

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Широко применяемый в расчетах полей излучения зеркальных антенн метод приближения Кирхгофа (ПК) с достаточной для практики точностью позволяет определять поля в секторе главного и первых боковых лепестков. В секторе дальних боковых и задних лепестков поле излучения рассчитывается с высокой точностью методом геометрической теории дифракции [1]. Однако последний метод становится менее эффективным в распространенном случае применения устройств из поглотителей электромагнитных волн для снижения фона излучения. Эти устройства размещаются в местах возникновения паразитной дифракции (на краях зеркала, в узле облучателя и т. д.) и тем самым снижают уровень фона излучения [2]. Поэтому представляют интерес уточнения метода ПК для расчета полей излучения конструируемых зеркальных антенн с устройствами из поглотителей электромагнитных волн.

Целью настоящей работы является попытка определения возможностей уменьшения неточности метода приближения Кирхгофа.

В рамках метода ПК при определении полей излучения зеркальных антенн делают следующие традиционные допущения [3]:

а) любая точка зеркала находится в дальней зоне облучателя;

б) размеры зеркала и радиус кривизны его в любой точке зеркала значительно больше длины волны;

в) токи на теневой стороне зеркала принимаются равными нулю;

г) не учитываются: влияние зеркала на характеристики облучателя, рассеяние энергии на облучателе и элементах конструкции зеркальной антенны, теневой эффект облучателя, влияние токов на кромке зеркала, погрешности изготовления и юстировки.

Допущение (а) очевидно дает значительную погрешность, поскольку в монографии [1] показано, что учет нахождения зеркала в ближней зоне облучателя с учетом приближения Френеля позволяет существенно уточнять результаты. Однако приближение Френеля справедливо в узком интервале расстояний, а по углу наблюдения лишь в секторе $\pm 30^\circ$. Следовательно, при расчете полей излучения желательнее учитывать наиболее точно расстояние между текущей точкой на излучающей поверхности облучателя и текущей точкой на зеркале.

В этом случае в какой-то степени учитывается кривизна зеркала, т. е. уменьшается вклад допущения (б).

Что же касается размеров зеркала значительно больших длин волн, то для реальных направленных зеркальных антенн это является необходимым условием.

Допущение (в) и неучет влияния токов на кромке зеркала соотвествуют использованию модели Макдональда при расчете полей дифракции на отверстиях в бесконечном плоском абсолютно «черном» экране [4]. Естественно, при этом предполагается тождественность векторов электромагнитного поля в отверстии «черного» экрана и в раскрыве апертурной антенны. На практике приближение к модели Макдональда получается за счет использования устройств из поглотителей электромагнитных волн, размещаемых на теневой поверхности и по краю (кромке) зеркала [2]. Отсюда следует, что допущение (в) и неучет влияния токов на кромке зеркала вполне оправданы при расчете полей излучения в переднем полупространстве зеркальных антенн с вышеперечисленными устройствами из поглотителей электромагнитных волн.

Допущения (г), кроме неучета погрешностей изготовления и юстировки, в основном оправданы, когда используются устройства из поглотителей электромагнитных волн для снижения нежелательного влияния указанных в допущениях факторов. Некоторые из таких устройств и их эффективность рассмотрены в работе [2]. Естественно, что имеющиеся затенения раскрыва желательнее учитывать для повышения точности расчетов полей излучения. Однако учет затенений в общем виде невозможен в связи с различными особенностями конструкций реальных антенн.

Погрешности изготовления зеркала проявляются в диаграмме направленности ориентировочно на уровне — (30 ... 50 дБ). Следовательно, реальной возможностью уточнения расчетов методом ПК может быть более строгий учет расстояний между текущими точ-

ками на излучающей поверхности облучателя и точками на поверхности зеркала или в раскрыве последнего.

Для проверки такого предположения выполним расчет распределения токов на поверхности рефлектора зеркальной антенны двумя вариантами. В первом случае воспользуемся точными выражениями для поля облучателя в рамках метода ПК, т. е. без погрешности, вызываемой как допущением (а), так и приближением Френеля. Во втором случае используем допущение (а) с использованием понятия диаграммы направленности облучателя.

В качестве объекта исследований возьмем распространяющую зеркальную антенну в виде параболоида вращения с центральной запиткой апертурным (волноводно-рупорным) облучателем линейной поляризации (рис. 1). Пусть облучателем является круглое отверстие диаметром $0,3 \lambda$ с постоянным амплитудно-фазовым распределением.

Поскольку нас интересует наиболее точный учет расстояния, нужно воспользоваться выражениями для расчета полей излучения апертурных антенн, полученными в рамках ПК без каких-либо упрощений. Такие выражения приведены в работе [5], где они использовались для расчета полей излучения в ближней зоне рупорных антенн. Там же показано удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Запишем выражения для полей излучения круглого отверстия (облучателя) в декартовой системе координат в случае линейной поляризации возбуждающего поля:

$$E_{x1} = \frac{i}{4\pi k} \int_0^{2\pi} d\varphi_0 \int_0^a (E_s/R_1^2) g f_{1\rho_0} d\rho_0; \quad (1)$$

$$E_{y1} = \frac{i}{4\pi k} \int_0^{2\pi} d\varphi_0 \int_0^a (E_s/R_1^2) g f_{2\rho_0} d\rho_0; \quad (2)$$

$$E_{z1} = \frac{i}{4\pi k} \int_0^{2\pi} d\varphi_0 \int_0^a (E_s/R_1^2) g f_{3\rho_0} d\rho_0; \quad (3)$$

$$H_{x1} = \frac{i}{4\pi k W} \int_0^{2\pi} d\varphi_0 \int_0^a (E_s/R_1^2) g f_{2\rho_0} d\rho_0; \quad (4)$$

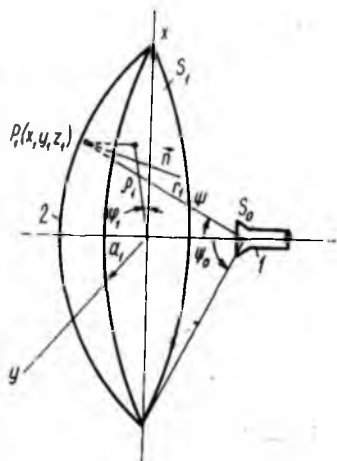


Рис. 1

$$H_{y_1} = \frac{i}{4\pi k W} \int_0^{2\pi} d\varphi_0 \int_0^a (E_s/R_1^2) g f_4 \rho_0 d\rho_0; \quad (5)$$

$$H_{z_1} = \frac{i}{4\pi k W} \int_0^{2\pi} d\varphi_0 \int_0^a (E_s/R_1^2) g f_5 \rho_0 d\rho_0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{нал}} &= x_0 E_s; \quad g = [\exp(-ikR_1)]/R_1; \\ f_1 &= (u/R_1^2)(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_0 \cos \varphi_0)^2 - ikzv - v + k^2 R_1^2; \\ f_2 &= (u/R_1^2)(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_0 \cos \varphi_0)(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_0 \sin \varphi_0); \\ f_3 &= (u/R_1^2)(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_0 \cos \varphi_0)z + ikv(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_0 \cos \varphi_0); \\ f_4 &= (u/R_1^2)(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_0 \sin \varphi_0)^2 - ikzv - v + k^2 R_1^2; \\ f_5 &= (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_0 \sin \varphi_0)[(u/R_1^2)z + ikv]; \end{aligned}$$

W — волновое сопротивление среды в месте нахождения излучающего отверстия, $W = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}}$

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{\rho_1^2 + z + \rho_0^2 - 2\rho_1 \rho_0 \cos(\varphi_1 - \varphi_0)} = \\ &= \sqrt{r_1^2 + \rho_0^2 - 2\rho_1 \rho_0 \cos(\varphi_1 - \varphi_0)}; \end{aligned}$$

R_1 — расстояние между текущей точкой на поверхности круглого излучающего отверстия (облучателя) и текущей точкой на поверхности наблюдения ρ_1 ; r_1 — расстояние от центра круглого излучающего отверстия до точки наблюдения ρ_1 ;

$$u = 3 + 3ikR_1 - k^2 R_1^2; \quad v = 1 + ikR_1; \quad k = 2\pi/\lambda;$$

ρ_j, φ_j — цилиндрические координаты точки на излучающей поверхности или точки наблюдения $\rho_j \in S_j$.

Индекс «0» означает отношение координат к облучателю.

Поскольку не делалось никаких упрощений, полученные выражения справедливы для расчета полей на любых расстояниях от апертуры как в ближней, так и в дальней зонах.

Воспользуемся выражениями (1) — (6) для определения распределения токов на поверхности зеркала.

Ток на криволинейной поверхности зеркала определяется известной приближенной формулой [3]

$$\vec{j} = 2[\vec{n}_0 \vec{H}_1], \quad (7)$$

где \vec{n}_0 — внутренняя нормаль к параболической освещенной поверхности зеркала; \vec{H}_1 — напряженность магнитного поля, созда-

ваемого облучателем на поверхности зеркала, которая определяется выражениями (4) — (6).

В связи с тем, что угол ψ между падающим лучом на зеркало от облучателя и осью параболоида (осью z) в два раза больше угла между отраженным лучом, параллельным оси z , и нормалью к параболоиду в точке отражения [3], получаем

$$n_x = -\cos \varphi_1 \sin \psi / 2; \quad n_y = -\sin \varphi_1 \sin \psi / 2; \quad n_z = \cos \psi / 2. \quad (8)$$

Распределение тока на поверхности зеркала будет иметь вид

$$\begin{aligned} \vec{j} = & x_{01} \vec{j}_x + y_{01} \vec{j}_y + z_{01} \vec{j}_z = x_{01} 2 (-\sin \varphi_1 \sin \psi / 2 H_{z1} - \cos \psi / 2 H_{y1}) + \\ & + y_{01} 2 (\cos \psi / 2 H_{x1} + \cos \varphi_1 \sin \psi / 2 H_{z1}) + z_{01} 2 (-\cos \varphi_1 \sin \psi / 2 H_{y1} + \\ & + \sin \varphi_1 \sin \psi / 2 H_{x1}), \end{aligned} \quad (9)$$

где x_{01} , y_{01} , z_{01} — единичные орты декартовой системы координат с центром в раскрыве зеркала (рис. 1).

Из выражения (9) видно, что ток на поверхности зеркала в случае апертурного облучателя линейной поляризации в общем виде содержит все три компоненты. Это отличается от чаще всего получаемых выражений, где отсутствует одна поперечная компонента при линейной поляризации облучателя и слагаемые с сомножителями H_{x1} и H_{z1} [3].

По формулам (9) и (4) — (6) были рассчитаны распределения всех трех компонент тока на поверхности зеркала с фокусным расстоянием 30λ в зависимости от угла облучения (засветки) рефлектора ψ .

Для выполнения интегрирования по поверхности раскрыва облучателя площадь его раскрыва разбивалась на элементарные участки. При этом количество элементарных участков (их площадь) определялась исходя из того, чтобы набег фазы от двух соседних участков не превышал в точке наблюдения величины π/m ($m=1, 2, 3, 4, \dots$). Двойные интегралы в формулах (4) — (6) по каждому участку приближенно определялись как вычисленное в точке значение подинтегральной функции, умноженное на площадь этого участка.

Разбиение площади апертуры облучателя осуществляли по радиусу раскрыва и по углу φ так, чтобы набег фаз от двух выбранных точек соседних элементарных участков не превышал $\pi/30$. Расстояние между соседними расчетными точками в апертуре облучателя при заданном условии вдоль радиуса не должно превышать $\lambda/2m$, а по углу — $\Delta\varphi = \arccos [1 - (\lambda/2ma)]$. Для нашего случая с учетом повышения точности вдоль радиуса размещалось 40 расчетных точек, а по углу они размещались через $3, 6^\circ$.

На рис. 2, а, б, в приведены некоторые амплитудные распределения компонент тока из большого количества рассчитанных: j_x в плоскости E , j_z в плоскости E , j_y в плоскости под углом 45° к плоскостям E и H . Все значения компонент тока нормированы

на максимальное значение компоненты j_x , которое имеет место при $\psi = 0^\circ$. На рис. 1, 2 приведены также нормированные амплитудные распределения компонент тока j_x и j_z на поверхности зеркала в случае облучателя элемента Гюйгенса [3]. Последние распределения рекомендуются для расчета полей излучения зеркальных

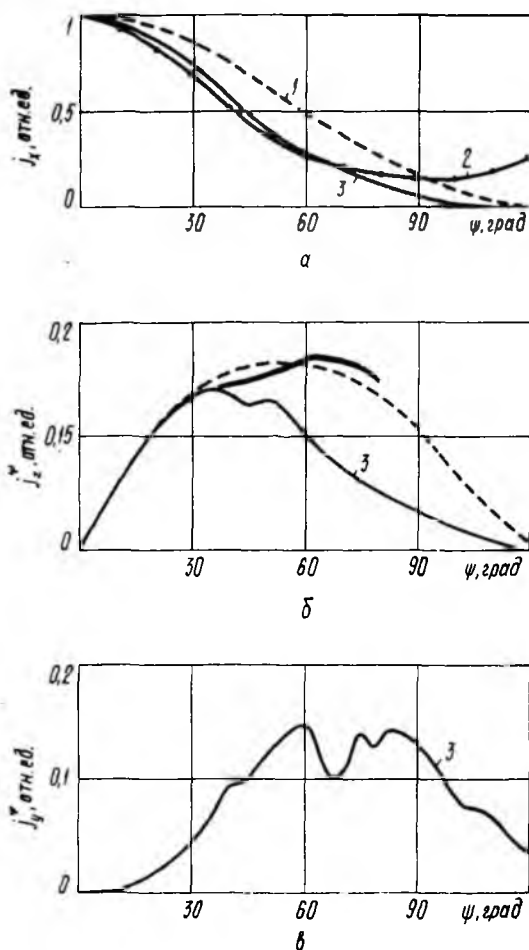


Рис. 2

излучающих систем при любых волноводно-рупорных облучателях.

Расчитанное амплитудное распределение при использовании понятия ДН облучателя приведено на рис. 2, а (кривая 2). В качестве облучателя было также выбрано круглое отверстие диаметром $0,3 \lambda$ с постоянным амплитудно-фазовым распределением. Характерными особенностями этого распределения являются наличие только одной компоненты j_x и идентичность его во всех плоскостях.

Из рис. 2 видно, что амплитудные распределения тока для разных случаев заметно отличаются. Аналогичные картины получают и при определении полей в раскрыве. Это дает право утверждать о возникновении существенных отличий в области боковых и задних лепестков диаграмм направленности зеркальной антенны, которые определяются этими распределениями. Существует ряд работ, где показано, что незначительные отличия в амплитудных распределениях токов на зеркале или полей в апертуре существенно изменяют картину фона излучения.

Появление максимума кроссполяризационной компоненты (КП) j_y под углом 45° к основным плоскостям при нашем точном расчете не является неожиданностью. Имеются работы, где более точными методами показано существование КП-компоненты в поле излучения осесимметричной зеркальной антенны с апертурным облучателем. В литературе приведены экспериментальные результаты, которые подтверждают наличие максимумов КП-составляющей под углом 45° к основным плоскостям в случае рупорного облучателя [2].

Полученные результаты свидетельствуют о возможности уменьшения неточности метода ПК за счет строгого учета расстояний между точками на излучающей поверхности облучателя и точками на рефлекторе. Проведенный расчет может служить основой для определения параметров затеняющих раскрыв рефлектора устройств снижения фона. Одними из таких устройств являются поглощающие поляризационные решетки для снижения кроссполяризационного излучения [2].

Из изложенного следует, что для получения достоверной картины уровня фона излучения зеркальных антенн необходимо в задачах анализа методом ПК точно учитывать расстояние между текущими точками на зеркале (в его раскрыве) и в раскрыве облучателя. Аналогичный учет требуется и при решении внутренней задачи синтеза в интересах создания зеркальных антенн с малым уровнем фона излучения. Однако этот учет значительно усложняет получение результатов при решении обоих типов задач.

Список литературы: 1. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М., 1978. 248 с. 2. Павлов В. Ф., Хоменко С. И. Применение поглотителей электромагнитных волн для снижения фона излучения зеркальных антенн. Х., 1985. 35 с. (Препр./АН УССР. Ин-т радиоэлектроники; 271). 3. Айзенберг Г. З. Антенны УКВ: В 2 ч./Под ред. Г. З. Айзенберга. М., 1977. Ч. 1. 288 с. 4. Фельд Я. Н. К расчету поля апертурных антенн//Радиотехника и электроника. 1981. 26, № 1. С. 178—179. 5. К вопросу определения полей излучения в ближней зоне апертурных источников/А. А. Александров, Т. С. Волошина, В. Ф. Павлов и др.//Радиотехника. 1986. Вып. 77. С. 3—9.

Поступила в редколлегию 03.08.89