

## Компьютерный анализ характеристик зеркальных антенн, поверхность которых аппроксимируется плоскими треугольниками

Н. Н. Горобец, В. И. Кийко

Харьковский государственный университет,  
310077, Харьков, пл. Свободы, 4

Статья поступила в редакцию 26 мая 1998 г., после переработки 25 ноября 1998 г.

На основе токового метода расчета рассмотрены характеристики излучения сканирующей зеркальной антенны со сферическим рефлектором, аппроксимированным плоскими треугольниками. Проведена оптимизация характеристик направленности таких антенн в зависимости от размера, положения и ориентации облучателя в виде диагонального рупора при сканировании луча в секторе углов порядка 60 ширины диаграммы направленности. Исследовано влияние затенения зеркала блоком облучателей на характеристики антенны.

На основі струмового методу розрахунку розглянуто характеристики випромінювання скануючої дзеркальної антени із сферичним рефлектором, що апроксимується плоскими трикутниками. Проведено оптимізацію характеристик напрямленості таких антен в залежності від розміру, розташування та орієнтації опромінювача у вигляді діагонального рупора, при скануванні променя в секторі кутів приблизно 60 ширин діаграм напрямленості. Досліджено вплив затінення дзеркала блоком опромінювачів на характеристики антени.

В мобильной радиолокации, космических радиотелескопах и системах дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли из космоса находят применение развертываемые остро-направленные зеркальные антенны [1,2]. Одним из перспективных вариантов таких антенн являются ферменные антенны [3], особенность которых состоит в том, что отражающая поверхность рефлектора представляет собой систему плоских треугольников, вершины которых лежат на поверхности гладкого рефлектора заданного типа. При этом максимальное отклонение от данной поверхности, которое связано с размером стороны плоского треугольника, выбирается таким, чтобы потери коэффициента усиления антенны за счет систематических отклонений не превышали 5%. Развертываемые антенны ферменного типа с рефлектором в виде параболоида вращения, аппроксимированного плоскими треугольниками, успешно исследованы в условиях космоса (антенна космического радиотелескопа КРТ-10) [3]. В работе [4] вычислена диаграмма направленности (ДН) и коэффициент использования поверхности (КИП) для складной антенны с параболическим рефлектором, аппроксимированным плоскими треугольниками, и шестиугольной формой раскрытия. При этом вводился ряд упрощений, позволивших привести выражения для расчета КИП антенны с шестиугольным раскрытием к аналитическому виду. ДН антенны с шестиугольным раскрытием ищутся в виде суммы ДН антенны с круглым раскрытием

радиуса  $R_3$  и ДН бесконечно узкого азимутально-модулированного кольца того же радиуса. Эквивалентный радиус  $R_3$  определяется из условия равенства площадей шестиугольного и круглого раскрытия  $R_3 = 0,91R$ , где  $R$  – радиус описанной вокруг шестиугольника окружности. Влияние аппроксимации зеркала плоскими треугольниками на характеристики направленности антенны учитывалось путем введения фазовой ошибки в раскрыве антенны. В первом приближении фазовая ошибка считалась периодической.

Значительный интерес для практики представляют антенны с широкоугольным сканированием луча, а также многолучевые антенны с веером лучей в широком секторе углов (порядка 60 ширины ДН), например, антенны со сферическим рефлектором [5,6]. Известно, что применение сферических рефлекторов ограничено в связи с возникающими в них сферическими аберрациями [6], которые существенно проявляются с повышением направленности антенны. Среди существующих методов уменьшения влияния сферической аберрации наиболее простым является вынос облучателя из фокуса сферического рефлектора [5]. В работах [7,8] подробно исследована возможность оптимизации характеристик сферических зеркальных антенн путем смещения облучателя из параксиального фокуса вдоль фокальной оси зеркала.

В развертываемых сферических зеркальных антеннах помимо сферических aberrаций форму ДН искажают и другие, специфические для данной конструкции детали, связанные с отличием формы раскрыва зеркала от круговой, с периодической фазовой ошибкой в раскрыве антенны, вызванной отклонением профиля зеркала от идеального за счет аппроксимации плоскими треугольниками, а также с затенением зеркала блоком облучателей в случае многолучевой или сканирующей антенны. Все эти факторы трудно учесть в аналитическом виде. Поэтому представляет интерес проведение прямого численного моделирования параметров таких антенн.

угольники, приближающиеся к равносторонним (рис. 1, а). Отношение основания равнобедренного треугольника  $c$  к его боковой стороне  $l$  определяется соотношением

$$c/l = \cos(\gamma/2),$$

где  $\gamma$  – угол, под которым видна сторона  $l$  из центра сферы.

Боковые стороны всех аппроксимирующих треугольников в каждом из шести секторов равны, а величина основания  $c$  каждого треугольника зависит от местонахождения данного треугольника в секторе. При выбранной геометрии и размерах рефлектора вдоль каждой из граней сектора размещается 16 треугольников. Максимальное уменьшение основания треугольника  $c$  до 4% (а следовательно и его площади до 2,7%) от величины основания (площади) треугольника, расположенного в начале сектора, будет иметь место для треугольника, расположенного по периметру контура апертуры в середине каждой секции.

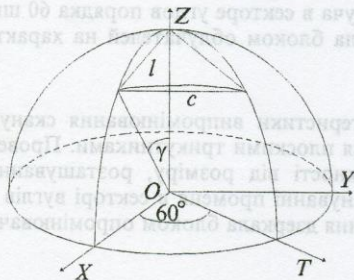
Компьютерный анализ характеристик излучения сферических зеркальных антенн, аппроксимированных плоскими треугольниками, проводился по программе, разработанной на базе метода физической оптики: по полю облучателя рассчитываются токи на поверхности зеркала, а затем находится поля в дальней зоне антенны путем интегрирования этих токов по всей поверхности зеркала. Поле излучения антенны запишем в виде интеграла по поверхности зеркала  $S$  [5]

$$\vec{E}(\vec{p}_0) = \frac{\sqrt{G_0}}{\lambda} \int_S \left[ \vec{p}_0, \left[ \vec{p}_0, \left[ \vec{n}_0, \left[ \vec{\sigma}_0, \vec{E}_0 \right] \frac{e^{-ik\sigma}}{\sigma} \right] \right] \right] e^{-ik\Delta r} dS, \quad (1)$$

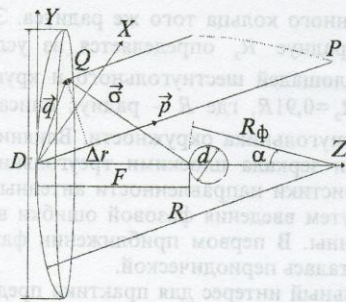
где  $G_0$  – коэффициент усиления облучателя;  $\vec{E}_0$  – характеристика поля облучателя;  $\vec{p}_0$  – единичный вектор в направлении на точку наблюдения  $P$ ;  $\vec{n}_0$  – внутренняя нормаль к точке интегрирования  $Q$  на поверхности зеркала;  $\vec{\sigma}_0$  – единичный вектор в направлении распространения поля облучателя;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\sigma$  – расстояние от облучателя до точки интегрирования на зеркале;  $\Delta r = (\vec{q}, \vec{p}_0)$  – разность хода лучей, попадающих в точку наблюдения;  $\vec{q}$  – радиус-вектор точки интегрирования  $Q$  (см. рис. 1, б). На этом рисунке  $F$  – фокусное расстояние зеркала.

Для численного интегрирования поле (1) представим в виде суммы полей по всем треугольникам

$$\vec{E}(\vec{p}_0) = \frac{\sqrt{G_0}}{\lambda} \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^N \left[ \vec{p}_0, \left[ \vec{p}_0, \vec{j}^3 \right] \right] e^{-ik\Delta r} \Delta S, \quad (2)$$



а)



б)

Рис. 1. Схема аппроксимации сферы плоскими треугольниками (а) и геометрия задачи (б)

Расчет характеристик антенн рассмотрим на примере большой зеркальной антенны со сферическим рефлектором радиуса  $R=350\lambda$  и диаметром раскрыва  $D=300\lambda$ , аппроксимированном плоскими треугольниками с размером стороны треугольника  $l=0,0286R$ . Здесь  $\lambda$  – рабочая длина волны.

Для расчета характеристик исследуемых антенн необходимо знать координаты вершин аппроксимирующих треугольников и их геометрические размеры. В случае сферической зеркальной антенны ее поверхность разбивается на шесть равных секторов. Каждый сектор в свою очередь разбивается на плоские равнобедренные тре-

где  $m, n$  – соответственно номер сектора и номер треугольника в секторе;  $N$  – число треугольников в секторе;  $\vec{j}^a$  – наведенный полем облучателя ток в центре аппроксимирующего треугольника;  $\Delta S$  – площадь аппроксимирующего треугольника.

В расчетах в качестве облучателя использовался диагональный рупор [9], имеющий симметричную ДН. Рупор располагался произвольным образом на фокальном модуле диаметра  $d$ , что имитировало многолучевую или сканирующую антенную систему. При этом учитывалось затенение зеркала фокальным модулем.

Интегрирование токов на поверхности зеркала проводилось по формуле (2) как методом прямоугольников, когда амплитуда и фаза токов на поверхности каждого треугольника принимались постоянными и равными их значениям в центре треугольника, так и методом трапеций, когда амплитуда токов на поверхности треугольников принималась постоянной и равной ее значению в центре треугольника, а фаза на поверхности треугольника аппроксимировалась линейной функцией по ее значениям в вершинах треугольников. Точность расчета характеристик излучения антенн выше при использовании метода трапеций. Программа компьютерного анализа позволяла также рассчитать характеристики излучения зеркальных антенн с гладкой поверхностью сферического зеркала. Для этого использовался известный метод разбиения поверхности зеркала на ячейки интегрирования размером порядка десяти длин волн и численного интегрирования полей с применением квадратурного метода Гаусса при  $n = 4$ .

Для проверки разработанного алгоритма проведены расчеты ДН антенны с гладким сфериче-

ским зеркалом диаметром 3 м для длины волны 2,68 см. Результаты экспериментальных исследований этой антенны даны в работе [10]. На рис. 2, а приведена рассчитанная нами ДН антенны (сплошная кривая), а крестиками отмечены экспериментальные данные из [10]. Видно, что расчеты подтверждаются экспериментом.

Сравнение результатов расчета ДН антенны с гладкой поверхностью рефлектора и круглой апертурой диаметром  $300\lambda$  (кривая 1 на рис. 2, б) и идентичной ей антенны с шестиугольной апертурой (кривые 2, 3 на рис. 2, б) позволило оценить влияние шестиугольной формы апертуры на характеристики антенны. На этом рисунке кривой 2 представлена ДН в плоскости диагонали антенны с шестиугольным излучающим раскрывом ( $\varphi=0^\circ$  на рис. 2, б), а кривой 3 – в плоскости, проходящей перпендикулярно к радиальной стороне сектора ( $\varphi=30^\circ$ ). Как видно из рисунка, шестиугольная форма раскрыва не оказывает заметного влияния на форму ДН в области главного и первых двух боковых лепестков и начинает сказываться в области дальних боковых лепестков. Здесь же для сравнения приведены ДН, рассчитанные для антенны с шестиугольным раскрывом и сферическим зеркалом, аппроксимированным плоскими треугольниками, соответственно для диагонального сечения при  $\varphi=0^\circ$  (кривая 4) и для сечения  $\varphi=30^\circ$  (кривая 5). Видно, что в области главного и первого бокового лепестка ДН для всех трех вариантов зеркала результаты расчетов совпадают. В области второго и дальних боковых лепестков расчеты характеристик направленности зеркала, аппроксимированного плоскими треугольниками, показывают, что ДН принимает

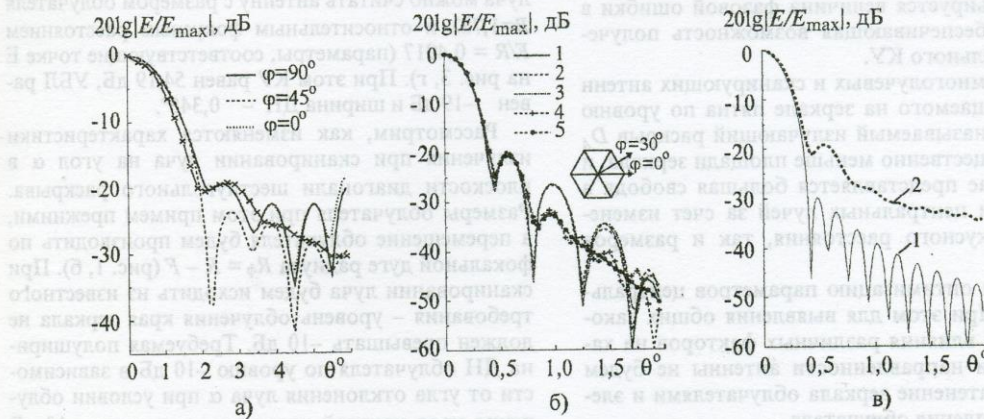


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных ДН антенны с гладким сферическим зеркалом (а), ДН антенн с различной формой апертуры (б), антенн с различными профилями рефлекторов (в):

а) —×— эксперимент;

б) 1 – круглая апертура; 2 – шестиугольная апертура,  $\varphi=0^\circ$ ; 3 – шестиугольная апертура,  $\varphi=30^\circ$ ; 4 – шестиугольная апертура, аппроксимация треугольниками,  $\varphi=0^\circ$ ; 5 – шестиугольная апертура, аппроксимация треугольниками,  $\varphi=30^\circ$ ;

в) 1 – параболический профиль, 2 – сферический профиль

монотонно убывающий характер. Это вызвано наличием квазипериодической фазовой ошибки аппроксимации, причем в диагональной плоскости наблюдается возрастание уровня боковых лепестков, что согласуется с выводами, сделанными в [4].

Оценим потери эффективности антенны при переходе от параболической формы рефлектора к сферической. Для этого рассмотрим оптимизированный вариант антенны с гладким сферическим рефлектором и зеркальной антенны с гладким параболическим рефлектором того же диаметра и с тем же фокусным расстоянием. На рис. 2, в приведены диаграммы направленности антенн с параболическим (сплошная кривая) и сферическим (пунктирная кривая) рефлектором. Расчеты показали, что коэффициент усиления (КУ) антенны при замене параболического рефлектора на сферический уменьшается на 1,3 дБ, уровень бокового лепестка (УБЛ) возрастает на 11,1 дБ, а ширина ДН увеличивается на 10 %.

Как отмечалось выше, для получения максимального КУ в сферических зеркальных антеннах необходимо проведение расчетов по выбору оптимального фокусного расстояния  $F_{\text{опт}}$ , которое для сферического зеркала не будет совпадать с парааксиальным [7]. Кроме того, важным параметром антенн, предназначенных для систем дистанционного зондирования, радиоастрономии и радиолокации, является УБЛ, который должен быть ниже -20 дБ.

В случае однолучевой антенны оптимизация проводится по максимуму КИП: задается определенный уровень облучения края зеркала (как правило -10 дБ), и тем самым определяются размеры сторон облучателя, а изменением фокусного расстояния варьируется величина фазовой ошибки в раскрыве, обеспечивающая возможность получения максимального КУ.

В случае многолучевых и сканирующих антенн размер освещаемого на зеркале пятна по уровню -10 дБ (так называемый излучающий раскрыв  $D_A$  [6]) будет существенно меньше площади зеркала, и в этом случае представляется большая свобода в оптимизации центральных лучей за счет изменения как фокусного расстояния, так и размеров облучателя.

Проведем оптимизацию параметров центрального луча. При этом для выявления общих закономерностей влияния различных факторов на характеристики направленности антенны не будем учитывать затенение зеркала облучателями и элементами крепления облучателя.

Оптимизацию будем проводить для сферического зеркала, аппроксимированного плоскими треугольниками. Входными параметрами оптимизации будут относительное фокусное расстояние  $F/R$  и размер облучателя (сторона диагонального рупора  $B$ ). Выходными параметрами (результатами)

оптимизации будут КУ, максимальный УБЛ и ширина ДН по уровню -3 дБ.

Результаты расчетов КУ, УБЛ и ширины ДН в зависимости от величины относительного фокусного расстояния  $F/R$ , изменяющейся в пределах от 0,484 до 0,5, и размера облучателя  $B = 1,39 + 2,67\lambda$  представлены в виде линий равных уровней поля соответственно на рис. 3, а, б, в. Из рисунков видно, что максимальный КУ, равный 54,6 дБ, достигается в такой антенне при размере облучателя  $B = 1,5\lambda$ , расположенного на расстоянии  $F = 0,488R$  от вершины зеркала. Максимальный УБЛ при этом составляет -15 дБ при ширине ДН, равной  $0,305^\circ$ . Видно, что этот вариант не дает минимально возможного уровня первого бокового лепестка. Уменьшить УБЛ можно только за счет уменьшения КУ и увеличения ширины главного лепестка ДН. Если считать допустимым снижение КУ на 0,5 дБ от максимально достижимого, то как видно из рис. 3, б, где область, ограниченная пунктирной линией, соответствует КУ, превышающему 54,1 дБ, при определенных параметрах  $F/R$  и  $B$  можно получить УБЛ не выше -20 дБ. На рис. 3, г представлены аналогичные кривые в виде линий равных уровней поля тех же выходных параметров антенны для узкой области изменения входных параметров:  $F/R$  в пределах  $0,4905 \div 0,4925$  и  $B$  в пределах  $1,5 \div 2,0\lambda$ .

Если считать допустимым возрастание максимального уровня боковых лепестков на 1 дБ, то область оптимальных значений  $F/R$  и  $B$  на рис. 3, г будет ограничена линиями  $KU = 54,1$  дБ и  $УБЛ = -19$  дБ. Расчет ДН с параметрами, соответствующими точкам А, В, С, D и Е на рис. 3, г, показал, что оптимальным вариантом для центрального луча можно считать антенну с размером облучателя  $B = 1,78\lambda$  и относительным фокусным расстоянием  $F/R = 0,4917$  (параметры, соответствующие точке Е на рис. 3, г). При этом КУ равен 54,19 дБ, УБЛ равен -19 дБ и ширина ДН -  $0,345^\circ$ .

Рассмотрим, как изменяются характеристики излучения при сканировании луча на угол  $\alpha$  в плоскости диагонали шестиугольного раскрыва. Размеры облучателя при этом прием прежними, а перемещение облучателя будем производить по фокальной дуге радиуса  $R_\phi = R - F$  (рис. 1, б). При сканировании луча будем исходить из известного требования - уровень облучения края зеркала не должен превышать -10 дБ. Требуемая полуширина ДН облучателя по уровню -10 дБ в зависимости от угла отклонения луча  $\alpha$  при условии облучения края круглой апертуры по уровню -10 дБ вычисляется по формуле

$$\Delta\theta(\alpha) = \arctg \left( \frac{X - R_\phi}{\sqrt{R^2 - X^2 - R_\phi \cos \alpha}} \right) - \alpha, \quad (3)$$

где  $X$  - координата края зеркала.

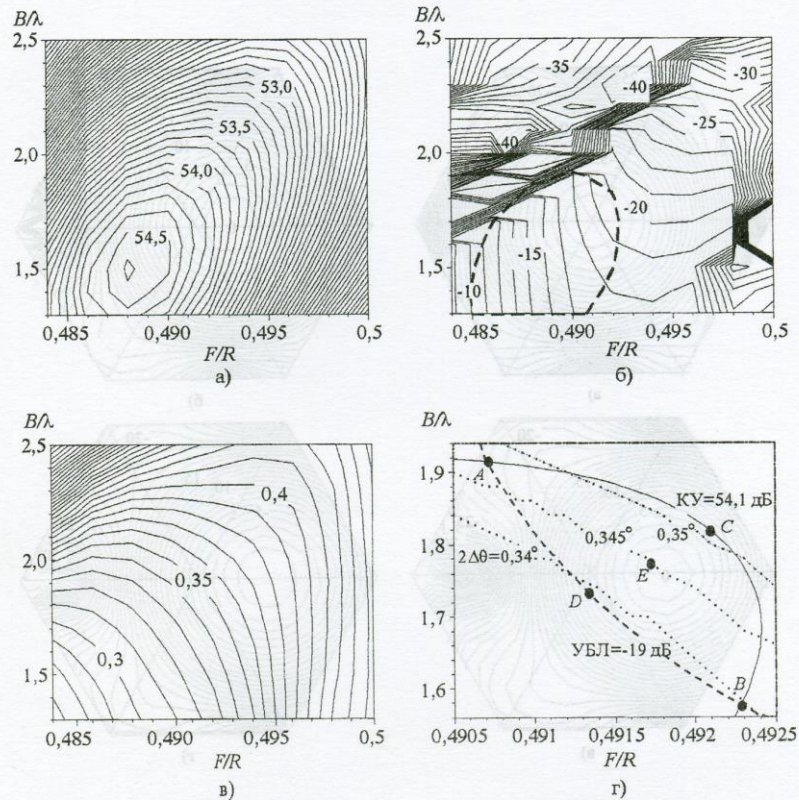


Рис. 3. Коэффициент усиления в дБ (а), уровень бокового лепестка в дБ (б), ширина ДН в град (в) и область оптимальных значений этих параметров для центрального луча (г) как функции от  $F/R$  и  $B/\lambda$ .

Ширину ДН диагонального рупора в зависимости от размера  $B/\lambda$  можно вычислить по формулам из [9]:

$$E_{\theta} = \frac{\sqrt{2}B^2}{\pi\lambda^2} \left( \frac{\sin u}{u} + \frac{\cos u}{1-4u^2\pi^{-2}} \right), \quad (4)$$

$$E_{\varphi} = \frac{\sqrt{2}B^2}{\pi\lambda^2} \left( \frac{\sin u}{u} - \frac{\cos u}{1-4u^2\pi^{-2}} \right),$$

где  $u = \frac{\pi B}{\lambda} \sin \theta$ .

По формулам (3) и (4) определяется максимальный сектор сканирования луча по углу  $\alpha$  в зависимости от размера стороны облучателя  $B$  при условии облучения края зеркала полем по уровню  $-10$  дБ. Для выбранного оптимального варианта облучателя в случае круглой апертуры зеркала максимальный угол сканирования составляет  $11^\circ$ . Для шестиугольной апертуры этот угол

сканирования будет несколько меньше и равен примерно  $10^\circ$ .

Рассмотрим характер распределения нормированной плотности тока, наведенного полем облучателя на зеркале, при сканировании луча. На рис. 4, а, б, в приведены соответствующие графики распределения токов в виде линий равного уровня для углов  $\alpha = 0; 5$  и  $10^\circ$  в контуре шестиугольной апертуры. Зависимость КУ, УБЛ и ширины ДН антенны от угла сканирования  $\alpha$  приведены соответственно на рис. 5, а, б, в (сплошные кривые).

Из этих рисунков видно, что при отклонении луча от оси антенны характеристики излучения антенны сначала незначительно улучшаются, достигая максимального значения при угле  $\alpha=7^\circ$ , а затем с увеличением угла  $\alpha$  резко ухудшаются. Так, КУ антенны возрастает на  $0,1$  дБ для  $\alpha=7^\circ$ , УБЛ уменьшается на  $0,7$  дБ а ширина ДН уменьшается на  $2,6\%$ . Для крайнего луча при  $\alpha=10^\circ$  КУ снижается на  $0,1$  дБ, УБЛ возрастает на  $1$  дБ а ширина ДН возрастает на  $1,4\%$  по сравнению с центральным лучом.

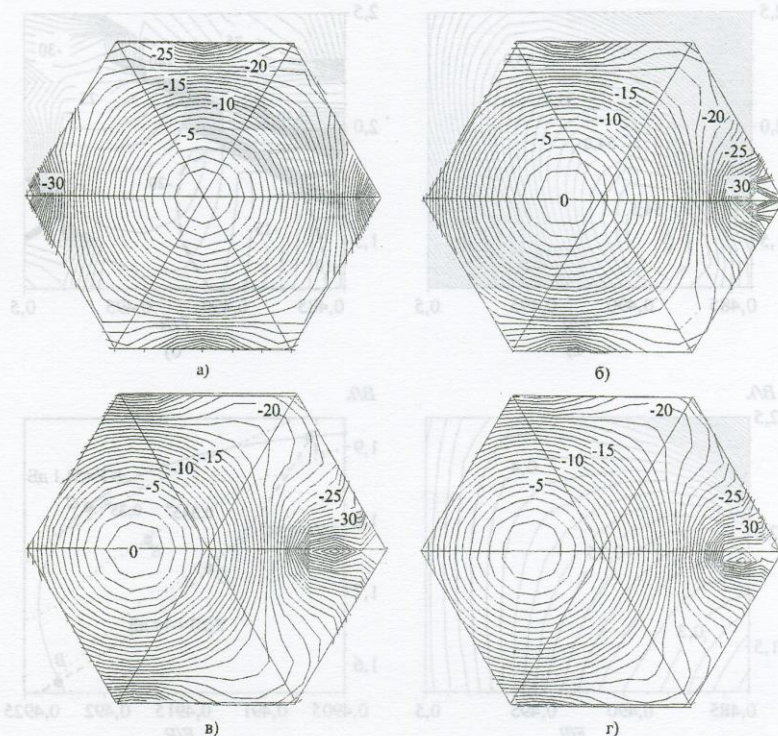


Рис. 4. Распределение нормированной плотности тока, наведенного на поверхности зеркала, при отклонении луча на угол  $\alpha=0^\circ$  (а),  $\alpha=5^\circ$  (б),  $\alpha=10^\circ$  (в) и при отклонении луча на угол  $\alpha=10^\circ$  с доворотом рупора к центру зеркала на  $1^\circ$  (г)

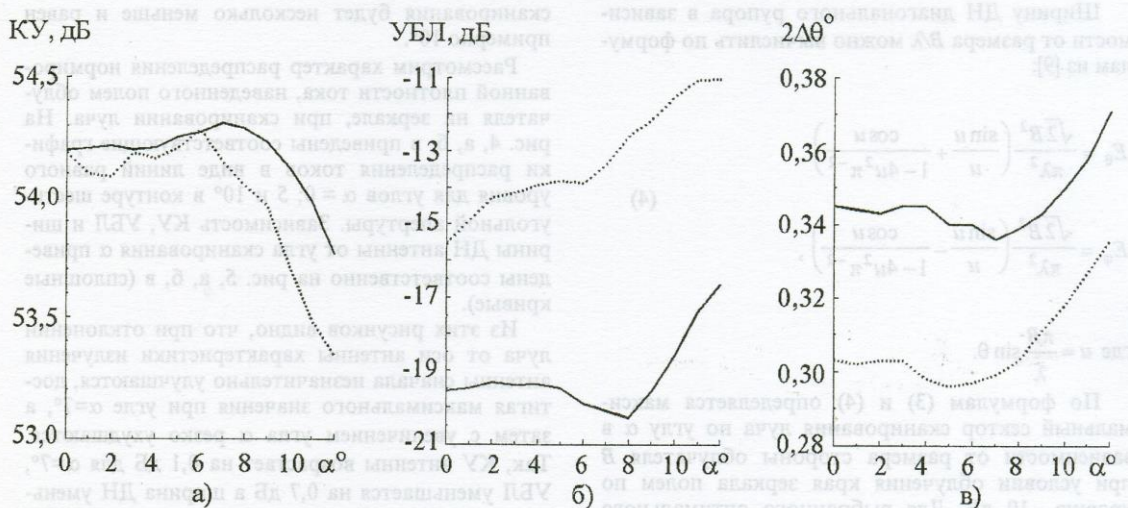


Рис. 5. Изменение КУ (а), УБЛ (б) и ширины ДН (в) при сканировании луча без учета затенения (—) и с учетом затенения (.....)

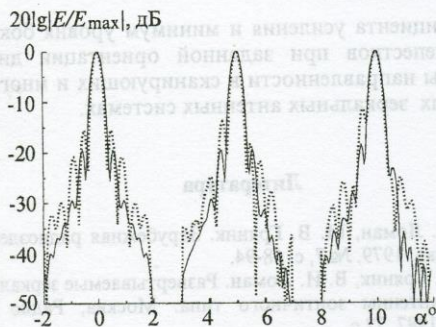


Рис. 6. ДН при сканировании луча без учета затенения (—) и с учетом затенения (···)

Расчетные ДН для диагональной плоскости апертуры для углов  $\alpha = 0; 5$  и  $10^\circ$  приведены на рис. 6 в виде сплошных кривых. Видно, что при отклонении луча на угол  $\alpha = 10^\circ$  наблюдается асимметрия формы ДН: возрастание УБЛ, расположенного ближе к направлению нормали к раскрыву антенны, и уменьшение лепестка, расположенного с противоположной стороны.

Проведем оптимизацию антенны с лучом, отклоненным на угол  $\alpha = 10^\circ$ . Сохраняя неизменным фокусное расстояние, будем варьировать размеры облучателя, изменяя тем самым размер облучаемого пятна на зеркале, а следовательно, уровень облучения края зеркала. Результаты расчетов показали, что максимальный КУ антенны для крайнего луча, равный 54,16 дБ, имеет место при облучении края апертуры на уровне -9 дБ, что на 0,06 дБ больше по сравнению с неоптимизированным облучателем для крайнего луча. Размер оптимизированного облучателя уменьшается до 1,66λ. Этот результат совпадает с выводами, полученными в [4]. Однако УБЛ при этом возрастает на 1 дБ по сравнению с неоптимизированным вариантом.

Рассмотрим далее возможность оптимизации характеристик излучения крайнего луча антенны путем изменения размера облучаемого пятна на зеркале (при неизменном фокусном расстоянии) с одновременным смещением пятна на поверхности зеркала путем доворота рупора как к центру зеркала, так и в противоположную сторону. При этом примем, что край апертуры зеркала всегда облучается по уровню -10 дБ. Результаты расчета показали, что такая оптимизация позволяет повысить КУ крайнего луча на 0,3 дБ за счет увеличения облучаемого пятна на зеркале и смещения его к центру зеркала на  $1^\circ$  так, чтобы край зеркала освещался на уровне -10 дБ. При этом УБЛ возрастает на 1 дБ. Картина распределения наведенных токов на поверхности зеркала для этого случая показана на рис. 4, г.

Рассмотрим зависимость величины сектора сканирования луча от полного размера раскрыва антенны  $D$  при изменении последнего от  $D_A$  до максимального размера, равного  $2R$ , что соответствует полусферическому зеркалу. При этом размер излучающего раскрыва остается неизменным и равным оптимальному его значению для центрального луча. Очевидно, что в (3)  $2\Delta\theta$  — угол, под которым виден излучающий раскрыв антенны  $D_A$  из точки расположения облучателя, и для оптимального варианта антенны (точка Е на рис. 3, г) он равен  $27,3^\circ$ . Будем определять максимальный сектор сканирования для случаев, когда КУ антенны уменьшается на краю зеркала на 0,5 и 3,0 дБ по сравнению с центральным лучом. Тогда, по аналогии с [6], выражение для угла сканирования луча запишется в виде

$$\alpha = \arcsin \frac{D}{2R} - 2 \arcsin \frac{D_A}{2R} + \delta\theta, \quad (5)$$

а весь сектор сканирования будет равен  $2\alpha$ . В (5)  $\delta\theta$  — величина расширения угла сканирования при допустимом уменьшении КУ на краю сектора сканирования.

Проведенные для данного варианта антенны расчеты показали, что если потери КУ на краю сектора сканирования составляют 0,5 и 3,0 дБ, величина  $\delta\theta$  соответственно равна 1,8 и 8,8°.

До сих пор мы рассматривали характеристики излучения сканирующей сферической зеркальной антенны без учета затенения. В реальных конструкциях широкоугольных сканирующих и многолучевых зеркальных антенн линейный размер блока облучателей в плоскости сканирования равен

$$d = 2(R - F) \sin \alpha + B,$$

где  $2(R - F) \sin \alpha$  — расстояние между фазовыми центрами крайних излучателей;  $B$  — размер стороны облучателя

Как правило, блок облучателей совмещается с аппаратным блоком, и поэтому фокальный модуль (ФМ) имеет форму сферы диаметром  $d$ . В исследуемой антенне отношение диаметра фокального модуля  $d$  к диаметру раскрыва  $D$  составляет

$$d/D \approx 1,17 \sin \alpha$$

и в случае широкоугольного сканирования на угол  $\alpha = 10^\circ$  фокальный модуль будет образовывать тень на поверхности зеркала размером  $d \approx 0,2D$ .

Учет затенения зеркала сводится к исключению при интегрировании по поверхности в выражениях (1), (2) той части поверхности зеркала, на которую падает тень от фокального модуля под углами  $\theta$ ,  $\varphi$ . При этом в расчетах диаметр ФМ принят равным  $0,13D$ .

Аналогично рассмотренной выше оптимизации параметров центрального луча без учета затенения нами была проведена оптимизация параметров центрального луча с учетом затенения. Анализ результатов расчета зависимости КУ, УБЛ и ширины ДН в виде линий равного уровня от параметров  $F/R$  и  $B$  показал, что максимальный КУ, равный 54,23 дБ в этом случае достигается при  $F/R = 0,488$  и  $B = 1,46\lambda$ . При этом УБЛ составляет  $-15,14$  дБ, а ширина ДН равна  $0,296^\circ$ .

Из результатов компьютерного анализа следует, что оптимальным является вариант, когда КУ антенны, рассчитанный с учетом затенения, равен КУ оптимизированного варианта антенны без учета затенения, то есть составляет 54,19 дБ, а УБЛ при данном КУ минимален. Такому варианту антенны с затенением соответствуют параметры:  $F/R = 0,4885$ ,  $B = 1,55\lambda$ . При этом УБЛ составляет  $-15,5$  дБ, а ширина ДН равна  $0,303^\circ$ . Сравнивая эти результаты с результатами расчета антенны без учета затенения, видим, что при обеспечении одинакового КУ антенны для центрального луча, затенение зеркала приводит к увеличению УБЛ от значения  $-19,6$  дБ до  $-15,5$  дБ (на 4,1 дБ) и уменьшению ширины ДН от значения  $0,345^\circ$  до  $0,303^\circ$ .

Рассмотрим характеристики сканирования антенны с учетом затенения. На рис. 5, а, б, в приведены зависимости КУ, УБЛ и ширины ДН от угла поворота максимума ДН (пунктирные кривые). Видно, что при затенении зеркала характер изменения зависимости КУ от угла  $\alpha$  сохраняется таким же, как и в случае антенны без затенения, однако максимум КУ, превышающий на 0,1 дБ КУ для центрального луча, наблюдается при меньшем, чем в незатененном варианте, угле отклонения луча и равен  $6^\circ$ . На краю сектора сканирования КУ уменьшается на 0,5 дБ по сравнению с величиной КУ для центрального луча. (В случае без затенения уменьшение КУ составляет 0,1 дБ).

В отличие от антенны без затенения, где с увеличением  $\alpha$  до  $8^\circ$  УБЛ уменьшается, а затем снова растет, при затенении зеркала уровень боковых лепестков монотонно возрастает до  $-11,5$  дБ при  $\alpha = 10^\circ$ . ДН антенны, рассчитанные с учетом затенения, для углов сканирования  $\alpha = 0; 5$  и  $10^\circ$  приведены на рис. 6 (пунктирные линии).

Таким образом, разработан алгоритм определения оптимальных размеров, ориентации и положения облучателя, обеспечивающий максимум

коэффициента усиления и минимум уровня боковых лепестков при заданной ориентации диаграммы направленности в сканирующих и многолучевых зеркальных антенных системах.

### Литература

1. В. И. Ломан, М. В. Гряник. Зарубежная радиоэлектроника. 1979, № 7, с. 68-94.
2. М. В. Гряник, В. И. Ломан. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. Москва, Радио и связь, 1987, 72 с.
3. А. Г. Соколов, А. С. Гвамичава. Решение инженерных конструкций космических радиотелескопов. В кн.: Антенны. Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Радио и связь. 1981, вып. 29, с. 2-10.
4. Ю. А. Кисанов, Н. М. Фейзулла. Влияние конструктивных особенностей складных антенн ферменного типа на их радиотехнические характеристики. В кн.: Антенны. Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Радио и связь. 1981, вып. 29, с. 26-32.
5. Р. Кюн. Микроволновые антенны. Ленинград, Судостроение, 1967, 517 с.
6. Л. Д. Бахрах, Г. К. Галимов. Зеркальные сканирующие антенны. Москва, Наука, 1981, 302 с.
7. С. П. Мартынюк, Г. И. Хлопов. Оптимизация сферической зеркальной антенны. Дифракция и распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн. Киев, Наукова думка, 1984, с. 248-255.
8. В. Н. Горелов, С. П. Мартынюк, Г. И. Хлопов. Оптимизация остроуправленных зеркальных антенн со сферическим рефлектором. Радиофизика и электроника миллиметровых и субмиллиметровых волн. Харьков, Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР, 1988, с. 122-129.
9. A. W. Love. Microwave Journal. March 1962, pp. 117-122.
10. Li. Tingye. IEEE Trans. Antennas Propag. July 1959, AP-7, pp. 223-226.

### Computer Analysis of Reflector Antenna Characteristics which Surface Is Approximated by Plane Triangles

N. N. Gorobets, V. I. Kiyko

The radiative characteristics of the scanning reflector antenna with spherical reflector approximated by plane triangles was considered. The optimization of radiation pattern of such antennas depending on size, position and orientation of radiator feed having diagonal horn form during scanning beam in the angle sector of the order of 60 pattern widths was carried out. The dependence of the antenna characteristics from reflector shadowing by the radiator feed block was investigated.