

# 基于 CDMA 容量的星载多波束天线赋形分析

徐 非<sup>1,2</sup>, 梁 广<sup>1,2</sup>, 姜兴龙<sup>1,2</sup>, 龚文斌<sup>2</sup>

(1 中科院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050

2 上海微小卫星工程中心 上海 200050)

**摘 要:**建立 LEO-CDMA 通信系统容量分析模型,给出系统容量的计算方法,从系统容量的角度出发对比分析运用遗传算法赋形得到的波束增益模型和基于二阶锥形模型的波束增益模型的系统容量。结果表明,基于二阶锥形增益模型的系统容量约为基于赋形增益模型系统容量的两倍。分析结果为多波束接收天线的系统设计及赋形方案设计提供了理论依据。

**关键词:**多波束赋形; 星地通信; 功率控制; 系统容量

**中图分类号:**TN927+.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**CN11-1780(2011)04-0019-06

## 引 言

目前绝大多数移动卫星通信系统都采用码分多址 CDMA(Code Division Multiple Access)的多址方式。与其他的多址方式相比,CDMA 具有抗干扰性强、隐蔽性好、多址访问灵活、对非正交系统不需要系统同步、与同频通信系统之间的相互干扰小、对多普勒频移不敏感等优点。

对于低地球轨道 LEO(Low Earth Orbit)卫星而言,星下点到覆盖区域边缘路径损耗差异是不能忽略的,为了补偿路径损耗差异,达到“等通量”覆盖的目标,需要对波束赋形展宽<sup>[1,2]</sup>。常见的波束赋形以理想“等通量”为目标,运用遗传算法等优化算法求出赋形后的波束增益模型<sup>[2]</sup>,而这样的赋形方法往往存在旁瓣增益水平较高的问题。本文提出以二阶锥形模型完成波束覆盖,形成多波束增益模型,通过调整其内外层波束中心增益来逼近理想“等通量”。

此外,本文从系统容量的角度出发,通过建立 LEO 单星 CDMA 通信系统的容量分析模型,给出了系统容量量化计算的方法,对比分析了两种不同波束增益模型的系统容量,为多波束接收天线的系统设计及赋形方案选择提供了理论依据。

## 1 天线赋形多波束增益模型

为了达到“等通量”覆盖的目的,不仅要求天线宽角度高增益的覆盖,而且要求增益中间凹陷,边缘升高,且变化的幅度达到 5dB 以上,图 1 所示为理想等通量覆盖下的方向性增益图,波束覆盖角度为 53°,星下点增益为 11dBi,覆盖边缘增益为 16dBi<sup>[2]</sup>。图 2 所示为运用遗传算法等智能优化算法得到的低轨卫星通信环境的增益模型<sup>[2]</sup>。

理想等通量覆盖下的方向性增益图

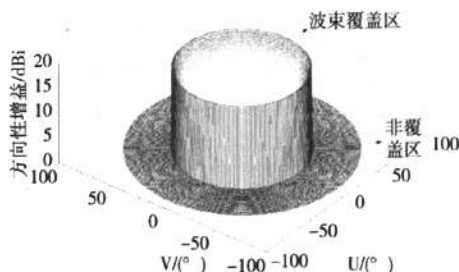


图 1 理想等通量覆盖下的方向性增益图

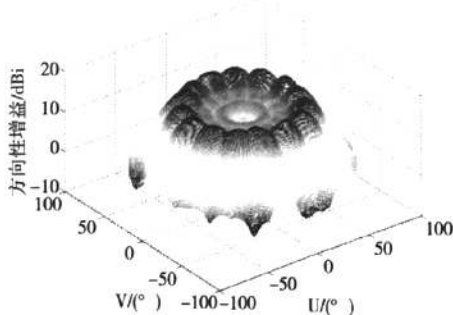


图 2 天线赋形波束增益模型

## 2 二阶锥形口径增益模型

有研究表明, 常规的多波束天线波束增益可以由如下的二阶锥形波束模型得到<sup>[3]</sup>。

$$G(\theta) = G_m \left[ \frac{(p+1)(1-T)}{(p+1)(1-T) + T} \left( \frac{2J_1(u)}{u} + 2^{p+1} p! \frac{T}{1-T} \frac{J_{p+1}(u)}{u^{p+1}} \right) \right]^2 \quad (1)$$

其中  $J_p(u)$  为  $p$  阶的第一类贝塞尔函数,  $p$  为阶数,  $p = 2$ ,  $T = 20\text{dB}$ ,  $G_m$  为波束中心的最大增益,  $\theta$  为某一用户相对波束中心的俯仰角。

$$u = \frac{\pi d_a \sin \theta}{\lambda_0} \quad (2)$$

其中,  $\lambda_0$  为载波波长,  $d_a$  为波束的等效口径。

图 3 为基于二阶锥形波束模型的多波束增益模型。图 4 为两种波束增益模型的截面对比, 从图 4 中可以看出, 赋形的波束模型能较好地拟合理想的方向性增益图。下面我们从系统容量的角度来比较两种增益模型的性能优劣。

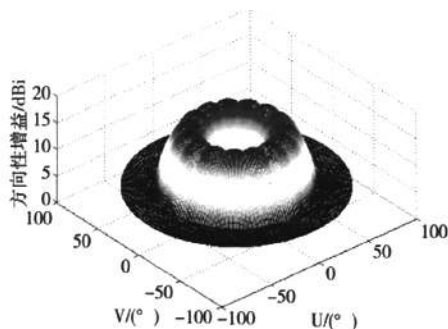


图 3 天线二阶锥形波束增益模型

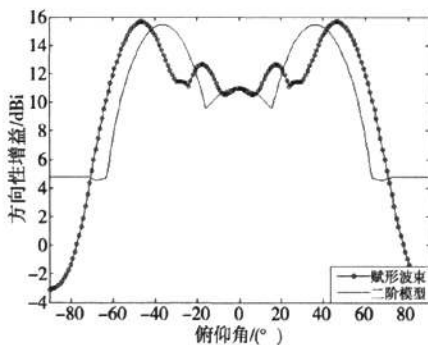


图 4 两种波束增益模型截面对比

## 3 基于多波束天线的 LMSS-CDMA 系统干扰分析

在通信系统信道纠错码选定的情况下, 给定的误码率水平对应的解调信噪比是固定的, 无线通信系统容量取决于干扰的大小。CDMA 系统是一个干扰受限系统, 卫星系统容量仍然会受到热噪声 (内部干扰) 和同频用户多址干扰 (外部干扰) 的影响<sup>[4,5]</sup>。通常, 在单星 CDMA 通信系统中, 产生干扰的主要原因有<sup>[6]</sup>: ①同一波束中其他用户产生的多址干扰; ②同一卫星中其他波束产生的干扰。

本文通过计算基于多波束天线的 LMSS-CDMA (Land Mobile Satellite System-CDMA) 通信系统的多址干扰来分析系统容量。图 5 为基于多波束天线的 LMSS-CDMA 系统的干扰计算模型。

卫星的覆盖区域被划分成 16 个波束小区 (图 5 中空白部分), 我们假设在每个波束小区内均匀分布

$N$  个同频用户。定义第  $j$  波束小区的第  $k$  个用户为  $(j, k)$ ,  $V$  表示在该卫星覆盖区域内与关注用户相关的其他用户集合。为了便于分析,将卫星覆盖区域分为  $S_1$  和  $S_2$  两个部分。 $S_1$  表示关注用户所在波束小区,  $S_2$  表示其余波束小区。

我们可以用接收信号比特信噪比来表示 CDMA 系统的通信质量,接收信号比特信噪比的表达式为

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B}{R} \times \frac{C}{I + \eta} \quad (3)$$

其中,  $B$  为系统带宽,  $R$  为比特速率,  $I$  为总的多址干扰,  $\eta$  为白噪声功率, 其功率谱密度为  $\eta_0$ ,  $C$  表示卫星天线接收到的载波功率。

如图 5 所示, 对于一个关注用户  $(j_0, k_0)$ ,  $C = \alpha_{j_0 k_0} EIRP_{j_0 k_0} G_{j_0}(\theta_{j_0 k_0}, \varphi_{j_0 k_0})$ , 干扰用户为  $(j, k) \in V$ , 可以将式(3)改写为

$$\begin{aligned} \frac{E_b}{N_0} &= \frac{B}{R} \times \frac{C}{I + \eta} \\ &= \frac{B}{R} \times \frac{\alpha_{j_0 k_0} EIRP_{j_0 k_0} G_{j_0}(\theta_{j_0 k_0}, \varphi_{j_0 k_0})}{\sum_{(j, k) \in V} \alpha_{jk} EIRP_{jk} G_{j_0}(\theta_{jk}, \varphi_{jk}) + \eta} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\alpha_{jk}$  表示从用户  $(j, k)$  到卫星的信道增益 ( $\alpha_{jk}^{-1}$  表示信道衰减),  $EIRP_{jk}$  表示用户的等效全向发射功率,  $(\theta_{jk}, \varphi_{jk})$  分别表示用户的俯仰角和方位角,  $G_j(\theta_{jk}, \varphi_{jk})$  表示用户  $(j, k)$  在波束  $j$  的多波束天线增益。

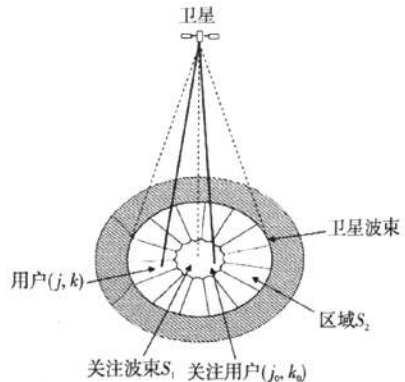


图 5 LMSS-CDMA 干扰分析模型

#### 4 LMSS-CDMA 系统容量计算与建模

在 CDMA 通信系统中,为了克服远近效应,使系统既能维持高质量通信,又不对占用同一信道的其他用户产生不应有的干扰,用户会受到其所在波束的功率控制<sup>[7]</sup>。有研究表明,被遮挡用户和非遮挡用户都会受到功率控制误差 PCE (Power Control Error) 的影响<sup>[8,9]</sup>,功率控制误差  $\gamma$  通常服从对数正态分布<sup>[10]</sup>

$$\gamma = e^{\delta} \quad (5)$$

其中,  $\delta$  为 0 均值、方差为  $\sigma_{\delta}^2$  的高斯变量。对于非遮挡用户,  $\sigma_{\delta}$  的值一般为 1dB; 对于被遮挡用户,  $\sigma_{\delta}$  的值一般为  $2 \sim 4\text{dB}$ <sup>[10]</sup>。

假设在理想的功率控制条件下,卫星天线接收到每个用户的功率为  $P_0$ 。干扰用户经增益调整后进入关注波束的信号功率为  $P_0 e^{\delta_{j_0 k_0}} \cdot \beta_{jk}^2$ , 其中  $\beta_{jk}^2$  的表达式为

$$\beta_{jk}^2 = \frac{G_{j_0}(\theta_{jk}, \varphi_{jk})}{G_j(\theta_{jk}, \varphi_{jk})} \quad (6)$$

表示基于关注波束天线增益和范围的补偿因子<sup>[11]</sup>。

显然,式(3)中的  $C$  即为  $P_0 \cdot e^{\delta_{j_0 k_0}}$ , 则

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B}{R} \frac{P_0 e^{\delta_{j_0 k_0}}}{I + \eta} \quad (7)$$

其中,总的多址干扰  $I$  包括同波束内用户干扰(来自  $S_1$  区域)和其余波束内用户干扰(来自  $S_2$  区域),  $I$  可以表示为

$$I = I_{S_1} + I_{S_2} = \sum_{\substack{(j, k) \in S_1 \\ (j, k) \neq (j_0, k_0)}} v P_0 e^{\delta_{jk}} + \sum_{(j, k) \in S_2} v P_0 e^{\delta_{jk}} \cdot \beta_{jk}^2 \quad (8)$$

其中,  $v$  为话音激活因子。则

$$I/P_0 = \sum_{\substack{(j, k) \in S_1 \\ (j, k) \neq (j_0, k_0)}} v e^{\delta_{jk}} + \sum_{(j, k) \in S_2} v e^{\delta_{jk}} \cdot \beta_{jk}^2 \quad (9)$$

对于给定的性能要求,解调所需信号干扰噪声比  $SINR_{\text{req}}$  取决于信道条件、调制方法和编码方式,定义

中断概率为

$$P_{\text{out}} = \Pr\left\{\frac{E_b}{N_0} \leq \text{SINR}_{\text{req}}\right\} \quad (10)$$

将式(7)代入式(10), 可以求出中断概率为

$$P_{\text{out}} = \Pr\{I/P_0 \geq \lambda\} \quad (11)$$

其中

$$\lambda = \frac{B}{R} \left[ \frac{e^{\delta_{j_0 k_0}}}{\text{SINR}_{\text{req}}} - \frac{1}{E_b/\eta_0} \right] \quad (12)$$

在我们的模型中, 用户在每个波束小区内均匀分布, 每个波束内的同频用户数为  $N$ , 可以近似地认为总的多址干扰  $I$  服从高斯分布, 那么  $I/P_0$  也服从高斯分布<sup>[12]</sup>。由式(9)可以得出  $I/P_0$  的均值  $\mu_I$  和方差  $\sigma_I^2$  分别为

$$\mu_I = E[I/P_0] = v \cdot g_1 (N-1 + \sum_{(j,k) \in S_2} \beta_{jk}^2) \quad (13)$$

$$\sigma_I^2 = E[(I/P_0)^2] - \{E[I/P_0]\}^2 = v \cdot (g_2 - v g_1^2) (N-1 + \sum_{(j,k) \in S_2} \beta_{jk}^4) \quad (14)$$

其中

$$g_1 = E[e^\delta] = A e^{h^2 \sigma_{\delta_s}^2 / 2} + (1-A) e^{h^2 \sigma_{\delta_{us}}^2 / 2} \quad (15)$$

$$g_2 = E[(e^\delta)^2] = A e^{2h^2 \sigma_{\delta_s}^2} + (1-A) e^{2h^2 \sigma_{\delta_{us}}^2} \quad (16)$$

其中,  $h = (\ln 10)/20$ , 为分贝转换为奈培的转换因子,  $\delta_s$  和  $\delta_{us}$  分别表示受遮挡和未受遮挡时功率控制误差的高斯变量,  $A$  表示用户被遮挡的概率。那么  $P_{\text{out}}$  关于  $\delta_{j_0 k_0}$  的条件概率为

$$P_{\text{out}} | \delta = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\lambda - \mu_I}{\sqrt{2\sigma_I^2}}\right) \quad (17)$$

其中  $\text{erfc}$  为补误差函数, 则中断概率为

$$P_{\text{out}} = A \int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{out}} | \delta_s \cdot f(\delta_s) d\delta_s + (1-A) \int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{out}} | \delta_{us} \cdot f(\delta_{us}) d\delta_{us} \quad (18)$$

## 5 仿真结果分析

本系统采用的多址方式为多载波 CDMA (MF-CDMA), 每个波束内将 10MHz 可用频带划分为 8 条带宽为 1.25MHz 的 CDMA 信道。多载波的系统容量可以近似于每个信道的可容纳用户数乘上信道数。卫星的基本业务类型为语音业务, 其信息速率  $R = 2.4 \text{ kb/s}$ , 用户的遮挡概率  $A = 0.3$ , 话音激活因子  $v = 3/8$ , 信号和热噪声的比特信噪比为  $E_b/\eta_0 = 20 \text{ dB}$ 。

图 6、图 7、图 8 分别显示了当  $\text{SINR}_{\text{req}}$  为 4dB、5dB、6dB 时的系统容量, 图中的 PCE 表示被遮挡用户的 PCE 标准差, 非遮挡用户的 PCE 标准差为  $\sigma_{\delta_{us}} = 1 \text{ dB}$ 。从图 6 ~ 图 8 可以看出, 在不同的  $\text{SINR}_{\text{req}}$  和  $\sigma_{\delta_s}$  条件下, 基于二阶锥形模型的系统的容量要明显高于基于赋形波束模型的系统。

为了能直观地对比两种波束增益模型的容量差别, 在中断概率为 5% 的条件下, 选取不同的 6 组参数, 给出了系统容量的具体数值, 如表 1 所示。

不难发现, 在 6 组不同的参数条件下, 二阶锥形模型的系统容量约为赋形波束模型的系统容量的两倍。其原因在于, 运用遗传算法的波束赋形完全以理想“等通量”为目标, 提高了波束的旁瓣增益水平, 加大了相邻波束内用户对关注用户的干扰, 使得系统容量降低。

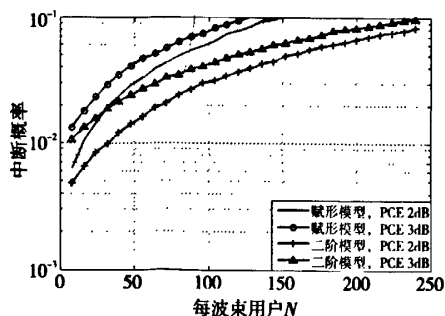


图 6  $\text{SINR}_{\text{req}} = 4 \text{ dB}$  时的系统容量

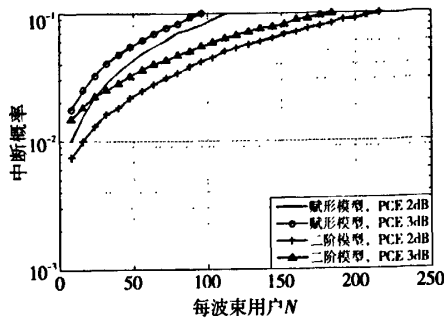


图 7  $SINR_{req} = 5\text{dB}$  时的系统容量

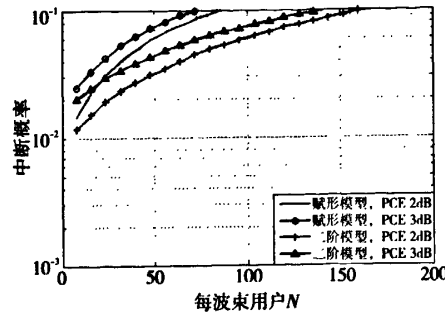


图 8  $SINR_{req} = 6\text{dB}$  时的系统容量

另外,从表 1 也可以看出,  $\sigma_a$  每增加 1dB,会导致系统容量下降约 25%;  $SINR_{req}$  每增加 1dB,会导致系统容量下降约 29%。这说明系统容量对参数  $SINR_{req}$  和  $\sigma_a$  十分敏感,通过改进功率控制算法(减小  $\sigma_a$ ) 和寻找性能更加优异的纠错码(减小  $SINR_{req}$ ) 能在很大程度上提高系统容量。

表 1 LEO 卫星赋形多波束 CDMA 系统容量(  $P_{out} = 5\%$ , 波束数  $N_c = 16$ )

	1	2	3	4	5	6
无遮挡时 PCE 标准差 $\sigma_m$ (dB)	1	1	1	1	1	1
受遮挡时 PCE 标准差 $\sigma_a$ (dB)	2	2	2	3	3	3
受遮挡概率 A	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
比特信噪比 $(E_b/\eta_0)$ (dB)	20	20	20	20	20	20
解调信干比门限 $SINR_{req}$ (dB)	4	5	6	4	5	6
话音激活因子 $v$	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8
单波束用户数 $N$ (赋形模型)	81	57	41	62	43	30
单波束用户数 $N$ (二阶模型)	154	112	81	118	87	58
波束簇总的用户数(赋形模型)	1296	912	656	992	688	480
波束簇总的用户数(二阶模型)	2464	1792	1296	1888	1392	928

## 5 总结

本文从系统容量的角度出发,通过建立 LEO-CDMA 通信系统容量分析模型,给出了系统容量的计算方法,对比分析了运用遗传算法得到的赋形波束增益模型和基于二阶锥形模型的波束增益模型的系统容量。结果表明,基于二阶锥形模型的波束增益模型由于有较低的旁瓣增益水平,其系统容量要大于赋形波束增益模型的系统容量,前者约为后者的两倍。

分析表明,提高通信系统容量可以采用以下途径:①改进功率控制算法,降低功率控制误差;②寻找性能更加优异的纠错码,降低解调信噪比门限;③优化波束赋形方法,降低赋形波束的旁瓣增益水平。

本文的分析结果为多波束接收天线的系统设计及赋形方案设计提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] Liang Guang, Gong Wenbin, Yu Jinpei. Development of 61-channel digital beamforming (DBF) transmitter array for mobile satellite communication[J]. Progress in Electromagnetics Research-PIER, 2009, 97: 177 ~ 195.
- [2] 贾铂奇. 星载多波束天线赋形技术研究[D]. 上海: 上海微系统与信息技术研究所, 2007.
- [3] Vatalaro F, Corazza G E, etc. Analysis of LEO, MEO and GEO global mobile satellite systems in the presence of interference and fading[J]. IEEE J. Select. Areas Commun, vol13:291 ~ 300.
- [4] Vojcic B R, Milstein L B, Pickholtz R L. Total capacity in a shared CDMA LEOs environment[J]. IEEE J. of SAC,

- 1995, SAC, 13(2): 232 ~ 244.
- [5] Guo Zi-hua, Letaief K B. Erlang capacity for satellite CDMA systems with adaptive power control and interference cancellation[C]. IEEE International Conference on Communications, New Orleans, USA, 2000, 2(5): 119 ~ 223.
- [6] Gilhousen K S, Jacobs I M, etc. Increased capacity using CDMA for mobile satellite communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(4): 503 ~ 514.
- [7] Gong Wen-bin, Gan Zhong-ming. Uplink power control with faster convergence in DS-CDMA system[C]. IEEE International Conference on Communication, ICC2003, Anchorage, USA, May, 2003, Vol. 1: 373 ~ 376.
- [8] Ekici O, Yongacoglu A. A capacity analysis of CDMA multi-beam mobile satellite systems with imperfect power control [C]. IEEE Globecom (Global Telecommunications Conference), Texas, USA, 2001: 1157 ~ 1162.
- [9] Mosen P. Multiple-access capacity in mobile user satellite systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1995, 13(2): 222 ~ 231.
- [10] A. M. Monk, L. B. Milstein. Open-loop power control error in a land mobile satellite system[J]. IEEE J. Select. Areas Commun. vol. 13, Feb, 1995: 205 ~ 212.
- [11] E. Lutz. Other-cell interference in satellite power-controlled CDMA uplink[C]. in Proc. 5th Int. Mobile Satellite Conf. Pasadena, CA, June, 1997: 83 ~ 88.
- [12] Fu H, Bi G, Arichandran K. Capacity comparison of CDMA and FDMA/TDMA for a LEO satellite system[C]. IEEE International Conference on Communication, Vancouver, Canada, 1999: 1069 ~ 1073.

### Analysis of Beam-forming Scheme Based on CDMA System Capacity

Xu Fei, Liang Guang, Jiang Xinglong, Gong Wenbin

**Abstract:** Through the establishment of capacity analysis model of LEO-CDMA communication system, a method to calculate the system capacity is presented. Considering the two different gain models, one formed with genetic algorithm and another based on second-order cone gain model, a comparison of capacities between the two models is presented. The analysis shows that the capacity of system based on the second-order cone gain model is about twice of the capacity calculated by using the formed gain model. The conclusion of this paper can be used as a theoretical foundation in the design of multi-beam receiving antenna.

**Key words:** Beam-forming; Land mobile satellite communication; Power control; Communication system capacity

#### [ 作者简介 ]

徐 非 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为相控阵天线技术。

梁 广 1983 年生, 博士, 主要研究方向为相控阵天线技术、卫星通信技术。

姜兴龙 1984 年生, 博士研究生, 主要研究方向为卫星通信网络。

龚文斌 1975 年生, 研究员, 主要研究方向为相控阵天线技术、卫星通信技术、卫星导航技术。

## 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,一直致力和专注于微波、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>