

MIMO 无线通信中的极化天线应用前瞻

郑剑锋 冯正和

清华大学电子系微波与数字通信国家重点实验室 100084

【摘要】 本文从极化天线的应用前瞻为出发点，以 MIMO 通信系统系统为背景，对 MIMO 通信系统中应用极化天线可获取的容量增益，极化信道的测量和建模，极化天线的实现同等内容的研究境况做了较为详尽的阐述。从当前的研究成果可以看到，极化天线的应用能有效的提高 MIMO 通信系统的容量，改善通信质量，其与信号处理的协同更是能够极大的提高无线通信系统传输能力。。

一、MIMO 无线通信和多极化天线

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 无线通信技术的研究是当前无线通信研究的重要内容。其核心思想是在通信系统发射机和接收机两端同时使用多个天线，充分利用无线多径信道的空间自由度提高系统容量与传输速率，以增加系统复杂程度为代价换取更高的频谱利用率，被认为是在丰富多径的环境中实现不断增长的容量需求的强有力的方法[7][22]。MIMO 无线通信系统通过利用多径信道的空间特性，来提供一个新的维度以使之提高系统的性能。MIMO 系统的物理设计的核心问题是如何提高空间自由度，一般情况下等价于等效特征信道数。设计有效的多天线系统以充分发掘无线信道中所蕴含的空间资源不容易。多极化天线则能极大幅度的提高有限空间内的空间自由度，是未来 MIMO 无线通信中的关键技术。

极化特性是多径信道空间特性中的一个重要组成，利用极化实现分集以抵抗无线多径的衰落特性也早已得到应用[9][32]。Dietrich 等人比较了极化分集和空间、方向图分集在移动终端上的应用，发现极化分集具有同空间、方向图分集近乎相同的增益，能使系统信噪比改善约 $7\sim10$ dB[4]。

事实上，天线极化可提供更多的自由度。Andrews 等人指出，在一个多径丰富的无线传播环境中，利用极化可以获得六路不相关的信道[3]。也就是在任意一点，三对正交电赫兹偶极子和磁赫兹偶极子天线可以构建六路特征信道，从而极大的提高无线通信系统的传输速率和系统容量。下图（a）表示在不同仰角角度扩散 ($-\Delta\theta < \theta < \Delta\theta$) 情况下，有效无关分支数和在接收和发送端分别使用电磁传感器的 MIMO 系统的信道容量随多径到达扩散角度 ($-\Delta\phi < \phi < \Delta\phi$) 的变化曲线[27]。

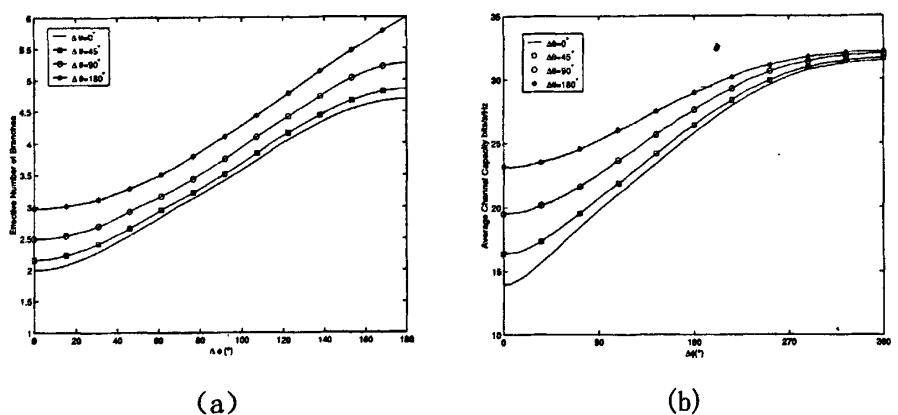


图 1 (a) 不同角度扩散下的有效无关分支数 (b) 不同角度扩展下的 MIMO 系统信道容量

从图中可以看出，极化天线即使在直射径的情况下也可以提供两路特征信道；在多径丰富的情况下，利用极化特性可获得多达六路特征信道，极大提高了 MIMO 无线通信系统的容量。

理想多极化天线的增益为 MIMO 通信系统容量提高提供了有力的支持，但实际 MIMO 系统容量的提高取决于天线系统的设计，还依赖于信道能否提供足够丰富的多径，需要对极化信道和极化天线的设计进行深入的研究。

二、极化分集增益和极化 MIMO 信道容量测量

1. 极化分集增益测量

数十年前，人们就开始关注极化分集技术的应用以及极化分集信道的测量和建模。从七十年代开始，Lee 等人[16]就开始研究上行链路信号传播的极化特性，在表一中列出了一些文献的测量结果[16][13][32][17][30]。

表一、上行链路极化分集测量结果¹

文献索引	测试环境	测量类型	频率 MHz	天线类型		XPD ²	相关系数	分集增益 ³
				用户	基站			
Lee	城区	2×2 分集	836	V/H	V/H	6	<0.2	—
Kozono	城区	1×2 接收分集	900 920	V	±45°	6	<0.6	—
Vaughan	城区 NLOS	1×2 接收分集	463	30°	VH	7	-0.003	5 (95%)
	郊区 NLOS					12	0.019	3 (95%)
Lemieux	室内 NLOS	1×2 接收分集	915	V	VH	3	—	4
Turkmani	城区	1×2 接收分集	1790	0°	VH	13.3	<0.7 (95%)	1.6
	45°			1.2		5.2		
	0°			10.8		2.3		
	郊区			45°		2.9		5.1

1. 天线倾角均指与垂直方向夹角；
2. 测量信道的 XPD 时，用户和基站天线都是垂直/水平极化；±45°极化时 XPD 实际是两端口输出功率比；表中数据是测量数据的均值；
3. 分集增益为最大比合并的计算结果，除特别注明外 CDP=90%；

研究结果表明，影响上行链路分集效果的主要因素是天线姿态和传播环境。基站极化分集接收天线有两种安装方式，极化方向分别是垂直/水平方向和±45° 方向。后者的分集通道较为平衡，所以分集增益略高于前者，但差别并不明显。视距（Line Of Sight）传播路径因为存在较强的分量，分集效果比非视距传播路径差。所有的测量结果都证实各分支的相关系数很低，完全能满足分集的要求。而

XPD (cross-polarization discrimination) 则随环境、天线配置变化，所测量的平均 XDP 分布于 0~18dB，均方差通常在 3~8dB 的量级。总体而言，极化分集与空间分集效果相当，但双极化天线只占用单个天线的空间就能实现双通道分集，基站分集成本可以大为减小。

虽然极化分集技术已在上行链路被广为使用，但在移动终端的应用却报道得很少。其实极化分集对移动终端更为适用。由于设备体积限制，移动终端能够安装的天线数目非常有限。极化分集能增加一个独立的收发通道而不增加天线体积，是非常有效的分集方案。一般情况下，用户周围的障碍物比较多，所以在用户端信号的角度扩展比较大。Toftgård 等人[29]发现在非视距传播环境中信号的极化是杂乱无章的，因而形成的极化分集端口的弱相关特性对分集接收是有利的。如果终端位于开阔环境或视距传播范围，极化信号的相关性比较明显，分集效果会变差。但通过正交极化接收仍然能够消除极化失配引起的信号衰落，这是其相对空间分集或方向图分集的优势。

2. 极化 MIMO 信道容量测量

对于极化 MIMO 信道的初步测量表明极化 MIMO 信道具有相对同极化 MIMO 信道而言占用空间小、更多容量增益等特点。尽管混合极化 MIMO 系统的平均接收信噪比低于单一垂直极化 MIMO 系统，测量结果仍表明 MIMO 系统中采用混和极化方式比单一极化方式容量更大。在室内环境中使用双极化天线阵列相对于单一极化阵列而言可以获得大约 10%~20% 的容量增益[14][33]。

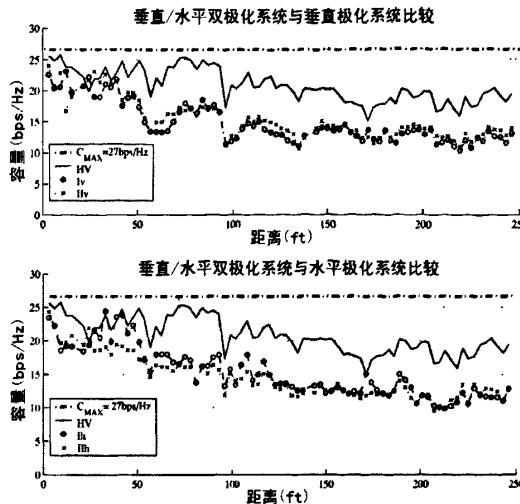


图 2 4×4 的水平/垂直双极化系统与单一极化系统的比较，参考信噪比为 20dB

Kyritsi 等人的测量结果表明[14]，单极化系统与混合极化系统的比较显示混合极化系统具有更高的系统容量。在 LOS 环境下，该容量增益并不明显，但在 NLOS 环境中，混合极化系统的容量显著高于单极化系统。

Wallace 等人通过测量分析指出，混合极化 MIMO 系统的容量优势来自于混合极化信道具有的对角相关特性[33][20]，在相同接收信噪比下，对角相关 MIMO 信道的信道容量要远高于独立同分布高斯 MIMO 信道的信道容量。

Sulonen 等人测量了微蜂窝和超微蜂窝的双极化 MIMO 信道，表明双极化天线系统的容量比单一极化天线系统高约 14%[26]，Erceg 等人室外的测量也得到了类似的结论[6]，但其与 kyritsi 的室内测量结果不同的是，混合极化 MIMO 系统在 K 因子较高的近基站区（强直射径区）。

多极化 MIMO 系统不仅具有容量增益，当天线位置发生偏转时，单一极化系统易出现天线极化失配，而混合极化系统则能够很好的解决这一问题[10]。

三、极化信道特性

由于双极化天线在上行链路分集接收中的成功应用，以及其所具有的体积、容量方面的优势，极化天线在 MIMO 系统中的应用前景广阔。但是，对于极化信道的测量、建模还有待深入。虽然 3GPP/3GPP2 给出了一个可用于 MIMO 系统仿真的交

叉极化的简单信道模型 0，但是其忽略了俯仰角度的建模问题，并且其并未反映 XPD 和其他的信道物理参数之间的关系。极化信道建模的难点在于如何测量揭示极化参数与信道其他物理参量间的相互关系，并依此实现对极化信道特性的准确描述[25][12]。

1. XPD 同距离的关系

Kyritsi[14]等人的室内测量结果表明功率随距离的变化可以用指数衰减表示，虽然传统的 $n \log(d)$ 律也可以得到满意的结果。不同极化的衰减指数并不相同，其为 1.07, 1.20, 1.49, 和 1.47，分别对应 VV, HH, VH 和 HV 极化方式。XPD 的测量结果较大，约为 15dB，并且随着距离增加而增加。其他的室内测量结果可见文献[23]，室外的测量结果，见于文献的则有[24][21][12]。

2. XPD 同水平和俯仰角度的关系

Neubauer 和 Eggers[18]利用各种不同方向图的垂直和极化天线对信道进行测量，结果表明，天线方向图对 XPD 有很大的影响，但是，很难从其中提取 XPD 和水平俯仰角度的关系。

对于宏小区，文献[21]中的测量结果显示当极化方向为 $\pm 45^\circ$ 时，水平极化独立于极化方向。但[19]的结果表明对于垂直发射的移动段，基站端的 XPD 同水平扩展角度具有弱负相关 $\rho = -0.15$ 。也就是较大的水平角度扩散会使得 XPD 变小。这在物理上是较明显的，即较大的水平角度扩散和较低的 XPD 都是同强散射相关联的。

更详细的关于 XPD 同水平俯仰角度扩散的测量结果可见[12]。

3. XPD 同延迟扩展的关系

[21]和[5]中的测量结果显示在室外环境中，极化和延迟扩展并无相关性，在室内环境中，[23]也显示了类似的结论。但是[5]中的测量结果依然显示，两种极化的功率谱密度分布并不相同。

Toeltsch[28]等人测量了同极化和交叉极化的延迟特性，结果表明同极化和交叉极化分量具有不同的延迟时间常数。以微小区环境中的多径束延迟常数为例，测量显示同分量随时间的衰减常数为 $8.9 \text{dB}/\mu\text{s}$ ，而交叉极化分量随时间的衰减常数为 $11.8 \text{dB}/\mu\text{s}$ ，也就是 XPD 会随着到达时间而增大。然而，3GPP 的模型则将宏小区中 XPD 的均值定为 $0.34 \times (\text{平均相关路径能量 dB}) + 7.2$ ，也就是说，XPD 随着延迟的增加降低；同时，规定微小区环境中，XPD 为固定的 8dB。

五、多极化天线实现

天线极化为通信系统提供了更多的更利用空间及自由度，极大提高了系统的信道容量，而以往的研究还局限于双极化天线的研究（垂直/水平方向和 $\pm 45^\circ$ 方向），对于多极化天线的研究还非常匮乏。在 60 年代，贝尔实验室的研究人员就提出，可以同时接收入射场的电场和磁场能量，通过场分量分集技术提高无线通信系统的传输可靠性[9][15]，并且将这种天线命名为能量密度天线（Energy Density Antenna），这是由于经适当处理，该天线的输出结果近似正比于该处电磁场的能量。虽然在多径环境中，单一极化电场或磁场分量会在呈现衰落的现象，但电磁场能量往往保持近似恒定[31]，可以利用能量密度天线进行分集以提高链路的传输质量。见于文献的能量密度天线，大体都是交叉缝隙构成的交叉磁偶极子和加载单极子的组合[11][2]，由于应用场景的假定，能量密度天线一般定义具有水平的地平面，因而仅可以获得三路无关的信道。

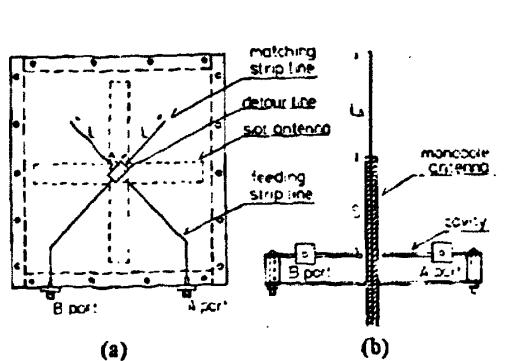


图 3 能量密度天线[5] (a) 地平面视图 (b) 前视图

近期 Getu 等人利用 12 个偶极子构成了一个立方体[8]，实现了多极化多方向图的 MIMO 天线。虽然其仅仅从理论上给出了一个在优先空间内实现多极化 MIMO 天线的例子，但表明多极化 MIMO 天线的实现是可行的。

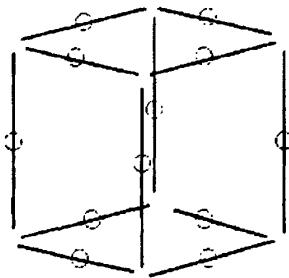


图 4 MIMO 立方 [8]

随着通信的发展和随时随地通信的需求，多极化天线需适应移动终端小型化的需求，并且满足使用环境的复杂性，因此，有必要对多极化天线的设计做进一步深入的研究。

六、总结及展望

本文从多极化天线的应用前瞻为出发点，以多极化天线在 MIMO 通信系统中的应用为背景，对极化信道的测量和建模、极化天线的实现、极化天线与信号处理协同等内容的研究境况做了较为详尽的阐述。从当前的研究成果可以看到，极化天线的应用能有效的提高 MIMO 通信系统的容量，改善通信质量，其与信号处理的协同更是一个有力的手段。

虽然极化天线的应用前景广阔，但其研究还远未满足 MIMO 通信系统的需求。如何在复杂的电磁环境中设计性能优异的极化以及可重构极化天线，发展极化天线与信号处理的协同算法，进一步提高信道模型对极化特性的描述精确性，是研究的方向所在。

参考文献

- [1] “ Spatial channel model for multiple input multiple output MIMO simulations,” 3GPP, TR 25.996, 6.1.0ed., 2003.

- [2] H. Arai, H. Iwashita, N. Toki, and N. Goto, "A flat energy density antenna system for mobile telephone", *IEEE trans Veh. Technol.*, vol. 40, no. 2, May 1991.
- [3] R. A. Andrews, P. P. Mitra, and R. deCarvalho, "Tripling the capacity of wireless communications using electromagnetic polarization," *Nature*, vol. 409, pp. 316 - 318, Jan. 2001.
- [4] C. B. Dietrich, K. Dietze, J. R. Nealy and W. L. Stuzman, "Spatial, polarization, and pattern diversity for wireless handheld terminals," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, no. 9, pp. 1271-1281, Nov. 2001.
- [5] P. C. F. Eggers, J. Toftgaard, and A. M. Oprea, "Antenna systems for base station diversity in urban small and micro cells," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 11, no. 7, pp. 1067-1057, Sep. 1993.
- [6] V. Erceg, H. Sampath and S. Catreux-Erceg, "Dual-Polarization versus single-polarization MIMO channel measurement results and modeling," *IEEE Trans Wireless Commun.*, vol. 5, no. 1, Jan. 2006.
- [7] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, pp. 311-355, Mar. 1998.
- [8] B. N. Getu and J. B. Andersen, "The MIMO cube - a compact MIMO antenna," *IEEE Trans Wireless Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 1136-1141, May 2005.
- [9] E. N. Gilbert, "Energy reception for mobile radio," *Bell Sys. Tech. J.*, vol. 44, pp. 1779-1803, Oct. 1965.
- [10] A. N. Gonzalez, and B. Lindmark, "The effect of antenna orientation and polarization on MIMO capacity," *Antenna and Propagat. Society Inter. Symp. 2005*, vol. 3B, pp. 434-437, July 2005.
- [11] K. Itoh, R. Watanabe, and T. Matsumoto, "Slot-monopole antenna system for energy-density Reception UHF", *IEEE Trans Antennas and Propagat.*, vol. 27, no. 4, July 1979.
- [12] K. Kalliola et al., "Angular power distribution and mean effective gain of mobile antenna in different propagation environments", *IEEE trans Veh. Technol.*, vo. 51, no. 5, pp. 823-838, Sept. 2002.
- [13] S. Kozono, T. Tsuruhara, and M. Sakamoto, "Base Station polarization diversity reception for mobile radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 33, no. 4, pp. 301-306, 1984.
- [14] P. Kyritsi, et. al., "Effect of antenna polarization on the capacity of a multiple element system in an indoor environment," *IEEE J. Sel. Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1227-1239, Aug, 2002.
- [15] W. C. Y. Lee, "Comparison of an energy density antenna system with predetection combining systems for mobile radio", *IEEE Trans commun. Technol.*, vol. 17, no. 2, April 1968.
- [16] W. C. Y. Lee and Y. S. Yeh, "Polarization diversity system for mobile radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 912-923, 1972.

- [17] J. Lemieux, M. S. El-Tanany, and H. M. Hafez, "Experimental evaluation of space /frequency /polarization diversity in the indoor wireless channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, pp.569-573, 1991.
- [18] T. Neubauer, and P. C. F. Eggers, "Simultaneous Characterization of Polarization Matrix Components in Pico Cells," *in Proc. Veh. Technol. Conf.*, 1999, pp. 1361-1365.
- [19] M. Nilsson, "Measurements of the spatio-temporal polarization characteristics of a radio channel at 1800 MHz," *in Proc. Veh. Technol. Conf.*, 1999, pp. 386-391.
- [20] H. Ozcelik and C. Oestges, "Some remarkable properties of diagonally correlated MIMO channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 6, pp. 2143-2145, Nov. 2005.
- [21] K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and B. H. Fleury, "Dual-Polarized Model of Outdoor Propagation Environments for Adaptive Antennas," *in Proc. Veh. Technol. Conf.*, 1999, pp. 990-995.
- [22] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi, "Spatio-temporal coding for wireless communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 357-366, Mar. 1998
- [23] T. S. Rappaport, "Wide-band Microwave Propagation Parameters Using Circular and Linear Polarization Antennas for Indoor Wireless Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 2, pp. 240-245, Feb. 1992.
- [24] P. Soma, "Analysis and modeling of multiple-input multiple-output MIMO radio channel based on outdoor measurements conducted at 2.5 GHz for fixed BWA applications," *in Proc. IEEE ICC*, vol. 1, 2002, pp. 272-276.
- [25] M. Shafi et al., "Polarized MIMO channels in 3-D: models, measurements and mutual information", *IEEE J. Sel Area Commun.*, vol. 24, no. 3, pp.514-527, March 2006.
- [26] K. Sulonen, P. Suvikmnas, L. vuokko, J. Kivinen and P. Vainikainen, "Comparison of MIMO antenna configurations in Picocell and Microcell environments," *IEEE J. Sel Area Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 703-712, June 2003.
- [27] T. Svantesson, M. A. Jensen, and J. W. Wallace, "Analysis of electromagnetic field polarizations in multi-antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, no. 3, Mar. 2004.
- [28] M. Toeltsch, J. Laurila, K. Kalliola, A. F. Molisch, P. Vainikainen, and E. bonek, "Statistical characterization of urban spatial radio channels," *IEEE J. Sel. Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 539-549, Apr. 2002.
- [29] J. Toftgård and P. C. F. Eggers, "Experimental characterization of the polarization state dynamics of personal communication radio channels," *IEEE 43rd Veh. Technol. Conf.* 1993, 65-69
- [30] A. M. D. Turkmani, A. A. Arowojolu, P. A. Jefford, et al., "An experimental evaluation of the performance of 2-branch space and polarization diversity schemes at 1800 MHz," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, no. 2, pp.318-326, 1995.

- [31] R. G. Vaughan and J. B. Andersen, "Antenna diversity in mobile communications", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 149-172, Nov. 1987.
- [32] R. G. Vaughan, "Polarization diversity in mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 39, no. 3, 1990.
- [33] J. W. Wallace, M. A. Jensen, A. L. Swindlehurst, and B. D. Jeffs, "Experimental characterization of the MIMO wireless channel: Data acquisition and analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, no. 2, pp. 335 - 343, Mar. 2003.

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>