

文章编号: 1671-8860(2004)12-1089-04

文献标识码: A

# 基于 EM 算法和单幅雷达图像 阴影的控制点坡度校正

钱俊<sup>1,2</sup> 舒宁<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学印刷与包装系, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 对在我国现有的条件下进行控制点坡度校正的必要性进行了阐述, 并分析了 EM 算法。根据 EM 算法以及基于区域增长的余弦散射模型建立了控制点坡度校正模型, 并用河北省张北地区的雷达影像进行了实验, 取得了较高的精度初值。

**关键词:** 基于区域增长的余弦散射模型; 控制点坡度校正; 雷达影像; EM 算法

中图法分类号: P237.9; TP751.1

SAR 技术求取高程有雷达立体影像测图、雷达干涉测量、单幅雷达影像测图技术三种方法。雷达立体影像测图和雷达干涉测量获取 DEM 对原始数据的要求较高, 至少需要两幅雷达影像, 特别是雷达干涉测量常常会因为数据难以满足良好干涉条件而难以获得高质量的 DEM。单幅雷达测图技术仅用单幅雷达影像, 根据雷达成像模型, 建立影像的强度与地面坡度的关联, 并通过各种算法估算出对应地面各部分的坡度, 从而计算出高程。由于其对原始数据的要求较低, 是一种有效对地观测技术。要获取雷达影像上所有像素点的坡度, 必须至少存在一点, 该点的地面信息是已知的, 包括该点的坡度和高程以及对应的地面坐标, 通常称之为控制点。国外主要是利用布设角反射器来获取。但在国内, 还没有建立雷达地面控制系统, 在一些山区, 由于地形变化较快, 在山脊或其他地形比较突出的地方, 亮度太强甚至超过了角反射器的亮度, 难以把握。现在常用的方法是通过目视雷达影像和地形图的对应关系寻找地理特征明显的点, 然后通过地形图估算出该点的坡度作为控制点。由于位置的不确定性以及地形图的精度等各种因素的影响, 通过该方法得到的控制点坡度不仅误差较大, 而且由该点递推其他像素点的坡度精度不准, 甚至递推出来的坡度

超出了[0, 90] 的范围, 需要进行校正。

## 1 基于 EM 算法的控制点坡度初值校正

EM 算法是迭代计算混合密度最大似然估计 (MLE) 的一个常用方法。其最大特点是通过对完全数据的处理来解决不完全数据的问题。它从初始解  $\beta^{(0)}$  开始, 迭代得到解  $\beta^{(1)}, \dots, \beta^{(t)}$ , 在每步迭代中, 似然函数单调增加。

雷达影像是一种测距影像, 而利用人眼难以确认雷达影像和地形图的对应关系。同时, 由于叠掩等因素的影响, 使得雷达影像上的像素点和地形图上的位置不是线性等比例关系, 地形图比例尺和雷达影像分辨率之间也存在着不一致性, 通过手工测量地形图获取坡度是测不准的。为此, 在进行雷达影像测图时, 必须进行初值校正。

### 1.1 控制点初值的获取

为了能够较为精确地获取控制点, 首先需要寻找雷达影像上特征较为明显的像素点。因为水对雷达波呈镜面反射, 目视时应首先寻找水域。但由于河北张北地区缺少水源, 特别是在 10 月份, 而实验用雷达数据是 1997 年 10 月 8 日由 ERS1 卫星获取的, 图 1 是其中部分丘陵地带雷达

影像图(行向上进行了 1:5 的压缩), 图 2 是对应区域的地形图。其次是选择山脊, 因为山脊反映在雷达影像上是灰度变化最大的区域, 容易观察, 而且可以利用拉普拉斯算子求边缘来获取山脊, 拉普拉斯算子的阈值为零时, 几乎所有的像素点均为边缘, 因此, 必须调节阈值。图 3 是阈值为 156 的边缘图, 从中可以较为清晰地分辨出山脊线。



图 1 张北地区雷  
达影像图

Fig. 1 SAR Image of  
Zhangbei Region

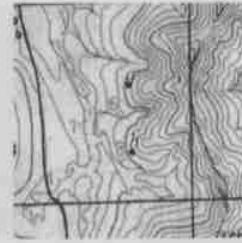


图 2 雷达影像对应  
区域的地形图

Fig. 2 Contour Map of  
Reflecting Radar Image



图 3 阈值为 156 的边缘图

Fig. 3 Edge Map When Threshold= 156

一般情况下, 选择山脊或者其附近的像素点, 能够得到较为精确的地理信息, 看起来作为控制点比较理想。但由于山脊附近起伏大, 不连续的区域较多, 难以利用该点去递推其他点的地理信息, 因此, 山脊只能作为参考, 而要选择地理位置比较特殊、较易识别且有一边灰度变化较小的位置, 如图 2 中黑点所代表的位置。有了山脊和所需的点, 利用网格可以确定山脊和该点的相互关系, 进而可以利用地形图求解该点的坡度。由于叠掩等现象的存在, 进一步假设控制点落在等比例点和其八邻域之中。从地形图上选择距离比较接近、但分属不同坡面的任意两点, 如图 2 中的  $a$  和  $b$ , 其等比例对应的雷达影像位置(图 1)是(28, 31)和(45, 31)。其纵向和横向坡度的求取方法如下: 在地形图上量取两等高线的间距乘以地形图比例尺, 然后除等高线高差, 反正切就得到坡

度角。

## 1.2 基于 EM 算法的控制点坡度校正

1) 对(28, 31)和(45, 31)及其八邻域赋初值, 可以假设在(28, 31)和(45, 31)处即为对应的控制点的概率为 50%, 而其八邻域点为控制点的概率为 6.25%。从地形图上测得  $b$  点对应的距离向坡度角为 55.387 5, 方位向坡度角为 54.487 0;  $a$  点对应的距离向坡度角为 55.128 0, 方位向坡度角为 55.326 8。

2)  $a$  点的值分别赋予(28, 31)及其八邻域点, 分别把它们作为基于区域增长的余弦散射模型单幅雷达测图技术(图 4)的种子点, 去求得另外八个点的坡度, 再根据种子点的概率确定(28, 31)及其八邻域点的坡度, 如(28, 30)点的坡度是根据如下方法确定的。

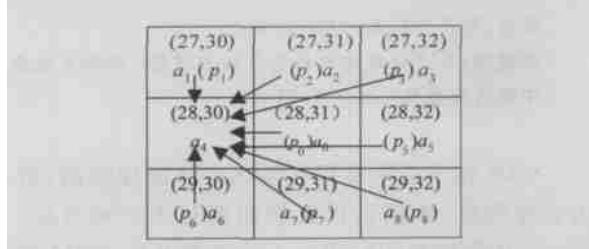


图 4 坡度校正示意图

Fig. 4 Slant Correction Map

由  $a_{11}(27, 30)$  点作为种子点递推得到  $a_{12}(28, 30)$  的坡度, 乘以(27, 30)的概率( $p_1$ ), 得到  $m_{14}$ 。其他邻域点及其本身对该(28, 30)的影响值为  $m_{24}, m_{34}, m_{44}, m_{04}, m_{54}, m_{64}, m_{74}, m_{84}$ , 则  $a_{12}$  点的坡度为  $m_{14} = m_{11} + m_{24} + m_{34} + m_{44} + m_{54} + m_{64} + m_{74} + m_{84}$ 。同理可以得到  $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{01}, a_{51}, a_{61}, a_{71}, a_{81}$  点的坡度。

3) 依照相应的方法得到与  $b$  点相关的  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$  的坡度。

4) 把  $a_1$  和  $b_1$  作为种子点, 选择两点中间地势较为平坦的地区作为两个种子点(控制点)递推出来的坡度校验的重叠区域, 在该区域计算  $a_1$  递推出来的坡度和由  $b_1$  递推出来的坡度差值, 取绝对值后相加, 得到统计差值  $w_{11}$ 。

5) 对  $a_1$  和  $b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$  进行同样操作, 得到统计差值  $w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{15}, w_{10}, w_{16}, w_{17}, w_{18}$ 。把这些差值相加, 得到由种子点  $a_1$  递推引起的差值  $w_{a1}$ 。

6) 演算  $a_2, a_3, a_4, a_0, a_5, a_6, a_7, a_8$  递推引起的差值  $w_{a2}, w_{a3}, w_{a4}, w_{a0}, w_{a5}, w_{a6}, w_{a7}, w_{a8}$ , 并对这些数据进行排序, 把差值最大占所有误差的比重认为是差值最小的点为控制点的概率, 如此

类推, 得到关于  $a$  点及其八邻域点的新概率。

7) 推导  $b$  点及其八邻域点的新概率。

8) 利用新的概率和新的坡度进行迭代, 直至收敛, 把概率最大的点作为控制点, 新的坡度值为真实的坡度值。

## 2 基于区域增长的余弦散射模型

雷达成像模型——余弦散射模型是单幅雷达测图技术的重要模型, 其对雷达影像强度和坡度角之间的关系描述如下:

$$I_r(\alpha, \beta) = K\sigma_0 \cos^2(\theta - \alpha) \cos^2(\beta) A(\alpha, \beta) \quad (1)$$

式中,  $I_r$  为回波强度;  $\alpha$  为幅度角(实验中的横向角);  $\beta$  为方位角(实验中的纵向角);  $\theta$  为雷达发射电磁波的入射角;  $K$  为定标常量;  $\sigma_0$  为地面覆盖物的后向散射系数;  $A$  为 SAR 影像上的一像素点对应的地面面积, 其表达式为:

$$A = Rd \sin(\theta) * Ra / (\cos(\beta) * \sin|\theta - \alpha|) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中有多个未知量  $\alpha, \beta, \sigma_0$ 。为求取坡度, 引进了区域增长法, 形成一种基于区域增长的余弦散射模型单幅雷达测图算法, 其步骤如下。

1) 用拉普拉斯算子对雷达影像进行区域化处理。

2) 在区域内, 可以假设  $\sigma_0$  变化不大, 为常数, 则区域内相邻两像素点的比值为:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\cos^2(\theta_1 - \alpha_1) \cos(\beta_1) \sin(\theta_1) \sin|\theta_2 - \alpha_2|}{\cos^2(\theta_2 - \alpha_2) \cos(\beta_2) \sin(\theta_2) \sin|\theta_1 - \alpha_1|} \quad (3)$$

3) 在同一区域, 根据邻域点已求解情况赋予不同权重, 对于有两个已解缠点的方向, 赋予较大的权值; 而对只有一个邻近已解缠点的方向, 权值较小; 若某方向上最邻近处没有已解缠点, 则不作处理。

4) 根据邻域点情况求和加权平均后, 递推出该点的坡度, 由于该坡度有一定的误差, 可利用式(3)进行校正。

5) 假设  $\beta$  不变, 代入式(3)求得  $\alpha$ 。

6) 假设该点坡度已知, 其灰度值最接近的坡度位置, 可利用上面方法校正, 将求得的  $\alpha$  代入式(3)求得  $\beta$ 。

7) 重复上面步骤, 直至误差在允许范围内。

8) 扩大拉普拉斯求解边缘的域值, 把一些差别不大的区域合并, 以利于控制点的增长。



图 5 推导出来的数字高程

Fig. 5 Deduced DEM Map

## 3 实验及结果

获取准确的控制点位置及其高程值是单幅雷达测图技术和雷达干涉测量技术的基础, 张北丘陵地区布设角反射器效果并不明显(其反射强度被丘陵地形所抵消), 只能通过目视对应的地形图来获取控制点, 控制点的误差较大, 基本不能用来递推其他点的地理信息。由于雷达获取影像分辨率的影响, 1:1 的原始雷达影像图难以目视得到明显的地理特征, 因此, 目视获取雷达控制点之前, 在雷达影像行向上进行了 1:5 的压缩, 如图 1 所示。图 2 中,  $a, b$  两点相距较近, 分属两个坡面, 朝向相同, 且以其为分界的左右两边坡度变化不是很大, 容易划分区域, 可以作为控制点。通过等比例对照, 得到这两点的坐标在雷达影像上为(28, 31)和(45, 31)。分别给这两点及八邻域点赋初值, 按照基于 EM 算法的坡度初值校正方法进行校正, 至收敛时, 其坡度和概率如表 1 和表 2 所示。其中, (29, 32)的概率是 0.780 1, 距离向坡度角为 54.995 6, 方位向坡度角为 55.215 8; (45, 31)的概率是 0.869 9, 距离向坡度角为 55.487 5, 方位向坡度角为 55.487 0。从表 1 和表 2 中可以看出, 这两点作为控制点的概率远远高于其他邻域点。代入基于种子区域增长的余弦散射模型单幅雷达测图算法获得的该区域的高程见图 5, 其趋势和相应的地形图上走势相同, 并把图中右边的山脊处求解得到的高程和实际地形图的高程进行了对照, 最大误差为 37m, 平均误差为 12m。而采用原始数据, 并以(28, 31)和(45, 31)作为控制点, 手工测得坡度并代入, 同样利用基于种子区域增长的余弦散射模型单幅雷达测图算法求解, 最大误差为 107m, 平均误差为 35m。这说明基于 EM 算法的初值坡度校正提高了初值的精度。

表1 收敛时(28, 31)及其八邻域点的概率和坡度

Tab. 1 Probabilities and Slants of Point (28, 31) and Eight Neighbor Points When Converged

概率和坡度	初值位置								
	27, 30	27, 31	27, 32	28, 30	28, 31	28, 32	29, 30	29, 31	29, 32
概率 $p$	0.008 4	0.009 7	0.010 5	0.010 9	0.044 7	0.057 8	0.024 5	0.053 4	0.780 1
距离向 $\alpha$	52.019 3	52.268 5	52.506 7	52.604 5	54.289 0	55.460 6	52.552 1	54.470 7	54.995 6
方位向 $\beta$	52.167 2	52.498 9	52.769 3	53.710 1	54.518 2	55.503 9	52.617 3	54.512 2	55.215 8

表2 收敛时(45, 31)及其八邻域点的概率和坡度

Tab. 2 Probabilities and Slants of Point (45, 31) and Eight Neighbor Points When Converged

概率和坡度	初值位置									
	44, 30	44, 31	44, 32	45, 30	45, 31	45, 32	46, 30	47, 31	48, 32	
概率 $p$	0.012 4	0.029 7	0.010 7	0.012 7	0.869 9	0.013 9	0.010 9	0.025 5	0.014 3	
距离向 $\alpha$	53.430 9	55.108 2	55.497 0	55.125 3	55.487 5	55.661 4	54.012 9	55.237 6	55.995 6	
方位向 $\beta$	53.421 8	55.197 8	55.398 5	55.103 4	55.487 0	55.603 7	55.000 6	55.112 6	55.785 1	

## 参 考 文 献

- 詹总谦, 钱俊, 舒宁. 基于区域分割和编码的相位解缠方法. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3)
- 杨杰, 廖明生, 江万寿, 等. 从单幅雷达影像提取地面高程信息. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6)
- 舒宁. 微波遥感原理. 武汉: 武汉大学出版社, 2001
- Frankot R T, Chellappa R. Estimation of Surface Topography from SAR Imagery Using Shape-from-Shading Techniques. Artificial Intelligence, 1990, 43 (6): 271~310

- 钱俊, 舒宁, 詹总谦. 基于区域增长的单幅雷达测图算法. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(7): 624~627
- Jordon M, Xu L. Convergence Results for the EM Approach to Mixtures of Experts Architectures. Neural Networks, 1996 (8): 1409~1431

第一作者简介: 钱俊, 副教授, 博士。主要从事计算机视觉、雷达测图的研究。

E-mail: qianjungreat@sohu.com

## Correction of Control Point Slope Based on EM Algorithm and Shading of Single SAR Image

QIAN Jun<sup>1,2</sup> SHU Ning<sup>1</sup>

(1) School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

(2) Department of Printing and Packaging, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This paper introduces a new algorithm based on EM algorithm to get precise position and slope. We find the position of notable geographic characteristic in the SAR image and the contour map. Then the position of the seed is adjusted. We correct the position and slope of the seed through iterative computation by cosine backscatter model based on EM algorithm.

**Key words:** region growth-cosine-backscatter model; correction of control point slope; SAR image; EM algorithm

**About the first author:** QIAN Jun, associate professor, Ph. D. His major researches include computer vision and radardinometry.  
E-mail: qianjungreat@sohu.com

(责任编辑: 晓晨)