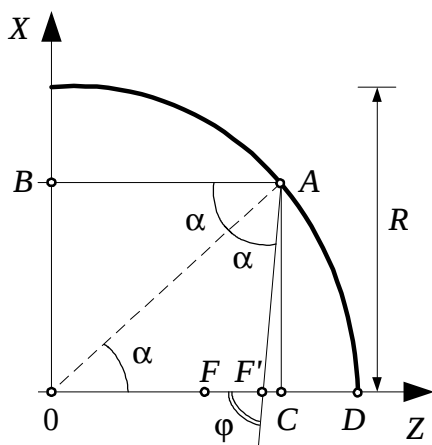


ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНО ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ СО СФЕРИЧЕСКИМ РЕФЛЕКТОРОМ

Рисунок 1 – Схема зеркальной антенны со сферическим рефлектором



Представлены результаты исследований геометрических свойств зеркальной антенны со сферическим рефлектором. Анализ проведен на основе метода геометрической оптики. Показана возможность расширения эффективно излучающей поверхности антенны за счет оптимального выбора местоположения облучателя.

Разработка современных систем спутниковой радиосвязи требует применения многолучевых антенн (МЛА), позволяющих осуществлять прием и передачу сигналов одновременно в нескольких фиксированных направлениях. Обычные антенны типа однозеркальной параболической или двухзеркальной антенны Кассегрена предназначены для формирования одного луча и не удобны при создании МЛА. Достаточно простым и технически целесообразным решением является применение однозеркальной антенны со сферическим рефлектором, в которой каждому из лучей соответствует только часть излучающей поверхности. При этом вследствие высокой симметрии сферического зеркала характеристики лучей получаются практически одинаковыми [1 - 3].

Однако такого рода антенны не могут создать в своей апертуре синфазное распределение поля. Эта характерная особенность приводит к уменьшению эффективно излучающей поверхности, а также к искажениям диаграммы направленности (ДН) антенны. Для учета этой особенности применяются следующие способы:

а) подбираются такие размеры освещенной области сферического зеркала, при которых фазовые ошибки в апертуре антенны не будут превышать допустимую величину [3];

б) фазовое распределение поля в апертуре антенны корректируется специально сконструированными облучателями, усложнением облучающей системы путем введения переотражающих зеркал специальной формы, корректирующих линз [1,2].

В данной работе с использованием теории геометрической оптики оптимизируются геометрические параметры зеркальной антенны со сферическим рефлектором, включая местоположение фазового центра облучателя применительно к созданию на ее основе МЛА.

Пусть на сферическое зеркало падает параллельный пучок лучей. На рисунке 1 в виду симметрии сферического зеркала изображено меридиональное сечение верхней полусферы и один из таких лучей. На этом же рисунке отмечены: F — точка параксиального фокуса ($OF = 0,5R$, где R — радиус сферического зеркала); F' — точка, в которой отраженный от зеркала луч пересекает ось зеркала (ось Z); α — угол между падающим лучом и нормалью к точке падения (точка A); $\varphi = 2\alpha$ — угол наклона отраженного луча к оси зеркала.

Определим разность между длинами произвольного L и центрального L_0 лучей, параллельно падающих на зеркало $\Delta L = L - L_0$.

Известно [1], что параллельные лучи, проходящие вблизи оси сферического зеркала, пересекаются в точке параксиального фокуса. Тогда длина центрального луча от точки в апертуре антенны (точка O) до точки на поверхности зеркала (точка D) и после отражения до точки параксиального фокуса F равна $L_0 = 1,5R$.

Для вычисления длины произвольного луча разложим его на участки. Первый участок определим от точки B с координатами $(x_a, z_a=0)$ в апертуре антенны до точки A с координатами $(x_3=x_a, z_3)$ на поверхности антенны. Причем, ввиду того, что рассматриваемая поверхность зеркала является сферической, для точек принадлежащих поверхности зеркала одну из координат можно выразить через другую. Например, $z_3 = \sqrt{R^2 - x_3^2}$. Тогда

$$|BA| = \sqrt{(x_a - x_3)^2 + (z_a - z_3)^2} = \sqrt{R^2 - x_3^2}.$$

Второй участок находится на отраженной части рассматриваемого луча от точки A на поверхности антенны до точки F' на оси зеркала. Определим его из прямоугольного треугольника ACF'

$$|AF'| = \frac{|AC|}{\sin \phi} = \frac{x}{\sin 2\alpha} = \frac{x}{2\sin \alpha \cos \alpha},$$

где функции $\cos \alpha$, $\sin \alpha$ вычислим из прямоугольного треугольника BOA :

$$\cos \alpha = \sqrt{R^2 - x^2} / R, \quad \sin \alpha = x / R.$$

Опустив промежуточные преобразования, запишем

$$\Delta L(x_3) = \frac{3R^2 - 2x_3^2}{2\sqrt{R^2 - x_3^2}} - 1,5R. \quad (1)$$

Величина $\Delta L(x_3)$ с учетом волнового числа $k = 2\pi/\lambda$ определяет запаздывание фазы в точке F' относительно параксиального фокуса F .

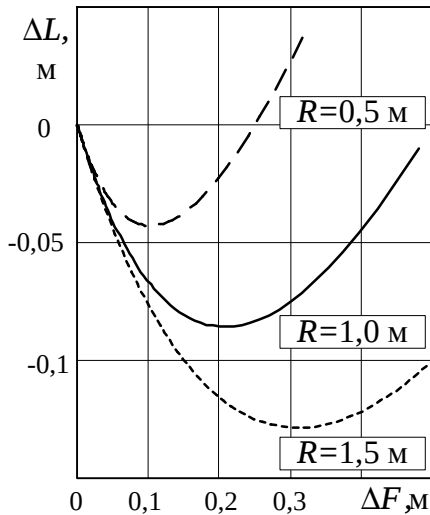


Рисунок 2 – Разность длин параллельных лучей от смещения фокуса

Далее вычислим также разность $\Delta F = F' - F$ между точкой пересечения произвольным лучом оси зеркала F' и точкой параксиального фокуса.

Выполнив аналогичные описанным выше преобразования, получим

$$\Delta F(x_3) = \frac{R^2}{2\sqrt{R^2 - x_3^2}} - 0,5R. \quad (2)$$

На рисунке 2 изображены зависимости, характеризующие разность длин лучей $\Delta L(x_3)$ от смещения точки пересечения лучей $\Delta F(x_3)$ с осью Z для различных радиусов сферического зеркала. Согласно рисунку 2 для каждой из приведенных зависимостей наблюдается экстремум, вычислить который можно приравняв к нулю производную

$$\frac{d\Delta L(x_3)}{d\Delta F(x_3)} = \frac{d\Delta L(x_3)}{dx_3} \cdot \frac{dx_3}{d\Delta F(x_3)} = 0. \quad (3)$$

Решив данное уравнение (3) с учетом соответствующих преобразований (1) и (2), получим:

$$x_{3\text{экстр}} = 0,707R, \quad \Delta L_{\text{экстр}} = -0,086R \quad \text{и} \quad \Delta F_{\text{экстр}} = 0,207R.$$

Полученные таким образом соотношения позволяют определить местоположение фазового центра облучателя, при котором длина луча, падающего параллельно оси зеркала и пересекающего эту ось после отражения, минимальна.

Согласно теории геометрической оптики, воспользуемся принципом обратимости лучей. Пусть фазовый центр облучателя расположен в точке F' . Тогда из пучка лучей, исходящих из этой точки, после отражения от сферической поверхности в одном меридиональном сечении три луча дадут лучи, параллельные оси зеркала. Один из этих лучей является центральным, другие два будут располагаться симметрично относительно оси зеркала.

Зададим максимально допустимую разность длин неосевого и центрального лучей ΔL_{max} , исходящих из точки F' . При этом неосевой луч для данного случая и будет тем лучом, для которого отраженный луч параллелен оси зеркала. Из выражения (1), изменив значение L_0 на $L' = L_0 - \Delta F$, после преобразования получим

$$\Delta L(x_3) = \frac{2R^2 - x_3^2}{\sqrt{R^2 - x_3^2}} - 2R. \quad (4)$$

Далее преобразуем выражение (4) относительно координаты x_3 для заданного значения $\Delta L_{\text{max}} = \Delta L(x_3 = x_3^{\text{max}})$. В результате получим

$$\left(\frac{x_3^{\max}}{R}\right)^2 = -\left(0,5\left(\frac{\Delta L_{\max}}{R}\right)^2 + 2\frac{\Delta L_{\max}}{R}\right) + \sqrt{0,25\left(\frac{\Delta L_{\max}}{R}\right)^4 + 2\left(\frac{\Delta L_{\max}}{R}\right)^3 + 5\left(\frac{\Delta L_{\max}}{R}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta L_{\max}}{R}\right)} . \quad (5)$$

Вычислив $(x_3^{\max}/R)^2$ согласно (5), можно определить и оптимальное положение фазового центра облучателя, которое соответствует значению координаты $z_{F'}$ (см. рисунок 1):

$$z_{F'} = \frac{R}{2\sqrt{1 - (x_3^{\max}/R)^2}} . \quad (6)$$

Численное значение радиуса эффективно излучающей поверхности сферического зеркала для заданной величины $\Delta L_{\max}$ можно найти с помощью одной из аппроксимирующих парабол. При этом можно построить две параболы оптимальным образом аппроксимирующие сферическую поверхность зеркала для заданной максимальной фазовой ошибки. Для обеих парабол точка F' является фокусом, а их оси совпадают с осью зеркала. Отличие состоит в том, что первая из парабол точно аппроксимирует сферическую поверхность вблизи точки O , а вторая — вблизи точки A (см. рисунок 1), так как в этих точках отраженные лучи параллельны оси зеркала. Используя любую из этих парабол, можно определить эффективно излучающую поверхность сферического зеркала.

Отклонение аппроксимирующей параболы от рассматриваемого сечения сферического зеркала на аппроксимирующем участке можно вычислить как разность соответствующих координат

$$\Delta z(x) = z_3(x) - z_n(x), \quad (7)$$

где $x = x_a = x_3 = x_n$; z_3, x_3 — координаты сечения сферической поверхности, определяемые согласно рисунку 1 выражением

$$z_3(x) = \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (8)$$

z_n, x_n — координаты аппроксимирующей параболы, связанные соотношением

$$z_n(x) = R - 0,25x^2(R - z_{F'})^{-1}. \quad (9)$$

Приравняв выражение (7) к нулю и решив его уравнение относительно x_a , получим значение максимально возможного радиуса эффективно излучающей апертуры сферической антенны $x_a = r_a^{\max}$.

В качестве примера рассмотрим сферическое зеркало с радиусом $R = 1$ м, длина волны источника облучения равна $\lambda = 0,03$ м (10 ГГц). Необходимо определить максимально возможный радиус эффективно излучающей апертуры при допустимых фазовых ошибках $\psi_{\max} \leq \pi/2$ и местоположение облучателя на оси зеркала.

Используя выражение $\psi_{\max} = 2\pi/\lambda \cdot \Delta L_{\max}$, находим $\Delta L_{\max} = 0,0075$ м. Далее на основании (5) и (6) определяем местоположение облучателя $z_{F'} = 0,545$ м. Решая уравнение (7) в виде $\Delta z(x_a) = 0$ с учетом (8) и (9), получаем $r_a^{\max} = 0,574$ м.

Вычисления с аналогичными исходными данными, проведенные для точечного облучателя, расположенного в точке параксиального фокуса $z_F = 0,5$ м, по формулам из [3], дают значение радиуса эффективно излучающей апертуры сферической антенны равным $r_a^{\max} = 0,416$ м, что на 38% меньше.

Таким образом, в результате проведенных исследований и расчетов в приближении геометрической оптики показана возможность увеличения эффективной излучающей поверхности сферической антенны при помощи оптимального выбора местоположения облучателя. Описанный метод является оптимальным в том смысле, что при наперед заданной максимальной фазовой ошибке получают максимально возможный размер эффективной апертуры сферической антенны в предположении равномерного амплитудного распределения ее поверхности.

Библиографический список

1. Бахрах Л.Д. Сканирующие зеркальные антенны / Л.Д. Бахрах, Г.К. Галимов. — М.: Наука, 1981. — 304 с.
2. Корнблит С. СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн / С. Корнблит. Пер. с англ., Под ред. О.П. Фролова. — М.: Связь, 1980. — 360 с.
3. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства Учеб. пособие для вузов связи / А.З. Фрадин. — М.: Связь, 1977. — 440 с.

Поступила в редакцию 21.02.2005 г.