

# 基于 SATC-CABP 成像模型的天线姿态误差补偿方法

杨延光, 周智敏, 宋 千

(国防科技大学电子科学与工程学院超宽带雷达实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 分裂孔径发射配置(SATC)天线体制可取得与传统单站 SAR 相当的方位分辨率,且更适用于前视探测的运动平台。步进频率信号对相位极为敏感,平台的运动误差将导致天线阵的姿态发生变化,使得成像结果出现几何畸变。针对天线阵姿态误差对成像的影响,提出了一种基于分裂孔径发射配置下固定孔径后向投影(SATC-CABP)成像模型的补偿方法,通过传感器获取的姿态倾角修正成像模型中的参数,可在成像过程中实现天线姿态误差补偿。仿真结果表明,所提出的方法可得到聚焦良好的成像结果,且可很好地校正由天线阵姿态误差引起的目标成像位置畸变。

**关键词:** 合成孔径雷达; 分裂孔径发射配置; 固定孔径后向投影算法; 天线姿态误差补偿; 步进频率

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

## Compensation method of antenna attitude errors based on the SATC-CABP imaging model

YANG Yan-guang, ZHOU Zhi-min, SONG Qian

(UWB Lab, School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The split aperture transmit configuration (SATC) antenna system has a similar azimuth resolution to the conventional monostatic SAR, and it is more applicable to the forward-looking motorial platforms for exploration. Antenna attitude errors caused by the movement errors of the platforms, however, will lead to imaging distortion of the system with step frequency signal, which is very sensitive to the phase errors. To overcome the effects of the antenna attitude errors on the imaging results, a new compensation technique based on the constant aperture back-projection (CABP) imaging model under the SATC antenna system is presented. The novel method can compensate the attitude errors of the antenna array during the imaging process via modifying some parameters of the imaging model by using the pose obliquity obtained through sensitive sensors. The simulation results show that the proposed method can obtain good focused image and perfectly calibrate the distortion of targets imaging locations caused by the attitude errors of the antenna array.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR); split aperture transmit configuration (SATC); constant aperture back-projection (CABP) algorithm; attitude errors compensation of antenna array; step-frequency

## 0 引言

车载探地雷达(ground penetrating radar, GPR)广泛用于道路和机场跑道质量检测,地下管道、电缆、地雷及未爆物等的探测。车载前视 GPR 系统以探测距离远、探测范围大和行进安全(用于探测地下未爆物时)等优点而备受关注<sup>[1-2]</sup>。考虑车载前视 GPR 系统对可靠性与实时性的要求,采用阵列天线,通过各单元快速切换并依次接收回波实现方位向的合成孔径更为合适。因平台的前进速度相对于

天线单元间的电扫描可忽略,可以实现快速行进中的探测。由于天线阵长度受车辆平台和天线支架机械结构的限制,如何提高方位分辨率成为关键。文献[2]提出了一种分裂孔径发射配置(split aperture transmit configuration, SATC)的天线体制,在同样孔径长度下它可以实现与传统单站 SAR 相当的方位分辨率。

为得到高分辨的二维 SAR 图像,在利用方位合成孔径处理获得高的方位分辨率的同时,需利用超宽带信号波形获得距离向的高分辨率。步进频率波形具有很好的功率和带宽扩展性,且可通过连续发射多个瞬时带宽较小的脉冲

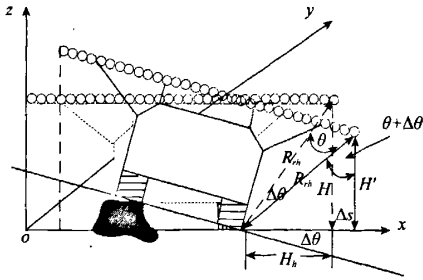
收稿日期:2007-03-12; 修回日期:2008-02-21。

作者简介:杨延光(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理,超宽带 SAR 信号处理,目标检测。

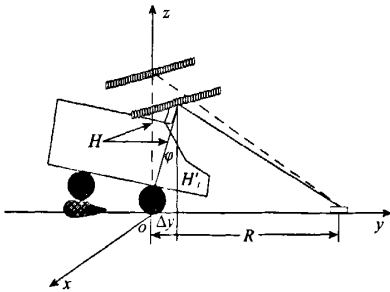
E-mail: yangguang.yang@gmail.com



天线阵将以两前轮的轴线为轴向前(后)倾斜,如图 2(b)所示。



(a) 横向倾斜示意图



(b) 纵向倾斜示意图

图 2 车辆姿态

## 2.1 横向倾斜

考虑车辆以右轮(从车辆后面看)为轴心向右横向倾斜的情况。对于图 2(a)中左轮抬高情况,假设天线阵右端点到右轮的距离为  $R_n$ , 天线阵水平时距离地面的垂直高度可表示为  $H = R_n \cos \theta$ , 天线阵右端到右车轮的连线与其到地面的垂线的夹角为  $\theta$ , 连线在地面的投影为  $H_s = R_n \sin \theta$ 。天线右端向下倾斜时,其右端到地面的垂直高度为

$$H' = R_n \cos (\theta + \Delta \theta) \quad (9)$$

天线阵在方位向上向右的偏移量为

$$\Delta s = R_n \sin (\theta + \Delta \theta) - H_s \quad (10)$$

天线阵在水平和垂直地面方向上的投影长度分别为

$$L_p = L \cdot \cos (\Delta \theta), \Delta H = L \cdot \sin (\Delta \theta) \quad (11)$$

天线阵向右横向倾斜后,其最右端单元的方位坐标为  $L + \Delta s$ ,由式(11)可得其最左端单元的方位坐标为  $L + \Delta s - L_p$ ,则由式(10)以及  $L_s$  可确定天线阵倾斜后各单元对应地面上的方位坐标位置为

$$x'_l = \Delta s + L - L_p + \frac{L_p}{L_s - 1} \cdot (l - 1), l = 1, 2, \dots, L_s \quad (12)$$

由式(9)和式(12)及  $L_s$  可确定天线阵各单元距离地面的高度为

$$H'_l = H' + \frac{\Delta H}{L_s - 1} \cdot (L_s - 1), l = 1, 2, \dots, L_s \quad (13)$$

当天线阵右端向上倾斜时,可采用类似的方法确定天线阵各单元对应的地面方位坐标和高度坐标。将天线阵倾斜时通过高精度测量仪器得到的姿态角代入式(9)、(10)和(11)中,然后利用式(12)和式(13)求得天线阵倾斜时各接收单元和两发射天线单元对应的地面方位坐标和高度坐标,代入式(1)和式(2),从而在成像过程中完成天线阵姿态误差的校正。

此外,当车辆的两个前轮其中一个位于地表的凸起处,另一个位于凹陷处时,车辆可能以其两前轮的中心为轴心倾斜,导致天线阵将以相位中心为轴心横向旋转倾斜,此时方位向的平移偏移量  $\Delta s$  为 0,不过这种情况在实际中发生的可能性较小。例如,当天线阵以其相位中心为轴心向右旋转倾斜时,最左端单元的方位坐标为  $(L - L_p)/2$ ,利用简单的几何关系可求得天线阵各单元对应的地面方位坐标位置为

$$x'_l = (L - L_p)/2 + \frac{L_p}{L_s - 1} \cdot (l - 1), l = 1, 2, \dots, L_s \quad (14)$$

各单元距离地面的高度为

$$H'_l = H + \frac{L \sin (\Delta \theta)}{L_s - 1} \cdot \left( \frac{L_s + 1}{2} - l \right), l = 1, 2, \dots, L_s \quad (15)$$

由于天线阵横向倾斜时,方位孔径在水平方向上的投影长度减小,这将导致天线姿态误差补偿后的方位分辨率仍小于天线阵未倾斜时的。方便起见,以位于孔径中心处的散射点(3,10)为例,以  $1/4$  方位分辨单元为误差容限,来计算最大可容许的横向旋转倾斜角。由式(8)可得横向倾斜时,经姿态误差补偿后该散射点对应的方位分辨率为

$$\rho_{Dx}^u = 0.886 \cdot \frac{\lambda_c}{2(\sin \Theta_x^u + \sin \Theta_x^r)} \quad (16)$$

这里  $\Theta_x^r = \arctan \left( \frac{3 - x'_l}{R_n} \right)$ ,  $\Theta_x^u = \arctan \left( \frac{x'_l - 3}{R_n} \right)$ ,  $R_n$  的定义与式(8)中的相同,上标  $(\cdot)^u$  表示横向倾斜。其中  $x'_l$  和  $x'_{l_s}$  可由式(12)求得

$$x'_l = H \sin (\theta + \Delta \theta) / \cos \theta - H \tan \theta + L(1 - \cos (\Delta \theta)) \quad (17)$$

$$x'_{l_s} = H \sin (\theta + \Delta \theta) / \cos \theta - H \tan \theta + L \quad (18)$$

由式(8)可得天线阵未横向倾斜时散射点(3,10)对应的方位分辨率为  $\rho_{Dx} = 0.813 \lambda_c$ ,则可容许的最大横向倾斜角  $\Delta \theta$  可由下面的不等式求得

$$\rho_{Dx}^u - \rho_{Dx} \leq \rho_{Dx} / 4 \quad (19)$$

利用式(16)–(18)将上面的不等式重写为

$$\sin \left[ \arctan \left( \frac{3 - H \sin (\theta + \Delta \theta) / \cos \theta + H \tan \theta - L(1 - \cos (\Delta \theta))}{\sqrt{10^2 + H^2}} \right) \right] + \sin \left[ \arctan \left( \frac{H \sin (\theta + \Delta \theta) / \cos \theta - H \tan \theta + L - 3}{\sqrt{10^2 + H^2}} \right) \right] \geq 0.436 \quad (20)$$

由式(20)可知,直接求解  $\Delta\theta$  很困难。而式(20)中只有  $\Delta\theta$  为变量,令该不等式的左端等于  $f(\Delta\theta)$ ,给定一组参数  $L=6\text{ m}$ ,  $H=3.5\text{ m}$ ,  $\theta=29^\circ$ ,可画出  $f(\Delta\theta)$  随  $\Delta\theta$  变化时的关系曲线(如图 3 所示)。 $f(\Delta\theta)=0.436$  时对应的  $\Delta\theta$  即为所求的最大横向倾斜角。

图 3 中的实线与水平线的交点代表天线阵向右横向倾斜时,最大容许的倾斜角( $33.52^\circ$ ),虚线与水平线的交点代表天线阵以相位中心为轴心向右旋转倾斜时最大容许的倾斜角( $37.92^\circ$ )。比较图中的两条曲线可知,在同样的横向倾斜角度下,以天线阵相位中心为轴心的旋转倾斜经误差补偿后方位分辨率的损失更小一些。这是因为该种倾斜方式下,方位向的平移偏移量  $\Delta s$  为 0,使得  $\Theta^r = \Theta^c$ ,此时的  $\sin \Theta^r + \sin \Theta^c$  达到最大值,方位分辨率也最好。仿真结果中的图 6 也证实了这一结论。

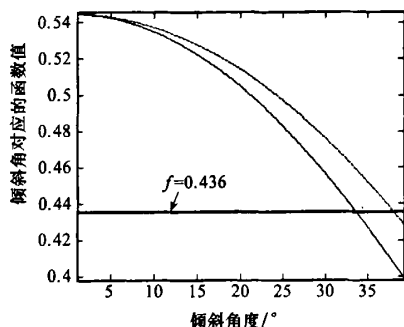


图 3 横向倾斜对应的  $f(\Delta\theta) \sim \Delta\theta$  关系曲线

## 2.2 纵向倾斜

如图 2(b)所示,假设天线阵向前倾斜的角度为  $\varphi$  (假定向前为正),地面目标到天线阵相位中心的距离在地面上的投影为  $R_g$ ,前向倾斜时天线实际高度变为

$$H'_g = H \cdot \cos \varphi \quad (21)$$

天线阵向前倾斜时引起的距离向偏移量为

$$\Delta y = H \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

地面目标到天线阵相位中心的距离在地面上投影的实际距离变为

$$R'_g = R_g - \Delta y \quad (23)$$

利用高精度测量仪器测出倾斜角  $\varphi$ ,由式(21)和式(23)可以计算出  $H'_g$  和  $\Delta y$ ,将  $H'_g$  和  $y_s - \Delta y$  分别替代式(1)和式(2)中的  $H$  和  $y_s$ ,可在成像过程中完成对天线前向倾斜的校正。当向后倾斜时  $\varphi$  为负,天线阵向远离目标方向偏移,可采用相似的方法进行天线姿态校正。

由于天线俯仰的波束角很宽,纵向倾斜在一定范围内( $\pm 20^\circ$ 内)波束仍然可以照射到探测区域内的目标,通过天线姿态校正仍可正确成像,且方位和距离分辨率都不会改变。因目标到天线相位中心的实际距离发生变化,图像中的目标将在距离向上偏离真实位置,但方位上不会发生偏移。因此,这里仅分析天线阵纵向倾斜多大时方需要姿态补偿。以位于孔径中心处的散射点(3,10)为例,计算满足距离向目标位置偏移小于  $1/4$  个距离分辨单元时对应的纵向倾斜角度。令式(22)中的  $\Delta y = \rho_r/4$ ,可得不需进行误差补偿的最大纵向倾斜角度为

$$\varphi = \arcsin(\rho_r/4H) \quad (24)$$

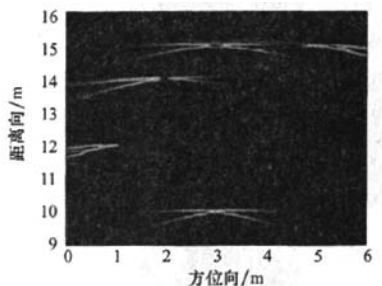
其中  $\rho_r$  为系统的距离分辨率。

天线阵横向倾斜对于成像的影响比纵向倾斜要大一些,目标在方位和距离向上都将发生偏移,因此必须进行天线姿态误差补偿。在实际中,车辆的横向倾斜角度一般在  $\pm 15^\circ$  以内(小于  $\pm 33.52^\circ$ ),对天线姿态误差进行校正后,成像的方位分辨率和视觉效果几乎不受影响。

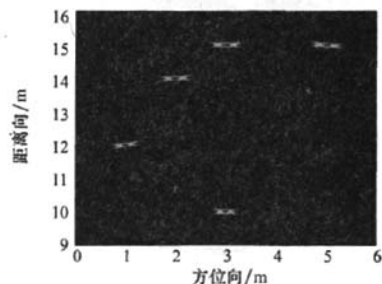
此外,车辆不可能沿一条直线行驶,会出现两个前轮一前一后的情况,这将导致天线阵在平行于地面的平面内前后倾斜,这不会影响对应成像区域的成像分辨率,但会使得天线波束照射中心的轨迹不是一条直线,需对成像结果进行配准。鉴于篇幅的限制,这里不再对它更为复杂的姿态变化情况进行讨论。通过电子测量设备获取天线阵的横向倾斜角、纵向倾斜角、水平方向倾斜角(从垂直地面方向看)以及相位中心的高度,可计算出天线阵各单元的三维位置坐标,进而利用 SATC-CABP 成像模型在成像中完成天线姿态误差补偿。

## 3 仿真结果及分析

在以下的仿真试验中,假设成像目标是各向同性的,且不考虑距离衰减和天线的加权影响。车辆平台运动的最大速度为  $5.56\text{ m/s}$ ,接收天线阵长  $L=6\text{ m}$ ,具有  $L_r=64$  个接收单元,距离地面的垂直高度  $H=3.5\text{ m}$ 。采用某一步进频率雷达的参数,此速度对合成距离像造成的影响可忽略,故在成像仿真中不考虑车速的影响。成像区域距离向长度为  $7\text{ m}$ ,方位向宽度为  $6\text{ m}$ ,五个散射点的位置分别为:(1,12)、(2,14)、(3,10)、(3,15)和(5,15),单位为  $\text{m}$ 。图 4(a)和 4(b)分别给出了利用式(6)和(7)得到的成像结果。图 4(a)表明,在 SATC 方式下,直接对步进频率信号利用 CABP 成像算法无法得到正确聚焦的结果;而利用修正后的成像公式可得到良好的聚焦结果(如图 4(b)所示)。



(a) 复信号直接相干叠加



(b) 复信号经补偿相位后相干叠加

图 4 利用 SATC-CABP 算法对步进频率信号的成像结果

为分析天线姿态变化对成像结果的影响,图 5(a)和图 5(b)分别给出了天线阵在两种横向倾斜(向右倾斜)方式下

的成像结果,图 5(c)给出了纵向倾斜(向前倾斜)时的成像结果。

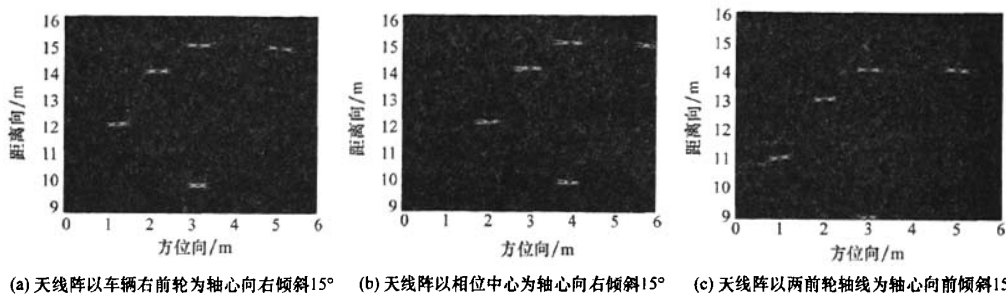


图 5 天线阵姿态倾斜对成像结果的影响

由图 5 可以看出,天线姿态误差未校正的成像结果中,目标位置均发生了偏移。图 5(a)和图 5(b)表明,天线阵横向倾斜时,目标在方位向和距离向上均发生偏移,且在同样的倾斜角度下,天线阵自身的倾斜将使得目标偏移更厉害。图 5(c)表明,天线阵纵向倾斜时,目标仅在距离向上发生偏移。通过天线姿态误差补偿可在成像中克服目标偏移这一问题(误差校正后的成像结果如图 4(b)所示),但天线阵倾斜导致其在水平方向上的投影长度减小(例如天线阵横向倾斜  $15^\circ$  时,其在水平方向上的孔径长度为  $5.796\text{ m}$ ),使得方位分辨率有所下降。图 6 给出了天线阵未倾斜时以及两种横向倾斜情况下经姿态误差补偿后散射点  $(3, 10)$  对应的方位像。

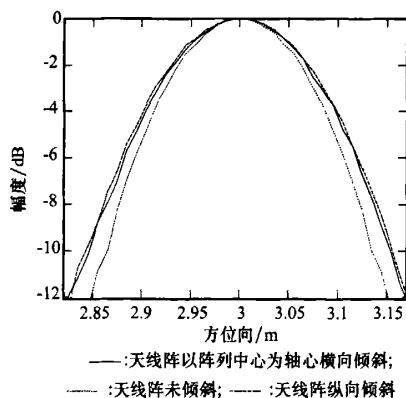


图 6 不同天线姿态校正后散射点  $(3, 10)$  对应的方位像

当天线阵未倾斜时,实际成像结果得到的方位分辨率为  $0.166\text{ m}$ ,横向倾斜  $15^\circ$  和  $30^\circ$  时,经姿态误差补偿后得到的方位分辨率分别为  $0.172$  和  $0.193\text{ m}$ 。横向倾斜  $30^\circ$  时对应的方位分辨率( $0.193\text{ m}$ )优于最大容许横向倾斜角对应的方位分辨率( $0.2075\text{ m}$ ),这一点也证明了式(19)的正确性。天线阵纵向倾斜时方位孔径长度未发生变化,经姿态误差补偿后方位分辨率不会改变。可见天线姿态误差对方位分辨率的影响较小,图 5 从视觉上也说明了这一点。这

对系统设计非常有利,因该种天线体制的成像质量受车辆姿态误差的影响较小,经姿态误差补偿后图象质量一般不会很差。

## 4 结束语

SATC 天线体制可在孔径长度受限的情况下获取与传统单站 SAR 相当的方位分辨率而极大地降低系统成本及其复杂性。结合 BP 算法的优点,提出了一种 SATC-CABP 成像模型,利用其对步进频率信号成像时,通过补偿合成距离像中由步进频率名义载频引入的相位,可实现相干叠加成像。考虑到步进频率信号对相位误差的敏感性,以地面车载前视系统为例,分析了天线姿态误差对成像的影响,并基于该成像模型在成像过程中实现天线姿态误差的校正。仿真结果表明,本文提出的成像方法具有良好的聚焦性能,且可方便地对天线姿态误差进行补偿。

## 参考文献:

- [1] Kositsky J, Cosgrove R, Amazeen C, et al. Results from a forward-looking GPR mine detection system[C] // *Proceedings of SPIE Aerosense Conference, Orlando, FL, 2000*, 4038: 206 - 217.
- [2] Marshall Bradley, Thomas Witten, Michael Duncan, et al. Mine detection with a forward-looking ground penetrating synthetic aperture radar[C] // *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII, Proc. of SPIE*, 2003, 5089: 334 - 347.
- [3] Donald R. Wehner. 高分辨率雷达[M]. 刘谦雷,等,译. 南京:电子工业部第十四研究所, 1997, 5.
- [4] 王顺华. 机载大处理角 SAR 成像理论及算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 1998.
- [5] 金添. 超宽带 SAR 浅埋目标成像与检测的理论和技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [6] 董臻. UWB-SAR 信息处理中若干问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2001.
- [7] 朱国富, 董臻, 梁旬农. 超宽带 LFM 信号的 BP 成像算法[J]. 信号处理, 2001, 17(5): 424 - 428.

## 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](http://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](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](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>