

# 用 FDTD 和物理光学混合法分析毫米波抛物面天线

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:** 抛物面天线通常的分析方法是几何光学法和物理光学法,对于电大尺寸的抛物面天线这两种方法都可以得到较好的结果,对于电小尺寸馈源的抛物面天线,馈源方向图不仅取决于辐射器本身的辐射特性,其馈电结构对馈源方向图也有较大的影响,在此情况下,用上述方法得到的结果与实验结果之间有较大的误差。利用 FDTD 可以把整个馈电结构纳入计算域中,得到辐射器完整的近区场,由等效原理可求出抛物面上电流分布,从而用物理光学方法计算抛物面天线远区场。本文用这种混合方法分析计算了毫米波波导裂缝作为辐射器的抛物面天线,计算结果和测试结果相当吻合,证明了方法的有效性。

**关键词:** FDTD; 抛物面天线; 毫米波天线

**中图分类号:** TN82

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0791-03

## Analysis of Paraboloidal Reflector Antenna Using FDTD Method and Physical Optics

YIN Jia-xian, LIU Ke-cheng, LIU Pei-guo, MAO Jun-jie

(Institute of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** In general, the analysis methods of paraboloidal reflector antenna use geometrical-optics and physical-optics. The preferable numerical results will be obtained by using these two methods for electrically large paraboloidal reflector antenna. For electrically small radiator, the numerical results are not in agreement with experimental results, because the feed pattern are not only determined by feed radiator but also feed structures. In this paper, the finite-difference time-domain method (FDTD) is used to analyze the feed of paraboloidal reflector antenna, and because the computing areas include all the feed structure, we can obtain the precise near fields of the feed. The currents on the paraboloidal reflector can be calculated by using equivalence principle, and then we can calculate far fields of paraboloidal reflector antenna using physical optics. Using this hybrid method, the millimeter wave paraboloidal reflector antenna with waveguide slot feed is analyzed in this paper. Numerical results are compared with the experimental results, and the comparison shows excellent agreement over a wide angle.

**Key words:** FDTD; paraboloidal reflector antenna; millimeter wave antenna

## 1 引言

抛物面天线是应用最广泛的天线之一,其分析设计有一套成熟的方法,基本上是几何光学和物理光学<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,计算精度不高。矩量法虽可得到较为精确的结果,但由于馈电结构的复杂性,使其计算相当困难,目前尚无人尝试。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,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。我们发现这种混合方法能明显改进精度,对抛物面天线设计的优化提供了新的途径。

## 2 天线结构

本文所讨论的算例是一个毫米波抛物面天线,直径波长比  $D/\lambda = 15$ ,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

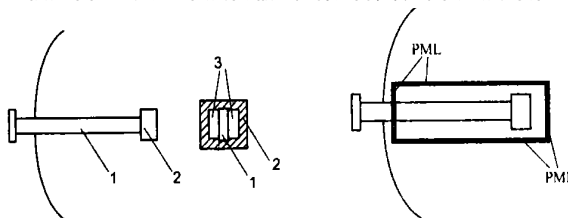


图1 波导缝隙馈电抛物面天线(1)馈电波导(2)背腔(3)辐射缝对

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。

### 3 计算方法

#### 3.1 馈源方向图计算

##### 3.1.1 馈源 FDID 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,但为尽可能的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。

##### 3.1.2 激励源设置

用 FDID 计算波导馈电的问题时,激励源设置要考虑两个问题:(1)时域波形选择;(2)入射场的连接。频域计算时主要考虑的是入射场连接问题。关于波导中的时域波形选择文献[4]中有详细论述,入射场的连接方式读者可参考文献[5]。

##### 3.1.3 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。

##### 3.1.4 计算空间减小

由于馈源是 E 面(波导窄壁方向)和 H 面(波导宽壁方向)的对称结构,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。

##### 3.1.5 馈源远场方向图计算

在 FDID 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。

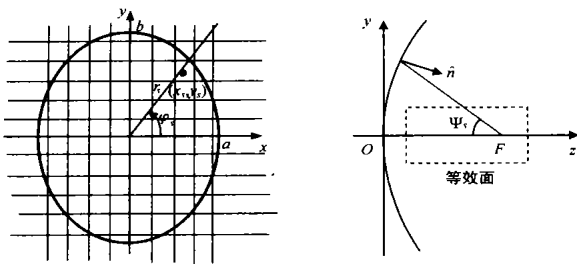


图 3 抛物面上电流计算坐标

#### 3.2 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:

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

式中  $H_i$  为等效面在抛物面上点  $(x_s, y_s)$  处产生的磁场,  $\hat{n}$  为该处抛物面法线单位矢量。由抛物面上各点的  $J$  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:

$$E = -\frac{j\mu e^{-jkr}}{4r} \cos \sin \iint_S e^{jkr \cos \theta} ds \quad (2)$$

$$E = \frac{j\mu e^{-jkr}}{4r} \cos \iint_S e^{jkr \cos \theta} ds \quad (3)$$

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

### 4 计算结果

首先计算馈源的幅度和相位方向图,我们计算了两种形状的辐射缝,一种是直缝;另一种为圆弧缝,对应的直缝口径为  $8.4 \times 2\text{mm}^2$ ,辐射缝的 E 面间距为  $5.5\text{mm}$ ,每一种辐射缝我们计算了两种馈电波导尺寸的馈源方向图,一种为  $7.1 \times 2.5\text{mm}^2$ ,另一种为  $7.1 \times 2.0\text{mm}^2$ ,图 4、图 5 分别是对应的直缝和圆弧缝馈源方向图。从图中可以看出,当辐射缝得形状改变时,馈源的幅度方向图没有很大变化,而馈源相位方向图则有较大变化,直缝馈源的 E 面相位方向图随着角度的增加是单调上升的,圆弧缝馈源的 E 面相位方向图在  $\pm 30^\circ$  的范围内与直缝馈源基本一致,而在  $\pm 30^\circ$  以外相位随着角度的增加减小,因此,从 E 面相位的角度说,圆弧缝馈源优于直缝馈源;对于 H 面的相位方向图来说,直缝馈源和圆弧缝馈源在抛物面的照射角 ( $\pm 50^\circ$ ) 范围内两者的差别不大,辐射缝形状的改变主要影响 E 面的相位方向图。总体上看,圆弧缝馈源的 E 面、H 面相位方向图的变化规律比较一致,改变馈源的位置可进行相位修正,使抛物面口面上 E 面、H 面平均相位差减小;直缝馈源的 E 面、H 面相位方向图的变化规律一致性不好,改变馈源的位置只能使抛物面口面上某一个面的平均相位差减小,不能做到 E 面、H 面兼顾。对馈电波导来说,馈电波导越薄,馈源 E 面方向图的起伏越小,这是因为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,波导越薄,宽壁上下两壁上的电流之间的距离也越小,对馈源 E 面方向图的影响就越小。如果波导厚度趋于零,

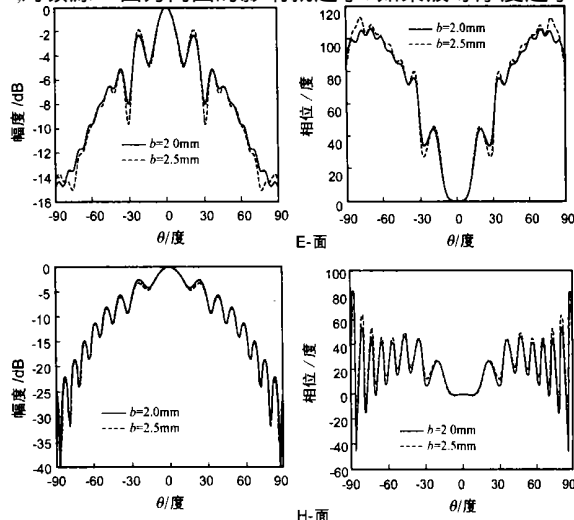


图 4 馈源辐射缝为直缝时的馈源幅相方向图

图中  $b$  为馈电波导窄边尺寸

则波导壁上的电流对馈源 E 面方向图就没有影响,考虑到天线的阻抗匹配问题,馈电波导需要有一定的厚度.宽壁上下两壁的电流在 H 面方向的辐射是互相抵消的,因此,馈电波导厚度的变化对 H 面方向图的影响较小.

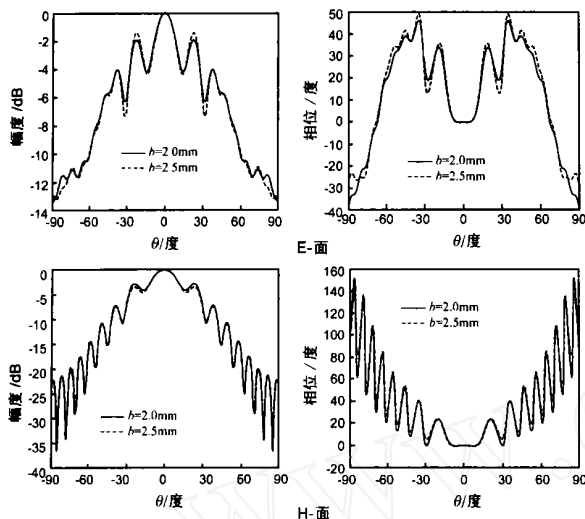


图 5 馈源辐射缝为圆弧缝时的馈源幅相方向图.

图中 b 为馈电波导窄边尺寸

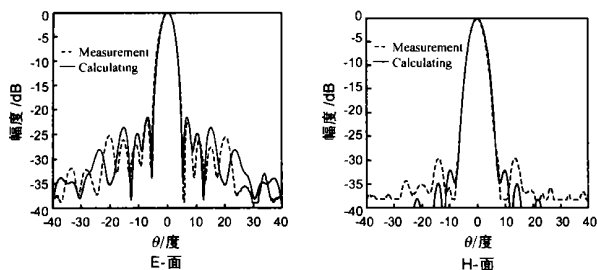


图 6 抛物面天线方向图

图 6 为圆弧缝馈源抛物面天线的 E 面和 H 面的计算和测量方向图,在小角度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,这主要有两个原因:一是抛物面方向图的计算中只考虑了馈源遮挡的影响,事实上馈源对抛物面的口径辐射除了遮挡以外,还有绕射作用;二是抛物面边缘也有一定的绕射作用,这两种因素对抛物面方向图主瓣影响甚微,但对抛物面方向图副瓣有影响,特别是副瓣较小时影响较大.如果再结合 GID 或物理绕射理论,可能得到更好的结果,但对工程应用来说,上述结果已经可以接受.

## 5 结论

用 FDTD 方法直接计算馈源的辐射场,把馈电结构和辐射缝作为一体来考虑,因此可保证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,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.现代面天线新技术[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:北京大学出版社,1994.
- [3] Jear-Pierre Berenger. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J].Journal of Computational Physics,1996,(127):363-379.
- [4] 尹家贤,刘克成,等.FDTD 中波导激励源研究[J].国防科技大学学报,2001,23(2):99-102.
- [5] 尹家贤,谭怀英,刘克成.FDTD 中微带线激励源设置的新方法[J].电波科学学报,2000,15(2):204-207.

## 作者简介:



尹家贤 男,1964 年生于浙江桐庐.1984 年和 1994 年在国防科技大学电子技术系获学士、硕士学位,1998 年起在国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位.现任国防科技大学电子科学与工程学院副教授.研究方向:电磁场数值计算、微带天线的数值计算及工程应用.

刘克成 男,1937 年生于江苏扬州.国防科技大学电子科学与工程学院教授,中国电子学会高级会员.研究方向:电磁场数值计算、超宽带馈电系统以及目标特性测量等.

刘培国 男,1969 年生于山东章丘.1990 年和 1994 年在国防科技大学电子技术系获学士、硕士学位,1998 年起在国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位.研究方向:电磁场数值计算、超宽带天线的数值计算及工程应用.