

毫米波抛物面多波束天线分析与设计

李成国,牟善祥,张忠传

(南京理工大学 电子工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对工程实际应用,本文深入分析了主模圆锥喇叭馈电多波束抛物面天线的辐射特性,通过快速哈特莱变换(FHT)对辐射场积分的处理,利用软件优化仿真得到了抛物面多波束天线设计的关键参数和辐射方向图,大大简化了工程设计中各设计参数的复杂考虑和计算量,最后利用优化结果设计了8波束抛物面天线。该分析对工程设计有着极其重要的参考价值。

关键词: 雷达工程; 多波束; 多馈源; 主模圆锥喇叭; 快速哈特莱变换; 抛物面天线

中图分类号: TN820.1⁺⁵ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2008)03-0305-03

Analysis and Design of Multi-beam Millimeter-wave Parabolic Reflector Antenna

LI Cheng-guo, MU Shan-xiang, ZHANG Zhong-chuan

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at engineering application, we analyzed radiation of multi-beam parabolic reflector antenna with conical horn feed source. On the basis that the radiation integral was evaluated rapidly via the FHT, the key parameter and radiation pattern of parabolic reflector antenna were derived through simulation and optimization, so as to simplify the design and the computation of parameters in engineering. A millimeter-wave parabolic reflector antenna of eight beams was designed by the optimized results. This study is instructive to engineering design of multi-beam parabolic reflector antenna.

Key words: radar engineering; multi-beam; multi-feed; conical horn; FHT; parabolic reflector antenna

自20世纪80年代以来,多波束天线技术受到广泛关注,现在已有不少方法。相控阵系统难以设计高效率的辐射单元、存在较高的馈电损耗、相位控制十分复杂、成本高;龙伯特凸镜虽然扫描特性好,但很难设计出所需要的高增益、窄波束;透镜和馈源组合的多波束天线结构较为复杂、造价高、笨重,一般只在一些特殊情况下才应用;双反射面天线副面的边缘绕射效应较大,容易引起主面口径场振幅起伏与相位畸变,加上副面的遮挡,会使天线增益有所下降,旁瓣电平有所上升;单反射面天线和馈源组合的多波束天线易于设计、结构简单、造价较低、且性能优越,在通信、雷达、射电天文等领域得到广泛应用^[1]。

本文在毫米波频段,选用幅度和相位对称性极

好的主模圆锥喇叭作为旋转抛物面的馈源,得到了抛物面天线的远场表达式。最后采用哈特莱变换仿真优化了天线的远场积分,得出复合天线设计参数,使过去繁杂的多波束天线设计变得简单,并为工程设计提供了参考。

1 基本原理分析

当电磁波与天线轴线以一定的夹角入射时,经抛物面天线反射后可在焦平面轴线另一侧会聚于一点。该点将偏离原焦点并出现散焦,形成彗星斑,偏轴入射角越大时散焦越严重。馈源辐射的电磁波照射到天线反射体上时,在其内表面上将感应出表面电流,这样反射面上的任一小单元就形成一个小辐射元再辐射。将每个面元上的辐射在远场观察点上

所产生的电场进行矢量叠加, 可求得整个反射体在远场区观察点上的辐射场, 把各观察点上的值逐点计算出来并连成曲线, 就可得到远场次级方向图。

为用面电流法计算天线远场辐射特性, 将不计互耦和反射面边缘及背面边缘对远场的影响。设抛物面顶点 $(0, 0, z_0)$, 直径为 D , 焦距为 F , 选取以焦点为原点的球坐标系, 圆锥喇叭馈源相心为 $(\Delta x, 0, 0)$, 如图 1 所示。远场为^[2-4]

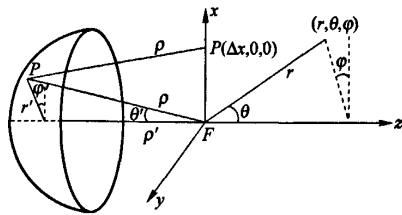


图 1 抛物面天线结构

Fig. 1 Geometry of parabolic reflector antenna

$$E(\theta, \varphi) =$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R f(r', \varphi') e^{-jk[r' \sin \theta \cos(\varphi' - \varphi) - \Delta x \sin \theta' \cos \varphi']} r' dr' d\varphi', \quad (1)$$

式中: $f(r', \varphi')$ 为口径场分布; Δx 为馈源横向偏移量。令 $\varphi = 0^\circ$ 得 E 面方向图表达式

$$E_e(\theta) =$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R f(r', \varphi') e^{-jk[r' \sin \theta \cos(\varphi' - \varphi) - \Delta x \sin \theta' \cos \varphi']} r' dr' d\varphi'. \quad (2)$$

设 $f_0(\theta')$ 为馈源在抛物面口径的照射函数, 与馈源口径尺寸及频率有关

$$f(r', \varphi') = f_0(\theta')/\rho, \quad (3)$$

$$\rho = (2F)/(1 + \cos \theta'), \quad (4)$$

$$\sin \theta' = r'/\rho. \quad (5)$$

设 θ' 取值范围为 $(0, \theta_0)$, 由图 1 得

$$\theta_0 = 2 \arccos(4F/D). \quad (6)$$

将(3)式~(6)式代入(2)式得

$$E_e(\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} \frac{f(\theta'_0) \sin \theta'}{(1 + \cos \theta')^2} \exp \left\{ -jk \left[\frac{2f \sin \theta'}{1 + \cos \theta'} \cdot \right. \right.$$

$$\left. \left. \sin \theta \cos \varphi' - \Delta x \sin \theta' \cos \varphi' \right] \right\} d\theta' d\varphi', \quad (7)$$

抛物面天线馈源采用直径为 d 的主模圆锥喇叭, 主模圆锥喇叭的归一化方向系数为^[5]

$$f(\theta') = \sin \varphi' [1 + \cos \theta' \beta d / (kd)] f_E(u), \quad (8)$$

$$f_E(u) = 2J_1(u)/u, \quad (9)$$

$$u = (kd \sin \theta')/2. \quad (10)$$

$f_E(u)$ 为主模圆锥喇叭 E 面辐射方向图, $J_1(u)$ 为贝塞尔函数, 将(8)式~(10)式代入(7)式得抛物面

的远场辐射特性为

$$E_e(\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} F(\theta', \varphi') \exp \left\{ -jk \left[\frac{2f \sin \theta}{1 + \cos \theta'} \cdot \right. \right.$$

$$\left. \left. \sin \theta \cos \varphi' - \Delta x \sin \theta' \cos \varphi' \right] \right\} d\theta' d\varphi', \quad (11)$$

$$F(\theta', \varphi') = \frac{2 \sin \theta' \sin \varphi' J_1((kd \sin \theta')/2)}{k A_0 \sin \theta' (1 + \cos \theta')^2} \left(1 + \frac{\cos \theta' \beta d}{kd} \right). \quad (12)$$

2 数值计算及仿真

为了能够快速求出抛物面天线远区辐射场, 对抛物面辐射积分运用快速哈特莱变换(FHT)以提高运算速度^[6]。

对一长度为 N 的实数序列 $X(n)$, $0 \leq n \leq N-1$, 离散哈特莱变换(DFT)^[7-8] 定义为

$$H(K) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \operatorname{cas}\left(\frac{2\pi}{N} kn\right), \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (13)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} H(k) \operatorname{cas}\left(\frac{2\pi}{N} kn\right), \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (14)$$

式中: $\operatorname{cas} x = \cos x + \sin x$

FHT 是 DFT 的快速算法, 它是将一个大点数 N 的 DFT 分解成若干个小点数 DFT 的组合, 而它的运算次数与 N 成正比, 经过这样处理会使运算次数减少, 从而加快了运算速度^[9-10]。为了使(11)式、(12)式能应用 FHT, 将它进行变换和离散化处理, 把积分区间分成 M 和 N 等分, 则有

$$E_e(\theta) = \frac{2\pi 2 \arctan(4F/D)}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F(\theta_m, \varphi_n) \cdot \exp \left\{ -jk \left[\frac{2f \sin \theta_m}{1 + \cos \theta_m} \sin \theta \cos \varphi_n - \Delta x \sin \theta_m \cos \varphi_n \right] \right\}, \quad (15)$$

$$F(\theta_m, \varphi_n) = \frac{4 \sin \theta_m \sin \varphi_n J_1((kd \sin \theta_m)/2)}{kd \sin \theta_m (1 + \cos \theta_m)^2} \left[1 + \frac{\cos \theta_m \beta d}{kd} \right]. \quad (16)$$

由于(14)式中包含复数, 将它分为实数和虚数两部分, 取采样点数 $M = 128$, $N = 64$ 分别进行 FFT 计算, 最后求模得 $E_e(\theta)$ 。

$E_e(\theta)$ 为抛物面焦距比、圆锥喇叭直径和馈源偏移量的函数, 通过优化仿真, 可以得到抛物面天线的焦距比为 $F/D = 1.1$, 喇叭直径 $d = 1.74$ mm, 馈源间隔 $\Delta x = 2.1$ mm, 得到最优的 10 波束辐射方向图, 如图 2 所示。

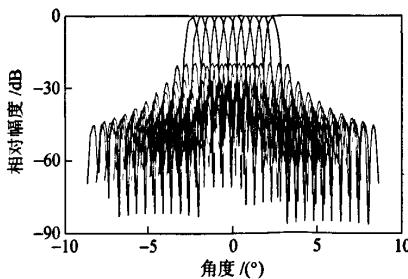


图 2 10 波束辐射方向图
Fig. 2 Radiation pattern of 10 beams

从仿真结果可以看出,各波束的波束宽度大约 0.5° ,旁瓣电平大约 20 dB 。最外两个波束增益略有下降,与理论预测结果基本一致。仿真结果也说明,在波束扫描角度较小时(如小于 5°),偏焦对辐射特性的影响(如增益,旁瓣,波束宽度等)可以忽略不计。

3 工程设计

3.1 喂源设计

采用具有良好辐射对称性的主模圆锥喇叭为馈源,通过选取圆锥喇叭参数 φ (口面上平面波前与球面波前的最大相差)和 u ($u = \pi d \sin\theta/\lambda$)实现幅度和相位方向图主瓣的等化,查图 15(6)~(9)^[5],选取 u 和 φ_m , E 面电平为 13.6 dB ,相位 177.6° , H 面电平为 15.0 dB ,相位为 137.5° 。照射电平和波瓣等化已经获得了良好的结果,但照射相位太大,取照射相位为 56.67° ,则 $\Delta R = \Delta\varphi\lambda/360 = 0.46$,照射角 $a = 60.34^{\circ}$,则相心为

$$Q = [\Delta R((\Delta R)/2 + F)]/[\Delta R + F(1 - \cos a)] = 0.9. \quad (17)$$

取平方率相差无量刚常数为 S ,查表 15^[5], $GF = 4.275\text{ dB}$,设计增益为 11.725 dB 时,根据前面得到的圆锥喇叭的优化直径 d ,得到斜距为

$$L = d^2/(8\lambda S) = 3.24\text{ mm}. \quad (18)$$

3.2 抛物面天线设计

根据系统指标要求,结合优化的抛物面天线焦径比和馈源间隔,选取抛物面直径为 200 mm 。利用优化和工程设计得到的馈源结构以及抛物面焦径比、馈源间隔,设计了 8 波束抛物面天线,如图 3 所示。

根据抛物面天线优化和设计参数,得到多波束抛物面天线的 3 dB 波束宽度为^[5]

$$BW_{3\text{ dB}} = 67.46^{\circ}\lambda/D = 0.5^{\circ}. \quad (19)$$

4 结论

在抛物面多波束设计中,各个馈源相位中心位

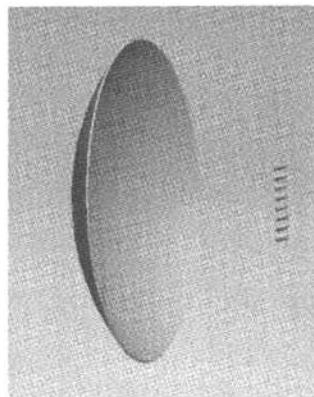


图 3 8 波束抛物面天线
Fig. 3 8 beam parabolic reflector antenna

置的确定、馈源以及抛物面参数的选择是设计的难点和关键。本文在对主模圆锥喇叭馈电的抛物面天线辐射场 FHT 的基础上,能够快速通过计算机对复合天线设计的关键参数进行仿真优化,得到符合系统指标要求的多波束复合天线。所用方法简单实用,解决了工程设计中各个设计参数的繁杂考虑和复杂的计算量,对于多波束抛物面天线的设计有着极其重要的现实意义。

参考文献(References)

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 1~10.
ZHANG Guang-yi. Phased array radar system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994: 1~10. (in Chinese)
- [2] John R. Lateral-feed displacement in a paraboloid [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1965, AP-13: 660~664.
- [3] Imbriale W A, Ingerson P G, Wong W C. Large lateral feed displacements in a parabolic reflector[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1974, AP-22: 742~745.
- [4] Sandler S S. Paraboloidal reflector patterns for off-axis feed[J]. IRE Trans Antennas Propagat, 1960, AP-8: 368~379.
- [5] 林昌禄, 陈海, 吴为公. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990: 420~495.
LIN Chang-lu, CHENG Hai, WU Wei-gong. Design of latter antenna[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 1990: 420~495. (in Chinese)
- [6] Bracewell R N. The fast Hartley transform[J]. IEEE, 1984: 1010~1018.
- [7] Bracewell R N. Discrete Hartley transform[J]. J Opt Soc Amer, 1983, 73(12): 1832~1835.
- [8] Bucci O M, Elia G D. Fast analysis of large antennas-a new computational philosophy[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1980, AP-28: 306~311.
- [9] Buneman O. Conversion of FFTs to fast Hartley transform[J]. SIAM J Sci Stat Computing, 1986, 7(2): 624~638.
- [10] Sorensen H V, Jones D L, Burrus C S, et al. On computing the discrete Hartley transform [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1985, ASSP-33: 1231~1238.

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>