

天馈伺系统

大型双曲率雷达天线检测方法研究*

李宗春, 李广云, 薛志宏

(信息工程大学测绘学院, 郑州 450052)

【摘要】 针对某大型双曲率预警雷达天线(4m×8m)提出了比较完整的测量与调整方案。天线三维坐标测量采用了多台电子经纬仪构成的前方交会测量系统,通过最优设站技术,使坐标测量的精度达到±0.1 mm左右,实现了精密、高效的数据采集。在数据处理方面,创造性地提出了修正公共点坐标转换法,使设计坐标系的复现更准确合理;提出了双曲率雷达天线设计坐标的曲线插值方法,实践表明缩短了计算时间;独立研究出了该天线法向偏差的严密计算方法,实现了用法向偏差来评定天线的表面精度。探讨了雷达天线的安装调整方案,提出了系统制造误差的补偿方法和天线主面的调整方法,提出了馈源安装调整方法。通过该文的实践,提高了对大型双曲率天线检测的认知水平。

【关键词】 预警雷达天线;交会测量系统;修正公共点转换法;坐标内插;法向偏差

中图分类号:TN957.2 文献标识码:A

On the Calibration Method for a Large Double-curvature Reflector Antenna

Li Zong-chun, Li Guang-yun, Xue Zhi-hong

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

【Abstract】 A complete measurement and adjustment scheme for a large double-curvature reflector antenna is proposed in this paper. Multi-theodolite measuring system is adopted in this scheme, which could obtain an accuracy of coordinate measurement within ±0.1 mm. A new coordinate transformation method, which is called corrected common point coordinate transformation, was firstly proposed to recover the design coordinate system with high accuracy. A curve interpolation method was suggested to find the design coordinates of a measurement point. A normal deviation formula was also firstly derived. Finally, the adjustment scheme was put forward to get a high surface accuracy and precise feed position.

【Key words】 early warning radar antenna; multi-theodolite intersection system; corrected common point transformation; coordinate interpolation; normal deviation

0 引言

某双曲率预警雷达天线如图1所示,其曲面方程为

$$\begin{cases} x = x \\ y = \rho \cdot \sin \Psi - \frac{\rho \cdot \sin \Psi}{1 - \cos(\Psi + \theta)} \times \\ \quad \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{\rho^2} \tan^2 \left(\frac{\Psi + \theta}{2} \right)} \right) \\ z = -\rho \cdot \cos \Psi + \frac{\rho \cdot \cos \Psi}{1 - \cos(\Psi + \theta)} \times \\ \quad \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{\rho^2} \tan^2 \left(\frac{\Psi + \theta}{2} \right)} \right) + z_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:Ψ为入射角;ρ为矢径;θ为反射角。它们之间有确定的数值解关系,该天线条带为焦点带。其曲面边界条件为

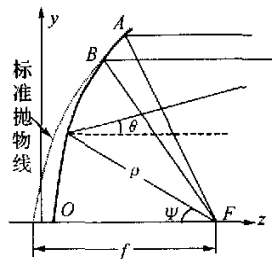


图1 雷达天线坐标系定义图

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

1 坐标转换

适合天线数据处理的坐标转换方法有曲面自由拟合法和公共点坐标转换法^[1-2]。对于双曲率反射体,曲面自由拟合法已不适用,而公共点转换法因公共点的设计坐标精度较低(加工误差及变形等)影响坐标系

恢复的精度,因此本文提出了一种新的坐标转换方法——修正公共点坐标转换法。因该法克服了公共点转换法中公共点精度较低的缺点,也可以称之为“无精度损失的公共点转换”。

该法是用实测的离散点和设计的理论曲面(此时理论曲面与实际天线尺寸相对应)直接进行转换。其转换过程为:坐标转换的初值可以手工输入或者通过公共点坐标转换计算给出,其次将测量点投影到理论面上,以投影点为公共点的设计坐标,重新进行坐标转换,获得新的转换参数;然后重复上述步骤,直到测量点相对于设计曲面的点位拟合精度最高时停止迭代计算。从该计算过程可以看出:首先,它能准确控制天线的设计位置;其次,公共点设计坐标经过逐次修正,其系统误差越来越小,提高了坐标转换的精度。实际计算时注意应尽可能精确地确定近似参数,以减少迭代计算时间。

对一个实际曲面,两种坐标转换方法结果的比较列于表1中。实践表明,修正公共点坐标转换法计算出的表面精度客观真实。

表1 实际坐标转换结果

坐标转换方法	公共点数/个	坐标转换精度 /mm	表面精度 /mm
公共点坐标 转换法	15	1.384	0.512
修正公共点 坐标转换	170	0.419	0.366

2 雷达天线设计坐标计算

坐标转换完毕后,获得了测量点在设计坐标系下的坐标值,还需其理论坐标才能计算轴向和法向偏差。而由式(1)可知,一个点的信息包括 $(\Psi, \rho, \theta, x, y, z)$,已知 x 和 y ,将其代入式(1)尚不能求出 $(\Psi_{\text{理}}, \rho_{\text{理}}, \theta_{\text{理}}, z_{\text{理}})$ 。要解决此问题须采用坐标插值的方法,可采用曲面差值法^[3],本文提出了一种新的方法——曲线插值法。

该法直接取 x 的值代入式(1),依据 (Ψ, ρ, θ) 得出曲线 x 的所有三维坐标点 $(\Psi, \rho, \theta, x, y, z)$;其次根据 x 和 y 坐标值,在理论坐标文件中查找 $(\Psi_{\text{理}}, \rho_{\text{理}}, \theta_{\text{理}}, z_{\text{理}})$ 。以查找 $z_{\text{理}}$ 为例(如图2所示),方法如下:设3号点坐标为 $(x, y, z_{\text{理}})$,一般情况下,在理论坐标文件中不存在此点,需通过其邻近的1,2两点内插。首先找出这两个点的坐标,在曲线 x 上找到两点,满足关系

$$y_1 \leq y < y_2 \quad (3)$$

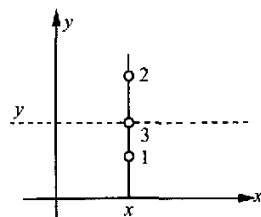


图2 坐标值曲线内插示意图

所以相邻两个点的坐标为

$$\begin{cases} 1(x, y_1, z_1, \Psi_1, \rho_1, \theta_1) \\ 2(x, y_2, z_2, \Psi_2, \rho_2, \theta_2) \end{cases} \quad (4)$$

有了两个已知点后,就可以计算3号点的设计 z 坐标值

$$z = z_1 + (z_2 - z_1) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (5)$$

3号点的其余参数 $(\Psi_{\text{理}}, \rho_{\text{理}}, \theta_{\text{理}})$ 可参考上式分别得出,只需将式(5)中的 z 换成相应的参数即可。

与曲面插值法相比较,该法的计算速度比较快,结果准确。

3 法向偏差及面形精度评定

在通常的数据处理中,获得了曲面的轴向偏差(见式11)就可评价其表面精度,而表面精度严格来讲应用法向偏差表示。但双曲率雷达天线法向偏差计算方法未见公开报道,本文经过研究,独立提出了如下算法。如图3所示, P 为曲面上任意一点,经过设计坐标查找后的点位信息为 $(\Psi, \rho, \theta, x, y, z_{\text{测}}, z_{\text{理}})$ 。图中 PA 为反射线, PH 为平行于 z 轴的水平线, PN 为法线, PF 为人射线(矢径 ρ'),一般情况下,这四条直线不共面(当点 P 在中截线上时,该四条直线共面)。 PA 与 PH 的夹角为 θ , PH 与 PN 的夹角为 β (待求), PF 与 xoz 面的夹角为 Ψ' , PF 在 xoz 面的投影与 z 轴的夹角为 α 。设点 F 坐标为 $(0, 0, z_F)$,则有

$$\rho' = \sqrt{x^2 + y^2 + (z_{\text{理}} - z_F)^2} = \sqrt{x^2 + \left(\rho - \frac{\rho}{1 - \cos(\Psi + \theta)} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{\rho^2} \tan^2 \left(\frac{\Psi + \theta}{2} \right)} \right) \right)^2} \quad (6)$$

$$\Psi' = \arcsin \frac{y}{\rho'}, \quad \alpha = \arctan \frac{x}{z_F - z_{\text{理}}}$$

从式(6)可以看出,如果点 P 在中截线上,则 $\rho' \approx \rho$, $\Psi' = \Psi$;当点 P 不在中截线上时,其矢径 ρ' 和入射角 Ψ' 均已发生变化,只有反射角 θ 保持不变^[4]。

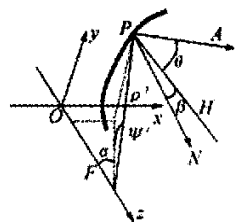


图3 雷达天线法向偏差计算图



图4 雷达天线视图

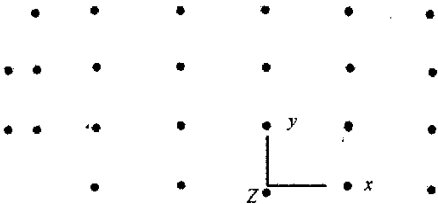


图5 雷达天线公共点分布图

PA 、 PF 和 PH 的方向余弦分别为

$$\begin{cases} PA(0, \sin\theta, \cos\theta) \\ PF(-\cos\Psi'\sin\alpha, -\sin\Psi', \cos\Psi'\cos\alpha) \\ PH(0, 0, 1) \end{cases} \quad (7)$$

因为 PN 是 PA 与 PF 的角平分线, 所以其方向余弦为

$$PN \begin{pmatrix} \frac{-\cos\Psi'\sin\alpha}{\sqrt{2(1+\cos\theta\cos\Psi'\cos\alpha-\sin\theta\sin\Psi')}} \\ \frac{\sin\theta-\sin\Psi'}{\sqrt{2(1+\cos\theta\cos\Psi'\cos\alpha-\sin\theta\sin\Psi')}} \\ \frac{\cos\theta+\cos\Psi'\cos\alpha}{\sqrt{2(1+\cos\theta\cos\Psi'\cos\alpha-\sin\theta\sin\Psi')}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

由此可得 PN 与 PH 的夹角 β 为

$$\cos\beta = \frac{\cos\theta + \cos\Psi'\cos\alpha}{\sqrt{2(1+\cos\theta\cos\Psi'\cos\alpha-\sin\theta\sin\Psi')}} \quad (9)$$

当 $\alpha=0$ 时, $\Psi'=\Psi$, 此时点 P 在中截线上, 上式还可写为

$$\cos\beta = \cos\frac{\Psi-\theta}{2} \quad (10)$$

点 P 的轴向偏差计算公式为

$$\Delta z = z_{\text{测}} - z_{\text{理}} \quad (11)$$

所以点 P 的法向偏差为

$$\Delta = \Delta z \cdot \cos\beta = \frac{(z_{\text{测}} - z_{\text{理}})(\cos\theta + \cos\Psi'\cos\alpha)}{\sqrt{2(1+\cos\theta\cos\Psi'\cos\alpha-\sin\theta\sin\Psi')}} \quad (12)$$

如此可得到天线的表面精度为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (13)$$

4 雷达天线安装调整方案

为指导天线在现场的安装与调整, 本文提出了雷达天线的安装调整方案。某双曲率预警雷达天线如图 4 所示, 由于天线的尺寸(4 m×8 m)比较大, 采用了分

块制造、整体组装的方法。天线组装后在工作姿态下, 采用经纬仪交会测量系统^[5-6]进行三维坐标测量, 公共点分布见图 5, 测量点位分布见图 6, 满足了上文提出的均匀整体覆盖的要求, 通过优化设站技术, 使点位测量精度达到±0.1 mm 以内。

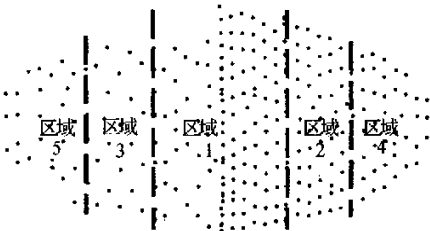


图6 雷达天线面板分块图

天线的结构分块如图 6 所示, 共有五块组成。根据本文提出的修正公共点坐标转换方法, 最终获得各分块的表面精度及总体天线精度见表 2。

表 2 天线表面精度统计 单位(mm)

	天线各分块					整体
	Part1	Part2	Part3	Part4	Part5	
表面精度	0.297	0.369	0.268	0.422	0.301	0.750

从上表可以看出, 天线各分块的精度大大优于整体精度, 说明各分块安装之后存在系统误差(见表 3)。当然每块也有随机误差, 由于不可调整, 故只考虑调整各分块之间的相对位置, 消除其系统差, 提高整体面形精度。

由于该雷达天线为双曲率天线, 其三维坐标调整并非易事, 现存调整方法的效率和精度还有待提高, 本文提出了如下两种调整方案。

4.1 直接三维放样

4.1.1 各分块坐标系的定义

设天线的各个分块(分块的面形靠加工保证, 此处只讨论定位)都有 3 个定位孔用作调整, 这 3 个点构成的平面坐标系如图 7 所示。其中坐标系的原点为 1, y 轴方向为 1、3 两点的连线方向, x 轴正方向指向 2

表 3 天线各分块之间的系统差

天线 各分块	坐标转换参数(以 Part1 为基准的差值)						转换精度 /mm
	X/mm	Y/mm	Z/mm	$R_x/(^{\circ})$	$R_y/(^{\circ})$	$R_z/(^{\circ})$	
Part1	0	0	0	0	0	0	0.309
Part2	0.144	0.219	-1.505	0.023 5	-0.034 2	-0.003 0	0.392
Part3	-0.130	-0.090	-0.125	-0.013 6	0.036 1	0.003 3	0.284
Part4	0.746	0.603	-3.281	0.037 8	-0.068 1	-0.004 0	0.458
Part5	-0.659	0.307	-2.028	-0.006 8	0.072 8	0.009 0	0.329

点, z 轴为平面的法线, 按右手坐标系定义其方向。则各点的理论坐标为其在自身分块坐标系的坐标, 其待调整坐标为其在 Part1 坐标系下的坐标, 这样将各分块坐标系的差别转化为 3 个调整点的待调整坐标与理论坐标的差值, 通过 3 个点的三维调整即可消除系统差。三维调整机构的设计可参考抛物面天线的调整机构, 见图 8, 能实现 x 方向和 y 方向的平移以及 z 方向的升降运动, 并且应有足够的调整量。

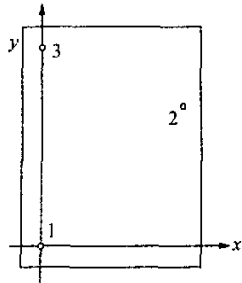


图 7 单块面板坐标系

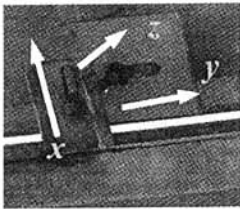


图 8 天线三维调整机构

4.1.2 调整方案

由于三维调整比较复杂, 因此考虑将三维调整简化为二维加一维的调整过程, 从而使调整过程简单可行。

- (1) 将实测面板调整到与设计面板相互平行。
- (2) 绕 z 轴旋转面板实现在 x, y 方向与设计位置重合。每次固定一个定位孔, 绕 z 轴旋转面板, 最终可以实现在 x, y 方向与设计位置重合。该步骤有两种方法^[5]: 其一是逐次趋近法, 其二是严格重合法。

考虑到实际调整过程带来的误差, 每步调整后也可以再重新测量定位孔的坐标, 用新测的数据进行调整, 因此调整工作是一个逐步趋近的过程。

4.2 只调整法向偏差

该法是抛物面天线安装调整时经常用到的方法。尽管调整点偏离理论点是一个空间向量(三个坐标分量), 但是只调整其法向偏差, 只要将点调整到理论面上, 调整即告结束。但是必须注意保持整个天线轮廓

的正确性, 也就是在面板初装时首先要将天线的平面位置大致调整到位, 后续调整只调法向偏差即可。

4.3 二者的比较

两种方法都各有特点, 对直接三维放样而言, 单块面板在 x, y 方向上的调整收敛比较快, 但调整易受其他面板的干涉; 二维调整至少需要 3 个人协作, 当天线处在垂直状态时, 操作的安全性差, 因此适用于天线在水平下状态的调整, 相对工作效率低。法向偏调整法差只需 1 个人进行一维调整, 工作效率比较高, 但 x, y 方向上的调整收敛比较慢。所以两者可以结合进行。

图 9 是天线调整前的误差分布图, 图 10 是模拟调整后的误差分布图, 可以看出表面精度得到了改善。



图 9 调整前天线表面
误差分布图



图 10 模拟调整后天线
表面误差分布图

5 馈源安装调整方法

馈源和天线主面在设计时有明确的对应关系, 当天线主面得到优化后, 其对应关系必然发生变化, 另外天线在工作状态下易产生自重变形, 也导致二者对应关系不正确, 因此需要对馈源进行微调。结合三维测量技术, 实现该问题就容易一些。其思路为: 当天线出现变形或主面精度得到优化后, 重新建立测量坐标系和设计坐标系的关系, 然后将馈源调整到位出来。馈源调整数据包括位置和姿态, 一般情况下, 馈源点位不能直接放样出来(比如在馈源喇叭内, 如图 11 所示)。这时就需借助间接的方法, 选择一些可观测的标志点, 建立这些点与馈源点位和姿态的关系, 根据测量坐标系和设计坐标系的关系, 用三维测量系统将馈源准确放样出来, 当然这也是一个逐次趋近的过程。

(下转第 70 页)

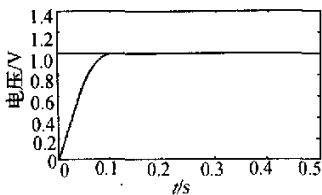


图4 专家PID控制仿真阶跃响应曲线

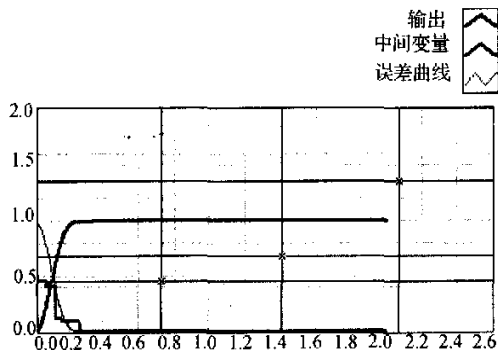


图5 系统阶跃响应

果很接近,能够达到较好的控制结果。

4 结 语

本系统充分利用 LabVIEW 在图形化编程和数据采集方面的优势和 MATLAB 在控制算法设计方面的

(上接第 66 页)

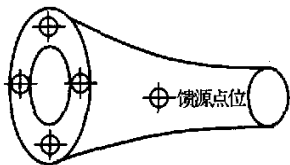


图11 馈源安装方法示意图

6 结 语

本文对双曲率雷达天线测量数据处理及调整方案进行了较深入的探讨,可归纳为:

1) 提出了修正公共点坐标转换法,既兼顾到天线的位置关系又有较高的转换精度。

2) 在天线表面精度计算方面,提出了曲线坐标差值的新方法,推导了双曲率雷达天线轴向偏差、法向偏差及表面精度的计算公式。

3) 探索了双曲率雷达天线的调整方案,模拟数据表明该方案能大大优化表面精度。

4) 结合三维测量技术和本文提出的修正公共点坐标转换法,本文提出了馈源的三维间接放样方法,有

优点,将两者有效、合理的结合,研究了 MATLAB 与 LabVIEW 相结合进行控制系统设计的方法。实践证明,本系统构架可很好地满足控制系统要求,同时还可以进一步拓展到网络化远程控制,在实时控制领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 刘君华. 基于 LabVIEW 的虚拟仪器设计. 北京:电子工业出版社,2003
- 2 高东杰,谭 杰,林红权. 应用先进控制技术. 北京:国防工业出版社,2003
- 3 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京:电子工业出版社,2003
- 4 裴 锋,杨万生. LabVIEW 与 MATLAB 混合编程. 电子技术应用,2004,30(3):4-6
- 5 牛全民,朱忠尼,戴志平. 雷达同步随动系统的设计与仿真. 现代雷达,2002,24(5):74-77

陈 桂 女,1973 年生,安徽旌德人,硕士,讲师。从事电力传动及其控制的教学与研究工作。

盛党红 女,1965 年生,江苏硕士,副教授。从事测控技术与仪器方向的教学与研究工作。

汪木兰 男,1967 年生,湖北孝感人,硕士,副教授。从事电力传动及其控制的教学与研究工作。

助于提高天线的使用效率。

致谢:非常感谢中电集团第三十八研究所王新稳工程师及其他几位专家的热心指点!

参 考 文 献

- 1 李宗春,李广云,金 超. 面天线检测数据处理方法的探讨. 宇航计测技术,2003,23(2):12-19
- 2 华慕麟. 天线变形曲面的一种拟合方法. 现代雷达,1994,16(1):75-82
- 3 李宗春,李广云,卢志辉. 余割波束天线检测方法的研究. 电波科学学报,2001,16(3):363-366
- 4 万 伟,王季立. 微波技术与天线. 西安:西北工业大学出版社,1986. 362-366
- 5 李广云,倪 涵,徐忠阳. 工业测量系统. 北京:解放军出版社,1994. 44-45
- 6 李广云. 工业测量系统进展. 北京:解放军出版社,2000. 34-43

李宗春 男,1973 年生,山东日照人,工学博士,信息工程大学测绘学院副教授。现主要从事天线测量理论与技术、工业测量系统和精密工程测量仪器与方法等研究和教学工作。

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>