

УДК 621.396.67

Л.М. Лобкова, д-р техн. наук, професор,**Ю.Н. Тыщук, ассистент***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053**E-mail: y.tyschuk@gmail.com***ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СФЕРИЧЕСКИХ АНТЕНН**

Предложен метод определения диаметра апертуры сферического зеркала с учетом допустимых фазовых ошибок и отношения фокального расстояния к диаметру апертуры.

Ключевые слова: *зеркальная антенна, сферическое зеркало, диаметр апертуры, фокусное расстояние.*

Развитие современных систем радиосвязи привело к необходимости осваивать диапазоны длин волн, начиная с сантиметровых (СМВ), миллиметровых (ММВ), вплоть до оптических радиоволн. Во всех этих диапазонах используются апертурные антенны, чаще всего с применением параболических зеркал.

Однако в 50-х годах А.З. Фрадин, а позднее Р. Кюн обратили внимание на свойства сферических зеркал. Ввиду того, что сферическое зеркало можно аппроксимировать параболическим профилем в ограниченных пределах, то появилась возможность широкоугольного сканирования диаграммы направленности (ДН) антенны либо создания антенн с многолучевым режимом излучения [1, 2]. В лаборатории СевНТУ, начиная с 1982 г. проводилась теоретические и экспериментальные исследования по созданию многолучевых сферических антенн.

Целью данной работы является оптимизация геометрических параметров сферической антенны для получения заданной диаграммы направленности.

Сформируем задачу следующим образом. Пусть задана полусфера с радиусом R . Представим её центральное сечение в виде полуокружности в декартовой системе координат, сместив её центр по оси Z на величину R (рисунок 1), тогда для любой точки $M(x, z)$ можем записать

$$R^2 = x^2 + (R - z)^2.$$

Отсюда следует, что

$$x^2 = 2Rz \left(1 - \frac{z}{2R} \right). \quad (1)$$

Из соотношения (1) следует, что если $\frac{z}{2R} \ll 1$, то

$$x^2 \cong 2Rz. \quad (2)$$

Уравнение (2) и есть аппроксимирующая парабола. Полагая $R = 2f$, находим параметр параболы

$$f = \frac{R}{2}.$$

Тогда элемент окружности можно представить в виде

$$x^2 = 4fz. \quad (3)$$

Чтобы воспользоваться соотношением (3) при построении сферической антенны, необходимо провести анализ выражения $\frac{z}{2R}$ с точки зрения возможных фазовых ошибок, которые будут иметь место в апертуре антенны.

Для этого в качестве облучателя рассмотрим изотропный излучатель, который расположен на расстоянии $\frac{R}{2}$ от вершины зеркала. На рисунке 2 показана фокальная плоскость, в пределах которой проведём анализ геометрической разности хода Δr между фокальным лучом АО и наклонным лучом АМ после отражения от поверхности зеркала

$$\Delta r = AM + MB - 2AO, \quad (4)$$

где $2AO = R$; $AM = \sqrt{\left(\frac{R}{2} - z\right)^2 + x^2}$.

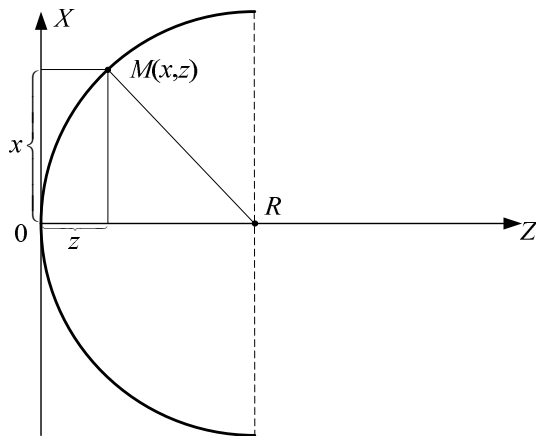


Рисунок 1 — Геометрия расположения полуокружности

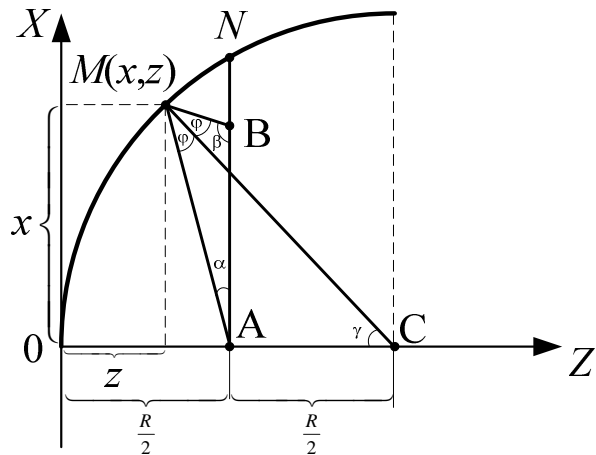


Рисунок 2 — К определению геометрической разности хода лучей в фокальной плоскости NA

После подстановки (1) в выражение для AM, получим

$$AM = \sqrt{\frac{R^2}{4} + Rz} . \tag{5}$$

Для определения MB из треугольника MVA запишем соотношения для углов α и β в виде:

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \gamma - \varphi ;$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \gamma - \varphi .$$

Тогда сторона MB примет вид

$$MB = MA \frac{1 - \operatorname{tg}\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi}{1 + \operatorname{tg}\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi} , \tag{6}$$

где

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{\sqrt{2Rz - z^2}}{R - z} ; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{2Rz - z^2}}{R + z} , \tag{7}$$

После подстановки выражений (5), (6) и (7) в (4) получим

$$\Delta r = \frac{\sqrt{R^2 + 4Rz}}{1 + \frac{2Rz - z^2}{R^2 - z^2}} - R . \tag{8}$$

Разложим числитель дробной части выражения (8), оставляя величины второго порядка малости,

$$R\sqrt{1 + 4\frac{z}{R}} \cong R\left(1 + \frac{2z}{R} - \frac{2z^2}{R^2}\right) . \tag{9}$$

После подстановки (9) в (8) и преобразования получим $\Delta r = -\frac{z^2}{R}$, следовательно, разность фаз будет определяться следующим выражением

$$\Delta\psi = k \cdot \Delta r = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{z^2}{R} . \tag{10}$$

Из соотношения (10) следует, что:

- в фокальной плоскости, а равным образом и в любой другой, включая апертуру полусферы, распределение фазы поля подчинено квадратичному закону z^2 ;
- знак «-» в выражении (10) свидетельствует о том, что квадратичное фазовое распределение соответствует сходящейся сферической волне.

Полученный результат позволяет описать физическую картину формирования поля излучения сферической антенны.

Представим полусферическое зеркало с равноамплитудным распределением поля, создаваемого изотропным излучателем. Выделим зоны Френеля, при этом центральная зона создаёт синфазное поле (рисунок 3). Все следующие зоны создают сферические сходящиеся волны с увеличивающимся радиусом кривизны фронта по мере приближения к вершине зеркала (синфазной области). Сферические волны, формируемые на краю зеркала, имеют наименьший радиус кривизны и создают фокальное пятно вблизи апертуры зеркала (рисунок 3).

Таким образом, поле излучения полусферической антенны формируется главным образом за счет синфазного участка, а все фокальные точки образуют вторичные излучатели со своей амплитудой и фазой. Следовательно, чем ближе фокальная точка S_n к апертуре антенны, тем сильнее её влияние на фазовый фронт синфазного участка.

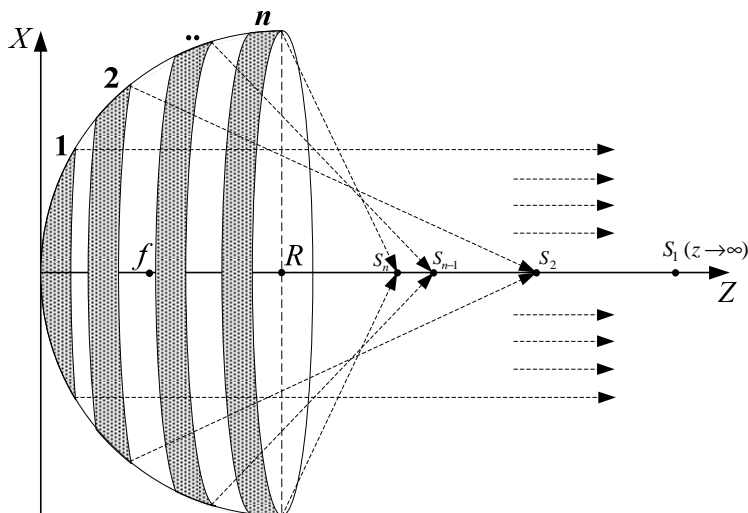


Рисунок 3 — Геометрическая модель формирования поля излучения полусферической антенны

Для исключения влияния близлежащих фокальных точек используется только область вблизи вершины полусферы. Однако влияние дальних фокальных точек (S_1, S_2 и т.д.) остается, но его можно ослабить, если облучатель сместить из точки фокуса в сторону вершины зеркала. Влияние дальних фокальных точек можно оценить по величине допустимых фазовых ошибок, которые определяются с использованием выражения (10).

Поскольку в соответствии с формулой (2) сферическая поверхность аппроксимируется параболической, то после подстановки $z = \frac{x^2}{2R}$ в (10) получим

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^4}{4R^3}. \quad (11)$$

Дальнейший анализ (11) проведем в зависимости от выбора геометрических параметров параболических зеркал, для которых важным параметром является угол раскрытия $2\Psi_0$ и его зависимость от отношения фокусного расстояния f к диаметру апертуры d , то есть $f/d = f(\Psi_0)$ (рисунок 4). Для этого преобразуем формулу (11), определяя $\Delta\Psi_{max}$ на краю апертуры, то есть при $x = d/2$, где $d = 2R$. Тогда формула (11) примет следующий вид

$$\Delta\Psi_{max} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{4R^3} \frac{d^4}{2^4}$$

Умножив и поделив правую часть равенства на λ^3 , получим

$$\Delta\Psi_{max} = \frac{2\pi}{4} \frac{1}{2^4} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3. \quad (12)$$

Введём в формулу (12) фокальное расстояние $f = \frac{R}{2}$ и представим её в следующем виде

$$\Delta\Psi_{max} = \frac{2\pi}{4} \frac{1}{2^7} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{\lambda}{f}\right)^3. \tag{13}$$

Умножив и поделив соотношение (13) на $(d/\lambda)^3$, после преобразования получим

$$\frac{f}{d} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{4\Delta\Psi_{max}}} \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{d}{\lambda}}. \tag{14}$$

На основании формулы (14) можно установить следующее:

— для повышения направленных свойств сферической антенны (СА) необходимо увеличивать диаметр апертуры d , что вызовет увеличение фокусного расстояния f при заданных фазовых ошибках $\Delta\Psi_{max}$;

— увеличение $\Delta\Psi_{max}$ в свою очередь приводит к уменьшению фокусного расстояния f при заданной апертуре d .

На рисунке 4 показаны численные результаты для сферической антенны (СА) для двух значений $\Delta\Psi_{max}$: $\pi/2$ и $\pi/8$.

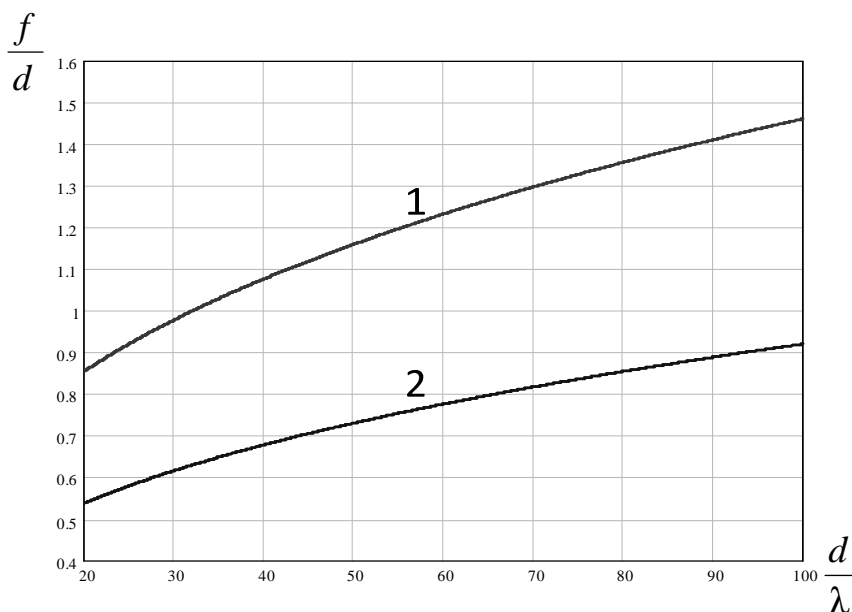


Рисунок 4 — Зависимость отношения f/d от относительного диаметра апертуры d/λ для случаев: 1 — $\Delta\Psi_{max} = \pi/8$, 2 — $\Delta\Psi_{max} = \pi/2$

Рассмотрим случаи малых апертур при $d/\lambda = 20$ и больших апертур при $d/\lambda = 200$ для $\Delta\Psi_{max} = \pi/2$. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 — Геометрические параметры сферических зеркал

d/λ	20	30	40	50	60	80	100
f/d	0,54	0,62	0,68	0,73	0,78	0,85	0,93
f/λ	10,8	18,6	27,2	36,5	46,8	68	93
R/λ	21,6	37,2	54,4	73	93,6	136	186

Рассмотрим выбор геометрических параметров СА для $d/\lambda = 20$. Как следует из таблицы 1, при $\Delta\Psi_{max} = \pi/2$ получим $f/\lambda = 10,8$, а $R/\lambda = 21,6$.

Полученный результат указывает на то, что при радиусе апертуры СА $a = d/2 = 10\lambda$ точка фокуса располагается вблизи апертуры, то есть угол раскрытия апертуры СА $2\Psi_0$ близок к значению 180° . Таким образом, для $d/\lambda = 20$ и при $\Delta\Psi_{max} = \pi/2$ получаем СА с предельным зеркалом, которое, как и для параболических антенн (ПА), на практике не применяется. Необходимо отметить, что предельные ПА характеризуются отношением $f/d = 0,25$ (рисунок 5), а для предельных СА $f/d \cong 0,5$, то есть в 2 раза

больше, чем для ПА. Также необходимо отметить, что увеличение $\Delta\psi_{max}$ приведёт к дальнейшему уменьшению f/λ и переходу к глубоким зеркалам, которые на практике практически не применяются.

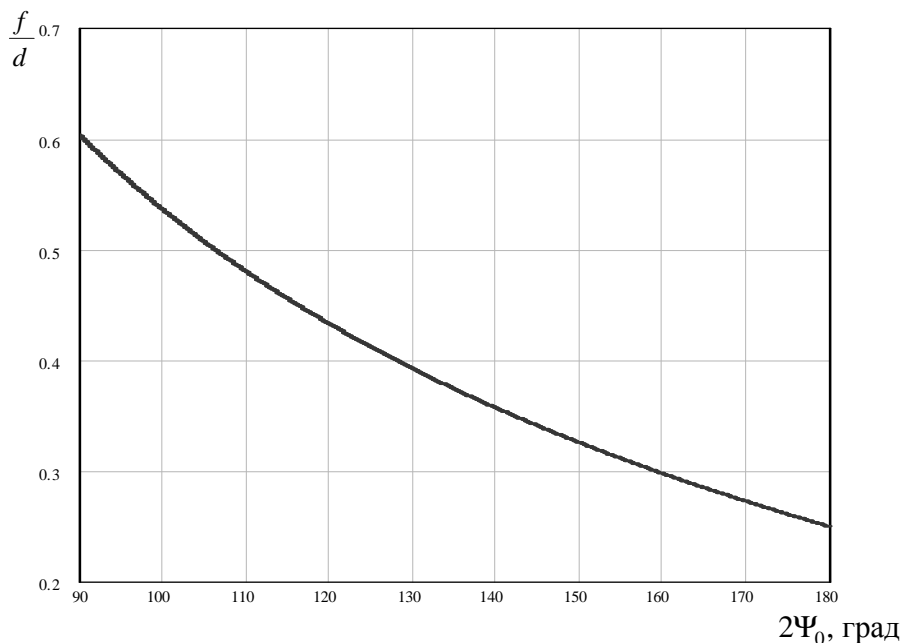


Рисунок 5 — Залежність відношення f/d від кута розкриття параболічного дзеркала $2\Psi_0$

Однако уменьшение $\Delta\psi_{max}$ до $\pi/8$ позволяет получить уже $f/\lambda = 17,2$, $R/\lambda = 34,4$ для случая $d/\lambda = 20$. В этом случае СА имеет большой радиус кривизны, а точка фокуса располагается за пределами апертуры, то есть антенна реализуется с помощью длиннофокусного зеркала.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- реализация СА целесообразна для больших апертур, начиная с $d/\lambda = 50$;
- проведено сравнение полученных результатов для СА с ПА для которых на рисунке 5 показана зависимость f/d от $2\Psi_0$, что $f/d = 0,25$ при $2\Psi_0 = 180^\circ$, в тоже время для СА в этом случае равна $f/d \cong 0,5$;
- учитывая практическое применение ПА при отношении $f/d = 0,48$ и $2\Psi_0 = 110^\circ$ можно предположить, что для СА оптимальным будет отношение $f/d = 0,96$, которое можно получить при $\Delta\psi_{max} < \pi/8$.

Целью дальнейших исследований является экспериментальная проверка полученных результатов. В процессе планируемых исследований будут изготовлены зеркала сферической формы с различными радиусами и проведены измерения характеристик излучения антенн, построенных на основе этих зеркал.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот / А.З. Фрадин. — М.: Советское радио, 1957. — 635 с.
- 2 Кюн Р. Микроволновые антенны, пер. с англ. / Р. Кюн, под ред. М.П. Долуханова. — Л.: Судостроение, 1967. — 517 с.

Поступила в редакцию 09.04.2013 г.

Лобкова Л.М., Тишук Ю.М. Вибір геометричних параметрів сферичних антен

Запропоновано метод визначення діаметра апертури сферичного дзеркала з урахуванням допустимих фазових помилок і відносини фокальної відстані до діаметру апертури.

Ключові слова: дзеркальна антена, сферичне дзеркало, діаметр апертури, фокусна відстань.

Lobkova L.M., Tyshuk Y.N. Choice geometrical parameters of the spherical antennas

A method of determining of the aperture diameter of the spherical reflector the allowed phase errors and the relationship focal length to diameter aperture is presented.

Keywords: reflector antenna, spherical reflector, the aperture diameter, focal length.