

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Е.В. Шафранов

Рассматривается решение задачи восстановления характеристик зеркальных антенн на основе моделирования процесса измерений поля в ближней зоне. В качестве точного решения принимается диаграмма направленности (ДН), рассчитанная апертурным методом по заданному распределению вектора напряженности электрического поля в апертуре антенны. Осуществляется восстановление ДН по источникам, заданным в ближней зоне, причем в качестве источников электромагнитного поля используются эквивалентные электрические и магнитные токи, рассчитанные апертурным методом на прямоугольнике измерений. Приводятся оценки восстановления ДН в пределах главного и двух боковых лепестков.

Ключевые слова: *апертурный метод, диаграмма направленности, зеркальная антенна, моделирование процесса измерения поля*

Введение

В работе [1] изложен строгий метод решения задачи дифракции электромагнитных волн (ЭМВ) на металлических экранах. Однако, когда размеры зеркальной антенны намного больше длины волны, более эффективными являются приближенные методы решения.

Одним из широко используемых методов расчета характеристик зеркальных антенн является апертурный метод [2 – 5]. Суть метода в применении к параболическим антеннам заключается в том, что в качестве апертуры используется плоский круглый раскрыв, вдоль которого задается распределение вектора напряженности электрического \vec{E}^s поля. На рис. 1 изображена геометрия рассматриваемых ниже задач, где S – апертура параболического зеркала, D – прямоугольник конечных размеров в ближней зоне, на котором предполагаются выполненными измерения тангенциальных составляющих электрического \vec{E}^D и магнитного \vec{H}^D полей. Параболическое зеркало предполагается неглубоким, а его размеры намного больше длины волны, тогда апертурный метод является приближенным методом решения задачи и обладает простой реализацией.

Рассматривается распространение электромагнитных волн в однородной, изотропной, абсолютно непроводящей среде (вакуум) с постоянными диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями. Предполагается гармоническая зависимость процесса возбуждения и распространение по закону $e^{i\omega t}$, где ω – частота электромагнитного поля.

В случае апертурных антенн источниками поля являются эквивалентные электрические и магнитные поля. Приведенные предпосылки являются традиционно принятыми при решении задач расчета поля по заданным источникам, будем их придерживаться при дальнейшем изложении.

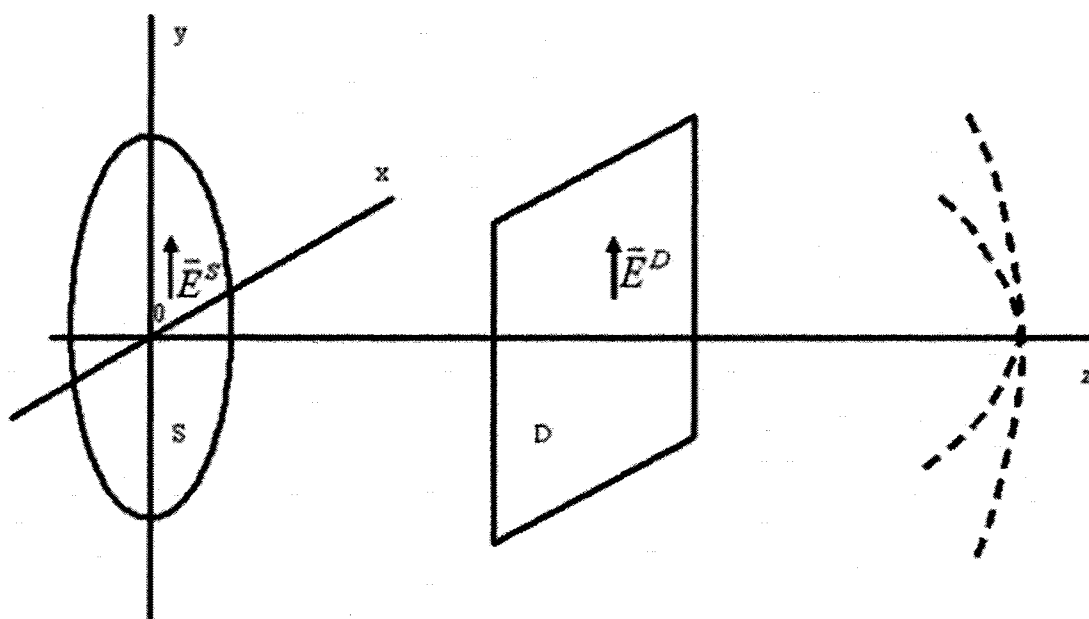


Рис. 1. Геометрия задачи

В силу сделанных предположений связь между векторами напряженности электрического \vec{E}^s и магнитного \vec{H}^s поля и источниками поля \vec{j}^{eo} (сторонний электрический ток) и \vec{j}^{mo} (сторонний магнитный ток) можно представить [2] в виде:

$$\vec{E}(M) = -i\omega\mu\vec{A}^e(M) - \frac{i}{\omega\epsilon} \text{grad div } \vec{A}^e(M) - \text{rot } \vec{A}^m(M), \quad (1)$$

$$\vec{H}(M) = -i\omega\epsilon\vec{A}^m(M) - \frac{i}{\omega\mu} \text{grad div } \vec{A}^m(M) + \text{rot } \vec{A}^e(M). \quad (2)$$

Так как рассматривается внешняя задача, решения соответствующих волновых уравнений, удовлетворяющих условиям излучения Зоммерфельда, могут быть представлены в виде:

$$\vec{A}^e(M) = \int_S \vec{j}^{eo}(P) \cdot G(M, P) dS, \quad (3)$$

$$\vec{A}^m(M) = \int_S \vec{j}^{mo}(P) \cdot G(M, P) dS, \quad (4)$$

где S – либо апертура зеркальной антенны, либо прямоугольник измерения в ближней зоне, M – точка наблюдения, расположенная вне источника поля, $P \in S$ – переменная точка интегрирования, а

$$G(M, P) = \frac{e^{-ikR(M, P)}}{4\pi R(M, P)}$$

функция Грина пограничного однородного изотропного пространства, k – волновое число, $R(M, P)$ – расстояние между точками M и P , $\vec{A}^e(M)$ и $\vec{A}^m(M)$ – векторные потенциалы, соответствующие эквивалентным электрическим и магнитным токам. Решение поставленных задач позволяет определить размеры и расположение прямоугольника измерений, обеспечивающие восстановление ДН с приемлемой для практики точностью.

Расчет диаграммы направленности в дальней зоне по заданным источникам в апертуре зеркальных антенн

В качестве метода решения задачи воспользуемся апертурным методом. Вектор \vec{H}^s в апертуре связан с вектором \vec{E}^s соотношением

$$\vec{j}(P) = 2[\vec{n}, \vec{H}(P)] = 2W^{-1}[\vec{n}, [\vec{s}, \vec{E}(P)]], \quad (5)$$

где $\vec{E}(P), \vec{H}(P)$ – первичное поле в точке $P \in S$, \vec{n} – нормаль к поверхности, направленная в сторону, откуда приходит излучение, \vec{s} – единичный вектор совпадающий с направлением падающей волны, W – волновое сопротивление свободного пространства с постоянными параметрами ϵ и μ .

Эквивалентные электрические и магнитные токи в апертуре S определяются с помощью соотношений

$$\begin{cases} \vec{j}^{eo}(P) = [\vec{k}, \vec{H}_y^S] \\ \vec{j}^{mo}(P) = [\vec{k}, \vec{E}_y^S] \end{cases}, \quad (6)$$

где \vec{k} – единичный вектор, направленный вдоль оси Oz .

Вид распределения \vec{E}^S зададим с помощью соотношений:

$$\begin{cases} E_y^S(x, y) = 1 - 2,667 \left(\frac{x^2 + y^2}{D_S^2} \right) \\ E_x^S(x, y) = \sin \left(1,78 \cdot \frac{\pi x}{D_S} \right) \cdot \left(1 - 2,667 \frac{y^2}{D_S^2} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

где D_S – диаметр раскрыва зеркала, а (x, y) – декартовы координаты текущей точки раскрыва. Первая формула (7) формирует обычную ДН, а вторая – разностную ДН, что позволяет рассчитать векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в произвольной точке наблюдения M по формулам (1) – (4).

Моделирование процесса измерения электромагнитного поля в ближней зоне

По заданному распределению электрического поля (7) в апертуре антенны S рассчитаем векторы электрического \vec{E}^D и магнитного \vec{H}^D поля на прямоугольнике измерений D , которые являются аналогом процесса измерения. По формулам (6), где $S = D$, найдем распределение эквивалентных электрических и магнитных токов и рассчитаем диаграмму направленности по формулам (1) – (4).

Расчет диаграммы направленности в дальней зоне по результатам моделирования поля в ближней зоне

Исследуем решение поставленных задач, в том случае, когда в качестве апертуры S параболической антенны выбирался круг с диаметром раскрыва $D_S = 10\lambda$, где λ – длина волны, а плоскость измерений D представляла собой квадрат со стороной 21λ , расположенный на расстоянии 20λ от раскрыва S . На рис. 2 – 5 представлены ДН, полученные в результате решения задачи апертурным методом в двух взаимно перпендикулярных сечениях как для обычной, так и для разностной диаграмм. При расчете эквивалентных электрических и магнитных токов на прямоугольнике измерений D (моделирование процесса измерений) число узлов прямоугольной сетки выбиралось равным 71×71 , что соответствует шагу дискретизации $\frac{\lambda}{3}$. По рассчитанным токам производился пересчет ДН в дальнюю зону. Решение

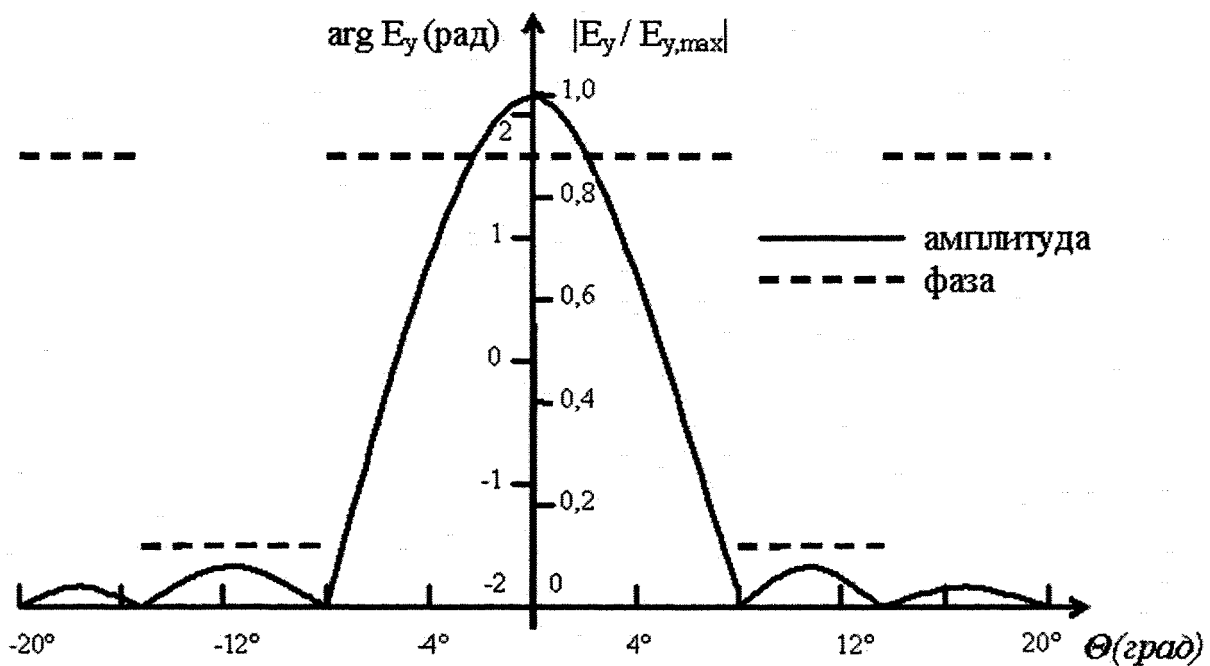


Рис. 2. Обычная ДН составляющей E_y в дальней зоне в плоскости вектора \vec{H}

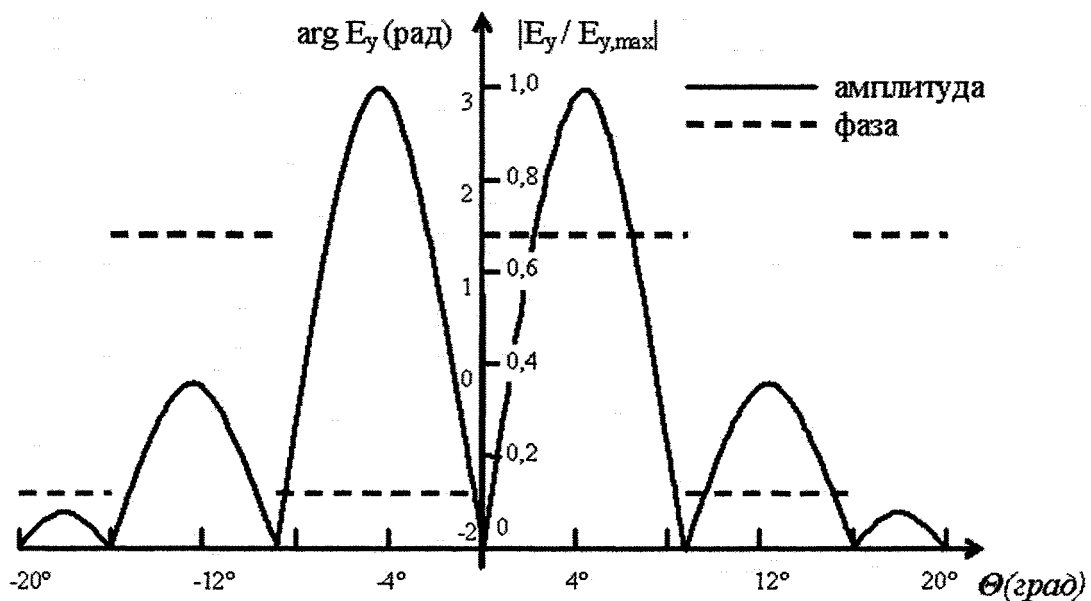


Рис. 3. Разностная ДН составляющей E_y в дальней зоне в плоскости вектора \vec{H}

задачи восстановления сравнивалось с решением задачи расчета ДН по источникам, заданным в апертуре зеркальной антенны. Результаты сравнения для обычной ДН показали, что в пределах главного и первого бокового лепестка рассчитанные ДН совпадают с хорошей степенью точности ($\Delta_{отн} < 5 \cdot 10^{-2}$ по амплитуде и $\delta_{абс} < 2 \cdot 10^{-1}$ рад по фазе). Второй боковой лепесток восстанавливается относительно хорошо по амплитуде ($\Delta_{отн} < 8 \cdot 10^{-2}$), но плохо по фазе ($\delta_{абс} \approx 1$ рад). Приемлемая практическая точность восстановления достигается и в случае разностных ДН.

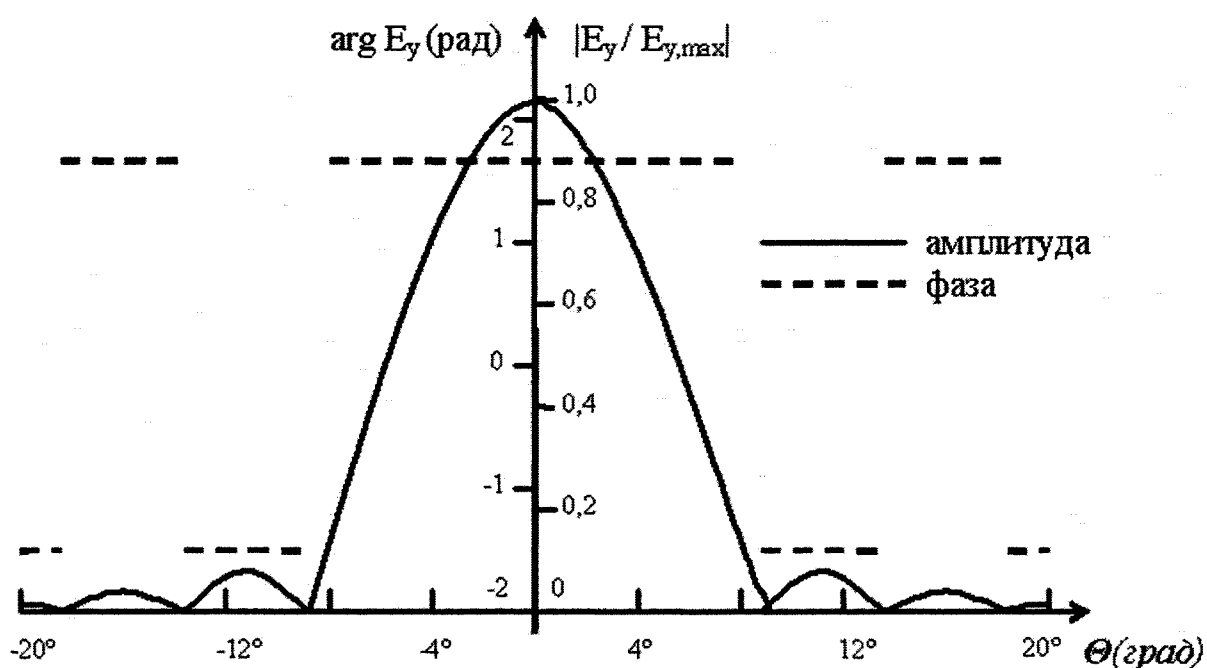


Рис. 4. Обычная ДН составляющей E_y в дальней зоне в плоскости вектора \vec{E}

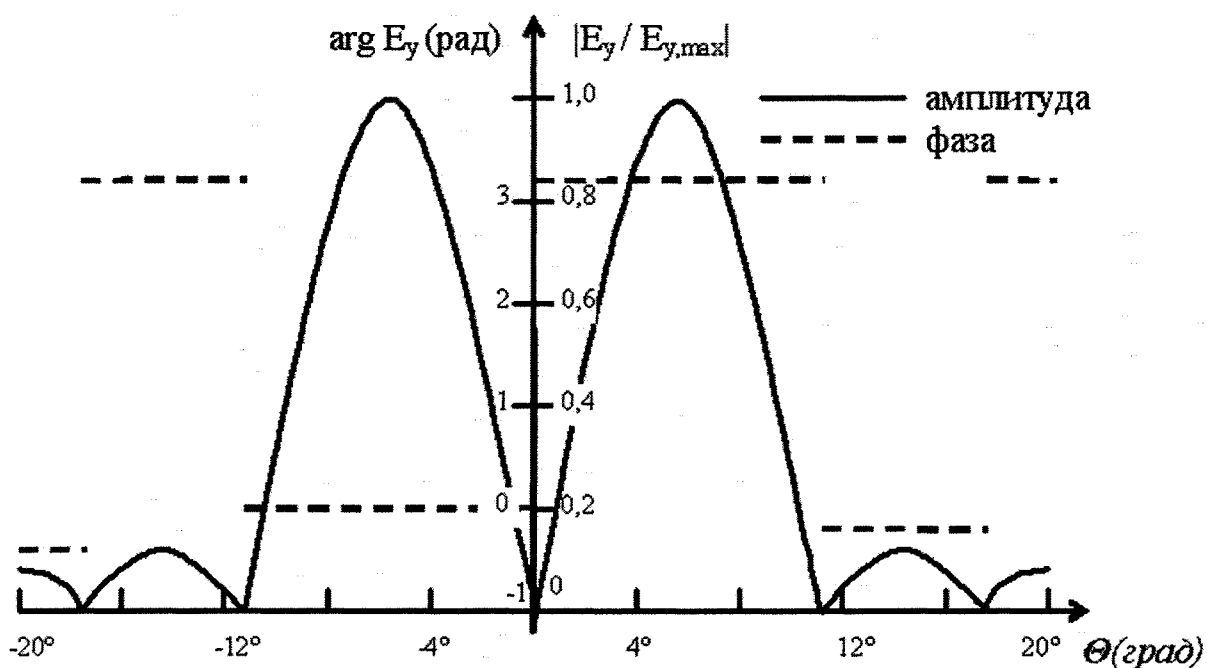


Рис. 5. Разностная ДН составляющей E_y в дальней зоне в плоскости вектора \vec{E}

Литература

1. Шафранов, Е.В. О численном решении задачи дифракции на основе метода интегральных уравнений электрического поля / Е.В. Шафранов // Материалы Всероссийской научной конференции «Математика. Механика. Информатика». – Челябинск, 2007. – С. 235 – 241.

2. Марков, Г.Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. – М.: Сов. радио, 1979.
3. Крымский, В.В. Применение сплайн функций при расчете ДН по измерениям в ближней зоне / В.В. Крымский, Е.В. Шафранов // Антенные измерения: тез. докл. IV Всесоюз. конф. «Метрологическое обеспечение антенных измерений». – Ереван, 1987. – С.348 – 350.
4. Горобец, Н.Н. Программная реализация задачи расчета электромагнитного поля в ближней и дальней зоне апертурных антенн / Н.Н. Горобец, Е.В. Шафранов // Теория и техника антенн: тез. докл. XXVI межведомств. конф. «Метрологическое обеспечение антенных измерений», секция «Зеркальные и другие антенны». – М., 1990. – С. 31 – 33.
5. Восстановление пеленгационных характеристик антенн с помощью сплайнов / В.А. Василенко, А.Б. Хашимов, Е.В. Шафранов и др. // Вопросы радиоэлектроники: серия ОВР. – 1988. – Вып. 4. – С. 73 – 76.

Кафедра теории управления и оптимизации,
Челябинский государственный университет

Поступила в редакцию 7 марта 2008 г.