

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН  
С ДИСКРЕТНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ****SCATTERING CHARACTERISTICS OF THE MIRROR  
ANTENNAS WITH DISCREET REFLECTORS**

**Аннотация.** На основе интегрального уравнения для двухмерной модели проведен численный анализ рассеивающих свойств зеркальных антенн с дискретными рефлекторами. Приводятся результаты расчетов характеристик обратного и двухпозиционного рассеяния.

**Summary.** On the basis of integral equation for two-dimensional model of mirror antennas with discrete reflectors the numerical analyses of scattering properties have been conducted. The results of calculations of monostatic and bistatic scattering characteristics have been analysed.

В последние годы наметился определенный интерес к исследованию характеристик зеркальных антенн с квазиплоскими рефлекторами, среди которых можно отметить ряд работ, содержащих исследования направленных и фокусирующих свойств рефлекторов с дискретно-плоской [1-5] (зеркала Френеля) и дискретно-параболической [6] (секционированные зеркала) рабочими поверхностями.

В то же время существует проблема исследования характеристик рассеяния зеркальных антенн, в особенности антенн, достаточно больших электрических размеров, и тем более – антенн с дискретными рефлекторами (АДР).

Это связано с тем, что анализ характеристик рассеяния системы состоящей из проводящих тел характеризуется большей трудоемкостью и сложностью, многоэтапными расчетами [7]. При таком анализе необходимо особо корректно учитывать дифракционные явления, в том числе многократные переотражения в такой системе. Размеры элементов в ней могут быть соизмеримыми с длиной волны, и поэтому следует использовать численные алгоритмы, базирующихся на строгих математических методах.

Развитие численных методов, основанных на возможностях современных ЭВМ, позволяет использовать для исследования антенн такие строгие методы анализа, как метод интегральных уравнений [8,9]. На этой основе, например, были проведены исследования направленных и фокусирующих свойств рефлекторов с дискретными рабочими поверхностями и размером апертуры равным  $50\lambda$  [10,11], однако анализ рассеивающих свойств таких рефлекторов не был проведен.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы проанализировать особенности влияния геометрических параметров и частотных факторов на характеристики рассеяния зеркальных антенн с дискретными рефлекторами, сопоставляя их с характеристиками рассеяния эталонной зеркальной антенны с обычным параболическим зеркалом.

Такой анализ, использующий упомянутый выше метод интегральных уравнений, на модели зеркальной антенны, состоящей из низкопрофильного дискретного рефлектора с облучателем в виде отрезка волновода, позволил достаточно корректно учесть все дифракционные эффекты, как в самом дискретном рефлекторе, так и в системе рефлектор-облучатель.

**1. Геометрия дискретных поверхностей.** Для анализа выбраны следующие модели рефлекторов, имеющих симметричную дискретную рабочую поверхность: дискретно-плоские и дискретно-параболические.

Под дискретной поверхностью будем понимать совокупность частей (областей, зон), выделенных определенным образом на некоторых воображаемых поверхностях. Если эти поверхности плоские, то получившуюся в результате конструкцию назовем дискретно-плоской поверхностью, если параболические, то дискретно-параболической поверхностью.

В двухмерном случае *дискретно-параболическая поверхность* образуется как совокупность элементов – проводящих тонких поверхностей: софокусных вырезов параболических цилиндров, эти элементы ограничены с двух сторон воображаемыми параллельными плоскостями (рис. 1,а). Высота профиля такой поверхности  $t$  может быть выбрана равной половине средней длины волны рабочего диапазона  $\lambda_0$  либо кратна ей, причем фокусные расстояния соседних параболических элементов оп-

ределяются из соотношения  $f_{n+1} = f_n + t$ , что необходимо для обеспечения равномерности фазового распределения поля в раскрыве при использовании такой поверхности в качестве рефлектора.

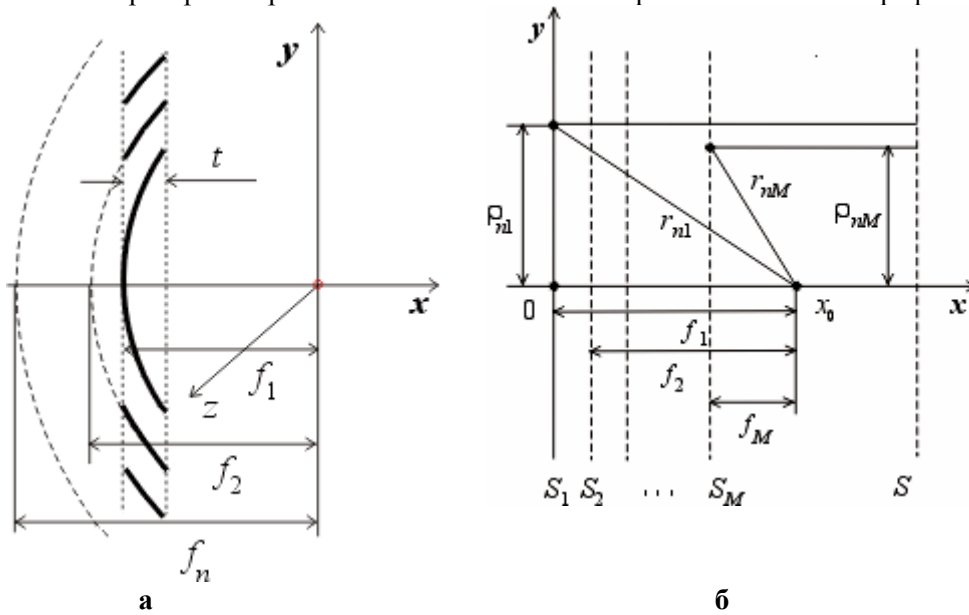


Рисунок 1 – Геометрические построения при дискретизации поверхностей

Дискретно-плоская поверхность образуется путем симметричной дискретизации нескольких плоских слоев. Например, рассмотрим  $M$  параллельных плоскостей  $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_M$  (назовем их слоями), расположенных, как показано на рис. 1,б.

Выберем на оси некоторую точку  $x_0$ , зададимся фокусными расстояниями  $f_m$  для каждого слоя в соответствии с правилом

$$f_{m+1} = f_m - \lambda_0 / 2M . \quad (1)$$

Назовем целое число  $M \geq 2$  параметром дискретизации, при этом  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  соответствует номеру слоя.

Выполним разбиение каждой из плоскостей  $S_m$  на части (зоны) и пронумеруем эти зоны так, чтобы расстояния от точки  $x_0$  до крайних точек каждой  $n$ -й зоны (фокальные радиусы  $r_{nm}$ ), принадлежащих  $m$ -й плоскости, удовлетворяли условию

$$r_{nm} = f_m + \frac{n\lambda_0}{M} .$$

Радиусы этих зон  $\rho_{nm}$  можно определить, воспользовавшись выражением

$$\rho_{nm} = \sqrt{\frac{2f_m\lambda_0}{M} + \left(\frac{n\lambda_0}{M}\right)^2} , \quad (2)$$

где  $n$  – это номер зоны,  $n = 1, 2, \dots$

Если источник монохроматического поля поместить в точку  $x_0$ , то условие (1) обеспечит в плоскости  $S$  параллельной слоям, синфазность рассеянных дискретной поверхностью полей. При этом разность фаз полей, создаваемых таким источником в крайних точках каждой зоны, составит  $2\pi / M$ .

Если параметр дискретизации  $M = 1$ , то фазы полей в крайних точках каждой зоны будут отличаться ровно на  $2\pi$ . Поскольку в этом случае  $r_{(n+1)m} - r_{nm} = \lambda_0$ , имеет смысл назвать такие зоны одноволновыми. Заметим, что случаю  $M = 2$  соответствуют полуволновые зоны (зоны Френеля), случаю  $M = 4$  – четвертьволновые и т.д. Можно назвать зоны, образуемые при дискретизации с параметром  $M > 2$ , обобщенными зонами Френеля.

Пронумеруем одноволновые зоны ( $k_m = 1, 2, \dots$ ), начав от оси  $x$ . При  $M > 2$  в пределах каждого  $m$ -го слоя можно выделить некоторое подмножество «синфазных» обобщенных зон Френеля, номера этих зон  $q_m$  определяются из выражения

$$q_m = (k_m - 1)M + m.$$

Считая, что в каждом слое только выделенные («синфазные») зоны выполнены в виде тонкого проводящего слоя, получаем в итоге симметричную многослойную дискретную поверхность.

В отличие от однослойной (Френелевской) дискретно-плоской поверхности, которая имеет четыре основные фокальные точки [10], многослойная дискретная поверхность имеет только две фокальные точки, общие для всех слоев. Так, если источник цилиндрической волны находится в фокусе, то синфазность полей рассеянных всеми слоями наблюдается в правом полупространстве в бесконечно удаленной точке на оси  $x$ , если же наоборот – источник находится в бесконечно удаленной точке на оси  $x$ , то синфазность рассеянных полей имеет место в точке  $x_0$ .

**2. Методика численного анализа.** Последующий анализ реализован на двухмерной модели АДР, состоящей из рефлектора с дискретной рабочей поверхностью и облучателя в виде плоского волновода, раскрыв которого совмещен с геометрическим фокусом рефлектора.

Исследуемые модели антенн имели размер раскрыва  $D = 50 \lambda_0$ , фокусное расстояние  $f_1 = 0,5D$ , высоту профиля  $t = 0,5 \lambda_0$ , длину и ширину волновода облучателя  $a = 1,5 \lambda_0$ ,  $b = 0,71 \lambda_0$ .

Геометрия дискретных рефлекторов рассчитывалась для средней частоты рабочего диапазона  $f_0$  и соответствующей ей длине волны в свободном пространстве  $\lambda_0$ .

В процессе анализа облучатель и рефлектор рассматривались как единая двухмерная бесконечно тонкая идеально проводящая дискретная многосвязная поверхность (экран). Ориентация экрана такова, что в декартовой системе координат  $(x, y, z)$  плоскость  $z = 0$  совпадает с плоскостью сечения и образует в этом сечении контур экрана  $L$ .

Профили моделей антенн с дискретно-параболическим и дискретно-плоским рефлекторами показаны на рис. 2,а и рис. 2,б соответственно (при этом для большей наглядности пропорции не соблюдены). Антенны облучаются плоской монохроматической волной (Е-поляризация), приходящей с направления, определяемого углом  $\theta_i$ , наблюдение рассеянного поля происходит в дальней зоне антенны с направления, определяемого углом  $\theta_s$ .

Для нахождения вторичных (рассеянных) полей вначале численно решалась задача дифракции при падении на антенну плоской волны с заданного направления, и находилось распределение поверхностной плотности электрического тока на экране, затем путем численного интегрирования находились рассеянные поля в заданном секторе углов (двухпозиционное рассеяние). Если же рассчитывалась диаграмма обратного рассеяния, то после определения поля рассеянного в обратном направлении, последовательно изменялось направление падения плоской волны (и, соответственно, направление на точку наблюдения при нахождении рассеянного поля) и после чего заново решалась задача дифракции.

Для рассматриваемого случая нахождение поверхностной плотности тока  $J_z$  на экране сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода [8,9]

$$\frac{\omega\mu}{4} \int_L J_z(\tau) K(\tau, t) d\tau = E_z^0(\tau), \quad (3)$$

где  $K(\tau, t) = H_0^{(2)}(kR_0(\tau, t)) \sqrt{(\partial\xi(t)/\partial t)^2 + (\partial\eta(t)/\partial t)^2}$ ,  $H_0^2$  – функция Ханкеля второго рода нулевого порядка;  $E_z^0(\tau)$  – падающее поле;  $R_0$  – расстояние между точкой интегрирования и точкой наблюдения;  $\xi, \eta$  – локальные координаты точек на контуре  $L$ .

Численное решение уравнения (3) осуществляется путем сведения его к системе линейных алгебраических уравнений методом коллокации. Как известно, устойчивость этого решения обеспечивается без применения каких-либо дополнительных регуляризирующих процедур [8, 9].

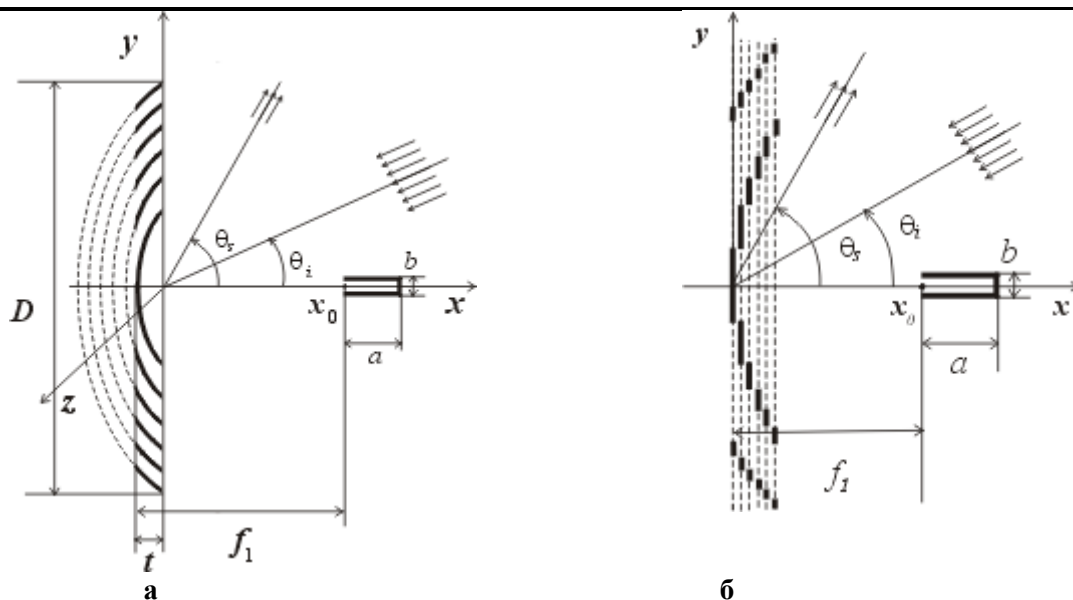


Рисунок 2 – Геометрия моделей антенн с дискретными рефлекторами

В процессе решения определялось оптимальное (исходя из допустимой погрешности расчетов и затрачиваемого времени) число точек коллокации. Это число составляло примерно 40 точек на участке экрана размером в одну длину волны, что обеспечивает относительную погрешность расчетов менее 0,1%.

Контроль внутренней сходимости решения, выполнения граничных условий и условия Мейкнера, проводившийся в процессе вычислений, гарантировал точность и достоверность получаемых результатов.

Найденные распределения плотности продольного поверхностного тока на экране позволили рассчитать характеристику однопозиционного, т.е. обратного рассеяния ( $\theta_i = \theta_s = \text{var}$ ) и характеристику двухпозиционного рассеяния ( $\theta_i = \text{const} = 0, \theta_s = \text{var}$ ) антенн с дискретными рефлекторами при разной длине волны падающего поля.

**3. Обсуждение результатов.** Некоторые результаты проведенных расчетов иллюстрируют диаграммы рассеяния в переднем полупространстве АДР, приведенные на рис. 3, 4, 5 и 6, причем все рисунки, отмеченные символом "а", соответствуют частоте  $f_0$ , а те, что отмечены символом "б" – частоте, равной  $1,5f_0$ .

На этих же рисунках пунктиром показаны диаграммы рассеяния аналогичной (эталонной) антенны со сплошным параболическим рефлектором тех же размеров и с тем же углом раскрыва. При этом, при построении диаграмм все рассеянные поля нормировались по отношению к максимальной амплитуде поля рассеянного эталонной антенной.

Это позволило адекватно оценивать и сравнивать количественные и качественные изменения, характеризующие рассеивающие свойства антенн разных типов и на разных частотах.

Так, на рис. 3,а сплошной линией изображена диаграмма двухпозиционного рассеяния ( $\theta_i = 0, -90^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ$ ), рассчитанная на частоте  $f_0$  для антенны с дискретно-параболическим рефлектором, аналогичная диаграмма, рассчитанная на частоте равной  $1,5f_0$  изображена на рис. 3,б.

Видно, что на основной частоте уровень поля рассеянного в направлении оси антенны (главный лепесток диаграммы рассеяния) одинаков для обеих антенн, характер огибающей боковых лепестков тоже примерно одинаков, а для АДР их средний уровень в секторе углов  $30^\circ \leq |\theta_s| \leq 70^\circ$  несколько выше, а секторе углов  $75^\circ \leq |\theta_s| \leq 90^\circ$  наоборот – несколько меньше. Последняя особенность, по-видимому, характерна для всех рефлекторов квазиплоской формы.

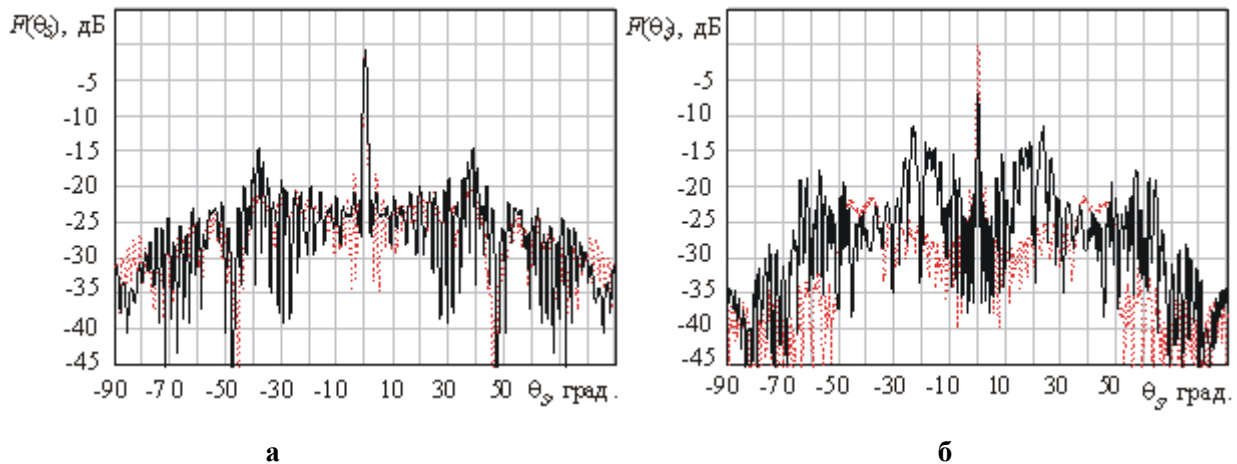


Рисунок 3 – Диаграммы рассеяния дискретно-параболической антенны

В то же время на частоте  $1,5f_0$  (рис. 3,б) главный лепесток примерно на 7 дБ меньше, однако заметно возрастает уровень боковых лепестков в области  $|\theta| \approx 20^\circ$  и  $|\theta| \approx 60^\circ$ .

Аналогичная картина наблюдается и на рис. 4,а и 4,б, которые иллюстрируют диаграммы двухпозиционного рассеяния антенны с дискретно-плоским рефлектором. Небольшое отличие состоит в том, что уровень рассеянного поля в направлении главного лепестка на обеих частотах примерно на 2 дБ меньше, чем у дискретно-параболической антенны.

Отмеченные изменения в диаграммах рассеяния, наблюдающиеся в АДР при вариации частоты, в основном объясняются эффектом смещения фокального пятна [10, 11].

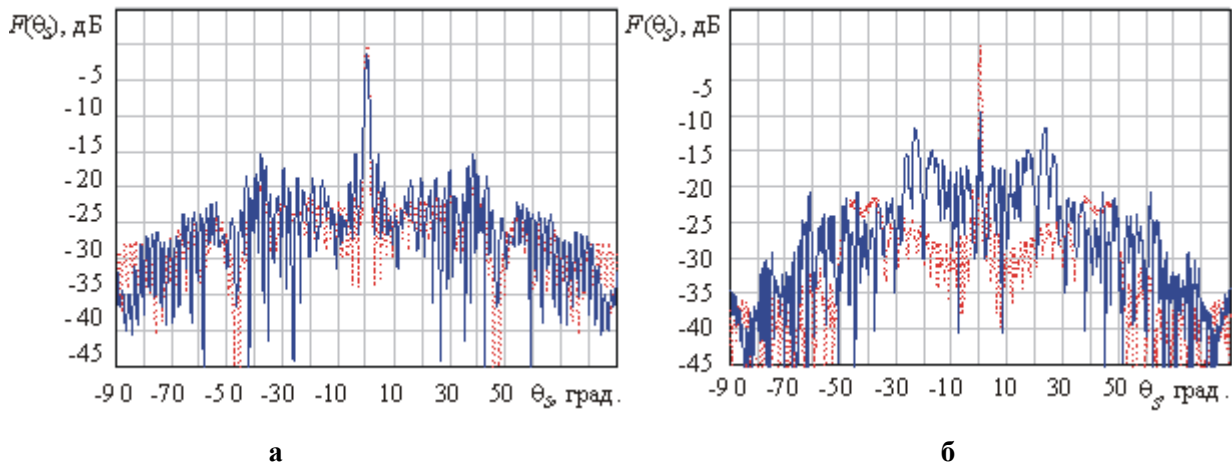


Рисунок 4 – Диаграммы рассеяния дискретно-плоской антенны

Рассматривая диаграммы обратного рассеяния  $\theta_s = \theta_i$ ,  $0^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ$ , изображенные на рис. 5 и 6 отметим, что в них имеются три области углов, отличающиеся своим характером:

- 1 – область значений  $0 \leq \theta_s \leq 25^\circ$ ,
- 2 – область значений  $25 \leq \theta_s \leq 85^\circ$ ,
- 3 – область значений  $85 \leq \theta_s \leq 90^\circ$ .

Область 1 – это область главного и ближних боковых лепестков диаграммы обратного рассеяния, которая на основной частоте для всех антенн имеет практически одинаковый вид. Область 2 – это область дальних боковых лепестков и здесь заметно, что для АДР уровень этих лепестков на 10—15 дБ выше, чем для эталонной антенны. И, наконец, третья область углов – это область рассеяния боковой поверхностью облучателя. Здесь отличия в характере и уровне рассеянного поля для всех антенн неотличимы.

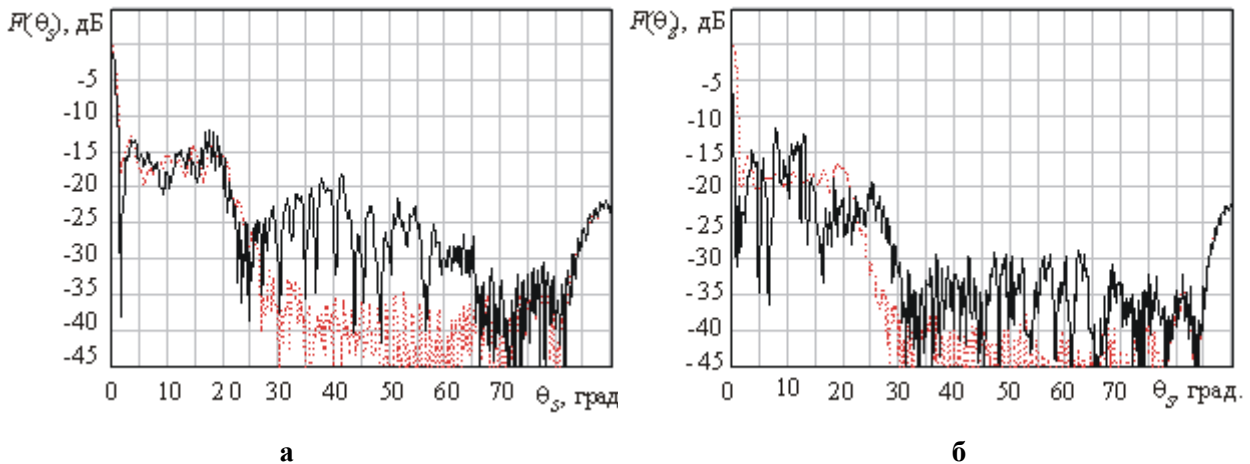


Рисунок 5 – Диаграммы обратного рассеяния дискретно-параболической антенны

Как и следовало ожидать, вариации частоты приводят к изменениям в характере рассеяния только в областях 1 и 2. Так, при возрастании частоты до значения равного  $1,5f_0$ , для АДР наблюдается не только определенное уменьшение уровня главного лепестка, но также заметный (до 10 дБ) спад уровня ближних и дальних боковых лепестков.

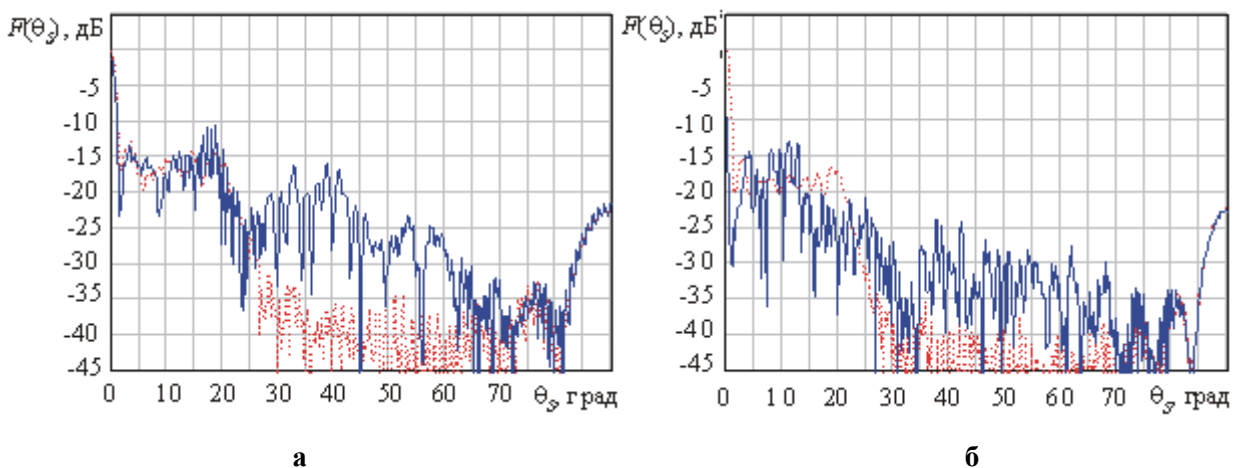


Рисунок 6– Диаграммы обратного рассеяния дискретно-плоской антенны

В заключение можно отметить, что характеристики рассеяния АДР существенно зависят от частоты, в то время как для эталонной антенны эта зависимость мало заметна. Потому вне рабочего диапазона уровень рассеянного поля в главном лепестке в АДР заметно меньше чем в эталонной зеркальной антенне. Однако уровень боковых лепестков диаграмм рассеяния (как и диаграмм направленности) АДР заметно выше, чем у эталонной антенны.

Следует иметь в виду, что для двухмерных моделей антенн вообще характерен более высокий уровень боковых лепестков диаграмм направленности и диаграмм рассеяния по сравнению с аналогичными трехмерными моделями с круговой симметрией. Поэтому можно ожидать, что при прочих равных условиях в таких конструкциях АДР уровень боковых лепестков диаграмм рассеяния окажется более низким.

Кроме того, нужно учитывать, что наличие системы питания и крепления облучателя в реальных конструкциях, практически не меняя уровня поля рассеянного в направлении главного лепестка, обычно приводит к заметному повышению уровня боковых лепестков. Следовательно, АДР, сохраняя пониженный уровень отражений в направлении главного лепестка, будут иметь примерно одинаковый с эталонной антенной средний уровень боковых лепестков. В этом случае уместно говорить об реальных конструкциях АДР как об антеннах с пониженной радиолокационной заметностью вне рабочего диапазона частот.

*Література*

1. Guo Y.J., Barton S.K. A High frequency Quarter -Wave Zone Plate Reflector // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – Vol. 2, № 12, December 1992.
2. Волошин О.И., Цалиев Т.А. Численный анализ влияния профиля зеркала на характеристики антенн Френеля // Изв. вузов. «Радиоэлектроника». – 1994. – 37. – № 9-10. – С.71-73.
3. Guo Y.J., Sassi I.H., Barton S.K. Multilayer Offset Fresnel Zone Plate Reflector // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – Vol. 4. – № 6, June, 1994.
4. O.I. Voloshin, I.I. Leschuk, T. A. Tsaliev. Investigation of the Antennas with Zoned Radiative Surface. // Proceedings PIERS-95, July 24-28, 1995, Univ. of Washington, Seattle, W/USA. – P. 721
5. Цалиев Т.А., Волошин О.И. Исследование антенн с зонированной излучающей поверхностью // Труды УНИИРТ. –1995. – №1. – С. 86-93.
6. Цалиев Т.А. Исследование частотных свойств характеристик излучения зонированного параболического рефлектора // Труды УНИИРТ. – 1998. – № 1. – С. 33 -36.
7. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. – М.: Сов. Радио, 1972. – 232 с.
8. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. Численный анализ дифракции радиоволн. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
9. Дмитриев В.И., Захаров Е.В. О численном решении некоторых интегральных уравнений Фредгольма первого рода // В кн.: "Вычислительные методы и программирование". – М.: Изд-во МГУ, 1968. – Вып. 10. – С. 49-54.
10. Цалиев Т.А. Электродинамические свойства дискретных поверхностей // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – 43. – № 5-10. – С.13-22.
11. Цалиев Т.А. Численный анализ направленных свойств дискретно-параболических рефлекторов // Труды УНИИРТ. – 2003. – № 2. – С. 37-42