

遥感影像地物特征识别的频谱能量分析方法探讨

吴桂平¹ 肖鹏峰² 冯学智² 王珂³

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京市北京东路 73 号, 210008)

(2 南京大学地理信息科学系, 南京市汉口路 22 号, 210093)

(3 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京市大屯路甲 20 号, 100101)

摘要:从 Parseval 能量守恒定理和地物特征的图谱识别理论出发,对遥感影像地物特征识别的频谱能量分析方法进行了分析。通过分析不同频谱半径范围内所占的能量比重,初步考察了地物特征频谱能量的分布特点。进而通过对频谱能量环状和楔状采样,定量描述了表征地物粗糙度、周期性及方向性特征的频谱能量分布状况。最后以居民楼地物为例,根据建立的高、低频识别标志,结合在频谱能量上具有方向和频带选择性的匹配 Gabor 滤波器,实现了居民楼地物对象的提取。实验结果表明,此方法可以获取在空间域中无法得到的地物信息表征,为进一步开展地物特征的识别和提取提供了一条新思路。

关键词:傅里叶变换;频谱能量;特征识别;信息提取

中图法分类号:P237.4; TP753

地物识别是对遥感影像中蕴涵的用户感兴趣目标进行分离,并采用计算机方法对相应的特征信息进行提取、分析与表达,研究地物目标的特征是进行遥感信息识别和提取的必要前提^[1-2]。人们经过多年研究,发展了一套根据像元光谱能量的差异进行地物识别的思路与方法,并将其应用于众多领域^[3-4]。然而,随着遥感影像分辨率的提高,地物的结构、形状和纹理等信息更加丰富,仅仅依靠传统的地物识别方法已不能满足当前遥感信息识别的需求^[5]。目前,探讨如何从基于像元的遥感影像分类方法向基于特征的影像识别技术转变,已经成为遥感科学研究的前沿和热点问题^[6-7]。

因此,本文尝试从地物特征的频谱能量角度出发,以二维离散傅立叶变换为手段,将变换之后的频谱能量系数所反映的原始模式特性作为不同地物目标识别的依据。在此基础之上,寻求从基于像元的光谱能量向基于地物特征的频谱能量识别技术转变的途径,从而对图像频谱能量识别的机理与方法作一些初步的探讨与研究,以期指导遥感影像地物目标在频率域中的识别与提取。

1 频谱能量识别的理论基础

1.1 空频 Parseval 能量守恒理论

遥感影像的亮度响应是能量的一种动态表现形式,通常用光强函数 $I = f(x, y)$ 来表示。传统的遥感影像识别理论仅仅描述了能量分布的光谱特性,是一种像元层次上的影像分析方法。根据傅立叶理论^[8],满足一定条件的二维函数可以分解成一系列正/余弦函数的叠加:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (1)$$

式(1)描述了一个大小为 $M \times N$ 的影像从空间域到频率域的傅立叶变换,基于此变换可以将像元光谱能量分布 $|f(x, y)|^2$ 变换为对应的频谱能量分布 $|F(u, v)|^2$,使不同频率 (u, v) 的成分在频谱图中反映出来^[9-10]。因此,地物不单单存在于以像元亮度值为特征的电磁波谱之中,还存在于以频谱能量值为特征的空间频率谱之中。

同时,根据 Parseval 定理可以发现,特定基元内的像元光谱能量与空间频率谱能量在数值上

收稿日期:2013-10-17。

项目来源:江苏省自然科学基金资助项目(BK20131056);中国科学院南京地理与湖泊研究所人才启动资助项目(NIGLAS2011QD15)。

恰恰存在着相等的关系:

$$\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |f(x,y)|^2 = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |F(u,v)|^2 \tag{2}$$

该定理的理论意义表现为:任何一个图像信号都可以看作是不同的像元(空域)或谐波(频域)上的能量叠置,从空域叠置或从频域叠置都可以组成原来的信号,并且能量是保持守恒的。已有研究表明,频谱能量对应的频率值与地物的诸多视觉特征存在着密切的联系^[11-13]。因此,除了从能量分布的光谱特性考虑以外,还可以从能量分布的频谱特性入手,对反映地物特征的空间频率规律加以研究,达到识别和解译地物的目的。

1.2 地物特征的图谱识别理论

20世纪90年代,由陈述彭院士提出的“地学信息图谱”理论,对于推动地球科学的发展产生了深远的影响^[14]。实际上,将遥感影像从空间域转变到频率域后,不同频率(u, v)上的频谱能量构成也是一种特殊的图谱,且该图谱与“地学信息图谱”在数学层面上的本质内容是一致的,都是按照指定规则构建的空间完整结构。“图”是被狭义地定义为具有清晰空间信息分布特征的遥感影像。“谱”是根据“图”在频率域中的特征建立起来的,即以频率域中不同频谱能量系数的组合形成“谱系”(见图1)。其核心思想可以概括为两个方面:①抽象:用抽象化的频谱能量系数去表达空域中复杂的地物特征信息。②综合:用不同频率(u, v)上能量系数的综合所得到的“谱系”去解译和识别遥感影像的地物目标。

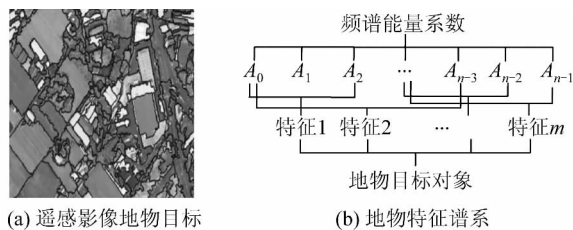


图1 遥感影像地物特征图谱构建

Fig. 1 Construction of Feature Informatic Tupu for Remote Sensing Image

综上所述,在以上两个理论条件的支撑下,实现遥感影像从“基于像元”向“基于特征”识别的过渡成为可能。

2 频谱能量的信息表征

图2(a)和2(b)分别显示了一幅全色波段的

QuickBird 影像及其傅立叶变换的频域能量谱图。可以看出,傅立叶变换后的能量大部分聚集在低频频谱能量系数上,并且随着频率增加,频谱能量减小得很快^[15]。以频谱中心为圆心、 R 为半径作一系列同心圆,用不同半径大小的圆内所包含的频谱能量系数进行重构,可以发现,位于频谱中心附近的低频能量系数对地物主体轮廓特征的重构起着重要的作用,随着频谱半径的逐渐增大,高频能量系数逐渐被纳入,影像的边缘细部特征也越来越明显(见图2(c)~2(f))。

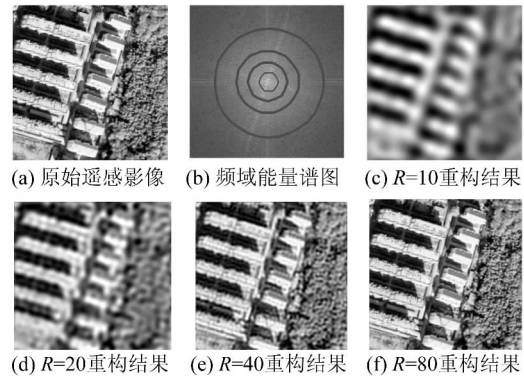


图2 频谱能量的分布及其重构效果

Fig. 2 Spectrum Energy Distribution in Different Radius and Their Reconstruction Results

上述分析仅仅描述了频谱能量空域表征的概况,为了找到表征对应特征信息的能量系数在频谱图中具体的位置和方向,本文借鉴由 Connors & Harlow(1980)提出的环状采样与楔状采样的方法,求出一定环形区域内和一定扇形区域内各次谐波能量的总和(图3)。

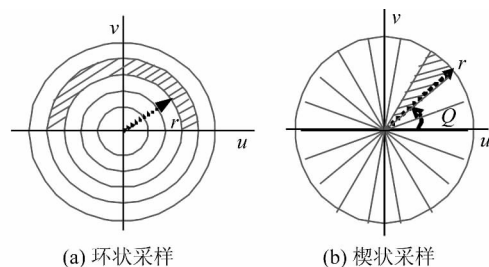


图3 能量谱的环状采样与楔状采样

Fig. 3 Ring-Shaped Sample and Wedge-Shaped Sample for Frequency Spectrum Energy

1) 地物特征的周期性表征。如图4所示,图4(a)、4(d)分别为 QuickBird 影像上截取的大小为128像元×128像元的居民楼和厂房影像。图4(b)、4(c)分别为对每种地物的能量谱图以图3(a)的采样方式进行采样,得到的对应环向频谱能量随频谱半径的分布情况。除直流中心以外,如果有一波峰特别突出,则表示空域地物特征具

有以该波峰频率为主频率的周期性成分存在。从图4(b)中可以发现,居民楼的环状能量采样曲线在谐波次数为 5 左右有一个明显的峰值,说明该影像上表征居民楼地物的频率具有以此频率为主频率的周期性。

2) 地物特征的方向性表征。图 4(c)、4(f)分别为对每种地物的能量谱图以图 3(b)的采样方式进行采样,得到的对应楔向频谱能量随方向的变化曲线。若地物特征具有角度 θ 的方向性存在,则其楔状分布曲线在 $\theta + \pi/2$ 上具有较大的峰值。根据图 4,居民楼的楔向能量曲线在 150° 附近的的方向上具有突出的能量集中,说明该地物具有在 60° 上的主方向,而厂房约在 60° 和 150° 两个方向上出现峰值,说明空域影像中的厂房也具有这两个角度上的特征主方向。

由此可见,对遥感影像的频谱能量进行分析,可以获取在单纯空间域中无法得到的地物信息表征,这为进一步开展地物特征的识别和提取提供了一条有效的新途径。由于每种地物均可以按照其结构、形状、大小和方向等特征,在频域能量谱图中占据一定的位置,因此,只要能够获取其对应地物特征的中心频率值,识别和提取的问题便迎刃而解。

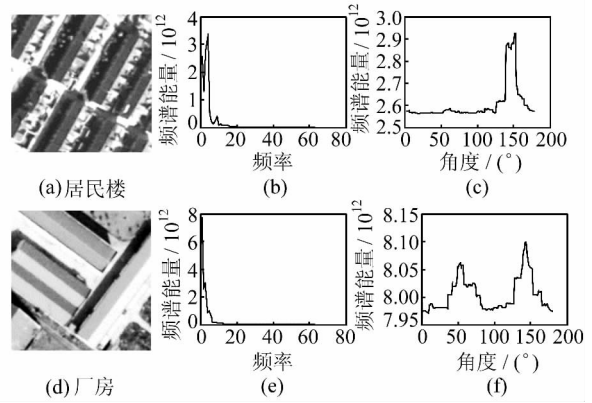


图 4 居民楼与厂房地物特征的频谱能量分布状况
Fig. 4 Spectrum Energy Distribution of Residential Buildings and Factory Buildings

3 实例与结果分析

本文以居民楼地物为例,选取了 2004-11-21 获取的江苏省南京市浦口区的一块 QuickBird 全色影像(732 像元 \times 732 像元)进行实验(见图 5(a))。

识别过程主要借助于居民楼的主体轮廓特征与局部边缘细节特征来实现。

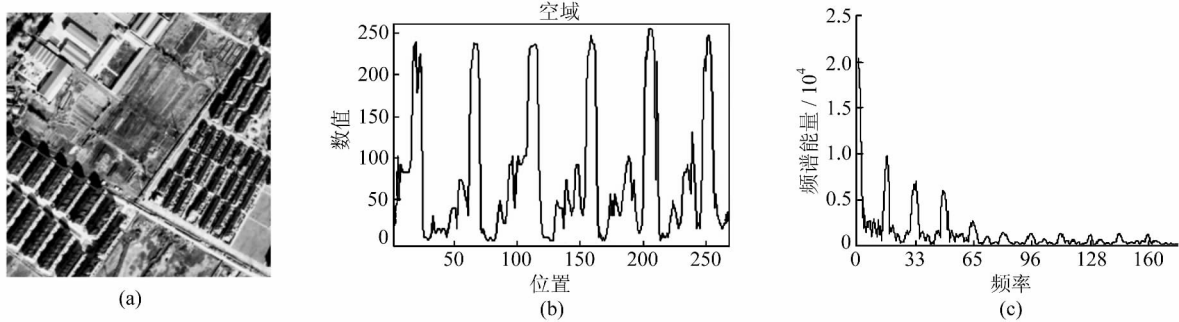


图 5 居民楼幢向剖面亮度响应曲线的频谱能量分布
Fig. 5 Energy Spectrum of Brightness Response Curve for Buildings Column Direction

1) 主体轮廓特征。首先,利用频谱能量环状采样,得到大致的低阶频谱能量所处位置;然后,沿居民楼幢向方向上横切一剖面线,得到表征其地物特征差异的亮度响应(图 5(b))。对该亮度响应进行傅立叶变换,得到其一维信号的能量谱(图 5(c))。把不同频率的谐波振动按照其能量贡献的大小进行分解,将能量贡献占绝对优势的频率成分视为中心频率值。同样,通过绘制若干与之平行的剖面线,以近似扩展为二维分析,最终对比分析得到表征其主体轮廓特征的中心频率。

2) 局部边缘细节特征。由于传统的傅立叶变换是一种全局变换,获得的是信号的整体频谱

能量分布,无法获得信号的瞬态频率是如何随空间发生变化的。本文考虑对亮度响应序列利用小波窗口变换方法来获取其对应的中心频率值。此方法对信号中存在的奇异成分十分敏感,可以有效地提取波动信号中局部微弱的细节频率成分。鉴于文章篇幅的限制,本文将不对上述方法进行扩展介绍。

通过分析和计算,最终获得表征实验区居民楼主体轮廓特征和局部边缘细节特征的中心频率值,如表 1 所示。根据该中心频率识别标志以及居民楼频谱能量楔状采样的峰值,通过设计在频谱能量上具有方向和频带选择性的匹配 Gabor

滤波器,便可以实现实验区居民楼地物的提取,其结果如图6所示。

表1 实验区居民楼地物特征中心频率

Tab. 1 Center Frequency of Residential Buildings' Feature in Experimental Area

地物特征	谐波次数	归一化频率
主体色调轮廓特征	17	0.023
局部边缘细节特征	幢向	0.093, 0.153, 0.197, 0.260, 0.328
	列向	0.056, 0.077, 0.113, 0.146, 0.172, 0.212

从图6中可以看出,主体轮廓特征(低频)和局部边缘细节特征(高频)是反映居民楼目标对象两种不同视觉模式的特征信息。主体轮廓特征反映了居民楼目标对象内部区域的一致性,根据不同地物滤波响应的差异,可以大体上确定目标对象的属性及其位置信息。局部边缘细节特征则反映了居民楼边缘上的细微结构差异,在一定程度上控制了目标对象的精确位置和几何形状特征信息。因此,将这两部分特征信息进行叠置,一方面可以实现居民楼目标的完整信息提取,另一方面,其叠置结果更加符合地物特征的对象层次,便于后续的影像分析和理解。图7分别显示了实验区居民楼地物目标的参考图像、正确提取图像、遗漏提取图像以及冗余提取图像。从遗漏提取图像的像元数量分布情况可以看出,由于居民楼阴影的影响,其列向方向上的边缘出现了遗漏提取的现象,同时,其左下角存在着两座完全遗漏的居民楼,究其原因主要是由于这两座居民楼与周围的道路或农田的主体色调相似,其滤波的能量响应较弱所致。在冗余提取的图像上,由于图像左上角的厂房与居民楼的方向和空间频率一致,从而出现了主要的误提现象。将提取结果与实验区居民楼地物的参考图进行逐像元分析和比较,计算得到提取的准确率、漏提率和误提率分别为86.69%、13.93%和12.23%,该精度在一定程度上可以满足遥感影像地物目标识别和提取的要求,同时也证明了本文所探讨的地物特征频谱能量识别理论及方法是切实可行的。

4 结语

本文以Parseval能量守恒定理和地物特征的图谱识别理论为依据,结合频谱能量分析的相关技术手段,初步探讨了遥感影像从“基于像元识别”向“基于特征识别”转变的途径及其相关理论与方法。研究表明,基于傅立叶变换的频谱能量分析方法为遥感影像地物识别提供了一套全新的思路。在这种思路的指引下,综合考虑地物对象的空间频率特征,可以实现比像元属性认知更高一个层次的影像理解的过程,对于地物特征

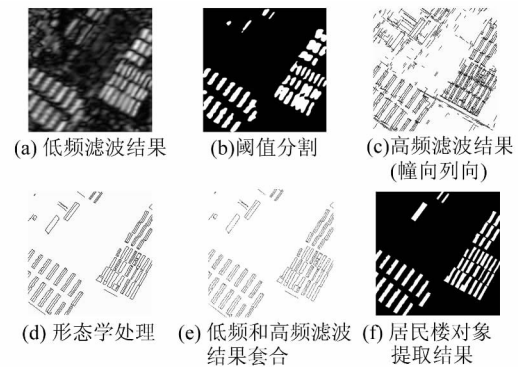


图6 居民楼地物对象提取

Fig. 6 Extracting Results of Building Objects Within Experimental Area

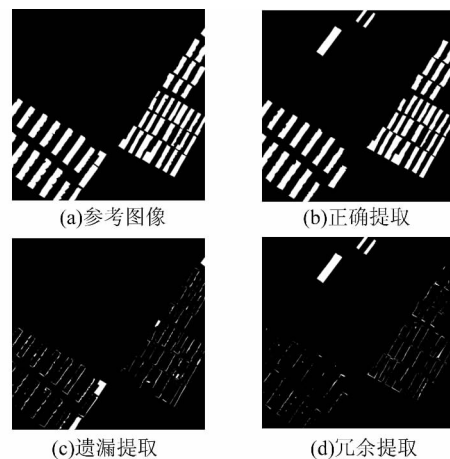


图7 居民楼提取结果定量评价分析

Fig. 7 Quantitative Evaluation for Extracted Results

识别内在机理的发掘具有一定的理论价值。但是,本文所探讨的空间特征主要包括地物的主体轮廓和边缘细节特征,如何通过频谱能量分析的手段,进一步地探寻诸如形状、大小、空间几何和方位等视觉特征的频域表达方法,从而实现遥感影像上不同地物目标的真正识别和理解,是值得进一步深入研究的内容。同时,本文的研究思路和方法,目前还处于探索阶段,其遥感影像空间分辨率大小与地物对象之间的关系决定了该方法的有效性。如何突破单一要素的研究,实现遥感影像更加程序化、作业化的处理模式,也是一个有待进一步研究和解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 雷小奇, 王卫星, 赖均. 一种基于形状特征进行高分辨率遥感影像道路提取方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 457-465
- [2] 程旗承, 马廷. 高分辨率卫星影像上地物线性特征的自动识别[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 26-30
- [3] 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [4] Strahler A H. The Use of Prior Probabilities in Maximum Likelihood Classification of Remotely Sensed Data[J]. Remote Sensing of Environment, 1980, 10: 135-163
- [5] 万幼川, 黄俊. 几何和图论特征对高分辨率遥感影像土地利用分类的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(7): 794-798
- [6] 宫鹏, 黎夏. 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
- [7] 陈云浩, 冯通, 史培军, 等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(4): 316-320
- [8] Jain A. Fundamentals of Digital Image Processing [M]. New York: Prentice Hall, 1989
- [9] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing Second Edition[M]. New York: Prentice Hall, 2002
- [10] Ballard D, Brown C. Computer Vision [M]. New York: Prentice Hall, 1982
- [11] 夔中羽. 地物频谱学研究始步: 地表物体纹理结构信息成像机理[J]. 影像技术, 1998(1): 1-11
- [12] 吴桂平, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 一种基于频谱段能量的高分辨率遥感图像边缘特征检测方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 587-591
- [13] 周立国, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 一种频域高分辨率遥感图像线状特征检测方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(3): 312-317
- [14] 陈述彭. 地学信息图谱探索研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2001
- [15] 吴桂平, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 利用频谱能量进行高分辨率遥感图像地物识别[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(11): 1 294-1 297

第一作者简介: 吴桂平, 博士, 助理研究员, 主要从事遥感图像处理方面的研究。

E-mail: gpwu@niglas. ac. cn

Applying Frequency Spectrum Energy Analysis Theory and Method to Recognize Objects for Remote Sensing Image

WU Guiping¹ XIAO Pengfeng² FENG Xuezhi² WANG Ke³

(1 Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, 73 East Beijing Road, Nanjing 210008, China)

(2 Department of Geographical Information Sciences, Nanjing University, 22 Hankou Road, Nanjing 210093, China)

(3 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, A20 Datun Road, Beijing 100101, China)

Abstract: Relying on the Parseval energy conservation theorem and ‘Theory of Tupu’, the feasibility of object recognition methods based on ‘pixel-based spectral energy’ to ‘feature-based spectrum energy’ was demonstrated. A preliminary investigation of the percentage of spectral energy contained by circles of different radius taking total energy, and the spectral energy distribution was undertaken. Meanwhile, a quantitative analysis of coarse-grained level, cyclical, and directional information was studied using wedge-shaped and ring-shaped energy spectrum sampling methods. Finally, based on low-frequency and high-frequency recognition marks, residential buildings were taken as an a test-case to assess this theory and method. Building objects were extracted with matched Gabor filters having direction and frequency selectivity. The results indicate that this method provides a new and effective idea means further identify and extract information from high resolution imagery.

Key words: Fourier transform; frequency spectrum energy; feature recognition; information extraction

About the first author: WU Guiping, Ph D, assistant researcher, majors in remote sensing image processing.

E-mail: gpwu@niglas. ac. cn