

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

基于多源高分辨率遥感的路网高效提取技术

臧彧

工作完成日期 2016 年 9 月

报告提交日期 2016 年 11 月

厦门大学

2016 年 11 月

基于高分遥感影像的路网提取技术研究

Road Network Extraction via High Resolution Remote Sensing Image

博士后姓名臧彧

流动站（一级学科）名称信息与通信工程

专业（二级学科）名称信号与信息处理

研究工作起始时间 2014 年 11 月

研究工作期满时间 2016 年 11 月

厦门大学

2016 年 11 月

厦门大学博士后研究工作报告 著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究工作报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究工作报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究工作报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（ ）， 2、不保密（ ）

纸本在年解密后适用本授权书；

电子版在 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

交通路网作为人民日常生活与国家经济发展的动脉,其科学合理的规划与管理,是国家经济快速发展的有力保障与强劲助力。但结合目前我国交通路网规模大结构复杂的现状,存在着一定发展不合理,管理不到位,应急能力不足,道路交通运输能力与潜力得不到充分发挥的问题。高分辨率遥感影像具有观察范围广,更新快速,精度高等显著优势,从高分辨率遥感影像中提取交通路网信息能够满足交通行业管理范围广、观测对象复杂、精度准确、实时性强、应急能力高等要求。

本文围绕高分遥感路网提取中的两方面基本问题——概率模型建立与拓扑重建展开重点研究。首先,结合结构感知理论,建立了路网概率模型,并以该模型为指导,对遥感影像进行平滑与增强;在此基础上,对道路基元提取展开研究,并对路网拓扑进行重建。围绕这两方面核心内容,本文取得了一定成果,具体包括:

(1) 路网区域概率模型建立

根据认知心理学中周期重复的纹理会抑制人类认知、而具有较好方向性的结构则能增强认知水平的结论,建立光谱对比、尺度无关的路网区域概率模型,能够在光谱行为多样的高分遥感影像数据中保持较好的鲁棒性,以适应道路变化多样的特点。

(2) 基于导向滤波的遥感影像平滑与增强

传统遥感影像平滑与增强手段依然仅依靠像素空间信息或光谱信息完成,对特定结构信息关注较少。本文提出基于道路特征导向的平滑与增强手段,不仅能够有效抑制遥感影像中的噪音,也能进一步增强潜在道路区域的特点,为后续路网拓扑的重建及恢复提供良好的信息支撑。

(3) 基于直线支持区的路网提取

针对道路拓扑结构复杂,干扰较多等特点,本文进行直线支持区分析,提取出潜在的道路基元;并探索合理的聚类算法对属性相似的支持区进行合并连接以提取路网片段。道路区域掩模(一个能表示潜在道路区域的二进制掩模)的建立,被用于描述道路网络的拓扑结构,对指导道路提取过程产生明确的约束,从而使检查结果在正确性和质量上都有明显提高。

在多类传感器数据库上的实验结果表明,本文的研究工作能够有效提高道路识别率与正确率,检测结果达到了国际同行水平。

关键词: 结构感知; 遥感影像增强; 路网提取; 路网拓扑重建

Abstract

As the artery of people's daily life and national economic development, scientific and rational traffic network planning and management is a powerful guarantee for the rapid development of national economy. However, with the current situation of large scale traffic network structure in China, there are some irrational development, emergency management is not in place, road transport capacity and potential can not give full play to the problem. High resolution remote sensing image has significant advantages of wide observation range, fast updating and higher accuracy. The traffic road network information extracted from the high resolution remote sensing image can be used to meet the requirements of wide management of traffic industry, complexity of the observation object and so on.

In this paper, we focus on two aspects of high resolution remote sensing road network extraction -- probabilistic road model building and road network topology reconstruction. First, by combining with the structure perception theory, we establish a network probability model. With the help of this model, an adaptive smoothing and enhancement scheme is proposed for input remote sensing images; Based on this, we proposed a road element extraction and network topology reconstruction method for the extraction of the entire road network. Specifically, the contribution of this paper include:

(1) Establishment of probability model of road network

According to the aperiodicity, fine directionality and the anisotropy of the salient structures, we proposed a road region measurement model to describe the probability of the road like structures. Such spectral contrast and scale independent model is able to maintain good robustness in high resolution remote sensing image data, while independent with the spectral behavior of the data.

(2) Task guided image enhancement

The traditional remote sensing image smoothing and enhancement method relies mainly on the information of spatial or spectral, but less attention to the specific structure information. In this thesis, a road feature guided method of smoothing and enhancement is proposed. Such method can not only restrain the noise in the remote sensing image effectively, but also further enhance the characteristics of the potential road area.

(3) Extraction of road network based on line support region

Specific to the characteristics of complex road structure, this thesis analyses the line support region to extract the potential road primitives; Then, we explore a

reasonable clustering algorithm to merge the support areas with similar attributes to extract the road network segment. A road region mask (a binary mask that can represent of potential road area) is established to describe the topological structure of the road network for the complete extraction of the road networks.

Experimental results on multi class sensor databases show that the research work in this thesis can effectively improve the recognition rate and accuracy, and the results can reach the level of international counterparts.

Key words: structure perception; remote sensing image enhancement; road network extraction; road network topology reconstruction

目录

第 1 章绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状及主要挑战	3
1.3 本文研究内容及主要贡献	7
1.3.1 本文的主要研究内容	7
1.3.2 本文的主要贡献	7
1.3.3 本文的组织结构	8
第 2 章结构感知的道路概率模型估计	9
2.1 结构张量	10
2.2 道路概率模型生成	11
2.3 实验结果	13
2.4 本章小结	14
第 3 章任务导向的遥感影像预处理	15
3.1 基于道路结构导向的自适应平滑	15
3.1.1 线积分卷积算法	15
3.1.2 自适应冲击滤波算法	19
3.1.3 实验结果	22
3.2 基于道路结构导向的冲击滤波	24
3.2.1 基于 PDE 冲击滤波	24
3.2.2 一致性冲击滤波	25
3.2.3 各向异性冲击滤波	26
3.2.4 实验结果	28
3.3 本章小结	29
第 4 章基于直线支持区的路网提取与检测	30
4.1 基于 LSD 的路网基元检测	30
4.1.1 图像梯度和水平线	30
4.1.2 直线支持区	31
4.1.3 区域的矩形近似	33
4.1.4 线段的验证	34

4.1.5 LSD 算法总结.....	37
4.1.6 实验结果.....	41
4.2 基元合并与连接.....	42
4.2.1 线段基元的合并.....	42
4.2.2 线段基元的连接.....	42
4.2.3 实验结果.....	44
4.3 基于形态学操作的二值路网生成.....	45
4.3.1 Canny 检测算法.....	46
4.3.2 形态学滤波.....	47
4.4 本章小结.....	51
第 5 章实验结果.....	52
5.1 多源高分辨率遥感影像试验对比.....	52
5.1.1 Geoeye 卫星影像.....	52
5.1.2 QuickBird 卫星影像.....	56
5.1.3 Ikonos 卫星影像.....	59
5.1.4 航拍影像.....	61
5.1.5 实验小结.....	64
5.2 韶山市遥感数据评价.....	65
5.3 与同类相关算法试验对比.....	67
5.3.1 质量评价.....	67
5.3.2 效率评价.....	73
5.4 实验总结.....	74
第 6 章总结与展望.....	75
6.1 本文工作总结.....	75
6.2 未来工作展望.....	76
参考文献.....	77
致谢.....	80
博士生期间发表的学术论文、专著.....	81
博士后期间发表的学术论文、专著.....	82

说 明

博士后研究工作报告的排版以全国博士后管理委员会办公室制定的统一格式为准（参见以上排版范例），研究报告封面统一以彩色羊皮卡纸制作，颜色不限，内页用纸为普通 A4 打印纸，单面或双面打印不限，正文字体为宋体小四。

为更好地保护博士后研究报告的著作权，请各位博士后在博士后研究工作报告中文摘要前加做《厦门大学博士后研究报告著作权使用声明》（具体格式见附件 2），并在该声明中明确保密年限。

出站时，提交 1 份研究报告至厦门大学图书馆，2 份给厦门大学人事处博士后管理办公室（学校定期提交给国家图书馆）

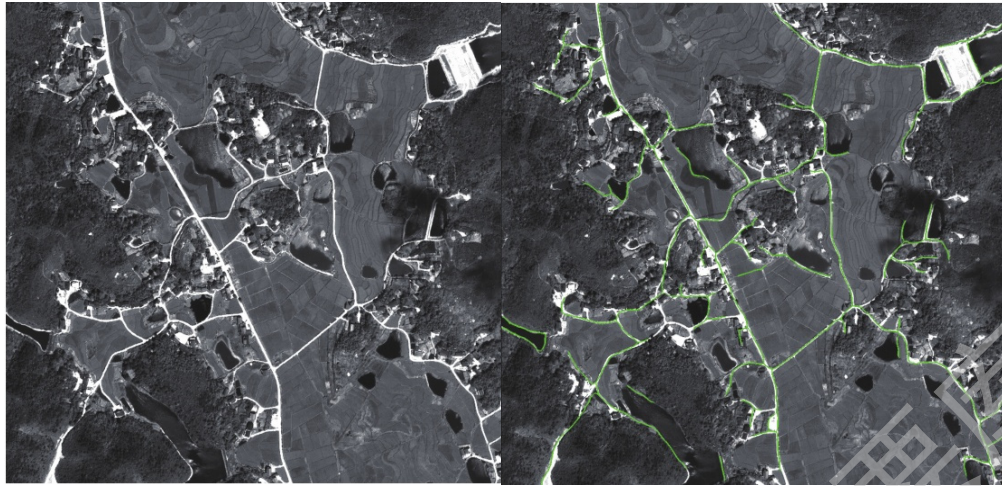
第 1 章绪论

1.1 研究背景

交通路网作为人民日常生活与国家经济发展的动脉，其科学合理的规划与管理，是国家经济快速发展的有力保障与强劲助力。但结合目前我国交通路网规模大结构复杂的现状，存在着一定发展不合理，管理不到位，应急能力不足，道路交通运输能力与潜力得不到充分发挥的问题。根据我国交通运输“十二五”发展规划，到 2015 年末，我国将建成由 450 万公里总路程的公路网、10.8 万公里的高速公路网、390 万公里的农村公路等多等级道路组成的交通路网，然而面对交通运输量的快速增长，在大兴工程建设的同时也对整个综合交通运输体系的规划、建设、管理提出了更高要求。

传统的交通路网数据主要来自人工外业手段，消耗人力资源大，更新速度慢，提取出道路等地物信息精度较低。遥感影像提供了丰富的地物信息，随着其质量尤其是空间分辨率的提高，从遥感影像中提取路网信息将成为重要的数据来源。无论是国家高速公路网、城市路网或是农村路网，都需要采集道路路网信息进入相关业务系统作为辅助决策依据。高分辨率遥感影像具有观察范围广，更新快速，精度高等显著优势，从高分辨率遥感影像中提取交通路网信息能够满足交通行业管理范围广、观测对象复杂、精度准确、实时性强、应急能力高等要求。

基于高分辨率遥感影像的交通路网提取技术的研究作为交通运输行业遥感应用的基础性研究，其提取的交通路网不仅本身是一种基础地理信息，还可为提取其他地物目标提供重要线索和参考价值，更能对国内交通运输行业高分遥感应用起到一定的带动作用。高分辨率遥感技术为新时期的交通运输行业发展提供了新的思维模式和重要的技术支撑，研究、开发和应用该技术是促进交通运输行业信息化的必要手段和途径，将进一步推进行业的信息化和智能化发展。



(a)

(b)

图 1-1 基于遥感影像的路网提取。其中图 (a) 是输入的遥感影像；图 (b) 是道路提取的结果。

1.2 研究现状及主要挑战

利用计算机将道路从遥感影像中提取出来，一直是模式识别、图像处理、遥感应用等领域研究的重点和热点之一。由于交通路网提取的重大意义，世界范围对于这个方向的研究已经持续了 30 多年，国内的中科院、武汉大学、解放军信息工程大学等多家科研院所也在这方面做了近 20 年研究，并取得了一定成绩。道路提取方法与理论也在这三十多年的研究中得到了较大的丰富和发展。

在这 30 多年研究过程中，遥感影像数据经历了从最初的低分辨率、单一影像类型到现在的高分辨率、多种影像类型的变化。利用计算机将道路从遥感影像中提取出来作为遥感应用、图像处理和模式识别领域的难点和人们长期的愿望，汇集了众多研究力量，产生了大量理论和技术方法创新。总的来说这些研究可大致分为两类：基于特征的算法与基于学习的算法。

1) 基于特征的路网提取

基于特征的路网提取算法不依赖任何先验知识，通过定义路网区域的识别规则，采用各种不同的特征描述符对道路区域进行筛选识别。早期的方法多通过直线检测算子提取图像中的类直线区域，进而直线片段进行聚类以进行路网区域提取。Hu 等^[1]提出了一种新的方法，方法核心思想是“桥接”模型(Bridge-link model)。该算法利用多权重算法提取边缘，并根据道路的基本宽度变化很小这一几何特征，连接边缘段对应的像素，进而提取出道路网。这种算法能有效避免道路被遮挡而导致提取不完整的现象。Q. Zhang 等^[2]提出了基于 radon 变换的线性特征检测器。文章主要完成中心线检测和线宽估计。Radon 变换是将线条构成的图像转换成可能的直线参数域。在此参数域中，图像中的直线会给出在相关线性参数位置上的极大值与极小值，从而实现线性检测。基于 Radon 变换的线性检测器比起其他线性检测器对噪声不敏感，因此噪声带来的波动强度在综合的过程中被减少了。Poullis^[3]提出了一个新的方法，首先对输入图像进行地理空间推理和分类。通过 Gabor 滤波器进行本地方向信息提取，接着执行张量投票 (tensor voting)。Gabor 滤波器和张量投票 (tensor voting) 的结合的优点是对硬阈值的需求减少。然后进行图像特征提取和标记。采取了利用图割的基于方向的分割方法。最后进行道路中心线提取和线性化，道路跟踪来提取路网。采用的线性分割方法是道路中心线中迭代霍夫变换的应用。最近的路网提取工作主要通过融合多种视觉特征，对提取的路网基元进行逐层的筛选过滤，从而得到精确的路网信息。Ursalan 等^[4]基于光谱梯度生成路网基元，并通过对这些基元建立图结构表示和形态学操作获取道路网信息。Shao^[5]等提出了一个检测遥感图像脊状或者带状线性特征的快速高效的算法。找到几个最大正交方向窗内像素的灰度值，并将其存储到一个评估窗口。利用的是道路中心线位置的像素灰度值比周围的要更明亮这一特征。Christophe^[6]提出了一种基于波谱角 (Spectral Angle) 和梯度法提取边缘的算法。通过波谱角结合多光谱信息：采取梯度法 (提取直线边缘)，该算法需要用户选

择道路样本像素作为参考像素，先计算各个像素和参考像素的波谱角，得到一幅表示波谱角大小的影像，然后根据梯度法进行边缘检测，提取道路段，再对其进行简化、连接、删减，最后提取道路网。该算法的优点是充分利用了道路的辐度特征，采用波谱角使得算法适用于多波段的影像，速度快，需要参数较少，缺点是需要选择参考像素，并且受到“异物同谱”的影响，提取的道路网不够准确。

滤波法是通过设计某种滤波器，对遥感影像进行滤波处理，从而在影像上提取线特征，进而进行连接等操作，完成道路网的提取。Movaghati^[7]等提出了一个新方法。方法中应用了扩展卡尔曼滤波器（EKF, Extend Kalman filter）滤波器会进行道路跟踪直至满足停止准则。方法中将 EKF 与特殊粒子滤波（PF）结合，来恢复除掉障碍外的道路跟踪。Gamba^[8]提出一种可以自适应道路主方向的改进滤波器，使得道路网提取的完整性和质量都有一定改善，其提出的道路方向滤波器所选择的滤波方向不是由临近像素决定的，而是由更大的一片感兴趣区域的线性特征方向决定的。算法核心：多个定向滤波器（从光学和 SAR 图像中提取线性特征），然后感兴趣分组（利用这些特征来提取道路）。

Shi^[9]等通过直线段提取和匹配策略提取路网信息，为了进一步抑制检测结果中的虚警，他们随后提出了一种多步骤路网中心线提取流程，通过光谱对比信息结合 Geary's C 特征建立道路区域的粗提，进而结合形状滤波和张量投票对所得结果进行精细化处理；Yuan^[10]等基于局部兴奋全局抑制振荡网络（locally excitatory globally inhibitory oscillator networks，简称 LEGION）网络分三步进行路网提取，首先通过 LEGION 对影像中的路网区域进行粗分割，然后提取每一分块中最窄区域的中轴点作为道路锚定点，最后通过 LEGION 网络对每一分块的锚定点进行聚类编组，形成路网信息；Grote^[11]等通过自适应图像分割算法对图像进行过分割，从而形成超像素分割块，并以每个分割块为节点建立图结构，进而通过路网结构的局部几何特征设计能量函数，通过图割算法获得道路网信息。为了获得低虚警的检测结果，这类方法通常需要采用多个步骤、结合多种特征对路网检测结果进行逐层筛选，不可避免的会包含大量需要人工调整的特设性参数，因而这类方法常常无法适应路面类型多变的情况。

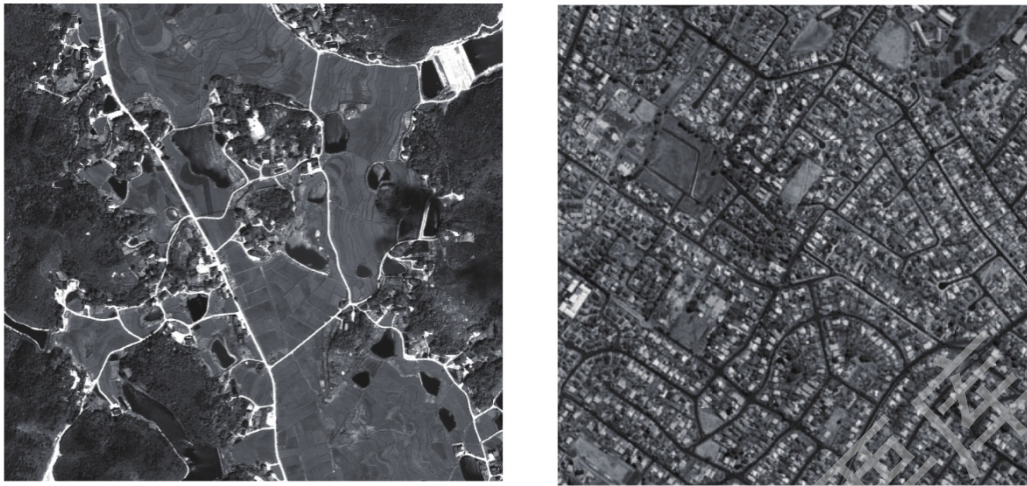
2) 基于学习的路网提取

基于学习的路网提取算法主要通过学习训练样本中的“道路知识”对测试图像中的像素进行二值化标记，进而通过空间一致性后处理对标记结果进行精细化处理。M. Mokhtarzade^[12]等假设道路是细长并且与背景存在显著光谱对比的区域，并依据这一特征建立多种神经网络结构，进而通过优化各网络间的权重配比函数训练神经网络对样本进行预测。支持向量机 SVM（Support Vector Machine）是一种进行复杂分类任务的有效工具，SVM 具有学习速度快、自适应映射能力强等特点，在学习、分类效率、可表达性等方面要优于神经网络。Das^[13]等提出了一种新的方法，主要由两个阶段构成：第一个阶段是处理道路待检测区域，利用道路两种显著特征，这两种显著特征由人眼观测得到：（1）和周围环境光谱的

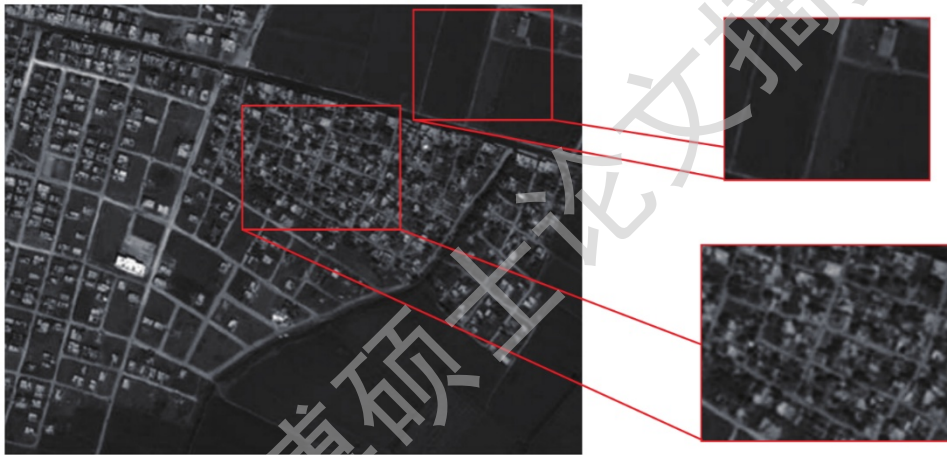
对比。(2) 局部线性轨迹。主要就是通过这两个显著特征提取道路；第二阶段是通过一组适合的后处理模块来提高道路提取系统的性能。我们通过从图像区域中提取的四种不同类别的训练集来训练四种概率支持向量机，能有效减少错误部分。该系统能从高分辨率多光谱图像中有效地提取道路网的主要部分，一些路口和弯曲的道路。Huang^[14]等提出了一种集成多尺度结构和支持向量机的方法从高分辨率图像中提取道路中心线。

Jan D. Wegner^[15]等以超像素单元为基元，基于高阶条件随机场设计不同像素属于路与非路标签的能量方程，并通过经典图割算法进行求解，同时他们通过支持向量机训练了一组融合参数以整合不同分辨率影像中的路网信息以获取完整的提取效果。由于分类、回归等学习方法为浅层结构算法，在样本和计算单元有限的情况下对复杂函数的表示能力有限，针对复杂分类问题其泛化能力受到一定制约。

然而，不论是基于特征的或者基于学习的方法，通常都是基于一个基本假设：道路区域是高光谱对比的低曲率且具有固定宽度的类直线区域，这样的假设适用于路面情况单一，分布规则的路网。由于低等级道路网路面情况复杂，分布多样，缺少固定的视觉描述模型。尽管基于遥感影像的路网提取研究已经进行了 20 多年，但相应的理论技术难以适应复杂背景道路路网的特点。近年来，机器学习领域关于样本分析的相关研究成果，和计算机图形学领域关于结构感知理论的研究为低等级道路网信息的提取提供了新的思路。样本分析理论致力于对训练样本按不同程度的分类，以提高学习系统的泛化处理能力；而结构感知理论则为样本的特征提取与分析提供了重要的视觉处理工具。



(a)(b)



(c)

图 1-2 不同卫星传感器的遥感图像。其中(a)和(b)是不同光谱性能的例子；(c)是一个低对比度的道路地区。

1.3 本文研究内容及主要贡献

1.3.1 本文的主要研究内容

本文通过对计算机图形学及计算机视觉中的相关理论方法研究，基于结构感知理论，结合认知心理学中相关认知结论和道路结构的特点，建立路网区域概率模型；根据该模型研究结构导向的高分影像平滑与增强方法；最后通过对该模型进行结构分析与聚类形成路网片段的理论方法。具体研究内容包括：

(1) 基于结构感知的路网区域概率模型建立

根据认知心理学中周期重复的纹理会抑制人类认知，而具有较好方向性的结构则能增强认知水平的结论，本文基于局部结构张量分析，研究路网结构在方向性、非周期性等方面的度量方法；进而建立与光谱对比、尺度无关的路网区域概率模型，以服务遥感影像的平滑与增强以及道路片段的提取和道路网络的重建。

(2) 路网结构导向的遥感影像平滑与增强

与传统做法多基于高斯滤波或中值滤波的平滑与增强过程不同，本文通过道路区域结构特征导向遥感影像平滑与增强来研究结构导向的平滑与增强技术。具体是研究基于路网结构描述符的滤波模型；建立结构导向的平滑与增强方法，对不同结构特征的区域进行自适应处理，从而使噪音和其他干扰得到充分平滑的同时，类路网结构也能得以保持甚至加强。

(3) 基于直线支持区的路网检测

根据每个像素点及其邻域上下文的局部向性、非周期性等特征信息，研究合理的特征描述符；基于路网区域的概率模型及局部区域特征描述，研究合理的区域生长算法建立局部直线支持区；根据支持区形状，探索合理的聚类算法对属性相似的支持区进行合并、拟合以提取路网片段，并结合路网高置信度路网区域，建立为学习服务的标记样本数据集。

1.3.2 本文的主要贡献

(1) 路网区域概率模型建立

本文根据认知心理学中周期重复的纹理会抑制人类认知、而具有较好方向性的结构则能增强认知水平的结论，建立光谱对比、尺度无关的路网区域概率模型，能够在光谱行为多样的高分遥感影像数据中保持较好的鲁棒性，以适应道路变化多样的特点。

(2) 基于导向滤波的遥感影像平滑与增强

传统遥感影像平滑与增强手段依然仅依靠像素空间信息或光谱信息完成，对特定结构信息关注较少。本文提出基于道路特征导向的平滑与增强手段，不仅能够有效抑制遥感影像中的噪音，也能进一步增强潜在道路区域的特点，为后续路

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库