

УДК 621.396.674.1

Л.М. Лобкова, д-р техн. наук, профессор,

В.В. Головин, канд. техн. наук,

Ю.Н. Тыщук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: v_golovin@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ГИБРИДНО-ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Рассмотрена гибридно-зеркальная антенна, состоящая из параболического зеркала и спирального облучателя с круговой поляризацией первичного поля излучения. Предложена обобщенная математическая модель и выведены формулы для расчета поля излучения гибридно-зеркальных антенн.

Инженерное развитие современных наземных и космических систем радиосвязи привело к необходимости пересмотра критерия оптимального выбора параметров антенн, обращая внимание не только на коэффициент усиления, уровень бокового излучения, коэффициент использования апертуры, но и на поляризационную структуру поля и на частотные характеристики входного сопротивления.

Таким образом, целью данной статьи является развитие направления в построении зеркальных антенн с круговой поляризацией поля излучения и заданными частотными свойствами. Одним из вариантов построения такой антенны является гибридно-зеркальная антенна (ГЗА), состоящая из параболического зеркала и облучателя в виде цилиндрической спирали (рисунок 1).

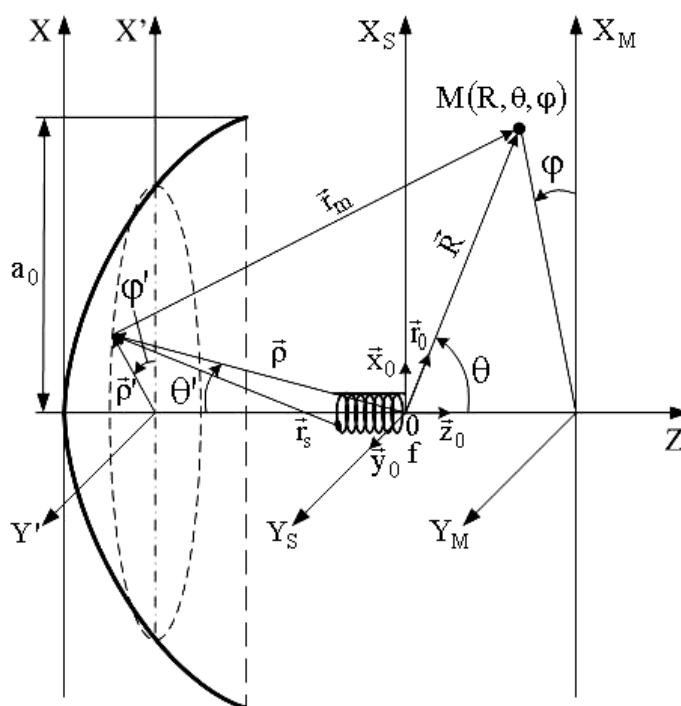


Рисунок 1 — Гибридно-зеркальная антенна с параболическим зеркалом, в фокусе которого расположен цилиндрический спиральный облучатель

Дальнейшее рассмотрение поля излучения ГЗА проводится с учетом расположения облучателя во Френелевской зоне параболического зеркала, что позволяет разработать математическую модель ГЗА как для предельных зеркал (облучатель расположен в плоскости апертуры антенны), так и глубоких, когда фокусное расстояние зеркала f меньше радиуса апертуры a_0 .

При исследовании поляризационной структуры поля излучения ГЗА воспользуемся токовым методом и найдем распределение плотности тока на поверхности параболоида.

Используя результаты работ [1,2] запишем формулу для составляющих магнитного поля в точке $N(\rho, \theta', \phi')$

$$H_N(\rho, \theta', \phi') = \text{rot} \vec{A}, \quad (1)$$

где

$$\frac{\rho}{A} = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\rho(S) \exp(-jk r_S)}{r_S} dS, \quad (2)$$

$I(S) = I_0 \exp(-jk_\phi S)$, $k_\phi = k\xi$, $\xi = \frac{c}{v_\phi} > 1$ — коэффициент замедления волны тока в спиральной структуре;

S — длина спирали;

$$\begin{aligned} r_S &= \sqrt{(x_N - x_S)^2 + (y_N - y_S)^2 + (z_N - z_S)^2}, \\ x_N &= \rho \sin \theta' \cos \varphi'; \quad x_S = a \cos \alpha; \\ y_N &= \rho \sin \theta' \sin \varphi'; \quad y_S = a \sin \alpha; \\ z_N &= -\rho \cos \theta'; \quad z_S = -a \alpha \operatorname{tg} \beta. \end{aligned}$$

Радиус-вектор ρ описывает профиль зеркала и в данном случае $\rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta'}$.

Воспользуемся известным разложением r_S и представим его в виде

$$r_S = \rho - \frac{x_N}{\rho} x_S - \frac{y_N}{\rho} y_S - \frac{z_N}{\rho} z_S.$$

Тогда можем записать

$$\frac{e^{-jk r_S}}{r_S} = \frac{e^{-jk \rho}}{\rho} \exp[jk(\sin \theta' \cos \varphi' \cos \alpha - \sin \theta' \sin \varphi' \sin \alpha - \alpha \cos \theta' \operatorname{tg} \beta)]. \quad (3)$$

После подстановки (3) в (2), выполняя дифференцирование и преобразования (1) по аналогии с [1], получаем формулы для составляющих $H_{X'}$. Учитывая, что составляющие нормали $\vec{n}$ к поверхности зеркала равны

$$n_X = -\sin \theta' \cos \varphi'; \quad n_Y = -\sin \theta' \sin \varphi'; \quad n_Z = \cos \theta',$$

получаем следующие выражения для составляющих поверхностной плотности тока:

$$\left. \begin{aligned} J_{X'} &= -H_{Z'} \sin \theta' \sin \varphi' - H_{Y'} \cos \theta'; \\ J_{Y'} &= H_{X'} \cos \theta' + H_{Z'} \sin \theta' \cos \varphi'; \\ J_{Z'} &= -H_{Y'} \sin \theta' \cos \varphi' + H_{X'} \sin \theta' \sin \varphi'. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом, можем записать формулу для поля излучения ГЗА в точке наблюдения $M(R, \theta, \varphi)$ в виде

$$\vec{E}(R, \theta, \varphi) = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \iint_S \left[\vec{\rho}_0 \left[\vec{J}_S \cdot \vec{\rho}_0 \right] \right] \frac{\exp(-jk r_M)}{r_M} dS, \quad (5)$$

где r_M представим в виде разложения, справедливого в зоне Френеля:

$$r_M = R + C(\theta, \theta') + A(\theta, \theta') \cos(\varphi - \varphi') - B(\theta, \theta') \cos^2(\varphi - \varphi'); \quad (6)$$

$$A(\theta, \theta') = -\frac{\rho^2}{R} \sin \theta \sin \theta' \cos \theta \cos \theta' - R \sin \theta \sin \theta';$$

$$B(\theta, \theta') = -\frac{\rho^2}{R} \sin^2 \theta \sin^2 \theta';$$

$$C(\theta, \theta') = \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{R} (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \theta') - R \cos \theta \cos \theta'.$$

Следовательно, (5) после подстановки (6) примет вид:

$$\begin{aligned} \vec{E}(R, \theta, \varphi) &= -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \iint_S \left[\vec{\rho}_0 \left[\vec{J}_S \cdot \vec{\rho}_0 \right] \right] \times \\ &\times \exp\left\{ -jk \left[C(\theta, \theta') + A(\theta, \theta') \cos(\varphi - \varphi') - B(\theta, \theta') \cos^2(\varphi - \varphi') \right] \right\} dS. \end{aligned} \quad (7)$$

В формуле (7) интегрирование ведется по поверхности параболоида вращения, для которого элементарная площадка dS определяется формулой

$$dS = \frac{\sqrt{P^2 - \rho'^2} \cdot \rho' d\rho' d\varphi'}{P}, \quad (8)$$

где $P = 2f$.

Векторное произведение равно

$$\begin{aligned}
[\rho_0 [J_S \cdot \rho_0]] = & \rho_X \left\{ J_{X'} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi) - \frac{1}{2} J_{Y'} \sin^2 \theta \sin 2\varphi - \right. \\
& - \frac{1}{2} J_{Z'} \sin 2\theta \cos \varphi \left. \right\} + \rho_{Y'} \left\{ J_{Y'} (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) - \right. \\
& - \frac{1}{2} J_{X'} \sin^2 \theta \sin 2\varphi - \frac{1}{2} J_{Z'} \sin 2\theta \sin \varphi \left. \right\} + \\
& + \rho_{Z'} \left\{ J_{Z'} \sin^2 \theta - \frac{1}{2} J_{X'} \sin 2\theta \cos \varphi - \frac{1}{2} J_{Y'} \sin 2\theta \sin \varphi \right\}.
\end{aligned} \quad (9)$$

Интегрирование в (7) выполняется по $d\varphi'$ в пределах от 0 до 2π , а по $d\rho'$ — от 0 до радиуса апертуры a_0 , при этом необходимо осуществить замену θ' в подынтегральной функции на ρ' , с учетом того, что, с одной стороны

$$\rho = \frac{(2f)^2 + \rho'^2}{2f},$$

а с другой

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta'}.$$

Тогда получаем:

$$\cos \theta' = \frac{P^2 - \rho'^2}{P^2 + \rho'^2},$$

$$\sin \theta' = \frac{2P\rho'}{P^2 + \rho'^2}.$$

На основании (7), (4) можем найти составляющие поля $\vec{E}(x, y, z)$ в декартовой системе координат в виде:

$$\begin{aligned}
E_X = A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{a_0} & \left\{ J_{X'} (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi) - \frac{1}{2} J_{Y'} \sin^2 \theta \sin 2\varphi - \right. \\
& - \frac{1}{2} J_{Z'} \sin 2\theta \cos \varphi \left. \right\} \exp(-jkq(\rho', \varphi', \theta, \varphi)) \sqrt{P^2 - \rho'^2} \rho' d\rho' d\varphi';
\end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
E_Y = A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{a_0} & \left\{ J_{Y'} (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) - \frac{1}{2} J_{X'} \sin^2 \theta \sin 2\varphi - \right. \\
& - \frac{1}{2} J_{Z'} \sin 2\theta \sin \varphi \left. \right\} \exp(-jkq(\rho', \varphi', \theta, \varphi)) \sqrt{P^2 - \rho'^2} \rho' d\rho' d\varphi';
\end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
E_Z = A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{a_0} & \left\{ J_{Z'} \sin^2 \theta - \frac{1}{2} J_{X'} \sin 2\theta \cos \varphi - \right. \\
& - \frac{1}{2} J_{Y'} \sin 2\theta \sin \varphi \left. \right\} \exp(-jkq(\rho', \varphi', \theta, \varphi)) \sqrt{P^2 - \rho'^2} \rho' d\rho' d\varphi'.
\end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{Здесь } A_0 = -j \frac{\omega \mu_0 \exp(-j k R)}{4\pi P R}; \quad P = 2f; \quad \rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta'} = \frac{2f}{1 + \frac{P^2 - \rho'^2}{P^2 + \rho'^2}};$$

$$\begin{aligned}
q(\rho', \varphi', \theta, \varphi) = & \left\{ \frac{1}{2} \frac{\rho'^2}{R} \left[1 - \left(\frac{P^2 - \rho'^2}{P^2 + \rho'^2} \right)^2 \cdot \cos^2 \theta \right] - R \frac{P^2 - \rho'^2}{P^2 + \rho'^2} \cos \theta \right\} - \\
& - \left[\frac{\rho'^2}{R} \frac{(P^2 - \rho'^2) 2P\rho'}{(P^2 + \rho'^2)^2} \cdot \sin \theta \cos \theta + R \frac{2P\rho'}{P^2 + \rho'^2} \sin \theta \right] \cos(\varphi - \varphi') -
\end{aligned}$$

$$-\frac{1}{2} \frac{\rho^2}{R} \left(\frac{2P\rho'}{P^2 + \rho'^2} \right)^2 \sin^2 \theta \cos^2(\varphi - \varphi').$$

Далее, переходя к сферической системе координат, можем записать соотношения для E_θ и E_φ составляющих поля в виде:

$$\left. \begin{aligned} E_\theta &= E_X \cos \theta \cos \varphi + E_Y \cos \theta \sin \varphi - E_Z \sin \theta; \\ E_\varphi &= E_Y \cos \varphi - E_X \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Полученные формулы (4), (13), (10) — (12) позволяют исследовать поляризационную структуру поля излучения параболической антенны как с облучателем, создающим первичное поле круговой поляризации (цилиндрическая спираль), так и с рупорным облучателем, первичное поле которого представляет линейно-поляризованную волну.

Таким образом, предложена математическая модель гибридно-зеркальной антенны с основным зеркалом в виде параболоида вращения и облучающей системой, создающей поляризацию поля излучения от круговой до линейной.

На основании разработанной модели ГЗА удастся рассчитать эффекты появления кросс поляризации и определить степень ее зависимости от геометрических параметров антенны, в первую очередь от отношения диаметра апертуры $2a_0$ к ее фокусному расстоянию f .

Дальнейшие исследования с применением разработанной математической модели предполагается вести в направлении сравнительного анализа поляризационных характеристик параболического и сферического зеркальных антенн с различными спиральными облучателями.

Библиографический список

1. Лобкова Л.М. Математическая модель поля излучения эллиптических спиральных антенн и оптимизация их параметров / Л.М. Лобкова, М.Б. Проценко, М.В. Ивашина // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 1999. — Т. 42. — № 9. — С. 37 — 43.
2. Лобкова Л.М. Поляризационная структура поля сферической антенны с осесимметричным расположением облучателя / Л.М. Лобкова, В.В. Головин, Ю.Н. Тыщук // Вестник СевГТУ: сб. научн. тр. — Севастополь, 2005. — Вып. 68. — С. 115 — 121.

Поступила в редакцию 23.03.2007 г.