

文章编号 1005-0388(2012)02-0415-07

# 用于空间功率合成的线阵馈电 焦散抛物曲面天线

谢泽明 王立新 阮水生

(华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640)

**摘 要** 提出了一种用于空间功率合成的焦散抛物曲面天线, 该反射面天线是由  $xoz$  平面的一条抛物线沿着  $yoz$  平面上的另一条抛物线正交扫描所形成的, 天线用 8 单元 E 面喇叭线阵进行偏馈。研究了天线的反射面结构参数对天线性能的影响以及横向偏焦电扫描特性, 给出了不同辐射方向下阵列的相位配置公式。仿真和实验结果表明: 提出的方案可以在给定方向合成高增益波束, 与同样线阵馈电的抛物柱面天线相比, H 面 3 dB 波束宽度从  $8.2^\circ$  下降到了  $5^\circ$ , 天线增益提高了 2.2 dB。

**关键词** 空间功率合成; 抛物曲面天线; 波束扫描; 阵馈反射面天线

中图分类号 TN 820. 1

文献标志码 A

## Linear array feed caustic parabolic curved antenna for spatial power combining

XIE Ze-ming WANG Li-xin RUAN Shui-sheng

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of  
Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract** A caustic parabolic curved antenna for spatial power combination is proposed in this paper. The reflector antenna is formed by a parabola in the  $xoz$  plane orthogonal scanning along the other parabola in the  $yoz$  plane. And antenna is offset fed with a line array of 8 E-plane sector horns. Both the impact of antenna structural parameters to the antenna performance and the electric scanning properties of the transversal displacement from focus are studied. A formula is given to configure the phases of the array for a given beam deflection angle. Simulation and experiment show that the designed antenna can combine a high gain beam at a given direction. Compared with the parabolic cylindrical antenna with the same aperture, the H-plane 3 dB beam width decreases from  $6.9^\circ$  to  $5^\circ$ , and the antenna gain increases by 2.2 dB.

**Key words** spatial power combination; parabolic curved antenna; beam scanning; array feed reflector antenna

## 引 言

在电子对抗微波毫米波系统中, 往往需要把大功率的定向电磁辐射波束辐射到作战空间, 用传统

的固态微波器件获得的功率非常有限。运用空间功率合成的方法能获得较大的微波干扰功率<sup>[1-2]</sup>, 通过采用空间功率合成天线, 多路功率信号直接通过天线单元辐射到自由空间去, 通过控制各路辐射的

收稿日期: 2011-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971052)

联系人: 谢泽明 E-mail: eezmxie@scut.edu.cn



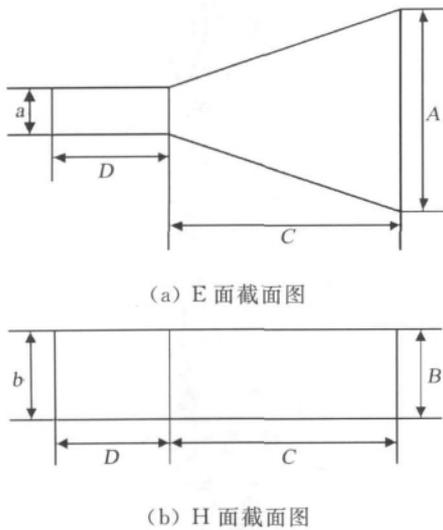


图 3 E 面扇形喇叭结构

设计的尺寸为:  $a = 0.397\lambda$ ,  $b = 0.794\lambda$ ,  $A = 1.75\lambda$ ,  $B = 0.794\lambda$ ,  $C = 2\lambda$ ,  $D = \lambda$ , 这时, E 面的  $-11$  dB 波瓣宽度等于  $55^\circ$ , 与抛物线 2 的张角  $\Psi$  相同, H 面的  $3$  dB 波瓣宽度等于  $66.8^\circ$ . 8 单元喇叭阵列的总长度为  $6.37\lambda$ , 即反射面的长度展宽到约为线阵的 2 倍. 每个喇叭馈源的相位是基于几何光学和惠更斯-菲涅尔原理进行配置, 使阵列在  $xOz$  平面上的等效相位中心落在抛物线 1 的焦点  $F_1$  上. 这时, 每个 E 面喇叭的馈电相位  $\varphi_i$  为

$$\varphi_i = -j \frac{2\pi}{\lambda} d_i \quad (1)$$

式中:  $d_i = \sqrt{x_i^2 + (f_1 - f_2)^2}$  为第  $i$  个 E 面喇叭的相位中心到抛物曲线 1 的焦点  $F_1$  的距离,  $x_i$  为第  $i$  个 E 面喇叭的相位中心的  $x$  坐标.

为了获得最佳反射面, 用 FEKO 软件采用物理光学法分析了抛物线 1 的焦距  $f_1$  和张角  $\Psi_1$  对天线增益的影响, 每次改变焦距  $f_1$  时馈源的相位配置也按式(1)同时改变. 找到最佳的参数为  $f_1 = 35\lambda$ ,  $\Psi_1 = 24^\circ$ . 当  $\Psi_1 = 24^\circ$  时天线增益与  $f_1$  的关系如图 4 所示; 当  $f_1 = 35\lambda$  时天线增益与  $\Psi_1$  关系如图 5 所示.

可见,  $f_1 = 35\lambda$  和  $\Psi_1 = 24^\circ$  对应了最佳增益值  $30$  dB. 当  $\Psi_1 = 24^\circ$  时, 由抛物线的性质可得  $H_1 = 14\lambda$ .

图 6 和图 7 分别给出了  $f_1 = 35\lambda$ ,  $\Psi_1 = 24^\circ$  时天线在 H 面和 E 面的仿真归一化方向图. 作为对比, 采用相同尺寸阵列馈电和相同投影口面大小 ( $H_1$  和  $H_2$ ) 的等幅同相馈电的抛物柱面天线的方向性图也在图中给出. 在 E 面, 两种天线的方向性图相同,  $3$  dB 波束宽度为  $4.9^\circ$ . 而在 H 面, 焦散抛物

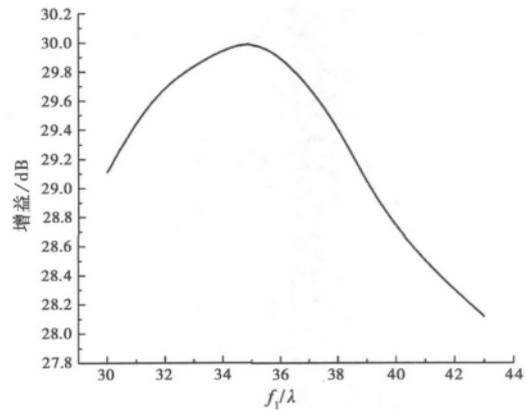


图 4 天线增益与焦距  $f_1$  的关系

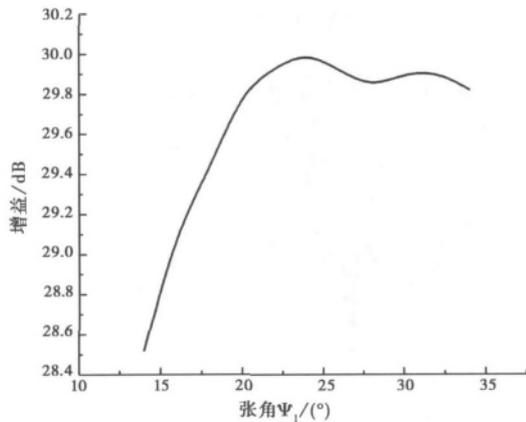


图 5 天线增益与张角  $\Psi_1$  的关系

曲面天线的  $3$  dB 波瓣宽度为  $5^\circ$ , 副瓣电平为  $-14.8$  dB, 而抛物柱面天线的  $3$  dB 波束宽度为  $8.2^\circ$ , 副瓣电平为  $-12.6$  dB. 焦散抛物曲面天线的增益为  $30$  dB, 而抛物柱面天线的增益为  $27.8$  dB. 与抛物柱面天线相比, 焦散抛物曲面天线的增益提高了  $2.2$  dB, 副瓣电平下降了  $2.2$  dB, 表明采用焦散抛物曲面时天线的性能更好. 这是因为根据惠更斯-费聂耳原理, 采用式(1)进行相位配置的阵列可以在其 H 面的辐射等效一个位于抛物线 1 的焦点  $F_1$  的源的辐射, 均匀辐射的角度范围近似为阵列对  $F_1$  的张角, 通过调整参数  $f_1$ , 可以使抛物曲面充分照射, 经反射后在 H 面形成幅度近似台阶余弦的同相口面场分布, 因而 H 面的有效口径增大, H 面波瓣变窄, 增益提高, 同时, 台阶余弦的口面分布也使副瓣变低. 而同样口径的抛物柱面天线, 等幅同相馈电的阵列辐射宽度近似为阵列长度的均匀柱面波, 只有一部分的反射面被照射, 有效口径小, 因而波瓣宽, 增益低. 而且有效照射部分的均匀幅度分布也使副瓣较高.

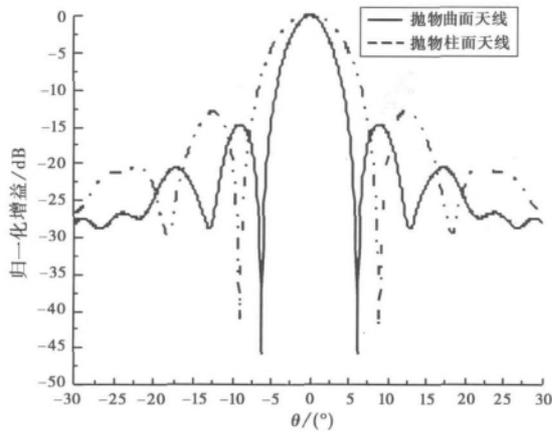


图 6 H 面 ( $xoz$  面) 仿真归一化方向图

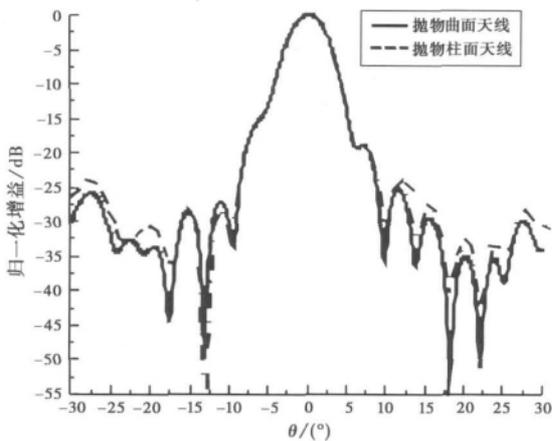


图 7 E 面 ( $yoz$  面) 仿真归一化方向图

对于范围更大的焦散曲面波,这个曲面波在 H 面和 E 面上的相位中心和焦散抛物曲面在这两个面上的焦点重合,经反射面反射后可以形成平面波。

在实际应用中,不单需要产生高功率的电磁波束,还要求电磁波束在尽可能大的范围内可以扫描控制<sup>[9]</sup>。为了实现在 H 面上的相控电扫描,采用等效横向偏焦法。通过配置阵列的馈电相位,使其在  $xoz$  平面上的等效相位中心横向偏移一段距离  $\Delta z$  到  $F_1$ ,如图 2(a)所示。根据抛物线的性质,偏焦后抛物曲面天线的口面场在 H 面上的相位偏差分布为<sup>[10]</sup>。

$$\Delta\Phi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \sin(\Phi) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\Delta x}{f_1} x - \frac{\Delta x}{6f_1^3} x^3 \right) \quad (2)$$

可以看出:馈源横向偏焦时口面场相位偏移约为直线律偏移和立方律偏移之差,直线率偏移使辐射波束偏转同一角度  $\Delta\theta$ ,偏转角度与偏焦距离的关系为<sup>[9]</sup>

$$\Delta\theta = -\arctan(\Delta x/f_1) \quad (3)$$

偏转方向与偏焦方向相反,在偏焦距离比较小的时候近似为线性关系。但是,立方律相位偏移会使得天线主瓣变宽,增益变低,并将会出现不对称的副瓣。

为了使阵列的相位中心偏移  $\Delta x$ ,基于几何光学和惠更斯-菲涅尔原理,每个 E 面喇叭的馈电相位  $\varphi_i$  为

$$\varphi_i = -j \frac{2\pi d'_i}{\lambda} \quad (4)$$

式中:  $d'_i = \sqrt{(x_i - \Delta x)^2 + (f_1 - f_2)^2}$  为第  $i$  个 E 面喇叭的相位中心到偏焦点  $F'_1$  的距离,如图 2(a)所示。为了使波束偏转  $\Delta\theta$ ,从式(3)求出需要的偏焦距离  $\Delta z$ ,代入式(4),馈电相位公式为

$$\varphi_i(\Delta\theta) = -j \frac{2\pi}{\lambda} \left[ (x_i - (f_1 \tan(\Delta\theta)))^2 + (f_1 - f_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

图 8 给出偏转角度与偏焦距离的关系仿真结果和式(3)的结果,两者符合得很好。由于式(2)中的非线性项,增益随偏焦距离增大而下降,图 9 仿真了天线增益下降与偏焦距离  $\Delta x$  的关系。由图 8 和图 9 看出,增益下降 1 dB 时波束偏转范围约为  $\pm 7.5^\circ$ ,表明等效横向偏焦法可以在一定范围内实现波束电扫描。

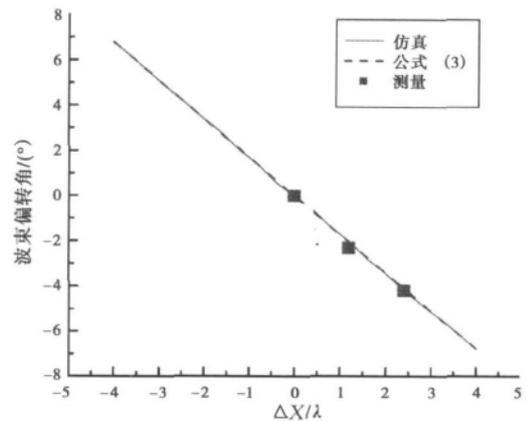


图 8 主波束偏转角度与横向偏焦量的关系

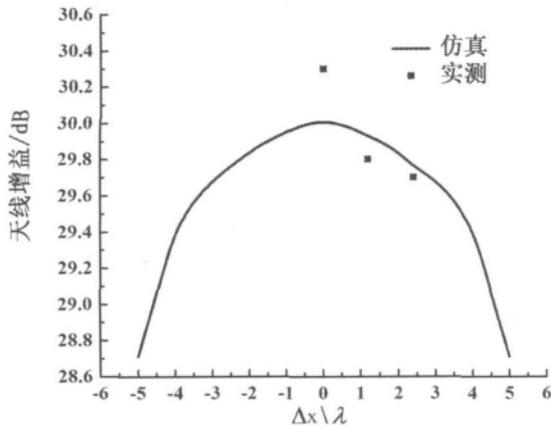


图 9 天线增益与横向偏焦量的关系

### 2. 仿真和测量结果

频率  $f = 12.5 \text{ GHz}$  下设计制作了实际天线进行测试,反射面的尺寸为  $H_1 = 360 \text{ mm}$ 、 $H_2 = 325 \text{ mm}$ 、 $f_1 = 850 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 310 \text{ mm}$ ,E 面扇形喇叭尺寸为  $b = 9.52 \text{ mm}$ 、 $A = 42 \text{ mm}$ 、 $a = B = 19.05 \text{ mm}$ 、 $C = 48 \text{ mm}$ 、 $D = 24 \text{ mm}$ . 焦散抛物曲面天线与同样投影口径的抛物柱面天线的 H 面和 E 面归一化方向图的测量结果如图 10 所示。

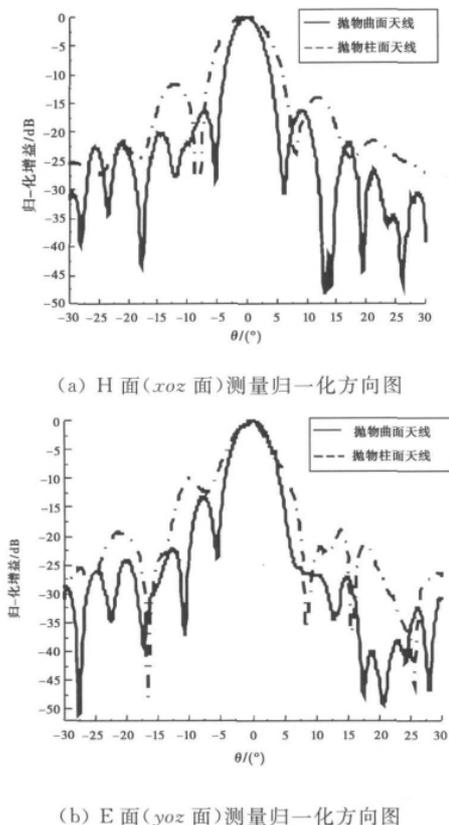


图 10 两种反射面天线测量归一化方向图

焦散抛物曲面天线测量结果为:增益 30.3 dB, E 面 3 dB 波束宽度  $4.8^\circ$ , H 面 3 dB 波束宽度  $4.6^\circ$ , 副瓣电平为  $-16.1 \text{ dB}$ ; 抛物柱面天线测量结果为:增益 28 dB, E 面 3 dB 波束宽度  $5.0^\circ$ , H 面 3 dB 波束宽度为  $7.8^\circ$ , 副瓣电平为  $-12.0 \text{ dB}$ . 实验结果和仿真结果相符,可以显示同样口径的焦散抛物曲面天线比抛物柱面天线性能更好。

横向偏焦 0 cm ( $0\lambda$ )、3 cm ( $1.2\lambda$ ) 和 6 cm ( $2.4\lambda$ ) 时的测量的 H 面归一化方向图如图 11 所示:测量偏转角度分别为  $0^\circ$ 、 $2.3^\circ$  和  $4.2^\circ$ , 仿真偏转角度分别为  $0^\circ$ 、 $2^\circ$  和  $4^\circ$ , 如图 8 所示;测量的增益分别为 30.3 dB、29.8 dB 和 29.7 dB, 仿真结果分别为 30 dB、29.9 dB 和 29.7 dB, 如图 9 所示。可见,测量和仿真结果在实验误差范围内基本相符,表明提出的等效横向偏焦电扫描方案是可行的。

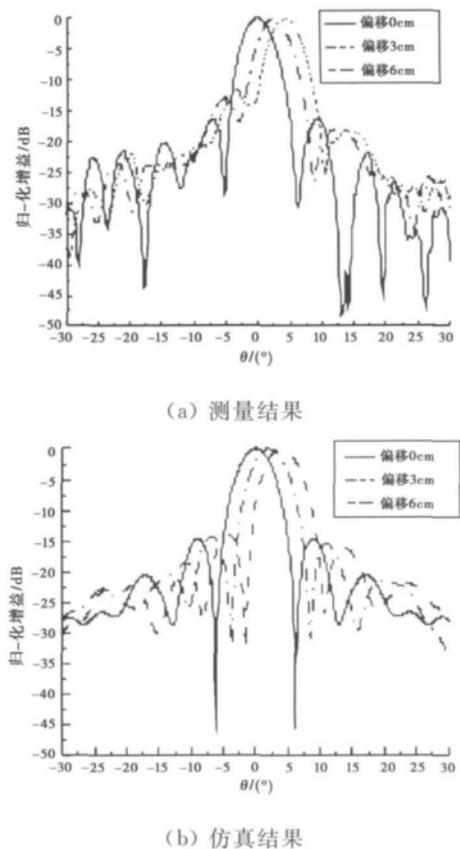


图 11 横向偏焦距离为 0 cm、3 cm 和 6 cm 时天线测量和仿真的 H 面(xoz 面)归一化方向图

### 3. 结 论

提出了一种用于空间功率合成的阵馈焦散抛物曲面天线,研究了抛物曲面天线各个结构参数对天

线性性能的影响,并给出了达到最佳性能时天线的结构参数。仿真和测量结果显示:焦散抛物曲面天线可以在给定方向有效地合成波束,实现空间功率合成。与同样口径的抛物柱面天线相比,能获得更高的增益和更窄的波束。还对焦散抛物曲面天线的等效横向偏焦电扫描特性进行了研究,给出了阵列馈电相位与H面主波束偏转角的关系,测量的波束扫描结果也与理论和仿真结果比较相符,这对工程实践具有一定的指导意义。

### 参考文献

- [1] 章宇兵,张浩,廖桂生.任意分散布阵短波通信干扰机空间功率合成技术[J].西安电子科技大学学报,2006,33(01):150-155.  
ZHANG Yubing, ZHANG Hao, LIAO Guisheng. A technology of spatial power-combination for the random decentralized jammer array[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(01): 150-155. (in Chinese)
- [2] DELISIO M P, YORK R A. Quasi-optical and spatial power combining [J]. IEEE Transactions, 2002, 50(3): 929-936.
- [3] 郭晨,张安学,吴辉,等.高功率超宽带双馈源抛物面天线设计与仿真[J].电波科学学报,2008,23(4):658-661.  
GUO Chen, ZHANG Anxue, WU Hui, et al. Design and simulation of a wide-beam high-power paraboloidal antenna with dual-source [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 658-661. (in Chinese)
- [4] RAHMAT-SAMII Y, DUAN D W, GIRI D V, et al. Canonical examples of reflector antennas for high-power microwave applications [J]. IEEE Transactions, 1992, 34(3): 197-205.
- [5] 钟哲夫.阵列馈源偏置抛物面天线合成大功率微波的研究[J].强激光与粒子束,2003,15(5):467-470.  
ZHONG Zhefu. Generating high-power microwave with array feed offset paraboloid antenna[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(5): 467-470. (in Chinese)
- [6] 张亦希,张恒伟.卫星阵馈反射面赋形波束天线窗口效应的研究[J].电波科学学报,2010,25(6):1046-1051.  
ZHANG Yixi, ZHANG Hengwei. Window effects of array-fed reflector satellite shaped-beam antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6): 1046-1051. (in Chinese)
- [7] 张荣幸,谢泽明,褚庆昕.偏馈抛物柱面型空间功率合成天线研究[J].微波学报,2008,24(4):10-14.  
ZHANG Rongxing, XIE Zeming, CHU Qingxi. Study of offset parabolic cylindrical reflector antenna for spatial power combining [J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(4): 10-14. (in Chinese)
- [8] 谢泽明,张荣幸,熊尚书.用于空间功率合成天线的功分喇叭阵列[J].强激光与粒子束,2011,23(2):463-466.  
XIE Zeming, ZHANG Rongxing, XIONG Shangshu. Power dividing horn array for parabolic cylindrical spatial power combining antenna[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2011, 23(2): 463-466. (in Chinese)
- [9] 刘少东,焦永昌,张福顺.宽角扫描赋形对称单反射面天线的优化设计[J].电波科学学报,2005,20(5):627-631.  
LIU Shaodong, JIAO Yongchang, ZHANG Fushun. Optimal design of shaped symmetric single reflector antenna for wide-angle scanning[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 627-631. (in Chinese)
- [10] 李高升,刘继斌,何建国.抛物面天线馈源偏焦的理论及应用研究[J].雷达与对抗,2004,24(3):38-41.  
LI Gaosheng, LIU Jibin, HE Jianguo. Study on theory and application of focus excursion of paraboloid feed source[J]. Radar & Ecm, 2004, 24(3): 38-41. (in Chinese)

### 作者简介



谢泽明 (1963—),男,广东人,华南理工大学电子与信息学院副教授,博士,硕士生导师,目前主要研究领域包括移动通信天线、无线射频识别技术(RFID)、射频与微波器件设计与仿真和空间功率合成技术等。



王立新 (1986—),男,广东人,华南理工大学电子与信息学院研究生。主要研究方向为阵馈反射面空间功率合成天线技术。



阮水生 (1986—),男,广东人,华南理工大学电子与信息学院研究生。主要研究方向为天线理论与技术。