

文章编号:1005-6122(2008)04-0010-05

偏馈抛物柱面型空间功率合成天线研究*

张荣幸 谢泽明 褚庆昕

(华南理工大学电子与信息学院,广州 510640)

摘要: 用口面场积分方法分析了偏馈抛物柱面型空间功率合成天线。在不同的馈源组阵方式,不同的抛物柱面夹角时,得出最佳的馈源喇叭的尺寸,最佳的馈源轴线指向,和最佳的抛物柱面边缘照射电平。计算偏馈抛物柱面天线的增益因子与抛物柱面尺寸的关系,比较不同的增加天线增益方法的优劣,指出 H 面喇叭 E 面阵列作为馈源比 E 面喇叭 H 面阵列作为馈源的抛物柱面天线具有更高的增益因子。本文的研究结果用于指导空间功率合成天线的设计。

关键词: 空间功率合成,抛物柱面,口面场积分

Study of Offset Parabolic Cylindrical Reflector Antenna for Spatial Power Combining

ZHANG Rong-xing, XIE Ze-ming, CHU Qing-xin

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

Abstract: A study of an offset parabolic cylindrical reflector antenna for spatial power combining is presented. The calculation based on aperture integral is agreed well with the measurement. The best dimensions of the feeding horn, the best feeding orientation and the best edge level of the reflector are calculated. The relationship between the antenna gain factor and the dimensions of the parabolic cylindrical reflector is analyzed. The gain factor of the antenna with an E_plane array feed is higher than that of the antenna with an H_plane array feed. Results of this paper are useful for the design of spatial power combining antenna.

Key words: Spatial power combining, Parabolic cylindrical, Aperture integral

引言

在通信对抗领域,要获得很大的微波干扰功率有两种方法:一是采用固态功率合成技术,但研制超大功率受到高压电源和高功率器件等因素的限制;二是利用空间功率合成技术大幅度提高干扰功率,这能突破功率器件的制约,得到更强大的干扰功率^[1]。利用多个天线单元发射频率相同、相位符合特定关系的电磁波,使之在空间传播过程中相互叠加合成,从而在一定方向上形成电磁波束的技术称为空间功率合成技术^[2]。空间功率合成的各路功放并行工作,各路信号通过低耗波导传播到空中进行合成,具有较高的合成效率,因而得到了广泛的应用^[3]。

本文研究偏馈抛物柱面型空间功率合成天线,

它包括多个天线单元组成的线性馈源阵列和抛物柱面反射板。人们对反射面天线的研究主要集中在抛物圆面天线,而有关抛物柱面天线的报道并不多。抛物柱面天线的尺寸很大,用数值方法计算需要大量的计算机内存和时间,故一般用光学近似方法分析。文献[4]用感应电流法全面地分析了欧洲非相干散射雷达(EISCAT)抛物柱面天线的辐射特性,文献[5]中综合考虑各种阻挡和衍射因素分析了该天线的口径利用效率和馈源的相位中心。文献[6]用物理光学方法分析了抛物柱面卫星电视接收天线。上述文献中的天线用半波振子阵列或贴片天线阵列作为馈源,而本文的抛物柱面天线以喇叭阵列为馈源,因此喇叭的口径,不同的组阵方式,和馈源的单元间距对抛物柱面天线性能的影响值得研究。

* 收稿日期:2007-07-23;定稿日期:2008-01-29

本文先用口面场积分计算方法计算抛物柱面天线,并与天线的测量结果对比,验证口面场积分的计算准确性。然后用口面场积分计算在不同的组阵方式,不同的抛物柱面夹角时,天线的增益因子与馈源的水平口径和馈源的轴线指向的关系,得出最佳的馈源水平口径和轴线指向和此时的反射面边缘电平。随后计算不同的组阵方式,不同的方法增加抛物柱面的高度(单纯增加抛物柱面高度,增加喇叭路数的同时增加抛物柱面高度,张开喇叭口径的同时增加抛物柱面高度)情况下天线的增益因子的变化情况,得出在H面喇叭的E面组阵比在E面喇叭的H面组阵具有更高的增益因子的结论,并指出当在E面喇叭的H面组阵时,喇叭的间距过大会使抛物柱面天线的方向性图出现栅瓣,影响空间功率合成天线的正常工作,而较好的增加天线增益的方法是采用在H面喇叭的E面组阵为馈源张开喇叭的E面口径同时增加抛物柱面高度。

1 天线结构描述

抛物柱面空间功率合成天线的立体结构示意图如图1所示,抛物柱面和喇叭的截面图如图2所示。

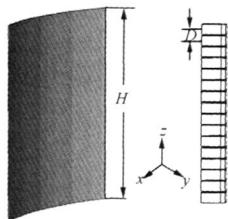


图1 抛物柱面天线结构示意图

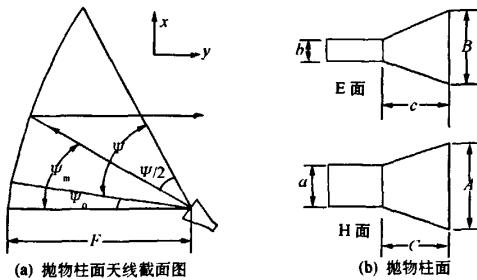


图2 天线馈源喇叭截面图

分别接功放的16路喇叭在z方向以单元间距D组阵放在抛物柱面的焦线位置作为馈源,微波信号通过抛物柱面反射后在空中进行大功率合成。抛物柱面的高度为H,为了减少抛物柱面的后向辐射,H比喇叭阵列的垂直面总高度两边分别多留出 H_0 的高度。抛物面的焦距为F。天线采用偏馈的形

式,截去抛物柱面张角小于 Ψ_0 的部分,抛物柱面夹角为 Ψ ,最大张角为 $\Psi_0 + \Psi$,喇叭的轴线指向角预设为 Ψ_m 。在本文,喇叭E面平行于z轴的馈源阵列称为E面阵,喇叭H面平行于z轴的馈源阵列称为H面阵,前者作馈源时空间功率合成天线垂直极化,后者则为水平极化。

2 计算方法

文献[7]中用馈源和抛物柱面分开仿真的方法计算了抛物柱面空间功率合成天线的方向图。本文采用口面场积分方法计算抛物柱面天线,占用内存更小,计算速度更快。根据惠更斯-菲涅尔原理可知,面状天线问题,可先求出开口面上的场 E_s (由馈源产生),这是内场问题;再由口径面的场分布 E_s (作为新的波源)求天线的辐射场,这是外场问题。求解内场时,忽略外场的影响,求解外场时,只考虑口径面上的场,所以这种方法是近似的,但其精度已经满足工程上的要求。本文的馈源喇叭工作在TE₁₀模,故可设其E面场均匀分布,H面场余弦分布,忽略相位分布不均匀和单元间耦合的影响,计算出喇叭的辐射方向图,进而求出抛物柱面上的口径场 E_s ,再由 E_s 求解外场问题。

用口面场法计算16路E面扇形喇叭在其H面组成阵列为馈源的抛物柱面天线,喇叭的垂直口径 $A = 0.794$,水平口径 $B = 1.75\lambda$,喇叭间距 $D = 0.967\lambda$;抛物柱面的焦距 $F = 12.5\lambda$, $\Psi_0 = 5^\circ$, $H_0 = 55^\circ$, $H_0 = 0.625\lambda$,抛物柱面的高度 $H = 16 \times D + 2 \times H_0 = 16.722\lambda$ 。口面场积分法计算的天线方向性系数为33.02dB,测量天线的增益为33.76dB。计算与测量的天线的H面方向性图如图3所示。计算与测量结果相近,可见口面场积分计算法的准确性。

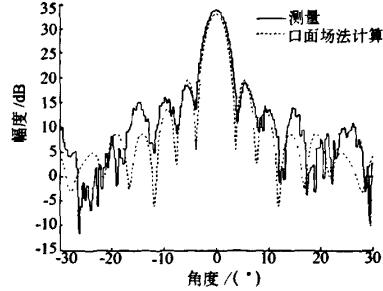


图3 测量与计算的抛物柱面天线H面方向性图

3 抛物柱面天线性能分析

根据电磁场理论,口面天线的方向性系数为 D

$= \nu \times 4\pi S/\lambda^2$, 其中 ν 是口面利用系数, 其值取决于口面场分布的均匀程度。对抛物柱面天线来说, 因其口面辐射的能量只是截获馈源辐射能量的一部分, 所以如果馈源的总辐射功率为 P_r , 抛物柱面截获的功率为 P_n , 则 $\eta_A = P_n/P_r$ 称为口面截获系数。此时忽略其他损耗, 则天线的增益系数为 $G = \eta_A D = \eta_A \nu \times 4\pi S/\lambda^2 = g \times 4\pi S/\lambda^2$, 式中 $g = \eta_A \nu$ 称为增益因子。显然, ν 和 η_A 都与馈源的方向图及抛物柱面的形状有关。因此, 增益因子是口径天线性能的重要标志。

3.1 抛物柱面天线增益因子与馈源喇叭水平口径的关系

喇叭垂直面口径和抛物柱面天线的高度保持不变, 分别采用 16 元馈源喇叭的 E 面组阵和 H 面组阵方式在抛物柱面夹角 $\Psi = 55^\circ, 70^\circ, 85^\circ$ 时, 计算天线的增益因子随着喇叭水平口径的变化情况。具体的天线尺寸为: $\Psi_0 = 5^\circ, \Psi_m = \Psi_0 + \Psi/2, F = 12.5\lambda, A = 0.794\lambda$ (喇叭 H 面组阵时), $B = 0.794\lambda$ (喇叭 E 面组阵时), $H = 16.722\lambda$ 。由口面场法计算的抛物柱面天线增益因子随着馈源喇叭水平口径的变化如图 4 所示。增益因子取最高时对应的单个喇叭为最佳馈源, 当抛物柱面夹角不同时, 最佳馈源的增益和它的水平面半功率角如表 1 所示。

表 1 不同的抛物面夹角的最佳喇叭增益和水平面半功率角

抛物柱面夹角	E 面阵列中的最佳馈源			H 面阵列中的最佳馈源		
	水平口径	增益	水平面半功率角	水平口径	增益	水平面半功率角
55°	2λ	10.2dB	17°	1.3λ	8.8dB	19°
70°	1.6λ	8.2dB	21°	1.1λ	7.6dB	22°
85°	1.4λ	7.1dB	24°	1λ	6.9dB	25°

从图 4 可以得出: 对于相同的抛物柱面夹角 (Ψ), 用喇叭 E 面阵列作为馈源的天线增益因子比用喇叭 H 面阵列作为馈源的更高, 即喇叭 E 面阵列作为馈源的天线效率会更高; 对于相同的抛物柱面

夹角 (Ψ), 当天线的增益因子达到最大值时, 喇叭 E 面阵列作为馈源时, 所需的喇叭水平面口径 (A) 比 H 面阵列作为馈源时的 (B) 大。

从表 1 可以看出: 抛物柱面夹角越大时, 需要的最佳馈源水平口径越小, 此时的馈源增益越低, 水平面的半功率角越大。因此馈源喇叭设计的重点是改变其口径尺寸, 令抛物柱面获得最佳的照射, 以获得较好的整体天线增益因子。

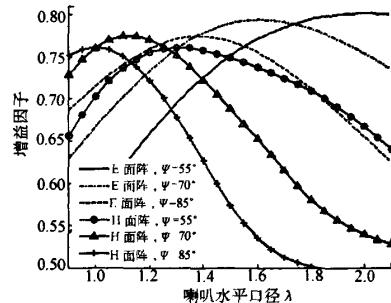


图 4 不同抛物面夹角时增益因子与馈源喇叭水平口径的关系

3.2 抛物柱面天线增益因子与馈源轴线指向的关系

保持 3.1 中的天线尺寸不变, 取增益因子最高时的喇叭水平口径, 计算天线增益因子随着喇叭轴线指向的关系, 结果如图 5 所示。

为了得出最佳的喇叭轴线指向与抛物柱面夹角平分线的关系, 图 5 中的虚线代表不同的抛物柱面夹角时的角平分线指向。不同的抛物面夹角时最佳喇叭轴线指向、最佳喇叭轴线指向偏离抛物柱面夹角平分线的角度和最佳的抛物柱面垂直边缘电平如表 2 所示。

从图 5 和表 2 可得, 最佳的喇叭轴线指向并不等于抛物柱面夹角平分线指向, 而是偏离并比它略高几度; 抛物面夹角越大, 最佳喇叭轴线指向偏离抛物柱面夹角平分线指向越远, 这是由于抛物柱面不是关于其夹角角平分线对称导致的; 由图 5 和表 2

表 2 不同的抛物面夹角的最佳喇叭轴线指向和抛物面垂直边缘的电平

阵列 馈源	抛物面 偏角 (°)	抛物面 夹角 (°)	抛物面夹角平 分线指向 (°)	最佳喇叭轴线 指向 (°)	最佳轴线指向 偏离角度 $\Psi_m - \Psi_m$ (°)	最佳喇叭指向 时抛物面边缘 电平 (dB)
	Ψ_0	Ψ	$\Psi_m = \Psi_0 + \Psi/2$			
E 面	5	55	32.5	33.5	1	-8.7
	5	70	40.0	42.0	2	-9.1
	5	85	47.5	51.5	4	-10.3
H 面	5	55	32.5	33.5	1	-6.7
	5	70	40.0	42.0	2	-8.0
	5	85	47.5	51.5	4	-9.9

可见, E 面和 H 面的喇叭阵列具有相同的最佳轴线指向;由表 2 可见, 抛物面夹角越大, 最佳的抛物面垂直边边缘电平越低;同时, 用 E 面组阵馈源的抛物面最佳垂直边边缘电平比用 H 面组阵馈源时的最佳抛物柱面垂直边边缘电平要低。

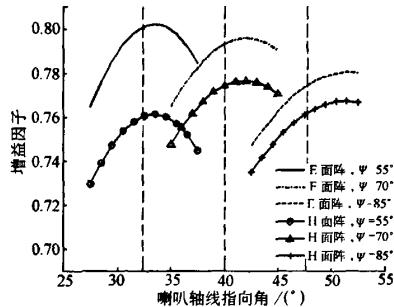


图 5 不同抛物面夹角时增益因子与喇叭轴线指向角的关系

3.3 抛物柱面天线增益因子与不同方法增加抛物柱面高度的关系

当抛物柱面夹角 $\Psi=55^\circ$ 时, 选取 3.1 和 3.2 中计算的最佳喇叭水平口径和最佳喇叭轴线指向, 用 3 种不同的方法增加抛物柱面的高度 H , 计算天线的增益系数随着 H 的变化情况。方法一是保持喇叭路数和喇叭单元的垂直口径不变, 单纯增加抛物柱面的高度 H , 即增加 H_0 ; 方法二是保持喇叭单元的垂直口径不变, 增加喇叭路数的同时相应地增加抛物柱面的高度 H ; 方法三是保持喇叭路数不变, 张开单元喇叭的垂直口径同时相应地增加抛物柱面高度 H 。

不同的组阵方式作馈源时, 抛物柱面天线的增益因子按不同的方法增加高度 H 时的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知, 方法一中单纯增加抛物柱面的高度 H , 天线的增益因子随着 H 增加而下降, 其下降的主要原因是单纯增加了抛物柱面的高度, 而喇叭的路数保持不变, 此时喇叭阵列只能照射抛物柱面的中间部分, 抛物柱面的口面场分布不均匀, 口面利用效率下降, 因此虽然天线的增益随着抛物柱面高度的增加而增加, 但天线的增益因子是下降的。方法二中增加喇叭路数同时增加抛物柱面高度 H , 天线的增益因子随着 H 的增加略有上升。方法三中张开喇叭垂直口径的同时增加 H , E 面阵列为馈源时, 天线的增益因子略有上升; 而 H 面阵列为馈源时, 天线的增益因子先下降后缓慢上升。对比可知, E 面阵列作为馈源比 H 面阵列作为馈源具有更高的天线增益因子。

方法二中, 增加喇叭路数而保持喇叭的间距不变, 天线的方向性图中不会出现栅瓣。方法三中, 16 路喇叭垂直口径张开同时增加 H , 现取 $H=26\lambda$, 计算天线的垂直面方向性图, 如图 7 所示。由图 7 可知, H 面阵列作为馈源时, 天线的垂直面方向图出现栅瓣, E 面阵列作为馈源即使喇叭张开也没有令天线方向图出现栅瓣。这是由于馈源喇叭在 TE_{10} 模工作时的 H 面口径场是余弦分布, 当单元喇叭间距过大时, 合成阵列方向图出现栅瓣, 而 E 面口面场是均匀分布, 忽略边缘间距的影响, 单元喇叭的间距变大, 合成阵列的方向图并不会出现栅瓣。出现栅瓣时的空间功率合成天线在非主瓣方向出现能力泄漏, 不能正常工作, 增益因子也会因此下降。因此, E 面阵列作为抛物柱面天线的馈源比 H 面更具优势。

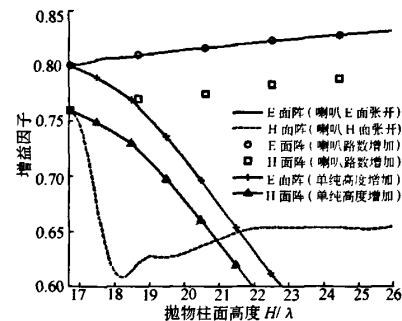


图 6 增益因子与抛物柱面高度的关系

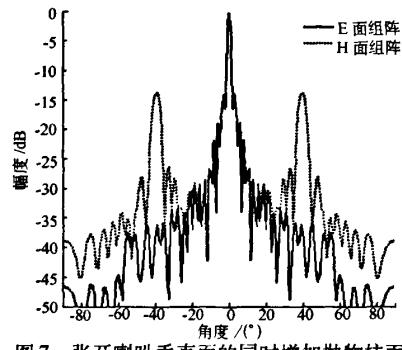


图 7 张开喇叭垂直面的同时增加抛物柱面高度的天线垂直面方向性图

4 结论

本文通过口面场积分法和测量偏馈抛物柱面天线的结果对比, 验证了口面场积分方法计算的准确性。口面场积分方法的计算结果表明: 喇叭 E 面阵列作为馈源比喇叭 H 面阵列作为馈源具有更高的天线增益因子; 最佳的喇叭轴线指向靠近并略高于

抛物面夹角平分线,最佳的边缘照射电平随着抛物面夹角的增大而减小;单纯增加抛物柱面的高度时天线的增益因子下降;保持喇叭口径不变增加喇叭路数同时增加抛物柱面的高度时,天线的增益因子增大;E 面阵列作为馈源时,张开喇叭的垂直口径同时增加抛物柱面的高度,天线的增益因子增大;H 面阵列作为馈源时,张开喇叭的垂直口径同时增加抛物柱面的高度,天线的增益因子先减小再缓慢增大,此时喇叭单元间距过大则抛物柱面方向性图出现栅瓣。

增加空间功率合成天线增益可以有以下方法:一是 E 面阵列馈源或者 H 面阵列为馈源,增加喇叭路数的同时增加抛物柱面的高度,其缺点是需要增加喇叭路数,即增加了大功率功放的个数,增加了成本,但提高了合成总功率;二是 H 面阵列作为馈源,张开喇叭垂直口径同时增加抛物柱面高度,其缺点是天线的方向图出现栅瓣,能量泄漏,天线的效率下降,因此应用受限;三是 E 面阵列作为馈源,张开喇叭垂直口径同时增加抛物柱面高度,这是在不增加系统成本和不增加总合成功率情况下,提高天线增益的有效方法。

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(1): 150~155
 - [2] 齐亚平,朱林芳.短波多站空间功率合成通信干扰技
- (上接第 9 页)
- [2] Gedney S D, Mittra R. The use of the FFt for the efficient solution of the problem of electromagnetic scattering by a body of revolution[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1990, 38(3): 313~322
 - [3] Michalski K A, Zheng D. Electromagnetic scattering and radiation by surface of arbitrary shape in layered media, part I, part II[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1990, 38(3): 335~352
 - [4] Yang J J, Chow Y L, Fang D G. Discrete complex images of a three-dimensional dipole above and within a lossy ground[J]. IEE Proc-H, 1991, 138(8): 319~26
 - [5] Vitebskiy S, Carin L, Ressler M A. Ultra-wideband, short-pulse ground-penetrating radar: simulation and measurement[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 762~772
 - [6] Wu T K, Tsai L L. Scattering from arbitrarily shaped lossy dielectric bodies of revolution. Radio Sci [J].

术研究[J].电子对抗,2000,(3): 16~25

- [3] DeLisio M P, York R A. Quasi-optical and spatial power combining[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 929~936
- [4] Kildal P S. Radiation characteristics of the EISCAT VHF parabolic cylindrical reflector antenna[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1984, 32(6): 541~552
- [5] Kildal P S. Aperture efficiency and line feed phase center of parabolic cylindrical reflector antenna[J]. IEEE Trans Antennas Propagat. 1984, 32(6): 553~567
- [6] Luk K M, Luo Yonglun. Radiation analysis of parabolic cylindrical reflector antenna with rectangular microstrip patch array as feed[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1994, V2: 974~977
- [7] Chen Zhi-Hui, Liu Guo-Dong, Chu Qing-Xin. A new method for analyzing large size parabolic cylindrical reflector antenna[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2006, 4421~4424

张荣幸 男,1981 年生,硕士,现在西门子公司从事射频技术研究。研究方向为天线理论与设计。

E-mail: honorhonor@163.com

谢泽明 男,1963 年生,华南理工大学电子与信息学院副教授,博士,硕士生导师。从事电磁场、天线与微波技术研究。

E-mail: eezmxie@scut.edu.cn

褚庆昕 男,1958 年生,华南理工大学电信学院教授、博士生导师。研究方向包括射频与微波电路、有源集成天线与空间功率合成和时域计算电磁学。

1979,12: 709~728

- [7] Wong D, Carin L. Analysis and processing of ultra wideband SAR imagery for buried landmine detection[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1996, 46(11): 1747~1748

孙晓坤 女,现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为埋地目标电磁建模。

E-mail: sxk1227@tom.com

周智敏 男,现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为超宽带合成孔径雷达系统技术及高速实时信号处理。

E-mail: zhouzhim@x263.com

王 建 男,现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为超宽带 SAR 成像与实时信号处理。

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>