

УДК 621.396.67

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

В.В. Головин, канд. техн. наук; Ю.Н. Тыщук

*Севастопольский национальный технический университет, кафедра радиотехники
99053, г. Севастополь, Стрелецкая балка, Студгородок*

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНО-ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ДВУХЭЛЕМЕНТНЫМ СПИРАЛЬНЫМ ОБЛУЧАТЕЛЕМ

Получены выражения для определения характеристик излучения гибридной однозеркальной антенны с двухэлементным облучателем, расположенным на конформной поверхности. Приведены результаты теоретического исследования характеристик излучения гибридно-зеркальной антенны.

Современный уровень радиотехнических средств связи и вещания предъявляют высокие требования к разработке гибридно-зеркальных антенн (ГЗА), обусловленные спецификой построения наземных и космических систем радиосвязи.

Характеристики ГЗА определяются прежде всего ее облучающей системой, а создание первичного облучателя является одной из наиболее сложных задач при построении ГЗА.

Одним из перспективных методов разработки облучающей системы ГЗА является построение антенной решетки из спиральных излучателей. Спиральные антенны при относительно малых размерах позволяют сформировать диаграмму направленности (ДН) с шириной главного лепестка по уровню -10 дБ от 40° до 160°. При построении антенной решетки из спиралей с синфазным возбуждением за счет подбора пространственной ориентации точек питания излучателей относительно друг друга можно осуществлять регулировку фазовой структуры поля излучения АР. Также подбором углов поворота спиралей можно компенсировать фазовые ошибки, возникающие вследствие неточности установки облучателя большого зеркала. Кроме того, спиральные антенны обеспечивают высокие характеристики направленности и согласования в широкой полосе частот. Следует отметить также, что их согласование на входе можно улучшить за счет подбора конструктивных параметров спиралей.

Хорошо изученные спиральные антенны до сих пор практически не рассматривались с позиции применения их в качестве элементов облучателя ГЗА. Это связано с трудностями математического описания поля вращающейся поляризации вблизи поверхности большого зеркала, формируемого решеткой спиралей с заданной геометрией.

Предлагаемая методика построения гибридно-зеркальной антенны ба-

зируется на схеме построения антенны Кассегрена, в которой облучающая система заменяется конформной решеткой спиральных излучателей.

Ориентация оси первичного излучателя была выбрана вдоль вектора $\vec{\rho}$ (см. рисунок 1). Расстояние r согласно [1] было представлено в виде:

$$r \cong R + C(\theta_1, \theta_2) + A(\theta_1, \theta_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - B(\theta_1, \theta_2) \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где

$$A(\theta_1, \theta_2) = -\frac{\rho^2}{R} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \rho \sin \theta_1 \sin \theta_2;$$

$$B(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{R} \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2;$$

$$C(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{R} (1 - \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2) - \rho \cos \theta_1 \cos \theta_2.$$

Дальнейшее исследование проводилось для случая круговой цилиндрической спирали, геометрия которой в параметрическом виде описывается следующими выражениями [2,3]:

$$x = a \cos \alpha; \quad y = b \sin \alpha; \quad z = a \alpha \operatorname{tg} \beta; \quad S = a \alpha \sec \beta.$$

Для определения магнитной составляющей поля $H_M(r, \theta_s, \varphi_2)$ вблизи поверхности большого зеркала использовалось соотношение

$$\vec{H}_M = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{A}, \quad (1)$$

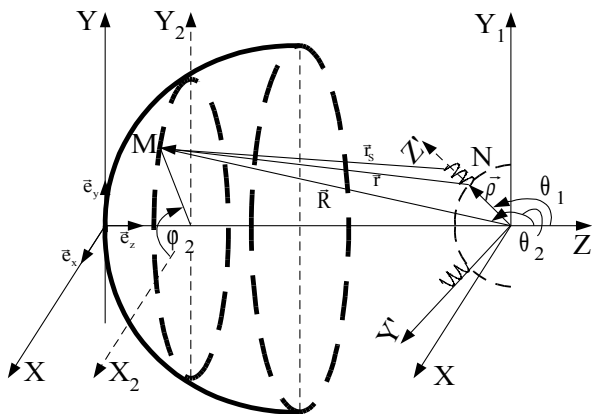


Рисунок 1 – Геометрия гибридно-зеркальной антенны:

$N(\rho, \varphi_1, \theta_1)$ - точка местоположения излучателя на поверхности малого зеркала;

$M(R, \varphi_2, \theta_2)$ - текущая точка на поверхности параболоида;

r - расстояние между точками N и M

где векторный потенциал $\vec{A}$ представлен в виде:

$$\vec{A} = \frac{1}{4\pi} \int_S \vec{I}(S) \frac{\exp(-jkr_s)}{r_s} dS. \quad (2)$$

Здесь

$$I(S) = I_0 \exp(-j k_\phi S); \quad k_\phi = k \xi; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \xi = \frac{c}{v_\phi}.$$

На основании (1) и (2) в [1] получены выражения для составляющих магнитного поля

$$H_x = \frac{a}{4\pi} K(R) N(R) [J_1 \sin \theta_2 \sin \varphi_2 - J_2 \cos \theta_2];$$

$$H_y = -\frac{a}{4\pi} K(R) \cdot N(R) \cdot [J_3 \cos \theta_2 + J_1 \sin \theta_2 \cos \varphi_2 \tan \beta];$$

$$H_z = \frac{a}{4\pi} K(R) N(R) \sin \theta_2 [J_2 \cos \varphi_2 + J_3 \sin \varphi_2],$$

где $J_1 = \int_0^{\alpha_n} B \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha} d\alpha; \quad J_2 = \int_0^{\alpha_n} B \cos \alpha d\alpha; \quad J_3 = \int_0^{\alpha_n} B \sin \alpha d\alpha;$

$$K(R) \approx \frac{\exp(-jkr)}{R}; \quad N(R) = C_1 + A_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + B_1 \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2);$$

$$A_1 = -jk \frac{\rho^2}{R^2} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2; \quad B_1 = -jk \frac{\rho^2}{2 \cdot R^2} \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2;$$

$$C_1 = -\frac{1}{R} - jk + jk \frac{\rho^2}{2R^2} (1 - \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2).$$

Согласно [1] для решетки из двух излучателей будем иметь:

$$H_x = H_{x1} + H_{x2}; \quad H_y = H_{y1} + H_{y2}; \quad H_z = H_{z1} + H_{z2}.$$

Для определения поверхностной плотности тока $\vec{J}_s(x, y, z)$ воспользуемся приближением физической оптики, согласно которому элементы поверхности зеркала можно представить в виде плоскости, касательной в точке отражения падающего луча.

Согласно [1] выражения для составляющих плотности тока на зеркале можно записать следующим образом:

$$J_x = -H_z \sin \frac{\Psi}{2} \sin \varphi_2 - H_y \cos \frac{\Psi}{2};$$

$$J_y = H_x \cos \frac{\Psi}{2} + H_z \sin \frac{\Psi}{2} \cos \varphi_2;$$

$$J_z = -H_y \sin \frac{\Psi}{2} \cos \varphi_2 + H_x \sin \frac{\Psi}{2} \sin \varphi_2.$$

Для исследования поляризационной структуры поля антенны в дальней зоне использовалось соотношение $\vec{E} = -j\omega (A_\theta \vec{\theta} + A_\phi \vec{\phi})$, где составляющие векторного потенциала A_θ и A_ϕ в сферической системе координат могут быть представлены через A_x, A_y, A_z :

$$A_\theta = A_x \cos \theta \cos \phi + A_y \cos \theta \sin \phi - A_z \sin \theta ;$$

$$A_\phi = -A_x \sin \phi + A_y \cos \phi .$$

В дальнейшем исследовались составляющие E_θ и E_ϕ , которые с точностью до постоянных коэффициентов равны $E_\theta = A_\theta$, $E_\phi = A_\phi$.

Составляющие векторного потенциала A_x, A_y, A_z согласно [4] описываются соотношениями:

$$A_x = -\frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \left\{ \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{\rho^2}{p} q_2 H_z \sin \phi_2 d\rho_2 d\phi_2 + \int_0^a \int_0^{2\pi} H_y q_2 \rho_2 d\rho_2 d\phi_2 \right\} ;$$

$$A_y = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \left\{ \int_0^a \int_0^{2\pi} H_x q_2 \rho_2 d\rho_2 d\phi_2 + \int_0^a \int_0^{2\pi} H_z \frac{\rho^2}{p} q_2 \cos \phi_2 d\rho_2 d\phi_2 ; \right.$$

$$A_z = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \left\{ - \int_0^a \int_0^{2\pi} H_y \frac{\rho^2}{p} q_2 \cos \phi_2 d\rho_2 d\phi_2 + \int_0^a \int_0^{2\pi} H_x \frac{\rho^2}{p} q_2 \sin \phi_2 d\rho_2 d\phi_2 . \right.$$

Здесь

$$q_2 = \exp(-jk \cos \theta) \exp[-jk[C(\theta, \psi) + A(\theta, \psi) \cos(\phi - \phi_2) + B(\theta, \psi) \cos^2(\phi - \phi_2)] ;$$

$$A(\theta, \psi) = \frac{R^2}{r_0} \sin \theta \sin \psi \cos \theta \cos \psi - R \sin \theta \sin \psi ; B(\theta, \psi) = \frac{1}{2} \frac{R^2}{r_0} \sin^2 \theta \sin^2 \psi$$

;

$$C(\theta, \psi) = \frac{1}{2} \frac{R^2}{r_0} (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \psi) + R \cos \theta \cos \psi .$$

Для проведения расчетов было выбрано зеркало с $D=41\lambda$, $\Psi_0=120^\circ$ и $F=19\lambda$. С использованием приведенной в [1] математической модели поля излучения спиральной антенны были определены ее геометрические параметры, при которых ширина главного лепестка ДН составляла $110^\circ \dots 120^\circ$. Все расчеты проводились на частоте $f=11,36$ ГГц.

Радиус цилиндра спирали выбирался равным $a=6$ мм, как условие формирования осевого излучения с поляризацией близкой к круговой.

Поставленным требованиям к ширине ДН спиральной антенны удовлетворяют структуры со следующими параметрами: угол наклона намотки витков $\beta = 11^\circ \dots 22^\circ$, число витков $n = 2 \dots 4$.

Для проверки полученных результатов были проведены экспериментальные исследования. Измерения проводились методом “вышки”. В качестве вспомогательной приемной антенны использовался рупор линейной поляризации, расстояние от него до исследуемой антенны удовлетворяет условию дальней зоны.

Было также проведено теоретическое исследование распределения плотности тока, формируемого на поверхности большого зеркала.

Расчеты проводились для ГЗА с одноэлементным облучателем, а также с облучателем в виде двухэлементной решетки, спирали в которой расположены симметрично относительно фокальной оси главного зеркала. Анализ проводился по составляющим тока J_x , J_y и J_z в плоскостях XOZ и YOZ.

Расположение спиралей на поверхности малого зеркала осуществлялось согласно методики, описанной в [4].

Наиболее близкое к требуемому в [4] распределение тока можно получить при использовании двухэлементного облучателя. Спирали располагаются симметрично относительно фокальной оси, параллельно друг другу. Для коррекции амплитудно-фазового распределения тока на зеркале следует проворачивать спирали вокруг своей оси вращения, смещая их на некоторые углы γ_{SI} и γ_{SH} относительно исходного положения. Одновременно с этим следует смещать спирали параллельно фокальной оси большого зеркала на некоторые расстояния Δz_I и Δz_{II} из их начального положения на гиперболической поверхности.

Результаты теоретического расчета распределения токов на поверхности зеркала и соответствующие им диаграммы направленности изображены на рисунке 2.

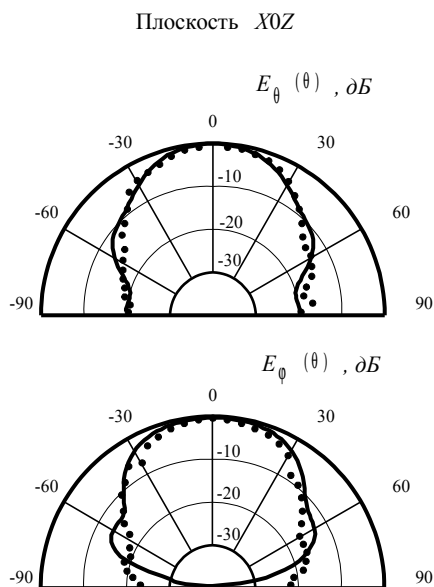


Рисунок 2 – Диаграммы направленности одиночной круговой спиральной антенны: сплошная линия – теория; пунктирная линия – эксперимент

На рисунке 3 изображена ДН зеркальной антенны, полученная при использовании спиралей со следующей геометрией: $n=3$, $\beta=15^\circ$, $\theta_1=170^\circ$, $\theta_n=180^\circ$. При использовании излучателя с $\beta=14^\circ$ и $\beta=17^\circ$ боковое излучение существенно возрастает, поэтому допустимые значения угла β лежат в пределах от 15° до 16° . Угловая зависимость коэффициента эллиптичности (КЭ) при $\beta=15^\circ$ следующая: на краю главного лепестка КЭ принимает значение 0,72, в максимуме ДН – 0,96. В результате коррекции амплитудно-фазового распределения тока на зеркале при $\beta=15^\circ$ получен КНД=42 дБ

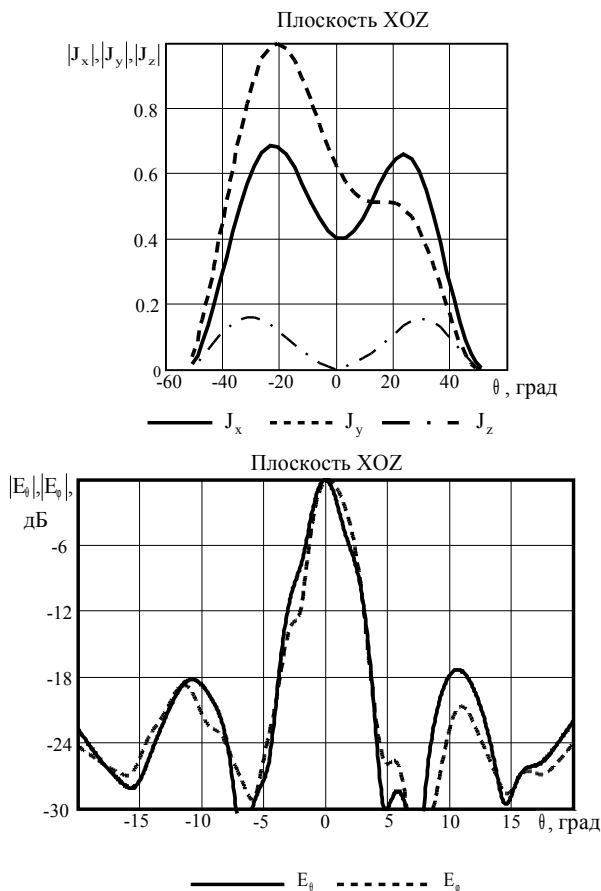


Рисунок 3 – Распределение амплитуды тока на зеркале и диаграмма направленности гибридной зеркальной антенны с двухэлементным облучателем; геометрические параметры спиралей: $a=6$ мм; $n=3$; $\beta=15^\circ$; $\theta_1=170^\circ$; $\theta_n=180^\circ$

при задании параметров точек питания спиралей в пределах: $\gamma_{SI} = -15^\circ \dots -20^\circ$, $\gamma_{SH} = -155^\circ \dots -160^\circ$, $z_I = -59 \dots -59,5$ мм, $z_{II} = -46,5 \dots -47,5$ мм.

Анализ частотных свойств ГЗА показал, что построенный на основе двух спиралей облучатель позволяет перекрыть полосу частот $\frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100\% = 9\%$. С ростом частоты ширина главного лепестка ДН по E_θ , E_ϕ

уменьшается в плоскости XOZ на $0,2^\circ \dots 0,4^\circ$, а в плоскости YOZ – на $0,9^\circ \dots 1,2^\circ$; КНД убывает на крайних частотах на 1,2 и 6,5 дБ, поляризационная структура поля излучения от частоты практически не зависит.

Таким образом, была разработана математическая модель гибридно-зеркальной антенны, позволяющая рассчитать распределение плотности тока на поверхности зеркала и соответствующие им диаграммы направленности, а также выбрать геометрические параметры облучателя для получения необходимых характеристик излучения. Характеристики разработанной антенны позволяют использовать ее в системах космической и наземной связи.

На основании полученных результатов в дальнейшем планируется провести исследование возможности построения многолучевых антенн и антенн со сканирующим лучом на базе параболических и сферических зеркал, использующих в качестве облучателя решетку из спиральных излучателей.

Библиографический список

1. Лобкова Л.М. Метод анализа характеристик поля излучения однозеркальной гибридно-зеркальной антенны / Л.М. Лобкова, В.В. Головин, Ю.Н. Тыщук // Вест. СевГТУ. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 47. — С. 88–94.
2. 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.
3. Generalized model of radiation field of elliptical helical antennas/ L.M. Lobkova, M.B. Protsenko, M.V. Ivashina, V.V. Molchanov // Proc. Int. Symp. on Antenna Theory and Techniques, Davos, Switzerland, 9-14 April 2000 y. — Davos, 2000. — P. 76.
4. Лобкова Л.М. Метод построения облучающей системы однозеркальной гибридно-зеркальной антенны / Л.М. Лобкова, В.В. Головин, М.А. Бороменкова // Вест. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 47. — С. 95–102.

Поступила в редакцию 20.02.2004 г.