

文章编号 1005-0388(2004)03-0338-05

主被动复合导引头天线共口径配置研究

马洪 李娜 漆兰芬

(华中科技大学电子与信息工程系, mahong_hust@263.net, 湖北 武汉 430074)

摘要 对主被动复合制导系统中的几种共口径天线配置技术进行了研究,其中被动测向系统中的天线为一个或多个宽带螺旋天线,主动雷达中的天线为标准旋转对称抛物面天线或其切割变形结构。对主被动天线之间的相互作用和影响进行了分析计算,并以此为依据进行性能比较和方案选优。

关键词 共口径复合天线, 天线互耦, 主被动制导

中图分类号 TN820.1⁺5 **文献标识码** A

Common-caliber antennas configuration schemes for passive/active compounded guiding system

MA Hong LI Na QI Lan-fen

(Huazhong University of Science and Technology,
mahong_hust@263.net, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract A few of common-caliber antennas configuration schemes for active/passive compounded guiding system were investigated in this paper. One or more wideband spiral antennas were used in the passive direction-finding sub-system and a standard rotation-symmetric parabolic antenna or partial-cut parabolic antenna was employed for the active pulse radar. As a key point, the interaction between the active antenna and passive antennas was analyzed.

Key word common-caliber antennas configuration, mutual influence among antennas, passive/active guidance

1 引言

使用宽带螺旋天线并配合单脉冲测向方法可构成实用的反辐射导弹宽带被动导引系统^[1]。为了进一步提高反辐射导弹的攻击力和作用距离,使其可对付处于非发射状态的目标雷达及其它低辐射功率目标(包括由目标雷达的发电机辐射出的电磁波探测出其位置),以及从远距离沿目标雷达天线的宽角副瓣甚至后瓣方向向其发起攻击,可在常规的被动测向系统基础上增加一个主动式脉冲雷达构成主被动复合制导系统。

在主被动复合导引头中,对主动式脉冲雷达天

线的基本要求是,具有高增益、低旁瓣电平、方向图可机械扫描、能方便地与被动测向系统组合并满足装弹要求。常规的抛物面天线和切割式抛物面天线可很好地达到这些要求。

本文研究几种主被动天线的共口径复合方案,并在此基础上进行性能分析和方案选优。

2 三天线共口径复合方案及性能

在三天线共口径复合方案中,两个双臂螺旋天线(阿基米德螺旋天线或等角螺旋天线)用于无源单平面测向系统^[1],主动雷达天线采用圆口径抛物面

收稿日期:2003-07-18

天线或对称切割抛物面天线。两只螺旋天线对称置于抛物反射面两边,并使螺旋平面的轴向夹角保持 $2\theta_0$,如图 1 示。

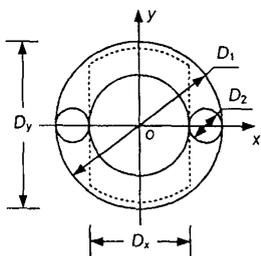


图 1 三天线共口径复合的配置
(D_1 :复合口径, D_2 :螺旋天线直径)

2.1 主动雷达天线分析

图 1 中所示的抛物反射面的口径尺寸为:

$$D_x = D_y = D_1 - 2D_2 \text{ (圆口径抛物面天线)} \quad (1)$$

$$\begin{cases} D_x = D_1 - 2D_2 \\ D_y = D_1 \end{cases} \text{ (对称切割抛物面天线)} \quad (2)$$

上述两种抛物面天线的远场方向图和增益示于图 2、3、4,计算中所使用的前置馈源为标准矩形波导开口。计算结果表明,切割抛物面天线的交叉极化电平高于标准抛物面天线。

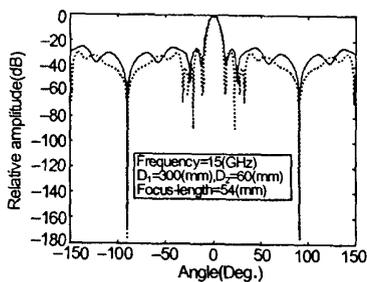


图 2 抛物面天线在水平面内的方向图
(—:圆口径天线,....:切割口径天线)

2.2 抛物面天线对螺旋天线的辐射耦合

由于两只螺旋天线对称地位于抛物反射面两边,毫无疑问,它们将从抛物面天线的馈源接收到较大的辐射泄漏功率(当主动雷达的工作频率位于螺旋天线的有效带宽时)。分析中,假设螺旋天线平面位于矩形波导馈源辐射场的远区,其接收到的泄漏功率为:

$$P_r = \left[\frac{\lambda}{2\pi(D_1 - D_2)} \sin\xi_1 \right]^2 G(\xi_1 + \theta_0, 0) P_t \quad (3)$$

式中, λ 是脉冲雷达的工作波长, P_t 是脉冲雷达

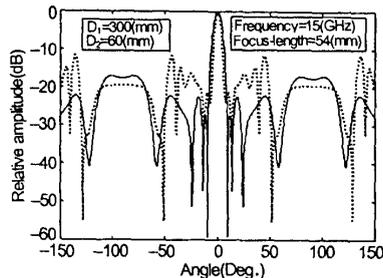


图 3 抛物面天线在垂直平面内的幅度方向图
(—:圆口径天线,....:切割口径天线)

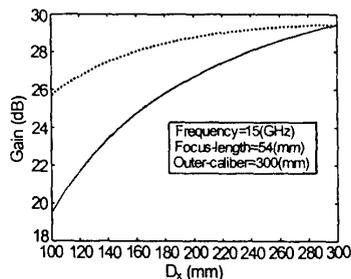


图 4 抛物面天线的增益随 D_x 的变化关系
(—:圆口径天线,....:切割口径天线)

的总输出功率, $F(\xi_1, 0)$ 是矩形波导馈源在 $(\xi_1, 0)$ 方向的归一化辐射方向函数, $G(\xi_1, 0) = G_0 F_1^2(\xi_1, 0)$ 为矩形波导馈源在 $(\xi_1, 0)$ 方向的增益, G_0 是该馈源的轴向功率增益,而 $G(\xi_1 + \theta_0, 0)$ 是螺旋天线沿 $(\xi_1 + \theta_0, 0)$ 方向的功率增益。其中, ξ_1 为:

$$\xi_1 = \arctan \left[\frac{1 + \cos\xi_0}{4f \cos\xi_0} (D_1 - D_2) \right] \quad (4)$$

式中, f 是抛物面天线的焦距, ξ_0 是其口径张角。改变抛物面天线与螺旋天线的口径中心的间距 L 将影响到泄漏功率 P_r 的值,如图 5 示。其中,计算时所取的参数为 $D_1 = 300 \text{ mm}$, $f = 54 \text{ mm}$, $\lambda = 20 \text{ mm}$, $P_t = 60 \text{ kW}$,阿基米德螺线常数为 0.47746 mm ,螺线平面的直径为 60 mm 。

上述结果表明,必须设法在螺旋天线输出端吸收掉该泄漏功率,否则将阻塞高灵敏度的被动测向接收机。同时,如果该功率直接被螺旋平面反射到空间,将等效地恶化抛物面天线的远区方向图(使主瓣波束变宽、副瓣电平升高)。图 6 给出了一种采用单刀双掷 PIN 开关的方案以避免上述情况的出现。将主动雷达的调制脉冲作为 PIN 开关的切换控制脉冲,使得在雷达发射期将螺旋天线与匹配负载相连,而在雷达发射间歇期将螺旋天线与测向接收机

相连。PIN 开关的带宽应与螺旋天线带宽基本相同以避免降低整个被动测向系统的带宽。

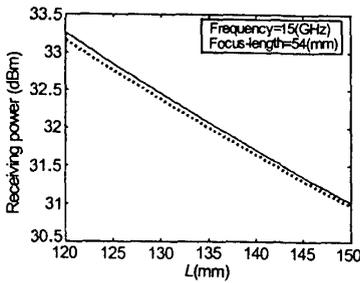


图5 螺旋天线接收到的泄漏功率随天线间距的变化情况 (—, $\theta_0 = 0^\circ$, ..., $\theta_0 = 10^\circ$)

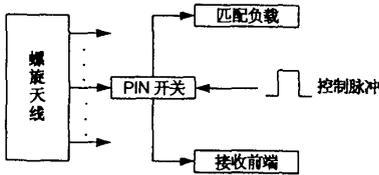


图6 在螺旋天线与测向接收机之间增加 PIN 开关

2.3 螺旋平面的散射场

螺旋天线接收到的泄漏功率绝大部分通过 PIN 开关被匹配负载吸收, 剩余部分功率被螺旋平面直接散射到空间构成对抛物面天线远区场的恶化, 如在水平面(或垂直面)形成宽角副瓣。引入螺旋平面的等效反射系数 η 后, 可将螺旋平面看成是导电平面并依次计算其口径场和远区场。注意到该散射面口径场的非同相分布特征, 使用广义 Kirchhoff 公式^[2]得到远区散射场为:

$$E_{\theta} = -j \frac{\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} \int_0^{2\pi} \int_0^c [A_1 \sin\phi - A_2 \cos\phi] * e^{j\beta \rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (5)$$

$$E_{\phi} = -j \frac{\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} \int_0^{2\pi} \int_0^c [A_1 \cos\theta \cos\phi - A_2 \cos\theta \sin\phi + A_3 \sin\theta] * e^{j\beta \rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (6)$$

式中,

$$A_1 = [d_3 \cos\theta \sin\xi \sin\phi' - d_2 \cos\theta \cos\xi - d_2] A(\rho, \xi, \phi')$$

$$A_2 = [d_1 \cos\theta \cos\xi - d_3 \cos\theta \sin\xi \cos\phi' + d_1] A(\rho, \xi, \phi')$$

$$A_3 = [d_1 \sin\theta \cos\xi \sin\phi' - d_2 \sin\theta \cos\phi \cos\xi + d_3 \sin\theta \sin\xi \sin(\phi' - \phi)] A(\rho, \xi, \phi') \quad (7)$$

$$A(\rho, \xi, \phi') = \eta \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{G_0 P_t}{4\pi}} \frac{1}{\rho} \frac{F(\xi, \phi')}{\rho} \sin\xi e^{-j\beta \frac{\rho^2}{2R}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{1 - \sin^2 \xi \cos^2 \phi'}, \\ d_2 &= -\frac{\sin^2 \xi \sin 2\phi'}{2\sqrt{1 - \sin^2 \xi \cos^2 \phi'}}, \\ d_3 &= \frac{\sin 2\xi \cos \phi'}{2\sqrt{1 - \sin^2 \xi \cos^2 \phi'}} \\ \rho &= \sqrt{\rho'^2 + l^2 + 2\rho' l \cos \phi''}, \\ \xi &= \arctg\left[\frac{1 + \cos \xi_0}{2f \cos \xi_0} \rho\right], \\ \phi' &= \arctg\left[\frac{\rho' \sin \phi''}{l + \rho' \cos \phi''}\right] \\ 0 &\leq \rho' \leq c, \quad 0 \leq \phi'' \leq 2\pi \end{aligned} \quad (9)$$

其中, c 是螺旋平面的半径, l 是主被动天线口径中心的距离。图 7 是根据上式算出的左、右两个螺旋平面在水平面(测向平面)上产生的散射方向图。由图可见, 虽然在 $\pm 119^\circ$ 处出现两个明显的散射花瓣, 但因其偏离中心轴线很远且电平很低, 故对主动雷达的影响可忽略不计。

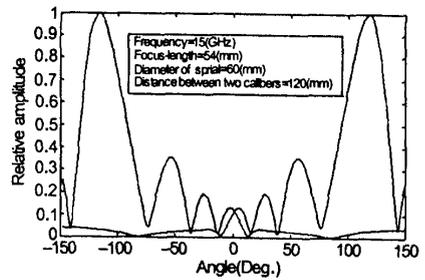


图7 两个螺旋平面的远区散射场

3 双天线共口径复合方案及性能

在该方案中, 使用一个双臂等角螺旋天线及一个波束运算网络^[1,3]形成两个重叠波束, 并采用幅度-幅度单脉冲技术完成在一个平面内的被动测向^[1]。主动雷达天线采用常规的圆口径抛物面天线或不对称切割抛物面天线, 螺旋天线放于抛物反射面一侧, 如图 8 所示。文献^[1]的分析表明, 螺旋常数对测角范围的影响微弱, 因此采用较小的螺旋常数(从而螺旋天线的口径较小)以给抛物面天线留出较大的安装空间。

3.1 主动雷达天线的分析

图 8 所示抛物反射面的尺寸为:

$$D_x = D_y = D_1 - D_2 \text{ (圆口径抛物面天线)} \quad (11)$$

$$\begin{cases} D_x = D_1 - D_2 \\ D_y = D_1 \end{cases} \text{ (非对称切割抛物面天线)} \quad (12)$$

表 1 列出了抛物面天线的远区方向图和增益特性, 计算中所取的频率为 15GHz, $D_1 = 300\text{m}$, $D_2 =$

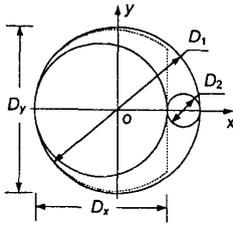


图 8 双天线共口径复合方案
(D_1 :复合口径, D_2 :螺旋平面直径)

60mm,抛物面焦距为 80mm。

3.2 抛物面天线对螺旋天线的辐射耦合

在这种方案中,螺旋天线接收到的矩形波导馈源泄漏功率的计算公式为:

$$P_r = \begin{cases} \left[\frac{\lambda}{2\pi D_1} F(\xi_1, 0) \sin \xi_1 \right]^2 G_0 G(\xi_1, 0) P_t \\ \left[\frac{\lambda}{2\pi(D_1 - D_2)} F(\xi_2, 0) \sin \xi_2 \right]^2 G_0 G(\xi_2, 0) P_t \end{cases} \quad (13)$$

其中,第一式对应于圆口径抛物面天线作为主动雷达天线的情况,第二式对应于非对称切割抛物面天线作为主动雷达天线的情况,且:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \arctg\left(\frac{1 + \cos \xi_{01}}{4f \cos \xi_{01}} D_1\right) \\ \xi_{01} &= 2 \arctg\left(\frac{D_1 - D_2}{4f}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \xi_2 &= \arctg\left(\frac{1 + \cos \xi_{02}}{4f \cos \xi_{02}} (D_1 - D_2)\right) \\ \xi_{02} &= 2 \arctg\left(\frac{D_1}{4f}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $G(\xi_1, 0)$ 和 $G(\xi_2, 0)$ 分别是等角螺旋天线沿 $(\xi_1, 0)$ 方向和 $(\xi_2, 0)$ 的功率增益。由于波束形成网络的输出信号是螺旋天线 M_1 模和 M_2 模的线性组合,因此它们应为:

$$G(\xi_1, 0) = G_1(\xi_1, 0) + G_2(\xi_1, 0) \quad (16)$$

$$G(\xi_2, 0) = G_1(\xi_2, 0) + G_2(\xi_2, 0) \quad (17)$$

其中, G_1 和 G_2 分别为 M_1 模和 M_2 模的增益。 P_r 的计算结果见表 1。

表 1 双天线共口径复合方案的性能计算值

天线形式	$2\theta_{0,s}$ (度)	$2\theta_{0,s}$ (度)	SLL(dB)	SLL(dB)	增益 (dB)	P_r (dBm)
	$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$	$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$		
圆口径抛物面天线	5.95	5.40	-25.8	-24.5	28.27	33.90
非对称切割抛物面天线	5.74	4.35	-23.5	-22.6	29.52	27.80

3.3 螺旋平面的散射场

由于在这种方案中只使用了一个螺旋天线,因此其远区散射场是不对称的,如图 9 所示。可见,与第一种方案一样,也出现了一个宽角副瓣。

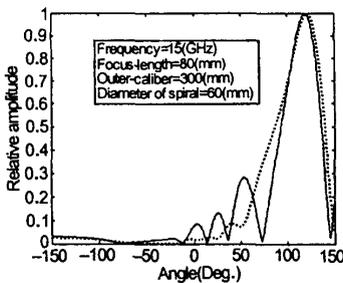


图 9 螺旋平面的远区散射场(水平面内)
(—,圆口径抛物面情况,....切割口径抛物面情况)

4 其它几种共口径配置方案及性能

除了上面给出的两种共口径配置方案外,还有两种共口径配置方案,分别如图 10(a)和图 10(b)所

示。

在图 10(a)中,主动雷达天线仍采用标准抛物面天线,但抛物面顶点 o 不再位于弹轴中心线上,两个螺旋天线位于抛物反射面的下方并有一定间距,同时保持螺旋平面的法线与弹轴方向平行(采用相干仪测向法)。这样配置的好处是,增大了主动雷达天线的口径面积从而提高其增益。这时,每个螺旋天线接收到的主动雷达漏射功率为:

$$P_{r1} = \left[\frac{\lambda}{4\pi L} F(\xi_1, \phi'_1) \sin \xi_1 \right]^2 G_0 G(\xi_1, \phi'_1) P_t \quad (18)$$

$$P_{r2} = \left[\frac{\lambda}{4\pi L} F(\xi_1, -\phi'_1) \sin \xi_1 \right]^2 G_0 G(\xi_1, -\phi'_1) P_t \quad (19)$$

其中, $F(\xi_1, \phi'_1)$ 、 $G(\xi_1, \phi'_1)$ 、 G_0 、 P_t 含义与前相同,抛物面天线馈源的角坐标为:

$$\phi'_1 = \arctg\left(\frac{2(D-d)\sin\alpha}{(D+d) + (D-d)\cos\alpha}\right) \quad (20)$$

$$\xi_1 = \arctg\left[\frac{1 + \cos \xi_0}{2f \cos \xi_0} \cdot \frac{\frac{1}{2}(D-d)\sin\alpha}{\sin \phi'_1}\right] \quad (21)$$

式中, ξ_0 为抛物面口径张角, f 为焦距, α 的含

义见图 10(a)。D 为复合口径尺寸, d 为螺旋平面直径, 抛物面天线的口径为 $D_0 = \frac{D-d}{2} + \frac{D-d}{2} \cos\alpha$, 两螺旋天线中心点之间的距离为 $l = \frac{1}{2} \frac{(D-d)\sin\alpha}{\sin\phi_1}$ 。图 11(a)和图 11(b)是计算出的抛物面天线口径 D_0 和接收到的漏射功率 P_{r1} 随 α 的变化曲线。对螺旋平面产生的远区散射场分析过程, 基本与第一种配置方案时相同, 此处不再赘述。

图 10(b)的口径配置方案基本与图 10(a) 相同, 差别仅在于用不对称切割抛物面天线作为主动雷达天线以进一步增大复合口径的面积利用率。这种情况下的性能分析从略。

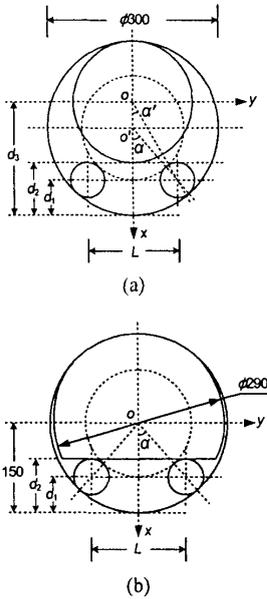
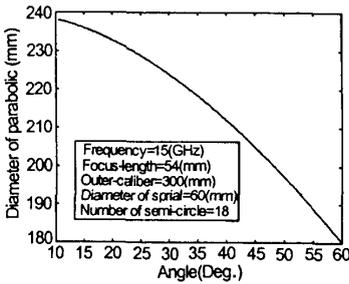
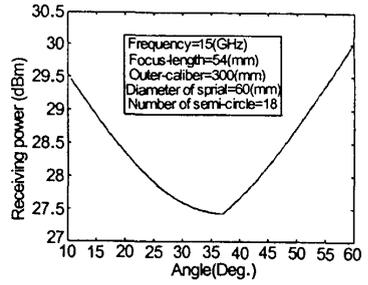


图 10 其它两种三天线共口径配置方案



(a) 抛物面天线口径 D_0 随 α 的变化



(b) 螺旋天线接收的漏射功率随 α 的变化

图 11 抛物面天线口径 D_0 与螺旋天线接收到的漏射功率 P_{r1} 随 α 的变化曲线

5 结论

本文给出了主被动复合导引头中的四种共口径天线配置方案以及主被动天线之间相互作用的计算方法和公式。综合考虑主动雷达天线的增益、波束宽度、副瓣电平和交叉极化电平, 以及主被动天线之间的相互影响、被动测向系统的测角范围和测角精度、系统实现复杂度等一系列指标, 第一种方案最优 (特别是采用对称切割抛物面时最好), 第四种方案最差, 第二、三种方案介于两者之间。

参考文献

[1] 马洪, 漆兰芬, 张业荣. 宽带被动导引头天线系统性能分析[J]. 电波科学学报, 1998, 13(2): 151~156.
 MA Hong, QI Lan-fen, ZHANG Ye-rong. The antennas performance of broad-band passive-guiding system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13(2): 151~156.
 [2] 魏文元等. 天线原理[M]. 国防工业出版社, 1985年.
 [3] 马洪, 漆兰芬. 主被动复合制导天线配置技术研究报告[R]. 华中科技大学, 1998年.



马洪 (1966—), 男, 四川人, 华中科技大学电子与信息工程系副教授, 博士。主要研究方向有天线、微波毫米波电路、无线与移动通信系统等。

李娜 (1980—), 女, 南京人, 华中科技大学电子与信息工程系硕士生。主要研究为天线、无线与移动通信系统等。

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>