

文章编号: 1001-4322(2010)10-2407-05

基于抛物面天线阵的空间功率合成技术*

陈 鑫, 余 川, 潘文武, 曹晓阳, 张生帅

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为提高微波空间合成的效率和经济性, 提出了一种基于抛物面天线阵的空间功率合成技术。采用抛物面天线作为天线阵列的基本辐射单元, 综合考虑空间功率合成效率和相位一致性之间的关系, 通过数值分析和理论公式对比得出: 合成效率只与单元的幅度和相位有关, 与合成单元的数量无关。对阵列单元、天线阵的合成效率进行了软件仿真, 得到的合成效率约为 92%。结合实验结果, 分析了影响合成效率的因素和提高合成效率的方法。

关键词: 空间功率合成; 效率; 抛物面天线; 数值仿真

中图分类号: TN822.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3788/HPLPB20102210.2407

微波功率合成是实现超大功率微波和高功率微波系统的重要发展方向, 可分为路的功率合成和空间功率合成。要实现超大功率微波输出路的合成, 会受到很多限制, 由于合路的级数增加会造成合路效率大幅度下降, 同时, 对合路器、隔离器、环形器等微波器件会提出非常高的要求, 在宽带情况下, 这些微波器件尤其难以实现。而微波空间功率合成具有高功率容量、低驻波和宽带特性, 能获得高功率、高重复频率和高能量的宽频带微波束, 因此实现有战略价值超大功率微波和高功率微波系统的重要途径^[1-6]。目前, 国内外对微波空间功率合成的研究主要基于传统相控阵天线。为了控制栅瓣和天线阵单元之间的互耦, 一般天线单元间距选择为半波长左右, 要实现天线高增益(如 50 dB), 天线单元需要上万个。激励源如果采用固态放大器, 整个系统造价会非常昂贵, 系统需要复杂的馈电和控制电路; 激励源如果采用大功率行波管则需要复杂的分路馈电网络, 会带来额外的功率损耗。本文采用抛物面做为阵列单元, 开展微波空间功率合成技术研究, 以期实现一种高效、经济的微波空间功率合成。

1 理论依据

由天线与电波传播理论可知^[7], 对于天线增益为 G_T , 输入功率为 P_T 的单元发射天线, 在自由空间电波传播条件下, 距离天线 r 处的信号场强

$$E_0 = \frac{(30P_TG_T)^{1/2}}{r} \exp(j\theta) \quad (1)$$

式中: θ 为信号到达相位。对于由 N 个单元组成的天线阵, 在距离该阵 r 处的场强 E 为各个单元天线辐射信号场强的叠加, 即

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (2)$$

假设各天线单元天线增益 G_{Ti} 和输入功率 P_{Ti} , 则第 i 个单元天线辐射信号在接收点的场强为

$$E_i = \frac{(30P_{Ti}G_{Ti})^{1/2}}{r} \exp(j\theta_i) \quad (3)$$

将 E_i 代入式(2), 可得

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = \frac{\sqrt{30}}{r} \sum_{i=1}^N \sqrt{P_{Ti}G_{Ti}} \exp(j\theta_i) \quad (4)$$

在信号波长为 λ , 自由空间电波传播条件下, 距离天线阵 r 处的功率密度函数为

$$P_C = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{|E|^2}{30} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \sum_{i=1}^N \sqrt{P_{Ti}G_{Ti}} \exp(j\theta_i) \quad (5)$$

* 收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2010-03-15

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 陈 鑫(1981—), 男, 硕士, 从事电磁场与微波技术研究; chenx_frank@sohu.com.

则,空间功率合成效率

$$\eta = \frac{P_c}{P_{\text{sum}}} = \frac{\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left[\sum_{i=1}^N \sqrt{P_i G_i} \exp(j\theta_i) \right]^2}{\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left(\sum_{i=1}^N \sqrt{P_i G_i} \right)^2} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N A_i \exp(j\varphi_i) \right|^2}{\left| \sum_{i=1}^N A_i \right|^2} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{sum}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left(\sum_{i=1}^N \sqrt{P_i G_i} \right)^2$ 为阵列天线单元发射信号全部同相时的天线阵功率密度; $P_c = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left[\sum_{i=1}^N \sqrt{P_i G_i} \exp(j\varphi_i) \right]^2$, 为阵列天线单元不完全同相的信号经过空间合成的功率密度; φ_i 为第 i 个辐射单元的相位; A_i 为第 i 个辐射单元的幅度。显然, $\eta \leq 1$ 。在理想情况下,当 N 个信号同相叠加,可以获得最大的空间合成效率。

2 合成效率数值分析

2.1 合成效率数值计算

设计采用口面效率较高的抛物面天线为阵列单元,抛物面单元口径为 40 cm,焦距比为 0.5。用波导移向器来补偿各个天线单元之间的相位差,最终实现高效率的空间功率合成,其原理和结构如图 1 所示。

考虑微波链路、天线等会引入幅相误差,可假定最终到达远场空间的电场幅度差为 ± 1 dB,相位一致性为 $\pm 30^\circ \sim \pm 40^\circ$,其中电场幅度相位误差为均匀分布,根据式(6)对天线阵空间功率合成效率进行数值仿真计算,结果如表 1 所示。

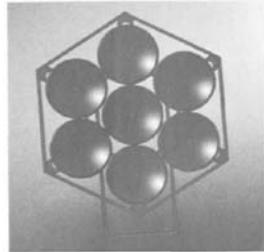


Fig. 1 Schematic diagram of spatial power combination

图 1 空间功率合成结构图

表 1 幅相不一致情况下空间功率合成效率计算值

Table 1 Spatial power-combination efficiency for antenna cells with different amplitude errors and phase errors

amplitude error/dB	phase error/dB	η_{\max}	η_{\min}	$\eta_{\text{mean}}/\%$
± 1	± 30	96	85	91
± 1	± 40	94	76	85

2.2 合成效率经验公式计算

根据 Ruze 的理论公式^[9],对空间功率合成效率的数值计算结果进行验证,在相位一致性为 $\pm 30^\circ$,幅度一致性为 ± 1 dB 的情况下,计算得到 $\eta = 90\%$,与数值模拟结果近似,说明了数值计算结果的可信性。

$$\eta = \frac{P_c}{P_{\text{sum}}} \approx \exp(-\sigma^2) \approx \frac{1}{1 + \sigma^2} \quad (7)$$

式中: $\sigma^2 = \sigma_a^2 \sigma_p^2$; σ_a 为幅度的标准差; σ_p 为相位的标准差。

通过仿真分析得出,发射天线阵中各个单元的幅相的一致性决定了空间功率合成效率只与单元的幅度、相位有关,而与合成单元的数量无关。从表 1 可以看出,空间功率合成的效率远远大于合路效率,特别是多级合路时的效率。

3 软件仿真分析

3.1 抛物面单元仿真

以 8.5 GHz 为中心频率,仿真得到抛物面单元的远场方向图,设计的抛物面直径为 40 cm,焦距比为 0.5。抛物面单元的 E 面仿真方向图如图 2 所示,实测方向图如图 3 所示。对比仿真与实测方向图,可知仿真结果与实测结果比较一致,加工的抛物面单元可以满足实验要求。

3.2 合成效率仿真

由设计的抛物面单元做为阵列单元,用 7 个抛物面单元构成天线阵列,如图 4 所示。阵元间距为 42 cm,每个抛物面天线单元的激励等幅同相。在频率 8.5 GHz 下,考虑互耦等情况,仿真得到天线阵远场方向图如图 5 所示,计算得到的天线阵面合成效率 $\eta = 92.43\%$ 。

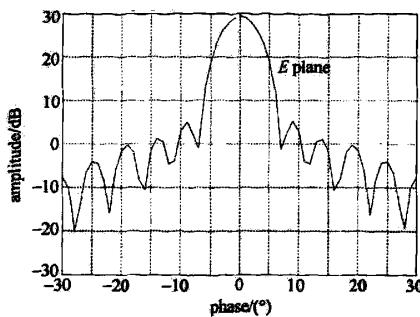


Fig. 2 Simulation pattern of parabolic antenna

图2 抛物面单元仿真方向图

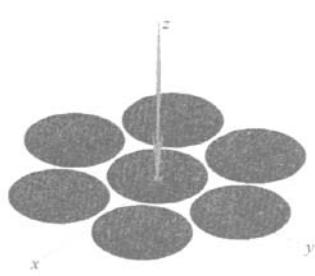


Fig. 4 Sketch map of parabolic antenna array

图4 抛物面阵列仿真示意图

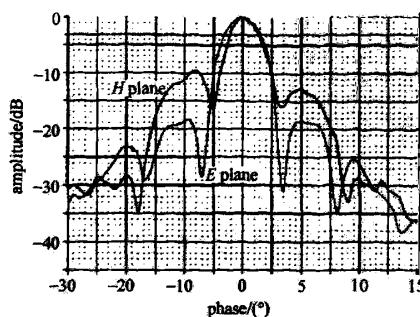


Fig. 3 Test pattern of parabolic antenna

图3 抛物面单元实测方向图

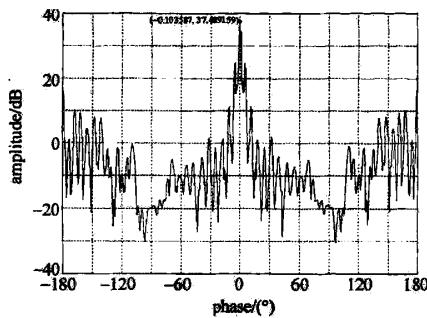


Fig. 5 Simulation pattern of parabolic antenna array

图5 抛物面阵列仿真远场方向图

4 实验测试

为验证软件仿真分析,依据仿真过程设计加工了一套原理性测试系统,包括抛物面天线单元、天线座、一分八功率分配器和波导移相器等。首先,在微波暗室中分别测试每个抛物面天线(附带电缆和波导同轴转换器)的相位、方向图,然后,对7个天线的相位差进行分析,选取某一面天线的相位做为参考,计算同相情况下其它6个抛物面天线所需的移相量,根据测试结果计算波导移相器的厚度并加工实物。波导移相器加工完成后,将每个波导移相器安装到相应的天线上,在微波暗室中测量天线阵列的电性能。

4.1 合成效率实验

发射频率为8.5 GHz,发射功率为18 dBm情况下,直接连接位于阵面中心抛物面天线单元,得到该抛物面天线单元的远场方向图,测量电平为-7.217 dB,方向图如图6所示。在相同测试条件下,信号源通过一分八功率分配器与7个抛物面单元和一路吸收负载相连,阵元间距42 cm,测量得天线阵远场方向图,测量电平为-0.64 dB,方向图如图7所示。一分八功分器在8.5 GHz频率下插入损耗约为1 dB,考虑功分器的插入损耗对合成效率的影响,在发射功率不变的条件下,通过抛物面天线阵列的空间功率合成技术,抛物面天线阵列与单个抛物面单元相比,可以提高的增益7.577 dB,实测得到合成效率 $\eta=81.77\%$ 。

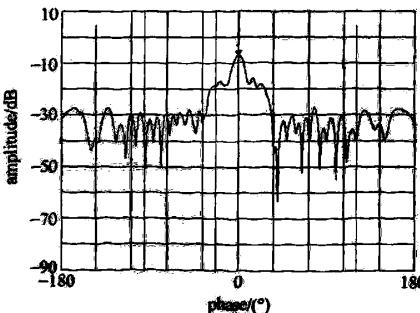


Fig. 6 Test pattern of the center parabolic antenna

图6 中心位置抛物面天线辐射方向图

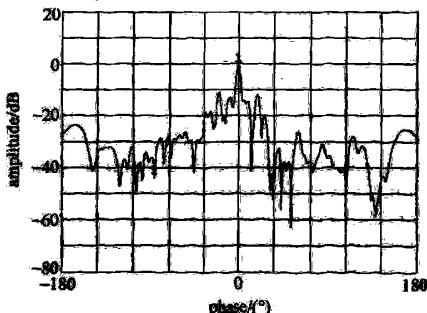


Fig. 7 Test pattern of parabolic antenna array

图7 抛物面阵列远场辐射方向图

4.2 天线阵列栅瓣实验

对天线阵中的每个单元,如果单元间距大于一个波长或者更大的间距,有多个可见的栅瓣。如果间距有几个波长,许多栅瓣都可见。在实际应用中,栅瓣限制了天线阵的性能,要注意避免或者减弱栅瓣的影响。由于抛物面阵列单元间距在 X 波段远大于一个波长,栅瓣的出现不可避免,出现位置计算式为

$$\phi_g = \arcsin\left(\frac{m}{d_1}\right) \quad (8)$$

计算结果如表 2 所示。图 8 分别为间距 42, 52, 62 cm 时的远场方向图。观察可知,测量方向图中的栅瓣位置与计算得出的栅瓣位置一致,且随着阵元间距增大,栅瓣与主瓣之间角度减小,栅瓣幅度增大,因此,在条件允许的情况下,应尽量减小阵元间距。

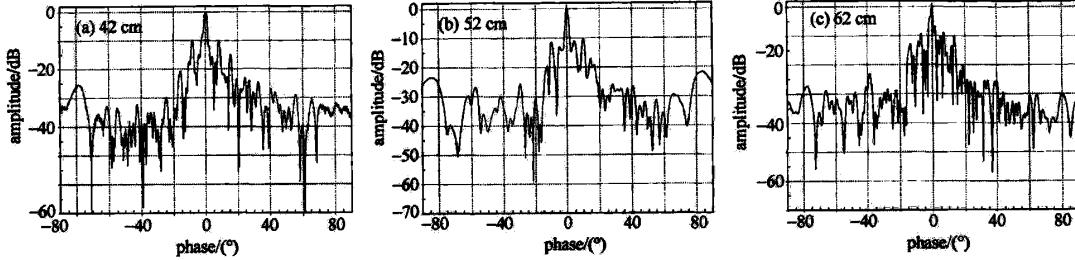


Fig. 8 Test pattern of antenna array with different cell space

图 8 不同阵元间距测试方向图

表 2 栅瓣位置计算值

Table 2 Calculations of grating lobe locations

cell space/cm	grating lobes location/(°)									
	the first		the second		the third		the fourth		the fifth	
	calculation	test	calculation	test	calculation	test	calculation	test	calculation	test
42	4.8	4.9	9.6	10.2	14.6	14.8	19.6	20.1	24.8	25.1
52	3.9	4.3	7.9	8.2	11.7	10.5	15.7	15.2	19.8	19.1
62	3.3	3.8	6.5	6.7	9.8	10.0	13.2	14.0	16.5	17.2

5 结 论

通过理论分析得出,发射天线阵中各个单元的幅相一致性决定了空间功率合成效率,数值计算和经验公式的计算也证明了幅度和相位对合成效率具有重要的影响。通过理论及实验研究表明,在 X 波段合成出现的阵列栅瓣是无法避免的,但由于抛物面天线是定向天线,本身对栅瓣有一定的抑制作用,使得栅瓣低于主瓣 10 dB 左右,测量方向图中的栅瓣位置与计算得出的栅瓣位置一致。随着阵元间距的增大,栅瓣与主瓣之间的夹角变小,栅瓣电平逐渐增大,因此在条件允许条件下应尽量减少阵元间距。通过仿真研究表明,本文中的合成效率为 92.43%,实测合成效率为 81.77%,如果研制相应的幅度、相位控制电路,可以进一步提高空间功率合成的效率。

参 考 文 献:

- [1] Ozkar M, Lazzi G, Mortazawi A. Study of design parameters in waveguide-based spatial power combining amplifier arrays using FDTD [C]//2001 International Microwave Symposium. 2001.
- [2] Nakajima M. A proposed multistage microwave power combiner[J]. Proc of the IEEE, 1973, 61(2):242-249.
- [3] Sanada A. Traveling-wave microwave power divider composed of reflectionless dividing units[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(1):14-20.
- [4] Varian K R. Power combining in a single multiple-diode cavity[C]//IEEE Microwave Theory and Techniques Society. 1978:344-345.
- [5] Kildal P S. Aperture efficiency and line feed phase center of parabolic cylindrical reflector antenna[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 1984, 32(6): 553-567.
- [6] 李高鹏,许荣庆,马子龙.天线单元存在幅相不一致性时的波束零点合成技术[J].电子学报,2005,33(6):1150-1153.(Li Gaopeng, Xu Rongqing, Ma Zilong. Null synthesis when antenna cells have different amplitude and phase errors. Acta Electronica Sinica, 2005,33(6):1150-1153)

- [7] 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: 自然科学版, 2006, 33(1): 150-155.
(Zhang Yubing, Zhang Hao, Liao Guisheng. A technology of spatial power-combination for the random decentralized jammer array. *Journal of Xidian University: Natural Science Edition*, 2006, 33(1): 150-155)
- [8] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. (Ling Changlu. Antenna engineering handbook. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002)
- [9] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design[M]. New York: Harper & Row Publishers, 1982.
- [10] 张克善. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. (Zhang Keqian. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001)

Spatial power-combination based on parabolic antenna array

Chen Xin, Yu Chuan, Pan Wenwu, Cao Xiaoyang, Zhang Shengshuai

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1016, Mianyang 621900, China)

Abstract: The spatial power-combination, adopting parabolic antennas as the array cells, has been studied, considering the relation between the spatial power-combination efficiency and the amplitude error and phase error of antenna cells. The results of numerical theoretical analyses and show that the efficiency of spatial power-combination is only related with the amplitude error and phase error of antenna cells only. The simulation on the antenna units and the antenna array shows a spatial power-combination efficiency about 92%. The influencing factors and the improvement methods of the efficiency have been presented.

Key words: spatial power-combination; combinataion efficiency; parabolic antenna; numerical simluation

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>