

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013
Vol.18 No.

1

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013年1月 第18卷 第1期(总第201期)

目次

综述

- 正面人脸图像合成方法综述 赵林, 高新波, 田春娜(1)
SAR 图像道路网提取方法综述 程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥(11)

图像处理和编码

- 头部缺失的 JPEG 文件碎片恢复 徐明, 黄立, 张海平, 徐建, 郑宁(24)
安全高效的可撤销指纹模板构造 喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣(36)
基于残差的图像超分辨率重建 陈华华, 姜宝林, 刘超, 陈伟强, 陆宇, 张嵩(42)
旋转的 Wang Tiles 纹理合成算法 王继东, 庞明勇, 赵瑞斌(49)
基于圆形约束快速水平集的原生质体细胞分割 王晓飞, 庞全(55)

图像分析和识别

- 采用压缩传感的鲁棒的视频指纹方案 孙锐, 李超, 蒋飞云(62)
基于图像显著性的路面裂缝检测 徐威, 唐振民, 吕建勇(69)
基于局部熵的主动轮廓模型 潘改, 高立群, 赵爽(78)
基于算子的图像分解 李峰, 曾晓辉, 陈盛霞, 沈玉娟(86)

图像理解和计算机视觉

- 中值流辅助在线多示例目标跟踪 王德建, 张荣, 尹东, 张智瑞(93)
四叉树直方图的特殊方向关系表达 张珂, 王小捷, 靳越(101)

计算机图形学

- 协同进化的近似规则纹理合成 王相海, 陶兢喆(107)
反走样直线的灰度循环生成算法 牛连强, 张胜男, 钟玲(115)

地理信息技术

- 微博客蕴含交通信息的提取 张恒才, 陆锋, 陈洁(123)

-
- “计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (130)

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 1 January 2013

Contents

Review

- Review of frontal face image synthesis methods Zhao Lin, Gao Xinbo, Tian Chunna(1)
Review of road network extraction from SAR images Cheng Jianguhua, Gao Gui, Ku Xishu, Sun Jixiang(11)

Image Processing and Coding

- Rrecovery method for JPEG file fragments with missing headers
..... Xu Ming, Huang Li, Zhang Haiping, Xu Jiang, Zheng Ning(24)
Secure and efficient scheme to construct a cancelable fingerprint template
..... Yu Jianping, Zhang Peng, Wang Yao, Yang Yijun(36)
Image super-resolution reconstruction based on residual error
..... Chen Huahua, Jiang Baolin, Liu Chao, Chen Weiqiang, Lu Yu, Zhang Song(42)
Texture synthesis using rotational Wang Tiles Wang Jidong, Pang Mingyong, Zhao Ruibin(49)
Protoplasm somatic cells segmentation based on circle dependent fast level-set segmentation Wang Xiaofei, Pang Quan(55)

Image Analysis and Recognition

- Robust video fingerprinting via compressed sensing Sun rui, Li Chao, Jiang Feiyun(62)
Pavement crack detection based on image saliency Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong(69)
Active contour model driven by local entropy energy Pan Gai, Gao Liqun, Zhao Shuang(78)
Operator-based image decomposition Li Feng, Zeng Xiaohui, Chen Shengxia, Shen Yujuan(86)

Image Understanding and Computer Vision

- Median flow aided online multi-instance learning visual tracking Wang Dejian, Zhang Rong, Yin Dong, Zhang Zhirui(93)
Expression of special directional relation based on quadtree histogram Zhang Ke, Wang Xiaojie, Jin Yue(101)

Computer Graphics

- Fast near-regular texture synthesis based on the concept of co-evolution Wang Xianghai, Tao Jingzhe(107)
Integral algorithm for generating anti-aliased straight line controlled by gray iteration
..... Niu Lianqiang, Zhang Shengnan, Zhong Ling(115)

Geoinformatics

- Extracting traffic information from massive micro-blog messages Zhang Hengcai, Lu Feng, Chen Jie(123)

中图法分类号: TP775 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)01-0011-13

论文引用格式: 程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥. SAR 图像道路网提取方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 11-23.

SAR 图像道路网提取方法综述

程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥

国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

摘要: SAR 图像道路网提取具有重要的遥感应用价值。20 多年来, 随着 SAR 成像技术的不断发展以及遥感应用的迫切需求, 涌现出大量道路网提取方法。本文回顾了 SAR 图像道路网提取研究的发展历程, 从道路提取流程阶段出发, 将其分为局部检测和全局连接这两大步骤, 在每个步骤中分析比较了现有算法的适用范围及相对优缺点, 指出了当前研究中存在的问题, 展望了 SAR 图像道路网提取的发展趋势。

关键词: 合成孔径雷达图像; 道路网; 局部检测; 全局连接; 综述

Review of road network extraction from SAR images

Cheng Jianghua, Gao Gui, Ku Xishu, Sun Jixiang

College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: Road network extraction from SAR Images is an important application in the field of remote sensing. With the development of the SAR imaging technology and the urgent demands from remote sensing applications, many road-network extraction methods have been proposed in the recent twenty years. In this paper, we review the development of road extraction methods from SAR images. First, we classify the course of road extraction into two steps: local detection and global connection. Then, some local detection and global connection algorithms are discussed regarding their application fields and their advantages and disadvantages. Finally, the current problems are given and possible future work is explained.

Key words: SAR images; road network; local detection; global connection; review

0 引言

道路作为一种典型的人造地物, 是构成现代交通体系的主要部分, 具有重要的地理、政治、经济、军事意义。据欧洲实验摄影测量研究组织(OEPE)调查显示, 85% 的人对道路信息感兴趣。在城区遥感图像中, 近 80% 的目标是建筑物和道路。作为主要的参照物, 提取出道路信息, 就可以获取整个城市的概貌特征。道路信息在城市规划、交通控制、辅助导航、GIS 数据库更新、应急响应、军事打击、毁伤效果评估等诸多领域有着广泛的应用。

遥感成像技术的发展, 使得遥感图像成为道路提取的重要图源, 从遥感图像中提取道路网已成为遥感技术应用的热点研究内容之一^[1]。由于合成孔径雷达(SAR)在各种遥感成像中不受光照和云层遮挡影响, 具有全天时、全天候工作的特点, 在遥感领域作用不可替代, 从 SAR 图像中提取道路网日益受到重视。

从 SAR 图像中提取出道路网, 关键是建立合适的道路模型。SAR 图像分辨率不同, 道路表现出来的特征差别很大。理想情况下, 在中低分辨率($>9\text{ m}$)^[2] SAR 图像中, 道路主要表现为具有一定方向和长度的线特征, 且由于 SAR 采用侧视成像方

收稿日期: 2012-04-24; 修回日期: 2012-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171316)

第一作者简介: 程江华(1979—), 男, 讲师, 2005 年于国防科技大学获电子科学与技术专业硕士学位, 主要研究方向为 SAR 图像解译。

E-mail: jianghua_cheng@nudt.edu.cn

式,道路路面较为平整,发生镜面反射的回波强度较弱,与其他邻近地物相比,道路成像的灰度值较低;在高分辨率($<5\text{ m}$)^[3] SAR 图像中,道路不再表现为线特征,而是呈现出由亮的双边缘包围的暗长区域^[4]。然而,在实际成像中,存在着各类干扰:

1) SAR 固有的乘性噪声干扰,造成道路的边缘比较模糊,且与周围环境的对比度不明显;

2) 道路旁高大建筑物以及树木的遮挡,会在道路上形成阴影,破坏道路线特征或区域特征的连续性,使得部分路段只有单边缘甚至没有边缘;

3) 道路上的铁护栏、车辆、天桥等金属地物会对雷达入射波形成强反射,在 SAR 图像的道路区域上形成亮白色干扰,破坏道路的连续性;

4) 道路两侧的绿化带形成具有一定灰度值的纹状干扰,使得路段与周围地物区分不明显,甚至人眼有时也难以分辨;

5) 道路与周围建筑物粘连,使得原本连续的道路双边缘变成单边缘,且造成同一条道路不同区域的宽度变化很大。

上述干扰的存在,使得很难用某种模型描述道路来解决提取问题。另外,不同的场景对道路提取的影响甚大。在乡村场景中,道路数量小,类型少,一般呈一定的曲率蜿蜒于整个图像中,且受其他地物的干扰较少;在城区场景中,道路数量较多,类型也多(主干道、次干道、一般街道、巷子等),一般道路较直,且受其他地物的干扰较大。因此,城区场景道路网提取较乡村场景更困难。

鉴于上述各类干扰的存在、道路类型的多样性以及环境背景的复杂性,SAR 图像道路提取是一项复杂而艰巨的课题。20 多年来,研究人员皓首穷经,探求解决之道,但至今尚无一套通用的道路网提取方案。

尽管前人已对道路提取方法进行过综述^[5-7],但主要针对光学遥感图像,且介绍的是自动提取方法^[5-6],尚无专门针对 SAR 图像道路提取进行综述的文献出现。相对于光学遥感图像,SAR 图像干扰更严重,场景更复杂,用于光学遥感图像道路提取的方法往往在 SAR 图像中不奏效。当前,自动道路提取方法常常在稳健性和准确性上不能达到令人满意的结果,通常需要后期大量的人工处理,开展半自动道路提取方法研究是当前较为实际的一个研究方向。本文将 20 多年来的 SAR 图像道路提取方法(自动、半自动)及涉及的相关技术进行系统总结,

并结合笔者在该领域的研究实践对这些方法进行了分析比较,指出当前存在的问题,展望该领域的发展趋势。

1 历史与现状

早在 20 世纪 70 年代,就开始了基于光学遥感图像的道路提取研究^[8]。开展基于 SAR 图像各类道路提取方法的研究晚于光学遥感图像,且与 SAR 成像技术的发展息息相关。在 20 世纪,SAR 成像以中低分辨率为主,道路呈现为线特征,道路提取通常分为先边缘检测得到边缘像素点,后边缘编组得到线特征,最后再将线连接成网络这 3 个阶段。按照中低分辨率图像道路提取的阶段流程,在 20 世纪 90 年代之前,严格来讲没有真正意义上 SAR 图像道路提取方法出现,大多数研究还处于边缘提取和边缘编组阶段。在边缘提取研究方面,Frost 等人^[9]提出的似然比边缘检测器,首开了恒虚警边缘检测研究的先河。Touzi 等人^[10]提出的均值比(ROA)检测算子具有一定的代表性,在此后几年里,涌现出多个改进型 ROA 边缘检测算子。在边缘编组研究方面,广泛使用的直线提取算子(Hough、相位编组等)在 SAR 图像中皆有应用。

1990 年,Samadani 等人^[11]报道了先局部边缘检测后全局道路连接的方法,被认为是第一次提出的真正意义上的 SAR 图像道路提取方法。嗣后,随着 SAR 图像应用向深度和广度发展,大量的道路提取方法涌现出来。值得一提的是,Tupin 等人^[12]开创性提出的基于 Markov 随机场模型道路网连接方法,对后续研究影响很大,后来出现的几篇有影响力的文章^[4,13-14]皆是该方法的延伸。

到了 21 世纪,随着 SAR 成像技术的进一步发展,对地成像观测中图像的空间分辨率得到进一步提高,多颗高分辨率 SAR 卫星相继发射并成功获取数据。2005 年,美国成功发射雷达侦察卫星 Lacrosse-5,最好分辨率达 0.3 m ;2007 年,德国发射商业卫星 TerraSAR-X,聚束成像模式下分辨率可达 1 m ;同年,加拿大成功发射 Radarsat-2,可提供全极化、超精细以及 3 m 分辨率波束等新的成像模式;2010 年,德国将另一颗与 TerraSAR-X 基本相同的卫星 TanDEM-X 送上太空。相对于星载 SAR 系统,机载 SAR 飞行高度一般在 10 km 以下,成像分辨率更高,“全球鹰”和“捕食者”等美国无人机载 SAR

传感器对地观测分辨率可达 0.3 m。在高分辨率 SAR 图像中,道路呈现为区域特征,且能表示更多的道路类型和地物细节。但是,高分辨率使得图像中的干扰被放大,环境背景变得更复杂,给道路提取带来很大的困难。充分利用高分辨率 SAR 图像道路的几何(平行双边缘)及辐射(灰度)特征,采用平行双边缘检测^[15]、分类分割^[16]、多尺度分析^[4]以及道路剖面分析^[17]等自动或半自动方法检测出道路区域,然后再连接成网络,是当前的研究现状。

总的来说,国内外开展从 SAR 图像中提取道路的研究已有 20 多年的历史。国外著名的研究机构和个人,如:法国国立布列塔尼高等电信学院(ENST) Tupin^[12-13],意大利帕维亚(Pavia)大学 Gamba^[18-20]、Lisini^[14,21]、Negri^[4,22]和 Dell^[16,23-25]等人,加拿大 Sherbooke 大学 Bentabet^[26],德国慕尼黑工业大学 Hedman^[27]等人,在此方面做了许多创新性工作,引领着该领域研究的前进方向。国内的中国科学院电子所、清华大学、武汉大学、国防科学技术大学、中国测绘科学研究院等研究院所在此方面做了大量工作,并取得了一定的成果。国际有影响力的杂志:《地理科学和遥感学报》(IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing)、《国际遥感杂志》(International Journal of Remote Sensing)、《IEEE 地球科学与遥感快报》(IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters)、《摄影测量工程与遥感》

(Photogrammetric Engineering and Remote Sensing)等,以及一些知名的国际会议:地理科学和遥感研讨会(IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing)和 SPIE 组织的一些会议,收录了关于 SAR 图像道路提取发表的文章上百篇,与道路提取相关的 SAR 图像降噪、边缘检测、线特征提取以及连接等文章更是不胜枚举。瑞士的 Amobe 项目、意大利等国针对多遥感图像应用的 OTB (Orfeo Toolbox)以及我国重大专项——高分辨率对地观测系统等均涉及道路这种典型的地物要素提取。

然而,关于 SAR 图像道路提取的综述性文章在国内外杂志上还没有报导,因此有必要对这些研究工作系统进行总结。

2 算法分类

当前,SAR 图像道路提取方法种类繁多,通常根据分辨率大小、处理流程、场景类型、有无人工干预、有无外界辅助知识等进行分类^[28-29]。将 SAR 图像道路网提取分为局部检测和全局连接两大步骤。其中,在局部检测中,按照分辨率大小,分为中低分辨率和高分辨率 SAR 图像局部检测这两大类;在全局连接中,部分连接方法(如 MRF、GA 等)适合于不同分辨率 SAR 图像,因此不再按分辨率大小进行划分,而是按照自动化程度将其分为自动和半自动这两类。具体分类如图 1 所示。

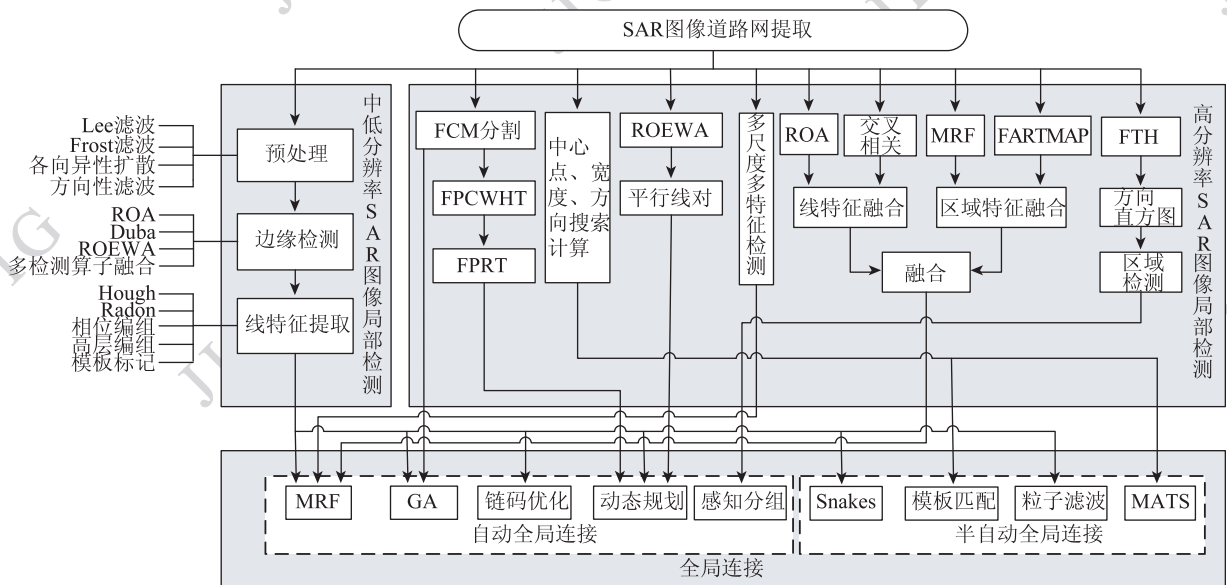


图 1 SAR 图像道路网提取方法分类

Fig. 1 Classification of road network extraction from SAR image

2.1 中低分辨率 SAR 图像局部检测

据引言所述,中低分辨率 SAR 图像道路表现为灰度值较小的直线或曲线。由于受乘性相干斑噪声的干扰,造成 SAR 图像道路边缘模糊。因此,一般先进行滤波或边缘增强等预处理,然后再进行边缘检测得到边缘像素点,将离散的像素点组合成连续的线,为后续道路网全局连接作准备。

2.1.1 预处理

相干斑点是所有微波成像系统中固有的一种现象。在 SAR 图像中,斑点表现为颗粒状的噪声特性,造成道路的边界模糊,导致道路边缘检测和线特征提取的断裂、虚警以及漏警。去除斑点噪声已经成为 SAR 图像应用前常规的处理步骤,其理想要求是在去掉噪声的同时能够保持甚至增强边缘。对于 SAR 图像道路提取来讲,需要尽量增大道路目标和背景之间的对比度。

1) 空域滤波

由于基于空域的滤波器算法简单、滤波效果较好等优点,得到广泛应用。经典的空域滤波方法有: Lee^[30]、Frost^[15,26]、Kuan 和 MAP 等。其中, Frost 滤波的边缘保持能力较强,因此在 SAR 图像道路预处理中应用较多。事实上,基于空域的滤波效果与滑动窗口大小的选择有关,小尺度窗口去噪能力较差,但能较好地保持边缘信息;而大尺度窗口虽然去噪能力较强,但容易丢失边缘细节。这就造成了去斑效果与边缘细节保持之间的矛盾。另外,不同类型道路的宽度不一样,对滤波窗口大小的要求也不一样,这些增加了滤波器设计的难度。

2) 各向异性扩散滤波

采用各向异性扩散滤波^[31]的方法可在去斑的同时保持边缘信息。为了便于说明问题,先给出常用 P-M 扩散方程模型

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(c(|\nabla u|) \nabla u) \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $|\nabla u|$ 为梯度场, $c(|\nabla u|) = 1/(1 + |\nabla u|^2/k^2)$ 为扩散系数, $k > 0$ 为边缘指数。在图像平坦区域 $|\nabla u|$ 较小, 扩散系数 $c(|\nabla u|) \rightarrow 1$, P-M 扩散呈现低通滤波特性, 能够去噪; 在图像边缘区域 $|\nabla u|$ 较大, 扩散系数 $c(|\nabla u|) \rightarrow 0$, P-M 扩散呈现全通特性, 能够保持边缘。

3) 方向性滤波

根据 SAR 图像道路具有一定的方向性特征进

行滤波, 是另一类预处理方法。SAR 图像道路低灰度值像素点是按照一定方向进行排列的, 如果用方向性滤波器对其进行滤波, 当道路的方向与滤波器的方向相同或相近时, 道路部分就会较好地保留下来, 而其他部分则会被滤去^[32]。将道路特征的方向信息加入到 Frost 滤波器中^[26], 起到很好的增强道路边缘和去除噪声的效果。

Bolon 等人^[31]比较了自适应中值滤波、各向异性扩散滤波、自适应加权 $d\alpha$ (α 为局部噪声脉冲自适应参数) 滤波、改进型 Lee 滤波等 4 个滤波器针对 SAR 图像的去噪性能, 得出去噪性能好的滤波器并不一定适合于滤波后 SAR 图像道路提取的结论。虽然自适应加权 $d\alpha$ 滤波去噪效果相对较好, 但各向异性扩散滤波能够在去噪的同时增强道路结构, 更适合于后续 SAR 图像道路网提取。

值得一提的是, 预处理阶段在整个道路提取过程中并非不可或缺。在道路边缘检测阶段中, 局部窗口的使用通常兼有滤波的功能。

2.1.2 边缘检测

边缘检测在整个道路提取过程中起着重要作用, 其性能在一定程度上影响着道路提取的整体效果。由于受乘性相干斑噪声的干扰, 经典的用于光学遥感图像加性噪声模型的边缘检测算子 (Canny、Sobel 等) 不具有恒虚警 (CFAR) 特性, 在高亮点处过检测出虚假边缘, 而在暗区则丢失很多真实边缘, 因此不再适用于 SAR 图像。自 20 世纪 80 年代起, 研究者提出了大量针对乘性噪声模型的边缘检测算子, 大致可分为基于单边缘和多边缘模型。

1) 单边缘检测算子

基于单边缘模型的检测方法通常采用局部加窗的方式, 并且假定分析窗内为单边缘。常用的单边缘模型典型方法是均值比 (ROA) 检测器^[33-34]。其原理是用 3 个相邻的矩形窗口沿当前像元方向对图像进行扫描, 同时统计每个窗口中的灰度均值, 通过均值比达到检测当前像元是否为边缘点 (图 2(a))。为了提高道路弱边缘检测的正确率, 通常采用加大中心窗口宽度的做法, 却使得强边缘附近许多非道路像素被错误地提取出来, 导致道路被展宽, 造成实际道路定位准确性下降。在中间矩形窗口的垂直方向设置一个修剪窗口, 搜索修剪窗口内比例响应最大值对应的点作为边缘点, 可对 ROA 结果进行瘦身, 提高道路边缘定位的准确率^[35]。或对 ROA 结果进行形态学膨胀后, 再用 Canny 算子二次

检测边缘,是另一种定位准确率提高的方法^[36]。Duba算子是另一类道路单边缘模型检测器,Geling等人^[37]结合SAR图像的统计特性,提出了恒虚警率的乘性Duba算子(图2(b))。对于SAR图像上的暗线边缘,即区域1的灰度值低于区域2和区域3的情况(见图2),通过计算区域间灰度均值比来获取边缘。乘性Duba算子适用于脊边缘提取,而ROA适合于阶跃边缘提取^[38]。

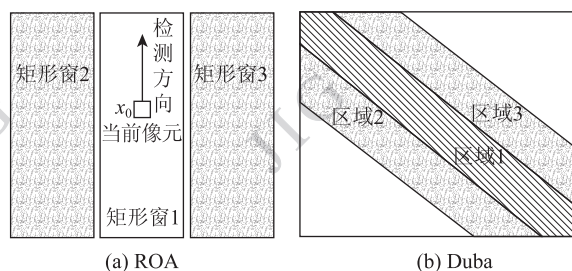


图2 边缘检测算子示意图

Fig. 2 Edge detection methods

2) 多边缘检测算子

基于单边缘模型的检测器在检测时对分析窗作了存在单边缘的限制性假设,而为了保证得到可靠的检测结果,在计算时往往又采用较大的窗口。对于大多数场景类型来说,大窗口内很可能包含多条边缘,这与单边缘的假设是矛盾的。Fjørtoft等人^[39]提出了更为实际的指数加权均值比(ROEWA)多边缘检测算子,该算子不仅具有CFAR特性,且虚假边缘少、抗断裂性能强、计算效率高^[38]。

由于单个边缘检测算子获取的边缘信息有限,边缘检测仍存在虚警率偏高的问题。多个检测算子相融合,利用它们的互补性往往可以获取更多的边缘信息。Tupin等人^[12]根据SAR图像呈现Gamma分布的统计特性,分别采用ROA和交叉相关两个边缘检测算子,并融合其检测结果,来提高道路边缘检测的效果。更多SAR图像边缘检测方法可参见文献^[40]。

2.1.3 线特征提取

边缘检测得到的道路边缘像素点只反映了图像的局部变化,且存在断裂情况,需要进一步处理,提取出线特征,为后续全局连接提供基本线基元。线特征提取的代表性方法有Hough变换^[20,41-43]、Radon^[44-47]变换、相位编组^[48]、高层编组^[49]、模板标记^[2]等。

1) 变换域线特征提取

Hough变换(HT)和Radon变换(RT)巧妙地利用直线与点之间的对偶关系,将线段的提取问题转化为变换域像素点的计数问题,HT一般用于二值图,RT一般用于灰度图。该类方法具有全局性好、抗噪性强的优点,但存在定位不准、计算耗时较长、局部性差、在复杂背景下易造成较短线基元遗漏等系列问题^[41]。为解决这些问题,针对不同应用,出现了多种HT、RT改进型。CWHT(connectivity weighted Hough transform)^[20]减少了变换域扫描空间范围,实现了计算速度的提升,且能够给出线段的端点坐标和实现不同宽度的线特征提取。RHT(rotation Hough transform)^[42]按照一定的步进角度进行旋转,在旋转过程中,搜索水平和垂直方向的线段,并得到其端点。利用粒度计算具有多角度、多层次观察问题的能力,在HT线特征提取过程中引入粒度计算的概念^[43],可实现对不同长短、粗细的直线提取。采用局部RT^[47],按照从上到下、从左到右的顺序搜索连通区域,在当前连通域进行RT,按极值点大小顺序逐个提取完线基元后,再转到下一个连通域,直到所有连通域提取完。该方法可有效克服较短线基元提取遗漏问题,但计算量较大。Zhang等人^[45]设计了一种利用中值滤波提取RT真极值点的方法,可对直线准确定位,且可估计道路的线宽。线特征提取综述性文献参见文献^[50]。

值得关注的是,Beamlet变换^[51]是一种以线为基本单元的多尺度几何分析工具,能克服传统的直线提取算法对噪声敏感、参数难以选择、局部性能差等缺点,可较准确地提取出任意位置、任意方向、任意长度的直线。另外,Beamlet变换采用多分辨率的思想,用直线段来近似表示曲线,效果令人鼓舞。近年来,Beamlet变换已在图像的稀疏表示、3维数据分析等领域取得了应用。令人遗憾的是,至今尚无采用Beamlet变换提取SAR图像线特征的先例。

2) 编组线特征提取

相位编组是根据邻域像素方向一致性扫描标记直线支持区的原理,采用了方向的重叠量化,可有效解决断裂的问题,克服Hough(或Radon)变换耗时长、局部性差的不足。但该类算法全局性和抗噪性较差,线特征提取效果与边缘检测结果密切相关。

针对噪声引起的直线缺损,高层编组通过对初始直线图的分析确定可能扩展的直线区域,之后在原始图像中进行统计证实,得到完整的直线图。具体包括两个步骤:首先根据两条直线共线的特点

(端点距离短、夹角小),搜索扩展区域;然后分析已有直线和候选直线两边灰度均值的关系,进行统计假设检验,筛选得到线特征。

基于模板标记的方法先是采用一定的模板标定每个边缘点,在小范围内将属于同一直线的点标记出来,并得到关于这条直线属性描述的一个结构体;然后采用邻域模板对这些线段做进一步连接。该方法与相位编组有类似之处,特点是理论简单、计算速度快,但抗干扰能力弱。

2.2 高分辨率 SAR 图像局部检测

在高分辨率 SAR 图像中,道路不再表现为线特征,而是具有一定宽度由亮的双边缘包围的较长的暗区域^[14],局部检测内容为暗同态区域或平行双边缘。尽管高分辨率图像的信息更丰富、细节更清晰,但道路旁建筑物的遮挡、道路沿线的树木和绿化带、道路上的车辆等干扰也随之被放大,给高分辨率道路提取带来极大的困难,很难直接从 SAR 图像中提取出道路,通常综合利用道路的辐射、几何等特征,共同检测道路区域。

2.2.1 FCM 区域分割局部检测

为了检测出暗同态区域,模糊 C 均值 (FCM) 聚类^[16,52]是常用的基于辐射特征的高分辨率 SAR 图像道路区域分割方法。肖志强等人^[52]分割出道路类型相对简单的主干道路区域后,就完成了局部检测内容,下一步直接基于道路区域像素点进行全局连接。通常,FCM 道路区域分割断裂较多,且存在空洞等现象,Dell 等人^[16]针对不同宽度和形状的城区 SAR 图像街道,在全局连接之前对 FCM 分割出的道路区域进一步处理。道路区域中心点搜索^[17]是根据道路的辐射特征,在初始输入点的引导下,通过计算圆形窗口区域内的熵纹理值,在垂直于道路方向按照固定步进长度搜索道路的中心点,为后续道路跟踪提供状态信息。平行线对检测是基于几何特征的高分辨率 SAR 图像局部检测方法。朱昌盛等人^[15]先用 ROEWA 检测出道路区域的双边缘,然后提出更切实际的平行线对模型(图 3),不仅可以检测出平行直线,而且可检测出平行曲线。

2.2.2 多特征融合局部检测

由于其他地物干扰等影响,单独检测平行双边缘几何特征或暗灰度区域辐射特征,会产生很高的虚警率。Negri 等人^[4]采用多尺度、多特征相融合的思路,使用圆形模板计算灰度和、对比度、主方向等

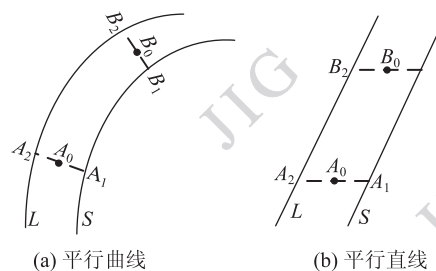


图 3 平行线对模型示意图

Fig. 3 The model of parallel pairs

模板内局部特征值(图 4),按照多特征提取、多特征二值化、多特征融合这 3 个步骤进行局部检测。由于多特征之间的融合互补,该方法降低了检测虚警率,并且多尺度处理可有效检测出不同宽度的城区道路。由于需要遍历每个像素点,且不同尺度下某些像素点需要重复计算,该方法存在运算量大的问题。Lisini 等人^[14]认为在高分辨率 SAR 图像中,传统的线结构特征(直线或曲线)只利用道路区域的部分信息,置信度不高。为了获取更多的信息,提出采用线特征提取和分类分割相融合的道路局部检测方法。由于道路线特征提取和区域分类分割这两个方法之间相互独立,各自利用了道路的结构信息和统计信息,不同信息互补提高了道路局部检测结果的置信度。

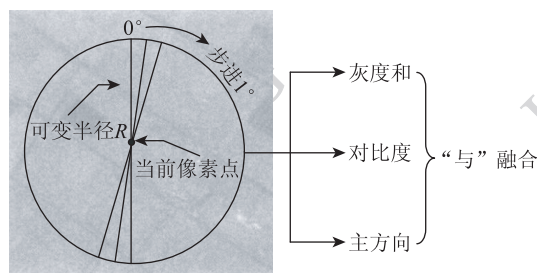


图 4 圆形窗口多尺度特征提取示意图

Fig. 4 Multi-features extraction in a circle window

2.2.3 方向性滤波局部检测

高分辨率 SAR 图像道路不仅具有平行双边缘,而且呈现一定的方向性。方向性滤波^[19]根据城区道路方向性先验知识,先在当前局部窗口内采用模糊 Hough 变换 (FHT) 提取具有一定长度的线特征;然后,计算方向直方图分布;接着,根据直方图中峰值点对应的主方向,设计方向滤波器,增强道路区域的对比度;最后,剔除局部窗口中的非道路区域,减少后续全局连接的计算负担。该方法局部道路区域漏检率较低。

2.3 全局连接

由于阴影、遮挡、交叉口等干扰物的出现,局部检测得到的结果通常不完善。一方面,许多道路点没有被检测到;另一方面,检测到的道路点中存在大量的虚警。因此,需要结合道路的先验知识以及上下文知识,建立道路全局连接模型,进一步对道路点或道路线基元进行组织以形成完整的网络结构。代表性的全局连接方法有:马尔科夫随机场(MRF)模型^[4,12-13,34]、遗传算法(GA)^[30,46,52]、链码优化法^[35]、动态规划法^[2,53]、感知分组^[30]、粒子滤波^[54-55]、主动轮廓模型^[26,56]、均值角度纹理跟踪^[57]等。

2.3.1 MRF 模型全局连接

MRF 模型具有充分利用图像特征的上下文信息以及先验知识的优势,在 SAR 图像处理中得到广泛应用。Tupin 等人^[12]第 1 次提出将 MRF 模型用于 SAR 图像道路网连接。其原理是:将提取出来的线基元(图 5(a))作为 MRF 模型的节点,将共点线基元之间夹角作为节点之间弧长,建立 MRF 模型图(图 5(b)),把道路网全局连接问题抽象为对总势能(包括观测数据模型势能和先验模型势能)的最大后验概率求解问题。针对不同的场景,观测数据模型和先验模型的定义不尽相同。在城区场景中,道路较多,且相互连接交叉的情况也较多,Tupin 等人修改了 1998 年先验模型势函数定义^[12],在 2002 年增加了 3 点共线的情况,使模型更接近道路实际^[13];在乡村 SAR 图像场景中,道路较少,几条道路共点交叉的情况更少,赵青等人^[34]精简了观测数据模型和先验模型势函数定义。在高分辨率 SAR 图像中,Negri 等人^[4]将道路交叉口信息添加进观测数据模型中,取得了较好的连接效果,但增加了计算复杂度。在最大后验概率求解的策略上,常见的有模拟退火^[12]、ICM^[13]、遗传算法^[34]等。道路网全局连接效果与 MRF 模型计算复杂度是一对矛盾。当前,基于 MRF 模型的道路网连接方法存在的主要问题是迭代连接速度偏慢,不能满足实时性要求。

2.3.2 遗传算法全局连接

遗传算法是另一类广泛用于道路全局搜索连接的方法。它是以自然选择和自然遗传机制为基础,通过选择、交叉和变异等操作,经过若干代后达到搜索最优个体的目的。为了减少 GA 迭代求解时间,通常在 GA 线基元组织之前先进行区域生长搜索预连接(图 6(a))。利用遗传算法进行全局最佳道路搜索需解决 3 个问题:定义染色体、设计适应度函数

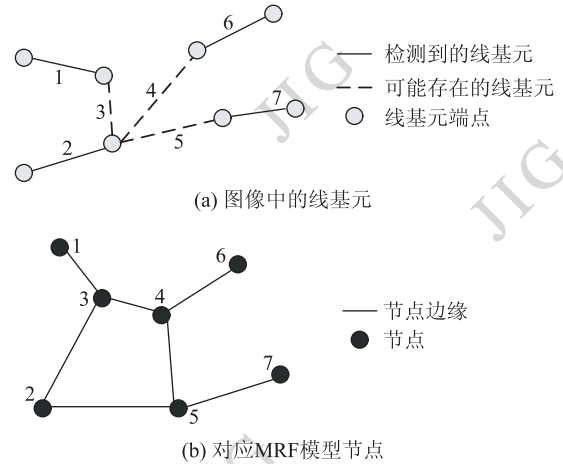


图 5 MRF 模型图

Fig. 5 MRF model graph

以及选择遗传算子。假设搜索区域有 n 个线基元,则染色体长度为 n 。染色体一般采用二进制随机编码的方式^[30]。为了保证种子基元始终被连接,也存在代表种子基元的染色体首基因位固定编码为 1,其余基因位随机编码^[46]的方式。适应度函数按照共线准则进行设计,由邻近性(图 6(b))、共向性(图 6(c))、重叠性(图 6(d))和相对长度这 4 个因素计算加权和得到。针对高分辨率 SAR 图像,肖志强等人^[52]提出了利用 GA 直接连接边缘像素点成道路网的方法。该方法连接效果较好,但参数设置较多,主要有:适应度函数 4 个权值;初始交叉率、初始变异率以及过程变异率;最大迭代次数、最大变异率等。这些参数的选择多依赖经验值,且后期需要用 Snake 模型对遗传迭代结果进一步调整^[46]。因此该类方法的适用性不广。

2.3.3 链码优化全局连接

针对 MRF 模型计算量偏大问题,链码优化法采用分级运算的思路,每次迭代连接时不需考虑所有

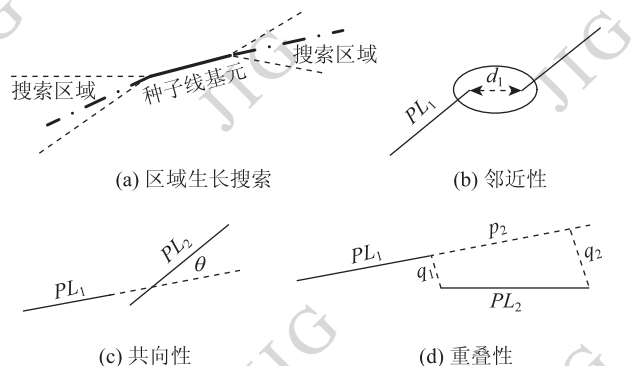


图 6 遗传算法线基元搜索及连接标准示意图

Fig. 6 Line elements searching and linking criterion by GA

线段,与传统 MRF 模型相比,运算量由 n^n 降为 n^2 。链码优化法大致分为 3 个步骤:链码基元组织、链码能量图定义和链码能量图优化。首先,将含有多个交叉的线基元按照连通性规则断开,去掉较短线基元后,对那些只含有两个端点的线基元按一定顺序编号,组成链码基元序列;然后,引入道路先验知识,对每个线基元在一定的扇距和扇角范围内定义扇形邻域平面,将所有可能的线基元进行连接,得到链码能量图;接着,对链码能量图进行优化,由链码线基元自身能量和链码线基元间能量共同组成链码总能量函数;最后,根据链码连接概率呈线性(或近线性)递增的特征,迭代优化链码能量,直到能量最小值时即为最优道路网线基元连接路线。该方法在曲率较大或存在拐角的道路网连接效果差强人意。

2.3.4 动态规划全局连接

动态规划法是传统道路网全局连接方法^[11],其原理是根据道路线基元的辐射^[53]或几何特征^[2],以 2 个确定的道路边缘为起点,按照代价函数最小原则,在一定的扇形范围内搜索道路的下一潜在边缘点,在满足停止条件之前周而复始地实现对道路的跟踪。边缘检测效果对该方法影响很大,对于边缘间的较小断裂,动态规划可通过线特征组织将其连接起来从而消除断裂;但对于边缘间的较大断裂,由于受扇形大小限制,动态规划则无能为力。为了克服断裂的影响,洪日昌等人^[53]提出了回溯的思想,不仅保留代价函数最小时的最优点信息,而且保留次优点信息,当跟踪过程中发现代价函数过大,跟踪偏离原始道路时,则自动退回上一步,采用次优点继续进行跟踪。

2.3.5 感知分组全局连接

感知分组是一种基本的道路网全局连接方法^[19]。应用感知分组进行道路网连接可理解为数据结构间的转换,通常根据连续性、邻近性、共线性等感知因子进行连接。其过程主要为:首先,从线特征某一弧段的一个节点出发,判断其他所有与该节点连接的弧段中哪条应该被连接起来,并将被连接的弧段标识为已利用,依次判断下去,直到该线特征无连接为止;然后,取没有标记的弧段继续建链,直到线特征中所有弧段都被表示成链为止。

一般情况下,上述道路网自动全局连接结果需要后期人工检验和调整。就目前的图像处理及模式识别技术水平,实现全自动连接非常困难。半自动

连接方法能够将机器的快速计算和人的解译技巧进行有效结合,是当前研究的热点。

2.3.6 粒子滤波全局连接

粒子滤波是一种半自动道路网全局连接方法,与光学遥感图像中广泛使用的 Kalman 滤波道路跟踪方法相比,更适合表述 SAR 图像乘性噪声干扰模型下的非线性、非高斯系统。粒子滤波是将图像中的道路线视为粒子点目标运动的轨迹。在输入初始点后,粒子滤波跟踪根据初始状态预测下一状态,到达下一状态后,根据观测值更新预测值。这样周而复始,直到满足停止条件,跟踪过程结束。粒子滤波跟踪一般分为初始化、预测、更新、输出、重采样这 5 个步骤。其中,初始化需要人工输入种子点,产生粒子;预测是根据状态转换方程估计下一状态;更新是根据观测方程更新每个粒子的权值;输出是根据每个粒子的权值求得状态的期望值输出,并计算有效粒子个数;重采样是当有效粒子数小于某个值时,为了避免粒子数匮乏问题,复制权值大的粒子,代替权值小的粒子,保持粒子总数不变。在直线道路模型^[55]下,状态量一般包括道路边缘点坐标、道路方向等值;在曲线道路模型^[54](三阶多项式)下(图 7),状态量除了包括道路边缘点坐标、道路方向,还包括曲线的二阶导数和当前段结点的极坐标角度等值。当前,该类方法存在的问题是:道路全局连接跟踪效果易受初始输入点影响;遇到干扰物不能自动跳过,需要人工引导,人机交互次数偏多。

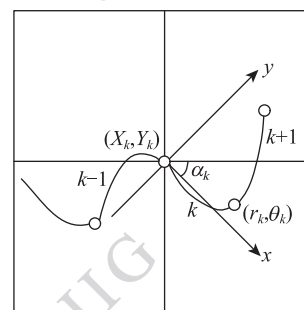


图 7 曲线模型粒子滤波道路跟踪示意图

Fig. 7 Particle filtering tracking based on polyline road model

2.3.7 Snakes 模型全局连接

主动轮廓(Snakes)模型是另一类重要的半自动道路网全局连接方法。其原理是在图像中道路边界附近给出一条初始轮廓曲线,轮廓曲线的能量由内部能量和外部能量两部分组成。最小化能量时产生内力和外力,轮廓曲线在自身的内力和由图像数据

产生的外力共同作用下运动,运动的最终结果是使得轮廓曲线与图像中道路边缘相一致。该方法对曲线道路拟合得较好。但由于每条道路都要给出初始轮廓曲线,人机交互次数过多。

2.3.8 均值角度纹理跟踪全局连接

均值角度纹理 (MATS) 跟踪^[57] 采用矩形模板,围绕当前输入的道路中心点,以一定角度旋转一圈(图 8(a)),计算每个矩形模板内的灰度均值(图 8(b)),并将最小灰度均值矩形模板对应的角度作为道路的方向,以此方向按照一定的步进间距进行跟踪。通过计算判断均值角度纹理图的形状,来决定是否继续跟踪。当其为类圆形时,认为遇到了道路交叉口区域,则停止跟踪,由人工引导下一个跟踪点;

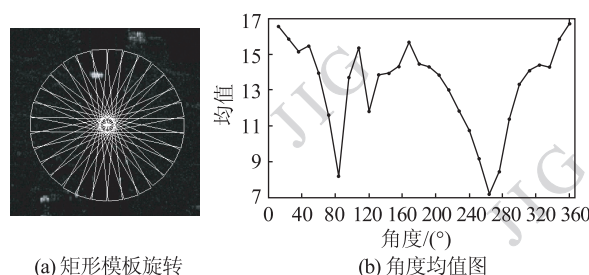


图 8 均值角度纹理计算示意图

Fig. 8 Mean angular texture signature calculation

当其为类“∞”形时,则继续跟踪。该方法可实现对干扰较少、道路较直的简单场景道路中心点进行跟踪,当遇到障碍、道路交叉口区域或道路曲率较大的场景时,则需人工频繁引导。

表 1 SAR 图像道路典型全局连接方法对比

Table 1 Typical global connecting methods comparison in SAR images

| 算法名称 | 机构、作者和提出时间 | 优点 | 缺点 | 应用情况 |
|----------------|--|---|----------------------------------|-------|
| 马尔科夫随机场(MRF) | 法国 ENST 的 Tupin 等人 ^[12] , 1998 | 充分利用图像上下文信息以及先验知识,连接效果较好 | 迭代连接速度偏慢,不能满足实时性要求 | 各种分辨率 |
| 遗传算法(GA) | 韩国 POSTECH 的 Jeon 等人 ^[30] , 2002 | 由于初始分组采用感知因子,迭代过程采用局部区域生长的方式,降低了运算时间 | 参数设置较多,适用性不广 | 各种分辨率 |
| 链码优化 | 中国测绘科学研究院张广伟等人 ^[35] , 2008 | 采用分级运算的思路,每次迭代连接时不需考虑所有线段,运算量由 n^n 降为 n^2 | 在曲率较大或存在拐角的道路网连接效果差强人意 | 中低分辨率 |
| 动态规划 | 美国斯坦福大学 Samadani 等人 ^[11] , 1990 | 算法简单,计算复杂度不高,时间开销较小 | 各种干扰引起的道路边缘点断裂对算法影响较大,抗噪性能差 | 中低分辨率 |
| 粒子滤波 | 清华大学 Deng 等人 ^[54] , 2010 | 结合了道路的局部和全局特性,适合于乘性噪声干扰的非线性非高斯系统跟踪 | 跟踪效果易受初始输入点影响;遇到障碍物不能跳过,人机交互次数偏多 | 中低分辨率 |
| 主动轮廓模型(Snakes) | 加拿大 Sherbooke 大学 Bentalbet 等人 ^[26] , 2003 | 无论是直线还是曲线道路,都能实现精确拟合 | 每条道路都有给出初始轮廓曲线,人机交互次数过多 | 中低分辨率 |
| 均值角度纹理跟踪 | 中国测绘科学研究院 Sun 等人 ^[57] , 2010 | 利用 SAR 图像道路局部区域平均散射特性,能克服小遮挡干扰的影响 | 不适合城区复杂场景跟踪 | 高分辨率 |

3 存在问题及发展趋势

SAR 图像道路提取已取得不少研究成果,但由于实际道路背景环境复杂多变,现有算法在自动化程度、速度、普适性及准确性等方面还有诸多问题有待解决。归纳起来,现有的道路提取方法存在的主要问题及发展趋势是:

1) 针对高分辨率 SAR 图像道路提取开展的研

究较少。随着成像技术的发展,SAR 图像分辨率不断得到提高,应用优于 0.5 m 分辨率的卫星 SAR 图像已成为现实,高分辨率多通道、全极化 SAR 图像得到广泛应用是当前现状和发展趋势。然而,现有算法多数是针对中低分辨率 SAR 图像和高分辨率的光学遥感图像,当前研究现状阻碍了高分辨率 SAR 图像的广泛应用,需要针对高分辨率 SAR 图像出现的新情况,充分利用多极化通道信息之间的冗余互补性,通过多极化通道信息之间的融合^[58]以及

SAR 图像与其他遥感图像之间的融合^[59], 提高道路特征提取的精度, 实现道路网快速、完整、精确地提取必然是 SAR 图像道路网提取今后重点研究内容。

2) 道路提取算法的鲁棒性不强。目前提取算法设置的参数偏多, 依赖于经验值, 且多是针对某一类来源的图像。将其应用到其他异源图像道路提取时, 需人工手动调整大量的参数, 方能有所适应。另外, 提取算法的设计一般针对某一种道路类型。然而, 实际上道路类型(高速公路、城区主干道、次干道、一般街道、乡村道路等)多种多样, 采用一种提取方法显然不能同时满足要求。解决此问题可借鉴光学遥感图像道路提取中采用的人工智能思想, 让算法在不同的图像类型以及不同的路况背景环境下进行在线学习^[60]。另外, 借鉴多尺度、多分辨率分析的思想^[61], 采用合适的尺度对不同宽度的道路进行抽象描述, 并对多分辨率分析结果进行融合处理, 是一项不错的选择。

3) 道路边缘检测及线特征提取虚警率偏高。由于 SAR 图像中存在建筑物、树木、河流等其他地物干扰影响, 现有的边缘检测算子提取出的虚假信息偏多, 将道路边缘淹没在这些信息中; 另外, 线特征提取算子(Hough、Radon 及其改进型等)仍存在多个极值点以及极值点定位不准确等问题。一种可行的思路便是根据高分辨率 SAR 图像道路的平行双边缘性、方向性和灰度等特征, 采用多个特征检测工具, 并将提取出来的特征信息进行融合, 充分利用不同检测工具之间的互补性, 降低边缘检测和线特征提取的虚警率。另外, 从初步研究成果^[62]来看, 虽然道路上的车辆、路旁的建设物以及道路附近裸露的土壤、植被区、阴影等地物干扰造成道路提取的断裂, 但这些上下文知识恰恰证实了道路的存在, 利用道路上下文知识降低提取虚警率具有很大的研究空间。

4) 道路网全局连接的速度不快。由于前级(边缘检测和线特征提取)虚警率偏高, 输入给道路网全局迭代连接的线基元数目过多, 造成迭代过程耗时较长; 此外, 当前常用的自动全局连接算法(MRF、GA)建模时, 最优求解的策略也导致耗时较长, 不能满足实时性的要求。有人工引导的道路种子点跟踪的策略(模板匹配、粒子滤波)不失为当前较好的选择, 但存在的问题是跟踪经常中断, 人机交互次数偏多。因此, 为了提高连接速度, 道路网自动全局连接需要研究一种方案, 减少输入虚假线基元

的数量, 改进最优迭代求解策略; 道路网半自动全局连接需提高种子点跟踪算法的稳健性, 提高自动化程度; 另外, 将外部 GIS 数据作为先验信息, 指导道路局部检测及全局连接^[26], 提高道路网提取的置信度, 值得深入开展研究。

4 结 语

SAR 图像道路网提取在遥感应应用领域具有不可替代的地位。经过 20 多年广泛研究, SAR 图像道路网提取已经取得了很大的进展, 但由于 SAR 图像背景复杂、噪声干扰较大、道路类型繁多, 导致当前仍然很难直接从 SAR 图像中提取道路网。本文对 20 多年 SAR 图像道路网提取方法进行全面系统的梳理, 按照提取流程将其分为局部检测和全局连接两大步骤, 并根据分辨率大小, 将局部检测再次划分为中低分辨率和高分辨率这两种类型, 根据自动化程度不同, 将全局连接分为自动和半自动两类, 对比总结出各种方法的优缺点, 指出当前研究存在的问题以及未来的发展趋势。随着 SAR 图像成像技术的发展、雷达回波电磁散射机理研究的深入、其他遥感图像解译技术的进步以及数学理论的推陈出新, 必将给 SAR 图像道路网提取带来新的研究途径。

参考文献(References)

- [1] Bonnefon R, Dherete P, Desachy J. Geographic information system updating using remote sensing images [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(9): 1073-1083.
- [2] Jia C L, Kuang G Y. Automatic extraction of roads from low resolution SAR images [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(10): 1218-1223. [贾承丽, 匡纲要. SAR 图像自动道路提取[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(10): 1218-1223.]
- [3] Gong P, Li X, Xu B. Interpretation theory and application method development for information extraction from high resolution remotely sensed data [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 1-5. [宫鹏, 黎夏, 徐冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些研究问题 [J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 1-5.]
- [4] Negri M, Gamba P, Lisini G, et al. Junction-aware extraction and regularization of urban road networks in high-resolution SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 217-221.
- [5] Mena J B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(16): 3037-3058.

- [6] Wu L, Hu Y A. A survey of automatic road extraction from remote sensing images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(7) : 912-922. [吴亮, 胡云安. 遥感图像自动道路提取方法综述 [J]. *自动化学报*, 2010, 36(7) : 912-922.]
- [7] Shi W Z, Zhu C Q, Wang Y. Road feature extraction from remotely sensed image: review and prospects [J]. *Acta Geodetica Et Cartographica Sinica*, 2001, 30(3) : 257-262. [史文中, 朱长青, 王昱. 从遥感影像提取道路特征的方法综述与展望 [J]. *测绘学报*, 2001, 30(3) : 257-262.]
- [8] Bajcsy R, Tavakoli M. Computer recognition of roads from satellite pictures [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1976, SMC-6(9) : 623-637.
- [9] Frost V S, Shanmugan K S, Holtzman J C. Edge detection for synthetic aperture radar and other noisy images [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Munich, Germany: IEEE, 1982(2) : 22-43.
- [10] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(6) : 764-773.
- [11] Samadani R, Vesecky J F. Finding curvilinear features in speckled images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4) : 669-673.
- [12] Tupin F, Maître H, Mangin J F, et al. Detection of linear features in SAR images: Application to road network extraction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2) : 434-453.
- [13] Tupin F, Houshmand B, Datcu M. Road detection in dense urban areas using SAR imagery and the usefulness of multiple views [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11) : 2405-2414.
- [14] Lisini G, Tison C, Tupin F, et al. Feature fusion to improve road network extraction in high-resolution SAR images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2) : 217-221.
- [15] Zhu C S, Zhou W, Guan J. Main roads extraction from SAR imagery based on parallel pairs detection [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(10) : 1908-1917. [朱昌盛, 周伟, 关键. 基于平行线对检测的 SAR 图像主干道提取算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(10) : 1908-1917.]
- [16] Dell'Acqua F, Gamba P. Detection of urban structures in SAR images by robust fuzzy clustering algorithms the example of street tracking [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10) : 2287- 2297.
- [17] Cheng J H, Guan Y F, Ku X S, et al. Semi-automatic road centerline extraction in high-resolution SAR images based on circular template matching [C] // *Proceedings of International Conference on Electric Information and Control Engineering*. Wuhan, China: IEEE, 2011 : 1688-1691.
- [18] Gamba P, Savazzi P. Classification of urban environments in SAR images: a fuzzy clustering perspective [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Seattle, WA, USA: IEEE, 1998 : 351-353.
- [19] Gamba P, Dell'Acqua F, Lisini G. Improving urban road extraction in high-resolution images exploiting directional filtering, perceptual grouping, and simple topological concepts [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(3) : 387-391.
- [20] Gamba P, Houshmand B. Three-dimensional road network by fusion of polarimetric and interferometric SAR data [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Hamburg, Germany: IEEE, 1999 : 302-304.
- [21] Lisini G, Gamba P, Luebeck D. Road extraction in urban and rural environments exploiting a dual-band SAR system [C] // *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2011 : 3610-3613.
- [22] Negri M, Gamba P. Feature fusion for road extraction in SAR scenes [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Denver, CO, USA: IEEE, 2006 : 2514-2517.
- [23] Dell'Acqua F, Gamba P, Lisini G. Extraction and fusion of street networks from fine resolution SAR data [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toronto, Ont, Canada: IEEE, 2002 : 89-91.
- [24] Dell'Acqua F, Gamba P, Lisini G. Improvements to urban area characterization using multitemporal and multiangle SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(9) : 1996-2004.
- [25] Dell'Acqua F, Gamba P, Odasso L, et al. Segment-based urban block outlining in high-resolution SAR images [C] // *Proceedings of 2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. Shanghai, China: IEEE, 2009 : 1-6.
- [26] Bentabet L, Jodouin S, Ziou D, et al. Road vectors update using SAR imagery: a snake-based method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(8) : 1785-1803.
- [27] Hedman K, Stilla U, Lisini G, et al. Road network extraction in VHR SAR Images of urban and suburban areas by means of class-aided feature-level fusion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3) : 1294-1296.
- [28] Jiang B. The research on road extraction from SAR imagery [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. [蒋斌. SAR 图像道路提取方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.]
- [29] Jia C L. The research on extraction of roads and airport from SAR imagery [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. [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.]
- [30] Jeon B K, Jang J H, Hong K S. Road detection in spaceborne SAR images using a genetic algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(1) : 22-29.
- [31] Bolon P, Chanussot J, Issa I, et al. Comparison of prefiltering operators for road network extraction in SAR images [C] // *Proceedings of International Conference on Image Processing*. Chambéry, France: IEEE, 1999 : 924-928.
- [32] Hu P G, Zhang M C. Main road extraction from SAR images

- using filter team [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(3): 187-190. [胡平广, 张名成. 滤波器组实现 SAR 图像中主要道路提取 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 187-190.]
- [33] Hu P G, Xue D S. Research on road extraction in SAR image [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(4): 206-210. [胡平广, 薛东升. SAR 图像道路目标提取研究 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(4): 206-210.]
- [34] Zhao Q, Kong F X. Road extraction in SAR image based on MAP-MRF frame [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(10): 2028-2030. [赵青, 孔繁兴. 基于 MAP-MRF 模型的 SAR 图像道路提取 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 2028-2030.]
- [35] Zhang G W, Zhang Y H. Road network extraction of urban areas in SAR image based on optimization of chain code [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 620-625. [张广伟, 张永红. 基于链码优化的 SAR 影像城市道路网络提取 [J]. 遥感学报, 2008, 12(4): 620-625.]
- [36] An C J, Du L L, Wang W H, et al. Linear feature extraction for SAR image based on fused edge detector [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1279-1282. [安成锦, 杜琳琳, 王卫华, 等. 基于融合边缘检测的 SAR 图像线性特征提取算法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1279-1282.]
- [37] Geling G, Ionescu D. An edge detection operator for SAR images [C] // *Proceedings of the Conference on Electrical and Computer Engineering*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 1993: 14-17.
- [38] Kuang G Y, Gao G, Jiang Y M, et al. SAR Target Detection Theory Algorithms and Applications [M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 2007: 289-292. [匡纲要, 高贵, 蒋咏梅, 等. 合成孔径雷达-目标检测理论、算法及应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007: 289-292.]
- [39] Fjortoft R, Lopes A, Marthon P. An optimal multiedge detector for SAR image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 793-802.
- [40] Zhao L J, Jia C L, Kuang G Y. Overview of edge detection in SAR images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(12): 2042-2049. [赵凌君, 贾承丽, 匡纲要. SAR 图像边缘检测方法综述 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2042-2049.]
- [41] Skingley J, Rye A. The Hough transform applied to SAR images for thin line detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 6(3): 61-67.
- [42] Kang C W, Park R H, Lee K H. Extraction of straight line segments using rotation transformation; generalized Hough transformation [J]. *Pattern Recognition*, 1991, 24(7): 633-641.
- [43] Wu Z C, Wan Q T, Liang J, et al. Line detection in remote sensing images using Hough transform based on granular computing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 860-863. [巫兆聪, 万茜婷, 梁静, 等. 粒度 Hough 变换及其在遥感影像直线检测中的应用 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(10): 860-863.]
- [44] Copeland A C, Ravichandran G, Trivedi M M. Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1): 35-45.
- [45] Zhang Q P, Couloigner I. Accurate centerline detection and line width estimation of thick lines using the radon transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 16(2): 310-316.
- [46] Jia C L, Zhao L J, Wu Q C, et al. Automatic extraction of road network from SAR imagery based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(7): 1186-1194. [贾承丽, 赵凌君, 吴其昌, 等. 基于遗传算法的 SAR 图像道路网检测方法 [J]. 计算机学报, 2007, 30(7): 1186-1194.]
- [47] Cardoso L A. Computer aided recognition of man-made structures in aerial photographs [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1999.
- [48] Burns J B, Hanson A R, Riseman E. Extracting straight lines [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(4): 426-466.
- [49] Wang C, Wang R S. Line extraction for SAR image [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(6): 816-820. [王程, 王润生. SAR 图像直线提取 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 816-820.]
- [50] Lindi J Q. A review of techniques for extracting linear features from imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(12): 1383-1392.
- [51] Yang M, Yin Y, Peng Y H, et al. Beamlet transform and multi-scale linear feature extraction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(1): 100-103. [杨明, 尹勇, 彭玉华, 等. Beamlet 变换与多尺度线特征提取 [J]. 电子学报, 2007, 35(1): 100-103.]
- [52] Xiao Z Q, Bao G S. Road extraction in SAR images using genetic algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(1): 93-98. [肖志强, 鲍光淑. 基于 GA 的 SAR 图像中主干道路提取 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(1): 93-98.]
- [53] Hong R C, Wu X Q, Liu Y, et al. Research on roads automatic extraction from low resolution remote sensing image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1): 36-45. [洪日昌, 吴秀清, 刘媛, 等. 低分辨率遥感影像中道路的全自动提取方法研究 [J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 36-45.]
- [54] Deng Q M, Chen Y L, Yang J. Joint detection of roads in multi-frequency SAR images based on a particle filter [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(4): 1069-1077.
- [55] Chen Y L, Gu Y T, Gu J, et al. Particle filter based road detection in SAR image [C] // *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*. Beijing, China: IEEE, 2005: 301-305.
- [56] Matthias B. Geometric refinement of road networks using network snakes and SAR images [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2010: 49-452.

- [57] Sun X F, Li Y C, Lin X G. Semi-automatic extraction of ribbon roads from VHR remotely sensed SAR imagery [C]//Proceedings of Chinese Conference on Pattern Recognition. Chongqing, China: IEEE, 2010:1-4.
- [58] Zhou G Y, Cui Y, Chen Y L, et al. Linear feature detection in polarimetric SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1453-1463.
- [59] Xiao Z Q, Bao G S, Huang J X. Update of road network in GIS by fusing SAR and TM imagery [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(1): 46-51. [肖志强, 鲍光淑, 黄继先. 融合 SAR 和 TM 图像更新 GIS 道路网络数据 [J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 46-51.]
- [60] Zhou J, Cheng L, Bischof W F. Online Learning with novelty detection in human-guided road tracking [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(12): 3967-3977.
- [61] Chen T L, Wang J F, Zhang K Z. A wavelet transform based method for road centerline extraction [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(12): 1423-1431.
- [62] Amberg V, Coulon M, Marthon P, et al. Improvement of road extraction in high resolution SAR data by a context-based approach [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, Korea: IEEE, 2005:490-493.