

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0063-04

# 毫米波多波束抛物面天线分析和设计\*

尹家贤, 刘克成, 刘培国, 毛钧杰

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 首先应用FDTD对毫米波多波束波导裂缝馈源进行分析计算, 讨论了馈电波导及辐射缝结构对馈源方向图的影响, 然后用物理光学法由抛物面上电流计算抛物面天线方向图, 方向图的计算结果和测试结果相当吻合, 这证明方法的有效性。

**关键词:** FDTD; 抛物面天线; 多波束天线

**中图分类号:** TN82 **文献标识码:** A

## Analysis and Design of mm-wave Multibeam Paraboloidal Reflector Antenna

YIN Jia-xian, LIU Ke-cheng, LIU pei-guo, MAO jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The finite-difference time-domain method (FDTD) is used to analyze the slots feed of paraboloidal reflector antenna. The effects of feed waveguide and shape of radiation slots on feed patterns are also discussed. The paraboloidal reflector antenna patterns are presented by using physical optics, and the numerical results are compared with experimental results, and the comparison shows excellent agreement over a wide angle.

**Key words:** FDTD; paraboloidal reflector antenna; multibeam antenna

多波束抛物面天线在雷达、微波通讯系统、无线电天文学等领域有广泛的应用, 其分析设计方法以几何光学和物理光学为主<sup>[1]</sup>。由于抛物面是电大尺寸, 用这种方法计算是合理的。但是对于馈源和馈电结构来说, 其尺寸往往是波长的量级, 并且馈电和支撑结构往往成为二次辐射源, 用物理光学法很难计算。矩量法虽可得到较为精确的结果, 但由于结构的复杂性, 计算也相当困难, 还未见到公开发表的文献。本文应用目前在电磁计算领域最流行的、也是功能比较强大的电磁场数值计算方法——时域有限差分法 (FDTD)<sup>[2]</sup>分析计算馈源及馈电结构, 然后用物理光学法计算多波束抛物面天线各波束的方向图。我们发现这种混合方法能明显改进精度, 为抛物面天线设计的优化提供了新的途径。

## 1 天线结构

本文所讨论的算例是一个毫米波多波束抛物面天线, 直径波长比  $D/\lambda \approx 15$ , 采用前馈抛物面的形式, 如图1所示, 这种馈电方式结构较为紧凑, 对称性好, 阻挡小, 作为小口径天线的应用较为合理。受毫米波传输线的限制, 馈线采用波导形式, 馈电波导的尺寸和馈电缝的结构作为优选参量, 研究天线的辐射性能。

## 2 计算方法

### 2.1 馈源方向图计算

#### 2.1.1 馈源 FDTD 模型

如图2所示, 馈源完全被计算的网格空间所包围, 网格的四周为完全匹配吸收层 (PML)<sup>[3]</sup>, 计

\* 收稿日期: 2001-08-30  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59972042)  
作者简介: 尹家贤 (1964—), 男, 副教授, 在职博士生。

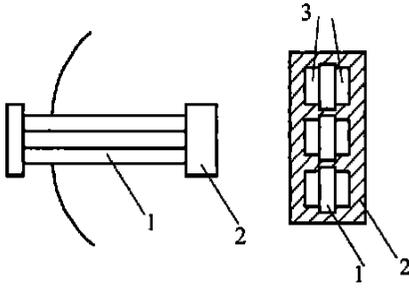


图1 波导缝隙馈电多波束抛物面天线

1) 馈电波导 2) 背腔 3) 辐射缝对

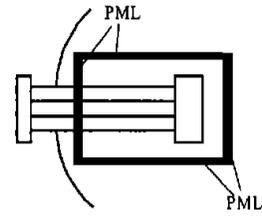


图2 馈源 FDTD 计算模型

Fig. 2 The FDTD computational model of feed

Fig. 1 Multibeam paraboloid antenna with waveguide slot feed

1) waveguide, 2) back cavity, 3) slots

算表明馈电波导表面在靠近辐射缝端有较大的电流,对馈源的方向图有较大影响,而靠近抛物面的波导表面电流相对较小,但为尽可能地减小由于馈电波导截断而引起的方向图计算误差,网格的边界在馈电波导方向尽量靠近抛物面,以便把尽可能长的馈电波导包围在网格空间中。馈电波导深入到 PML 中。

### 2.1.2 馈源等效面选取

等效面的选取有两条原则:一是等效面要完全包围馈源的辐射头及馈电波导;二是等效面不能在 PML 中。

### 2.1.3 计算空间减小

中间波导馈电时,馈源在 E 面(波导窄壁方向)和 H 面(波导宽壁方向)是对称结构,因此可以只计算网格空间的四分之一,在波导的宽壁方向采用电壁分隔,波导的窄壁方向采用磁壁分隔。边上波导馈电时,馈源只在 E 面是对称结构,因此可以计算网格空间的二分之一,在波导的宽壁方向采用电壁分隔。

### 2.1.4 馈源远场方向图计算

在 FDTD 迭代网格中,每一处的电场和磁场都是已知的,由此可以得到等效面上的电流和磁流,由等效面上的电流和磁流按自由空间矢量位公式就可得到馈源的远场方向图。

## 2.2 抛物面远场方向图计算

抛物面远场方向图用物理光学方法计算,图 3 表示计算原理。等效面上电流和磁流都将在抛物面上产生场,由此,它将在抛物面上激励电流:

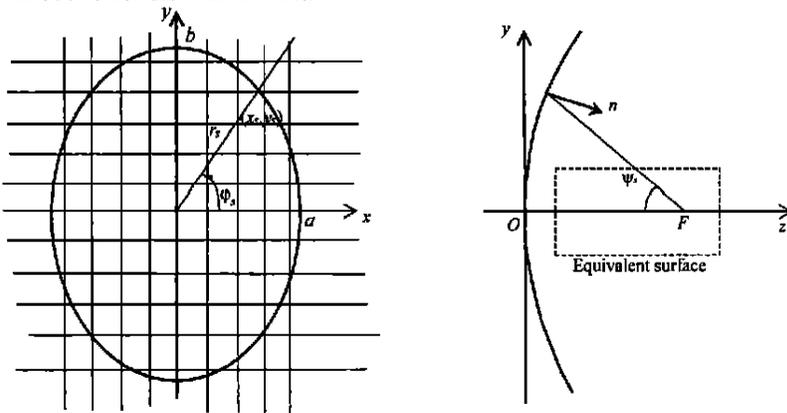


图3 抛物面上电流计算坐标

Fig 3 Calculating coordinate of paraboloid's surface currents

$$\mathbf{J}(x_s, y_s) = 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_i(x_s, y_s) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{H}_i$  为等效面在抛物面上点  $(x_s, y_s)$  处产生的磁场,  $\hat{\mathbf{n}}$  为该处抛物面法线单位矢量。由抛物面上各点的  $\mathbf{J}$  得到的方向图就是抛物面的远场方向图。由于我们只计算抛物面主极化方向图, 因此只需要计算抛物面上  $y$  方向电流  $J_y$ , 根据自由空间矢量位计算公式, 得到抛物面远场方向图计算公式如下:

$$E_\theta = -\frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \sin\varphi \iint_s J_y e^{jkr' \cos\psi} ds' \quad (2)$$

$$E_\varphi = -\frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\varphi \iint_s J_y e^{jkr' \cos\psi} ds' \quad (3)$$

式中  $r, \theta, \varphi$  为场点的坐标,  $r', \theta', \varphi'$  为源点的坐标,  $\psi$  为源点射线和场点射线之间的夹角。

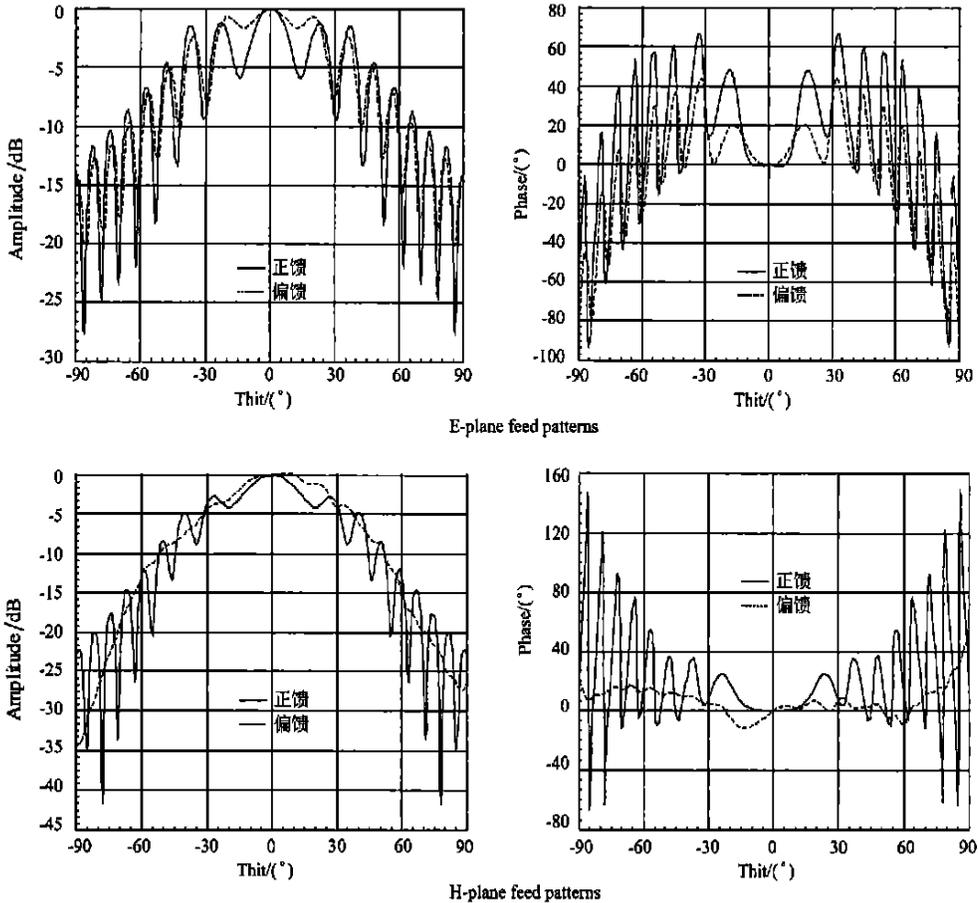


图 4 馈源幅相方向图

Fig. 4 The feed patterns

### 3 计算结果

首先计算的是馈源的幅度和相位方向图, 从计算的结果发现辐射缝的形状和馈电波导尺寸对馈源方向图有较大的影响。馈电波导外壁上的电流主要是在宽壁上, 而宽壁上的电流在上下两壁是反方向的, 此电流的辐射叠加到缝的辐射上使馈源 E 面方向图形成较大波纹起伏, 馈电波导越薄, 宽壁上上下两壁上的电流之间的距离越小, 馈源 E 面方向图的起伏越小。辐射缝的形状主要影响馈源的相位方向图, 改变辐射缝的形状使馈源的 E 面、H 面相位方向图变化趋势一致, 这样改变馈源在抛物面轴线上的位置就可以进行相位修正。图 4 的馈源方向图所对应的馈源尺寸如下: 馈电波导为  $(7.1 \times 1.5) \text{ mm}^2$ , 缝口径为  $(8 \times 2) \text{ mm}^2$ , 缝形状为弧形, E 面间距为  $7.5 \text{ mm}$ , H 面间距为  $8.5 \text{ mm}$ 。图中正馈表示馈源在抛物面轴线上, 偏馈表示馈源在 H 面偏离抛物面轴线  $8.5 \text{ mm}$ , 从图中不难看出偏馈的

馈源方向图幅度和相位起伏都小于正馈馈源, 这表明波导对正馈馈源的影响较大, 而对偏馈馈源的影响较小, 从抛物面的口面场来说, 偏馈时优于正馈, 实际测量结果: 偏馈时抛物面增益比正馈大 1.2dB, 与数值分析结论一致。

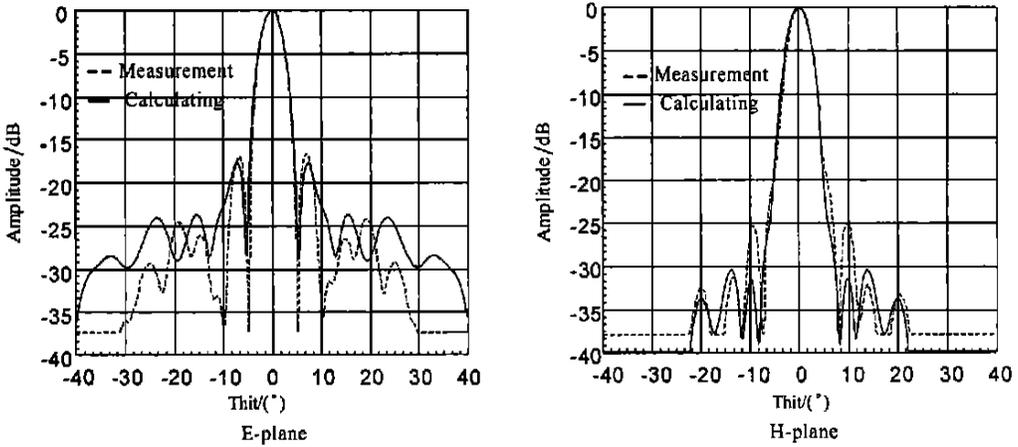


图 5 正馈抛物面天线方向图

Fig. 5 Radiation patterns of paraboloidal reflector antenna with focused feed

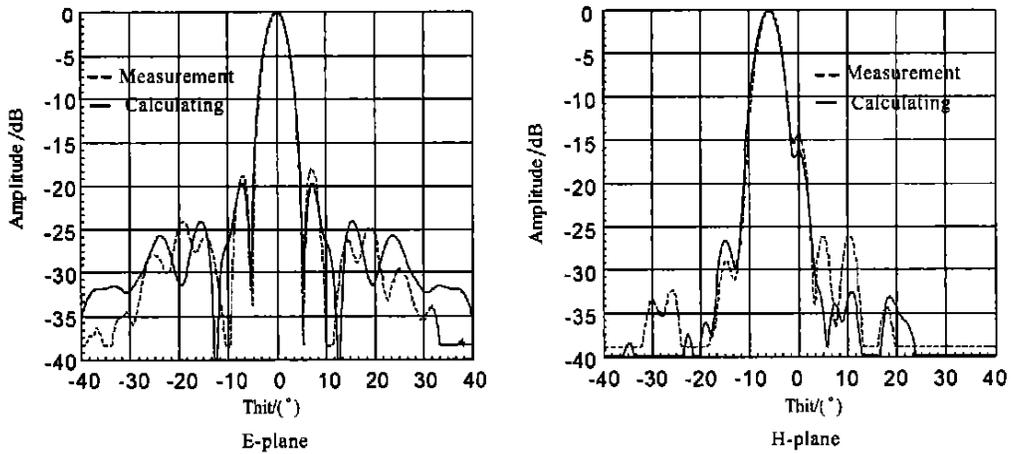


图 6 偏馈抛物面天线方向图

Fig. 6 Radiation patterns of a paraboloidal reflector antenna with defocused feed

图 5、图 6 为抛物面天线正馈和偏馈时 E 面和 H 面的计算和测量方向图, 在主瓣和第一副瓣范围内方向图的计算值与测量值相当吻合, 在远副瓣位置方向图的计算值和测量值误差稍大, 如果再结合 GTD 或物理绕射理论, 可能得到更好的结果。

## 4 结论

用 FDTD 方法直接计算馈源的辐射场, 提高了抛物面天线的口径场计算精度, 使调整馈电结构参量有正确的依据, 根据馈源场分布, 用物理光学法可分析计算整个抛物面天线的方向图, 从而能优化天线设计, 由计算结果与测量结果的比较表明, 这种混合计算方法是可靠的。

## 参考文献:

- [1] 杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代天线新技术 [M]. 北京人民邮电出版社, 1993.
- [2] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法 [M]. 北京大学出版社, 1994.
- [3] Jean-Pierre Berenger. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Journal of computational physics, 1996, (127): 363-379.