

## Расчет дальнего бокового и заднего излучения зеркальных антенн с радиопоглощающим покрытием кромок

О. И. Сухаревский, В. А. Василец, С. В. Нечитайло, С. В. Орехов

*Харьковский военный университет,  
61043, г. Харьков, пл. Свободы, 6*

*Статья поступила в редакцию 7 ноября 2001 г.*

Предлагается методика расчета диаграммы направленности модели зеркальной антенны, кромка которой закрыта тороидальным радиопоглощающим покрытием. Приведены результаты расчетов диаграмм направленности зеркальных антенн, снабженных радиопоглощающими покрытиями различных радиусов и типов.

Пропонується методика розрахунку діаграми спрямованості моделі дзеркальної антени, кромка якої закрыта тороїдальним радіопоглинаючим покриттям. Наведено результати розрахунку діаграм спрямованості дзеркальних антен, оснащених радіопоглинаючими покриттями різних радіусів та типів.

### Введение

При разработке радиотехнических средств, таких как радиолокационная техника, техника связи и др., особую актуальность приобретают вопросы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

Важным направлением в обеспечении электромагнитной совместимости для радиоаппаратуры является улучшение электрических характеристик и параметров антенн, в том числе уменьшение бокового и заднего излучения. Как известно [1], боковое излучение зеркальных антенн в значительной мере определяется дифракцией электромагнитных волн на кромках (ребрах) металлических поверхностей антенны, в частности на кромках зеркала. В ряде случаев для снижения бокового излучения антенны используются различные радиопоглощающие материалы (РПП), которые наносятся на кромки ее зеркала.

В статье приведена методика расчета дальнего бокового и заднего излучения зеркальной антенны, на кромку которой нанесено тороидальное радиопоглощающее покрытие (РПП). Приведены результаты численных расчетов диаграммы направленности (ДН) параболической антенны с тороидальным радиопоглощающим покрытием кромки для различных параметров РПП.

### 1. Методика расчета

В качестве модели зеркальной антенны рассмотрим параболоид вращения с тороидальным РПП на кромке, в фокусе  $d$  которого расположен элементарный электрический вибратор (облучатель), создающий сферическую волну единичной амплитуды, (см. рис. 1).

Поле облучателя в точке, определяемой вектором  $\vec{X}$  на поверхности зеркала, может быть записано в виде:

$$\vec{H}_0 = \frac{jk_0}{4\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{R}^0 \times \vec{p}) \frac{\exp[jk\vec{R}^0(\vec{X} + \vec{\rho}_0)]}{\vec{R}^0(\vec{X} + \vec{\rho}_0)},$$

$$\vec{E}_0 = \frac{jk_0}{4\pi} \vec{R}^0 \times (\vec{p} \times \vec{R}^0) \frac{\exp[jk\vec{R}^0(\vec{X} + \vec{\rho}_0)]}{\vec{R}^0(\vec{X} + \vec{\rho}_0)},$$

где  $\vec{p}$  – вектор поляризации источника волны;  $\vec{R}^0$  – орт направления распространения волны;  $\vec{\rho}_0$  – радиус-вектор вершины параболоида с началом в фокусе зеркала (рис. 1);  $\epsilon_0, \mu_0$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства;  $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ .

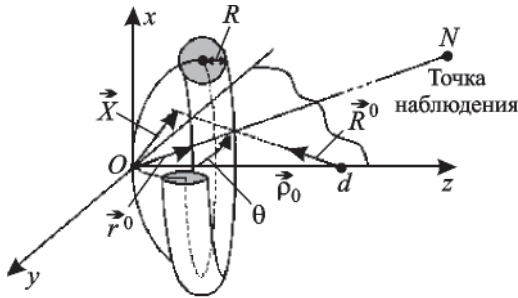


Рис. 1. Геометрия модели зеркальной антенны с тороидальным покрытием на кромке

Поле, рассеянное зеркалом антенны, можно рассчитать на основе методики, изложенной в [2]. При этом используются интегральное представление типа Стрэттона-Чу и его асимптотические выражения для полей дальней зоны:

$$\vec{H}^p(\vec{r}^0) = jk_0 \frac{\exp(jk_0 r)}{4\pi r} \vec{I}(\vec{r}^0) \times \vec{r}^0,$$

$$\vec{E}^p(\vec{r}^0) = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \vec{H}^p(\vec{r}^0) \times \vec{r}^0,$$

где  $\vec{r}^0$  – орт направления на точку наблюдения;  $r$  – расстояние до точки наблюдения;

$$\vec{I}(\vec{r}^0) = \int_S [\vec{H}^\perp - \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} (\vec{E}^\perp \times \vec{r}^0)] \times \exp[-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{X})] dS, \quad (2)$$

$\vec{E}^\perp = \vec{n} \times \vec{E}_0$ ,  $\vec{H}^\perp = \vec{n} \times \vec{H}_0$ ,  $S$  – замкнутая поверхность, охватывающая зеркало антенны. Следует отметить, что поверхность  $S$  может быть представлена в виде двух составляющих: первая  $S_0$  (гладкая часть зеркала) совпадает с поверхностью зеркала везде, за исключением некоторой окрестности кромки, вторая  $S_1$  в сечении, ортогональном кромке, представляет собой окружность, охватывающую кромку с поглотителем (т. е. радиус окружности больше либо равен радиусу  $R$  тороидального РПП).

Интегрирование в (2) по поверхности  $S_1$  будем проводить с использованием решения модельной задачи о рассеянии плоской электромагнитной волны на идеально проводящем клине с поглощающим цилиндром на ребре [3]. Для нашей задачи внешний угол клина выбирается равным  $2\pi$  (т. е. речь идет о полуплоскости с цилиндрическим РПП ребра). Суть этого метода состоит в том, что интеграл (2) по поверхности  $S_1$  представляется в виде повторного. Внешнее интегрирование осуществляется по линии кромки, а внутреннее – по окружности в сечении, перпендикулярном кромке. При этом входящие в интеграл (2) тангенциальные составляющие поля  $\vec{H}^\perp$  и  $\vec{E}^\perp$  считаются равными соответствующим составляющим на поверхности радиопоглощающего цилиндра, который закрывает ребро полуплоскости, касательной к кромке в точке стационарной фазы.

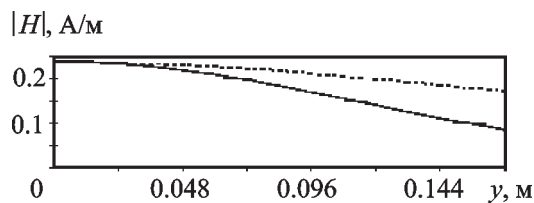
Будем рассматривать случай, когда электрические размеры зеркала достаточно велики. Тогда интеграл (2) по поверхности  $S_0$  может быть вычислен в приближении физической оптики. При этом интегрирование по  $S_0$  сводится к интегрированию по освещенной части этой поверхности. Заметим, что подынтегральная функция в (2) является быстроосциллирующей, поэтому для расчета интеграла будем пользоваться специальной кубатурной формулой для интеграла вида

$$I = \int_S \exp[jk\Omega(\vec{X})] f(\vec{X}) dS \quad [4]. \quad \text{Для этого}$$

проведем триангуляцию освещенной части поверхности зеркала, т. е. покроем поверхность зеркала системой достаточно мелких плоских треугольников. В пределах одного треугольника волну, приходящую от облучателя на поверхность зеркала, можно считать плоской. Тогда интеграл  $I$  может быть заменен (с некоторой погрешностью) суммой интегралов по всем треугольникам. После перехода к барицентрическим координатам интеграл по каждому треугольнику вычисляется аналитически. В [5] приведена оценка остаточного члена кубатурной формулы. Эту оценку можно использовать для расчета количества разбиений при вычислении интеграла  $I$ .

### Результаты математического моделирования

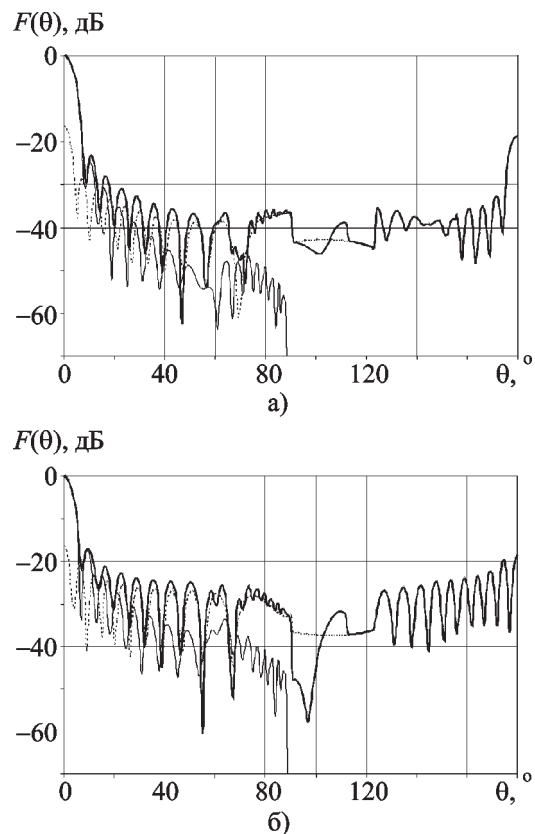
Рассмотрим модель антенны со следующими параметрами: фокусное расстояние  $d$  равно 0.125 м, глубина параболоида – 0.055 м (при этом радиус антенны равен 0.1658 м), длина волны облучателя равна – 0.03 м. Будем рассматривать два случая: первый – когда облучатель (диполь) параллелен оси  $Ox$  (в дальнейшем будем называть такой случай вертикальной поляризацией облучателя), второй – когда диполь параллелен оси  $Oy$  (горизонтальная поляризация облучателя). Распределение амплитуды поля, создаваемого облучателем в точках пересечения зеркала с плоскостью  $yOz$ , в зависимости от координаты  $y$  будет иметь вид, представленный на рис. 2. На этом ри-



**Рис. 2.** Распределение амплитуды поля облучателя вдоль зеркала антенны: сплошная линия – случай горизонтальной поляризации облучателя, пунктирная линия – случай вертикальной поляризации облучателя

сунке сплошной линией показана амплитуда поля для случая горизонтальной поляризации облучателя, пунктирной линией – для случая вертикальной поляризации.

Для описанной модели антенны представим некоторые результаты расчета диаграмм направленности. Будем рассматривать случай, когда точка наблюдения  $N$  лежит в плоскости  $yOz$  (см. рис. 1). На рис. 3 приведены нормированные ДН антенны  $F(\theta)$  с непокрытой кромкой. Сплошной жирной линией показана ДН, пунктирной линией – вклад кромочного участка, сплошной тонкой линией – вклад гладкого участка поверхности. На рис. 3, а изображен случай горизонтальной поляриза-



**Рис. 3.** ДН антенны  $F(\theta)$  с непокрытой кромкой при горизонтальной поляризации облучателя (а) и при вертикальной поляризации облучателя (б): сплошная жирная линия – ДН антенны, сплошная тонкая – вклад гладкой части зеркала, пунктирная – вклад кромочных участков антенны

ции, а на рис. 3, б – вертикальной поляризации.

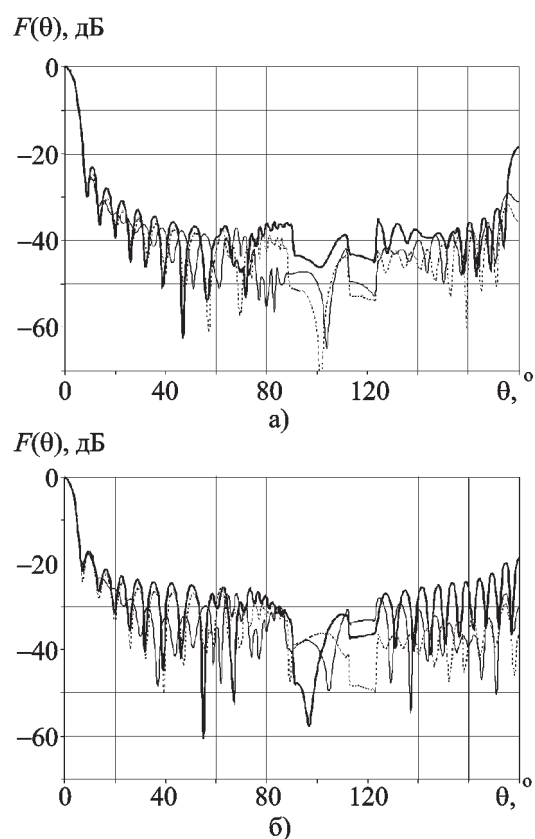
Уровень бокового излучения антенной системы ( $\theta = 5 \div 175^\circ$ ) для случая вертикальной поляризации облучателя в среднем на 10 дБ выше, чем для горизонтальной поляризации. Это связано в основном с распределением амплитуды поля вдоль апертуры (см. рис. 2), а также с ориентацией вектора поляризации относительно ребра кромки в точках стационарной фазы на кромке. Кромка антенны представляет собой плоскую выпуклую кривую, а именно окружность. Поэтому на ней всегда существуют две точки стационарной фазы, за исключением “особого” случая (который будет оговорен ниже). Точками стационарной фазы на кромке зеркала антенны являются точки пересечения кромки с плоскостью, проходящей через векторы  $\vec{r}^0$  и  $\vec{p}_0$  (для нашего случая это плоскость  $yOz$ ). Особым является случай, когда точка  $N$  лежит на оси  $Oz$  ( $\theta = 0$ ). При этом все точки кромки являются точками стационарной фазы. Таким образом, для углов  $\theta \neq 0$  рис. 3, а соответствует случаю, когда вектор поляризации облучателя перпендикулярен ребру кромки в точках стационарной фазы, рис. 3, б – случаю, когда вектор поляризации параллелен касательной к линии кромки в точках стационарной фазы.

Из рис. 3 видно, что в четвертый и последующие боковые и задние лепестки ( $\theta = 28 \div 180^\circ$ ) основной вклад вносит кромочный участок антенны. Отличие кривой ДН от кривой кромочного вклада в диапазоне углов  $\theta$  от  $90$  до  $120^\circ$  обусловлено полем облучателя, которое прошло мимо зеркала антенны.

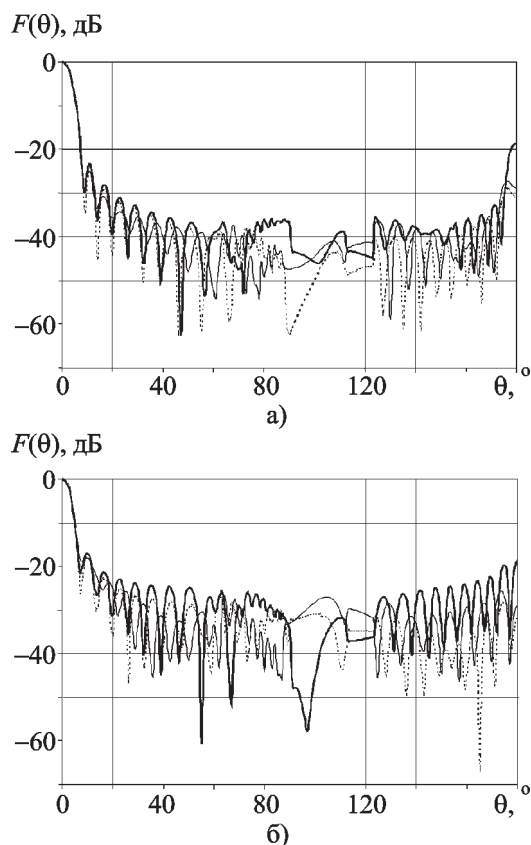
На рис. 4 и 5 приведены графики ДН для случаев, когда кромка покрыта РПП. Сплошной жирной линией показана ДН антенны с непокрытой кромкой, пунктирной линией изображен случай, когда радиус РПП равен  $0.4\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны), сплошной тонкой линией – случай, когда радиус РПП равен  $0.8\lambda$ . Такие значения радиуса РПП ( $0.4\lambda$  и  $0.8\lambda$ ) выбраны не случайно. Исследования показали, что при увеличении радиуса РПП от  $0.1\lambda$  до  $0.4\lambda$  средний уровень бокового излучения снижается в диапазоне углов  $\theta$  от  $90$  до  $180^\circ$ ,

однако при дальнейшем увеличении радиуса поглотителя в этом диапазоне углов уровень бокового излучения возрастает, что объясняется отражением от увеличивающегося по площади РПП.

На рис. 4 приведены графики зависимости ДН антенны для случая, когда кромка покрыта тороидальным РПП с относительными электрической и магнитной проницаемостями:  $\epsilon' = 1 + j10$ ,  $\mu' = 1 + j10$ . Такой РПП является поглощающим материалом зоммерфельдовского типа [6], его параметры  $\epsilon'$  и  $\mu'$  соответствуют реальным ферромагнитным покрытиям.



**Рис. 4.** ДН антенны  $F(\theta)$ , кромка которой снабжена РПП с  $\epsilon' = 1 + j10$ ,  $\mu' = 1 + j10$ , при горизонтальной поляризации облучателя (а) и при вертикальной поляризации облучателя (б): для случая непокрытой кромки – сплошная жирная линия, радиус окружности РПП равен  $0.8\lambda$  – сплошная тонкая линия, радиус окружности РПП равен  $0.4\lambda$  – пунктирная линия



**Рис. 5.** ДН антенны  $F(\theta)$ , кромка которой снабжена РПП с  $\epsilon' = 20 + j0.1$ ,  $\mu' = 1.35 + j0.8$ , при горизонтальной поляризации облучателя (а) и при вертикальной поляризации облучателя (б): для случая непокрытой кромки – сплошная жирная линия, радиус окружности РПП равен  $0.8\lambda$  – сплошная тонкая линия, радиус окружности РПП равен  $0.4\lambda$  – пунктирная линия

Аналогичные зависимости для антенны, кромка которой покрыта РПП с относительными электрической и магнитной проницаемостями:  $\epsilon' = 20 + j0.1$ ,  $\mu' = 1.35 + j0.8$ , приведены на рис. 5.

Анализ рис. 4 и 5 показывает, что в диапазоне углов  $105 \div 120^\circ$  наиболее эффективен РПП первого типа. В этом диапазоне снижение уровня дальнего бокового излучения для случая, когда радиус РПП равен  $0.4\lambda$ , происходит в среднем на  $10 \div 12$  дБ. В диапазоне углов  $120 \div 180^\circ$  для обоих типов материалов более эффективно РПП с радиу-

сом  $0.4\lambda$ . Однако в пределах  $2 \div 7$ -го боковых лепестков ( $\theta = 12 \div 68^\circ$ ) большей эффективностью обладает РПП с радиусом  $0.8\lambda$ . При этом происходит смещение максимумов боковых лепестков в направлении главного лепестка, что обусловлено ростом апертуры антенны за счет увеличения радиуса поглотителя. В диапазоне углов  $\theta = 7 \div 15^\circ$  (т. е. в пределах первого бокового лепестка) заметного снижения уровня бокового излучения, при применении РПП, не происходит, так как в этом диапазоне углов основной вклад в боковое излучение вносит гладкая поверхность зеркала (см. рис. 3).

Следует отметить, что при обоих типах РПП для случая, когда радиус поглотителя равен  $0.4\lambda$ , наблюдается значительное (на  $15 \div 20$  дБ) снижение уровня заднего лепестка.

Таким образом, предложенная в статье методика позволяет рассчитывать характеристики направленности зеркальных антенн с тороидальными поглощающими материалами на кромках, оценивать эффективность применения таких материалов в целях снижения дальнего бокового и заднего излучения зеркальных антенн.

## Литература

1. Л. Д. Бахрах, Г. К. Галимов. Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета. Москва, Наука, 1981, 302 с.
2. Ю. К. Сиренко, И. В. Сухаревский, О. И. Сухаревский, Н. П. Яшина. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн. Харьков, Крок, 2000, 344 с.
3. О. И. Сухаревский, А. Ф. Добродняк. Изв. вузов. Радиофизика. 1988, **31**, №9, с. 1074-1081.
4. О. И. Сухаревский, В. А. Василец, А. З. Сазонов, К. И. Ткачук. Радиофизика и радиоастрономия. 2000, **5**, №1, с. 47-54.
5. В. И. Замятин, Б. Н. Бахвалов, О. И. Сухаревский. Радиотехника и электроника. 1978, **23**, №6, с. 1289-1293.
6. Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский. Рассеяние волн “черными” телами. Москва, Сов. Радио, 1972, 288 с.

**Calculation of Far-Zone Side and Back  
Radiation of Reflector Antenna  
with Radar Absorbing Coating**

**O. I. Sukharevsky, V. A. Vasilets,  
S. V. Nechitaylo, S. V. Orehov**

The technique of calculating the directional pattern for the model of the reflector-type antenna whose edge is covered with the toroidal radar absorbing coating is proposed.

The results of calculation of the directional patterns of the reflector-type antenna equipped with radar absorbing coatings of different types and radii are presented.