

---

УДК 621.396.677

А.В. Ирха<sup>1</sup>, Г.В. Ермаков<sup>2</sup>, А.В. Ченькаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харьковський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків,

<sup>2</sup> Національний технічний університет «ХПІ», Харків,

<sup>3</sup> Военная служба правопорядка, Харків

## МЕТОД РАСЧЕТА ПИКОВОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПРИ УЧЕТЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ С ОБЛУЧАТЕЛЕМ ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

*Предложен метод расчета пиковой диаграммы направленности зеркальной антенны с круговой поляризацией с учетом взаимного влияния рефлектора и облучателя при излучении сверхширокополосных сигналов. Метод предполагает учет фазовых и поляризационных соотношений составляющих полей, излучаемых конической спиральной антенной. Ошибки, возникающие при проведении расчетов численными методами, усредняются и при выборе характерных размеров ячеек, на которые разбивается поверхность интегрирования, получаемую точность можно считать удовлетворительной.*

**Ключевые слова:** пиковая диаграмма направленности, сверхширокополосный сигнал, взаимное влияние, плотность поверхностного тока.

### Введение

**Анализ литературы.** При создании антенных систем для РТС специального назначения для того, чтобы избежать потерь по поляризации, целесообразно в качестве облучателя зеркальной антенны использовать спиральную антенну. При рассмотрении сверхширокополосного (СШП) сигнала с шири-

ной полосы  $\Delta f = 4,5 \div 5,5$  ГГц в качестве облучателя зеркальной антенны можно использовать коническую спиральную антенну с коэффициентом перекрытия  $K_{\Pi} = 1,2$  [1].

Для описания направленных свойств антенн при излучении СШП сигналов пользуются, как правило, понятием пиковой диаграммой направленности амплитуде – зависимость максимального зна-

чения излученного поля от угловых координат  $E_{\max}(t, \Theta, \varphi)$ , определяющих положение точки наблюдения. Необходимо отметить, что определение пиковой ДН отличается от традиционно определяемой ДН для гармонических сигналов.

Облучатель, находящийся в поле волны, отраженной от зеркала, влияет на уровень бокового излучения и коэффициент направленного действия антенной системы. Рефлектор, в свою очередь также влияет на работу облучателя. Это влияние проявляется в том, что облучатель принимает часть энергии, отраженной от зеркала. Поэтому, если до помещения в зеркало облучатель был согласован с фидером, то при наличии зеркала в фидере возникнет отраженная волна, т.е. произойдет рассогласование облучателя с фидером.

Поэтому целью настоящей статьи является разработка метода расчета пиковой ДН зеркальной антенны с учетом взаимного влияния рефлектора и облучателя в виде конической спиральной антенны.

### Основная часть

Учитывая тот факт, что размеры короткоимпульсной зеркальной антенны являются большими в сравнении с рабочими длинами волн спектральных составляющих СШП сигнала (диаметр  $d=0,5$  м), для расчета плотности поверхностного тока и в последующем ее пространственных характеристик целесообразно использовать метод уточнения приближения физической оптики [2].

Рассмотрим случай возбуждения зеркальной антенны с помощью облучателя в виде конической спирали гауссоидой тока единичной амплитуды и длительностью  $\tau_n = 1$  нс.

Форма импульса тока, возбуждающего облучатель, описывается зависимостью [3]:

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t^2}{2a^2}\right),$$

где  $A=1$  – амплитуда импульса,  $t$  – время, отсчитываемое с момента возбуждения,  $a$  – половина длительности импульса, определяемая по уровню 0,606.

Спектр сигнала, нормированный к максимальному значению, представлен на рис. 1 и описывается зависимостью:

$$I(\omega) = A\sqrt{2\pi a} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2(1/a)^2}\right).$$

При разработке метода определения ДН СШП зеркальной антенны, который позволяет учитывать взаимодействие рефлектора и облучателя, предлагается использовать итерационную процедуру определения напряженности электрического поля, которая отличается от предложенной в [4] учетом фазовых соотношений, характерных для круговой поляризации поля, возбуждающего рефлектор. Кроме этого,

в отличие от [4], при расчете поля антенны в дальней зоне будем учитывать эффект затенения зеркала антенны сеточным экраном облучателя.

На рис. 2 представлены основные расчетные обозначения.

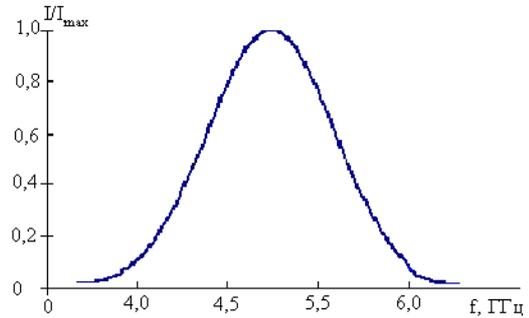


Рис. 1. Нормированный амплитудно-частотный спектр СШП сигнала

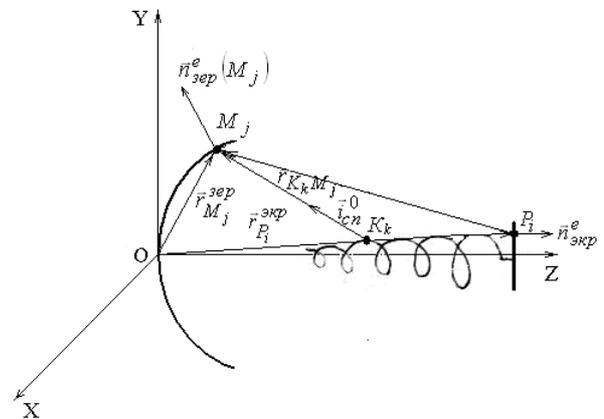


Рис. 2. Расчетные обозначения

Прежде чем изложить суть итерационной процедуры, сделаем ряд предварительных расчетов, касающихся геометрии предложенной антенной системы.

1. Фазовый центр спирали совпадает с фокусом зеркальной антенны.
2. При проведении расчетов предполагается использование метода отсечки токов, при котором различные спектральные составляющие излучаются различными витками спирали, т.е. теми, диаметр которых совпадает с длиной волны.

3. Для минимальной длины волны дальняя зона будет  $r > \frac{2(2R_{\min})^2}{\lambda_{\min}} = 0,006$  м, для максимальной

длины волны –  $r > \frac{2(2R_{\max})^2}{\lambda_{\max}} = 0,007$  м, т.е. с учетом фокусного расстояния очевидно, что облучатель находится в дальней зоне относительно рефлектора.

Суть метода состоит в следующем.

I итерация.

1. Определение составляющих напряженностей электрического и магнитного полей  $\vec{E}_{\Theta}(\omega), \vec{E}_{\varphi}(\omega)$ ,

$\dot{H}_\Theta(\omega), \dot{H}_\Phi(\omega)$ , излучаемых конической спиральной антенной, с учетом поляризационных и фазовых характеристик.

В дальней зоне для основной гармоники, излучаемой спиральной антенной, при осевом излучении получим [5]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_\Theta(\omega) &= \dot{E}_0(\omega) e^{-j\varphi_\omega} \frac{\sin \psi(0)}{\psi(0)}, \\ \dot{E}_\Phi(\omega) &= j\dot{E}_0(\omega) e^{-j\varphi_\omega} \frac{\sin \psi(0)}{\psi(0)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{E}_0(\omega) = -j \frac{\omega \mu}{4\pi r_{K_k M_j}} e^{-jk r_{K_k M_j}}$  – напряженность

электрического поля источника без учета направленных свойств спирали;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\varphi_\omega$  – фаза спектральной составляющей;

$\psi = \frac{\pi l}{\lambda} (1 - \cos \Theta)$  – обобщенный угол;  $k(\omega) = \omega/c$  – волновое число, соответствующее спектральной составляющей СШП сигнала на частоте  $\omega$ ;  $c$  – скорость света.

Выражения (1) описывают поле правой круговой поляризации, так как  $|\dot{E}_\Theta| = |\dot{E}_\Phi|$ , разность фаз составляет  $+90^\circ$ .

Поляризационная ДН спиральной антенны определяется выражением [5]:

$$F_{\text{пол}} = \left| \frac{E_\Theta}{E_\Phi} \right| \approx \cos \Theta.$$

Напряженность магнитного поля в точке наблюдения, т.е. на поверхности рефлектора, будет:

$$\begin{aligned} \dot{H}_\Theta^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega) &= \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \vec{i}_{\text{сп}}^0 \times \dot{E}_\Theta(M_j, \omega), \\ \dot{H}_\Phi^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega) &= \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \vec{i}_{\text{сп}}^0 \times \dot{E}_\Phi(M_j, \omega), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\epsilon_a, \mu_a$  – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;  $\vec{i}_{\text{сп}}^0 = \vec{r}_{K_k M_j} / |\vec{r}_{K_k M_j}|$  – единичный вектор в направлении от витка спирали до рефлектора; (1) – первая итерация.

2. Определение составляющих плотности поверхностного тока на рефлекторе  $\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega)$  с помощью метода уточнения приближения физической оптики):

$$\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega) = \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(1)}(M_j, \omega) - \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(1)}(M_j, \omega), \quad (3)$$

где  $\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(1)}, \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(1)}$  – плотность поверхностного тока на внутренней (+) и внешней (-) сторонах рефлектора для поляризационных составляющих  $\Theta, \Phi$ , определяемые из интегрального представления:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(1)}(M_j, \omega) + \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(1)}(M_j, \omega) \right) = \\ & = \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^0 \text{зер}(M_j, \omega) - \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{n}_{\text{зер}}^e(M_j) \times \\ & \times \left[ \left( \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(1)}(M, \omega) - \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(1)}(M, \omega) \right) \times \right. \\ & \left. \times \text{grad}_P \left( \exp(-jk(\omega)r_{MM_j}) / r_{MM_j} \right) \right] dS; \end{aligned}$$

где  $\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^0 \text{зер}(M_j, \omega) = 2\vec{n}_{\text{зер}}^e(M_j) \times \dot{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega)$  – плотность поверхностного тока на освещенной стороне в приближении физической оптики для обеих поляризационных составляющих  $H_\Theta, H_\Phi$ ;  $\vec{n}_{\text{зер}}^e(M_j)$  – внешняя нормаль к зеркалу в точке  $M_j$ ;  $M_j, M$  – точка наблюдения и интегрирования соответственно;  $S$  – поверхность интегрирования, представляющая собой всю площадь рефлектора; расстояние между точками наблюдения и интегрирования –

$$r_{MM_j} = \sqrt{(x_M - x_{M_j})^2 + (y_M - y_{M_j})^2 + (z_M - z_{M_j})^2}.$$

Для учета поляризационных различий, расчет проводится отдельно для  $\Theta$ - и  $\Phi$ -составляющих поля.

3. Расчет напряженности магнитного поля, излучаемого рефлектором, вблизи сеточного экрана:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{экp}(1)}(P_1, \omega) &= \dot{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{i экp}(1)}(P_1, \omega) + \\ & + \frac{1}{4\pi} \int_{S_{\text{зер}}} \left\{ \text{grad}_{M_j} \left( \exp[-jk(\omega)r_{P_1 M_j}] / r_{P_1 M_j} \right) \times \right. \\ & \left. \times \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega) \right\} dS_{\text{зер}}, \end{aligned}$$

где  $\dot{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{i экp}(1)}(P_1, \omega) = \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \frac{\vec{r}_{P_1 M_j}}{|\vec{r}_{P_1 M_j}|} \times \dot{E}_{(\Theta, \Phi)}(M_j, \omega)$  – на-

пряженность магнитного поля, возбуждаемого спиралью, вблизи зеркала.

4. Определение плотности поверхностного тока на экране:

$$\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{экp}(1)}(P_1, \omega) = \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{экp}(1)}(P_1, \omega) - \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{экp}(1)}(P_1, \omega), \quad (4)$$

где  $\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{экp}(1)}, \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{экp}(1)}$  – плотность поверхностного тока на внутренней (+) и внешней (-) сторонах сетчатого экрана для поляризационных составляющих  $\Theta, \Phi$ , определяемые из интегрального представления:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{экp}(1)}(P_1, \omega) + \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{экp}(1)}(P_1, \omega) \right) = \\ & = \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^0 \text{экp}(P_1, \omega) - \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{n}_{\text{экp}}^e(P_1) \times \end{aligned} \quad (5)$$

$$\times \left[ \left( \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{экp}(1)}(P, \omega) - \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{экp}(1)}(P, \omega) \right) \times \right. \\ \left. \times \text{grad}_P \left( \exp(-jk(\omega)r_{PP_1}) / r_{PP_1} \right) \right] dS$$

Где  $\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^0 \text{экp}(P_1, \omega) = 2\vec{n}_{\text{экp}}^e(P_1) \times \dot{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{экp}(1)}(P_1, \omega)$ .

II итерация.

5. Расчет напряженности магнитного поля, излучаемого сеточным экраном, вблизи рефлектора:

$$\vec{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(2)}(M_j, \omega) = \vec{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{i зер}(2)}(M_j, \omega) + (1/4\pi) \times \int_{S_{\text{экр}}} \left\{ \text{grad}_{P_1} \frac{\exp[-jk(\omega)r_{P_1 M_j}]}{r_{P_1 M_j}} \times \vec{J}_{\Theta, \Phi}^{\text{экр}(1)}(P_1, \omega) \right\} dS_{\text{экр}},$$

$$\text{где } \vec{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{i зер}(2)}(P_1, \omega) = \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \frac{\vec{I}_{K_k} M_j}{|\vec{I}_{K_k} M_j|} \times \dot{\vec{E}}_{(\Theta, \Phi)}(M_j, \omega).$$

6. Уточняется значение плотности поверхностного тока на рефлекторе с учетом поля, излученного сеточным экраном:

$$\vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(2)}(M_j, \omega) = \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(2)}(M_j, \omega) - \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(2)}(M_j, \omega). \quad (5)$$

Определяется, как и ранее, из интегрального представления:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(2)}(M_j, \omega) + \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(2)}(M_j, \omega) \right) = \\ & = \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{0 \text{ зер}}(M_j, \omega) - \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{n}_{\text{зер}}^e(M_j) \times \\ & \times \left[ \left( \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{+\text{зер}(2)}(M, \omega) - \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{-\text{зер}(2)}(M, \omega) \right) \times \right. \\ & \left. \left[ \text{grad}_P \left( \frac{\exp(-jk(\omega)r_{PP_1})}{r_{PP_1}} \right) \right] \right] dS, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{J}_{S(\Theta, \Phi)}^{0 \text{ зер}}(M_j, \omega) &= 2\vec{n}_{\text{зер}}^e(M_j) \times \vec{H}_{(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(1)}(M_j, \omega) + \\ \text{где } & + \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \frac{\vec{I}_{K_k} M_j}{|\vec{I}_{K_k} M_j|} \times \dot{\vec{E}}_{(\Theta, \Phi)}(M_j, \omega). \end{aligned}$$

7. Повторение шагов (3) – (5).

8. Итерационная процедура останавливается при

$$\sum_{\omega_{\text{мин}}}^{\omega_{\text{макс}}} \sum_{j=1}^N \left| j_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(n)}(M_j, \omega) - j_{S(\Theta, \Phi)}^{\text{зер}(n-1)}(M_j, \omega) \right|^2 \leq 0,01, \quad (6)$$

где n – номер итерации.

Последний шаг итерации предназначен для интегрального сравнения плотностей поверхностного на рефлекторе. В результате определению подлежат интегральные характеристики поля – пиковая ДН и КНД, поэтому указанную точность будем полагать достаточной.

## Выводы

Предложен метод расчета пиковой ДН зеркальной антенны с круговой поляризацией с учетом взаимного влияния рефлектора и облучателя при излучении СШП сигналов. Метод отличается от известных учетом фазовых и поляризационных соотношений полей, излучаемых конической спиральной антенной. Ошибки, возникающие при проведении расчетов численными методами, усредняются и при выборе характерных размеров ячеек  $\lambda/10$  ( $\lambda$  – длина волны), на которые разбивается поверхность интегрирования, получаемую точность можно считать удовлетворительной.

## Список литературы

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. Пособие / Я.С. Шифрин. – Х.: ВИРТА, 1976. – 407 с.
2. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике / Р. Миттра. – М.: Мир, 1977. – 485 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский И.С. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.
4. Власик С.Н. Методика определения диаграммы направленности сверхширокополосной зеркальной антенны с учетом взаимного влияния облучателя и рефлектора / М.Г. Иванец, Г.В. Ермаков, В.В. Воинов, С.Н. Власик // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 1 (19). – С. 39-41.
5. Антенные системы радиоэлектронных средств. Под общ. ред. Г.В. Хохлова. – М.: Воениздат, 1978. – 368 с.

Поступила в редколлегию 14.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПІКОВОЇ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ ДЗЕРКАЛЬНОЇ АНТЕНИ З КРУГОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ ПРИ ВРАХУВАННІ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ З ОПРОМІНЮВАЧЕМ ПРИ ВИПРОМІНЮВАННІ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

А.В. Ірха, Г.В. Єрмаков, О.В. Ченикаєв

Запропонований метод розрахунку пикової діаграми спрямованості дзеркальної антени з круговою поляризацією з урахуванням взаємного впливу рефлектора та опромінювача при випромінюванні надширокопasmових сигналів. Метод передбачає врахування фазових і поляризаційних співвідношень складових полів, що випромінюються конічною спіральною антеною. Помилки, що виникають при проведенні розрахунків чисельними методами, усереднюються та при виборі характерних розмірів комірок, на які розбивається поверхня інтегрування, точність можна вважати задовільною.

**Ключові слова:** пикова діаграма спрямованості, надширокопasmовий сигнал, взаємний вплив, густина поверхневого струму.

## METHOD OF MIRROR ANTENNA WITH CIRCULAR POLARIZATION PEAK PATTERN CALCULATION AT ACCOUNT OF MUTUAL COUPLING WITH IRRADIATOR AT RADIATION OF ULTRAWIDEBAND SIGNALS

A.V. Irkha, G.V. Yermakov, A.V. Chenykaev

The method of mirror antenna with circular polarization peak pattern calculation taking into account the mutual coupling of reflector and irradiator at the radiation of ultrawideband signals. A method supposes the account of phase and polarization correlations of fields components which radiated by conical spiral aerial. Errors arising up during realization of calculations numeral methods averaged and at the choice of cells characteristic sizes on that the surface of integration is broken up, the got exactness can be considered satisfactory.

**Keywords:** peak pattern, ultrawideband signal, mutual coupling, density of surface current.