

## ДИАПАЗОННЫЕ СВОЙСТВА ЗОНИРОВАННОГО РЕФЛЕКТОРА

А. И. Амосова

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова  
Национальной академии наук Украины, г. Харьков

Получена 15 января 2008 г.

*Методами FDTD с точными «поглощающими» условиями на виртуальных границах исследованы электродинамические характеристики зонированного параболоцилиндрического рефлектора. Установлено, что отличия основных антенных характеристик зонированного зеркала по сравнению с характеристиками сплошного зеркала с такой же апертурой могут быть минимизированы до заданного уровня при существенном улучшении массогабаритных параметров антенной системы. Получены ранее неизвестные данные о распределении полей вблизи границ секций рефлектора, в том числе – в области «тени».*

Благодаря простоте конструкции и хорошим электродинамическим характеристикам зеркальные антенны широко применяются в тех диапазонах длин волн, где при относительно небольших геометрических размерах всей конструкции достаточно просто достигаются весьма значительные электрические размеры апертур, которыми, в основном, и определяются электродинамические характеристики антенны [1, 2].

В тоже время, зеркальным антеннам присущ недостаток принципиального характера, который обусловлен применением зеркал с отражающими поверхностями второго порядка. Он состоит в, так называемом, «эффекте опережающего роста массы» (масса зеркала растет быстрее, чем его апертура) и особенно ярко проявляется при создании антенн с предельно достижимыми электродинамическими характеристиками и, следовательно, геометрически большими апертурами [3, 4].

В связи с этим поиск новых решений в конструировании зеркальных антенн и в настоящее время представляется актуальной задачей. Более того, на самом деле, он и не прекращался на протяжении всей истории развития зеркальных антенн (см., например, [5–11]).

Один из путей ослабления «эффекта опережающего роста массы» состоит в конструировании рефлектора из отдельных секций – зонировании рефлектора. Это позволяет улучшить массогабаритные параметры антенны и уменьшить ветровую нагрузку на зеркало. С другой стороны, рост количества электродинамически значимых элементов антенны, как правило, сопровождается ухудшением ее диапазонных свойств. Так, например, коэффициент использования поверхности (КИП) у антенн Кассегрена часто достигает значения 0.9, в то время как у однозеркальных антенн обычно не

превышает 0.5–0.6 [2]. Однако при этом полоса рабочих частот антенны сужается, так как уже определяется не только размерами облучателя и антенного зеркала, но и размерами контррефлектора. В еще большей степени это присуще многозеркальным антеннам.

Относительно небольшое количество данных о влиянии разбиения рефлектора на отдельные секции объясняется, с одной стороны, экспериментальными трудностями, особенно при исследованиях в ближней зоне, а с другой – отсутствием достаточно универсального и мощного метода теоретического исследования таких структур, который бы обеспечивал получение достоверных результатов. В связи с этим представляется актуальным исследование диапазоновых свойств антенного рефлектора, состоящего из отдельных секций, FDTD-методом с точными «поглощающими» условиями на виртуальных границах пространства счета.

Рассмотрим рефлектор, который образован трансляцией вдоль оси  $Ox$  декартовой системы координат дуг конфокальных парабол  $z = a_j y^2 + b_j y + c_j$  ( $a_j \equiv 1/4F_j > 0$ ,  $F_j < F_{j+1}$  – фокусные расстояния,  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ), ограниченных слоем  $0 \leq z \leq h$ . При этом  $c_1 = 0$ ,  $c_j = F_j - F_1 < 0$  и все  $b_j = 0$  (рис. 1). Предположим, что самая длинная рабочая волна мала в сравнении с размерами структуры вдоль  $Ox$ , т. е. –  $\partial/\partial x = 0$ . В качестве облучателя выберем оптимальный  $H$ -секториальный рупор, линия фазовых центров которого совпадает с фокальной осью, а плоскость апертуры ортогональна плоскости симметрии рефлектора, который возбуждается «нитью» электрического тока.

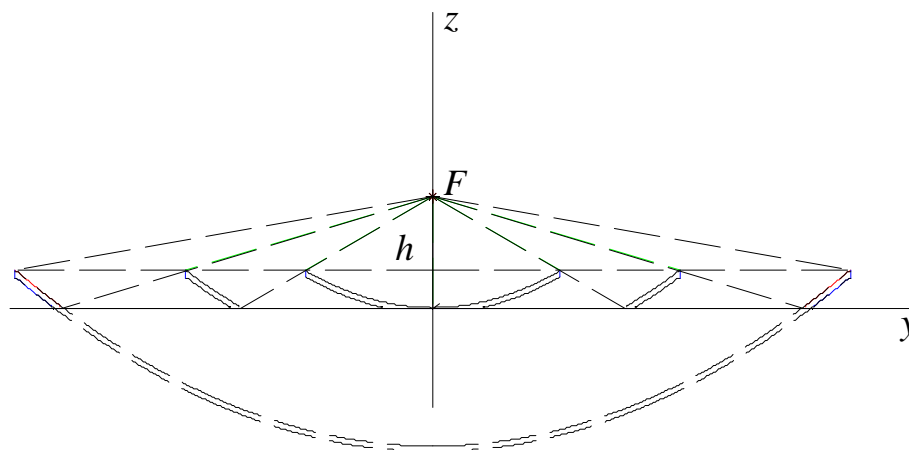


Рис. 1. Зонированный параболический рефлектор.  $F_1 = 1$ ,  $F_2 = 1.5$ ,  $F_3 = 2.25$ ,  $h = 0.3333$  (штриховыми линиями в области  $z < 0$  показано продолжение сплошного рефлектора).

В настоящей работе реализация программы исследований зонированных структур в математическом и вычислительном планах осуществлена путем эквивалентной замены оригинальных открытых начально-краевых задач

соответствующими модифицированными закрытыми задачами и базируется на результатах работ [12, 13] для случая плоских двумерных модельных задач теории излучателей несинусоидальных волн. Их решения сводятся к отысканию решений  $U(g, t) = E_x(g, t)$ ,  $g = \{y, z\} \in R^2$  двумерного телеграфного уравнения

$$\left[ -\varepsilon(g) \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \sigma(g) \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] U(g, t) = F(g, t); \quad g \in \mathbf{Q}, \quad t > 0,$$

удовлетворяющего условиям Дирихле на достаточно гладкой границе  $\mathbf{S}$  металла  $U(g, t)|_{g \in \mathbf{S}} = 0$ ;  $t \geq 0$  и начальным условиям

$$U(g, 0) = \varphi(g), \quad \left. \frac{\partial U(g, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = \psi(g); \quad g \in \bar{\mathbf{Q}}.$$

Здесь  $\bar{\mathbf{Q}}$  – замыкание области анализа  $\mathbf{Q}$ .

В предположении, об ограниченности носителей функций  $\varepsilon(g) - 1$ ,  $\sigma(g)$ ,  $\varphi(g)$ ,  $\psi(g)$ ,  $F(g, t)$  и занятой «металлом» области пространства при всех  $t > 0$  в  $\bar{\mathbf{Q}}$ , решение задачи существует и единственно для любого значения  $t \in [0; T]$  и принадлежит пространству Соболева  $\mathbf{W}_2^1(\mathbf{Q})$ .

Неограниченная область анализа  $\mathbf{Q}$  редуцируется до конечной области  $\mathbf{Q}_L$  с помощью точных локальных «поглощающих» условий, построенных в работе [13], которые являются прямым следствием классических условий излучения и, таким образом, придают недостающие атрибуты строгости постановке открытой начально-краевой задачи.

На рис. 2 представлены результаты численного анализа диаграмм направленности зонированного ( $N = 3$ ) и сплошного рефлекторов для длин волн  $\lambda = \tilde{\lambda}$  (синфазное возбуждение) и  $\lambda = (1 \mp 0.1) \tilde{\lambda}$ . При этом размеры апертуры и фокусное расстояние  $F$  сплошного рефлектора такие же, как у третьей (наибольшей) секции, т.е. –  $F = F_N$ . Сплошные линии соответствуют данным, полученным апертурным методом, пунктирные – данным, полученным в рамках подхода, разрабатываемого в настоящей работе. В случае сплошного рефлектора (рис. 2,а) в пределах главного лепестка ДН оба метода дают практически одинаковые результаты. Однако, уже в области первых и, тем более дальних, боковых лепестков имеются различия, обусловленные недостатками приближенного метода: неточным заданием амплитудно-фазового распределения поля в апертуре; пренебрежением краевыми эффектами и полем на «теневого» стороне зеркала. В случае зонированного рефлектора эти недостатки апертурного метода проявляются еще сильнее (рис. 2,б). Так, например, из результатов строгого анализа следует, что

девиация  $\lambda = (1 \mp 0.1)\tilde{\lambda}$  приводит к возникновению максимальной квадратичной фазовой ошибки на краю апертуры  $\Delta\varphi_{\max} \geq 3\pi/2$ , что отражается в наличии «провала» по центру главного лепестка и «заплывании» минимумов ДН. Эти эффекты, практически, не отражаются на результатах счета с использованием апертурного метода, но легко обнаруживаются при строгом анализе.

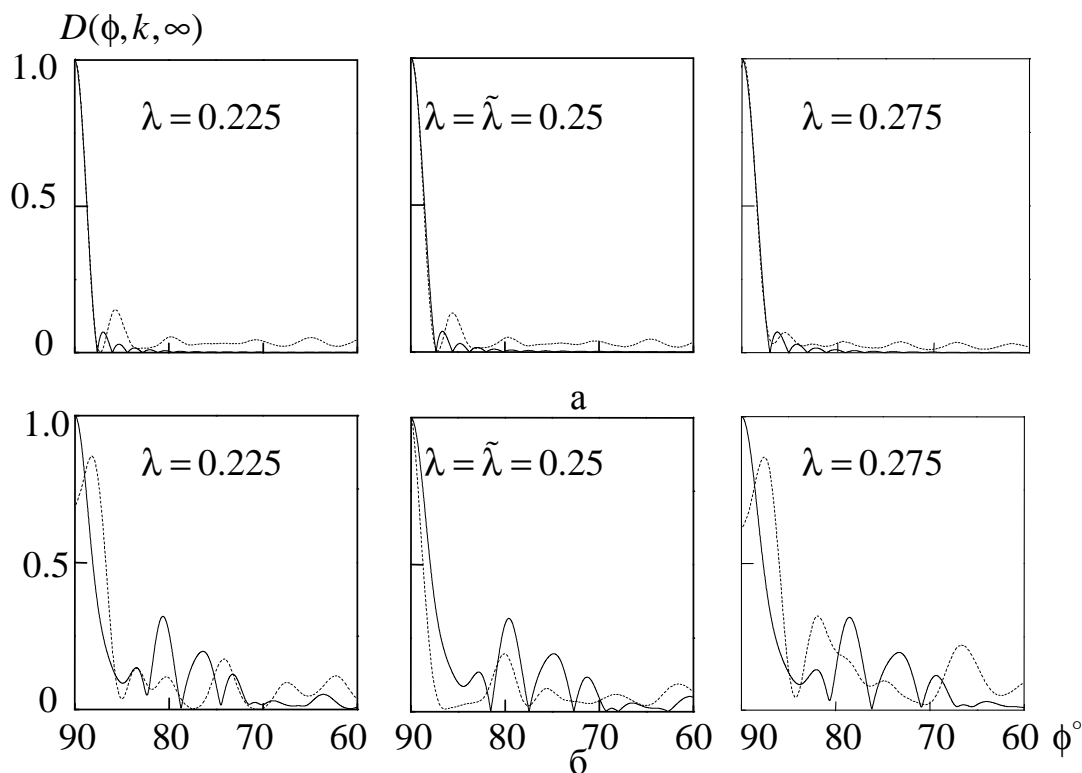


Рис. 2. Нормированные диаграммы направленности целого зеркала (а), зонированного зеркала (б) (сплошная линия – апертурный метод, пунктирная – FDTD).

Более подробно изменения электродинамических характеристик, к которым приводит разделение рефлектора на секции, иллюстрируется рисунком 3, на котором в интервале длин волн  $\lambda \in [0.9\tilde{\lambda}, 1.1\tilde{\lambda}]$  представлены отношение КИП зонированного рефлектора к КИП сплошного рефлектора (а) и коэффициенты направленного действия (КНД) зонированного и сплошного рефлекторов (б).

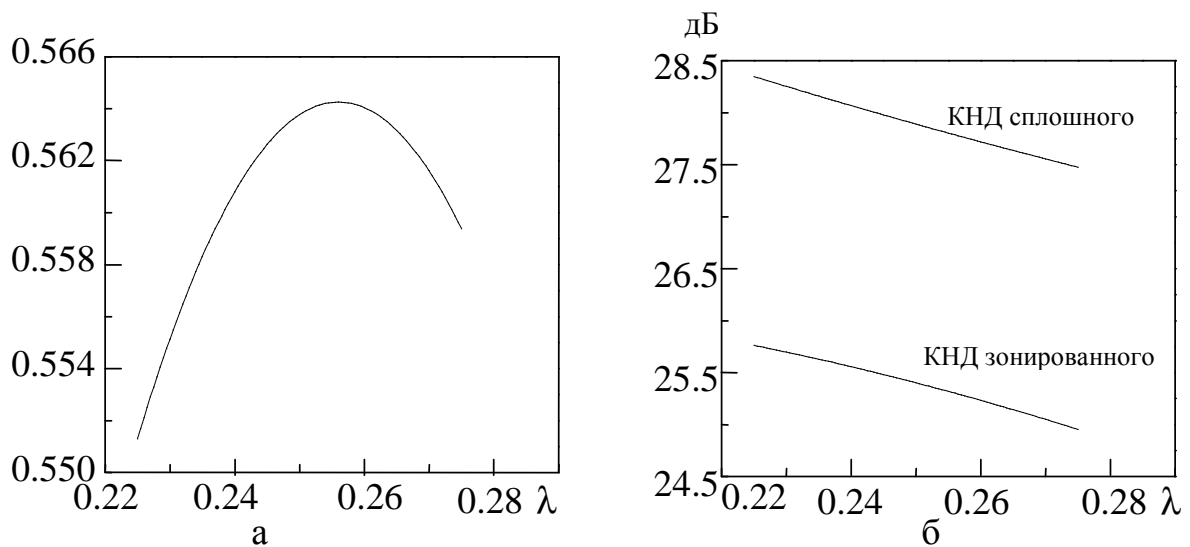


Рис. 3. Отношение КИП зонированного зеркала к КИП сплошного зеркала (а), коэффициенты направленного действия (б).

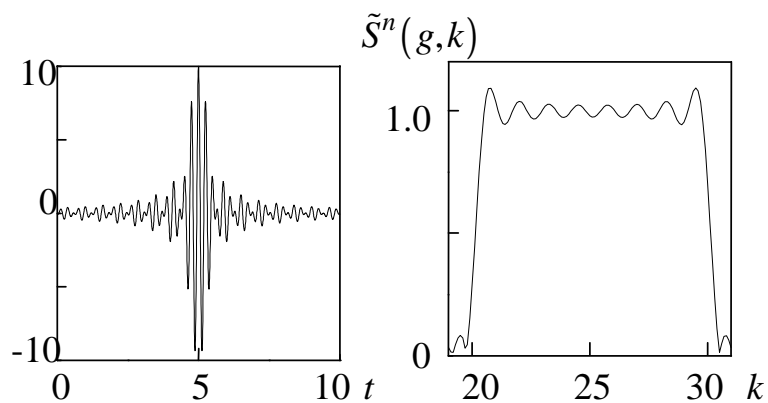


Рис. 4. Временная реализация и спектр сигнала источника в свободном пространстве

Наиболее наглядно и полно диапазонные свойства рассматриваемой структуры при возбуждении импульсным полосовым сигналом, временная реализация и спектр которого показаны на рис. 4, иллюстрируются широкополосной диаграммой излучения. На рис. 5 в координатах  $\{k, \varphi\}$  (здесь  $k$  – волновое число;  $\varphi$  – угол в плоскости  $yOz$ ) представлена диаграмма излучения зонированного рефлектора, любое сечение которой плоскостью  $k = const$  представляет собой обычную диаграмму направленности исследуемой антенны в  $H$ -плоскости. Периодическое расширение интервалов значений угловой координаты  $\varphi$ , соответствующей одному и тому же уровню поля, с изменением

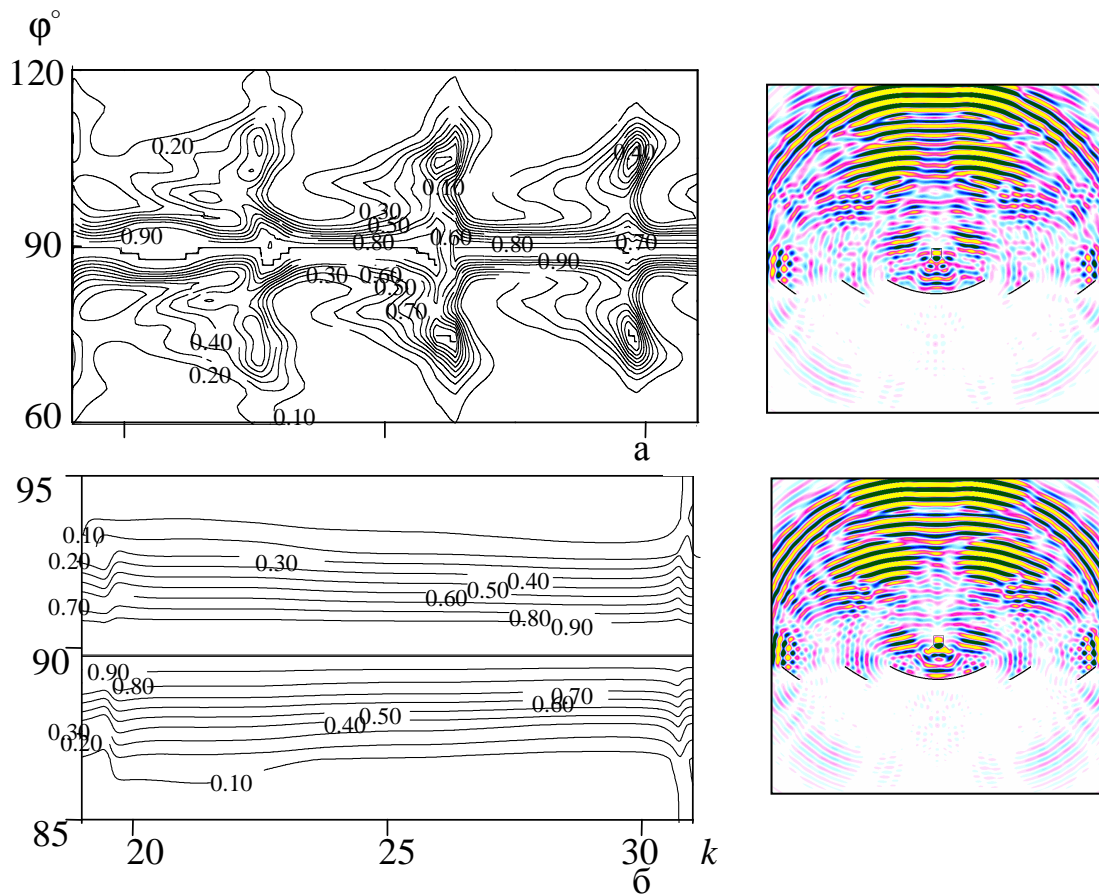


Рис. 5. Диаграммы излучения в полосе частот (а –  $D_{horn} = 1,44\tilde{\lambda}$ , б –  $D_{horn} = 2\tilde{\lambda}$ )

волнового числа  $k$  обусловлено ростом квадратичных фазовых ошибок в пределах  $\Delta\psi_{\max} \in [0, 2\pi n]$  ( $n=1, 2, \dots$  – целое). Из сравнения результатов численного эксперимента, выполненного при различных апертурах облучателя, видно, что при увеличении апертуры облучателя (от  $1,44\tilde{\lambda}$  до  $2\tilde{\lambda}$ ;  $\tilde{\lambda}$  – длина волны, соответствующая центральному значению частоты, при которой апертура рефлектора возбуждается синфазно) снижение уровня облучения краев рефлектора, как и следовало ожидать, приводит уменьшению влияния квадратичных фазовых ошибок на излучаемые антенной поля. При этом результаты вычислительного эксперимента свидетельствуют о возможности такого выбора параметров структуры, который бы обеспечивал заданную полосу рабочих частот антенны.

Отметим еще одно важное свойство исследуемой структуры, а именно: – из результатов численных экспериментов следует, что при возбуждении зонированного рефлектора  $E$ -поляризованным полем неоднородной цилиндрической волны, исходящей из фокальной оси рефлектора, ниже плоскости  $y=0$  поле, практически, отсутствует. Во всяком случае, его значение не превышает  $-(10 \div 15)$  дБ от максимума в направлении  $-0y$ , что весьма важно при практическом проектировании антенн с секционированными рефлекторами.

Таким образом, основываясь на приведенных выше результатах численных исследований, можно утверждать, что оптимальный выбор параметров облучателя и зонированного рефлектора позволяет обеспечить заданную рабочую полосу частот исследуемой антенны при допустимом снижении коэффициента усиления. Применение зонированных рефлекторов открывает широкие перспективы оптимизации массо-габаритных параметров антенных систем и, таким образом, позволяет существенно снизить отрицательное влияние «эффекта опережающего роста массы» на технико-экономические показатели зеркальных антенн.

## Литература

1. Кюн Р. Микроволновые антенны: Пер. с нем. – Л.: Изд-во «Судостроение», 1967. – 518 с.
2. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 208 с.
3. Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца / Гельфрейх Г. Б., Зайцев В. В., Илясов Ю. П. и др. – М.: Наука, 1990. – 212 с.
4. Хансен Р. К. Сканирующие антенные системы СВЧ: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1966. – 536 с.
5. Provencher J. H. Experimental study of adiffraction reflector // Trans. IRE. – 1960. – Vol.8, №3. – P.331-336.
6. Ronchi L., Russo V., DiFrancia G. T. Stepped cylindrical antennas for radio astronomy // Trans. IRE. – 1961. – Vol.9, №1. – P. 68-74.
7. Ronchi L., DiFrancia G. T. An application of parageometrical optics to the design of a microwave mirror // Trans. IRE. – 1958. – Vol.6, №1. – P.129-133.
8. Domakov A. I., Shugaev S. V. The directional properties of multiring zone antennas // Proc. International Conf. On Antenna Theory and Techniques. – Kyiv (Ukraine) – 2005. – P.173-175.
9. Rotman W. Wide-angle scanning with microwave double-layer pillboxes // Trans. IRE. – 1958. – Vol.6, №1. – P. 96-105.
10. Courtney C. C., Baum C. E. Coaxial beam-rotation antenna (COBRA) concepts // Sensor and Simulation Note. – 1996. – №395. – 38 p.
11. Atchley L. M., Farr E. G., Toy J. S., Merced N., Altgilbers L. L. Development and testing of a parachute deployable impulse radiating antenna // Sensor and Simulation Note. – 2002. – №465. – 30 p.
12. Сиренко Ю. К. Моделирование и анализ переходных процессов в открытых периодических, волноводных и компактных резонаторах. – Харьков: Эдена, 2003. – 363 с.
13. Сиренко Ю. К., Пазынин В. Л., Вязьмитинова А. И., Сиренко К. Ю. Компактные неоднородности свободного пространства: виртуальные границы в скалярных и векторных «открытых» начально-краевых задачах теории рассеяния несинусоидальных электромагнитных волн. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2003, т. 8, №11-12, с. 33–54.