

# 多天线波束成形系统干扰协调

何 浩 田 茂 张文健 杨鼎成

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要** 研究蜂窝系统中有限反馈波束成形系统小区间同信道干扰变化的特性, 提出基于机会通信的有限权值机会波束方法。通过在预先设计的有限数量的赋形权值码本中随机选择赋形权值发送数据。使得干扰变化与邻小区调度用户的改变无关, 使干扰测量和速率预测更为准确, 降低由于反馈时延和链路自适应造成的中断率, 提高系统吞吐量。理论分析和仿真证明采用正比公平调度的有限权值机会波束与有限反馈波束成形具有相同的发射速率, 而且干扰预测更为准确, 大大降低链路自适应传输的中断率, 提高了传输效率。

**关键词** 蜂窝通信; 波束成形; 小区间干扰; 机会通信; 调度

**中图分类号** TN911

## 1. 引言

发送波束成形(TBF)是一种有效的抵抗衰落提高系统性能的技术<sup>[1-2]</sup>。通过将发送信号按照信道方向进行加权将信号能量集中, 从而最大化接收信噪比(SNR), 提高传输容量。但是要实现发送波束成形, 发射机必须获得信道方向信息(CDI)。而信道方向信息通过用户使用一个发送端和接收端都已知的码本对信道进行量化并将量化索引值反馈给发射机是一种普遍使用的方法。文献[2][3]表明增大反馈比特数, 有限速率反馈波束成形(LBF)的容量损失较小。而且为了使传输速率达到容量, 需要根据链路状态自适应调整发射速率, 即根据信道质量信息(CQI)发射端选择合适编码速率和调制方式(MCS)。有限速率反馈与链路自适应技术相结合的思路已经广泛用于新一代移动通信系统(LTE)中<sup>[4-5]</sup>。

然而在实际系统中, CDI 和 CQI 的反馈都存在时延。在用户低速运动的慢衰落信道下, 信道变化缓慢, 反馈的 CDI 依然是准确的。而对于 CQI 即信噪比(SNR)情况更为复杂。在蜂窝系统中, CQI 不仅受热噪声影响, 还受小区间的同信道干扰(ICI)的影响。特别是在多天线环境下, 应用波束成形技术, 会造成小区间干扰具有空间方向变化的特性。由于

LBF 系统的波束方向与调度用户紧密相关, 邻小区干扰会随着调度用户的改变而改变, 造成测量 SNR 与实际传输经历的 SNR 不匹配。根据测量 SNR 自适应调整发射速率, 这种不匹配会增加传输中断, 降低系统传输效率。传统的解决方法一般是通过频率重用降低 ICI 的影响或是采用低速率保守的发送方案<sup>[6]</sup>。这些方法会降低系统可用资源, 而且不能充分利用多天线系统带来的性能优势。

本文考虑到多天线蜂窝系统干扰的影响以及变化情况, 提出了一种简单、有效的有限权值机会波束方法。该方法随机的从预先设计的赋形权值码本中选择赋形权值发送数据。将与用户信道紧密相关的赋形权值变为与用户无关, 使得干扰测量不受邻小区调度用户的改变的影响。通过将测量导频和实际发送数据采用相同的赋形权值, 使得干扰测量更为准确, 大大降低链路自适应传输的中断率。而且本文有限权值机会波束方法可以获得与对应有限反馈发送波束成形相同的系统容量。因此用户的发射速率不会降低, 同时中断率得到大大降低, 提高了系统的吞吐量。

## 2. 链路自适应波束成形系统

### 2.1 系统模型

假定一个线性阵列天线的蜂窝系统, 基站  $B_i(i$

$=1, \dots, M$ ) 搭载  $N_i$  个发送天线, 对移动终端  $M_i$  进行服务, 为简单起见移动终端搭载单天线。移动终端的有用信号来自与其表示相同索引的基站, 即  $M_i$  的有用信号来自于  $B_i$ 。每个小区使用有限反馈波束成形系统。信道为平坦衰落信道, 连续时间信号按照符号间隔  $T_s$  进行采样, 信号由样本序列表征。对于第  $n$  个接收数据样本, 由基站  $B_i$  服务的移动终端  $M_i$  的接收信号为

$$\begin{aligned} y_i[n] = & \sqrt{P_{i,i}[n]} \mathbf{h}_{i,i}[n] \mathbf{V}_i[n] x_i[n] + \\ & \underbrace{\sum_{m=1, m \neq i}^M \sqrt{P_{i,m}[n]} \mathbf{h}_{i,m}[n] \mathbf{V}_m[n] x_m[n] + z_i[n]}_{\text{其他小区干扰}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $y_i[n]$  是  $M_i$  的接收信号;  $\mathbf{h}_{i,i} \in \mathbb{C}^{N_i}$  是基站  $B_i$  到  $M_i$  的小尺度衰落信道, 其分布为 i.i.d  $\text{CN}(0, I_{N_i})$ ;  $P_{i,i}$  是基站  $B_i$  信号发射功率经大尺度衰落到达  $M_i$  的接收功率;  $\mathbf{V}_i[n] \in \mathbb{C}^{N_i}$  是基站  $B_i$  的预编码向量, 满足  $\mathbf{V}_i^\text{H} \mathbf{V}_i = 1$ , 在码本  $W = \{f_1, f_2, \dots, f_L\}$  中选择,  $x_i$  是基站  $B_i$  的发送信号  $E(x_i^\text{H} x_i) = 1$ ,  $z_i$  是 0 均值单位方差高斯白噪声。

在有限反馈波束成形系统, 在测量信道质量时刻, 反馈波束成形向量。赋形向量从码本  $W$  中选择, 选择标准按照最大化容量准则<sup>[3]</sup>。

$$\mathbf{V}_i[n-1] = \underset{f_l \in W}{\operatorname{argmax}} \| \mathbf{h}_{i,i}[n-1] f_l \|^2, 1 \leq l \leq L \quad (2)$$

反馈的信道质量信息 CQI 为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_i^R[n-1] = & \frac{P_{i,i}[n-1] \| \mathbf{h}_{i,i}[n-1] \mathbf{V}_i[n-1] \|^2}{\sum_{m=1, m \neq i}^M P_{i,m}[n-1] \| \mathbf{h}_{i,m}[n-1] \mathbf{V}_m[n-1] \|^2 + 1} \\ = & \gamma_i[n-1] \| \mathbf{h}_{i,i}[n-1] \mathbf{V}_i[n-1] \|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\gamma_i[n-1]$  是测量时刻接收功率和干扰加噪声的比值。

请求传输速率为

$$R_i^R[n-1] = \log(1 + \text{SNR}_i^R[n-1]) \quad (4)$$

在时刻  $n$  实际传输经历的 SNR 为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_i[n] = & \frac{P_{i,i}[n] \| \mathbf{h}_{i,i}[n] \mathbf{V}_i[n-1] \|^2}{\sum_{m=1, m \neq i}^M P_{i,m}[n] \| \mathbf{h}_{i,m}[n] \mathbf{V}_m[n] \|^2 + 1} \\ = & \gamma_i[n] \| \mathbf{h}_{i,i}[n] \mathbf{V}_i[n-1] \|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\gamma_i[n]$  是实际传输时刻接收功率和干扰加噪声的比值。

实际能够达到的传输速率为

$$R_i^F[n] = \log(1 + \text{SNR}_i^F[n]) \quad (6)$$

如果传输速率超过信道所能支持的速率, 传输就会失败。换而言之, 当用户测量反馈的 SNR 超过实际传输经历的 SNR 时, 传输会中断。

用户平均传输速率为

$$\bar{C}_i = E\{R_i^F[n-1] \Pr(R_i^R[n-1] \leq R_i^F[n])\} \quad (7)$$

在用户低速运动的慢衰落信道下, 信道变化缓慢, 测量 SNR 与实际传输经历 SNR 的差异主要取决于邻小区干扰的变化。而干扰的变化完全取决于邻小区调度用户波束方向的变化。因此如果用户测量时刻和实际传输时刻, 邻小区干扰波束方向不变, 则测量的 SNR 是准确的, 传输不会发生中断。

## 2.2 有限权值机会波束

在蜂窝系统中, 为了兼顾系统吞吐量和用户公平, 正比公平调度方法是一个合理的调度方法。但是在有限反馈发送波束成形系统中, 发送波束与调度用户信道紧密相关, 调度用户的改变会直接影响对邻小区的干扰, 同时反馈 CQI 存在延时, 造成测量干扰与实际经历干扰的误差, 进而影响 CQI 的准确性。因此为了使得调度用户的改变不会影响干扰测量的准确性, 机会波束是一种可行的方法。

机会波束是一种利用多用户分集获取容量的方法<sup>[7]</sup>。在用户中低速运动的慢衰落信道下, 通过增加信道的波动获得多用户分集。传统的机会波束<sup>[7]</sup>通过在不同天线人为产生随机变化的幅度和相位可以获得与特征发送波束成形相同的容量。这种完全随机的方式等效于有无限数量的赋形权值。但是增加天线数量, 就需要数量非常庞大的用户才能获得与特征发送波束成形相同的容量。另外有限反馈波束成形已经能够获得绝大部分的容量, 有鉴于此, 有限权值机会波束方法 (LOPP-BF) 只需要遍历预先设计的信道量化码本对应的信道状态, 能够极大的降低随机波束的数目, 在不需要大量用户的情况下, 就能够获得与相应有限反馈波束成形相同的容量。

基站  $B_i$  从码本索引集合  $I = \{1, 2, \dots, L\}$  中随机选择一个索引值  $l$ , 并按照权值  $f_l$  将导频数据在各天线进行加权, 用户  $k$  测量反馈的 CQI 为

$$\text{SNR}_k^R[n-1] = \gamma_k[n-1] \| \mathbf{h}_{k,i}[n-1] f_l \|^2 \quad (8)$$

根据反馈的 CQI 选择合适的发射速率  $R_k^R$ , 按照正比公平原则最终被调度的用户为

$$k^* = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \frac{R_k^F[n]}{T_k[n]} \quad (9)$$

式中  $T_k[n]$  是平均吞吐量, 按照如下的递归方式进

行更新

$$T_k[n+1] = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_c}\right)T_k[n] + \frac{1}{T_c}R_i^k[n] & k = k^* \\ \left(1 - \frac{1}{T_c}\right)T_k[n] & k \neq k^* \end{cases} \quad (10)$$

式中  $T_c$  是滑动平均的时窗长度。可见选择赋形权值的复杂度可以忽略, 因为只需在  $L$  个码本索引中随机选择即可获得对应的赋形权值。同时用户不需要反馈 CDI, 只需要反馈 CQI 即可, 大大降低了反馈开销。

调度用户  $k^*$  实际经历的 SNR 为

$$SNR_{k^*}[n] = \gamma_{k^*}[n] \|h_{k^*,i}[n]f_i\|^2 \quad (11)$$

在用户低速运动时, 信道认为近似不变, 测量 SNR 与实际经历 SNR 近似相等, 速率预测准确, 大大降低传输中断。

下面对含有  $L$  个权值的有限权值机会波束和  $L$  个码本有限反馈波束成形具有相同的容量进行证明。

假定用户信道是独立同衰落的, 总共  $K$  个用户。通过沃罗诺伊区域(Voronoi cell)将信道实现和码本进行关联<sup>[2]</sup>。第  $i$  个沃罗诺伊区域为

$$H_i = \{h \in C^N \mid h f_i > h f_j, i \neq j, j = 1, \dots, L\} \quad (12)$$

信道属于第  $i$  个沃罗诺伊区域的概率为  $\Pr(h \in H_i) = p_i$ , 用户信道属于  $H_i$  的用户数目的比例为  $K_i$ , 对应用户组集合为  $A_i$ 。由于用户信道彼此独立同衰落有

$$\sum_{i=1}^L K_i = 1, \lim_{K \rightarrow \infty} K_i = p_i \quad (13)$$

兼顾用户速率和公平, 采用正比公平调度(PFS), 用户以很大概率调度在其峰值速率<sup>[7]</sup>。平均峰值速率即为采用有限反馈波束成形的速率

$$R_i^{LBF} = E[\log_2(1 + \gamma \|h f_i\|^2) \mid h \in H_i] \quad (14)$$

式中  $\gamma$  是发送功率和噪声之比。

简单起见, 假定仅当随机选择的发送波束成形向量为  $f_i$  时,  $A_i$  中的用户被调度。由 PFS 的特性<sup>[8]</sup>, 其公平度为 1, 用户调度的时间比例相同。则  $A_i$  中用户  $k_i$  的长时平均速率为

$$\bar{R}_{k_i} = \frac{R_i^{LBF} p_i}{K_i K}, k_i \in A_i \quad (15)$$

大量用户存在时, 则用户平均速率为  $\lim_{K \rightarrow \infty} K \bar{R}_{k_i} = R_i^{LBF}$ , 有限权值机会波束的容量为

$$R^{OPP} = \sum_{\substack{k_i \in U \\ i=1}} \bar{R}_{k_i} = \sum_{i=1}^L \frac{R_i^{LBF}}{K} K_i K = \sum_{i=1}^L R_i^{LBF} K_i \quad (16)$$

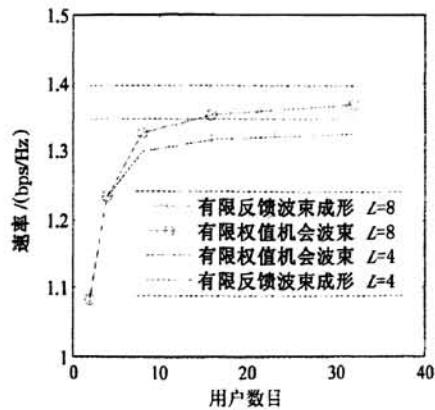
有大量用户存在时, 有限权值机会波束的容量

$$R^{OPP} = \sum_{i=1}^L R_i^{LBF} p_i, \text{ 有限反馈波束成形的容}$$

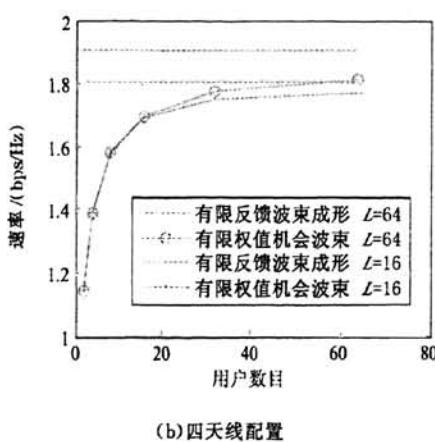
量<sup>[9]</sup>为  $R^{LBF} = \sum_{i=1}^L R_i^{LBF} p_i$ , 因此有限权值机会波束获得与有限反馈波束成形相同的容量。

$$\lim_{K \rightarrow \infty} R^{OPP} = R^{LBF} \quad (17)$$

如图 1 所示, 在两天线和四天线配置下, LBF 和 LOPP-BF 都使用格拉斯曼码本<sup>[10]</sup>。结果显示使用相同数目的权值向量和信道量化码本, 增加用户数 LOPP-BF 可以达到与 LBF 相同的容量。而且 LOPP-BF 不需要太多用户就可以接近对应 LBF 的容量, 如两天线时只需十几个用户, 四天线时只需二十几个用户。天线数目和码本数目越多, 达到对应 LBF 容量所需要的用户数目也越多。而且通常系统的天线数目和码本数目不会太多, 如 LTE 中两天线和四天线的码本数目分别为 4 和 16。因此有限权值机会波束不需要大量用户就能够接近有限反馈波束成形容量。



(a) 两天线配置



(b) 四天线配置

图 1  $\gamma=0$  dB 瑞利慢衰落信道下系统速率与用户数目的关系

### 3. 性能仿真与分析

为了验证有限权值机会波束的系统性能,按照LTE的仿真条件<sup>[11]</sup>建立19个小区的多天线蜂窝系统,每个小区包含3个扇区,相邻基站间距离500 m,每个扇区均有分布20个用户,用户移动速度为3 km/h。基站配置4个发射天线,赋形权值码本数目为8,链路自适应使用文献[5]中的16个等级的MCS。为了保证每个小区都有两圈小区包围,采用如图2所示的小区翻转拓扑结构。为简单起见,假定所有的子载波都使用相同的随机选择的赋形权值。蜂窝内所有用户的测量SNR与实际传输经历的SNR之差的分布如图3所示,此SNR是按照文献[12]中的指数有效信噪比映射方法(EESM)将用户使用的所有子载波的SNR进行等效得到的。结

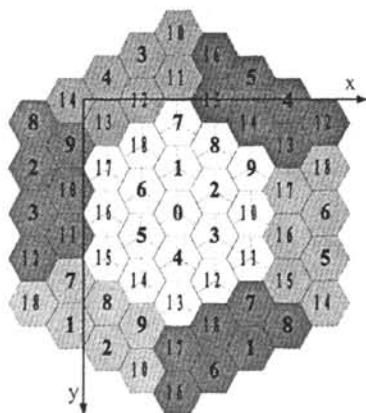


图 2 小区拓扑结构

果显示有限权值机会波束能够将测量SNR与实际经历SNR的差异控制在1 dB以内。因此传输中断率(即传输错误次数/传输次数)大大降低,如图4所示。使得用户的传输速率得到提高,在50%累积分

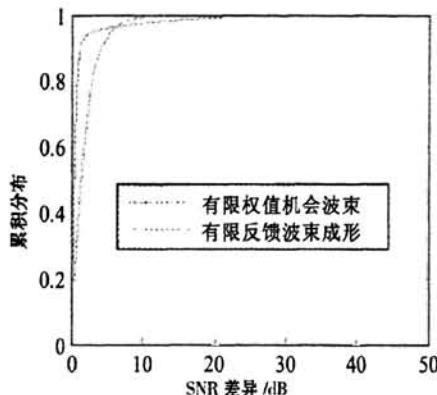


图 3 用户测量 SNR 与实际经历 SNR 差异分布

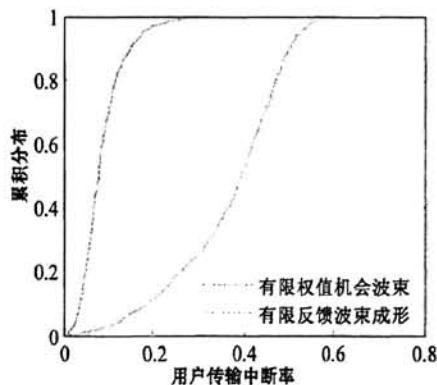


图 4 用户传输中断率分布

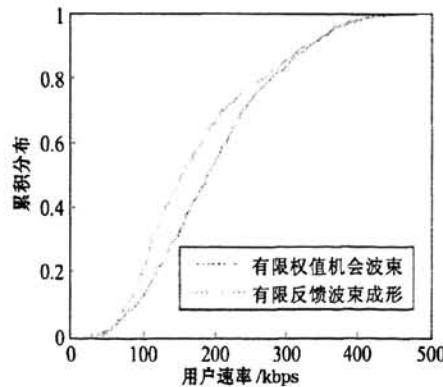


图 5 用户速率分布

布点传输速率有 20% 以上的提高,如图 5 所示。由于小区中心用户受 ICI 影响较小,因此这部分用户的传输速率没有改善,即图 5 中传输速率在 350 kbps 以上的部分用户没有性能增益。

## 4. 结 论

本文考虑有限反馈波束成形系统中,赋形权值与调度用户是紧密相关的。调度用户的改变会直接影响邻小区干扰的变化,造成干扰不可跟踪,使得测量信道质量与实际经历信道质量难以匹配,降低了传输效率。本文利用有限权值机会波束,使得 ICI 的变化与调度用户无关,使干扰可跟踪,极大的提高了传输效率。由理论证明和仿真结果可知,有限权值机会波束不但没有降低用户发送速率,而且还大大的降低了用户传输的中断率,使得用户的传输速率有 20% 以上的改善。而且在未来进一步研究还可以通过优化各个小区随机选择的赋形权值,降低小区间干扰,进一步提高传输速率。

## 参考文献

- [1] 王 勇,廖桂生,王喜媛. MIMO 系统空时特征波束性能分析 [J]. 电波科学学报,2009,24(2): 297-301.
- [2] MUKKAVILLI K K, SABHARWAL A, ERKIP E, et al. On beamforming with finite rate feedback in multiple antenna systems [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(10): 2562-2579.
- [3] LOVE D J, HEATH JR R W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems [J]. IEEE Trans. On Information Theory, 2005, 51(8): 2967-2976.
- [4] 3GPP. Physical channels and modulation [EB/OL]. [2011-03-30]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs>
- [5] 3GPP. Physical layer procedures [EB/OL]. [2011-03-30]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs>
- [6] IVRLAC M T, NOSSEK J A. Intercell-interference in the Gaussian MISO Broadcast Channel [C]// IEEE GLOBECOM, 2007:3195-3199.
- [7] VISWANATH P, TSE D N C, LAROIJA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2002, 48 (6): 1277-1294.
- [8] YANG L, ALOUINI M S. Performance analysis of Multiuser selection diversity [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2006, 55(6):1848-1861.
- [9] ANDREA G. Wireless communications [M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2005:97-99.
- [10] LOVE D J. Grassmannian Subspace Packing [EB/OL]. [2011-03-20]. <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~djlove/grass.html>.
- [11] 3GPP. Spatial channel model for Multiple input multiple output(MIMO) simulations [EB/OL]. [2011-04-09]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs>.
- [12] 3GPP. Feasibility study for orthogonal frequency division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement [EB/OL]. [2011-04-09]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs>.

## 作者简介

何 浩 (1984—),男,湖北人,武汉大学电子信息学院博士生,主要从事 MIMO, 协作通信及宽带无线通信的研究。

田 茂 (1957—),男,湖北人,武汉大学电子信息学院教授,博士,主要从事电波传播、无线通信以及嵌入式系统等方面的研究。

张文健 (1984—),男,河南人,武汉大学电子信息学院博士生,主要从事异构网络,中继的研究。

杨鼎成 (1985—),男,江西人,武汉大学电子信息学院博士生,主要从事中继,协作通信及宽带无线通信的研究。

## 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>