до точки наблюдения $Q(R, \varphi, \theta)$ для осевого направления ($\theta = 0$). Из графиков видно, что частотная зависимость координаты z_0 носит практически линейный характер. При увеличении частоты происходит смещение локального фазового центра в направлении излучения. Общее смещение координаты z_0 в пределах рассматриваемой полосы частот

составляет около $0,5\lambda$. Кривые, описывающие изменения локального фазового центра в зависимости от расстояния R , носят явный асимптотический характер. На основании этого факта можно отметить, что в осевом направлении, начиная с определенного расстояния, положение локального фазового центра стабилизируется и дальнейшее изменение происходит лишь в небольших пределах.

Обобщая полученные результаты исследований можно сформулировать следующие выводы:

– для антенн, формирующих сложную векторно-пространственную структуру электромагнитного поля, в частности, для антенн с эллиптической поляризацией излучения анализ местоположения локального фазового центра и его изменение необходимо проводить по основному виду поляризации (кроссполяризационная составляющая электромагнитного поля в рассматриваемом направлении должна быть минимальна);

– для таких антенн положение локального фазового центра изменяется не только в зависимости от относительных конструктивных параметров антенны (включая частоту возбуждения), но и положения рассматриваемой точки наблюдения, определяемой координатами сферической системы координат R, φ, θ ;

– существенные изменения (относительно длины волны) положения локального фазового центра антенны наблюдаются с изменением углов наблюдения φ, θ даже в пределах ширины амплитудной ДН и частоты возбуждения, а соответствующие изменения от расстояния R носят асимптотический характер, что в дальнейшем можно использовать для анализа дальней зоны антенны.

Основываясь на полученных результатах, основное направление дальнейших исследований состоит в разработке оптимальных антенных систем с управляемой поляризацией излучения в виде многолучевых адаптивных антенных решеток, многолучевых зеркальных антенн с учетом местоположения локальных фазовых центров, излучающих элементов.

Литература

1. *Пространственно-временная обработка радиосигналов* / И.Я. Кремер, А.И. Кремер, В.М. Петров и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
2. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
3. *Проценко М.Б., Нестерук С.В.* Анализ фазовых характеристик направленности антенн с эллиптической поляризацией излучения // Мат. 16-й Меж. конф. КрыМиКо-2006, «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 11-15 сент. 2006. – Севастополь, Украина. – 2006. – С. 449-450.
4. *Лобкова Л.М., Проценко М.Б., Головин В.В.* Управление поляризацией излучения на основе совмещенной цилиндрической спиральной антенны // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – Киев. – 2002. – Т. 45. – № 8. – С.41-48.
5. *Protsenko M. B.* Curved-wire antennas solution technique // Proc. of IX-th Intern. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2002), 10-13 Sept. 2002. – Kiev, Ukraine. – 2002. – Vol.1. – P. 307–309.
6. *Коротковолновые антенны* / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко, Г.А. Клигер, А.Г. Курашов / Под ред. Г.З. Айзенберга. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.