

基于正侧视模型的机载双天线干涉 SAR 外定标方法

张 薇^{1,2}, 向茂生¹, 吴一戎¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用基于敏感度方程的方法, 研究了基于正侧视成像模型下的机载双天线干涉 SAR 系统的外定标问题。算法通过对干涉成像方程各参数求导, 得到基于敏感度方程的误差模型, 并在此基础上, 依据若干地面控制点的精确数据, 求解干涉参数偏差。通过迭代求解, 得到定标后的干涉参数, 并生成精确的数字高程模型及对地面对象点进行定位。利用我国自主设计、研制的机载干涉 SAR 系统获得的数据, 进行了外定标处理实验, 验证了方法的有效性。

关 键 词: 干涉合成孔径雷达(合成孔径雷达干涉测量); 外定标; 敏感度方程; 地面控制点

中图分类号: TN 958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2008)03-0346-05

1 引言

影响机载干涉 SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达)生成高精度 DEM (Digital Elevation Model)的两个主要限制条件: 载机飞行的不稳定性和系统参数误差。精确记录载机在飞行过程中的姿态变化, 可以在干涉处理中将这种不稳定性进行校正。系统参数误差的影响主要来自干涉系统设备本身存在的相位偏移以及延时误差、相位偏置、基线、载机姿态等参量的测量偏差, 这些参数偏差将引入 DEM 误差。干涉参数定标即对这些参数偏差进行校正, 以得到高精度的 DEM^[1]。

目前基于敏感度方程的干涉定标方法中采用的 DEM 反演模型有正侧视模型和斜视模型。斜视的反演模型比正侧视的反演模型增加了载机姿态等参数, 并给出目标的地面信息, 但正侧视模型已经能给出精确的高程信息, 也可以通过几何关系对目标点进行定位。这里为了简化敏感度方程, 采用正侧视反演模型。

本文在基于正侧视模型干涉 SAR 几何关系的基础上, 求解目标高程关于干涉参数的偏导数, 得到干涉敏感度方程, 建立误差模型。应用最小二乘解中基于奇异值分解的广义逆中的 Moore-Penrose 广义逆^[2,3], 作为干涉参数偏差的解, 这种解即使在干涉敏感度矩阵发生列秩亏的情况下, 也能给出最小范数最

小二乘解, 且解唯一。迭代求解干涉参数偏差, 得到定标后的干涉参数, 并生成精确的数字高程模型。

实验选用中国科学院电子学研究所机载双天线干涉 SAR 系统的飞行数据, 以平地为定标场, 利用地面控制点(GCP, Ground Control Point)的位置信息, 进行外定标实验, 实验结果验证该方法有效地提高了 DEM 的精度。

2 基于正侧视模型的机载干涉 SAR 定标

2.1 干涉敏感度方程模型

基于正侧视模型的机载干涉 SAR 的几何关系如图 1 所示。

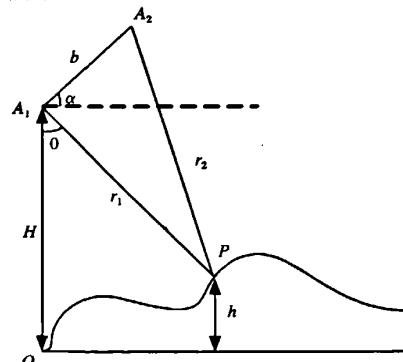


图 1 正侧视模型的机载干涉 SAR 的几何关系

Fig. 1 Airborne InSAR geometry based on boresight model

收稿日期: 2007-12-11; 修訂日期: 2008-05-04

基金项目: 863 项目“机载双天线 InSAR 数据处理技术研究及软件开发(2005AA133014)”。

作者简介: 张薇(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事干涉合成孔径雷达信号处理技术的研究。E-mail: rruun@126.com.

A_1 和 A_2 分别表示两幅天线位置, b 表示两幅天线之间的基线, α 为基线与水平方向的夹角, H 为平台高度, 地面点 P 到天线 A_1 的距离为 r_1 , 到天线 A_2 的距离为 r_2 , θ 为第一幅天线的参考视角, h 为地形高程。

目标点的高程由以下公式给出:

$$h = H - r_1 \cos\theta \quad (1)$$

$$r_2 = r_1 + \frac{\lambda\varphi}{2\pi Q} \quad (2)$$

$$\theta = \alpha - \arcsin\left(\frac{r_2^2 - b^2 - r_1^2}{2br_1}\right) \quad (3)$$

敏感度方程是通过对不同的干涉参数相对于基本的目标高程方程求微分得到的。从成像的几何关系图 1 中, 影响目标高程 h 的主要参量有: 斜距 r_1 、相位偏置 φ 、基线长度 b 、基线角 α 及载机的姿态。

雷达斜距的测量是通过记录天线发射的电磁波到达目标并返回的绝对时间延迟得到的。由公式(4)表述。

$$r_1 = \frac{1}{2}c\tau \quad (4)$$

由此得到高程对绝对时间延时的敏感度为:

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = -\frac{1}{2}c \cos\theta \quad (5)$$

干涉图的相位展开是恢复相位的 2π 模糊。绝对相位可以通过地形和载机位置的先验知识来获得, 但仍然存在由雷达环路的各种因素引起的相位偏置需要估计。高程对相位偏置的敏感度为^[4,5]:

$$\frac{\partial h}{\partial \varphi} = -\frac{r_1 \sin\theta}{\sqrt{\gamma^2 - \varphi^2}}, \text{ 其中 } \gamma = \frac{2\pi Qb}{\lambda} \quad (6)$$

另一个影响高程的关键参数是基线, 高程对基线的敏感度为:

$$\frac{\partial h}{\partial b} = \frac{r_1 \sin\theta \cdot \varphi}{b \sqrt{\gamma^2 - \varphi^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = r_1 \sin\theta \quad (8)$$

式(5)~(8) 表达了各干涉参数对高程的影响。应用足够的地面控制点, 对各干涉参数的敏感度构成敏感度方程, 就可以对干涉参数进行定标。敏感度方程为:

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial \tau}|_1, & \frac{\partial h}{\partial \varphi}|_1, & \frac{\partial h}{\partial b}|_1, & \dots \\ \vdots, & \vdots, & \vdots, & \vdots \\ \frac{\partial h}{\partial \tau}|_L, & \frac{\partial h}{\partial \varphi}|_L, & \frac{\partial h}{\partial b}|_L, & \dots \end{bmatrix} \quad (9)$$

高程差和干涉参数偏差的关系^[6] 为:

$$\Delta = F \cdot \Delta X \quad (10)$$

其中: Δ 为 $L \times 1$ 高程数据误差向量; F 为 $L \times N$ 敏感度矩阵; ΔX 为 $N \times 1$ 待估计的干涉参数偏差向量; L 为 GCP 的数目; N 为待定标的参数数目。

2.2 外定标数据的选取

获取定标数据是干涉 SAR 外定标的基础。通过在定标场中布放 GCP 的方法是获取定标数据的经典方法。文献[2~7]在基于敏感度矩阵条件数越小、干涉性能越高的考虑下, 提出了 GCP 的布放规则: GCP 沿距离向等间隔布放。

然而在 GCP 的实际布放中, 由于特殊的地形, 只能做到 GCP 沿距离向及方位向近似均匀分布。

2.3 机载干涉 SAR 外定标算法的实现

GCP 的数据是由 GPS 确定的。采用迭代的方式对干涉参数进行定标如图 2 所示。首先通过初始的干涉参数和展开相位生成 DEM, 然后通过敏感度方程, 建立 GCP 处的高程对干涉参数偏差的关系。更新参数偏差, 重新计算 DEM, 直到前后两次计算的地面高程的均方差达到理想精度。

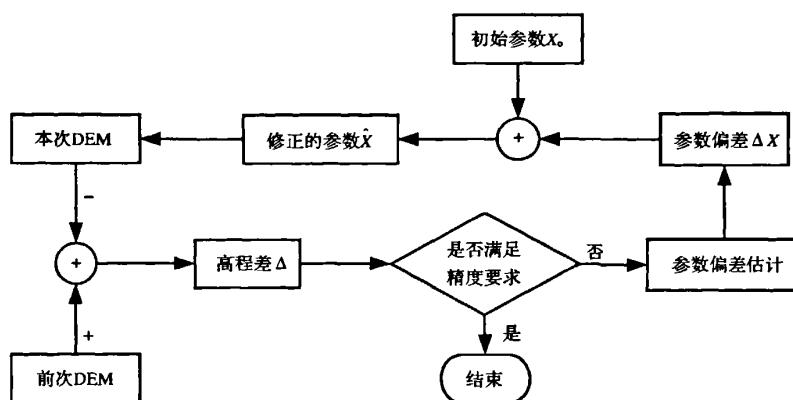


图 2 干涉外定标处理流程

Fig. 2 Flow chart of the InSAR outside calibration process

参数偏差可以通过求解由(10)给出的线性方程组的解得到,因此关键是如何得到线性方程组的解。选取的地面控制点数为 L ,待定标的参数数目为 N 。在干涉 SAR 定标中, $L > N$,即由(10)描述的线性模型是一个超定线性方程组。应用最小二乘法求解干涉参数偏差,基于奇异值分解的基础上求敏感度矩阵 F 的广义逆,广义逆中选取 Moore-Penrose 广义逆。这种逆即使在 F 发生列秩亏的情况下,能给出最小范数最小二乘解,且具有唯一性^[2,3]。

在实际实验中,由于 $L > N$,即使在某些 GCP 数据不准确的情况下,采用广义逆的方法求解敏感度方程仍能得到相对其它方法较可靠的解。

3 基于正侧视模型中目标的定位

基于正侧视的成像模型中,只能反演目标点的

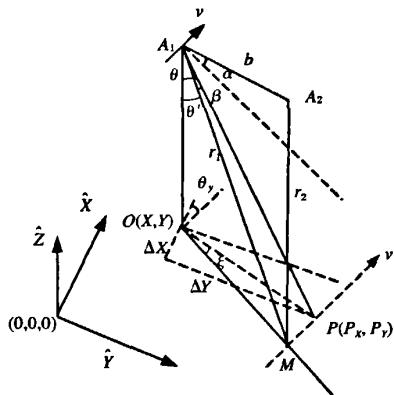


图 3 正侧视成像模型中目标点地面位置的几何关系

Fig. 3 Geometry of goal's ground location in
boresight imaging model

高程信息,然而并不明确目标点的位置信息。本文利用载机的飞行数据信息,根据几何关系,对目标进行定位。图 3 中, \hat{X} 为正北方向, \hat{Y} 为正东方向, θ , 为载机偏离正北方向的偏航角。为了能够更加精确地确定目标点的位置,通过测量多普勒频移,引入了斜视角 β 。根据高斯投影正算公式^[8],将载机的大地坐标 (B, L) 转化到高斯平面上的坐标 $O(X, Y)$,利用几何关系,得到目标点在高斯平面上的坐标为 $P(P_x, P_y)$:

$$\begin{aligned} P_x &= X - \frac{r_1 \sin \theta}{\cos \beta} \sin(\theta, -\xi) \\ P_y &= Y - \frac{r_1 \sin \theta}{\cos \beta} \cos(\theta, -\xi) \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\sin \beta = \frac{\lambda f_d}{2v}$, f_d 为多普勒中心频率。

4 实验结果

实验数据采用中国科学院电子学研究所机载干涉 SAR 系统的一组干涉数据。

为了降低敏感度矩阵的条件数,假设载机姿态的误差很低,没有对其进行定标^[1]。这种假设比对所有参数进行定标的结果好。对于机载双天线干涉 SAR 系统,基线角和载机的侧滚角是叠加在一起的,由于在前期 SAR 成像处理期间,已经对载机的侧滚角进行校正,因此在定标中,认为基线角是稳定的,不对其进行定标处理。由敏感度矩阵调整绝对时间延时、相位偏置和基线长度。实验中采用 6 个 GCP 在不同的方位向和距离向分布,以及 15 个地面检测点的位置。

表 1 定标参数迭代结果

Table 1 Calibration parameters iterative results

| 参数变量 | 第一次 | 第二次 | 第三次 | 第四次 |
|----------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| $\Delta \tau[\mu s]$ | 6.966 672 | 0.581 160 | 0.000 522 | 0.000 001 |
| $\Delta \phi [rad]$ | 16.983 898 | 0.482 732 | -0.003 736 | 0.000 004 |
| $\Delta b [m]$ | 0.075 454 | 0.001 735 | -0.000 018 | 0.000 000 |

表 2 GCP 高程数据迭代结果(单位:m)

Table 2 Height data iterative results(Unit:m)

| GCP | GPS | 目标高程 | | | |
|-----|----------|-----------|-------------|------------|-----------|
| | | 初值 | 第一次 | 第二次 | 第三次 |
| 1 | 55.386 2 | 115.143 0 | 87.744 2 | 56.539 6 | 56.365 3 |
| 2 | 55.187 9 | 189.093 6 | 91.510 6 | 55.959 8 | 55.787 6 |
| 3 | 52.853 5 | 63.007 8 | 82.003 7 | 53.665 3 | 53.489 4 |
| 4 | 54.004 7 | -54.153 4 | 74.861 1 | 53.340 4 | 53.161 0 |
| 5 | 55.000 0 | 501.291 1 | 109.392 7 | 55.956 4 | 55.794 2 |
| 6 | 55.000 0 | 325.006 0 | 96.611 8 | 53.008 4 | 52.840 2 |
| | | 均方差 | 276.354 864 | 40.978 266 | 0.169 984 |
| | | | | | 0.000 010 |

定标参数调整结果如表 1 所示, 经过 4 次迭代, 干涉参数偏差已经相对很小了, 在另一方面说明了算法收敛。

表 2 给出了基于敏感度方程的定标算法中, GCP 高程的迭代过程。算法设定均方差的收敛条件是 0.01, 经过 4 次迭代, 前后两次 DEM 的均方差

已经达到了设定的精度要求, 算法收敛。

表 3 列出了利用地面检查点检测的精度统计表, 统计了 7~21 号共 15 个检测点, 对目标点定位坐标进行了平移。对定标后的检测点的点位误差和高程误差进行统计, 点位中误差达到 3.769 2 m, 高程中误差达到 2.035 3 m, 说明了算法的有效性。

表 3 利用地面检查点检测的精度统计表(单位:m)

Table 3 Precision statistics using ground inspect points checked(Units: m)

| 点号 | 实测坐标 X 反演坐标 X | 实测坐标 Y 反演坐标 Y | 点位误差 | 实测高程 | InSAR 高程 | 高程误差 |
|-----|------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 7 | 31 648.132 6 31 649.838 7 | -12 623.549 0 -12 626.359 0 | 3.287 4 | 54.515 9 | 54.341 9 | 0.174 0 |
| 8 | 32 037.290 0 32 034.338 7 | -12 507.415 3 -12 509.203 7 | 3.450 9 | 56.468 2 | 54.706 6 | 1.761 6 |
| 9 | 31 649.793 0 31 649.838 7 | -13 210.695 9 -13 210.378 1 | 0.321 1 | 53.045 5 | 53.213 3 | -0.167 8 |
| 10 | 31 635.154 9 31 634.338 7 | -13 002.338 1 -13 002.352 4 | 0.816 3 | 53.649 3 | 54.178 6 | -0.529 3 |
| 11 | 31 588.259 4 31 582.588 7 | -13 492.923 0 -13 493.104 9 | 5.673 6 | 53.613 1 | 57.575 6 | -3.962 5 |
| 12 | 31 394.590 5 31 394.088 7 | -13 374.170 1 -13 375.138 3 | 1.090 5 | 54.016 4 | 57.428 9 | -3.412 5 |
| 13 | 31 276.950 1 31 279.838 7 | -13 388.183 4 -13 387.997 7 | 2.894 5 | 52.298 9 | 52.237 0 | 0.061 9 |
| 14 | 31 269.244 0 31 270.338 7 | -13 258.195 0 -13 250.138 6 | 8.130 5 | 55.076 9 | 56.132 9 | -1.056 0 |
| 15 | 31 252.798 7 31 253.088 7 | -12 978.114 7 -12 976.801 6 | 1.344 7 | 54.005 0 | 55.576 3 | -1.571 3 |
| 16 | 31 269.138 3 31 272.088 7 | -12 977.144 0 -12 979.284 5 | 3.645 1 | 54.082 3 | 54.566 3 | -0.484 0 |
| 17 | 31 241.974 5 31 238.088 7 | -12 796.647 1 -12 797.805 8 | 4.054 9 | 54.538 0 | 58.574 2 | -4.036 2 |
| 18 | 31 156.757 9 31 155.838 7 | -12 676.947 6 -12 676.583 4 | 0.988 8 | 54.406 2 | 57.661 1 | -3.254 9 |
| 19 | 30 972.186 6 30 971.088 7 | -12 707.882 8 -12 709.743 0 | 2.160 1 | 55.514 8 | 55.271 5 | 0.243 3 |
| 20 | 30 788.468 5 30 794.088 7 | -12 727.501 2 -12 724.791 9 | 6.239 1 | 53.255 9 | 53.965 8 | -0.709 9 |
| 21 | 30 758.841 4 30 760.088 7 | -12 739.564 7 -12 741.589 0 | 2.377 7 | 53.248 9 | 53.533 8 | -0.284 9 |
| 中误差 | | | ±3.769 2 | 中误差 | ±2.035 3 | |

5 结语

实验结果验证了利用基于敏感度方程的方法, 在正侧视成像模型下, 对机载干涉 SAR 数据进行外定标处理, 能在一定程度上提高 DEM 的精度, 同时引入斜视角对目标点进行了定位。本方法只针对定标场数据进行定标处理, 定标后的干涉参数即能应用于整个飞行条带。实验采用 4096 * 2218 大小的干涉相位数据, 经过 4 次迭代收敛后, 定标处理计算

速度在 1 分钟以内。

但本实验仅选用正侧视干涉 SAR 模型, 并只对目标高程数据进行外定标处理。后续的工作可以采用三维重建模型, 对目标的三维位置进行外定标处理, 并可引入更多的干涉参数, 如载机速度等。

参考文献:

- [1] Mallorqui J J, Rpsado I, Bara M. Interferometric Calibration for DEM Enhancing and System Characterization in Single Pass

- SAR Interferometry[C]. IEEE, 2001, 404-406.
- [2] Wang Y P. Studies on Calibration Model and Algorithm for Airborne Interferometric SAR[D]. Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, 2003. [王彦平. 机载干涉 SAR 定标模型与算法研究[D]. 中国科学院电子学研究所, 2003.]
- [3] Zhang X D. Matrix Analysis and Application[M]. Beijing, Qinghua University, 2004, 85-95. [张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京, 清华大学出版社, 2004, 85-95.]
- [4] Dall J, Grindler-Pedersen J, Madsen S N. Calibration of a High Resolution Airborne 3-D SAR[C]. IEEE, 1997, 1018-1021.
- [5] Dall J, Madsen S N, Kerller K, et al. Using Airborne SAR Interferometry to Measure the Elevation of a Greenland Ice Cap [C]. IGARSS2000, Hawaii, USA, 2000, 1125-1127.
- [6] Mallorqui J J, Bara M, Broquetas A. Calibration Requirements for Airborne SAR Interferometry [C]. Proceedings Europto 2000, SAR Image Analysis, Modeling and Techniques III Vol. 4173, SPIE, 2000, 267-278.
- [7] Wang Y P, Peng H L, Yun R S. Locating Calibrators in Airborne InSAR Calibration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(1), 89-94. [王彦平, 彭海良, 云日升. 机载干涉合成孔径雷达定标中的定标器布放[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(1): 89-94.]
- [8] Xu S Q. Mother Earth Measure Science[M]. Wuhan: Wuhan Mapping Science Technology University Press, 1996, 242-249. [徐绍铨. 大地测量学[M]. 武汉, 武汉测绘科技大学出版社, 1996, 242-249.]

Studies on outside Calibration Method Based on the Boresight Model for Dual-antenna Airborne Interferometric SAR

ZHANG Wei^{1,2}, XIANG Mao-sheng¹, WU Yi-rong¹

(1. The National Key Lab. of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the boresight model for the Dual-antenna Airborne InSAR, the outside calibration was researched by adopting sensitivity equations. The error model based on sensitivity equations was deduced by differentiating InSAR imaging equations. Then the biases of interferometric parameters were solved by several accurate Ground Control Points(GCPs). The calibrated interferometric parameters were calculated by iteration method. And the accurate Digital Elevation Model (DEM) was reconstructed. Then the ground points were oriented. A set of InSAR data was adopted to do calibration experiments, which was derived by the Airborne InSAR system researched independently by Institute Of Electronics, Chinese Academy Of Sciences. The experimental results show that this algorithm is efficient.

Key words: InSAR; Outside calibration; Sensitivity equations; Ground control points

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)，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>