

文章编号 1005-0388(2008)02-0229-06

一种有效的天线三维辐射方向图计算方法*

焦永昌[☆] 文 园 张福顺

(西安电子科技大学, 天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 提出了一种根据已知的天线 E 面和 H 面方向图计算天线的三维辐射方向图的近似算法。以全向和定向天线为例, 仿真比较了此算法和两种已有算法计算得到的天线三维辐射方向图与理论结果之间的误差。结果表明, 该算法误差较小, 可以有效地计算天线的三维辐射方向图。根据生成的三维辐射方向图, 计算了天线的方向性系数, 所得结果与理论值吻合良好。

关键词 天线; 三维辐射方向图; 算法; 方向性系数

中图分类号 TN820 **文献标志码** A

An efficient algorithm for calculating three-dimensional radiation patterns of antennas

JIAO Yong-chang WEN Yuan ZHANG Fu-shun

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology,
Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract This paper presents an approximation algorithm for calculating the three-dimensional (3D) radiation patterns of antennas based on their H-plane and E-plane patterns. By using the proposed algorithm, the 3D radiation patterns of the omnidirectional antenna and the directional antenna are calculated, and the absolute errors of the obtained results from the theoretical patterns are then compared with those provided by other techniques. The comparison results indicate that the proposed algorithm exhibits low approximation errors, which can be used to calculating the 3D radiation patterns of antennas efficiently. According to the generated three-dimensional radiation patterns, the directivities of the antennas are also calculated, which are in good agreement with the theoretical values.

Key words antenna; three-dimensional radiation patterns; algorithm; directivity

1 引言

随着现代移动通信网络的发展, 基站数目增多, 蜂窝网覆盖范围减小, 基站到用户的辐射角不能笼统地近似为零度, 仅仅了解水平面和垂直面辐射特性已不能满足设计需求, 因此需要对天线在全空间的辐射特性进行描述。采用实验的方法获取天线的近似三维(3D)辐射方向图不仅工作量大, 而且往往

也只能得出有限多个面上的辐射方向图, 因此有必要提出新的算法, 对天线的 3D 辐射方向图进行近似计算。

天线测量时通常仅测量其 E 面和 H 面辐射方向图。根据 E 面和 H 面方向图计算方向性系数, 准确度往往受所选择的经验公式制约。如能获得天线的 3D 辐射方向图, 则可根据 3D 方向图精确计算出天线的方向性系数。

* 收稿日期: 2006-09-01.

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(No. 60171045)

☆E-mail: ychjiao@xidian.edu.cn

SA算法是目前最常用的3D方向图近似算法^[6],该算法简便易行,对于全向天线有很好的近似效果。从目前国内发表的相关论文来看,目前天线3D辐射方向图近似计算主要存在以下的问题:一是没有给出近似结果与理论结果间的误差数据,如文献[1]使用几何方法生成3D方向图,但是并未对其精确性做出评价,文献[2]采用典型的数学插值方法由有限多个平面上的实测方向图近似计算3D方向图,只在近似结果间进行了比较而未与实测结果进行比较;二是近似效果不够理想,如文献[3,4]利用分别位于水平面和垂直面上的四个已知取样点对3D方向图进行插值计算,对于半波对称振子3D方向图的计算误差最高为12dB,文献[5]提出的有理逼近和MBPE相结合的算法在计算半波对称振子方向图时仍然存在一定误差,文献[6]提出的近似算法在计算场强值较小点时误差较大,不利于天线方向性系数的计算^[1~10]。

本文提出一种新的近似算法,利用E面和H面方向图来计算全向和定向天线的3D辐射方向图,给出了其所得结果与理论3D辐射方向图之间的误差,并与SA算法、文献[6]中提出的近似算法所得结果与理论3D方向图之间的误差进行了比较。结果表明,本文所提出的算法对全向和定向天线的3D方向图的计算精度均优于SA算法,而在计算场强较弱点时近似效果明显优于文献[6]所提出的近似算法。根据生成的3D辐射方向图,计算得到的最大辐射方向上的方向性系数也与理论值吻合良好。

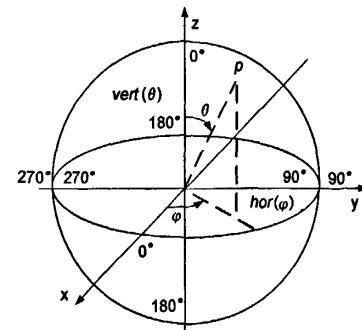
2 新计算方法

天线的E面和H面方向图可通过测量或理论计算获得。令E面和H面分别与水平面和垂直面重合,水平面为 $\theta=90^\circ$ 平面,垂直面为 $\varphi=90^\circ$ 平面,如图1(a)所示。将三维空间划分为 360×180 个网格,如图1(b)所示。下面根据水平面和垂直面归一化天线辐射方向图(分别记为 $hor(\varphi)$ 和 $vert(\theta)$)重构天线的3D辐射方向图。当考察点位于右半空间($0^\circ < \varphi \leq 180^\circ$)时,取 $hor'(\varphi) = hor(\varphi)$ 和 $vert'(\theta) = vert(\theta)$;当观察点位于左半空间($180^\circ < \varphi \leq 360^\circ$)时,取 $hor'(\varphi) = hor(\varphi)$ 和 $vert'(\theta) = vert(360^\circ - \theta)$ 。dB方向图分别表示为:

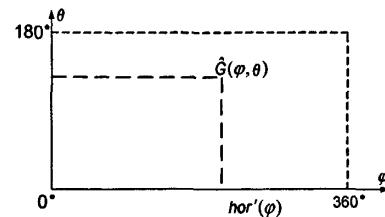
$$\begin{cases} G_H(\varphi) = 20 \lg hor(\varphi) \\ G_V(\theta) = 20 \lg vert(\theta) \end{cases}$$

对于任意点 $P(\varphi, \theta)$,天线的三维dB辐射方向图 $\hat{G}(\varphi, \theta)$ 可近似为:

当 $\sqrt{v_1^2 + v_2^2} \neq 0$ 时,



(a) 空间几何结构示意图



(b) 三维空间划分示意图

图1

$$\hat{G}(\varphi, \theta) = \frac{G_H(\varphi) \cdot v_1 + G_V(\theta) \cdot v_2}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \cdot (1 - u) +$$

$$(G_H(\varphi) + G_V(\theta)) \cdot u,$$

$$\text{式中: } \begin{cases} v_1(\varphi, \theta) = w_1 \cdot [1 - w_2], \\ v_2(\varphi, \theta) = w_2 \cdot [1 - w_1], \end{cases}$$

$$\begin{cases} w_1 = \cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(\theta), \\ w_2 = \cos^2(\theta), \end{cases}$$

$$u = \begin{cases} 1 & \varphi = 90^\circ, 270^\circ \\ & \text{or} \\ 1 - hor(\varphi) & \theta = 90^\circ \\ & \text{else} \end{cases}$$

当 $\sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 0$ 时, $w_1 = w_2 = 1$ 或 $w_1 = w_2 = 0$,而 w_1 与 w_2 不可能同时为1,故仅需考虑 $w_1 = w_2 = 0$ 情况。此时观察点位于y轴上。为简便起见,取 $v_1(\varphi, \theta) = 1, v_2(\varphi, \theta) = 0$,则 $\hat{G}(\varphi, \theta) = G_H(\varphi)$ 。

在新算法中,采用天线的E面和H面方向图来共同确定天线的3D辐射方向图,而E面和H面方向图对取样点处场强值的影响受其与取样点间的距离的制约。本文中将使用此算法对天线的3D辐射方向图进行近似计算。根据生成的3D辐射方向图计算天线的方向性系数,最大辐射方向上的方向性系数为:

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F^2(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta d\varphi},$$

式中 $F(\varphi, \theta) = 10^{\hat{G}(\varphi, \theta)/20}$ 。

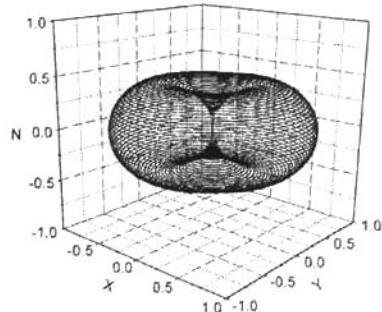
3 计算结果比较

为验证文中算法的精确性,引入误差函数: $\mu(\varphi, \theta) = \hat{G}(\varphi, \theta) - G(\varphi, \theta)$,其中 \hat{G} 为近似算法所得到的三维 dB 方向图, G 为三维理论 dB 方向图或由标准软件仿真得到的三维 dB 方向图。

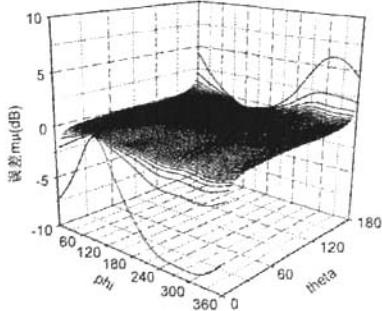
3.1 全向天线

全向天线的理论辐射方向图关于 z 轴对称。对于任意 φ 值,其水平面归一化辐射方向图 $hor(\varphi)$ 均为 1($G_H = 0$ dB)。

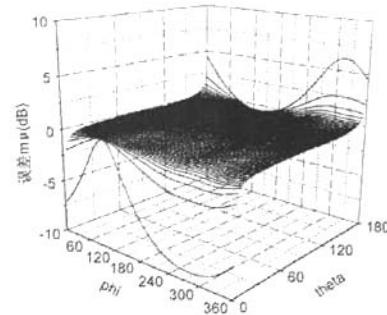
以半波对称振子天线为例,其归一化场强方向图为 $F(\theta) = \cos(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)) / \sin\theta$,最大辐射方向上的方向性系数为 $D \approx 2.15$ dB^[11]。采用 SA 算法、文献[6]算法和本文算法得到的三维方向图的误差函数 μ 均为 0。根据本文算法得到的 3D 方向图计算出的最大辐射方向上的方向性系数为 $\hat{D} \approx 2.15$ dB,与理论结果完全一致。考虑到实际中全向天线水平面方向图不可能为理想圆形,故对由标准软件仿真得到的半波对称振子天线 3D 方向图进行了计算,结果如图 2(a)所示。



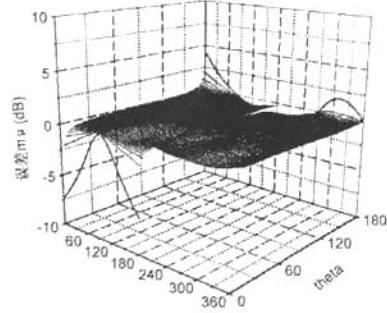
(a) 半波对称振子 3D 辐射方向图仿真结果



(b) SA 算法误差



(c) 文献[6]算法误差



(d) 本文算法误差

图 2

利用该标准软件仿真得到半波对称振子的 E 面和 H 面方向图,再采用三种算法分别计算了天线的 3D 辐射方向图,它们的误差函数 $\mu(\varphi, \theta)$ 如图 2 (b)、(c)、(d) 所示。表 1 分别给出了采用三种近似算法重构的天线 3D 方向图与仿真得到的 3D 方向图之间的误差数据的最小值 μ_{min} 、最大值 μ_{max} 、平均值 μ_{ave} 、绝对值平均数 μ_{abs} 和绝对值标准差 σ 。结果表明,计算全向天线 3D 方向图时本文方法的精度略优于 SA 算法和文献[6]算法。

表 1 半波对称振子天线误差数据统计结果对比

(单位: dB)

	μ_{min}	μ_{max}	μ_{ave}	$\mu_{abs} \pm \sigma$
SA 算法	-9.23	6.08	-0.20	0.31 ± 0.67
文献[6]算法	-9.20	6.30	-0.16	0.29 ± 0.66
本文算法	-7.17	4.32	-0.14	0.18 ± 0.33

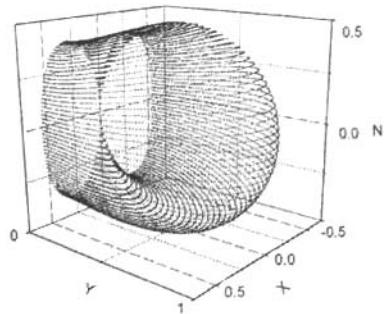
3.2 定向天线

下面分别对微带天线(宽波束)和喇叭天线(窄

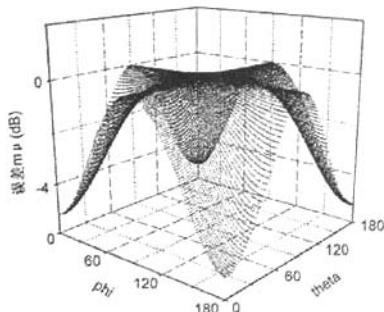
波束)的3D辐射方向图进行了近似计算。

3.2.1 微带天线

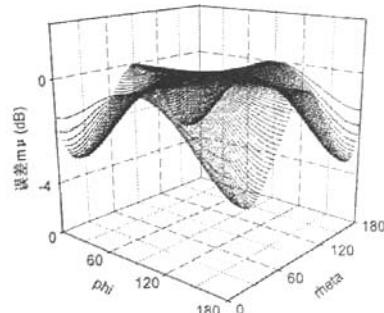
以频率为3.1 GHz,参数为 $W=10\text{ mm}$, $L=30.5\text{ mm}$ 的微带天线为例,其理论3D辐射方向图如图3(a)所示^[12]。微带天线理论方向图仅计算其在前向的辐射,故这里仅对其前向3D方向图进行近似计算和比较。采用三种算法得出的3D辐射方向图的误差函数 $\mu(\varphi, \theta)$ 如图3(b)、(c)、(d)所示。



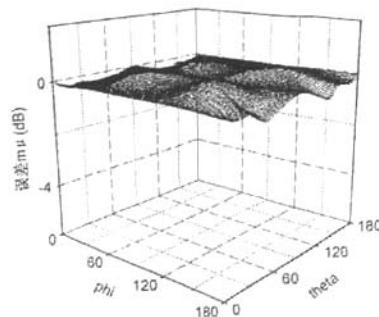
(a) 微带天线3D辐射方向图



(b) SA算法误差



(c) 文献[6]算法误差



(d) 本文算法误差

图3

表2给出了三种近似算法的误差的数据统计结果,数学符号的含义同表1,可以看出本文算法对于近似宽波束定向天线3D辐射方向图的精确度优于SA算法和文献[6]算法。根据理论方向图计算出的该天线最大辐射方向上的方向性系数 $D \approx 6.46\text{ dB}$ 。而根据本文算法得到的3D方向图算出的该微带天线的方向性系数为 $D \approx 6.37\text{ dB}$,与理论值吻合良好。

表2 微带天线误差数据统计结果对比(单位:dB)

	μ_{\min}	μ_{\max}	μ_{avr}	$\mu_{\text{avr}} \pm \sigma$
SA算法	-5.21	0	-1.28	1.28 ± 1.45
文献[6]算法	-3.20	9.54×10^{-7}	-0.86	0.86 ± 0.93
本文算法	-0.58	0.45	3.02×10^{-2}	0.14 ± 0.13

3.2.2 角锥喇叭天线

以中心频率为2.4 GHz,参数为 $A=368.5\text{ mm}$, $B=272.97\text{ mm}$, $a=109.22\text{ mm}$, $b=54.61\text{ mm}$ 的角锥喇叭天线为例,其理论3D辐射方向图如图4(a)所示^[13],采用三种算法得出的3D方向图误差函数 $\mu(\varphi, \theta)$ 如图4(b)、(c)、(d)所示。根据理论3D辐射方向图计算出的最大辐射方向上的方向性系数为 $D \approx 15.79\text{ dB}$,而根据本文算法得到的3D辐射方向图计算出的该喇叭天线的方向性系数为 $D \approx 15.46\text{ dB}$,两者吻合良好。

表3给出了三种近似算法的误差在前向和后向的数据统计结果(喇叭天线后向辐射较小,故将前向和后向误差数据分别进行统计和比较),可以看出:本文算法在近似窄波束定向天线的3D辐射方向图时的精确度优于SA算法;当取样点处场强较小时,本文算法的精确度优于SA算法和文献[6]算法。

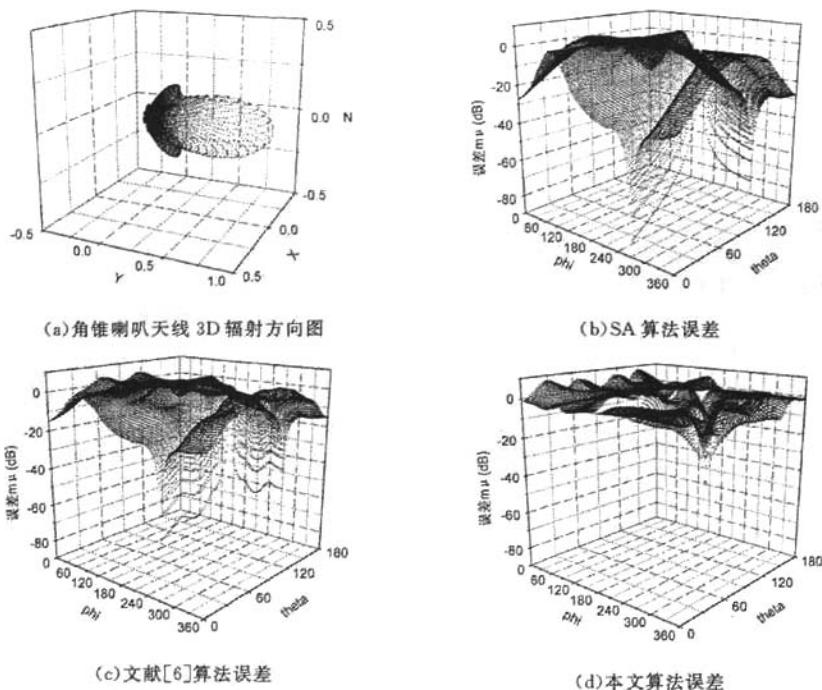


图 4

上面给出的计算结果表明,本文提出的新算法近似计算宽波束和窄波束定向天线的3D辐射方向图的精度优于SA算法,在近似计算场强值较小的取样点时,精确度优于SA算法和文献[6]算法。

4 结论

本文提出了一种新的近似算法,根据已知E面和H面方向图计算天线的3D辐射方向图。新算法计算量小,易于编程计算。与SA算法以及文献[6]

算法的对比结果表明,在计算全向天线3D辐射方向图时,三种算法的误差均很小,理想情况下甚至为0,而在计算定向天线3D辐射方向图时,本文算法的误差小于SA算法和文献[6]所提出的算法;当取样点处场强较低时,本文算法的精确度优于SA算法和文献[6]算法。根据本文算法生成的3D方向图计算得到的全向和定向天线的方向性系数均与理论值吻合良好,说明本文算法可以有效地计算一般天线的全空间辐射特性及其方向性系数。

表 3 喇叭天线误差数据统计结果对比(单位:dB)

	前向($0^\circ < \phi \leq 180^\circ$)				后向($180^\circ < \phi \leq 360^\circ$)			
	μ_{\min}	μ_{\max}	μ_{avr}	$\mu_{\text{avr}} \pm \sigma$	μ_{\min}	μ_{\max}	μ_{avr}	$\mu_{\text{avr}} \pm \sigma$
SA 算法	-27.21	1.14E-05	-5.93	5.93±8.93	-294.38	1.14E-05	-17.82	17.82±29.66
文献[6]算法	-14.98	3.79	-1.50	2.37±3.87	-271.13	4.10	-8.66	9.51±22.97
本文算法	-3.17	7.80	1.55	2.19±2.89	-40.13	4.20	-2.62	3.06±5.11

参考文献

- [1] W T A Lopes, G Glionna, and M S de Alencar. Generation of 3-D radiation patterns: A geometrical approach [C]. in Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf., VTC Spring, 2002, 2:741-744.
- [2] F Mikas and P Pechac. The 3-D approximation of an-

tenna radiation patterns [C]. in Proc. Inst. Elect. Eng. 12th Int. Conf. Antennas Propagat., ICAP, 2003:751-754.

- [3] F Gil, A R Claro, J M Ferreira, et al.. A 3-D extrapolation model for base station antennas' radiation patterns [C]. in Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.,

- VTC Fall, 1999, 3: 1341-1345.
- [4] F Gil, A R Claro, J M Ferreira, et al.. A 3-D interpolation method for base-station-antenna radiation patterns[J]. IEEE Antennas Propag. Mag., 2001. 43 (2):132-137.
- [5] 蒋鸿林等. 基于有理逼近和 MBPE 结合恢复天线方向图[J]. 电波科学学报, 2005, 20(6): 753-757.
Jiang H L, et al.. Combination rational approach and MBPE technology to resume antenna radiation patterns [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(6): 753-757.
- [6] Theodore G Vassiliadis, Antonis G Dimitriou, and George D Sergiadi. A Novel Technique for the Approximation of 3-D Antenna Radiation Patterns[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2005, 53(7):2212-2219.
- [7] Douglas H Werner, Rene J Allard. The Simultaneous Interpolation of Antenna Radiation Patterns in Both the Spatial and Frequency Domains Using Model-Based Parameter Estimation[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2000, 48(3): 383-392.
- [8] R J Allard, D H Werner, J S Zmyslo, et al.. Spectral domain interpolation of antenna radiation patterns using model-based parameter estimation and genetic algorithms[C]. in 14th Annnu. Rev. Progress Appl. Computat. Electromagn., Monterey, CA, 1998: 964-971.
- [9] R J Allard, D H Werner. The model-based parameter estimation of antenna radiation patterns using windowed interpolation and spherical harmonics [J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2003, 51(8):1891-1906.
- [10] R Roberts and D A McNamara. Interpolating radiation patterns using Prony's method [C]. in Proc. Symp. Antennas Propagat. Microwave Theory Tech.. Stellenbosch, South Africa, 1994: 151-154.
- [11] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M], 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [12] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [13] 江贤祚. 天线原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.

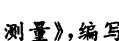


焦永昌 (1964—), 男, 山西人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 长期从事天线理论、设计、工程与测量方面的科研和教学工作。先后应邀赴日本、香港做高级访问学者。近年来, 共发表学术论文 70

余篇, 其中 40 余篇被 SCI、EI 检索, 主持和参加国家自然科学基金等多个科研项目, 曾获国家级和省部级科技奖 4 项。



文园 (1982—) 女, 陕西人, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业硕士研究生, 主要研究兴趣为天线分析与设计。



张福顺 (1960—), 男, 陕西人, 西安电子科技大学教授, 博士导师, 博士。主要研究方向为天线理论与工程及测量, 发表学术论文 50 余篇, 其中, 30 余篇被 EI 收录, 出版了专著《天线工程手册》和《天线测量》, 编写了《天线近场测量误差分析与系统》。

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>