

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ДИСКРЕТНО-ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация. Рассматриваются особенности построения многослойных дискретных поверхностей, как элементов антенн и фокусирующих устройств. Получены соотношения для расчета геометрических параметров таких поверхностей. Вводится понятие обобщенных зон Френеля. На основе численного решения интегрального уравнения проанализированы характеристики рассеянных полей и диаграммы направленности симметричных многослойных дискретно-плоских поверхностей.

Summary. Features of construction of multilayered discrete surfaces, as elements of aerials and focusing devices are considered. Formulas for calculation of geometrical parameters of such surfaces are received. The concept of generalized Fresnel zones is entered. On the basis of the numerical decision of the integral equation scattered fields characteristics and patterns of symmetric multilayered discrete-flat surfaces are analyzed.

В последние годы наметился определенный интерес к нетрадиционным способам формирования полей в антенных системах квазиоптического типа с использованием дискретных (зонированных) поверхностей, которые имеют малую высоту профиля и более технологичны в изготовлении.

Дискретизация, или зонирование, означает процедуру условного разбиения произвольной поверхности (либо совокупности нескольких поверхностей) на зоны (области) согласно заданному алгоритму. Выделив некоторое подмножество зон, полученную в результате многосвязную поверхность можно назвать дискретной поверхностью. В зависимости от применяемого алгоритма дискретизации такие поверхности могут использоваться в антеннах, в коллиматорах для создания квазиплоских полей или для фокусировки.

Так хорошо известные однослойные дискретные поверхности – зонные пластинки Френеля [1, 2, 3] находят применение не только в оптическом диапазоне, но и в гораздо более длинноволновых диапазонах.

В работе [4] проведена классификация однослойных дискретных поверхностей и проанализированы их электродинамические свойства. Однако особенности геометрии многослойных дискретных поверхностей и анализ их свойств не были изучены в достаточной степени. Цель данной работы – с более общей точки зрения рассмотреть особенности построения многослойных дискретных поверхностей и, на основе корректных электродинамических методов, исследовать их характеристики

1. Геометрия плоских многослойных дискретных поверхностей. Под дискретной поверхностью понимается совокупность областей (зон), выделенных на некоторой воображаемой поверхности; если эта поверхность плоская, то получившуюся в результате конструкцию назовем дискретно-плоской. Ограничимся рассмотрением параболического способа дискретизации, когда разбиение плоской поверхности на зоны производится так, чтобы границы зон соответствовали линиям пересечения этой поверхности и семейства софокусных параболоидов вращения [4].

Симметричная дискретизация плоских поверхностей. Приведем соотношения, лежащие в основе геометрии симметричных многослойных дискретных поверхностей, которые могут использоваться, например, в качестве рефлекторов в зеркальных антеннах, в фокусирующих устройствах, а возможно и в коллиматорах.

С этой целью рассмотрим M параллельных плоскостей $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_M$, (назовем их слоями), расположенных как показано на рис. 1.

Выберем некоторую точку $F(x_0, 0)$, зададимся размером раскрыва d , а также фокусными расстояниями f_m для каждого слоя в соответствии с правилом

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

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

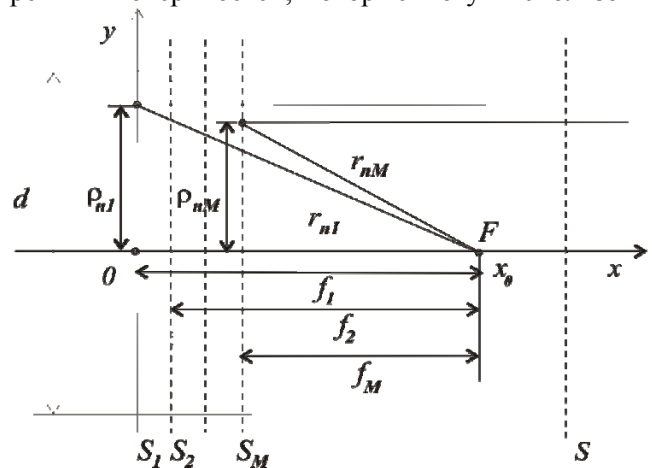


Рисунок 1 – Дискретизация многослойной поверхности

Выполним разбиение каждой из плоскостей S_m на зоны и пронумеруем эти зоны так, чтобы расстояния от точки x_0 до крайних точек каждой n -й зоны (фокальные радиусы r_{nm}), принадлежащей m -й плоскости, удовлетворяли условию $r_{nm} = f_m + \frac{n\lambda}{M}$. Радиусы этих зон ρ_{nm} можно определить, воспользовавшись выражением

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

где n – это номер зоны ($n = 1, 2, \dots, N_m$), а N_m – суммарное число зон на m -й плоскости в области дискретизации ($\rho_{nm} \leq d$), которое, используя формулу (2), можно найти, взяв целую часть от выражения $\frac{M}{\lambda} \sqrt{d^2 - \frac{2f_m\lambda}{M}}$.

Если источник монохроматического поля помещен в точку $F(x_0, 0)$, то условие (1) обеспечивает синфазность полей, рассеянных дискретным рефлектором в плоскости S , параллельной его раскрыву. Разность фаз полей, создаваемых таким источником в крайних точках каждой зоны, составляет $\Delta\varphi = 2\pi/M$.

Если параметр дискретизации $M = 1$, то фазы полей в крайних точках каждой зоны будут отличаться ровно на 2π . Поскольку в этом случае $r_{(n+1)m} - r_{nm} = \lambda$, назовем такие зоны одноволновыми.

Продолжая эти рассуждения 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 ($k_m = 1, 2, \dots, K_m$), начав от оси x , и обозначим символом K_m общее число таких зон в m -м слое, где K_m есть целое от величины N_m/M .

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

Заполнив в каждом слое тонким проводящим слоем только выделенные "синфазные" зоны, получим симметричный многослойный дискретно-плоский рефлектор. При облучении такого рефлектора из фокуса главный максимум его диаграммы направленности (ДН) будет ориентирован вдоль положительного направления оси x .

На основе геометрических построений можно убедиться в том, что вариации фазы отраженного поля (в приближении геометрической оптики) в плоскости S в пределах раскрыва рефлектора не превысят π/M .

Как уже отмечалось в предыдущей работе автора [1], однослойный дискретный рефлектор, обладает свойствами многофокусной поверхности. В отличие от этого рефлектор, состоящий из нескольких дискретных слоев, имеет только две фокальные точки, которые являются общими для каждого из слоев. Так, если источник 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 полей имеет место в точке $F(x_0, 0)$.

В заключение данного раздела отметим, что приведенные формулы позволяют рассчитать основные геометрические параметры многослойных дискретных поверхностей и, воспользовавшись описанной ниже методикой, проанализировать их основные характеристики.

2. Методика численного анализа. Поскольку размеры элементов рассматриваемых дискретных поверхностей соизмеримы с длиной волны (или даже меньше ее), то при анализе их электродинамических характеристик следует возможно корректнее учитывать неравномерность распределения токов на элементах и дифракционные эффекты. Этому требованию удовлетворяет метод анализа, основанный на численном решении интегрального уравнения относительно плотности поверхностного тока на экране [5].

При этом рефлектор рассматривается как 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 . Геометрия части профиля такой модели (при $M = 4$) показана на рис. 2.

Облучателем рефлектора служит источник монохроматической волны в виде нити электрического тока (E -поляризация), находящейся на фокальной линии. Задача определения поверхностной плотности тока для рассматриваемого случая сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода [5].

Численное решение этого уравнения осуществляется путем сведения его к системе линейных алгебраических уравнений методом коллокации. Устойчивость решения обеспечивается без применения каких-либо дополнительных регуляризующих процедур [5,6].

В процессе решения определяется оптимальное (исходя из допустимой погрешности расчетов и затрачиваемого времени) число точек коллокации. В рассматриваемой задаче это число составляет около 40 точек на участке экрана размером в одну длину волны, обеспечивая относительную погрешность расчетов менее 0,1%. Контроль внутренней сходимости решения, выполнения граничных условий и условия Мейкснера, осуществляемый в ходе решения задачи, гарантировал точность и достоверность получаемых результатов.

Найденные распределения плотности продольного поверхностного тока на экране позволили путем численного интегрирования рассчитать электродинамические характеристики многослойных рефлекторов в полосе частот. Для сравнения аналогичные расчеты проводились для сплошных параболических рефлекторов тех же размеров.

3. Результаты расчетов. Прежде всего, заметим, что описанные выше процедуры дискретизации поверхности основаны на лучевой трактовке, не учитывающей дифракционные явления. Поэтому изначально заданное положение фокальных точек может не соответствовать их реальному положению. Чтобы избежать связанных с этим погрешностей использовалась двухэтапная методика.

На первом этапе рассчитывался профиль рефлектора для основной длины волны λ_0 , и далее решалась задача дифракции при осевом облучении рефлектора плоской волной, распространяющейся в направлении отрицательных значений оси x . При этом проверялось: сходимость решения, выполнение граничных условий и условия на ребре, а также уточнялось положение фокального пятна.

На втором этапе нитевидный источник помещался в область фокального пятна на линию, соответствующую максимальной фокусировке поля, и затем заново проводилось решение дифракционной задачи.

Найденные при решении этой задачи распределения плотности поверхностного тока на экране служили основой для последующих расчетов. На первом этапе – для нахождения распределения поля на оптической оси и в фокальной области, на втором – для нахождения распределения поля в дальней зоне, построения диаграмм направленности (ДН), а также для расчета амплитудно-фазового распределения поля на линии параллельной раскрытию рефлектора.

Распределения поля в дальней зоне, найденные на втором этапе решения задачи, использовались для расчета КНД. При нахождении суммарного поля, необходимого в процессе расчета КНД, амплитудная характеристика направленности облучателя задавалась в виде: $F_0(\psi) = 1$ в секторе углов $0 \leq \psi \leq \psi_0$ и $F_0(\psi) = 0$ в секторе $0 > \psi > \psi_0$ (ψ_0 – половина угла раскрытия). При таком подходе полностью исключается "переливание" поля облучателя за края рефлектора, а характеристики рефлектора исследуются без учета частотных и направленных свойств реально применяемых облучателей.

Приводимые ниже результаты и анализ характеристик относятся к модели многослойного дискретно-плоского рефлектора с размером раскрытия $d = 50\lambda_0$, при трех вариантах дискретизации поверхности: $M = 2$ (френелевское зонирование), $M = 4$ и $M = 6$.

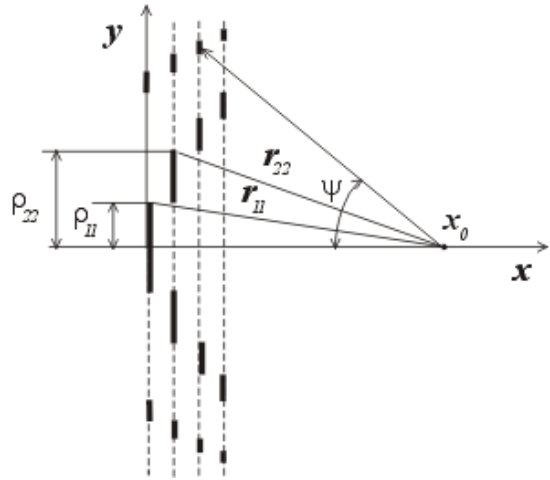


Рисунок 2 – Профиль многослойного дискретного рефлектора

Кривые, изображенные на рис. 3, иллюстрируют результаты расчетов амплитудного распределения поля на оптической оси, выполненных на первом этапе решения задачи, для дискретного (сплошная линия, $f_1 = 0,5d$, $M = 6$) и сплошного параболического (пунктир, $f = 0,5d$) рефлекторов.

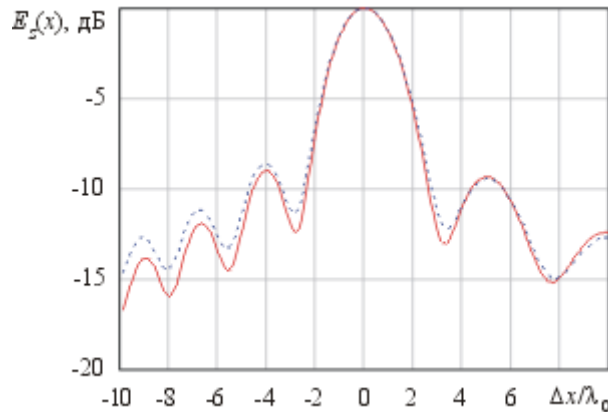


Рисунок 3 – Амплитудное распределение поля в фокальной области

На этих графиках заметен одинаковый характер амплитудного распределения в фокальной области, эта особенность сохраняется при других значениях геометрических параметров, т.е. фокусирующие свойства дискретного и сплошного рефлекторов практически одинаковы.

На рис. 4 и 5 изображены диаграммы направленности рефлекторов, рассчитанные для случаев, когда источник находится в реальном фокусе.

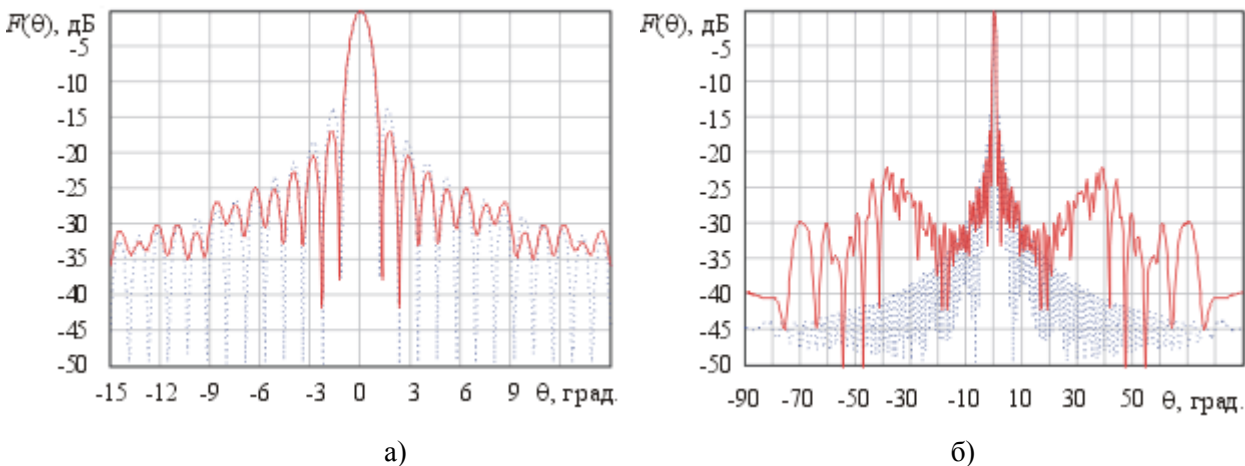


Рисунок 4 – Диаграммы направленности рефлекторов

Графики, изображенные на рис. 4,а, позволяют детально рассмотреть структуру ближних лепестков ДН дискретного (сплошная линия, $f_1 = 0,5d$, $M = 6$) и сплошного параболического (пунктир, $f = 0,5d$) рефлекторов. Отметим отличительную особенность плоских рефлекторов по сравнению с параболическим рефлектором – пониженный уровень первых боковых лепестков ДН, которая заметнее всего проявляется в короткофокусных дискретных конструкциях (для $f_1 / d = 0,3$ снижение доходит до 10 дБ). Однако при этом заметных различий в главном лепестке не наблюдается.

Рис. 4,б дает возможность оценить структуру дальних боковых лепестков ДН, уровень которых у дискретного рефлектора заметно выше, достигая иногда значения – 22 дБ.

Сравнивая кривые, изображенные на рис. 4,б, следует иметь в виду, что в реальной антенне со сплошным параболическим зеркалом наличие облучателя, системы его крепления и питания заметно изменит структуру и уровень боковых лепестков ДН в худшую сторону. Следовательно, можно предположить, что на самом деле (в реальных конструкциях) различия в структуре и уровне дальних боковых лепестков ДН дискретного и сплошного рефлекторов не будут столь заметными.

Проследить особенности изменения ДН многослойных дискретных рефлекторов помогут кривые, изображенные на рис. 5.

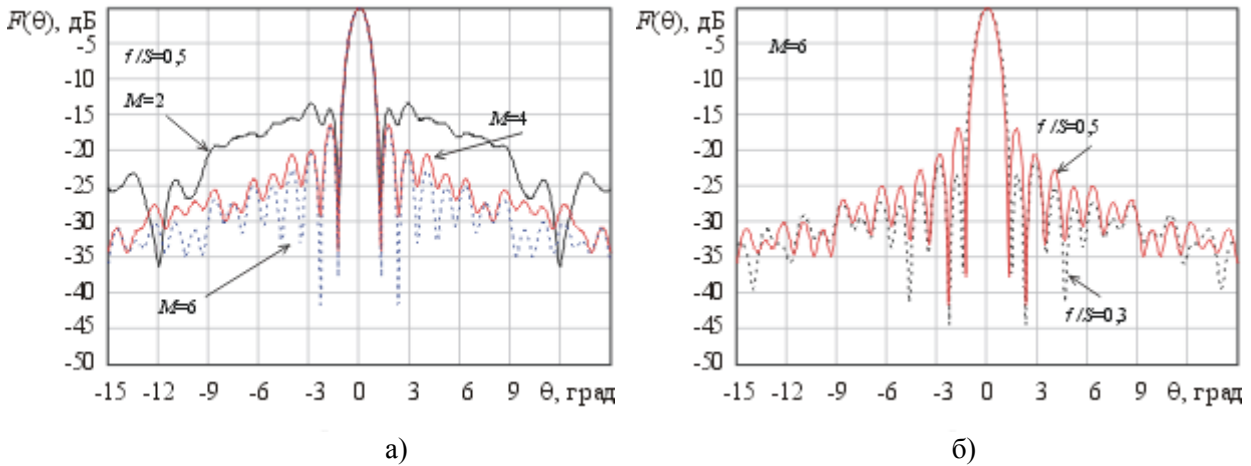


Рисунок 5 – Диаграммы направленности многослойных рефлекторов

Первый из этих рисунков (рис. 5,а) отображает поведение ДН при изменении числа слоев (параметра дискретизации) и позволяет оценить минимально необходимое с точки зрения направленных свойств число слоев рефлектора. Второй рисунок (рис. 5,б) иллюстрирует характер зависимости ближних боковых лепестков ДН при изменении фокусного расстояния.

На рис. 6 приведены результаты расчетов коэффициента направленного действия (КНД), отображающие его зависимость от фокусного расстояния и числа слоев (рис. 6,а), а также от частоты (рис. 6,б).

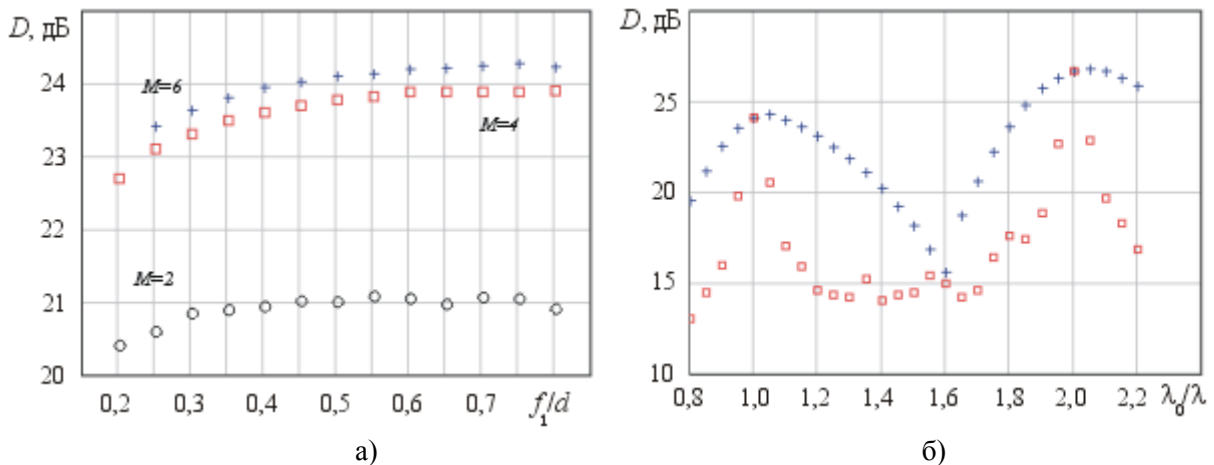


Рисунок 6 – Коэффициент направленного действия многослойных рефлекторов

Как и следовало ожидать, КНД возрастает при увеличении числа слоев и в длиннофокусных конструкциях приближается к значениям КНД для сплошного параболического рефлектора (см. табл. 1). Уменьшение фокусного расстояния при любом значении параметра дискретизации приводит к плавному снижению КНД, по-видимому, вследствие роста влияния эффектов затенения.

На рис. 6, б приведены данные, иллюстрирующие характер изменения КНД многослойного дискретного рефлектора при вариации длины волны. Последовательность значений КНД, отмеченных крестиками, соответствует случаю, когда положение источника в точности соответствовало положению фокального пятна на данной частоте, и эти значения отображают частотные свойства самого дискретного рефлектора.

Значения, отмеченные квадратами, получены для случая, когда положение источника было фиксировано в геометрическом фокусе, и эти значения отображают частотные свойства для системы рефлектор-облучатель. Заметно, что в последнем случае имеет место более резкое уменьшение КНД обусловленное смещением положения фокального пятна относительно источника-облучателя.

Таблиця 1 – Сравнение КНД сплошного и дискретного рефлекторов

Тип рефлектора		Отношение f_1 / d					
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
КНД, дБ	Дискретный $M=6$	23,64	23,95	24,1	24,19	24,25	24,23
	Сплошной	24,79	24,78	24,76	24,75	24,74	24,72

О характере изменения положения фокального пятна при вариации длины волны можно судить по результатам, приведенным на рис. 7.

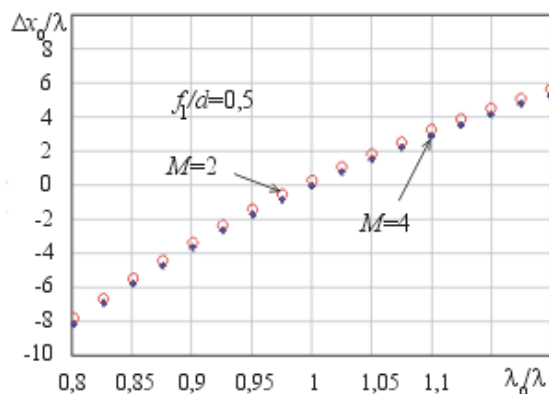


Рисунок 7 – Зависимость реального положения фокуса от частоты

Видно, что с увеличением длины волны фокальная точка приближается к раскрытию рефлектора, а с ее уменьшением – удаляется. При изменении частоты на $\pm 5\%$ смещение $\Delta x_0 = x - x_0$ составляет примерно $1,8\lambda_0$ и мало зависит от числа слоев рефлектора.

Отметим, что эффект смещения положения фокального пятна при вариации длины волны и является причиной относительной узкополосности системы рефлектор-облучатель, хотя сам по себе рефлектор более широкополосный (см. рис. 6, б).

Отметим, что явно выраженные свойства частотной избирательности антенн с многослойными дискретными рефлекторами в некоторых случаях могут представлять определенные преимущества с точки зрения ЭМС.

В заключение можно отметить, что основанные на предложенных формулах результаты корректного численного анализа позволяют по-новому взглянуть на фокусирующие, направленные и частотные свойства дискретных поверхностей и возможности их использования в качестве рефлекторов зеркальных антенн. Так, имея существенно меньшую высоту профиля, многослойные дискретно-плоские рефлекторы имеют пониженный уровень ближних боковых лепестков ДН, однако уступают по КНД сплошным параболическим около 0,6...0,8 дБ. Недостатками таких дискретных рефлекторов являются их относительная узкополосность и повышенный уровень дальних боковых лепестков ДН. По-видимому, в трехмерных конструкциях последний недостаток будет не столь заметен, в особенности при спадающем к краям рефлектора амплитудном распределении поля.

Литература

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М: Мир, 1973. – 354 с.
2. Базарский О.В., Колесников А.И., Хлянич Я.Л. Частотные свойства зонированных линз Френеля. // Радиотехника и электроника. – 1980. – № 12.
3. Байбулатов Ф.Х., Минин И.В. Исследование фокусирующих свойств зонной пластинки Френеля // Радиотехника и электроника. – 1985. – № 9.
4. Цалиев Т.А. Электродинамические свойства дискретных поверхностей // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – 43. – № 5-10. – С.13-22.
5. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. Численный анализ дифракции радиоволн. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
6. 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.