文章编号:1004-9037(2010)03-0273-05

绕环天线的干涉ISAR测高算法

徐国栋[1] 曹星慧[1,2] 宿富林[2]

(1.哈尔滨工业大学卫星技术研究所,哈尔滨,150080;
2.哈尔滨工业大学电子与信息工程学院,哈尔滨,150080)

摘要:提出了两副雷达天线在平面内绕环时的干涉逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像算法。现有的干涉ISAR成像研究通常忽略了天线几何位置对成像影响,将天线设置为仅在高度上有差别的两副垂直天线。针对这一情况,本文推导了当两副雷达天线不垂直时、特别是在平面内圆周绕环时的干涉ISAR测高算法。研究结果表明,干涉ISAR高程测量不仅与基线长度有关,还与散射点横距坐标有关,于是需要对散射点横距进行估计。仿真结果验证了在此情况下干涉ISAR测高公式的正确性,并进一步分析了天线基线与有效基线之间夹角的变化对测高精度的影响。经统计,目标高度平均测量误差低于3%,几乎达到原两副天线垂直时的测高精度。

关键词:逆合成孔径雷达;干涉成像;横距估计;高程测量

中图分类号:TN958 **文献标识码**:A

Interferometric ISAR Elevation Measurement Algorithm for Round-Loop Antenna

Xu Guodong[1], *Cao Xinghui*[1,2], *Su Fulin*[2]

(1. Reasearch Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150080, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150080, China)

Abstract: The interferometric inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging algorithm for round-loop of two radar antennas in a plane is proposed. The interferometric ISAR imaging algorithm ignores the antenna geometry effect and assumes radar antennae as two vertical antennas with a difference in an altitude direction. Based on it, this paper deduces an interferometric ISAR elevation measurement algorithm when the two antennas are out of the vertical, especially in a round-loop plane. Results show that in this case, the elevation measurement is related with the baseline length and the cross-range of the scattering point. Thus, before the interferometric process, the cross-range estimation is made. Simulation results verify that the interferometric ISAR elevation measurement algorithm is correct. The effect of the angle variation between the real baseline and the valid baseline on the elevation measure accuracy is analyzed. By statistic, the average measure error of the target elevation is less than 3% and it is almost achieve the accuracy of two original vertical ones.

Key words: inverse synthetic aperture radar(ISAR); interferometric imaging; cross-range estimation; elevation measurement

引 言

干涉逆合成孔径雷达(ISAR)成像是目标雷达三维成像中被研究较多的一种,它以ISAR距离-方位二维图像为基础,用高度上有差别的两副天线接收目标回波数据并分别重建ISAR复图像,逐一计算两幅图像中每一距离-方位分辨单元相位差,将此相位差转化为高度信息并加之距离-方位信息就可获得目标三维像[1-3]。目前对干涉ISAR的研究

基金项目:国家"973"重点基础研究发展计划(5131201-1-04-1)资助项目;教育部创新团队支持计划(IRT0520)资助项目。
收稿日期:2008-08-02;**修订日期**:2008-12-05

万方数据

主要针对两副成像雷达天线垂直的情况[4-6]，即两副天线的 X，Y 坐标相同，仅 Z 轴坐标不同。如 Mehrdad Soumekh 在文献[7]中给出了两副雷达天线垂直时的成像公式推导，指出两副雷达天线不垂直时原理也同样适用。但实际研究表明，当干涉 ISAR 的两副天线几何位置不垂直时的情况与两副天线垂直时是不同的。

本文从成像雷达天线几何配置对干涉 ISAR 测高影响的角度入手展开研究，重点讨论了当两副天线在 $Y=-R_0$ 平面内沿圆周环绕时的高程测量情况，推导了在此条件下的干涉 ISAR 测高公式，发现此时的高程测量与对应位置的目标散射点横向距离有关。由于目标的横距需要从ISAR 重建图像中估计出来，因此与两副雷达天线垂直时的干涉 ISAR 成像相比，不仅在干涉处理中多了一个步骤，而且也引入了额外的测高误差。文中提出了在两天线绕环条件下的高度测量精度估计公式，并分析了天线真实基线与有效基线之间夹角的变化对测高精度的影响。仿真结果验证了在此情况下干涉 ISAR 测高算法和误差分析的正确性，给出了此条件下的干涉 ISAR 三维成像图。

1 干涉 ISAR 测高基本算法

干涉ISAR 成像的基本几何配置关系如图1 所示。天线A、天线B 是两部相同的雷达天线，其中天线A 负责发射信号并接收回波，天线B 仅负责接收回波。两部天线垂直配置(即两部天线的 X 轴、Y 轴坐标均相等)，并假设目标已经过运动补偿等效为转速为 ω 的转台成像。建立几何坐标系，将目标的旋转中心定义为 O 点，雷达视线方向为 Y 轴，旋转角速度方向为 Z 轴，X 轴与 Y 轴、Z 轴满足右手螺旋关系，天线 A 与天线 B 之间的间距为 D，被称作基线长度，AB 的中点记为 O'，$O'O$ 的距离为 R_0。设目标上有一散射点 $P(x,y,z)$，记 AP，BP，$O'P$ 分别为 R_1，R_2，R，且将 $O'O$ 与 $O'P$ 之间的夹角记为 θ。针对成像雷达常用的线性调频信号，对干涉 ISAR 成像公式进行推导。

由于干涉成像主要关注回波之间的相位关系，

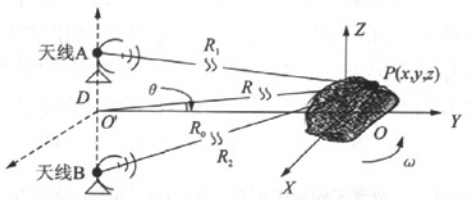

图1 干涉ISAR 成像的几何配置

为简化分析，暂时忽略了信号的包络项。设发射信号幅度为1，且不考虑传输衰减和天线增益。设雷达发射信号为线性调频(LFM)信号，则天线A，B 接收目标上散射点 P 的回波分别为

$$\begin{cases} S_{R_1}=\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_C\left(t-\dfrac{2R_1}{c}\right)+\mathrm{j}\pi K\left(t-\dfrac{2R_1}{c}\right)^2\right) \\ S_{R_2}=\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_C\left(t-\dfrac{R_1+R_2}{c}\right)+\mathrm{j}\pi K\left(t-\dfrac{(R_1+R_2)}{c}\right)^2\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中：f_C 为雷达发射信号的载频；K 为调频率；c 为光速。对回波进行解线频调处理，设参考距离 $R_{ref}=\sqrt{R_0^2+(D/2)^2}$，则参考信号为

$$S_{ref}=\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_C\left(t-\frac{2R_{ref}}{c}\right)+\mathrm{j}\pi K\left(t-\frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right) \tag{2}$$

针对式(1)，对两路回波信号 S_{R_1} 和 S_{R_2} 分别进行解线频调处理，得

$$S_{if1}=S_{r1}\cdot S_{ref}^*=\exp[-\mathrm{j}4\pi f_C\frac{\Delta R_1}{c}-\mathrm{j}4\pi K\frac{\Delta R_1}{c}t+\mathrm{j}4\pi K\frac{(R_1+R_{ref})\Delta R_1}{c^2}] \tag{3}$$

$$S_{if2}=S_{r2}\cdot S_{ref}^*=\exp[-\mathrm{j}2\pi f_C\frac{\Delta R_1+\Delta R_2}{c}-\mathrm{j}\pi K(2t-\frac{R_1+R_2+2R_{ref}}{c})(\frac{\Delta R_1+\Delta R_2}{c})] \tag{4}$$

式中

$$\begin{cases} \Delta R_1=R_1-R_{ref} \\ \Delta R_2=R_2-R_{ref} \end{cases}$$

对经解线频调处理的两路回波信号进行干涉，得

$$S_{IN}=S_{if1}\cdot S_{if2}^*=\exp[-\mathrm{j}2\pi f_C\frac{\Delta R_2-\Delta R_1}{c}+\mathrm{j}2\pi Kt\frac{(\Delta R_2-\Delta R_1)}{c}+\mathrm{j}\pi K\frac{(3R_1+2R_{ref})\Delta R_1-(R_1+R_2+2R_{ref})\Delta R_2}{c^2}]\approx\exp(\mathrm{j}2\pi\frac{f_C}{c}R_\Delta) \tag{5}$$

式中，$R_\Delta=\Delta R_2-\Delta R_1=R_2-R_1$。

设雷达天线 A，B 接收到的回波分别为 $f_1(x,y,z)$ 和 $f_2(x,y,z)$，重建的二维 ISAR 图像分别为 $f_{1S}(x,y)$ 和 $f_{2S}(x,y)$。理论上，f_{1S} 和 f_{2S} 幅值相同，仅存在相位差别，即

$$f_{2S}(x,y)=f_{1S}(x,y)\exp(-\mathrm{j}2\pi f_C R_\Delta/c) \tag{6}$$

万方数据

对于目标上高度为z的散射点P来说，两部天线的回波距离差R_Δ可近似为$R_\Delta \approx D\sin\theta \approx Dz/R_0$，有

$$f_{2S}(x,y) = f_{1S}(x,y)\exp(-\mathrm{j}\frac{2\pi f_C Dz}{R_0 c}) \quad (7)$$

对两幅图像进行干涉就是对下面的函数进行处理

$$f_S = f_{1S}(x,y)f_{2S}^*(x,y) = |f_{1S}(x,y)|^2\exp(-\mathrm{j}\frac{2\pi f_C Dz}{R_0 c}) \quad (8)$$

此干涉过程提取了两幅ISAR复图像的相位差$\Delta\varphi$，则可得目标的高度z为

$$z = \frac{\Delta\varphi R_0 c}{2\pi D f_C} \quad (9)$$

式(9)就是经典的干涉ISAR成像高度测量公式。从式(9)可以看出，当雷达发射信号固定、目标与雷达间距离已知时，散射点高度测量精度决定于干涉相位差$\Delta\varphi$和基线长度D的测量精度。

2　绕环天线的干涉ISAR测高算法

当两副雷达天线不垂直时，式(9)的表达形式将不再适用，需要针对具体情况重新推导测高公式。本文建立如图2所示的几何配置模型，天线A，B用一硬杆连接，中点为O'点，O'点以基座C为支撑，基座与O'点、天线A与天线B之间的连接均为刚体连接。且天线AB可以绕O'点在$Y=-R_0$平面内旋转，其他的几何配置与图1相同。下面推导此绕环天线的干涉ISAR测高算法。

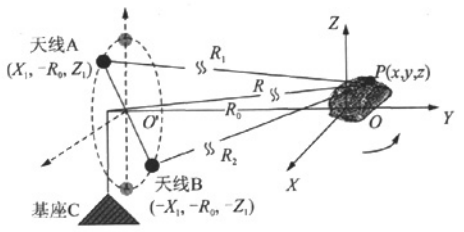

图2　绕环天线干涉ISAR成像几何配置

通过比较绕环天线的几何配置与经典干涉ISAR成像可知，此时的R_Δ将不能再用Dz/R_0来表示，必须分析其具体表达式。如图2所示，设天线A的位置坐标为$(X_1, -R_0, Z_1)$，天线B的位置坐标为$(-X_1, -R_0, -Z_1)$，目标上散射点仍设为$P(x,y,z)$，于是有

$$\begin{cases} X_1^2 + Z_1^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \\ |AB| = D \end{cases} \quad (10)$$

此时，仍设天线A距目标散射点P的距离为R_1，天线B距目标散射点P的距离为R_2，则有

$$\begin{cases} R_1 = \\ \sqrt{(X_1 - x)^2 + (-R_0 - y)^2 + (Z_1 - z)^2} \\ R_2 = \\ \sqrt{(-X_1 - x)^2 + (-R_0 - y)^2 + (-Z_1 - z)^2} \end{cases} \quad (11)$$

于是

$$R_\Delta = R_2 - R_1 = [(-X_1 - x)^2 + (-Z_1 - z)^2 - (X_1 - x)^2 - (Z_1 - z)^2]/[\sqrt{(-X_1 - x)^2 + (-R_0 - y)^2 + (-Z_1 - z)^2} + \sqrt{(X_1 - x)^2 + (-R_0 - y)^2 + (Z_1 - z)^2}] = (4X_1 x + 4Z_1 z)/[\sqrt{(-X_1 - x)^2 + (-R_0 - y)^2 + (-Z_1 - z)^2} + \sqrt{(X_1 - x)^2 + (-R_0 - y)^2 + (Z_1 - z)^2}] \approx \frac{2(X_1 x + Z_1 z)}{R_0} = \frac{D}{R_0}(x\sin\alpha + z\cos\alpha) \quad (12)$$

式中α为天线AB与Z轴的夹角，即

$$\begin{cases} \sin\alpha = \frac{X_1}{\sqrt{X_1^2 + Z_1^2}} \\ \cos\alpha = \frac{Z_1}{\sqrt{X_1^2 + Z_1^2}} \end{cases}$$

从式(12)可以看出，目标高度转化成一个与散射点横坐标有关的量。结合式(6)，有

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f_C}{c}R_\Delta = \frac{2\pi f_C D}{c R_0}(x\sin\alpha + z\cos\alpha) \quad (13)$$

经推导，得

$$z = \frac{\lambda_C R_0 \Delta\varphi}{2\pi D\cos\alpha} - x\mathrm{tg}\alpha \quad (14)$$

式中λ_C，R_0，D，α均为已知参数；$\Delta\varphi$由两幅ISAR复图像干涉得到。与式(9)相比，式(14)引入额外的量为x，即目标上散射点的横坐标。于是在这种情况下干涉成像需要对散射点的横坐标进行标定，且标定误差也会被引入到干涉测高误差中去。

假设目标匀速旋转，此时目标的横距方向与距离方向和高度方向垂直，散射点P的横距x可粗略计算为

$$x = (N_P - N_0)\Delta r_x \quad (15)$$

式中：N_0为目标旋转中心对应的方位向分辨单元序号；N_P为散射点P对应的方位向分辨单元序号；Δr_x为ISAR成像的方位分辨率。

万方数据

3 成像分辨率

假定绕环天线满足远场成像条件，且基线 $D \ll R_0$，此时两副天线重建的ISAR图像可认为视角不变，其距离分辨率和方位分辨率与常规情况相同，即距离分辨率与发射信号带宽有关($c/2B$)，方位分辨率与雷达波长和目标的积累转角有关($\lambda/2\theta$)。

然而得到干涉ISAR目标高度分辨率是比较困难的，它不像距离分辨率和方位分辨率那样有明确的计算公式，并且干涉成像的高度分辨率更确切地说应该称为测高精度。根据式(14)，在绕环天线条件下的干涉ISAR测高精度主要取决于干涉相位φ测量的准确程度和散射点横距的估计精度。如果定义干涉相位误差最大不超过$\pm\delta_1$，散射点横距的估计误差最大不超过$\pm\delta_2$，则反映在高度测量上的误差为

$$\Delta_z \leqslant \Delta_{z1} + \Delta_{z2} = \left|\delta_1 \frac{\lambda_C R_0}{2\pi D\cos\alpha}\right| + |\delta_2 x \mathrm{tg}\alpha| \tag{16}$$

式中Δ_{z1}，Δ_{z2}分别表示由干涉相位误差和散射点横距估计误差在高度误差上的反映量，于是式(16)就可作为高度维分辨率的表达式。

4 仿真实验与结果分析

成像几何配置如图2所示，设置雷达信号中心频率为10 GHz，带宽B为500 MHz，脉冲宽度τ为10 μs，成像积累角度为3°，被测目标中心距雷达的距离R_0为50 km，天线A，B之间的距离为10 m，天线A，B连线与Z轴的夹角α为$\pi/6$。设置9个散射点，如表1所示，用第2节推导的绕环天线的干涉ISAR成像算法进行高度测量，图3为其干涉高度测量立体图，图4为测量高度值与真实高度值的比较图。图3，4的高度测量结果证明了绕环天线的干涉ISAR成像算法的正确性。

表1 9个强散射点坐标 m

X	Y	Z
−2.0	1	1
−1.5	2	2
−1.0	3	3
−0.5	4	4
0.0	5	5
0.5	6	6
1.0	7	7
1.5	8	8
2.0	9	9

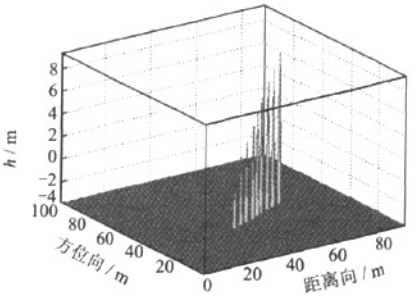

图3 9个散射点的干涉高度测量立体图

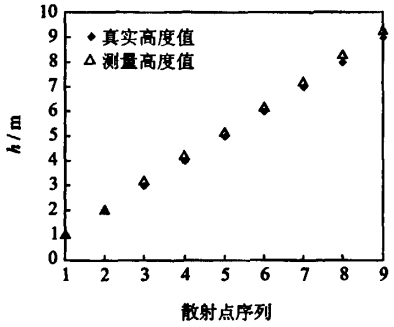

图4 测量高度值与真实高度值的比较图

为进一步对该算法引入的干涉测高误差进行评估，改变天线A，B连线与Z轴的夹角α，使其从0 rad以$\pi/12$ rad为间隔变化到$5\pi/12$ rad，分析这时的测高误差。根据式(16)，干涉高度测量误差由干涉相位误差和散射点横距的估计误差共同决定，而且这两项误差是加性的，亦即当这两项误差沿一个方向变化时(如均大于真实值)，其和误差加大；若这两项误差沿相反方向变化时(如一个大于真实值，一个小于真实值)，其和误差反而更小。因此，为综合评估该绕环天线算法的测量误差，这里设置两个独立的散射点P_1，P_2，其横向坐标一个为正值，一个为负值，分别为(−5，−2，5)和(5，−2，5)。计算这两个散射点在不同夹角α下的高度测量误差，结果如表2所示。从表2的结果可以看出，散射点P_1的高度测量误差随着夹角α的增加而增大，散射点P_2的高度测量误差随着夹角α的增加而减少，从而验证了上面的分析。

对表1中的9个散射点综合评价，得到9个散射点在在不同夹角α下的平均测高误差，测量结果列于表2。从平均测高误差的结果来看，本文推导的绕环天线的算法比较稳健，在不同夹角α下测高误差基本保持不变，只是随着夹角α的增加略有增大。这一结论也符合干涉ISAR测高算法基本原

万方数据

理，即有效基线长度与测高误差成反比。由于夹角α的增加，使得天线AB在Z轴方向的投影变短，也就是干涉有效基线长度变短，因此测高误差会略有增大。

表2　在不同夹角α下的测高误差

α/弧度	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$
$P_1(-5,-2,5)$/m	2.646	2.802	2.987	3.237	3.670	4.867
$P_2(5,-2,5)$/m	2.644	2.487	2.307	2.066	1.638	0.479
平均误差/%	2.581	2.582	2.584	2.587	2.593	2.609

最后建立一个基于148个散射点卫星目标模型的干涉ISAR三维成像实验，仿真参数与上同，夹角α设置为$\pi/6$。图5为目标散射点模型，图6为绕环天线干涉ISAR三维成像图。从成像结果可看出，文中推导的绕环天线干涉ISAR成像较好地重建了目标三维图像。

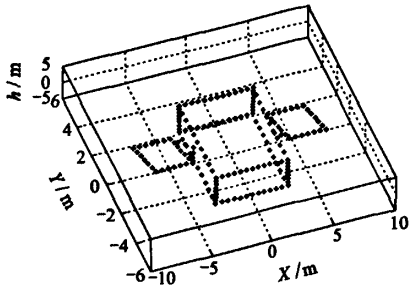

图5　目标散射点模型

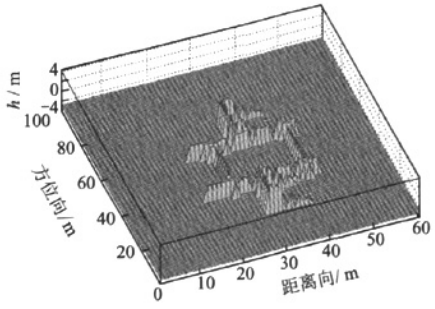

图6　干涉ISAR三维成像图($\alpha=\pi/6$)

5　结束语

通过推导两天线绕环情况下的干涉ISAR成像算法，证明了干涉成像的两副天线在高度上不垂直时与垂直时的测高表达式是不同的，指出在绕环天线情况下的干涉ISAR成像算法需要估计散射点的目标横距，并且目标横距的估计误差会被引入到干涉测高误差中。仿真结果验证了分析的正确性和算法方法的有效性。干涉ISAR成像技术由于能够提供目标的第三维信息而大大增加自动目标识别(ATR)概率，具有一定的现实意义。

参考文献：

[1] Given J A, Schmidt W R. Generalized ISAR-part II: Interferometric techniques for three-dimensional location of scatterers[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(11): 1792-1797.

[2] 李强，张守宏，张焕颖. 单脉冲三维成像中基于ISAR像的角运动参数估计与补偿方法[J]. 雷达科学与技术，2005，3(4)：221-227.

[3] 罗斌凤，张群，袁涛，等. In-ISAR三维成像中的ISAR像失配准分析及其补偿方法[J]. 西安电子科技大学学报，2003，30(6)：739-744.

[4] Smith B J, Rock J C. A synthetic Interferometric ISAR technique for developing 3-d signatures[C]// Proceedings of the 2003 IEEE Aerospace Conference 2003 Proceedings. USA: IEEE, 2003, 2: 1055-1065.

[5] Seybold J S, Bishop S J. Three-dimensional ISAR imaging using a conventional high-range resolution radar[C]// Proceedings of the 1996 IEEE Radar National Conference. USA: IEEE, 1996: 309-314.

[6] Cao Xinghui, Su Fulin, Sun Huadong, et al. Three-dimensional In-ISAR imaging via the emulated bistatic radar[C]// The 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) 2007. Harbin: IEEE, 2007: 2826-2830.

[7] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L. Developments in radar imaging [J]. IEEE Trans on Aerosp Electron Syst, 1984, 20(4): 363-400.

作者简介：徐国栋(1961-)，男，研究员，研究方向：卫星电子系统设计、图像合成与处理，E-mail：xgdong-61@163.com；曹星慧(1982-)，女，博士研究生，研究方向：逆合成孔径雷达成像；宿富林(1964-)，男，副教授，研究方向：合成孔径/逆合成孔径雷达成像技术及模式识别。

万方数据

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