

Study on Structural Design Method of Offset Parabolic Reflector Antennas

Yangguang Deng, Wenke Qin, Jingyi Li, Fei Chen

Aerors Painting Technology Co. Ltd., Xi'an Branch, Xi'an
Email: hua_wen_ok@126.com

Received: Nov. 19th, 2014; revised: Dec. 13th, 2014; accepted: Dec. 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The offset reflector antennas avoid blocking the feed of cover loss, improving the efficiency of the antenna with simple structure, and are applied widely in fixed ground station of modern satellite communications. This paper presents a way of designing an offset reflector antenna. Comparing with classical method, the antenna designed in this paper can make sure that it has the maximum effective area under limited physical size. The coordinate transformation of the intercepted reflector is also carried out in this paper.

Keywords

Offset Reflector Antennas, Effective Area, Coordinate Transformation

基于偏置抛物面天线结构设计方法的研究

邓阳光, 秦文科, 李婧钰, 陈 菲

航天天绘科技有限公司西安分公司, 西安
Email: hua_wen_ok@126.com

收稿日期: 2014年11月19日; 修回日期: 2014年12月13日; 录用日期: 2014年12月20日

摘 要

偏置抛物面天线避免了馈源的遮挡损耗, 使得天线效率提高, 同时也具有结构简单的优点, 在现代卫星

通信地面固定站中广泛使用。本文提出一种偏置抛物面天线结构设计的方法,与传统的设计方法相比较,在限定的物理尺寸下,能够保证天线具有最大的有效面积。本文还将对截取的抛物面进行坐标系变换的推导求解。

关键词

偏置抛物面天线, 有效面积, 坐标系变换

1. 引言

抛物面天线的辐射方向具有高定向性,被广泛的应用于卫星通信和地面远距离通信中。目前馈源性能的优化使前馈抛物面天线性能较过去有显著提高,但馈源及其支杆遮挡带来的旁瓣上升和输入电压驻波比过高的问题没有改善,且收发单元装在馈源后面,又带来了结构支撑问题。偏置抛物面天线能够避免抛物面的反射引起的馈源喇叭驻波特性恶化以及馈源系统和支撑结构的阻挡引起的增益下降等问题。偏置抛物面天线是相对于正馈抛物面天线而言的,正馈抛物面天线为中心聚焦的抛物面天线,正馈抛物面天线为反射面盘面为正圆,馈源位于天线抛物面的焦点,偏置抛物面天线的馈源安装位置不再与天线中心切面垂直且过天线中心的直线上,故不会存在所谓的馈源阴影的影响,在天线面积、加工精度以及接受频率相同的前提下,偏置抛物面天线的增益大于正馈抛物面天线[1]-[3]。由于偏置抛物面天线馈源的定位方式即其相位中心必须严格与偏置天线的焦距保持一致且必须对准,常规抛物面天线的最大辐射值落在椭圆形反射面的几何中心,不能够精准的定位馈源,导致了偏置抛物面天线的效率和增益的降低。本文提出一种偏置抛物面天线结构设计的方法,在限定的物理尺寸下,保证天线具有最大的有效面积,使得天线的增益等性能有了一定的提高。本文还将对截取的抛物面进行坐标系变换的推导求解。

2. 偏置抛物线结构设计及仿真分析

偏置抛物面天线减少了遮挡面积,提高了抛物面天线的效率和增益。为保证天线的基本参数口面有效面积不变,即保持天线辐射场强度不变的条件下,设天线孔径场为均匀分布时的孔径等效面积。目前传统的偏置抛物面天线设计方法是利用偏置圆形或者椭圆形去切割旋转抛物面天线[4] [5]。

2.1. 偏置圆形切割旋转抛物面

常规设计偏置抛物面天线,如图 1 所示,假设旋转抛物面的焦距为 f ,在抛物面所在坐标系为 oxy 坐标系, z 轴为抛物面的旋转轴,其旋转抛物面方程为:

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (2-1)$$

偏置抛物面天线反射面为圆形切割抛物面,即以焦平面内的圆形为基准的拉伸圆柱与抛物面相交后所截取的部分。通过圆柱面与旋转抛物面之间的坐标系位置关系,可以获得所需的反射面。由图 2 所示,天线结构采用常规方式截取的反射板,在焦平面的投影为圆形。

由于圆柱轴线与 z 轴平行,则在抛物面上截取的反射面为椭圆。假设圆柱轴线与 z 轴间距为 x_0 ,圆柱面直径为 D ,则圆柱在 xoy 平面的投影为圆,其圆方程为:

$$(x - x_0)^2 + y^2 = \frac{D^2}{4} \quad (2-2)$$

圆柱与旋转抛物面的交线为椭圆,假设其所在的坐标系平面为 $x'y'z'$ 。设 a 为椭圆的短半轴, b 为椭圆的长半轴,则[1]

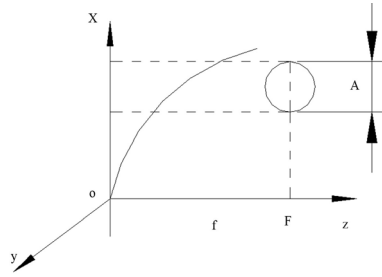


Figure 1. Design of conventional offset parabolic antenna
图 1. 常规偏置抛物面天线设计

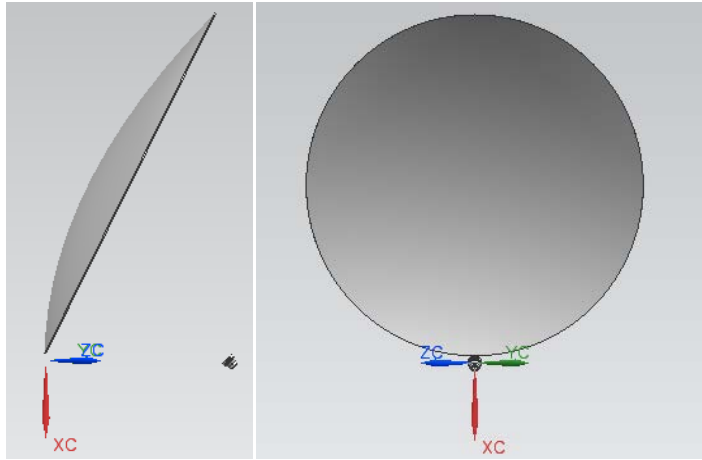


Figure 2. Conventional interception paraboloid three-dimensional map
图 2. 常规方式截取抛物面三维图

$$a = \frac{D}{2} \tag{2-3}$$

$$b = \frac{D}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{x_0}{2f}\right)^2} \tag{2-4}$$

2.2. 最大有效面积切割抛物面

如图 3 根据常规的抛物面设计方法，用直径为 D 的圆柱切割抛物面，圆柱在 xoy 平面的投影为圆，其面积为

$$S_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \tag{2-5}$$

此时，所截得的抛物面物理尺寸为 $D/\sin\beta > D$ 。根据工程设计要求，所设计的天线物理尺寸小于等于 D 。如果按照上述公式(2-5)常规方式截取反射面，则需要用 $D' = D \cdot \sin\beta$ 的圆柱截取抛物面从而获得反射面，圆柱在 xoy 平面的投影得到的圆面积为

$$S_2 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \sin^2 \beta \tag{2-6}$$

这时，截取抛物面获得的反射面口面为椭圆，其短轴为 $a = \frac{D'}{2}$ ，长轴为 $b < \frac{D'}{2}$ ，与工程设计要求相比，物理尺寸满足要求。但是，未达到最大有效面积。按照工程设计要求， $a = b$ 时，其投影面积最大，

即截取的椭圆短轴取长轴的尺寸时，在满足工程设计要求的同时，投影面积最大。

为获得最大投影面积，使 $a = b$ ，则

- 1) 用垂直于反射面口面的圆柱截取抛物面。
 - 2) 在常规方法中，用底面为椭圆的椭圆柱代替圆柱截取抛物面。
- 如图 4 所示，改进的截取抛物面的方式，在焦平面的投影为椭圆。
天线的有效面积与天线增益及工作波长的关系如下[4] [5]:

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \tag{2-7}$$

则截取抛物面有效面积为圆面时，天线的增益:

$$G_1 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_{e1} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{\lambda^2} \tag{2-8}$$

截取抛物面有效面积为椭圆面时，天线的增益:

$$G_2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_{e2} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \pi \cdot a \cdot b = \frac{4\pi^2 ab}{\lambda^2} \tag{2-9}$$

那么，改进设计方法提高天线增益:

$$\Delta = G_2 - G_1 = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \cdot (ab - r^2) \tag{2-10}$$

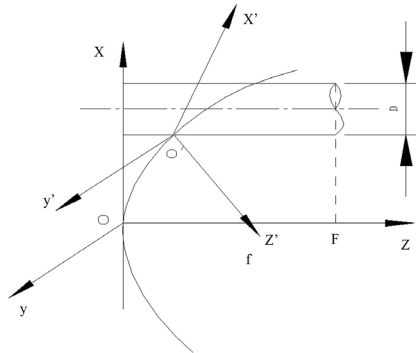


Figure 3. The maximum effective area of cutting parabola
图 3. 最大有效面积切割抛物面

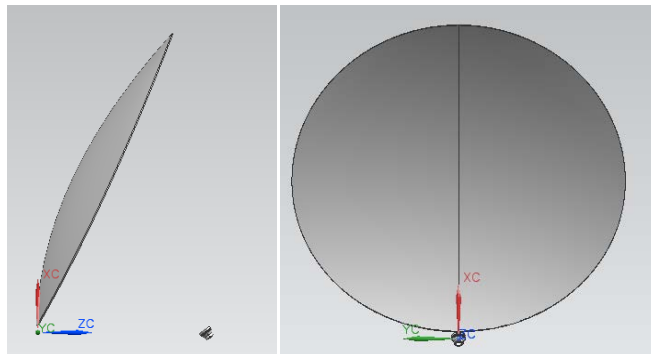


Figure 4. Using the maximum effective area of the interception of parabolic three-dimensional map
图 4. 采用最大有效面积截取抛物面三维图

2.3. 仿真分析

为验证本文的理论分析的正确性，对常规天线设计方法和改进后的方法进行了仿真结果对比，如图 5~图 7 所示。

在确定了物理口径的前提下，分别用两种方法在相同焦距的抛物面上，截取了两个反射面，并用相同的馈源进行照射，在电磁仿真软件 CST 中进行仿真，仿真结果如图所示。从图 7 中可知，改进方法的增益提高了 0.3 dB，进而说明了改进的天线设计方法的正确性。

3. 天线面坐标变换

以垂直于反射面口面的圆柱截取抛物面，求解截取获得的圆心的坐标。假设原始坐标系为 U ，变换后的坐标系为 H ，坐标系的空间运动可以用坐标变换定义。坐标系的空间运动可以用坐标变换定义，坐标系的变换如图 8。

3.1. 天线面坐标纯平移变换

一个坐标系在空间以不变的姿态运动，则说明该变换是纯平移。一个坐标系通过纯平移变换至另一

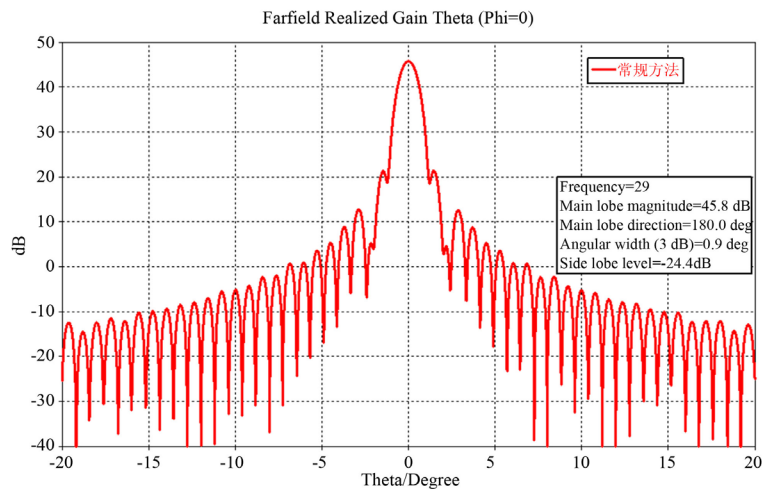


Figure 5. Conventional method simulation pattern

图 5. 常规方法仿真方向图

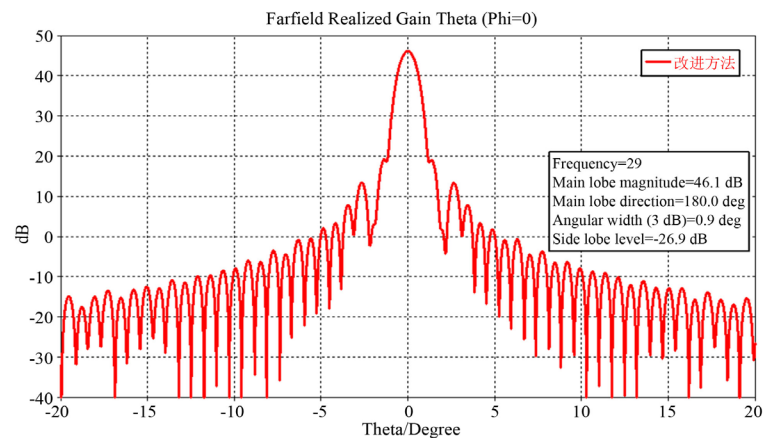


Figure 6. Improved simulation pattern

图 6. 改进后仿真方向图

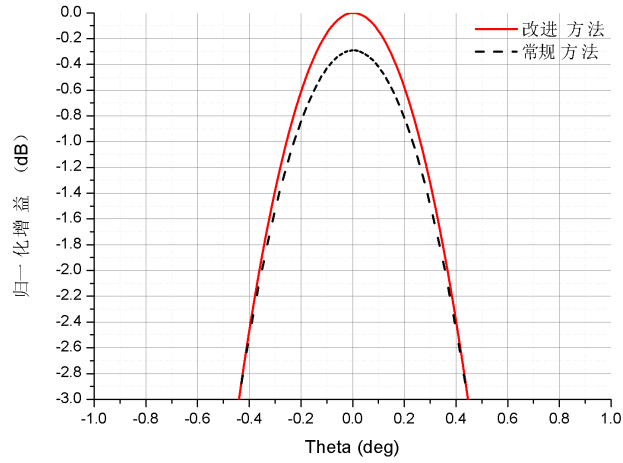


Figure 7. Contrast pattern of the two methods
图 7. 两种方法对比方向图

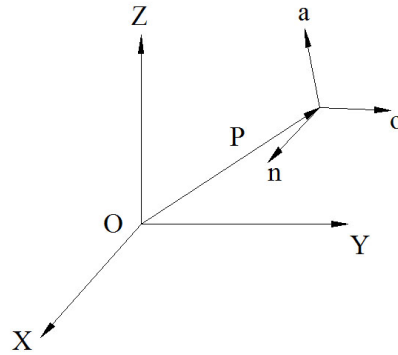


Figure 8. Coordinate transformation
图 8. 坐标系变换

个坐标系，只有坐标系的原点位置发生了变化，而坐标系的姿态不变。因此，新变换的坐标系可以通过原坐标系的位置向量与位移向量相加表示，用矩阵表达式可以是原始坐标系的坐标矩阵左乘变换矩阵。变换矩阵 T 表达式为：

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

其中 d_x ， d_y 和 d_z 是纯平移向量 \bar{d} 相对于参考坐标系各对应坐标轴的分量。纯平移坐标系变换后的矩阵表达式为：

$$F_{new} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x + d_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y + d_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z + d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

3.2. 天线面坐标绕一个轴的纯旋转

绕一个轴的纯旋转变换有两种情况：首先是共原点坐标变换，其次是不共原点的变换。

共原点坐标系变换，如绕参考坐标系 Z 轴的旋转，假设两个共原点坐标系分别为 $OX_iY_iZ_i$ 和 $OX_jY_jZ_j$ ，其中坐标系 $OX_jY_jZ_j$ 是由原始坐标系 $OX_iY_iZ_i$ 绕自身的 Z 轴旋转 θ 变换而来，规定按右手法则确定旋转角的正负。

对于在共原点坐标系中的点 P ，不同坐标系下分别为 $P(X_i, Y_i, Z_i)$ 和 $P(X_j, Y_j, Z_j)$ ，有以下关系：

$$X_i = X_j \cos \theta - Y_j \sin \theta + Z_j \times 0 \quad (3-3)$$

$$Y_i = X_j \sin \theta + Y_j \cos \theta + Z_j \times 0 \quad (3-4)$$

$$Z_i = X_j \times 0 + Y_j \times 0 + Z_j \times 1 \quad (3-5)$$

由以上三式改写成矩阵式为：

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$\text{令 } Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 则有:}$$

$$P(X_i, Y_i, Z_i) = Rot(z, \theta) \times P(X_j, Y_j, Z_j) \quad (3-7)$$

绕 Z 轴的旋转矩阵表示为：

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

同理，绕 X 轴的旋转矩阵表示为：

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

绕 Y 轴的旋转矩阵表示为：

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

对于不同原点的坐标变换，要先将坐标系的纯平移变换，使得两坐标系共原点，然后做旋转变换[6]。

3.3. 天线面坐标系的复合变换

坐标系的复合变换包括平移变换和旋转变换。复合变换可以是先旋转后平移，也可以是先平移后旋转，还可以是多组平移或者旋转的组合变换。因此，可以用复合变换来表达一个坐标系的任意空间变换。

对于坐标系 $oxyz$ 至坐标系 $o'x'y'z'$ 的变换，可以看作沿着 x 轴平移 d_x ，再沿着 z 轴平移 d_z ，最后沿着 y 轴旋转一个角度 θ 。假设 U 为原始坐标系， H 为变换后的坐标系， E 为坐标系 H 中某一点为原点的坐标系，则变换后坐标系 E 相对于 U 的变换方程为 ${}^U T_E = {}^U T_H {}^H T_E$ ，则

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x' \\ 0 & 1 & 0 & y' \\ 0 & 0 & 1 & z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于只关注相对位置，所以求得的 P_x, P_y, P_z 即为坐标系 H 中的某一点变换到原始坐标系 U 中的点坐标。

4. 总结

本文设计了确定了物理口径的前提下，一种新的偏置抛物面天线天线面截取方法，并对与常规的偏置抛物面天线设计进行了对比，通过公式推导得出了增益提高公式。通过电磁仿真软件 CST 的仿真结果，验证了新设计方法能够提高天线的效率和增益。最后，对坐标系的变换过程进行了推导论述，便于天线面在新坐标系内任意点的坐标变换求解。

参考文献 (References)

- [1] 徐曙斌, 陈庚超 (2013) 抛物面天线结构的优化设计. *电子机械工程*, **1**, 23-26.
- [2] 朱本志 (2014) 圆口径正馈抛物面天线的分析与优化. 南京理工大学, 南京.
- [3] 米宏伟, 常立新 (2012) 机载 0.45 m 卫星通信天线结构设计. *电讯技术*, **7**, 1143.
- [4] 汪泉弟, 罗宏伟 (2013) 旋转抛物面天线馈源相位中心的仿真分析. *重庆大学学报*, **4**, 45-50.
- [5] 林昌禄 (2002) 天线工程手册. 电子工业出版社, 北京, 5-24.
- [6] [美] Niku, S.B., 著 (2004) 机器人学导论——分析、系统及应用. 孙福春, 朱纪洪, 刘国栋, 等, 译, 电子工业出版社, 北京, 36-154.