

# 基于 MoM/GA 的加载宽带天线的分析与综合

陈海涛

第七二二研究所 武汉市 70005 信箱 邮编 430079

**摘要** 加载是改善天线宽带性能的有效途径。文中首先给出了用矩量法(MoM)求解加载天线电气参数的统一的方法,然后在数值分析的基础上着重讨论了用遗传算法(GA)对加载天线进行优化设计的问题。文章指出,利用数值方法,可以对加载天线进行快速、精确的分析;而基于遗传算法的数值综合,虽有不够完善之处,但也仍具有较大的实用价值。

**关键词** 短波宽带天线 加载 矩量法 遗传算法

## 1. 引言

随着现代高频通信技术的发展,各种形式的短波宽带天线成为人们竞相研究的热点之一。传统的宽带天线包括对数周期天线、笼形天线、螺旋天线等等。当这些天线用于短波波段(3MHz-30MHz)时,由于其体积过于庞大,因而极大地限制了在车载、船载等移动通信台站的应用。在这种情况下,研制一种体积小、架设方便、机动灵活的短波宽带天线就显得尤有必要了。自二十世纪六十年代以来,通过对细圆柱天线加载一定的阻抗而拓宽其工作频带的理论得到了很大的发展。1961年,Altshuler 提出一种在距顶端四分之一波长处加载电阻的宽带偶极子天线<sup>[1]</sup>,可看作是最早的集总加载天线,几年后 Wu-King 提出了著名的无反射分布电阻加载理论<sup>[2]</sup>,从而在世界范围内掀起了一股研究加载天线的热潮,直到今天,国内外仍有不少人对这一课题继续进行深入探讨,并不断有新的成果发表。本文将结合具体的设计实例,来探讨利用遗传算法<sup>[3]</sup>对短波波段的加载宽带鞭状天线进行最优化设计的问题。

## 2. 天线的快速数值分析

我们知道,天线的电气性能取决于其电流分布。不管是何种形式的天线,严格说来都是电磁场的边值问题,即在给定的边界条件下求解麦克斯韦方程组。然而严格的解析方法求解将会遇到十分困难的数学问题。因此人们转而致力于研究各种数值方法,其中最典型的就是矩量法<sup>[4]</sup>。对细圆柱天线,运用矩量法可得到如下矩阵方程:

$$ZJ = V \quad (1)$$

其中  $Z$  称为广义阻抗矩阵,其元素为:

$$Z_{mn} = \langle J_m \cdot E_n \rangle \quad (2)$$

式(2)的含义为取第  $m$  个检验函数与第  $n$  个基函数的场的反应。 $V$  称为广义电压矩阵,其元素为:

$$V_m = \langle J_m \cdot E^i \rangle \quad (3)$$

即第  $m$  个检验函数与入射场的反应。由此可以看出选定一组基函数和检验函数后，天线的广义阻抗矩阵只取决于天线的电尺寸，无论分布加载还是集总加载都只是改变其广义电压矩阵，而不影响其阻抗矩阵。因此在优化计算时，对于每一种电尺寸的天线，只需计算一次阻抗矩阵，然后存入数据文件中，在迭代时反复读出。由于在矩量法的计算中，阻抗矩阵的计算往往会遇到数值积分，占用大量机时，因此采用这种方法可以大大加快优化运算的速度，是很有意义的。

为了验证所编制程序的正确性，首先计算了普通对称振子天线的输入导纳，如图 1 所示。与文献<sup>[4]</sup>所给的数据是非常吻合的。

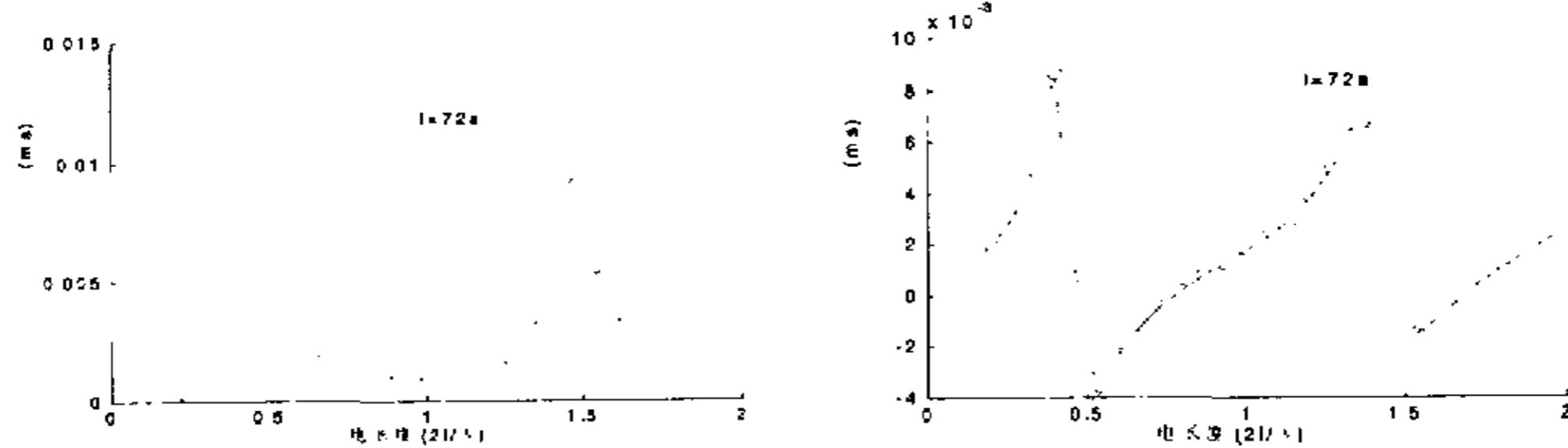


图 1 细圆柱天线的输入导纳

### 3. 加载宽带天线数值综合的研究及讨论

许多关于加载天线的文献中阐述的都是天线的分析问题，即在给定天线的样式、尺寸以及加载位置和加载量的情况下，如何比较精确、快速的计算天线的各项电气性能参数。在科研实践中，人们更感兴趣的是如何根据提出的电气性能要求来设计出一副天线，也就是天线的综合问题。综合的方法有解析法和数值法。由于天线的许多电气参数都难以用简单的初等函数来表达，因此解析法的应用受到限制；而随着计算机技术的不断发展，各种数值综合法越来越受到重视。天线的数值综合问题，即所谓的天线 CAD 技术，一直以来都是人们研究的热点。国内外许多学者都做了大量的研究，发表了大量的文章，也出现了许许多多的商业软件，然而直到目前，这一问题仍然没有得到比较完美的解决。许多所谓的最优化技术仍然带有较大的人为因素，而真正的智能化的综合程序尚未见到。这一方面是由于目前各种优化算法的局限性所致，另一方面也是由于天线综合问题本身的因素造成的。我们知道，对于稍微复杂一些的天线综合而言，其往往是一个多目标的问题，即有多项电气性能要同时满足，而这些电气性能之间又常常是相互矛盾的。这里所研究的宽带加载天线就是一个典型的例子，其阻抗的宽带性与其增益或效率就是一对矛盾，特别是当天线为电小天线时，矛盾表现的更为突出。这样就难以用某一个目标函数的极大或极小值来准确的描述设计的目的。

尽管如此，采用现代高速计算机来对天线进行综合毕竟对比以往纯粹依靠实验摸索要进步得多。虽然用数值优化方法综合到的参数不一定是真正的最优解，但它毕竟为设计提供了一个参考方向，可以作为实验调整的基础。因此，本文就以遗传算法为工具来对短波加载超宽带天线的综合问题作一些尝试，希望能对从事相关工作的工程技术人员提供一点参考。

遗传算法是模拟自然界生物进化过程与机制求解极值问题的一类自组织、自适应人工智能技术，是基于自然选择和基因遗传学原理的一种随机搜索算法。通常以一个二进制串编码

(染色体)来表示问题的一组可能解,其每一位称为该染色体的基因。它首先随机产生多个染色体组成初始种群,借助各个个体的适应值作为评价指标,反复使用遗传算子产生新的种群,同时搜索最优解,从而使问题的可能解不断改进并趋向于全局最优。其遗传操作由选择、杂交、变异三个算子完成,基本结构如下:

```

{ 初始化种群 p0
for (指定的进化代数)
{ 计算每个个体的适应值
  执行选择操作,生成 ps
  执行杂交,生成 pc
  执行变异,生成 pm
  p0=pm;
}
输出结果
}

```

在用遗传算法进行宽带天线的综合过程中,目标函数的选择是至关重要的,它直接影响到最后的优化结果。如前所述,所希望天线满足的两项指标——增益和带宽是矛盾的,在短波低频段更是如此,要获得比较好的宽带性能就必须牺牲一定的增益。而鞭天线是利用地波传播的,其使用频率又往往集中在低频段,如果为了保证阻抗的宽带性而牺牲了过多的增益,那这样的天线是没有意义的,因此,在目标函数中应该同时考虑增益和输入阻抗带宽这两项指标的要求。

现在要设计一副短波通信用的宽带鞭状天线,其尺寸为高 10m,平均半径 25mm。注意到阻抗的宽带性是用电压驻波比来衡量的,这里采用天线输入阻抗中的电阻分量的平均值作为馈线的特性阻抗来求驻波比,增益则由矩量法计算。为了便于比较,分别选择了两个函数作为目标函数,来观察它们最后的优化结果

第一个目标函数采用如下形式:

$$F_1 = t$$

$t$  为驻波比和增益同时满足条件的频率点的个数,这里驻波比和增益的条件分别取为小于 3 和大于-2dB。

第二个目标函数采用如下形式:

$$F_2 = \sum (G_s - G_0)^n$$

其中  $G_s$  表示系统增益,包括因加载电阻和反射功率带来的增益的损失,  $G_0$  为所希望的目标值,这里取 1dBi,  $n$  取 2。

出于结构上的考虑,加载的个数限为两个,且其中一个在天线根部,一个在距顶端 2.5 米处。优化参数定为 6 个,即每个加载阻抗都由电阻、电感、电抗的并联形式组成,并将元件值的范围限定为:  $0 \leq R \leq 1500 \Omega$ ,  $0 \leq L \leq 15 \mu H$ ,  $0 \leq C \leq 100 \mu F$ 。

用上面两个函数分别作为目标函数,种群规模取为 100 个,在进化了 50 代后,得到两组解集。分别选出两个解集中适应度最高的解来作为两组加载参数,如表 1 所示:

表 1 加载参数

	目标函数	$R1(\Omega)$	$L1(\mu H)$	$C1(pF)$	$R2(\Omega)$	$L2(\mu H)$	$C2(pF)$
第一组	$F_1$	696.9	3.4	12.7	165.4	6.2	53.9
第二组	$F_2$	566.9	3.3	12.7	425.3	4.5	87.3

图 2、图 3 为天线加载两组不同的参数后, 其输入阻抗和增益由计算机仿真的结果。

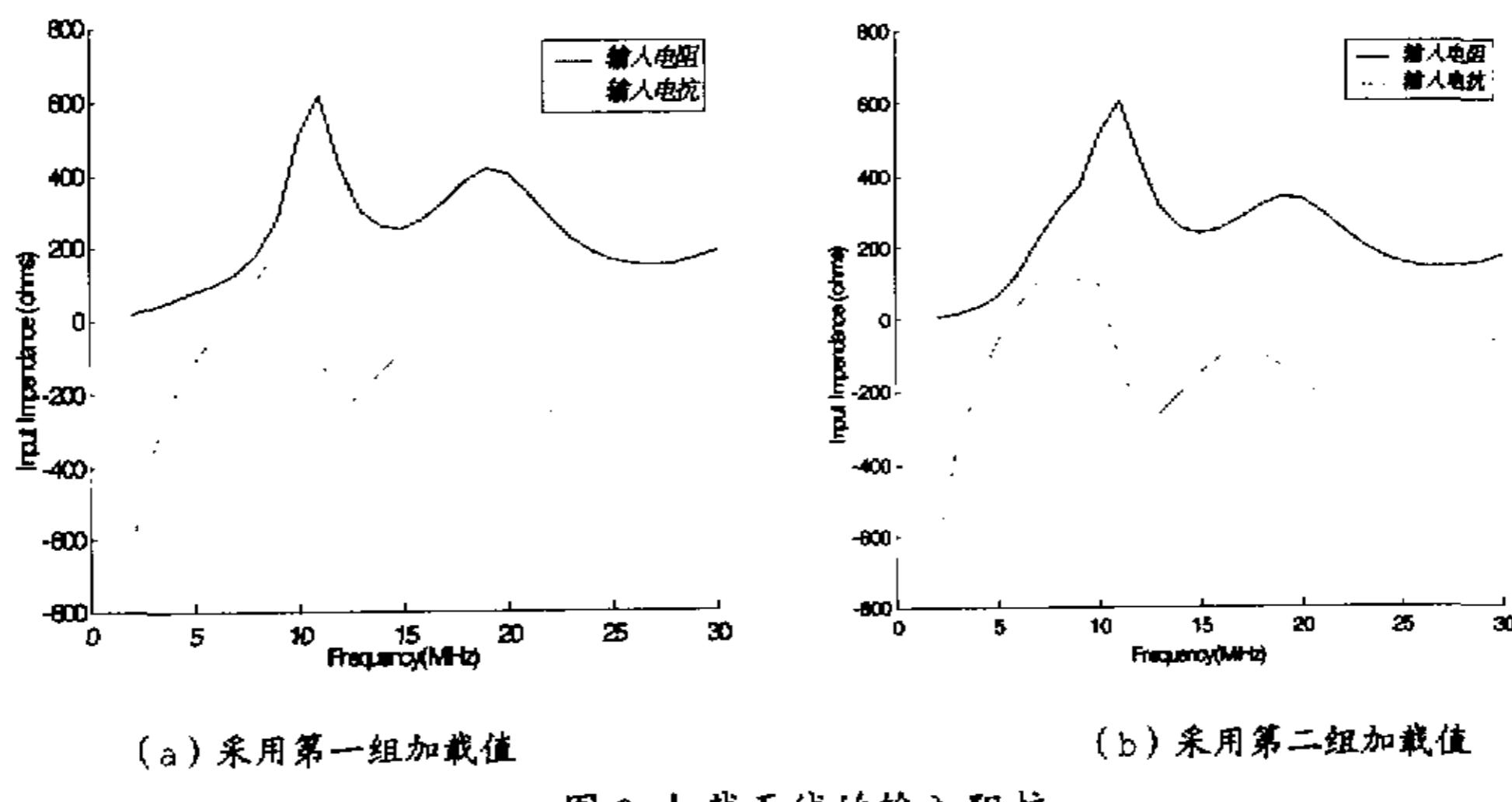


图 2 加载天线的输入阻抗

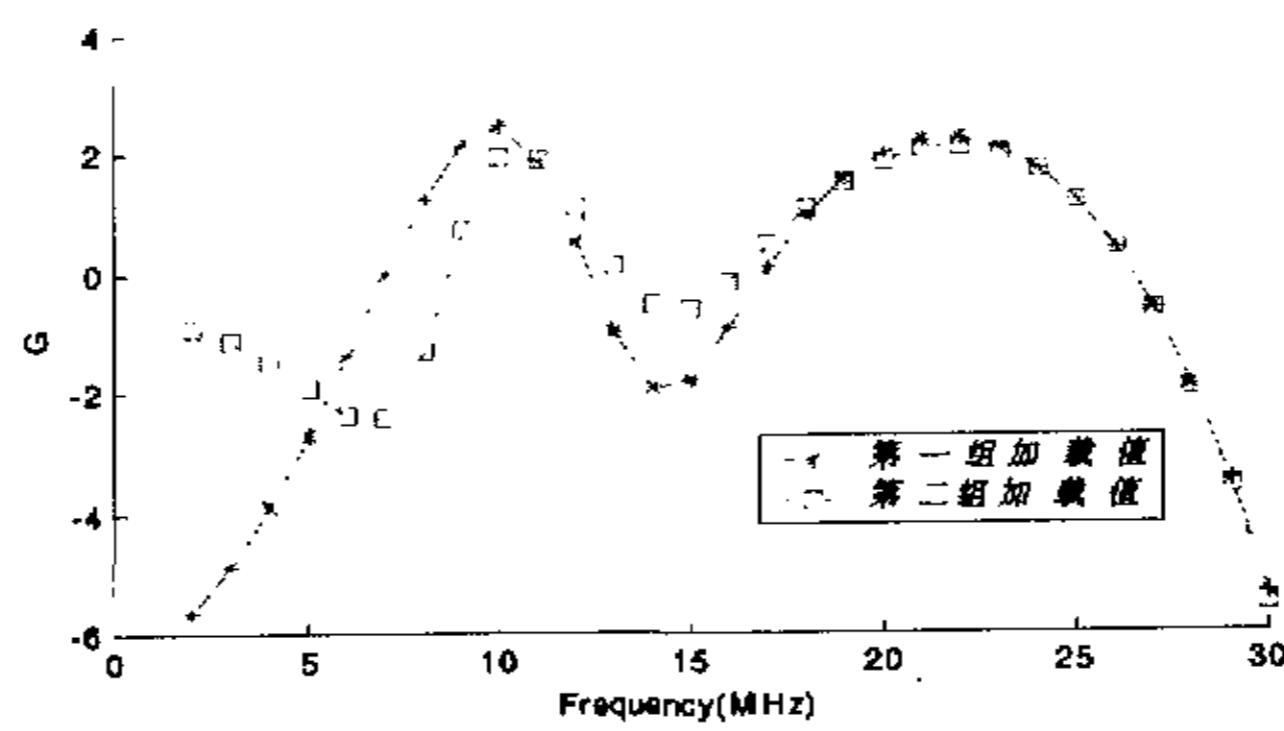


图 3 加载天线增益 (dBi)

对比一下采用两个不同的优化目标函数得到的结果, 可以看出两组加载参数得到的输入阻抗随频率变化的曲线大体相似, 从它们的阻抗圆图上判断, 都可以经过一个适当的阻抗变换器和匹配网络后在 4-30MHz 的频率范围达到  $VSWR < 3.0$ 。从理论上讲, 阻抗匹配网络也可以采用遗传算法来优化设计, 不过一旦求出了输入阻抗后, 其驻波比或反射系数与阻抗匹配网络元件的值之间的关系可以用一个非常简单的可微的函数来表示, 在这种情况下, 不如用更为传统一些的最速下降法、单纯形法等非线性规划方法来实现。用最速下降法设计宽带匹配网络的例子见文献<sup>[5]</sup>, 这里不再赘述。而两组加载参数得到的增益则存在着明显的差别, 其中第一组加载在低端要低于第二组, 在中段则要优于第二组, 而在高端, 两者重合。究竟如何取舍, 则要取决于实际使用的需要了。

#### 4. 结论

宽带化、小型化和智能化是现代通信天线发展的趋势。然而由于电尺寸的限制，天线的一些电气性能之间是矛盾的，只能根据实际使用的需要来进行取舍，以达到一个比较好的折衷。加载就是在小体积的天线上通过牺牲一定的增益来获得超宽带性能的一种有效的方法。本文在讨论其数值分析的基础上，着重研究了其数值综合的问题。相信随着电磁场数值方法的不断发展和大容量、高速度电子计算机的出现，未来的加载宽带天线以及其它更复杂一些的天线的设计将有可能实现真正意义上的智能化，从而摆脱过去那种大部分甚至完全依赖实验摸索的天线设计方法。

#### 参考文献

1. E.E. Altshuler. The Traveling-Wave Linear Antenna. IRE Trans. Antennas Propagat. vol.9, pp.324-329, 1961.
2. Wu, T.T., King, R.W.P.. The Cylindrical Antenna with Nonreflecting Resistive Loading. IEEE Trans. Antennas Propagat. pp.369-373, May 1965.
3. 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
4. 哈林顿著, 王尔杰等译. 计算电磁场的矩量法. 北京: 国防工业出版社, 1981.
5. S.T. Li, D.W.S. Tam. The Design of Impedance-Matching Networks for Broadband Antennas. NOSC 1988. AD187 600.
6. Alona Boag, Amir Boag, Eric Michielssen and Raj Mittra. Design of Electrically Loaded Wire Antennas Using Genetic Algorithms. IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol.44, pp.687-695, 1996.

#### 作者简介

陈海涛 (1979-) 男, 湖北人。2000 年毕业于南京理工大学, 2000 年 7 月起在武汉 722 所从事舰船天线设计工作。主要研究领域为宽频带天线及电磁场的数值方法。



## 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>