

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 закрита 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); ϵ_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства; $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$.

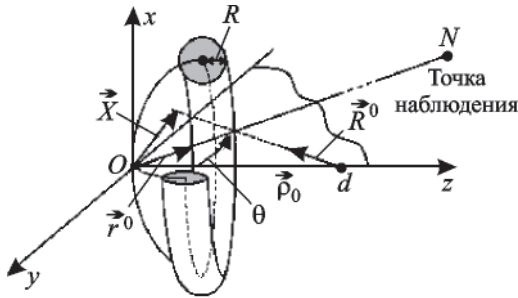


Рис. 1. Геометрия модели зеркальной антенны с тороидальным покрытием на кромке

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 2π (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-

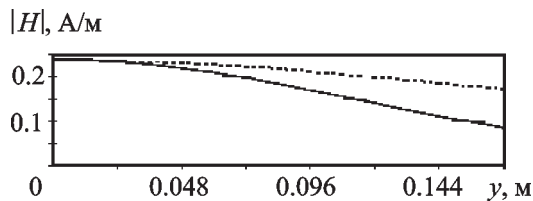


Рис. 2. Распределение амплитуды поля облучателя вдоль зеркала антенны: сплошная линия – случай горизонтальной поляризации облучателя, пунктирная линия – случай вертикальной поляризации облучателя

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-

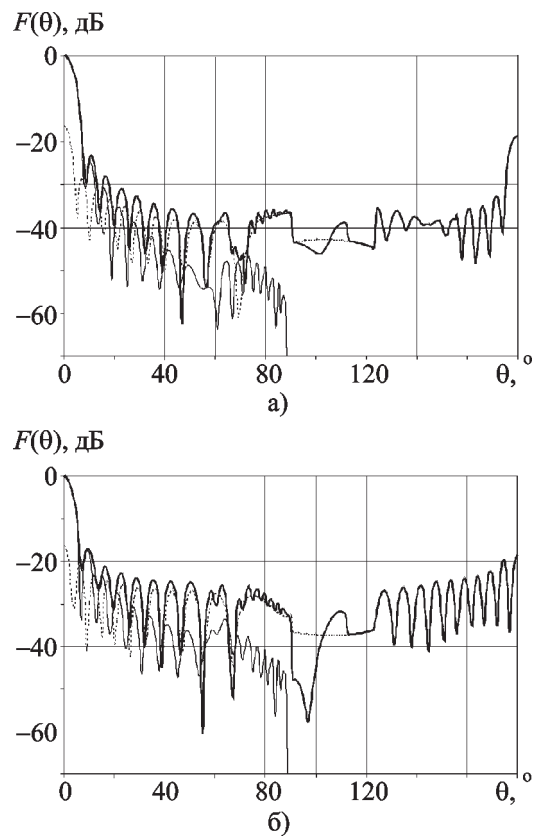


Рис. 3. ДН антенны $F(\theta)$ с непокрытой кромкой при горизонтальной поляризации облучателя (а) и при вертикальной поляризации облучателя (б):

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 θ от 90 до 120° 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 0.4λ (λ – длина волны), сплошной тонкой линией – случай, когда радиус РПП равен 0.8λ . Такие значения радиуса РПП (0.4λ и 0.8λ) выбраны не случайно. Исследования показали, что при увеличении радиуса РПП от 0.1λ до 0.4λ средний уровень бокового излучения снижается в диапазоне углов θ от 90 до 180° ,

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 ϵ' и μ' соответствуют реальным ферромагнитным покрытиям.

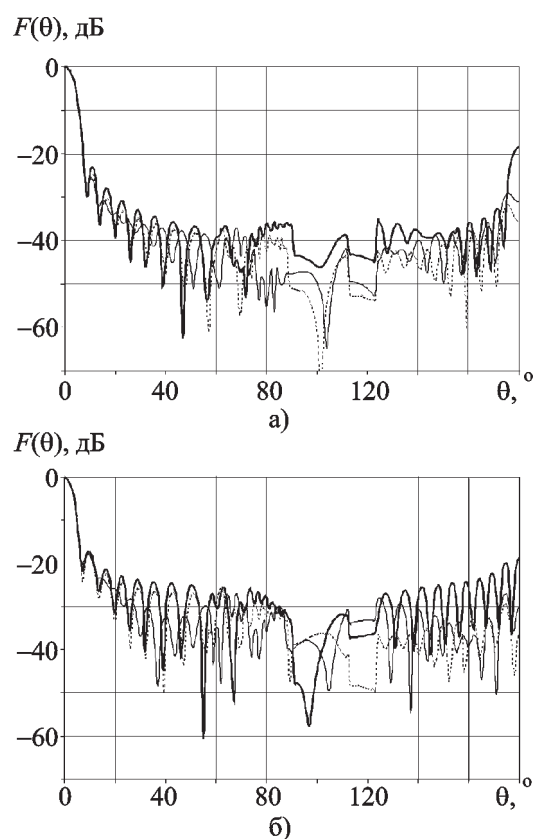


Рис. 4. ДН антенны $F(\theta)$, кромка которой снабжена РПП с $\epsilon' = 1 + j10$, $\mu' = 1 + j10$, при горизонтальной поляризации облучателя (а) и при вертикальной поляризации облучателя (б): для случая непокрытой кромки – сплошная жирная линия, радиус окружности РПП равен 0.8λ – сплошная тонкая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

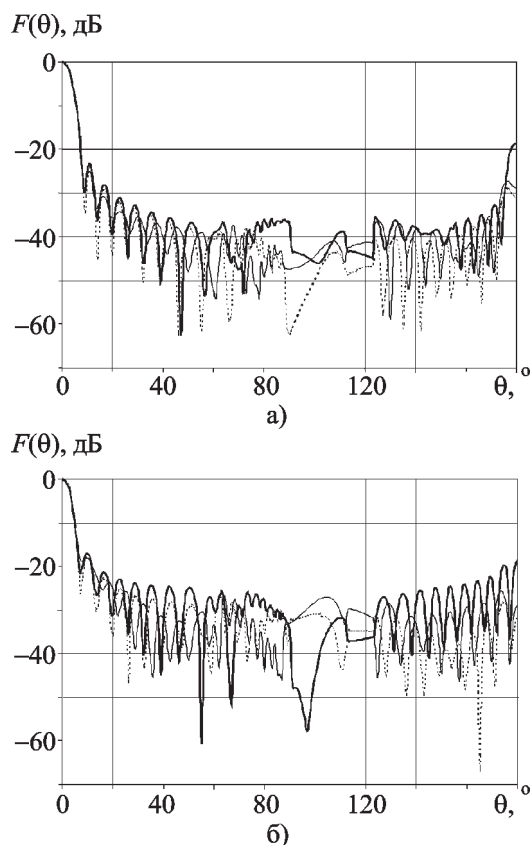


Рис. 5. ДН антенны $F(\theta)$, кромка которой снабжена РПП с $\epsilon' = 20 + j0.1$, $\mu' = 1.35 + j0.8$, при горизонтальной поляризации облучателя (а) и при вертикальной поляризации облучателя (б): для случая непокрытой кромки – сплошная жирная линия, радиус окружности РПП равен 0.8λ – сплошная тонкая линия, радиус окружности РПП равен 0.4λ – 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 0.4λ , 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 0.4λ . Однако в пределах $2 \div 7$ -го боковых лепестков ($\theta = 12 \div 68^\circ$) большей эффективностью обладает РПП с радиусом 0.8λ . 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 0.4λ , 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.