Раздел I. Прикладная электродинамика и антенные измерения

УДК 621.3.095.22

Н.И. Бобков

ИЗЛУЧЕНИЕ СОВОКУПНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ТОКОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрен метод решения электродинамической задачи излучения совокупности электрических и магнитных токов, возбуждаемых на поверхности с произвольной геометрией, являющейся актуальной при разработке широкополосных сканирующих зеркальных антенн, при исследовании процессов рассеяния электромагнитных волн телами сложной формы и в ряде других случаев. Задача решается путем интегрирования векторных электродинамических потенциалов поверхностных токов и преобразования систем координат. Представлены аналитические соотношения, определяющие в замкнутой форме функции распределения электрических компонент излучаемого поля в дальней зоне, на основе которых могут создаваться вычислительные алгоритмы для ряда практических применений.

Поле излучения; электрический и магнитный токи; напряженность поля; векторный потенциал; функция распределения; антенны.

N.I. Bobkov

RADIATION OF COMBINATION OF ELECTRIC AND MAGNETIC CURRENTS EXCITED ON THE SURFACE WITH COMPLICATED GEOMETRY

The method of solving the electrodynamics problem of radiation combined of electric and magnetic currents excited on the surface with an arbitrary geometry, which is relevant in the development of broadband scanning reflector antennas, the study of the scattering processes of electromagnetic waves by bodies of complex shape and in other cases, is presented. The problem is solved by integration of vector electrodynamics potentials of surface currents and the transformation of coordinate systems. Analytical relations, determining in closed form distribution function of the electrical components far-zone radiation field, on the basis of which can be created the computational algorithms for a number of practical applications, are presented.

The radiation field; the electric and magnetic currents; the field strength; vector potential; the distribution function; antenna.

Задача излучения системы электрических и магнитных токов, распределенных по поверхности произвольной геометрии, является основой для многих приложений теории и техники антенн. Здесь в первую очередь можно отметить вопросы разработки многодиапазонных и сверхширокополосных многолучевых зеркальных антенн [1–3], а также вопросы построения широкоугольных сканирующих и полифокальных зеркальных антенн с отражающими поверхностями сложной формы [4]. Еще одним приложением являются вопросы расчета моностатических и бистатических диаграмм рассеяния тел произвольной формы с импедансными граничными условиями [5–7]. Несмотря на достаточно большое число работ, посвященных данной задаче [8–11], в них отсутствуют развернутые аналитические соотношения, позволяющие строить эффективные вычислительные алгоритмы. Таким образом, определение полей излучения системы электрических и магнитных токов, распределенных по поверхности сложной формы, является актуальной в практическом плане и интересной в теоретическом отношении задачей.

Целью статьи является представление соотношений, связывающих геометрические параметры поверхности и закон распределения поверхностных электрических и магнитных токов с функцией распределения напряженности излучаемого электромагнитного поля в дальней зоне.

В рассматриваемой постановке будем считать заданными:

- форму и размеры поверхности S, удовлетворяющей условиям Ляпунова [9];
- закон распределения электрических $\vec{j}^{\,э}(\vec{r})$ и магнитных $\vec{j}^{\,м}(\vec{r})$ токов по поверхности S.

Необходимо найти функцию распределения $\vec{F}(\theta,\varphi)$ напряженности поля, формируемого заданной совокупностью токов.

Запишем соответствующие выражения для векторных потенциалов поверхностного электрического и магнитного тока

$$\vec{A}^{э}(\vec{r}) = \int\limits_S \vec{j}^{\,э}(\vec{r}\,')G(\vec{r},\vec{r}\,')d\vec{r}\,', \tag{1}$$

$$\vec{A}^{м}(\vec{r}) = \int\limits_S \vec{j}^{\,м}(\vec{r}\,')G(\vec{r},\vec{r}\,')d\vec{r}\,', \tag{2}$$

где $\vec{r} = \{x,\ y,\ z\}$ – радиус-вектор точки, в которой определяется векторный электродинамический потенциал; $\vec{r}\,' = \{x',\ y',\ z'\}$ – радиус-вектор точки на поверхности S, в которой задается плотность поверхностного электрического $\vec{j}^{\,э}(\vec{r}\,')$ или магнитного $\vec{j}^{\,м}(\vec{r}\,')$ тока. Поверхность S, геометрия которой показана на рис. 1, в системе координат $Oxyz$ определяется уравнением $z = f(x,\ y)$.

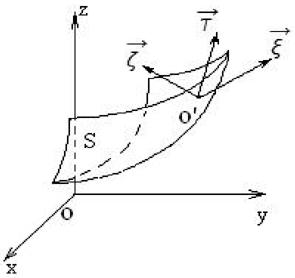

Рис. 1. Поверхность S и связанные с ней системы координат

С использованием векторных электродинамических потенциалов определим компоненты вектора напряженности электрического поля в дальней зоне ($kr >> 1$) следующими формулами

$$E_x = \int\limits_S G(\vec{r},\vec{r}\,')\Big\{-i\omega\mu_0 j_x^{\text{ý}} + (i\omega\varepsilon_0)^{-1}\Big[\, j_x^{\text{ý}}\big(-ikr^{-3}(r^2 - ikr(x-x')^2\big) -$$
$$- j_y^{\text{ý}} k^2 r^{-2}(x-x')(y-y') - j_z^{\text{ý}} k^2 r^{-2}(x-x')(z-z')\Big] -$$
$$-ikr^{-1}\Big[\, j_z^{\text{ì}}\,(y-y') - j_y^{\text{ì}}\,(z-z')\Big]\Big\}\,ds', \tag{3}$$

$$E_y=\int\limits_S G\left(\vec r,\vec r'\right)\Big\{-i\omega\mu_0 j_y^{\text{ý}}+\left(i\omega\varepsilon_0\right)^{-1}\Big[j_y^{\text{ý}}\left(-ikr^{-3}(r^2-ikr(y-y')^2\right)-$$

$$-j_x^{\text{ý}}k^2r^{-2}(x-x')(y-y')-j_z^{\text{ý}}k^2r^{-2}(y-y')(z-z')\Big]+$$

$$+ikr^{-1}\left[\,j_z^{\text{ì}}\,(x-x')-j_x^{\text{ì}}\,(z-z')\right]\Big\}\,ds',\qquad(4)$$

$$E_z=\int\limits_S G\left(\vec r,\vec r'\right)\Big\{-i\omega\mu_0 j_z^{\text{ý}}+\left(i\omega\varepsilon_0\right)^{-1}\Big[j_z^{\text{ý}}\left(-ikr^{-3}(r^2-ikr(z-z')^2\right)-$$

$$-j_x^{\text{ý}}k^2r^{-2}(x-x')(z-z')-j_y^{\text{ý}}k^2r^{-2}(y-y')(z-z')\Big]-$$

$$-ikr^{-1}\left[\,j_y^{\text{ì}}\,(x-x')-j_x^{\text{ì}}\,(y-y')\right]\Big\}\,ds',\qquad(5)$$

где k – волновое число; $r=\left|\vec r\right|$.

Учтем взаимосвязь между компонентами напряженности электрического поля в дальней зоне, представленными в сферической и декартовой системах координат

$$\left|\begin{matrix}E_\theta\\ E_\varphi\end{matrix}\right\rangle=\begin{bmatrix}\cos\theta\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi & -\sin\theta\\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0\end{bmatrix}\left|\begin{matrix}E_x\\ E_y\\ E_z\end{matrix}\right\rangle.\qquad(6)$$

Найденное представление компонент E_x, E_y, E_z позволяет с учетом формулы (6) записать следующие соотношения для компонент E_θ и E

$$E_\theta=-\frac{iW_0}{k}\Bigg\{\int\limits_S G\left(\vec r,\vec r'\right)\Big[j_x^{\text{ý}}\Big[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(x-x')^2\right)\cos\theta\cos\varphi-$$

$$-k^2r^{-2}\left((x-x')(y-y')\cos\theta\sin\varphi-(x-x')(z-z')\sin\theta\right)\Big]+$$

$$+j_y^{\text{ý}}\Big[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(y-y')^2\right)\cos\theta\sin\varphi-$$

$$-k^2r^{-2}\left((x-x')(y-y')\cos\theta\cos\varphi-(y-y')(z-z')\sin\theta\right)\Big]-$$

$$-j_z^{\text{ý}}\Big[k^2r^{-2}\left((x-x')(z-z')\cos\theta\cos\varphi+(y-y')(z-z')\cos\theta\sin\varphi\right)-$$

$$-\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(z-z')^2\right)\sin\theta\Big]\Big]ds'\Bigg\}-$$

$$-ik\int\limits_S G\left(\vec r,\vec r'\right)r^{-1}\Big\{\cos\theta\cos\varphi\left[\,j_z^{\text{ì}}\,(y-y')-j_y^{\text{ì}}\,(z-z')\right]+$$

$$+\cos\theta\sin\varphi\left[\,j_z^{\text{ì}}\,(x-x')-j_x^{\text{ì}}\,(z-z')\right]-$$

$$-\sin\theta\left[\,j_y^{\text{ì}}\,(x-x')-j_x^{\text{ì}}\,(y-y')\right]\Big\}\,ds'\;,\qquad(7)$$

$$E_\varphi=-\frac{iW_0}{k}\Bigg\{\int\limits_S G\left(\vec r,\vec r'\right)\Big[j_x^{\text{ý}}\Big[-\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(x-x')^2\right)\sin\varphi-$$

$$-k^2r^{-2}(x-x')(y-y')\cos\varphi\Big]+$$

$$+j_y^{\text{ý}}\Big[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(y-y')^2\right)\cos\varphi+k^2r^{-2}(x-x')(y-y')\sin\varphi\Big]-$$

$$+j_z^{\text{ý}}\Big[k^2r^{-2}(x-x')(z-z')\sin\varphi-k^2r^{-2}(y-y')(z-z')\cos\varphi\Big]\Big]ds'\Bigg\}+$$

$$+ik\int_S G(\vec{r},\vec{r}')\, r^{-1}\Big\{\sin\varphi\Big[\, j_z^{\grave{i}}\,(y-y') - j_y^{\grave{i}}\,(z-z')\Big] +$$
$$+\cos\varphi\Big[\, j_z^{\grave{i}}\,(x-x') - j_x^{\grave{i}}\,(z-z')\Big]\Big\}\, ds' \,. \tag{8}$$

Свяжем с каждой точкой поверхности S локальную систему координат $O'\tau\xi\zeta$, как показано на рис. 1. Оси $O'\tau$ и $O'\xi$ являются касательными к поверхности S , а ось $O'\zeta$ является нормалью к данной поверхности в точке O' .

Взаимосвязь между координатами вектора в системах координат $O'\tau\xi\zeta$ и $Oxyz$ определяется при заданном уравнении поверхности S в виде

$$\left| \begin{matrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{matrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \partial x/\partial\tau & \partial x/\partial\xi & \partial x/\partial\varsigma \\ \partial y/\partial\tau & \partial y/\partial\xi & \partial y/\partial\varsigma \\ \partial z/\partial\tau & \partial z/\partial\xi & \partial z/\partial\varsigma \end{bmatrix} \left| \begin{matrix} a_\tau \\ a_\xi \\ a_\varsigma \end{matrix} \right\rangle , \tag{9}$$

В системе координат $O'\tau\xi\zeta$ плотность электрического и магнитного тока определяются соответствующими касательными компонентами $\vec{j}^{\,э} = \left\{ j_\tau^э,\, j_\xi^э,\, 0 \right\}$ и $\vec{j}^{\,м} = \left\{ j_\tau^м,\, j_\xi^м,\, 0 \right\}$, с которыми компоненты токов в декартовой системе координат связаны следующим образом

$$\left| \begin{matrix} j_x^t \\ j_y^t \\ j_z^t \end{matrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \partial x/\partial\tau & \partial x/\partial\xi & \partial x/\partial\varsigma \\ \partial y/\partial\tau & \partial y/\partial\xi & \partial y/\partial\varsigma \\ \partial z/\partial\tau & \partial z/\partial\xi & \partial z/\partial\varsigma \end{bmatrix} \left| \begin{matrix} j_\tau^t \\ j_\xi^t \\ 0 \end{matrix} \right\rangle , \quad (t = э,\, м). \tag{10}$$

С учетом последнего выражения формулы для компонент напряженности электрического поля E_θ и E в дальней зоне приобретают вид

$$E_\theta = -\frac{iW_0}{k}\Bigg\{\int_S \Big[j_\tau^э \Big[\partial x/\partial\tau\Big[\Big(k^2 - ikr^{-3}(r^2 - ikr(x-x')^2\Big)\cos\theta\cos\;\; -$$
$$-k^2 r^{-2}(x-x')\Big((y-y')\cos\theta\sin\;\; + (z-z')\sin\theta\Big)\Big]\Big] +$$
$$+\Big[\partial y/\partial\tau\Big[\Big(k^2 - ikr^{-3}(r^2 - ikr(y-y')^2\Big)\cos\theta\sin\;\; -$$
$$-k^2 r^{-2}(y-y')\Big((x-x')\cos\theta\cos\;\; + (z-z')\sin\theta\Big)\Big]\Big] -$$
$$-\Big[\partial z/\partial\tau\Big[\Big(k^2 - ikr^{-3}(r^2 - ikr(z-z')^2\Big)\sin\theta +$$
$$+k^2 r^{-2}(z-z')\Big((x-x')\cos\theta\cos\;\; + (y-y')\cos\theta\sin\;\; \Big)\Big]\Big] +$$
$$+ j_\xi^э\Big[\partial x/\partial\xi\Big[\Big(k^2 - ikr^{-3}(r^2 - ikr(x-x')^2\Big)\cos\theta\cos\;\; -$$
$$-k^2 r^{-2}(x-x')\Big((y-y')\cos\theta\sin\;\; + (z-z')\sin\theta\Big)\Big] +$$
$$+\partial y/\partial\xi\Big[\Big(k^2 - ikr^{-3}(r^2 - ikr(y-y')^2\Big)\cos\theta\sin\;\; -$$
$$-k^2 r^{-2}(y-y')\Big((x-x')\cos\theta\cos\;\; + (z-z')\sin\theta\Big)\Big] -$$
$$-\partial z/\partial\xi\Big[\Big(k^2 - ikr^{-3}(r^2 - ikr(z-z')^2\Big)\sin\theta +$$
$$+k^2 r^{-2}(z-z')\Big((x-x')\cos\theta\cos\;\; + (y-y')\cos\theta\sin\;\; \Big)\Big]\Big]\Big] \times$$
$$\times G(\vec{r},\vec{r}')B(\tau,\xi)\,d\tau d\xi\Bigg\} -$$

$$-ik\int_S G(\vec r,\vec r')r^{-1}\{\cos\theta\cos\ [j_z^{м}(y-y')-j_y^{м}(z-z')]+$$
$$+\cos\theta\sin\ [j_z^{м}(x-x')-j_x^{м}(z-z')]-$$
$$-\sin\theta[j_y^{м}(x-x')-j_x^{м}(y-y')]\}B(\tau,\xi)d\tau d\xi, \qquad (11)$$

$$E_\varphi=-\frac{iW_0}{k}\Bigg\{\int_S[j_\tau^{э}[\partial x/\partial\tau[-(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(x-x')^2)\sin\varphi-$$
$$-k^2r^{-2}(x-x')(y-y')\cos\varphi]+$$
$$+\partial y/\partial\tau[(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(y-y')^2)\cos\varphi+$$
$$+k^2r^{-2}(x-x')(y-y')\sin\ ]-$$
$$-\partial z/\partial\tau[k^2r^{-2}(z-z')((x-x')\sin\varphi-(y-y'))]+$$
$$+j_\xi^{э}[\partial x/\partial\xi[-(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(x-x')^2)\sin\varphi-$$
$$-k^2r^{-2}(x-x')(y-y')\cos\varphi]+$$
$$+\partial y/\partial\xi[(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(y-y')^2)\cos\varphi+$$
$$+k^2r^{-2}(x-x')(y-y')\sin\varphi]-$$
$$-\partial z/\partial\xi[k^2r^{-2}(z-z')((x-x')\sin\varphi-(y-y')\cos\varphi)]]]\times$$
$$\times G(\vec r,\vec r')B(\tau,\xi)d\tau d\xi\Bigg\}+$$
$$+ik\int_S G(\vec r,\vec r')r^{-1}\{\sin\varphi[j_z^{м}(y-y')-j_y^{м}(z-z')]+$$
$$+\cos\varphi[j_z^{м}(x-x')-j_x^{м}(z-z')]\}ds'. \qquad (12)$$

В соотношениях (11), (12) $B(\tau,\xi)$ определяет якобиан преобразования системы координат $Oxyz$ в систему координат $O'\tau\xi\zeta$.

На заключительном этапе учтем, что координаты точек наблюдения связаны условием $x=r\sin\theta\cos$, $y=r\sin\theta\sin$, $z=r\cos\theta$. Это позволяет записать выражения для функций распределения компонент поля следующим образом:

$$F_\theta=-\frac{iW_0}{k}\Bigg\{\int_S[j_\tau^{э}[\partial x/\partial\tau[(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\cos-x')^2)\cos\theta\cos-$$
$$-k^2r^{-2}(r\sin\theta\cos-x')((r\sin\theta\sin-y')\cos\theta\sin+(r\cos\theta-z')\sin\theta)]]+$$
$$+[\partial y/\partial\tau[(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\sin\ -y')^2)\cos\theta\sin-$$
$$-k^2r^{-2}(r\sin\theta\sin-y')((r\sin\theta\cos-x')\cos\theta\cos+(r\cos\theta-z')\sin\theta)]]-$$
$$-[\partial z/\partial\tau[(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\cos\theta-z')^2)\sin\theta+$$
$$+k^2r^{-2}(r\cos\theta-z')((r\sin\theta\cos-x')\cos\theta\cos+(r\sin\theta\sin-y')\cos\theta\sin)]]+$$
$$+j_\xi^{э}[\partial x/\partial\xi[(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\cos\ -x')^2)\cos\theta\cos-$$
$$-k^2r^{-2}(r\sin\theta\cos-x')((r\sin\theta\sin-y')\cos\theta\sin+(r\cos\theta-z')\sin\theta)]+$$

$$+\partial y/\partial\xi\left[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\sin\varphi-y')^2\right)\cos\theta\sin\varphi-\right.$$
$$-k^2r^{-2}(r\sin\theta\sin\ -y')\left((r\sin\theta\cos\ -x')\cos\theta\cos\ +(r\cos\theta-z')\sin\theta\right)\Big]-$$
$$-\partial z/\partial\xi\left[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\cos\theta-z')^2\right)\sin\theta+\right.$$
$$+k^2r^{-2}(r\cos\theta-z')\left((r\sin\theta\cos\ -x')\cos\theta\cos\ +(r\sin\theta\sin\ -y')\cos\theta\sin\ \right)\Big]\Big]\Big]\times$$
$$\times G(\vec r,\vec r\,')B(\tau,\xi)d\tau d\xi\Big\}-$$
$$-ik\int_S G(\vec r,\vec r\,')r^{-1}\left\{\cos\theta\cos\varphi\left[j_z^{M}(r\sin\theta\sin\varphi-y')-j_y^{M}(r\cos\theta-z')\right]+\right.$$
$$+\cos\theta\sin\varphi\left[j_z^{M}(r\sin\theta\cos\varphi-x')-j_x^{M}(r\cos\theta-z')\right]-$$
$$\left.-\sin\theta\left[j_y^{M}(r\sin\theta\cos\varphi-x')-j_x^{M}(r\sin\theta\sin\varphi-y')\right]\right\}B(\tau,\xi)d\tau d\xi, \qquad (13)$$

$$F_\varphi=-\frac{iW_0}{k}\left\{\int_S\left[j_\tau^{э}\left[\partial x/\partial\tau\left[-\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\cos\varphi-x')^2\right)\sin\varphi-\right.\right.\right.\right.$$
$$\left.-k^2r^{-2}(r\sin\theta\cos\varphi-x')(r\sin\theta\sin\varphi-y')\cos\varphi\right]+$$
$$+\partial y/\partial\tau\left[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\sin\varphi-y')^2\right)\cos\varphi+\right.$$
$$\left.+k^2r^{-2}(r\sin\theta\cos\varphi-x')(r\sin\theta\sin\varphi-y')\sin\varphi\right]-$$
$$-\partial z/\partial\tau\left[k^2r^{-2}(r\cos\theta-z')\left((r\sin\theta\cos\varphi-x')\sin\varphi-(r\sin\theta\sin\varphi-y')\cos\varphi\right)\right]+$$
$$+j_\xi^{э}\left[\partial x/\partial\xi\left[-\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\cos\varphi-x')^2\right)\sin\varphi-\right.\right.$$
$$\left.-k^2r^{-2}(r\sin\theta\cos\varphi-x')(r\sin\theta\sin\varphi-y')\cos\varphi\right]+$$
$$+\partial y/\partial\xi\left[\left(k^2-ikr^{-3}(r^2-ikr(r\sin\theta\sin\varphi-y')^2\right)\cos\varphi+\right.$$
$$\left.+k^2r^{-2}(r\sin\theta\cos\varphi-x')(r\sin\theta\sin\varphi-y')\sin\varphi\right]-$$
$$-\partial z/\partial\xi\left[k^2r^{-2}(r\cos\theta-z')\left((r\sin\theta\cos\varphi-x')\sin\varphi-(r\sin\theta\sin\varphi-y')\cos\varphi\right)\right]\Big]\Big]\times$$
$$\times G(\vec r,\vec r\,')B(\tau,\xi)d\tau d\xi\Big\}+$$
$$+ik\int_S G(\vec r,\vec r\,')r^{-1}\left\{\sin\varphi\left[j_z^{M}(r\sin\theta\sin\varphi-y')-j_y^{M}(r\cos\theta-z')\right]+\right.$$
$$\left.+\cos\varphi\left[j_z^{M}(r\sin\theta\cos\varphi-x')-j_x^{M}(r\cos\theta-z')\right]\right\}ds'. \qquad (14)$$

В частном случае поверхности в виде параболоида вращения уравнение поверхности отражателя S имеет вид: $z=a(x^2+y^2)$. Матрица преобразования из (10) определяется формулой

$$\begin{bmatrix}\cos\ /(1+4a^2tg^2\alpha)^{1/2} & -\sin & -2atg\alpha\cos\ /(1+4a^2tg^2\alpha)^{1/2}\\ \sin\ /(1+4a^2tg^2\alpha)^{1/2} & \cos & -2atg\alpha\sin\ /(1+4a^2tg^2\alpha)^{1/2}\\ 2atg\alpha/(1+4a^2tg^2\alpha)^{1/2} & 0 & (1+4a^2tg^2\alpha)^{-1/2}\end{bmatrix}. \qquad (15)$$

Якобиан преобразования $B(\tau,\xi)$ для введенной таким образом системы координат $O'\tau\xi\zeta$ равен

$$B(\tau,\xi)=\sqrt{tg^2\alpha(1+a^2tg^2\alpha)\frac{1+4a^2tg^2\alpha}{\cos^2\alpha}}\ . \qquad (16)$$

Соотношения для компонент вектора напряженности электрического поля E_θ, E , формируемого в дальней зоне протекающими по поверхности параболического отражателя электрическим и магнитным токами, имеют вид (13), (14), в которых коэффициенты перехода и якобиан преобразования определяются выражениями (15) и (16) соответственно.

Таким образом, полученные соотношения определяют в замкнутой форме функции распределения компонент вектора напряженности электрического поля, формируемого системой электрических и магнитных токов с известным законом распределения по произвольной поверхности S и, в частности, поверхности в виде параболоида вращения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фролов О.П., Вальд В.П.* Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 496 с.
2. *Бобков Н.И.* Сверхширокополосная многолучевая зеркальная антенна. Сб. докладов международной научной конференции «ИРЭМВ-2011», Таганрог – Дивноморское, 27 июня-2 июля 2011 г. –С. 93-97.
3. *Бобков Н.И., Габриэльян Д.Д., Зелененко А.Т., Семененко В.Н., Стуров А.Г.* Многолучевая зеркальная антенна для систем сверхширокополосной радиолокации. Сб. докладов V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М., 21-25 ноября 2011 г. – С. 173-177.
4. *Бахрах Л.Д., Галимов Г.К.* Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета. – М.: Наука, 1981. – 304 с.
5. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Интеллектуальные радиоэлектронные покрытия. Современное состояние и проблемы // Антенны. – 2001. – № 4 (50). – С. 4-11.
6. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
7. *Привалова Т.Ю., Юханов Ю.В.* Рассеяние плоской Н-поляризованной волны на решетке нагруженных волноводов // Радиотехника. – 2008. – № 11.
8. *Семенов Н.А.* Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1973. - 480 с.
9. *Васильев Е.Н.* Возбуждение тел вращения. – М.: Радио и связь, 1987. - 272 с.
10. *Фелсен Л., Маркувиц Н.* Излучение и рассеяние волн. В 2-х томах. – М.: Мир, 1978. Т. 1 – 548 с.; Т. 2 – 556 с.
11. *Петров Б.М.* Электродинамика и распространения радиоволн: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Д.В. Семенихина.

Бобков Николай Иванович – Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (ОАО «ВНИИ «Градиент»); e-mail: gradient@aaanet.ru; 344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96; тел.: 88632348900, 88634131563; начальник сектора

Bobkov Nikolay Ivanovich – Joint Stock Company “All-Russian Scientific Research Institute “Gradient” (JSC “VNII“Gradient”); e-mail: gradient@aaanet.ru; 96, Sokolov street, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phones: +78632348900, +78634131563; the chief of research laboratory.