

文章编号 1005-0388(2009)03-0467-04

## 圆口径正馈抛物面天线的近场分析

高 初 李 刚

(中国电子科技集团公司第38研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要** 分析了圆口径正馈抛物面天线的近场。采用口径场绕射积分求取了天线的近场及远场方向图, 绘制了波束宽度、方向性和最大副瓣电平三个关键参数随场点距离的关系曲线。通过与物理光学法的计算结果对比, 验证了该方法的正确性。仿真结果是: 随场点距离的减小, 波束宽度展宽, 方向性减小, 最大副瓣电平在一定范围内波动。场点在  $D^2/\lambda$  外, 远场近似的波束宽度误差小于1%; 在  $0.5D^2/\lambda$  外, 远场近似的波束宽度误差小于10%; 在  $0.5D^2/\lambda$  内, 不能采用远场近似。

**关键词** 抛物面天线; 近场; 波束宽度; 方向性; 最大副瓣电平

**中图分类号** TN011

**文献标志码** A

### On near field of circular aperture normal feed paraboloidal antenna

GAO Chu LI Gang

(38th Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Hefei Anhui 230031, China)

**Abstract** Near field of a circular aperture normal feed paraboloidal antenna is analyzed. Radiation patterns of both near field and far field are calculated by aperture field diffraction integral method. Three key parameters, namely beamwidth, directivity and maximum sidelobe level, are drawn versus the distance between field points and the center of aperture. The correctness of the results is validated by the comparison with the results obtained by physical optics. The simulation results show beamwidth broadening, directivity decreasing and maximum sidelobe level fluctuating within a typical range with the decreasing distance. In conclusion, the far field approach has a beamwidth error less than 1% beyond a distance of  $D^2/\lambda$  and a beamwidth error less than 10% beyond a distance of  $0.5 D^2/\lambda$ . And the far field approach is not applicable when the distance is less than  $0.5 D^2/\lambda$ .

**Key words** paraboloidal antenna; near field; beamwidth; directivity; maximum sidelobe level

### 引 言

单个飞行器和舰船等往往要完成多种不同的使命, 如制导、导航、通信及探测等。一方面, 不同的使命对天线有不同的要求, 如工作频率、波束宽度等, 这是一个天线很难同时满足的。因此有必要根据不

同的需求设计多个不同功能的天线。另一方面, 载体上的空间相对于天线的工作波长来说十分狭小, 这就导致了部分甚至全部天线都工作在其他天线的近场区。天线间、天线与箱体间、天线与馈线间可能存在强烈的互耦。这些近场干扰的常见影响是方向图变形、增益损失、副瓣抬高及多径干扰。为了解决

天线间的电磁兼容问题就必须研究天线的近场方向图<sup>[1,2]</sup>。

反射面天线的近场分析具有广泛的应用,如多反射面天线的设计、方向图测试和有近场条件限制的反射面的设计<sup>[3~5]</sup>。相应的近场分析也得到了学者的广泛关注。NAEASIMHAN M S等应用均匀几何绕射理论分析了抛物反射面天线的前后比<sup>[6]</sup>。SHAFAI L等研究了反射面近场聚焦的焦点距离及尺寸<sup>[7]</sup>。SINGH K采用球面波展开法和虚拟偶极子阵法分别分析了天线的近场场强<sup>[2]</sup>。INFANTE L等以反射面边缘的线积分代替面积分计算了抛物反射面的近场方向图<sup>[8]</sup>。其他的近场分析方法还包括基于磁流分布或电流分布的远/近场变换法<sup>[9,10]</sup>。这些方法为反射面近场的准确分析提供了工具。

采用一种较为简明的近场计算方法——口径场绕射积分法分析圆口径正馈抛物面天线的近场。在指定场点所在球面到反射面口面中心的距离后,计算了升余弦点馈源照射下的反射面对应球面位置的方向图。通过比较不同距离的波束宽度、方向性和最大副瓣电平,揭示了这三个关键指标从远场到近场的变化规律。方向性和最大副瓣电平的计算结果还得到了物理光学法的验证。

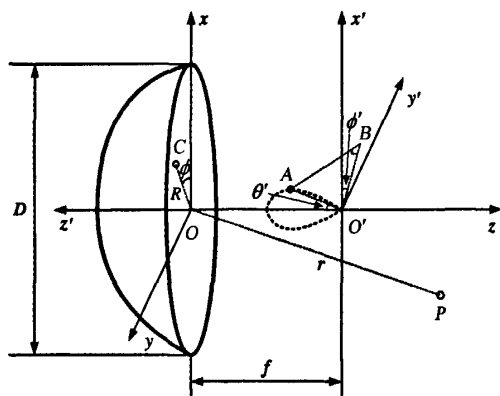


图1 圆口径正馈抛物面天线示意图

## 1 方向图的计算

圆口径正馈抛物面天线如图1所示。抛物面的口径为 $D$ ,焦距为 $f$ 。记抛物面口径中心为 $O$ ,以其为坐标原点建立直角坐标系, $z$ 轴垂直于口径,指向口径外侧, $x$ 、 $y$ 轴在口径所在平面内。 $O'$ 为馈源所在位置,以其为原点也建立一个直角坐标系。该坐标系的 $x'$ 轴与 $x$ 轴方向相同, $y'$ 轴与 $y$ 轴方向相反, $z'$ 轴与 $z$ 轴方向相反。场点 $P$ 距抛物面口径中心的距离为 $r$ 。

计算过程分为两步:一,由馈源的场分布根据几何关系推出口径场分布;二,对口径场做绕射积分求取场点处的场分布。

设馈源与口径间一点的坐标是 $A$ ,其在 $x'O'y'$ 平面内的投影为 $B$ ,在口径面上的投影为 $C$ 。假定馈源和口径面上的场分布分别为 $f_0(\theta',\phi')$ 及 $f_s(R,\phi)$ 。其中 $\theta'$ 为 $O'A$ 与 $z'$ 轴的夹角, $\phi'$ 为 $O'B$ 与 $x'$ 轴的夹角。 $R$ 为 $C$ 与 $O$ 的距离, $\phi$ 为 $OC$ 与 $x$ 轴的夹角。

$$f_0(\theta',\phi') = 0.5(1 + \cos \frac{\theta'}{s}) \quad (1)$$

式中, $s$ 由边缘照射电平决定。

那么根据能量守恒关系

$$f_s^2(R,\phi)RdR = Mf_0^2(\theta',-\phi')\sin\theta'd\theta' \quad (2)$$

其中 $M$ 为常数,以及抛物面的几何关系

$$R = (f - \frac{R^2}{4f})\tan\theta' \quad (3)$$

可得口径场分布为

$$f_s(R,\phi) = \frac{4f}{4f^2 + R^2} f_0(2\arctan \frac{R}{2f}, -\phi') \quad (4)$$

在已知口径场分布后,根据 Huygens 源假定简化口径场绕射积分公式<sup>[11]</sup>,可得空间任一点的电场为

$$E = \frac{jk}{4\pi} \int_S (\mathbf{z} \times \mathbf{E}_{at} - \mathbf{E}_{at} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r} \frac{e^{-jkr}}{r} dS \quad (5)$$

式中, $\mathbf{E}_{at}$ 是第一步求得的口径场分布 $f_s(R,\phi)$ , $\mathbf{r}$ 为场点位置单位矢量。在远场的计算中,由于 $R \ll r$ ,故可以舍去一些含有 $R$ 的高阶小量以简化计算;但在近场分析中, $R$ 与 $r$ 的相对大小是不确定的,必须保留所有项,考察它们对场强的共同影响。

## 2 仿真结果及分析

假设一个圆口径正馈抛物面天线的口径 $D$ 为50个波长,焦距直径比 $f/D = 0.4$ ,则焦点对反射面边缘的半张角约为 $64^\circ$ 。馈源的方向图用升余弦函数模拟,其对口径边缘的照射电平为 $-12.5$  dB,对应式(1)中的参数 $s$ 为0.526。近场的距离以 $D^2/\lambda$ 为单位归一化,取值的区间为 $[0.03, 2]$ 。在 $[0.1, 2]$ 内每隔0.05单位计算一次反射面的方向图;在 $[0.03, 0.1]$ 内则每隔0.01单位计算一次反射面的方向图。其中,2单位是远场区与辐射近场区的分界线,0.09单位是辐射近场区与感应近场区的分界线。图2(a)~(c)分别给出了主瓣波束宽度、最大副瓣电平及方向性随观察点到口径中心距离的变化关系。其中副瓣电平和方向性的计算结果还与物理光学法求解的相应结果进行了比较。表1则列举了

主瓣波束宽度与方向性在几个主要分界点的值。

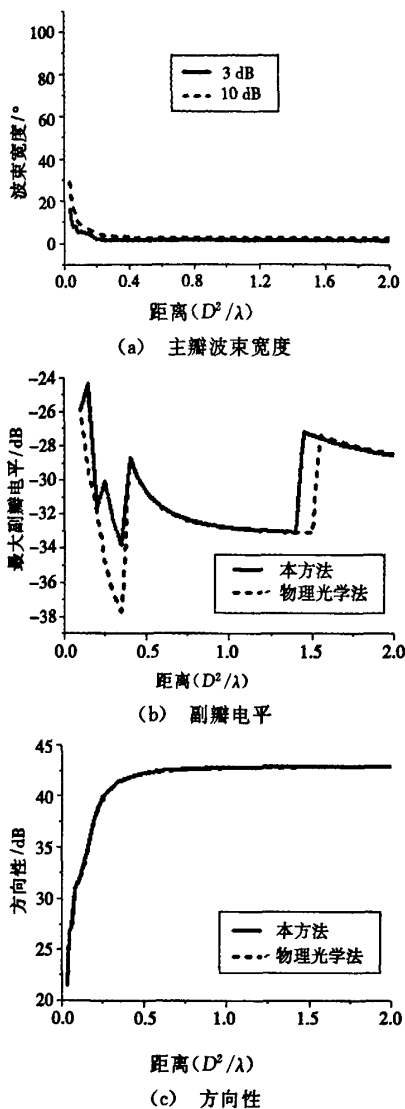


图 2 关键参数随距离的变化关系

表 1 主瓣波束宽度及方向性随距离的变化关系

位置 ( $D^2/\lambda$ )	主瓣 3 dB 波束宽度/ $^\circ$	主瓣 10 dB 波束宽度/ $^\circ$	方向性/dB
$\infty$	1.40	2.43	43.0
2	1.40	2.44	42.9
1	1.41	2.47	42.8
0.5	1.44	2.63	42.2
0.09	5.29	9.39	31.6
0.03	11.4	30.8	21.5

由图 2(a)可见,辐射近场区内 $[0.5, 2]$ 部分的主瓣 3 dB 波束宽度及 10 dB 波束宽度均与远场接近,且随场点位置的变化不明显。当场点与口径中心距离小于 0.5 单位时,主瓣宽度迅速增大。到 0.09 单位时,主瓣 3 dB 波束宽度和 10 dB 波束宽度已展宽到远场情况的 4 倍左右。到 0.03 单位时,这个比例扩大到了 8 倍左右。

由图 2(b)可见,随着场点距离的减小,最大副瓣电平呈上升趋势。值得注意的是在 1.4 单位,0.3 单位等位置处出现了最大副瓣电平变化的大幅跳跃,其原因是零深阻塞后,与主瓣相邻的副瓣融入了主瓣,导致原第二副瓣成为第一副瓣。虽然两种方法在部分频点存在差异,但它们都反应了零深随场点变近而阻塞的物理规律。

由图 2(c)可见,随着场点距离的减小,天线的方向性呈减小的趋势。由于方向性的减小与主瓣波束的展宽存在直接关系。方向性的减小有辐射近场区缓慢,感应近场区迅速的特点。到二者分界面 0.09 单位时,其方向性与远场方向性相比已下降了 11.4 dB。本方法与物理光学方法的仿真结果吻合较好。

图 3 给出了场点位于 $\infty$ 、1、0.5、0.09 及 0.03 单位处的方向图。结合表 1 可知,当距离大于 1 单位时,近场方向图与远场方向图 3 dB 波束宽度和 10 dB 波束宽度展宽小于 1%,方向性下降小于 0.2 dB。在距离为 0.5 单位时,波束宽度展宽不超过 10%,方向性下降小于 0.8 dB。在粗略估算时,距离 0.5 单位以外的方向图可用远场方向图近似。距离为 0.09 单位时波束展宽相当严重。随着距离的进一步减小,除波束展宽和方向性减小外,近场方向图还出现了远场方向图所不具有的主瓣内起伏的特性。此外,在距离减小的过程中,整体副瓣电平不断抬高。

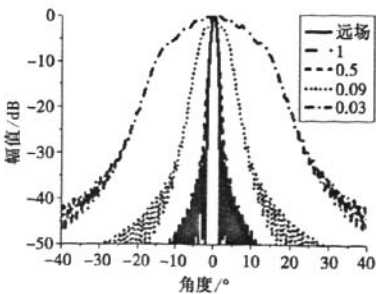


图 3 不同场点距离的方向图

### 3 结 论

本文采用 Huygens 源近似的口径场绕射积分分析了圆口径正馈抛物面天线的近场。通过比较场点与口径面中心不同距离处的方向图发现:随着距离的减小,天线的波束展宽,方向性降低,与主瓣相邻的副瓣不断融入主瓣。在场点距离大于  $D^2/\lambda$  时,远场方向图对近场方向图近似的波束宽度误差在 1% 以内,效果良好。在场点距离大于  $0.5D^2/\lambda$  时,远场方向图对近场方向图近似的波束宽度误差在 10% 以内,效果较好。当场点距离小于  $0.5D^2/\lambda$  时,不能用远场方向图近似近场方向图。

#### 参考文献

- [1] KIM J J and KESLER O B. Performance analysis of radar antenna systems[J]. IEEE AES Systems Magazine, 1999, 14(6): 38-42.
- [2] SINGH K. Antenna near field intensity prediction[C] // Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 1999: 109-114.
- [3] MOUSAVI P, SHAFI L, VEIDT B, and DEWDNEY P. Feed-reflector design for Large Adaptive Reflector Antenna (LAR) [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2001, 49(8): 1142-1154.
- [4] HOQUE M, HAMID M, RAHMAN A, and ELSHERBENI A Z. Radiation pattern of a parabolic reflector antenna from near field measurements of a coupled reflector[J]. Electronic Letters, 1989, 25(7): 484-486.
- [5] BUCCI O M, CAPOZZOLI A, D ELIA G. Synthesis of reflector antennas with near-field constraints[C] // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001, 1: 562-565.
- [6] NARASIMHAN M S and GOVIND K R. Front-to-back ratio of paraboloidal reflectors[J]. IEEE trans. Antennas and Propagation, 1991, 39(7): 877-882.
- [7] SHAFI L, KISHK A A, and SEBAK A. Near field focusing of apertures and reflector antennas[C] // Conference on Communications, Power and Computing Proceedings. Winnipeg, MB, May 22-23, 1997: 246-251.
- [8] INFANTE L and MACI S. Near-field Line-integral representation of the kirchhoff-type aperture radiation for a parabolic reflector [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003, 2: 273-276.
- [9] TAAGHOL A and SARKAR K. Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry, utilizing an equivalent magnetic current[J]. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3): 536-542.
- [10] SARKAR T K and TAAGHOL A. Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1999, 47(3): 566-573.
- [11] 林昌禄, 聂在平. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

高 初 (1978—), 男, 博士, 现为中国电子科技集团公司第 38 研究所工程师, 主要从事稀布阵及反射面天线的设计。



李 刚 (1972—), 男, 本科, 现为中国电子科技集团公司第 38 研究所高级工程师, 主要从事天线设计。



## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、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](http://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>