

文章编号:1007-5321(2006)02-0081-05

基于智能天线技术的码分多址系统容量研究

彭木根, 王文博

(北京邮电大学 电信工程学院, 北京 100876)

摘要:理论分析了影响基于自适应智能天线技术的码分多址(CDMA)移动通信系统上行链路容量的因素,研究了波束赋形平均干扰因子、小区外与小区内干扰比率因子以及多用户检测因子对系统容量的影响。仿真结果验证了理论分析,研究成果可用于自适应智能天线技术下的CDMA系统上行链路容量规划和先进的无线资源管理算法优化。

关键词:码分多址;智能天线;上行链路容量;背景噪声提升因子

中图分类号:TN911 文献标识码:A

On the Capacity of Code Division Multiple Access Systems Employing the Adaptive Smart Antenna Technique

PENG Mu-gen, WANG Wen-bo

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: An approach to determine the uplink capacity and load of code division multiple access (CDMA) systems employing the smart antenna technique was presented. The impacts of average antenna interference gain, inter-intra interference ratio, and multi-user detection factor were determined. By simulation, the analytical approach and the deduced expressions are demonstrated to be well available in the uplink capacity planning and the optimization of advanced radio resource management schemes.

Key words: code division multiple access; smart antenna; uplink capacity; background noise rise

0 引言

CDMA系统在使用智能天线技术后,增加和派生出了新的逻辑和虚拟资源,系统资源的内涵得到了扩展。研究智能天线技术下的系统容量至关重要。基于智能天线技术下系统容量和负载的正确评估,对空时处理系统中的多种无线资源进行有效的分配与管理,并合理设置无线资源管理算法参数,从而充分利用有限的无线资源,达到提高系统容量和频谱效率,进而优化系统性能的目标。

目前关于CDMA系统容量研究集中在频分复用(FDD)双工模式,主要论述了在上行链路可以采用背景噪声提升来评估系统理论容量和负载^[1],但是对采用了多用户检测技术^[2]和智能天线技术的CDMA系统的容量研究很少涉及,而这些是时分同步码分多址接入(TD-SCDMA)系统容量理论研究的基础。本文从理论上推导了采用智能天线技术的上行链路容量理论公式,给出了影响系统容量和负载的各关键因素,提出了波束赋形平均干扰因子的概念,论证了背景噪声提升因子与系统容量的关

系。通过比较系统级仿真结果和理论分析结果,验证了理论分析的正确性,各关键因素的概率分布和统计值对实际系统的网络规划优化具有指导作用。

1 智能天线技术概述

N 天线阵子的圆阵列几何结构如图 1 所示, A_0 对应天线阵子 0 所对应的坐标位置, 位于坐标原点; A_k 为第 k 个天线阵子对应的坐标, 相邻阵元间距为

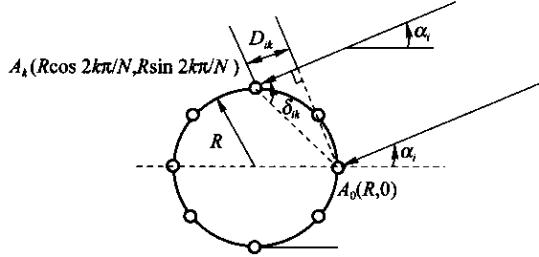


图 1 圆形阵列几何结构图

$\lambda/2$ 。当一信号 $s(t)$ 从 α_i 方向入射到天线阵列, 这个信号到达第 k 个天线阵子和第 1 个天线阵子的距离差为

$$D_{ik} = \cos \delta_{ik} \cdot R \sqrt{1 - \cos 2k\pi/N} \quad (1)$$

式中

$$\delta_{ik} = \alpha_i + \left(\frac{1}{2} - \frac{k}{N} \right) \pi$$

利用距离差 D_{ik} , 可以计算出第 k 个天线阵子和第 1 个天线阵子的相位差为

$$\varphi_{ik} = 2\pi \frac{D_{ik}}{\lambda}$$

因此阵列输出为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{a}(\alpha_i) s_i(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{a}(\alpha_i) = (1, e^{-j\varphi_{i1}}, e^{-j\varphi_{i2}}, \dots, e^{-j\varphi_{i(N-1)}})^T$$

$\mathbf{N}(t)$ 是 AWGN 阵列, 可表示为

$$\mathbf{N}(t) = (n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t))^T$$

如果有 K 个用户分别从 α_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 方向同时入射到该基站的天线阵列, 则天线阵列用矩阵的形式可表示为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\alpha) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{A}(\alpha)$ 是 1 个 $N \times K$ 矩阵, 可以表示为

$$\mathbf{A}(\alpha) = (\mathbf{a}(\alpha_1), \mathbf{a}(\alpha_2), \dots, \mathbf{a}(\alpha_K))$$

智能天线阵列波束赋形算法能自动调整权重实现信号的最佳接收, 目前主要有最大信噪比、最小均方误差、线性约束最小方差等方法, 考虑到算法实现的复

杂性和高运算量, 文献 3 采用最大接收信号准则调整权值。该算法的好处是只需对信号的入射方向进行估计, 就可以得到加权值, 无需求解相关矩阵和逆矩阵等复杂过程, 在系统信噪比没有明显降低情况下降低系统复杂度。根据最大接收信号准则, 即 $\mathbf{W} = \mathbf{A}(\alpha)$ 接收信号的方向因子可以表示为

$$\mathbf{f}(\alpha) = \mathbf{W}^T \mathbf{A}(\alpha) = \mathbf{A}^*(\alpha) \mathbf{A}(\alpha) = \| \mathbf{A}(\alpha) \|^2 \quad (4)$$

所以对射入方向为 α 的波束赋形功率(单位为 dBi)可以表示为

$$G(\alpha, \phi_k) = \sum_{m=1}^M e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R \left[\cos \left(\alpha - \frac{m-1}{M} 2\pi \right) - \cos \left(\phi_k - \frac{m-1}{M} 2\pi \right) \right]} / M \quad (5)$$

式中, α 为到达角(DoA); $\phi_k \in [0, 360]$; M 为天线阵元数; λ 为无线波长。这里假设最近 2 根天线阵元间隔距离为波长的一半, 则当 $M = 8$ 时, $R = 0.6533\lambda$ 。需要注意的是, 式(5)给出了智能天线的理想波束赋形增益, 在实际网络中, 对于每个用户其智能天线阵列图是不同的, 为了便于下面的理论分析和极限容量推导, 假设所有用户的天线阵列图都是理想的, 可以根据式(5)计算得到。

2 TD-SCDMA 上行链路容量模型

在移动通信系统中, 对于业务 i 其 E_b/N_0 可以表示为

$$\frac{P_{mi} G(\alpha, \phi_{mi})}{(1 - \beta) \sum_{n \neq i}^N P_{mn} G(\alpha, \phi_{mn}) + \sum_{k \neq m} \sum_{n=1}^N P_{kn} G(\alpha, \phi_{kn}) + P_N} \quad (6)$$

式中, W 指系统的码片速率; P_{mi} 为 i 用户在基站 m 的接收信号强度, 为在天线处测量得到的接收功率和, 不包含在基带处引入的波束赋形增益值; ϕ_{mi} 为用户 i 到服务基站 m 的入射角; ϕ_{mn} 为用户 n 到基站 m 的入射角; ϕ_{kn} 为基站 k 中的用户 n 到基站 m 的入射角; V_i 为用户 i 的语音激活因子, 如果是数据业务, 其值为 1; R_i 为用户 i 的比特速率; S_i 为在该速率下占用的时隙比率; P_N 为背景热噪声; $(C/I)_i$ 为用户 i 接收信号的信干比; β 是由于在上行信道中采用多用户技术的相关作用而引起的干扰消除(即干扰消除因子), 如果不采用多用户检测(MUD)技术则 $\beta = 0$, 否则 β 介于 0 和 1 之间(在

TD-SCDMA 中可以设为 0.9); N 为每小区平均接入的满意用户数。

根据文献[4]可知, 理论极限容量 N_{\max} 可以表示为

$$N_{\max} = \frac{G_{\max} + \tilde{G}(1 - \beta)C/I}{(C/I)(1 + j - \beta)G} \quad (7)$$

\tilde{G} 定义为波束赋形平均干扰因子, 含义为所有干扰用户由于智能天线波束赋形对目标用户形成的天线增益干扰均值。背景噪声提升(r)为用户的总接收功率(I_t)和背景热噪声的比值, 其为

$$r = \frac{I_t}{P_N} = \frac{N(1 + j)}{\frac{G_{\max}}{C/I} - \tilde{G}[(1 - \beta)(N - 1) + jN]} + 1 \quad (8)$$

系统的负载可以表示为

$$\eta = \frac{N}{N_{\max}} = \frac{(1 + j - \beta)r - 1}{1 + j + (1 + j - \beta)r - 1} \quad (9)$$

由式(9)可知, j 和 \tilde{G} 的大小会影响系统容量和负载。由于 j 和 \tilde{G} 在实际系统中会随环境、用户分布和系统参数设置而变化, 整个网络中各蜂窝小区中的 j 和 \tilde{G} 并不相同。表 1 和 2 列举了在目标 $C/I = -2.5$ dB 的假设前提下, 采用 8 阵元圆形天线阵列, 根据公式(5)可得 $G_{\max} = 9.1$ dB, 参数 f 、 β 和 \tilde{G} 对系统理论极限容量的影响。

表 1 CDMA 多蜂窝上行时隙理论极限容量($G = 0$ dB)

f	β					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
0.40	11.04	12.71	15.05	18.57	24.42	29.11
0.60	9.66	10.90	12.55	14.85	18.32	20.79
0.75	8.83	9.84	11.15	12.92	15.43	17.12
1.00	7.73	8.47	9.41	10.61	12.21	13.23

表 2 CDMA 多蜂窝上行时隙理论极限容量($G = -6$ dB)

f	β					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
0.40	41.82	48.62	58.14	72.43	96.24	115.29
0.60	36.59	41.67	48.45	57.94	72.18	82.35
0.75	33.45	37.64	43.07	50.39	60.78	67.82
1.00	29.27	32.41	36.34	41.39	48.12	52.40

从表 1 和 2 可以看出, 多用户检测技术(β 因子)对系统容量的影响较大, 但是相比 \tilde{G} 对系统容量的改善而言, β 的作用不如智能天线技术大。在实际的网络中, 应该采用先进的基于智能天线技术的无线资源管理算法, 使 \tilde{G} 尽量小, 从而提高网络性能。根据公式(8), 可以得到表 3 所示的系统接入用户数与 r 的关系。

表 3 CDMA 多蜂窝上行时隙容量与 r 的关系

$$(\beta = 0.78, \tilde{G} = 0 \text{ dB})$$

f	r/dB						
	1	2	6	12	15	25	100
0.40	2.43	4.87	13.5	20.5	22.0	23.5	23.7
0.60	2.10	4.13	10.8	15.8	16.8	17.8	17.9
0.75	1.90	3.70	9.42	13.5	14.3	15.0	15.1
1.00	1.64	3.16	7.76	10.8	11.4	11.8	12.0
1.20	1.48	2.83	6.80	9.36	9.84	10.3	10.3

从表 3 可以看出, 对于采用了智能天线技术的 CDMA 系统而言, 由于增加了智能天线增益, r 对系统的容量影响与全向天线时显著不同, 为了保证系统的负载为 75%, 在全向天线 FDD 模式下 $r = 6$ dB, 而在采用了 MUD 因子为 0.8, 宏小区场景基于全向天线的 TD-SCDMA 系统下 r 约为 9 dB; 但在智能天线下如果采用多用户检测因子为 0.78, 相应的 r 约为 2.47($j = 0.4$) 和 4.98 dB($j = 1.2$), 并且与 j 和 \tilde{G} 的大小密切相关。如果假设 $\tilde{G} = -6$ dB, 如表 4 所示, 负载 75% 对应于 r 约为 2.09($j = 0.4$) 和 3.15 dB($j = 1.2$)。在实际的网络中, 由于 f 和 \tilde{G} 会随接入的用户数量、用户所处位置、用户的资源分配算法等不同而变化, 所以 r 的值将会变化剧烈, 基于总接收功率的上行接入控制算法不能与传统的接入控制算法一样只考虑 r 的大小, 必须联合考虑 G_{\max} 和 \tilde{G} , 即接入控制门限 r 必须动态设置。

表 4 CDMA 多蜂窝上行时隙容量与 r 的关系

$$(\beta = 0.78, \tilde{G} = -6 \text{ dB})$$

f	r/dB						
	1	2	6	12	15	25	100
0.40	2.61	5.7	23.2	58.0	72.0	90.6	93.2
0.60	2.27	4.9	19.5	46.3	56.2	68.8	70.4
0.75	2.07	4.5	17.5	40.1	48.2	58.2	59.6
1.00	1.81	3.9	14.9	32.9	39.0	46.4	47.4
1.20	1.64	3.5	13.3	28.7	33.9	39.9	40.7

3 仿真及其结果

为了进行仿真验证,使用 C++ 语言搭建了一个 TD-SCDMA 系统级静态仿真平台。基于实际系统考虑,智能天线技术假设采用 8 阵元的圆阵天线阵,天线阵元之间间隔为波长的一半,采用理想的 DoA 估计,对每个接入系统的用户设备(UE)都具有相同的理念波束赋形阵列,并假设系统是软容量受限,码资源无限制(即只研究干扰受限的系统容量)。

3.1 仿真工具和参数描述

仿真平台基于 Macro 蜂窝模型,蜂窝半径为 577 m,每个小区只支持 1 个子载波,Macro 系统由 64 个无方向性天线的蜂窝组成,数据在中间 16 个蜂窝收集。基站到用户间的损耗为 $37.6 \lg d + 15.3$ 其中 d 为两者距离(单位为 m);设置静态抓拍次数为 800,每次抓拍功控次数为 150 次,基站最大总发射功率为 34 dBm,最大单码发射功率为 22 dBm,最小单码发射功率为 2 dBm,移动终端最大发射功率为 21 dBm,最小发射功率为 -49 dBm;基站端基本天线增益为 11 dB,而移动终端天线增益为 0 dB,基站热噪声为 -106 dBm,移动终端热噪声为 -104 dBm;阴影衰落均方差为 10 dB;基站和移动终端最小耦合损耗为 70 dB。研究 TD-SCDMA 中 12.2 kbit/s 上行链路纯语音业务,上行链路的误块率(BLER)为 10^{-3} 时对应的目标 C/I 为 -2.5 dB。

3.2 仿真结果性能分析

图 2 中,假设多用户检测因子大小为 0.78。由于实际系统中的参数 j 、 G 与服务用户数以及移动台位置密切相关,当接入用户较多时,用户分布比较均匀,从而 r 的期望值和均方差都逐渐减小直到达

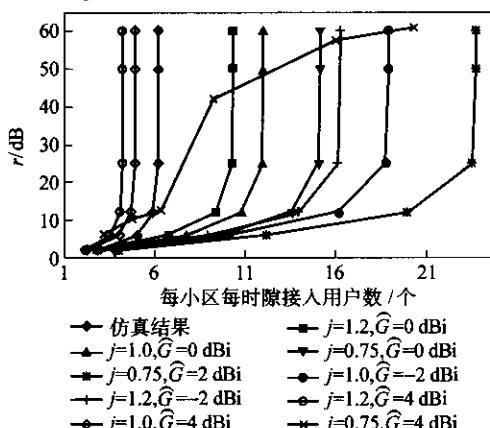


图 2 接入用户数与 r 的关系

到一稳定值。同时,接入用户越多,多用户处于同一主瓣的概率越多,从而 G 会增加;但用户数越多则用户分布更均匀,从而 G 的均方差会减小。仿真结果显示,当服务用户数小于 8 时,随服务用户的增加, r 缓慢增大,表明系统处于中低负载;当服务用户数大于 8 但小于 10 时, r 陡增,表明系统由中负载转变为高负载;服务用户数大于 10 后, r 增长缓慢,原因在于大于 10 时处于小区边缘的 UE 以最大功率发射,理想功率控制已经失效,此时接入的用户数已经超过了理论极限容量。

图 2 所示仿真结果处于理论计算曲线($G = -2 \text{ dB}$, $j = 1.2$)和曲线($G = 4 \text{ dB}$, $j = 1.2$)之间,原因在于实际系统中的 G 和 j 都是一个和 UE 所处位置密切相关的变量,不是一个恒值。

图 3 所示为 G 的概率分布仿真结果图。从图中可见,接入的用户数越少, G 的期望值也越小,但是波动非常大;随着接入用户数增加,相互干扰变大,使得 G 的期望值变大,但此时由于用户分布更均匀, G 的均方差值变小;当接入的用户数足够多时,不考虑码资源受限, G 的期望值将趋向于 1 dB,而其均方差值也会趋向于 1 dB。

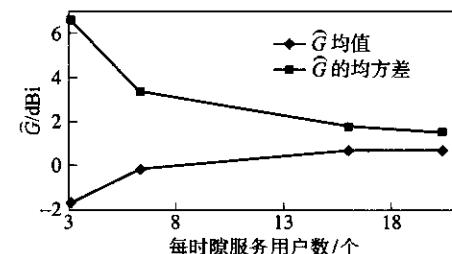


图 3 G 的分布

上行链路的系统容量大小除了与 G 有关,还与小区外与小区内干扰比率密切相关,其概率分布如图 4 所示。小区外与小区内干扰比率与接入的用户数密切相关,接入的用户数越多,波动越小,干扰分布越均匀,均方差值越小。另外,接入的用户数少也会导致邻小区的干扰效果更加明显,如图所示,当接入用户数小于 7 时, j 的期望值为 1.0,且均方差大于 0.65。在 FDD-CDMA 系统中,该值一般为 0.55,一般可以将小区外干扰看作热噪声;但在 TD-SCDMA 系统中由于小区外干扰值非常大,不能视为热

噪声.

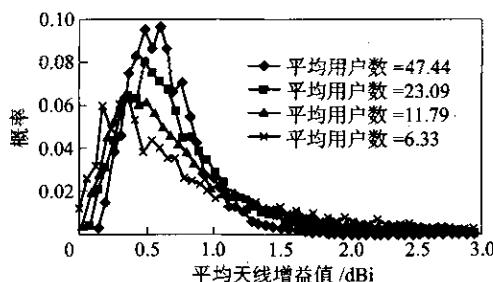


图4 小区外干扰与小区内干扰比率因子分布

由公式(7)以及表1和2可知,基于智能天线的CDMA系统上行链路容量还与上行链路采用的MUD因子大小有关,如表5所示。仿真结果表明, \hat{G} 和 f 的分布在不同多用户检测因子时相差较大, 这很好地诠释了不同参数对系统性能的影响。当MUD大于0.6时, r 较小, 与理论分析曲线 $f=1.6$ 和 $f=1.75$ 非常相近;当MUD较小时, 干扰较大, 有些用户无法正常满意服务, 功控失效, 理论上此时 r 无穷大, 但考虑到最大发射功率受限, 此时仿真所示的 r 并不会无穷增大。

表5 CDMA多蜂窝下MUD因子与 r 因子的关系(服务用户数为 7.5, $\hat{G}=0$ dB)

f	MUD					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
1.0	15.32	9.80	7.72	6.48	5.63	5.29
1.5	无穷大	无穷大	无穷大	15.05	10.35	9.21
1.6	无穷大	无穷大	无穷大	无穷大	12.53	10.72
1.75	无穷大	无穷大	无穷大	无穷大	28.47	14.96
仿真结果	40.16	37.21	28.56	16.70	13.40	12.80

4 结论

本文分析了基于智能天线技术下采用了多用户检测技术的CDMA上行链路系统容量,给出了相应的容量模型和评估公式。仿真结果显示,波束赋形平均干扰因子、小区外与小区内干扰比率因子的分布与接入用户数、UE所处位置以及相应资源分配算法密切相关。

参考文献:

- [1] Holma H, Toskala A. WCDMA for UMTS [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [2] 彭木根, 王文博. 基于多用户检测技术的时分双工-码分多址系统上行链路容量研究 [J]. 北京邮电大学学报, 2003, 26(3):27-31.
Peng Mugen, Wang Wenbo. On the capacity of time division duplex-code division multiple access uplink system with multi-user detection [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2003, 26(3):27-31.
- [3] 王大庆, 张惠明, 吴伟陵. CDMA中智能天线的接收准则及自适应算法研究 [J]. 通信学报, 1998, 19(6):33-39.
Wang Daqing, Zhang Huiming, Wu Weiling. A new criterion and algorithm of base station antenna arrays in cellular CDMA [J]. Journal of China Institute of Communications, 1998, 19(6):33-39.
- [4] 彭木根, 王文博. TD-SCDMA系统上行链路接入控制机制研究 [J]. 北京邮电大学学报, 2006, 28(1):35-40.
Peng Mugen, Wang Wenbo. Investigation of admission control mechanisms in the smart antenna technique based TD-SCDMA system [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006, 28(1):35-40.

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>