

多波束抛物环面天线的几何关系

金超¹, 李广云², 李宗春²

(1. 中国电子科技集团公司第 54 研究所; 2. 信息工程大学测绘学院)

摘要 多波束抛物环面天线的几何关系复杂, 涉及的坐标系很多, 为了正确施工必须明确定义。本文导出了多波束天线的数学模型, 定义了安装抛物环面天线所需要的设计坐标系、结构坐标系、工作姿态坐标系、施工坐标系以及测量坐标系, 给出了坐标系之间的转换关系公式, 该文中的数学模型和坐标系之间的转换关系公式, 是指导抛物环面天线安装的重要文件, 已成功地实现了某大型多波束抛物环面天线的安装, 实际应用表明该大型多波束天线性能优良。

关键词 抛物环面天线; 工作姿态角; 设计坐标系; 施工坐标系; 测量坐标系

0 引言

通过赋形相位校正副面^[1]等途径有效地解决了 $D/\lambda \geq 200$ 时抛物环面天线严重劣化的固有散焦特性和交叉极化特性, 使具有波束扫描性质的抛物环面天线越来越多的受到人们的重视, 已成为最具有吸引力的多波束卫星通信地球站天线。

由一段抛物线绕与其焦轴成 $\pi/2+\alpha$ 角的一个轴线旋转而成的多波束抛物环面天线, 其安装的一个重要内容是如何实现天馈系统的几何关系, 包括天线主辐射方向的方位角、俯仰角以及姿态倾斜角, 主面、副面以及馈源之间的几何位置关系, 弄清楚这些基本关系才能正确地安装天线。

1 多波束抛物环面天线的数学模型^[2~3]

多波束抛物环面天线的几何结构如图 1 所示, M 为坐标系 xoz 中的标准抛物线, F 为其焦点。抛物环面天线是抛物母线 M 以 R 为旋转半径、并绕与其焦轴成 $\pi/2+\alpha$ 夹角的轴线(即 Z' 轴) 旋转而成的, 同样, 焦点 F 绕 Z' 轴旋转形成焦弧 PW。多波束抛物环面天线的主参数有: 卫星位置配置角 α ^[4]、焦距 f、旋转半径 R、有效口径 D、净空高 d。

抛物母线 M 的方程为:

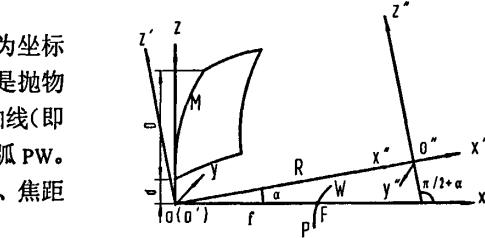


图 1 抛物环面天线的几何结构

$$z^2 = 4fx \quad (1)$$

坐标系 xoz 与 $x'o'z'$ 的关系为:

$$\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ z' \end{pmatrix} \quad (2)$$

坐标系 $x'o'z'$ 与 $x''o''z''$ 的关系为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R-x'' \\ z'' \end{pmatrix} \quad (3)$$

其曲面方程为:

$$\left(\left(R - \sqrt{x'^2 + z'^2} \right) \cdot \sin \alpha + z' \cdot \cos \alpha \right)^2 = 4f \left(\left(R - \sqrt{x'^2 + z'^2} \right) \cdot \cos \alpha - z' \cdot \sin \alpha \right) \quad (4)$$

2 多波束抛物环面天线的工作姿态角

图 2 为抛物环面天线工作姿态示意图, 其工作姿态角的描述为: 大地方位角(焦轴 X 在水平面的投影的大地方位角)、俯仰角(焦轴与水平面的夹角)和姿态倾斜角(Y 轴与水平面的夹角)。

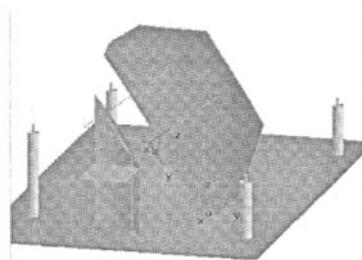


图 2 抛物环面天线的工作姿态

3 定义抛物环面天线所涉及的坐标系及其相互关系

3.1 设计坐标系和结构坐标系

如图 1 所示, 坐标系 $O-XYZ$ 是用以描述母线 M 的坐标系, 定义为设计坐标系。坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 是用以描述抛物环面天线的坐标系, 在该坐标系中其数学模型和几何特征比较简单, 定义为结构坐标系, 设计坐标系与结构坐标系的关系如下:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{设计}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{结构}} \quad (5)$$

3.2 工作姿态坐标系和施工坐标系

如图 2 所示, 在工作姿态下的天线的设计坐标系 $O-XYZ$ 定义为工作姿态坐标系, 其原点为 O , 焦轴 X 的大地方位角 (焦轴 X 在水平面的投影的大地方位角) 为 A , 俯仰角 (焦轴与水平面的夹角) 为 $-\varepsilon_Y$, 姿态倾斜角 (Y 轴与水平面的夹角) 为 θ 。图 3 所示为天线施工坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$, 施工坐标系用于天线的现场施工, 施工坐标系的原点 O_s 为工程制定, $X_sO_sY_s$ 平面为水平面, Z_s 为铅垂线的反方向, X_s 方向为抛物环面天线焦轴在水平面的投影方向, Y_s 与 X_s 垂直并按右手坐标系定义定出。

工作姿态坐标系与施工坐标系的关系如图 4 所示, 在工作姿态下, 天线原点 O 在施工坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 下的坐标为 (X_O, Y_O, Z_O) , 将施工坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 平移到 O 点后, 按下述坐标转换方法可以将施工坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 转换到天线的工作姿态坐标系下:

(1) 绕 Y_s 轴旋转 ε_Y 使 X_s 轴与 X 轴重合; 绕 X 轴旋转 ε_X 使 Y_s 轴与 Y 轴重合。

从天线工作姿态定义可见, 所给出的姿态倾斜角并不是需要的转动角 ε_X , 而是姿态倾斜角 θ , 它们之间的关系为:

$$\sin \theta = \cos \varepsilon_Y \sin \varepsilon_X \quad (6)$$

由此可以求出转动角 ε_X 。按照 Kardan 坐标转换公式可以得到施工坐标系与天线工作姿态坐标系的关系:

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{施工}} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_Y & \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y & \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \\ 0 & \cos \varepsilon_X & -\sin \varepsilon_X \\ -\sin \varepsilon_Y & \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y & \cos \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{设计}} + \begin{pmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.3 测量坐标系

测量坐标系 $O_C-X_CY_CZ_C$ 的原点 O_C 由测量坐标系本身定义, $X_CO_CY_C$ 平面为水平面, Z_C 为铅垂线的反方向, X_C 方向为真北方向, Y_C 轴与 X_C 垂直并按左手坐标系定义定出, 如图 5 所示。

测量坐标系 $O_C-X_CY_CZ_C$ 与施工坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 的关系为:

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix}_{\text{测量}} = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ \sin A & -\cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{施工}} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

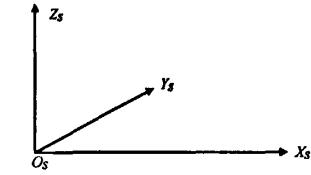


图 3 施工坐标系

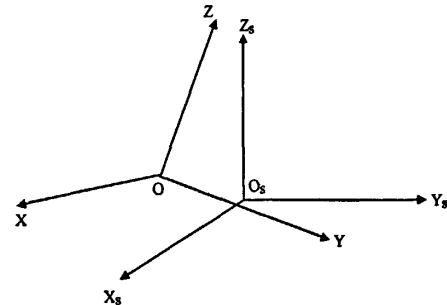


图 4 工作姿态坐标系和施工坐标系的关系

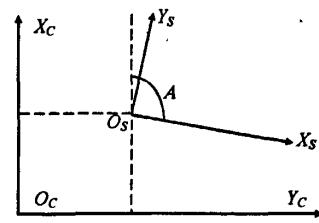


图 5 施工坐标系与测量坐标系

(下转第 325 页)

投影宽零陷约束的 MVDR 算法相比较，宽波束形成宽零陷约束的 MVDR 算法虽然旁瓣稍高一些，但是仍低于 DOA 准确的 MVDR 算法，而且主瓣宽度明显窄于子空间投影宽零陷约束的 MVDR 算法，在 3dB 时的主瓣宽度比子空间投影宽零陷约束的 MVDR 算法窄 2.25° 左右，这意味着对期望信号方向的估计更加准确，分辨率更高，即使在期望信号和干扰信号离得很近时也能很容易的分辨出期望信号，使算法的抗干扰能力增强。

5 结束语

MVDR 算法虽然具有高分辨率，但是受预估方向矢量误差影响较大，本文通过引入宽零陷约束，宽波束形成等算法，提出了一种新的适用于分布式信号源的稳健的波束形成算法，不仅改善了 MVDR 算法得稳定性，还对干扰信号进行较大限度的抑制，而且主瓣宽度更窄。

参考文献

- [1] Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proc. IEEE 57, 1989: 1408-1418.
- [2] Godara L G. Error analysis of the optimal antenna array processors. IEEE Trans. On AES, 1986, 22(3): 395-409.
- [3] 杨莘元, 陈四根, 崔金辉, 一种稳健的自适应波束形成方法, 系统工程与电子技术, 2005, 27(2):244-246.
- [4] Griffiths L J, Jim C W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. IEEE Trans. On AP, 1982, 30(1): 27-34.
- [5] Jabolton N K. Adaptive beamforming with the generalized sidelobe canceller in the presence of array imperfections. IEEE Trans. On AP, 1986, 34(8):996-1012.
- [6] 李高鹏, 许容庆, 马子龙. 天线单元存在幅相不一致时的波束零点合成技术, 电子学报, 2005, 33(6): 113-117.

作者简介

陈昕昕 (1981-), 女, 重庆人, 电子科技大学电子工程学院在读硕士研究生。研究方向为分布式信号源的 DOA 估计。
万群 电子科技大学教授, 博导, 中国电子学会 (CIE) 高级会员、IEEE 会员, 主要从事信号处理、移动台定位、雷达系统等方面的教学和科研工作。
黄安民 (1976-) 江西吉安人, 电子科技大学在读博士研究生, 研究方向: 空间谱估计。

(上接第 295 页)

式中, X_0 、 Y_0 为 O_s 在测量坐标系中的平面坐标, Z_0 为设计施工零点的高程值, A 为天线的天文方位角。

4 结束语

抛物环面天线是具有吸引力的卫星通信地球站天线, 由于其几何关系复杂, 涉及的坐标系很多, 因此本文导出了多波束天线的数学模型, 定义了安装抛物环面天线所需要的设计坐标系、结构坐标系、工作姿态坐标系、施工坐标系以及测量坐标系, 给出了坐标系之间的转换关系公式, 为某大型多波束抛物环面天线的安装奠定了基础。

参考文献

- [1] 杨可忠. 附加相位校正副面的抛物环面天线 [J]. 无线电通信技术, 1997(5).
- [2] 金超, 李广云. 多波束抛物环面天线的最小二乘拟合测量 [J]. 电波科学学报, 1999(1).
- [3] 金超, 张万才. 多波束天线指向的校准 [J]. 无线电通信技术, 2003(6).
- [4] 杨可忠. 关于多波束抛物环面天线 α 角的确定 [J]. 无线电通信技术, 1994(4).

作者简介

金超 男, (1964-), 中国电子科技集团公司第 54 研究所研究员, 现主要从事大型天线安装测量工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>