



智能天线的算法研究

国家无线电监测中心监测处 王爱举

随着无线通信事业的发展,频率资源越来越匮乏,用较少的频率资源来传输更多的信息以及抑制无线电干扰技术成为无线传播技术发展的两大挑战。故自第三代移动通信提出后无线传输部分马上成为研究热点,而作为关

键技术之一——智能天线的实现也成为科学工作者的奋斗目标。响系统工作指标,所以对算法的研究很有必要。结合自适应天线较成熟的算法,可概括出智能天线的算法有:

- (1)最小均方算法(LMS)
- (2)递归最小平方算法(RLS)
- (3)抽样协方差矩阵求逆算法(SMI)
- (4)等旁瓣针状波束形成算法
- (5)空间变步长算法
- (6)恒模算法(CMA)
- (7)最大比值合并法(MRC)
- (8)子空间法(SS)
- (9)功率反演算法
- (10)极大似然估计算法(ML)
- (11)自相关恢复算法(SCORE)
- (12)盲序列估计法(BSE)
- (13)共轭梯度算法(CGA)

上述算法虽很多,但归纳起来分为两类:需要参考信号的算法和不需要参考信号的盲估计算法。

键技术之一——智能天线的实现也成为科学工作者的奋斗目标。

概括的讲,智能天线是指利用数字信号处理技术,自动调整天线权值和空间指向,使高增益的主波束对准用户信号,而低增益的旁瓣或零陷对准干扰信号,从而放大和充分利用有用信号来抑制干扰,达到智能天线自动调整空间指向的目的。

智能天线除受硬件直接限制外,还受算法约束。算法好坏将直接影

能天线构造基于业务需求的动态小区,这要求智能天线具备定位和跟踪MS的能力,从而自适应地调整系统参数以满足业务要求,这表明使用智能天线可以改变小区边界,从而能随着业务需求的变化为每个小区分配一定数量的信道,即实现信道的动态分配。

由于每个用户在小区内的位置都是不同的。这一方面要求天线具有多向性,另一方面则要求在每一独立的方向上,系统都可以跟踪个别用户。通过DSP控制用户的方向测量使上述要求可以实现。每用户的跟踪通过到达角进行测量,

在TD-SCDMA系统中,由于无线子帧的长度是5ms,则至少每秒可测量200次,每用户的上下行传输发生在相同的方向,通过智能天线的方向性和跟踪性,可获得其最佳的性能。

TDD模式的TD-SCDMA的进一步的优势是用户信号的发送和接收都发生在完全相同的频率上。因此在上行和下行两个方向中的传输条件是相同的或者说是对称的,使得智能天线能将小区间干扰降至最低,从而获得最佳的系统性能。

通过智能天线获得的较高的频谱利用率,

使高业务密度城市和城区所要求的基站数量相应地变得较低。此外,在业务量稀少的乡村,智能天线的方向性可使无线覆盖范围增加一倍。无线覆盖范围的增长使得在主要业务覆盖的宽广地区所需的基站数量降至通常情况的1/4。

因此,TD-SCDMA中智能天线的应用是高经济系统设计的重要部分,可降低运营商投资和其经济收益。带有智能天线,联合检测和具有对称和非对称业务的自适应无线资源分配能力的TD-SCDMA技术的先进设计是迈向软件无线电的重要的一步。

需参考信号的算法

需要参考信号的算法是在实现智能天线定向波束中必须有预知参考信号,实现智能天线的功能。这种算法的优点是技术非常成熟,对其理论认识很深;缺点是需要参考信号参与,应用受限,且有时参考信号存在误差,影响整个系统的技术指标。根据需参考信号的不同又分为需参考波形和参考波达方向两种算法。

1. 需参考波形的算法

需参考波形的算法有最小均方算法(LMS)、递归最小平方算法(RLS)、抽样协方差矩阵求逆算法(SMI)等,其中以最小均方算法为代表。LMS算法是智能天线系统基本且重要的方法,基于LMS算法的阵列天线已广泛用于自适应天线系统,在抗多径干扰方面取得较好效果。LMS算法是在最小均方误差准则(MMSE)指导下,利用最陡梯度法推导出来的,其原理如下:

假设参考信号为 $d(n)$,数字波束形成网络处理函数为 W ,则系统的输出信号为:

$$y(n) = W^T X_N(n) \quad (1)$$

$$\text{其误差为: } e(n) = d(n) - W^T X_N(n) = d(n) - X_N^T(n)W \quad (2)$$

根据MMSE准则,要求均方误差最小,所以:

$$E[e^2(n)] = E[d^2(n)] - 2W^T R_{xd} + W^T R_{xx}W \quad (3)$$

其中: R_{xd} 为有用信号和参考信号的互相关系数

R_{xx} 为有用信号的自相关系数

$$\text{对}W\text{取梯度,并令其为零可得: } W_{OPT} = R_{xx}^{-1}R_{xd} \quad (4)$$

由此可见,当知道参考波形信号 $d(n)$ 时,可取得最佳权值。实现的方法是:

$$W_N(n+1) = W_N(n) + \mu \nabla_W [e^2(n)] \quad (5)$$

$$\nabla_W [e^2(n)] = \frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial W} = E\left[\frac{\partial e^2(n)}{\partial W}\right] = E[2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial W}] \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial e(n)}{\partial W} \right|_{W=W_{OPT}} = -X_N(n) \quad (7)$$

$$\text{所以 } \nabla_W [e^2(n)] = -2E[e(n)X_N(n)] \quad (8)$$

$$\text{可得 } W_N(n+1) = W_N(n) + \mu E[e(n)X_N(n)] \quad (9)$$

其中 μ 为常数,它决定了步速度。为了减小系统的复杂性及计算量,

$$E[e(n)X_N(n)] \text{ 将近似为瞬时期望值,即: } E[e(n)X_N(n)] = e(n)X_N(n) \quad (10)$$

$$\text{则得权值表达式: } W_N(n+1) = W_N(n) + \mu e(n)X_N(n) \quad (11)$$

此式为求 $W=W_{OPT}$ 的方法,也即LMS算法。

对需参考波形的算法及LMS算法的评价:

(1)需参考波形的算法技术非常成熟,对其理论、试验及应用有很

深的研究,是智能天线基本而且重要的方法;

(2)需参考波形的算法能反应信号信道变化,但是是以牺牲频谱利用率为基础的,相应降低了频谱利用率;

(3)LMS算法是一种基本的方法,基于LMS算法的各种形式阵列天线已广泛应用于自适应天线系统;

(4)LMS算法结构简单,成本低,可容许较大的硬件误差;

(5)LMS算法在抗多径干扰信号方面取得了较好效果,且当干扰数目少于阵元时非常好;

(6)LMS算法在干扰功率越大时其抗干扰效果越好,如果干扰功率小,需其它抗干扰手段,如跳频等加以辅助;

(7)LMS算法要用到参考波形信号,这就对如何得到参考波形提出要求。不仅要有参考信号,且还要有一定精度,否则系统工作会不理想甚至无法工作;

(8)在LMS算法中,大胆提出 $E[X_N(n)e(n)] = X_N(n)e(n)$,这种提法本身有不足之处,但当 N 趋向无穷大时,其统计意义成立;

(9)在现代移动通信环境中,干扰源的数目可能多于阵元数,此时LMS算法抗干扰效果不好,故LMS算法此时受限;

(10)LMS算法动态范围小,收敛速度慢,对非平稳信号适应性差;

(11)RLS算法也需参考波形。它以最小平方为准则,所用误差函数取值是每时刻对所有输入信号的重估计值,然后选择每一时刻权值的最优可能值,故这种算法的信号非平稳适应性强、收敛速度比LMS快且对矩阵的信号相关性不敏感。不足之处是由于时刻需对信号重估,信号码元间计算量大;

(12)在MMSE准则下的好多算法,如前面的LMS、RLS等都是闭环的,相对开环算法来说收敛速度较慢,且算法的性能指标对协方差矩阵 R_{xd} 很敏感,一旦参考信号或输入信号导致 R_{xd} 变坏,就不利于系统工作甚至无法收敛。SMI算法能很好解决这一矛盾,它属开环自适应,利用最大似然原理(ML),通过对取样协方差矩阵直接估计加权系数 W 来实现与特征值无关的最大收敛速度。SMI算法的不足之处在于需要高速度、高性能的数字信号处理器来实现加权系数 W 变化,而现代数字信号处理技术的发展对这一技术要求已不成问题,例如利用TMS320可以很好解决这一问题。另一个缺点是如果协方差矩阵呈病态,则求逆过程难以进行。

2. 需要参考方向到达角的算法

这种算法一般在最大信噪比(MSINR)准则下工作,也是非常成熟的技术,应用很广泛。其工作过程如下:

$$\text{设输入信号为: } X_N(n) = AU + n + i \quad (12)$$

其中: AU 为有用的输入信号, A 为信号振幅表达式, U 为信号相位

表达式, n 为噪声, i 为干扰。

$$\text{令 } l=i+n \text{ 为信号+干扰噪声值之和, 则: } X=AU+I \quad (13)$$

在阵列天线中相位依次后移且相移可能不等, 表达式为

$$U = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha_1} \\ e^{-j\alpha_2} \\ e^{-j\alpha_n} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha_N} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $\alpha_n = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \beta_n$, β_n 为第 n 个信号的人射角。经过天线系统后信号变为: $y(n) = W^T X_N(n) = X_N^T(n) W$ (15)

$$\text{信噪扰比为 } SINR = \frac{P_s}{P_i} = \frac{W^T R_{ss} W}{W^T R_{ii} W} \quad (16)$$

其中 P_s 为有用输入信号功率, P_i 为噪声干扰功率

要使 $SINR$ 最大, 可以利用正定的 Hamilton 矩阵变换及柯西施瓦茨不等式, 得

$$SINR \leq |A^2| \|D^T U\|^2 \quad (17)$$

式中 D 为 R_{ii} 的归一化正交矩阵

且当时 $W = u R_{ii}^{-1} U$ 等式成立, 即 $SINR$ 最大, 所以

$$W = W_{OPT} = u R_{ii}^{-1} U \quad (18)$$

为最佳权值。其中 μ 为常数, 决定了计算步速度

R_{ii} 为噪声干扰自相关系数

由此可见 $W = W_{OPT}$ 是和方向角有关的量, 如果预先知道波达方向角 DOA, 则 W_{OPT} 可顺利求出, 也就是由信号输入方向角来确定最优权值 W_{OPT} 。

观察此时最优权值 W_{OPT} , 发现它和前面 MMSE 准则下的加权值很相似, 只要 μ 和 R_{xx} 等价, 则模式完全相同。所以可利用 MMSE 准则下的算法实现 MSINR 下的计算, 故在 MMSE 准则下主要任务是确定 DOA。

确定 DOA 的方式很多, 最典型的有: 多重信号分类(MUSIC)和通过旋转不变技术的信号参数估计(ESPRIT)。其中 MUSIC 方法既适用于

噪声的方向判定, 又可用于信号的判定, 这里是信号方向的判定。它对协方差矩阵进行特征分解, 并进行谱峰搜索, 计算量很大, 运用现代数字处理技术能解决这一要求, 但实时性仍不太好; ESPRIT 算法无需谱峰搜索, 故处理速度快, 实时性强, 主要解决矩阵的信号方向, 缺点是要求两个子矩阵形式完全相同, 参量匹配时有困难, 故使用也受限。文献[1]、文献[2]给出了两种估计 DOA 的算法, 其中文献[1]的算法仿真试验明显优于 MUSIC 算法。

除了利用波达方向角按以上的方法实现智能天线的功能外, 还有一种是等旁瓣波束形成算法。当预知了 DOA 后, 直接将既定的方向图调出, 让主瓣对准有用信号方向、旁瓣对准干扰, 实现智能天线的功能。这种方法不需要一步步迭代来靠近 W_{OPT} , 而是一步到位, 故响应速度快、实时性强。文献[3]给出了这种方法较详细的描述。

对 MSINR 准则下算法的描述:

(1)只要知道波达方向角就能实现智能天线功能, 避开了难以寻找参考波形及有时波形不准通信环境的限制, 精度较高, 且对硬件要求不高, 允许有较大的硬件误差;

(2)DOA 判定技术成熟, 用 DOA 代替参考波形非常容易;

(3)在抗多径干扰方面性能很好, 尤其干扰信号少于阵元数目时效果更明显。值得一提的是, 文献[5]的算法在干扰信号多于阵元数目时其抗干扰能力仍很强;

(4)不需要各个干扰向量, R_{ii} 可以在信号间隔期间通过各阵元响应采集, 并通过高速处理机求得;

(5)避免了正交化加权向量可能导致的信号干扰噪声比下降的缺陷;

(6)不用 DOA 判别系统时, 可用来进行定向通信, 效果也很好;

(7)能反映信号信道变化情况, 但是是以牺牲信号频谱利用率为基础的;

(8)干扰信号多于阵元数目时抗多径干扰效果不好, 在这一方面应用受限;

(9)系统收敛速度对矩阵特征值不灵敏,不利系统工作;

(10)最小方差(MV)准则下的算法遵循需参考方向的,它一般要求输入信号经过权值处理后的噪声方差最小,对信号要求高,应用受限;

(11)空间变步长算法也是需参考方向的,它以最大接收电平为准则,可以很好地解决干扰源数目大于阵元数目的通信环境要求,且这种算法速度快,实时性强。

不需要参考信号的盲估计算法

不需要参考信号的盲估计算法(Blind Method)是近几年发展起来,不需参考信号的参与来实现智能天线的功能。这类算法无固定准则,凡是不用参考信号的算法都可归为这一类。由于不需参考信号而直接用天线收到信号的统计特性加以分析,取得有用信号、分离干扰噪声,再调整权值,故正被人们日益看中。这类算法主要有恒模算法(CMA)、最大比值合并法(MRC)、子空间法(SS)、盲序列估计法(BSE)等,其中以恒模算法为代表。

恒模算法(CMA)[4]由 Goford 和 Treich 提出并逐步完善,它无需参考信号,仅利用从接收端接收的信号进行自适应调整来完成包络信号的产生,是一种非常成功的盲估计算法,大量的文献及理论分析都证明了其自适应的有效性,受到人们的重视。其模型如下:

设接收端为 N 维信号 $X_N(n)$, 如它为包络信号则经过权值 W 处理后输出也应为包络信号。输出为:

$$y(n) = W^T X_N(n) = X_N^T(n)W \quad (19)$$

$$\text{CMA算法中的目标函数是: } G^{(P)} = E[|y(n)|^P - |a_n|^P]^2 \quad (20)$$

$$D^{(P)} = E[|y(n)|^P - R_P]^2 \quad (21)$$

其中 $R = \frac{E[|a_n|^4]}{E[|a_n|^2]}$ a_n 为信号源发出的原信号

为方便起见一般令 $P=2$, 且在阵列天线中应用CMA算法时一般令 $a_n=R_P=I$, 则有:

$$G^{(2)} = E[|y(n)|^2 - 1]^2 \quad (22)$$

$$D^{(2)} = E[|y(n)|^2 - 1]^2 \quad (23)$$

选择最快梯度法使权值最优得: $W(n+1) = W(n) + u \nabla W[D^{(2)}]$ (24)

对 W 求导数得权值表达式: $W(n+1) = W(n) + u e(n) X_N^T(n)$ (25)

其中: $e(n) = y(n)[|y(n)|^2 - 1]$

这样根据 $X_N(n)$ 及 $y(n) = W^T X_N(n)$ 就可求出权值 W , 而无需参考信号的参与,从而达到目标。

对盲估计及 CMA 算法的评价:

(1)盲估计算法无需参考信号,这样能满足多种通信环境。很多通信环境中难以找到参考信号或参考信号不准确,用盲估计算法可以从根本上消除由此带来的系统振荡甚至无法工作等情况;

(2)盲估计算法无法正面反应信号信道的变化,但它能提高信号的频谱利用率;

(3)CMA算法除了盲估计算法的一般特性外,它还能很好地补偿在多径环境中产生的多径衰落,克服信号间的时间延迟,对抗干扰有特殊的效果;

(4)CMA 算法在克服同信道干扰产生的影响时效果很好;

(5)CMA算法对相位的变化不敏感,故信号有较大相位变化或是相位调制时使用受限;

(6)CMA算法的原型收敛速度较慢,且到最优权值时有较大的剩余误差,不能很好的收敛于全局最小点,不能满足高精度通信的要求;

(7)CMA 算法要求输入信号的数目小于阵元数,否则效果不好^[13]。

(8)近年来多种文献都对 CMA 算法做了较大的改进,使 CMA 算法更趋成熟和完善。其中文献[5]、[6]将 CMA 算法和阵列天线有机的结合起来并证明了 CMA 算法的有效性;文献[7]、[8]在求权值时做了调整,其收敛速度增加,剩余误差减小;文献[9]对工程中的判决引导信号算法和 CMA 算法的转换做了阐述;文献[10]对算法做了更深入的分析;

(9)最大比值合并法(MRC)也是盲估计算法中较典型的算法,当信

号正交后以最大信号电平为目标,能很好地清除信号中的干扰和噪声;

(10)子空间算法(SS)也是一种盲估计算法,它是将整个信号先分解开提取有用信号后再合成,由于计算量大,只有在用户数目不太大时才能正常使用,故使用受限;

(11)功率反演算法也是盲算法的一种。它是LMS算法的演化,能无需参考信号达到自适应状态,要求是干扰信号数目少、干扰电平强于有用信号,且干扰电平越大效果越好,故应用受限;

(12)极大似然估计法(ML)也可无需参考信号,其思路就是以干扰噪声为代价,在有用信号未知的情况下,对有用信号做最大可能性的估计,目的是不漏掉任何有用信号,它能最大概率地得到有用信号;

(13)自相干恢复算法(SCORE)利用信号的周期平稳特性,如载频、波特率等,能无需知道太多的其它信息而提取有用信号。这种算法的适应性很强,但信号结构提取时计算量大,现代信号处理的发展可以满足这方的要求,实时性仍不太好;

(14)文献[11]利用用户信号是一个既定子空间的原理,这种方法优点是能扩大系统的容量,当它和阵列天线结合时能容纳较多的用户,缺点是当有较多的用户时需要大量的数字运算,实时性有待提高。文献[12]提出的算法仅利用前几个信号段就能估计出原来的信号,由于所用步骤少、估计过程简单,故实时性好,在实时通信中的适应性很强。

(15)共轭梯度法(CGA)是求权值时较好的方法,它的迭代公式简单、收敛速度比最快下降法快,有二次收敛特性,剩余误差很小、能进入准最小点。不足之处是在系统初始化时参数的指向可能不是真正的下降方向,这样易导致算法无法收敛,故要求误差函数是凸的。所

以很多系统是将CGA和最快梯度法混合使用,先让后者对系统初始化,再选择CGA算法来使系统收敛,这样充分利用二者的优点来达到最佳状态。

结论

本文着重阐述了智能天线系统中的算法问题,对需参考信号和无需参考信号两种技术要求下算法的优缺点做了较为详细的说明,对其中的典型算法做了简单的推导。由这些算法可以看出,通信的精确度、方便性和系统的复杂度、计算量是矛盾的,往往不能兼顾,只有根据不同的技术要求来确定所用的算法。本文的目的就是全面了解智能天线的算法,根据实际通信环境的要求来选择,以便让系统的综合指标如费用、精确度、实时性等达到最佳组合。另外,从优化系统指标考虑,如果在天线阵前端装上信号预处理器,例如Nolen级联网络、格莱姆——施密特级联网络等,可大大改善系统的收敛速度、对相关矩阵特征值敏感等问题,在此基础上的各种算法也就更接近实际通信环境的要求。

参考文献

- [1] 刘若伦,王树勋.基于累积量的二维DOA估计的特征向量算法[J].电子学报,1999,27(9):138-140.
- [2] 冯大政,史维祥.有效的自适应波达方向盲估计算法[J].电子学报,1999,27(3):1-4.
- [3] 冯正和,张志军.不采用自适应算法的智能天线系统[J].电子学报,1999,27(12):1-3.
- [4] D.N.GODARD,Self-recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-dimensional Data Communication Systems[J].IEEE Trans On Commun,1980,COM-28:1867-1875.
- [5] T.OHGANE,T.SHIMURA,N.MATSUZAWA AND H.SASAKA.An implement of a CMA Adaptive Array for High Speed GMSK Transmission in Mobile Communications[J].IEEE Trans,On Vehicular Technology,1993,42(3):282-288.
- [6] J.J.SHYNN,R.P.GOOCH.The Constant Modulus Array for Cochannel Signal Copy and Direction Finding . IEEE Trans On Signal Processing,1996,44 (3):652-660.
- [7] 欧阳喜,葛临东.一种新的基于CMA算法的递归步长盲均衡算法[J].信息工程学院学报,1999,18(1):44-46.
- [8] 樊龙飞,何晓薇,查光明.一种混合型盲估计算法[J].电子科技大学学报,1998,27(6):573-577.
- [9] 徐金标,杜利民,王育民.一种适用于QAM调制的变步长判决引导的盲均衡算法[J].通信学报,1998,19(11):21-29.
- [10] A.-J VAN DER AND A.PAULRAJ.An Analytical Constant Modulus Algorithm[J].IEEE Trans On Signal Processing ,1996,44(5):1136-1155
- [11] M.TORLAK AND G..XU.Blind Multisuser Channel Estimation in Asynchronous CDMA Systems[J]. IEEE Trans On Signal Processing, 1997,45(1):137-147.
- [12] 杨晓东,牟松会,杨日杰,赵俊渭.快速实现盲序列估计的一种新方法[J].电子科学学刊,2000,22(1):78-83.

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),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>