

结合统计和形状特征的高分辨率 SAR 影像道路网提取

余 洁^{1,2,3} 刘振宇¹ 燕 琴⁴ 杨 杰⁵

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京市西三环北路 105 号,100048)

(3 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京市西三环北路 105 号,100048)

(4 中国测绘科学研究院,北京市莲花池西路 28 号,100039)

(5 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:结合高分辨率 SAR 影像统计特性和道路形状特征,提出一种新的道路网提取方法。首先引入窗口均值改进二值分割,以降低 SAR 影像固有斑点的噪声影响,针对高分辨率影像中道路呈现为面特征并存在宽度变化的情况,引入 VC 系数自适应调整窗口大小,从而有效提取可能的道路区域;然后利用道路的形状特征约束,去除非道路区域;最后通过空洞填充、腐蚀和膨胀等数学形态学运算,以及骨骼化和去除多余分支等处理,提取道路网络。实验证实了本文方法的有效性。

关键词:高分辨率 SAR 影像;道路网提取;VC 系数;形状特征

中图法分类号:P208; P237.9

道路网提取作为合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像解译的重要研究内容,以往的研究主要集中于低分辨率影像^[1]。在 SAR 影像道路网提取研究中,当影像分辨率低时通常将道路作“线特征”提取^[2];首先提取局部线性特征,然后利用马尔可夫随机场或其他优化算法识别并连接道路^[3-6]。高分辨率道路网提取研究方面,文献^[5]将光学影像中圆形模板匹配应用到高分辨率 SAR 影像道路提取中,但需人工干预。文献^[1]提出了一种结合影像分类与线特征提取的道路网提取方法,但仍将道路视作线特征,没有充分考虑道路在高分辨率 SAR 影像中的特征。文献^[6]结合道路在高分辨率光学和 SAR 影像中分布特征来提取和更新城区道路信息,但精度较差。

总体而言,随着影像分辨率的提高,道路不再是简单的线特征,而是呈现面特征(区域),而且面特征道路的宽度存在变化;道路中细节信息增加了提取的复杂度,例如车辆、树木、建筑物及阴影。此外还需考虑 SAR 影像斑点噪声影响。相对而

言,高分辨率道路提取更加复杂^[7]。针对此,本文提出一种高分辨率 SAR 影像道路网提取方法。

1 理论和方法

1.1 极化散射特征

全极化 SAR 测量目标得到数据可用 Sinclair 散射矩阵表示:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, h 表示水平极化; v 表示垂直极化; S_{hv} 是以水平极化发射、垂直极化接收的回波。散射矩阵也用 Pauli 分解矢量形式表达,介质满足互易条件时:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_{hh} + S_{vv} \quad S_{hh} - S_{vv} \quad 2S_{hv})^T \quad (2)$$

式中, \mathbf{K} 矢量中三个元素的模,分别对应 RGB 彩色合成中 B、R、G 通道,得到对应 Pauli 分解 RGB 影像。利用 \mathbf{K} 可定义极化相干矩阵:

$$\bar{T} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M K_j K^* T_j \quad (3)$$

式中, * 表示矩阵共轭; M 称视数, 值取 1 称单视, 否则称多视。该矩阵是厄米共轭、半正定阵, 其特征值 $\lambda_i (1 \leq i \leq 3)$ 非负, 可定义:

$$\left. \begin{aligned} \text{SPAN} &= \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \\ \tilde{A} &= \sqrt{\text{SPAN}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, SPAN 为极化总功率; \tilde{A} 为振幅也称幅度。

1.2 基于 VC 系数的道路分割

全极化 SAR 数据提供大量的极化散射特征^[8], 其中强度和幅度影像包含丰富的细节信息, 后者受噪声影响相对小, 因此本文选用幅度影像开展道路提取研究。文献^[9]通过二值分割区分道路和非道路。然而并非所有 SAR 影像都可利用二值分割区分目标和背景。只有当目标背景比值大于 4 时, 才能提取单视幅度影像中的目标, 多视处理后, 该值降低^[10]。考虑到 SAR 影像斑点噪声, 文中对传统二值分割进行改进:

$$B(i, j) = \begin{cases} 1, w(i, j) \leq T_d \\ 0, w(i, j) > T_d \end{cases} \quad (5)$$

式中, $w(i, j)$ 表示影像中 (i, j) 位置窗口内幅度值的算术平均; T_d 表征阈值。对同质区域, 选用的窗口尺寸越大, 降噪能力越好, 然而由于道路宽度存在变化, 如对式(5)采用同等大小窗口, 不能有效提取宽度变化道路, 因此文中引入 VC (variation coefficient) 系数, 自适应调整窗口大小:

$$VC = \frac{\sigma_y}{y} = \begin{cases} \leq \sigma_n, \text{ 同质} \\ > \sigma_n, \text{ 异质} \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_y 和 y 表征窗口内像素的标准差和均值; 阈值 $\sigma_n = 0.5227 / \sqrt{M}$, 0.5227 为单视幅度影像的标准差均值比^[11]。同质区域 VC 值仍存在变化, Park 给出一种动态计算公式^[12]:

$$T_\sigma = \eta \left(1 + \sqrt{\frac{1 + 2\sigma_n^2}{2N}} \right) \cdot \sigma_n \quad (7)$$

式中, η 表征平滑程度, 值越大 (大于 1) 降噪越明显, 文中设定为 1; N 表征采样像素数。

式(5)中的阈值 T_d 可用最优阈值法确定。假设影像中目标和背景的概率密度函数分别为 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$, 出现概率为 p 和 $1-p$, 则误差概率为:

$$J = P \int_L^\infty f_1(x) dx + (1-P) \int_0^L f_2(x) dx \quad (8)$$

当满足 $P f_1(x) = (1-P) f_2(x)$ 时, 式(8)取最小值。值得注意的是, 低分辨率多视幅度影像服从 Chi 分布, 高分辨率 SAR 数据的幅度影像则更趋向 K 分布、log-normal 分布或 Weibull 分布^[13]。

为简化计算, 采用 Chi 分布给出一个近似值

$$T = \frac{2\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_2^2 - \sigma_1^2} \left(\ln r + \ln \left(\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \right) \right) \quad (9)$$

$r = p / (1-p)$, p 是影像中目标出现的概率。

1.3 结合形状特征约束的道路提取

SAR 影像中阴影、水体等弱后向散射信号常被误分为道路, 考虑到道路具有形状特征, 因此引入形状特征, 去除非道路区域。常用道路形状特征包括: ① 面积 S , 道路区域通常面积较大, 可滤除小面积干扰目标; ② 形状复杂度 $E = L^2 / S$, 其中 L 表征区域周长, S 为面积, 描述图形的单位面积对应周长, 道路可分为直线面特征道路和曲面特征道路 (见图 1 中椭圆区域), 形状复杂度能有效提取这两种面特征。因此, 文中首先利用道路面积去除小目标干扰, 然后利用形状复杂度提取道路区域。上述特征能保证道路区域有效提取, 仅特殊情况下需人工干预。道路提取后, 通过形态学处理得到道路中心线, 形成道路网络。目前常用完整率 (Com) 和正确率 (Cor)^[14-15] 评价道路网络, 定义如下:

$$\text{Com} = L_c / L_r \quad \text{Cor} = L_c / L_t \quad (10)$$

式中, L_c 表征正确提取道路长度; L_r 是实际道路长度; L_t 表征提取道路长度。

1.4 SAR 影像道路网络提取

首先, 计算幅度影像中每个像素所在窗口的 VC 系数, 判断区域是否异质, 如果区域同质, 进一步增加窗口尺寸, 直到满足区域异质条件, 根据同质对应最大窗口, 统计窗口幅度均值, 结合式(9)给出的最优阈值, 实现道路分割; 再根据 § 2.3, 利用道路面积和复杂度等形状约束因子, 去除分割结果中干扰因素; 最后利用形态学处理, 提取道路中心线, 形成道路网络。

2 结果与分析

2.1 实验数据

实验数据是 2010 年 2 月中国电子科技集团在海南省陵水黎族自治县获取的机载 X 波段 SAR 数据, 大小 1 106 像素 × 1 260 像素, 分辨率约 0.4 m, 黑色条带区域为道路。图 1 给出了研究区域的 Pauli RGB 合成影像。

2.2 实验结果分析

图 2 中给出两块同质区域 (图 1 中方框标识区域) 的 VC 值随窗口尺寸变化, 当窗口尺寸大于 21 时, VC 值趋于稳定, 约 0.35, 小于 0.5227, 说明数据已做多视处理。因此式(5)中窗口尺寸设

定为[3, 21]区间内的奇数,自适应选取满足式(6)的最大尺寸窗口,计算均值执行道路分割。

实验数据中非道路和道路区域比值约为7,满足文献[10]的要求,可用幅度信息提取道路区域,图3给出部分区域的分割结果对比,图3中自适应窗口分割降低了斑点噪声影响,有效提取了宽度变化的道路区域,证实了本方法的有效性。



图1 Pauli RGB Composite Image

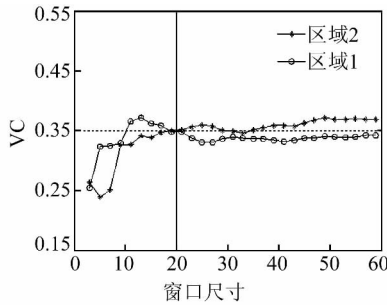


图2 VC Value Change with Windows

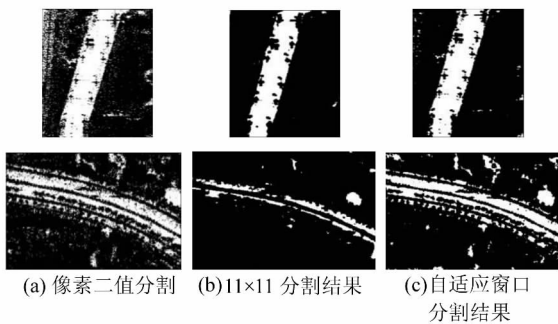


图3 分割结果对比

2.3 基于形状约束与形态学处理的道路网络提取

图4中给出形状约束前后的结果,灰度阈值540,面积阈值1 000 m²,形状复杂度阈值2 772.3。对比处理前后结果,形状约束能去除非道路区域,并保留道路区域;然而道路中存在空洞,道路边缘也并不光滑,这是道路中的路灯、车辆和道路边缘阴影等细节信息影响道路分割所导

致。

针对直接提取的不足,引入腐蚀和膨胀^[16]以及空洞填充等形态学处理,填充空洞,平滑道路边缘。对处理结果利用距离变换^[17]得到单像素宽度道路骨架,然后采用倒查法去除分叉,即首先寻找骨架末端点,然后从末端开始搜索,不考虑已搜寻点,若每个像素点的八邻域内仅有一个像素,不做处理;若有两个或两个以上点,说明搜寻路径为分叉,统计分叉长度,小于阈值时去除分叉。最终结果见图5。图5(a)中给出形态学处理后的道路区域,道路边缘仍然存在突起,在中心线提取时会形成多余的分支(毛刺),通过倒查法消除多余分支,结果如图5(b),得到了较好的道路网络。

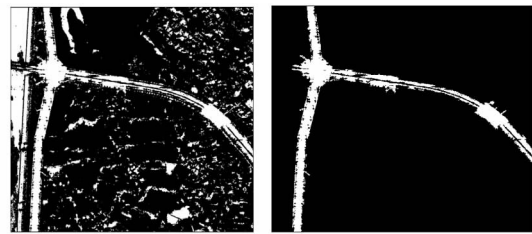


图4 形状约束前后道路分割结果

图4 Result of Road Segmentation Before and After Shape Restrict

将图5(b)提取结果叠加到对应 Pauli RGB 合成影像(图1)中,结果见图6(a)。从图6中可看出,提取的道路网与实际道路中心线基本吻合,当道路宽度变化时,也能得到较好的结果;方框标出与实际中心线偏离区域,可发现道路区域有强散射目标,影响道路分割结果所导致;椭圆区域道路网断开,对比图4(b)可发现,这是由于较窄路段处的强散射目标造成道路分割错误导致。

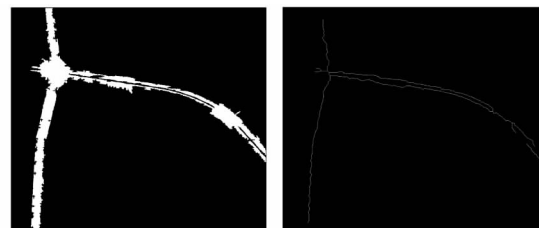
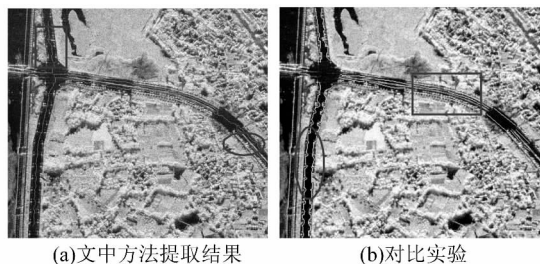


图5 道路分割结果形态学处理与中心线提取

图5 Morphological Processing and Center-line Extraction of Road Segmentation

利用文献[1]中方法提取结果见图6(b)。图6给出的是进行道路连接和干扰去除后的结果,结果中主要给出道路边缘并非道路网络(见图6(b)中椭圆),部分区域给出道路网络(见图6(b))

中方框),这是因为该方法将道路视为线特征,理论基础是边缘检测,虽然可通过设置检测模板以顾及道路宽度信息,但无法适用于宽度存在变化的道路,因此宽度大的道路区域只能提取边缘,而宽度小的道路区域,接近为线特征,能够给出道路中心线信息,同时由于道路中细节信息干扰边缘检测,结果中无法提供良好的道路边缘信息。



(a)文中方法提取结果

(b)对比实验

图 6 道路网提取效果图

Fig. 6 Result of Road Network

图 7 给出第二组实验结果。图 7(a)对应形状约束后的分割结果,其中灰度阈值 560,面积阈值 800 m^2 ,形状复杂度阈值 290。对比图 7(b)可发现,一些面积小、线特征疑似道路没有被提取,这是因为在形状约束处理中,面积阈值已将其作为非道路区域去除,此外受道路边缘阴影或弱散射目标影响,道路边缘存在一些不规则突起,通过距离转换和去毛刺处理,可消除其对道路网提取结果的影响。图 7(b)给出叠加后的提取结果,从图 7 中可看出,提取结果基本符合实际,由于道路细节信息影响,个别区域中心线偏离,部分道路中心线断开,这是由于数据没有进行辐射定标,道路与周围地物信号串扰,无法被有效提取所致。

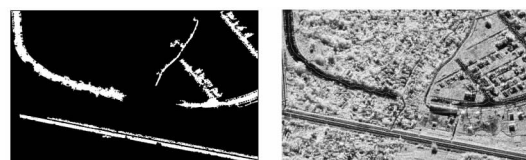
2.4 道路网络提取精度评估

表 1 中给出两组实验的定量评估。文中方法提取道路网精度较高,证实文中方法的有效性;两组实验道路网络提取精度主要受道路分割精度影响,第一组实验完整率为 94.91%,优于第二组实验,对比图 6(a)和图 7(a)可知,第一组实验道路提取结果相对较好,大多数道路区域都被有效提取,道路缺失相对较少,因此其完整率也相对较高,此外第一组实验提取结果受道路边缘因素影响较小,因此其正确率也高于第二组实验。

表 1 道路网提取质量评估/%

Tab. 1 Assessment of Road Extraction/%

实验编号	完整率	正确率
一	94.91	94.77
二	85.69	92.94



(a)形状约束后道路区域提取结果

(b)道路网提取效果图

图 7 道路网络提取结果

Fig. 7 Result of Road Net

3 结 语

本文通过改进二值分割降低斑点噪声,引入 VC 系数自适应调整窗口大小,从而有效提取宽度变化的道路区域;提出利用道路的形状特征克服水体和阴影被误分割为道路区域的现象,去除非道路区域;通过空洞填充、腐蚀和膨胀等形态学处理以及去分叉处理,降低道路中细节信息影响。实验结果定性定量分析表明,文中方法能解决高分辨率影像中道路宽度变化,并降低细节信息影响,精度较高。下一步的研究重点是如何降低道路中强散射体影响,以及连接道路网络。

参 考 文 献

- [1] Lisini G, Tison C, Tupin F, et al. Feature Fusion to Improve Road Network Extraction in High Resolution SAR Images[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing Letter, 2006, 2(3):217-221
- [2] 程江华,高贵,库锡树,等. SAR 图像道路网提取方法综述[J]. 中国图像图形学报,2013, 18(1): 11-23
- [3] Tupin F, Maitre H, Mangin J F, et al. Detection of Linear Features in SAR Images; Application to Road Network Extraction[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1998, 36(2): 434-453
- [4] Katartzis A, Sahli H, Pizurica V, et al. A Model Based Approach to the Automatic Extraction of Linear Features from Airborne Images [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001, 39(9): 2 073-2 079
- [5] Poulain V, Inglada J, Spigai M, et al. High Resolution Optical and SAR Image Fusion for Road Database Updating[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Hawaii, 2010
- [6] Cheng J, Guan Y, Ku X, et al. Semi-automatic Road Centerline Extraction in High-resolution SAR Images Based on Circular Template Matching[C]. Electric Information and Control Engineering (ICE-ICE), Wuhan, 2011
- [7] 贾承丽. SAR 图像道路和机场提取方法研究[D].

- 长沙:国防科学技术大学,2006
- [8] Cao F, Hong W, Wu Y, et al. An Unsupervised Segmentation with an Adaptive Number of Clusters Using the SPAN/H/ α /A Space and the Complex Wishart Clustering for Fully Polarimetric SAR Data Analysis[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2007, 11(45): 3 454-3 467
- [9] 卫蒙, 常文革. 数学形态法在超宽带 SAR 道路边缘检测中的应用[J]. 中国图形图像学报, 2010, 10(15): 1 555-1 560
- [10] Lee J S, Lurkevich I. Segmentation of SAR Images [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1989, 6(27): 674-680
- [11] Lee J S, Pottier E. Polarimetric Radar Imaging: From Basic to Applications[M]. London: Taylor & Francis, 2009
- [12] Park J M, Song W J, Pearlman W A. Speckle Filtering of SAR Images Based on Adaptive Windowing[J]. IEEE Proceedings, Vision Image and Signal Processing, 1999, 146(4): 191-197
- [13] Wang H P, Ouchi K. Accuracy of the K-distribution Regression Model for Forest Biomass Estimation by High-resolution Polarimetric SAR: Comparison of Model Estimation and Field Data[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2008, 4(46): 1 058-1 064
- [14] 冯颖涛. 基于非下采样 Contourlet 的遥感图像道路增强与提取[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010
- [15] 罗昭拓. 高分辨率遥感图像中道路提取的分析与研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008
- [16] 蔡正涛. 基于双结构元的数学形态学边缘检测算法[D]. 西安:西北工业大学, 2003
- [17] 丁颀, 刘文予, 郑宇化. 基于距离变换的多尺度连通骨架算法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 4(24): 281-285

第一作者简介:余洁,博士,教授,研究领域为遥感影像处理与应用。

E-mail:yuj2011@whu.edu.cn

Road Network Extraction of High Resolution SAR Image in Combination with Statistics and Shape Features

YU Jie^{1,2,3} LIU Zhenyu¹ YAN Qin⁴ YANG Jie⁵

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

(2 College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, 105 West 3rd Ring Road North, Beijing 100048, China)

(3 Beijing Key Lab of Resources Environment and Geographic Information System, Capital Normal University, 105 West 3rd Ring Road North, Beijing 100048, China)

(4 Chinese Academy of Surveying and Mapping, 28 West Lianhuachi Road, Beijing 100039, China)

(5 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A method of road network extraction for high resolution SAR images was proposed in combination with statistics from the image and shape features of a road in this paper. Firstly the window mean was introduced to improve binary segmentation to reduce the speckle noise. Next, the variation coefficient (VC) was introduced to adaptively select the window size in order to resolve the problem that the road in high resolution images are always shown as a region and the width of the road usually changed. Then, these shape features of the road were used to remove the non-road regions. Finally, Mathematical morphology processing including hole filling, erosion and dilation, skeletonization, and branch trim were exploited to extract the road network. The experimental results show that the proposed method can effectively extract road region of different width and provides excellent road net information, which validates the method described in the paper.

Key words: high resolution SAR image; road network extraction; VC coefficient; shape features

About the first author: YU Jie, Ph D, professor, specialized in process and application of remote sensing imagery.

E-mail: yuj2011@whu.edu.cn