

## 曲线轮廓光壁喇叭天线设计与分析

刘广<sup>1</sup>, 王宏建<sup>1</sup>, 张升伟<sup>1</sup>, 程岳云<sup>2</sup>, 易敏<sup>1</sup>, 陈雪<sup>1</sup>, 刘世华<sup>2</sup>

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心微波遥感部, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 针对毫米波段波纹喇叭加工困难、加工费用昂贵的问题, 提出一种由正弦曲线和高斯曲线组成的曲线轮廓光壁喇叭天线, 采用基于有限元算法的高频电磁场仿真软件 ANSOFT HFSS 对该天线的电特性进行计算, 并运用准光理论计算其高斯耦合效率。采用高频平面近场天线测试系统对喇叭实物进行测试, 实测结果与波纹喇叭对比, 这种曲线轮廓光壁喇叭天线的副瓣电平比波纹喇叭低 6.59 dB, 增益高 0.5 dB, 高斯耦合效率高 0.9%, 长度短 15.8 mm, 而且易于加工, 是一种可替代波纹喇叭的优良性能馈源。

**关键词:** 波纹喇叭; 曲线轮廓光壁喇叭; 高斯耦合效率; 毫米波

中图分类号: TN 82 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2011)01-0087-05

## The Design and Analysis of a Smooth-Walled Spline-Profile Horn

LIU Guang<sup>1</sup>, WANG Hong-jian<sup>1</sup>, ZHANG Sheng-wei<sup>1</sup>, CHENG Yue-yun<sup>2</sup>,  
YI Min<sup>1</sup>, CHEN Xue<sup>1</sup>, LIU Shi-hua<sup>2</sup>

(1. Center for Space Science and Applied Research, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Graduate University, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** At millimeter-wave frequencies, corrugated horns are difficult and expensive to manufacture. As an alternative, a smooth-walled spline-profile horn constituted by sin-profile and Gaussian-profile is presented in this thesis. Its electrical property was calculated using commercially available finite element software, high frequency structure simulator (HFSS) of ANSOFT. The Gaussian coupling efficiency of the horn was calculated using quasi-optical theory. The designed horn was measured using high frequency planar near-field antenna testing system. Testing results indicate that, compared with corrugated horn, the sidelobe of smooth-walled spline-profile horn decreased 6.59 dB, its gain increased 0.5 dB, Gaussian coupling efficiency increased 0.9%, total length shortened 15.8 mm and it was much easier to manufacture. It seems that the presented horn has a high performance and it can be used as a feed source of antenna in stead of corrugated horn.

**Key words:** corrugated horn; smooth-walled spline-profile horn; Gaussian coupling efficiency; millimeter-wave

干涉式综合孔径辐射计是一种利用干涉测量技术来获得高分辨率遥感图像的被动微波成像仪, 它利用稀疏的小口径天线阵列来实现大的实孔径天线的高分辨率, 多采用喇叭馈源组阵。为减小邻近馈源之间的互耦和空间杂波的干扰, 综合孔径辐射计

要求馈源波束低副瓣、低交叉极化、旋转对称性良好、主波束效率高, 馈源的性能对整个系统起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。

近年来, 波纹喇叭一直被用作一种高性能、宽频带、方向图对称良好、低交叉极化的高性能馈源, 广

收稿日期: 2010-04-21

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2007AA120700)

作者简介: 刘广(1984—), 男, 博士生, E-mail: liuguang@nmrs.ac.cn; 王宏建(1969—), 男, 博士, 研究员。

泛用于微波遥感、射电天文等领域。然而波纹喇叭的加工是非常困难而且昂贵的,机械加工对于20 GHz以下的频率是可以生产加工的,但是对于短毫米波频段,由于波纹喇叭的尺寸较小,波纹数目多,导致普通机械加工显得无能为力。加工费昂贵、废品率高,往往加工出来的天线性能与设计结果相差很大。

为了解决这个问题,一种方法是使用电子成形技术对波纹喇叭进行加工,首先采用铝制成和波纹喇叭内径相反的模子心轴,利用电子成形在上面敷上铜,并利用溶心剂将心轴腐蚀掉,从而得到波纹喇叭。但是随着频率的升高,电子成形技术废品率高、加工周期长、加工费昂贵,限制了此方法的应用。曲线轮廓光壁喇叭天线,是以曲线绕对称轴旋转而成的光壁喇叭天线,它可以通过喇叭轮廓曲线的自由变化对波导模进行变换,有效地将输入的TE<sub>11</sub>模转换为与自由空间相匹配的高斯波束<sup>[2]</sup>。由于喇叭中产生的高次模相速大于光速,会产生方向图畸变,因此要想使得波导与自由空间匹配,必须使高次模在喇叭口面消失,使口面只辐射基模能量,从而产生良好的方向图<sup>[3]</sup>和较高的辐射效率。

曲线轮廓光壁喇叭天线可以选择的曲线种类很多,包括抛物线、指数曲线、 $x^p$ 曲线、 $\sin^p$ 曲线、多项式曲线等<sup>[4]</sup>。但是以往的研究结果表明,采用单一曲线的曲线轮廓喇叭天线的性能很难与波纹喇叭相比。本文首先研究 $\sin^p$ ( $p$ 为指数)曲线轮廓喇叭,仿真不同 $p$ 的方向图和交叉极化电平,确定 $p$ 的最优值。然后引入高斯曲线与 $\sin^p$ ( $p$ 取最优值)曲线进行组合,构造出新型曲线轮廓喇叭天线,并进行优化仿真计算,成功研制出增益高、副瓣电平低、高斯耦合效率高而且易于加工的新型馈源,解决了短毫米波段波纹喇叭加工费昂贵、废品率高、加工困难的问题。

## 1 $\sin^p$ 曲线轮廓喇叭

$\sin^p$  曲线轮廓喇叭中,  $p$  可以取任意值( $0 \sim \infty$ ),但是一般 $p$ 不大于2,接下来就保持喇叭的输入半径、输出半径和喇叭长度不变,分析参数 $p$  分别取0.75,1.00和2.00时对天线副瓣和交叉极化电平的影响,喇叭的工作频点取53 GHz。 $p$  分别取0.75,1.00和2.00时, $\sin^p$  曲线轮廓如图1所示,喇叭输入半径3.0 mm,输出半径9.1 mm,长度34.3 mm。喇叭取不同 $p$  的方向图如图2所示,图3是交叉极化电平。

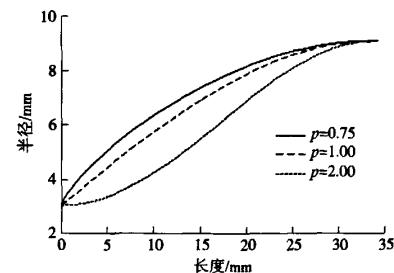


图1  $\sin^p$ ( $p=0.75, 1.00$  和  $2.00$ )的曲线轮廓喇叭  
Fig. 1  $\sin^p$ ( $p=0.75, 1.00$  and  $2.00$ ) profile horn

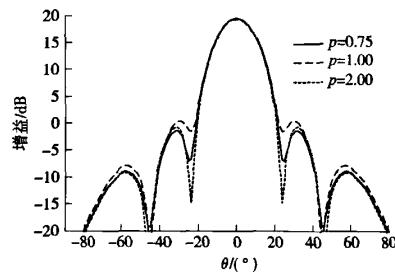


图2  $\sin^p$ ( $p=0.75, 1.00$  和  $2.00$ )曲线喇叭的方向图  
Fig. 2 Radiation pattern of  $\sin^p$ ( $p=0.75, 1.00, 2.00$ ) profile horn

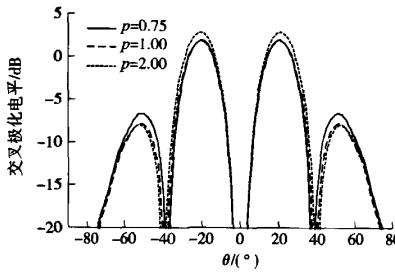


图3  $\sin^p$ ( $p=0.75, 1.00$  和  $2.00$ )曲线喇叭的交叉极化电平  
Fig. 3 Cross-polarization level of  $\sin^p$ ( $p=0.75, 1.00, 2.00$ ) profile horn

从图中可以看出,随着 $p$ 的增大,副瓣增大,交叉极化电平上升,天线性能降低。当 $p=0.75$ 时, $\sin^p$  曲线轮廓喇叭能够得到较低的副瓣和交叉极化电平。

## 2 曲线轮廓光壁喇叭天线设计与仿真

然而当 $p=0.75$ 时, $\sin^p$  曲线喇叭的交叉极化电平为-17 dB,增益为18.5 dB,无法满足对馈源的指标要求,必须加以改进。由于 $\sin^{0.75}$  曲线的末端和高斯曲线的前端曲率都为0,两种曲线能够平滑地连接起来,下面就对这种由 $\sin^{0.75}$  曲线和高斯曲线组合而成的曲线轮廓喇叭天线进行深入研究和分析。

### 2.1 曲线轮廓方程

曲线轮廓的方程如式(1)所示,它由 $\sin^{0.75}$  曲线和高斯曲线组成。

$$r(z) = \begin{cases} r_i + (R_a - r_i) \sin^{0.75} \left( \frac{\pi z}{2L_1} \right) & 0 \leq z \leq L_1 \\ R_a \sqrt{1 + \left( \frac{z - L_1}{q} \right)^2} & L_1 \leq z \leq L \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $r_i$  为输入圆波导半径;  $L_1$  为  $\sin^{0.75}$  曲线的长度;  $L$  为喇叭的总长度;  $R_a$  既是  $\sin^{0.75}$  曲线段的输出半径, 也是高斯曲线段的输入半径. 喇叭的输出口径由  $q, L_1, L$  和  $R_a$  共同决定. 为了对比高斯曲线段对馈源性能的改善,  $\sin^p (p=0.75)$  曲线保持图 1 中的设计不变, 因此  $r_i = 3$  mm,  $L_1 = 34.3$  mm,  $R_a = 9.1$  mm, 仅对  $L$  和  $q$  参数进行优化. 其中  $q$  为一个参数, 无实际意义, 只对喇叭的输出口径有影响.

## 2.2 优化仿真

利用 HFSS 的优化功能对  $L$  和  $q$  进行优化, 优化目标为交叉极化电平小于  $-30$  dB, 工作频率为 53 GHz, 优化后所得喇叭轮廓如图 4 所示, 喇叭总长 93.2 mm, 输出半径为 14.9 mm.

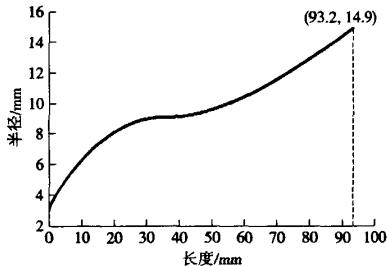


图 4 喇叭轮廓的优化结果  
Fig. 4 Optimized result of the horn's profile

喇叭在 53 GHz 的  $E$  面和  $H$  面方向图和交叉极化电平, 如图 5 所示. 将图 5 与图 2、图 3 对比可以发现, 当  $\sin^p (p=0.75)$  曲线后端加载一段高斯曲线后, 方向图副瓣降低了 6 dB, 交叉极化电平降低了 12 dB, 增益增大了 4 dB, 说明高斯曲线段能够明显增大喇叭的模转换效率, 降低馈源的交叉极化电平和副瓣, 对馈源性能有明显的改善. 加载高斯曲线段后, 馈源的增益为 23.1 dB, 副瓣电平为  $-31$  dB, 交叉极化电平为  $-32$  dB.

在位于延庆的中科院空间中心近场测试实验室, 利用高频平面近场测试系统对曲线轮廓喇叭的近场幅值和相位进行测试, 通过近远场变换得到天线的远场方向图. 测得曲线轮廓喇叭 53 GHz 频点的方向图如图 6 所示. 将测试结果与数值计算结果进行比对, 数值计算的天线增益为 23.1 dB, 旁瓣电

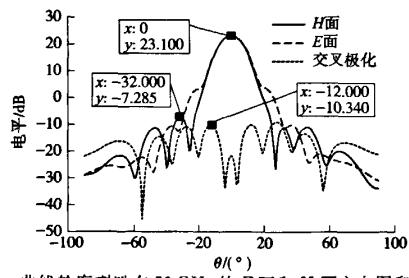


图 5 曲线轮廓喇叭在 53 GHz 的  $E$  面和  $H$  面方向图和交叉极化电平  
Fig. 5 Theoretical radiation pattern and cross-polarization level of spline-profile horn at 53 GHz

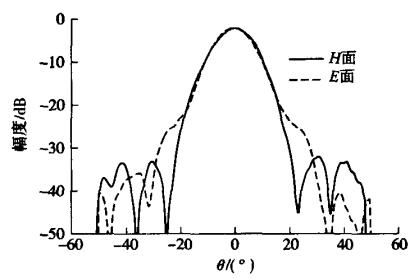


图 6 曲线轮廓喇叭 53 GHz 频点的测试方向图  
Fig. 6 Measured radiation pattern of the spline-profile horn at 53 GHz

平为  $-30.40$  dB, 3 dB 波束宽度为  $13.8^\circ$ , 天线的测试增益为 23.1 dB, 旁瓣电平为  $-30.34$  dB, 3 dB 波束宽度为  $13.32^\circ$ , 实测结果与数值计算结果基本一致, 而且测得的  $E$  面和  $H$  面的方向图等化性良好.

图 7 分别是曲线轮廓喇叭分别在 50 和 56 GHz

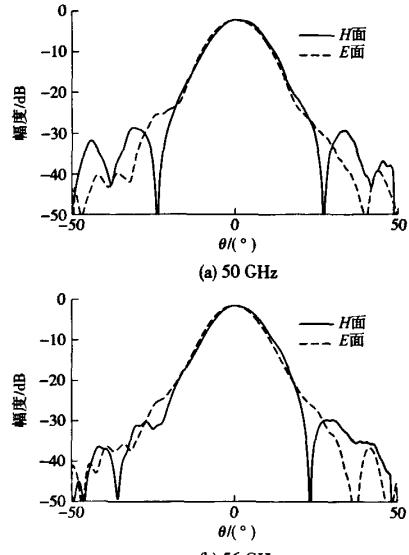


图 7 曲线轮廓喇叭在 50 GHz 和 56 GHz 的测试方向图  
Fig. 7 Measured radiation patterns of the spline-profile horn at 50 GHz and 56 GHz

测得的方向图。天线工作在 50 GHz 时,增益为 22.1 dB,旁瓣电平为 -28.20 dB,3 dB 波束宽度为 14.7°;天线工作在 56 GHz 时,增益为 22.8 dB,旁瓣电平为 -30.00 dB,3 dB 波束宽度为 12.7°。由测试结果可见,这种曲线轮廓喇叭在 12% 的相对带宽内,增益大于 22 dB,旁瓣电平小于 -28.00 dB,波束宽度小于 14.7°。并且在 -15°~15° 的方向图范围内,  $E$  面和  $H$  面波束电平的差小于 1 dB,方向图旋转对称性良好,满足天线指标要求。

### 2.3 高斯耦合效率

在毫米以及亚毫米频段,高斯波束能够实现真空中无损传输,因此高斯耦合效率是衡量高频天线性能的一项重要指标<sup>[5]</sup>。

高斯波束中基模占绝大部分能量,因此设计天线时应尽量使天线与高斯基模耦合效率最大<sup>[6-7]</sup>。高斯基模表达式为

$$E_{\text{Gauss}}(r) = \hat{\epsilon} \exp\left(-\frac{r^2}{R_1^2} - j\frac{\pi r^2}{\lambda R}\right). \quad (2)$$

式中:  $r$  表示场点与  $z$  轴的距离;  $\hat{\epsilon}$  为高斯基模的极化矢量;  $R_1$  为  $d$  处的波束半径,当  $r=R_1$  时,场强衰减为中心最大值的  $1/e$ ;  $R$  为  $d$  处的等相面曲率半径,  $d$  表示波束与束腰位置的距离。参数表达式分别为

$$R_1 = R_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda d}{\pi R_0^2} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (3)$$

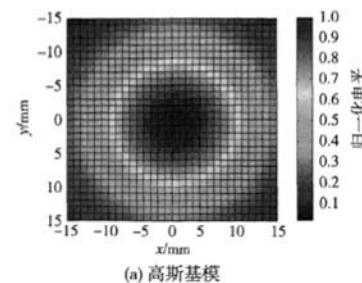
$$R = d + \left( \frac{\pi R_0^2}{\lambda} \right)^2 / d. \quad (4)$$

式中  $R_0$  为高斯波束的束腰半径。

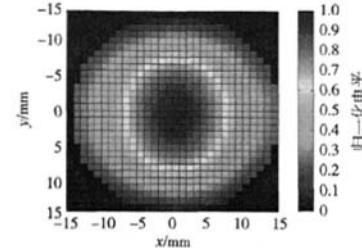
假设喇叭天线的口径场表达式为  $F(r, \phi, d)$ ,采用柱坐标表示,天线辐射方向为  $z$  轴正方向,  $z$  轴与喇叭的口径面垂直,  $d$  为定值,一般取值 3~5 个波长。假设  $\hat{\epsilon}_{\text{co}}$  为高斯基模的同极化单位矢量,则天线的高斯耦合效率为<sup>[5]</sup>

$$\eta_{\text{Gauss}} = \frac{\left| \iint [\hat{\epsilon}_{\text{co}} F(r, \phi, d)] e^{-\left(\frac{r}{R_1(d)}\right)^2} e^{-j\left(\frac{r^2}{2R_1(d)}\right)} r dr d\phi \right|^2}{\iint |F(r, \phi, d)|^2 r dr d\phi \iint e^{-2\left(\frac{r}{R_1(d)}\right)^2} r dr d\phi}. \quad (5)$$

高斯基模场分布和曲线轮廓光壁喇叭天线的口径场分布分别如图 8 所示,由图 8 可见,曲线轮廓光壁喇叭天线的口径场与高斯基模场分布极为相似。应用式(5)计算曲线轮廓光壁喇叭天线的高斯耦合效率为 98.9%。



(a) 高斯基模



(b) 曲线轮廓光壁喇叭

图 8 高斯基模和曲线轮廓光壁喇叭天线的口径场分布  
Fig. 8 Fundamental Gaussian mode and aperture-field of the spline-profile horn

### 2.4 曲线轮廓光壁喇叭与波纹喇叭的性能比较

为证明这种新型馈源的性能,将曲线轮廓光壁喇叭天线与一个同样工作在 50~56 GHz 的经过设计优化的波纹喇叭馈源进行对比<sup>[8-9]</sup>,此波纹喇叭长 110 mm,输出口径 31.2 mm,共有 55 个波纹,采用电子成形技术进行加工,同样采用平面近场测试系统进行测试,测得波纹喇叭在 53 GHz 频点的方向图如图 9 所示。波纹喇叭的口径场分布如图 10 所

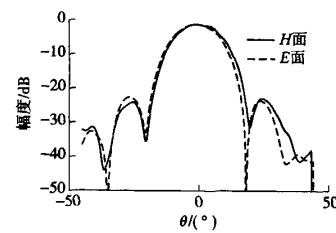


图 9 波纹喇叭在 53 GHz 的测试方向图  
Fig. 9 Measured radiation pattern of the corrugated horn at 53 GHz

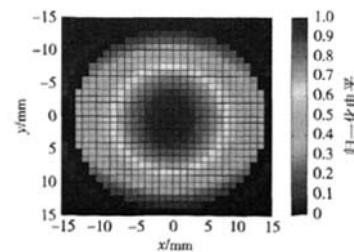


图 10 波纹喇叭的口径场分布

Fig. 10 Aperture-field of the corrugated horn

示,应用式(5)计算波纹喇叭的高斯耦合效率为98%。

将波纹喇叭的测试结果与曲线轮廓喇叭测试结果进行对比,如表1所示。

表1 波纹喇叭与曲线轮廓光壁喇叭的测试结果对比  
Tab.1 Contrast of test results between corrugated horn and spline-profile horn

喇叭类型	喇叭长	输出口	增益/副瓣电平/dB	3 dB 波瓣宽度/(°)	高斯耦合效率/%
波纹喇叭	109.0	31.2	22.6 -23.75	15.74	98.0
曲线轮廓喇叭	93.2	29.8	23.1 -30.34	13.32	98.9

由表1可得以下结论。

① 曲线轮廓喇叭的长度相比波纹喇叭缩短了14%,结构上比波纹喇叭更为紧凑,更加满足星载天线的要求。

② 波纹喇叭与曲线轮廓喇叭的输出口径相差不大,但是由于波纹喇叭需要较大的壁厚用于开槽,使得波纹喇叭的横向尺寸增大,限制了其在阵元间隔较小的阵列天线之中的应用。

③ 曲线轮廓喇叭的增益略大于波纹喇叭天线的增益。

④ 曲线轮廓喇叭的副瓣电平比波纹喇叭的副瓣电平低6.59 dB,低副瓣电平能够有效降低邻近馈源之间的电磁干扰,有利于目标信号的有效获取。

⑤ 曲线轮廓喇叭较窄的波束宽度对于提高遥感系统的分辨率起着决定性的作用。

⑥ 曲线轮廓喇叭的高斯耦合效率为98.9%,意味着曲线轮廓所辐射的波束与自由空间的匹配性更好,在自由空间内的传输损耗更低,可以实现遥感系统更远距离的探测。

⑦ 在短毫米波段,波纹喇叭普遍采用电子成形技术进行加工,电子成形技术不仅工序繁冗,而且费用昂贵、废品率高,不适合批量生产。而曲线轮廓喇叭天线的内壁是光滑的,采用精密数控机床就可以实现加工生产,加工过程简单,加工费用也只是波纹喇叭的1/5,而且废品率远远低于波纹喇叭,易于批量生产,适合作为阵元应用于阵列天线之中。

测试结果以及加工难度对比表明,曲线轮廓喇叭天线的增益高、副瓣低、3 dB 波束宽度窄,所辐射的能量更集中在主波束范围内,从而可实现更高的主波束效率,而且较高的高斯耦合效率使得波束在真空中传输损耗更小,更加满足航天微波遥感系统对馈源的性能要求。

### 3 结 论

提出一种由 $\sin^{0.75}$ 曲线和高斯曲线组成的曲线轮廓光壁喇叭天线,解决短毫米波段波纹喇叭加工困难、加工费昂贵、废品率高的问题。对这种曲线轮廓光壁喇叭天线进行优化仿真并实际加工测试,测试结果与数值计算结果一致性良好。分别从电性能和加工方面将曲线轮廓喇叭与波纹喇叭进行对比,对比表明,这种曲线轮廓光壁喇叭天线的增益、副瓣电平和高斯耦合效率均优于波纹喇叭天线,而且结构紧凑、易于加工、加工费廉价、废品率低,非常适合批量生产。因此在短毫米波段,曲线轮廓光壁喇叭满足微波遥感、卫星通信和射电天文学等领域的技术需求和工程需求,为短毫米波段馈源设计提供了一种新思路。

#### 参考文献:

- [1] Plaum B. Optimization of global earth coverage horns[C]// Proceedings of JINA 2002 International Symposium Antennas. Nice, France:[s. n.], 2002:371 - 374.
- [2] Jensen I. A smooth-walled profiled horn antenna with low cross-polarization generated by the particle swarm optimization method [C] // Proceedings of 28th ESA Antenna Workshop. Noordwijk, Netherland:[s. n.], 2005:435 - 441.
- [3] Granet C, Bird T S, James G L. Compact multimode horn with low sidelobes for global earth coverage[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2000,48:1125 - 1133.
- [4] Granet C. Profile options for feed horn design[C]// Proceedings of Asia Pacific Microwave Conference. Sydney, Australia:[s. n.], 2000:1448 - 1452.
- [5] Rebeiz G M. Millimeter-wave and terahertz integrated circuit antennas[J]. Roc of the IEEE, 1992,80(11): 1748 - 1770.
- [6] Erikson N, Goldsmith P, Predmore C, et al. A 15 element imaging array for 100 GHz[J]. IEEE MTT-S International Symposium Digest, 1990,40:973 - 976.
- [7] del Rio C, Gonzalo R, Sorolla M. High purity Gaussian beam excitation by optimal horn design[C]//Proceedings of ISAP'96. Chiba, Japan:[s. n.], 1996:1133 - 1136.
- [8] Clarricoats P J B. Corrugated horns for microwave antennas [M]. Columbus, OH, USA: Short Run Press, 1984.
- [9] Ramón Gonzalo, Jorge Teniente, Carlos del Río, et al. New approach to the design of corrugated horn antennas[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2004,52:848 - 854.

(责任编辑:刘芳)

## 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](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>