



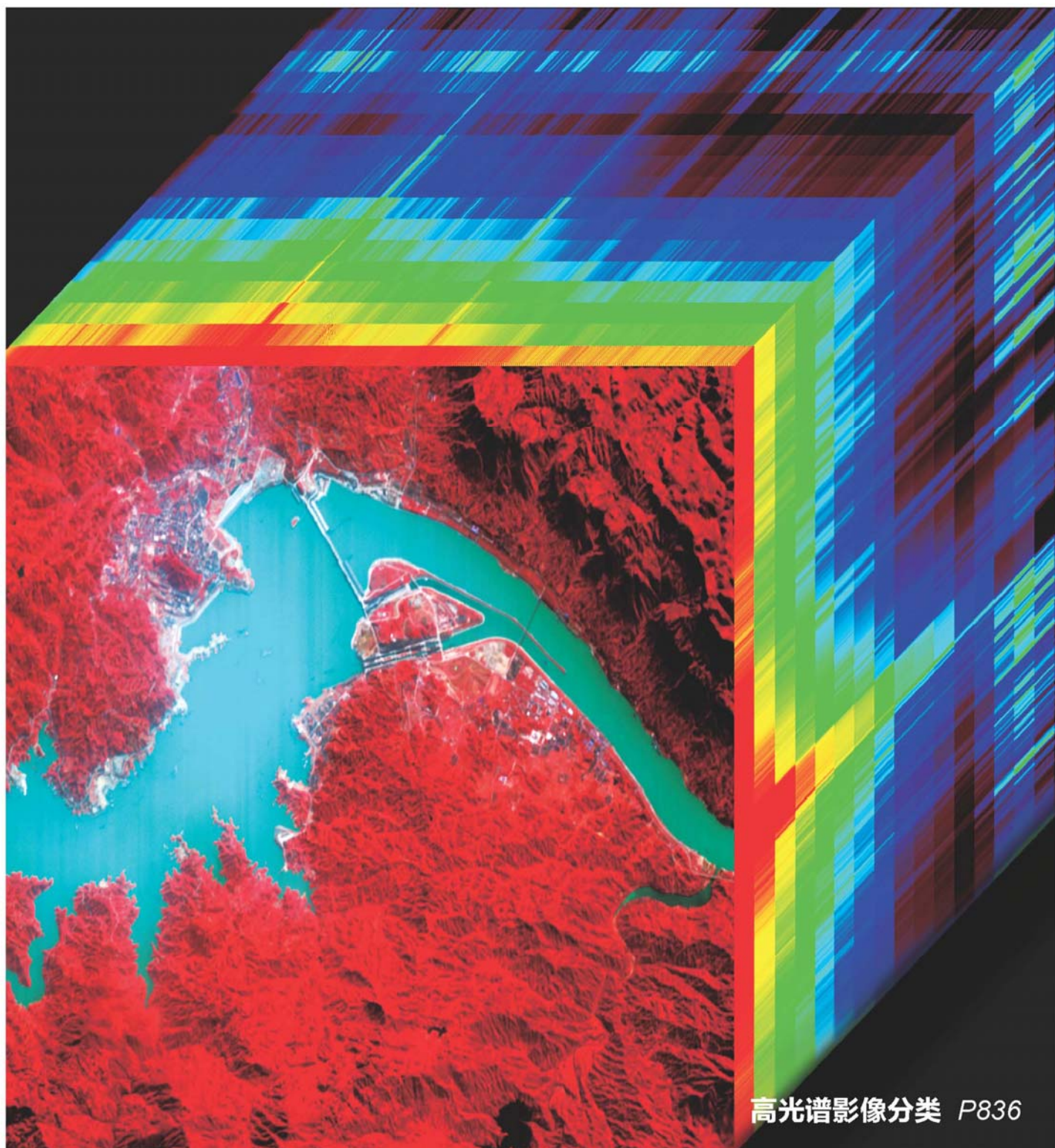
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

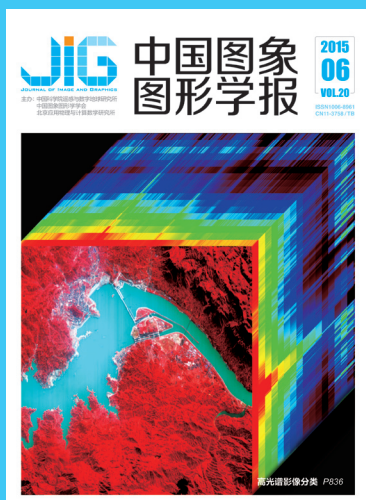
中国图象图形学报

2015
06
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



高光谱影像分类 P836



第20卷第6期（总第230期）

2015年6月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

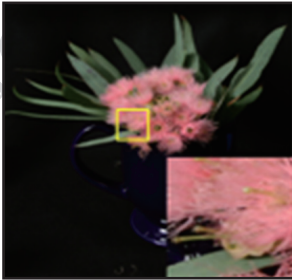
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

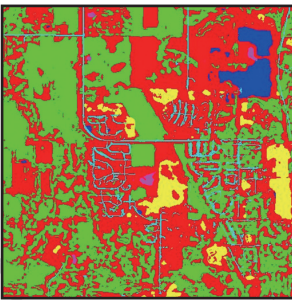
国内定价 50.00元



边缘结构保持的加权BDTV
全光场图像超分辨率重建
(第0733页)



基于超像素的多主体图像交
互分割(第0764页)



谐波分析光谱角制图高光谱
影像分类(第0836页)

图像处理和编码

边缘结构保持的加权BDTV全光场图像超分辨率重建

张旭东, 李梦娜, 张骏, 胡良梅, 王一 0733

基于Arnold映射的分块双层自适应扩散图像加密算法

徐亚, 张绍武 0740

结合梯度信息的特征相似性图像质量评估

苗莹, 易三莉, 贺建峰, 邵党国 0749

图像分析和识别

复杂场景下自适应背景减除算法

邵奇可, 周宇, 李路, 陈庆章 0756

基于超像素的多主体图像交互分割

伯彭波, 袁野, 王宽全 0764

采用金字塔纹理和边缘特征的图像烟雾检测

李红娣, 袁非牛 0772

结合手指检测和HOG特征的分层静态手势识别

刘淑萍, 刘羽, 於俊, 汪增福 0781

形状角计算改进及其在矩形目标识别中的应用

孟伟荣, 李辉, 方黎勇, 白金平 0789

融合图像感知哈希技术的运动目标跟踪

李子印, 朱明凌, 陈柱 0795

利用快速傅里叶变换的目标尺度自适应回归跟踪

张浪, 侯志强, 余旺盛, 许婉君 0805

基于点云属性信息的平面标靶特征提取

刘燕萍, 贾东峰 0815

融合局部思想和协作表达的鲁棒分类

楼宋江, 赵小明, 于海涛, 张石清 0822

计算机图形学

草绘3维人体建模的模板形变方法

李毅, 刘兴川, 孙亭 0828

遥感图像处理

谐波分析光谱角制图高光谱影像分类

杨可明, 刘飞, 孙阳阳, 魏华锋, 史钢强 0836

倾斜航空影像的城区DSM生成

吴军, 程门门, 姚泽鑫, 彭智勇, 李俊, 马峻 0845

封面图片由中国科学院遥感与数字地球研究所高光谱遥感应用技术研究室张霞研究员提供

CONTENTS

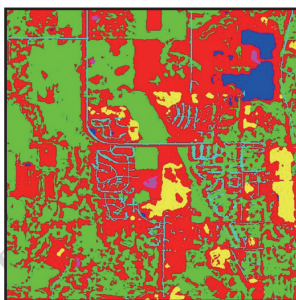
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Edge preserved light field image super-resolution based on weighted BDTV model (P0733)



Interactive multiphase image segmentation based on superpixels (P0764)



Classification algorithm of hyperspectral imagery by harmonic analysis and spectral angle mapping (P0836)

Image Processing and Coding

Edge preserved light field image super-resolution method based on weighted BDTV model

Zhang Xudong, Li Mengna, Zhang Jun, Hu Liangmei, Wang Yi 0733

Encryption algorithm of image blocking and double adaptive diffusion with Arnold mapping

Xu Ya, Zhang Shaowu 0740

Image quality assessment of feature similarity combined with gradient information

Miao Ying, Yi Sanli, He Jianfeng, Shao Dangguo 0749

Image Analysis and Recognition

Adaptive background subtraction approach of Gaussian mixture model

Shao Qike, Zhou Yu, Li Lu, Chen Qingzhang 0756

Interactive multiphase image segmentation based on superpixels

Bo Pengbo, Yuan Ye, Wang Kuanquan 0764

Image based smoke detection using pyramid texture and edge features

Li Hongdi, Yuan Feiniu 0772

Hierarchical static hand gesture recognition by combining finger detection and HOG features

Liu Shuping, Liu Yu, Yu Jun, Wang Zengfu 0781

Improved shape angle computation and its application in detection of rectangular

Meng Weirong, Li Hui, Fang Liyong, Bai Jinping 0789

Object tracking algorithm based on perception hash technology

Li Ziyin, Zhu Mingling, Chen Zhu 0795

Scale adaptive regression tracking method based on fast Fourier transform

Zhang Lang, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng, Xu Wanjuan 0805

Feature extraction of flat target based on point cloud attribute information

Liu Yanping, Jia Dongfeng 0815

Locality constrained collaborative representation classification for robust classification

Lou Songjiang, Zhao Xiaoming, Yu Haitao, Zhang Shiqing 0822

Computer Graphics

Sketch-based method for 3D human modeling using template deformation

Li Yi, Liu Xingchuan, Sun Ting 0828

Remote Sensing Image Processing

Classification algorithm of hyperspectral imagery by harmonic analysis and spectral angle mapping

Yang Keming, Liu Fei, Sun Yangyang, Wei Huafeng, Shi Gangqiang 0836

Automatic generation of high-quality urban DSM with airborne oblique images

Wu Jun, Cheng Menmen, Yao Zexin, Peng Zhiyong, Li Jun, Ma Jun 0845

中图法分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)06-0836-09

论文引用格式: Yang K M, Liu F, Sun Y Y, Wei H F, Shi G Q. Classification algorithm of hyperspectral imagery by harmonic analysis and spectral angle mapping[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(6): 0836-0844. [杨可明, 刘飞, 孙阳阳, 魏华锋, 史钢强. 谐波分析光谱角制图高光谱影像分类[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(6): 0836-0844.] [DOI:10.11834/jig.20150614]

谐波分析光谱角制图高光谱影像分类

杨可明, 刘飞, 孙阳阳, 魏华锋, 史钢强

中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要: 目的 针对光谱角制图(SAM)分类算法对高光谱像元光谱曲线的局部特征和其辐射强度不敏感, 而且易受噪声和维数灾难影响, 致使分类效率低和精度较差等缺陷, 将谐波分析(HA)技术引入到SAM高光谱影像分类中, 提出一种基于谐波分析的光谱角制图(HA-SAM)高光谱影像分类算法。方法 利用HA技术将高光谱影像从光谱维变换到能量谱特征维空间, 并提取低次谐波分量及特征系数(谐波余项、相位和振幅), 用特征系数组成的向量代替光谱向量, 对高光谱影像进行SAM分类。结果 将SAM和HA-SAM同时应用于EO-1卫星的Hyperion高光谱影像分类, 通过对比和分析, 验证了HA-SAM的优越性, 再选择AVIRIS(airborne visible infrared imaging spectrometer)高光谱影像对HA-SAM进行验证, 结果表明该算法具有较强的普适性。结论 HA-SAM提高了传统SAM高光谱影像分类的效率和精度, 而且适用性较强具有良好的应用前景。

关键词: 高光谱遥感; 高光谱影像分类; 光谱角制图; 谐波分析; 能量谱

Classification algorithm of hyperspectral imagery by harmonic analysis and spectral angle mapping

Yang Keming, Liu Fei, Sun Yangyang, Wei Huafeng, Shi Gangqiang

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract: **Objective** The algorithm for spectral angle mapping classification is insensitive to the local characteristics of the spectral curves of hyperspectral image pixels, as well as to its radiation intensity. This algorithm is easily affected by noise and dimension disasters as well, thus lowering classification efficiency and precision. This study presents a model based on harmonic analysis and spectral angle mapping (HA-SAM) to classify hyperspectral imagery. **Method** HA technology was used to convert hyperspectral imagery from the spectral dimension to the feature dimension of the energy spectrum. The low-order harmonic component and its characteristic coefficients (harmonic remainder, phase, and amplitude) are extracted, and the spectral vector is replaced with the energy spectrum feature vector to classify hyperspectral imagery with SAM. **Result** SAM and HA-SAM are applied in EO-1 Hyperion hyperspectral image classification. The superiority of HA-SAM is verified through contrasts and analysis. This model also exhibits strong universal applicability on the basis of AVIRIS (airborne visible infrared imaging spectrometer) hyperspectral images. **Conclusion** HA-SAM not only improves the efficiency and precision of traditional hyperspectral image classification through SAM but also displays strong applicability and application prospects.

Key words: hyperspectral remote sensing; hyperspectral imagery classification; spectral angle mapping; harmonic analysis; energy spectrum

收稿日期: 2014-12-16; 修回日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271436)

第一作者简介: 杨可明, (1969—) 男, 教授, 2006年于中国矿业大学(北京)获摄影测量与遥感专业工学博士学位, 主要从事高光谱遥感及应用研究。E-mail: ykm69@163.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (41271436)

0 引言

高光谱影像因光谱信息丰富、“图谱合一”等特点而被广泛应用于地物类型判别、矿产资源探测、环境气候监测、军事侦查以及农作物普查等领域^[1-2],但其较低空间分辨率所造成的大量混合像元光谱也给准确识别地物目标与精确分类等带来困难。根据高光谱影像的数据表示形式和统计特性,其传统的分类算法可分为两大类:一是基于统计理论分类,有平行六面体(Parallelepiped)、马氏距离(MD)和最大似然(ML)等;二是基于光谱测度分类,包括光谱角制图(SAM)、光谱信息散度(SID)与支持向量机(SVM)等。目前,基于光谱测度是高光谱遥感分类研究的热点方向,可是高光谱影像波段数较多、波段间相关性强,如果直接利用所有波段信息进行分类,再加上相对较少的训练样本,则分类精度反而低,分类速度慢^[3]。比如SAM算法^[4]把光谱角测度作为一种全局性的描述指标^[5]对整个光谱向量集进行相似性测量,但对局部特征和辐射强度都不敏感,且易受噪声影响,导致分类精度下降。同时,所有高光谱的波段都参与影像分类,也容易产生 Hughes(维数灾难)现象^[6],如此就无法获得理想的分类效果。而谐波分析(HA)可以把高光谱影像每个像元的完整光谱作为序列信号进行时频空间转换,既能最大程度地保持光谱信息与压缩信号,又能有效地抑制数据背景、噪声和 Hughes 现象等。

HA最早由Jakubauskas等人^[7]提出,主要应用于电力系统谐波监测等^[8],但在遥感领域的研究与应用甚少。多层次的HA可将高光谱影像每个像元光谱表达为一系列由谐波余项、振幅和相位等能量谱组成的正(余)弦波叠加之和^[9],其中低次谐波包含了波谱的主要能量特征,高次谐波一般夹杂着噪声信息^[10],而振幅和相位分别承载着地物波段的能量和纹理位置信息,反映着波谱的局部特征信息。本文利用谐波分析改善SAM分类算法,提出一种谐波分析法光谱角制图(HA-SAM)高光谱影像分类算法,通过提取像元光谱多次谐波分解的谐波余项、低次谐波振幅和相位,组建能量谱特征维向量,从而代替光谱维向量实现影像分类。实验结果与分析表明,HA-SAM分类算法能有效地放大地类间特征差

异,降低分类数据维数和消除噪声,还克服了对光谱局部特征和辐射强度不敏感的缺陷,具有良好的分类效果。

1 谐波理论与 HA-SAM 分类模型

1.1 谐波分析理论

1.1.1 时频空间的谐波分析

谐波分析是把时间序列从时域变换到频率域,以频率域空间中若干条不同频率的正余弦波(谐波)相叠加形式来表示时域空间的一条时间序列曲线 $f(t)$ ^[11-12]。即时域空间中任何连续的波形 $f(t)$ 均可表示为傅里叶(Fourier)级数形式^[13]

$$\begin{aligned} f(t) &= \\ \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(2h\pi t/L) + B_h \sin(2h\pi t/L)] &= \\ \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \sin(2h\pi t/L + \varphi_h)] & \quad (1) \\ A_h &= \frac{2}{L} \sum_{t=1}^L [f(t) \cos(2h\pi t/L)] \\ B_h &= \frac{2}{L} \sum_{t=1}^L [f(t) \sin(2h\pi t/L)] \\ C_h &= \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \\ \varphi_h &= \arctan(A_h/B_h) \end{aligned}$$

式中, $h(h=1, 2, 3, \dots)$ 为谐波分解的次数, t 为时间序列, L 为周期, $A_0/2$ 为谐波余项, $C_h \sin(2h\pi t/L + \varphi_h)$ 为第 h 次谐波分量, A_h 、 B_h 和 C_h 分别为第 h 次谐波分解的余弦振幅、正弦振幅和谐波分量振幅, C_h^2 为其对应的功率谱, φ_h 为第 h 次谐波分量的相位。

1.1.2 影像光谱维谐波分析

传统的2维离散Fourier变换是把遥感影像的单个波段图像从空间域变换到频率域,用单波段图像像元的灰度值变化梯度(剧烈程度)来表示频率域图像,这种变换方式只是对单波段图像的不同像元进行分析,并不是高光谱影像的光谱维信息分析,更没有分析和提取不同维数据的关系和特征。

根据高光谱影像特点,从高光谱影像的光谱维出发,利用HA技术将每个像元光谱分解成一系列的谐波余项、振幅和相位等能量谱成分,并充分展现

不同波段之间的特征。对于离散高光谱影像上第 i 行第 j 列的像元 $P_{i,j}$, 其矢量数据可表示为 $V_{i,j}(x) = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ (x 为波段号向量, v_i 为第 i 波段的像元光谱值, N 为波段总数), 如图 1 所示。

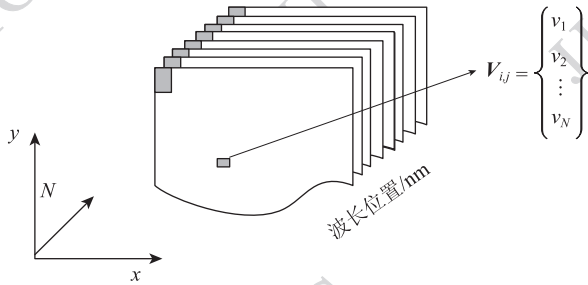


图 1 光谱维空间

Fig. 1 Spectral dimension space

将式(1)中的时间序列 t 用波段号向量 x 代替, 周期 L 用波段总数 N 代替, 则像元 $P_{i,j}$ 的谐波分解变换可表示为

$$V_{i,j}(x) = \frac{A_0^{i,j}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h^{i,j} \cos(2h\pi x/N) + B_h^{i,j} \sin(2h\pi x/L)] = \frac{A_0^{i,j}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h^{i,j} \sin(2h\pi x/N + \phi_h^{i,j})] \quad (2)$$

像元 $P_{i,j}$ 的 h 次谐波各特征成分为

$$\frac{A_0^{i,j}}{2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k \quad (3)$$

$$A_h^{i,j} = \frac{2}{N} \left(v_1 \cos \frac{2\pi h}{N} + v_2 \cos \frac{4\pi h}{N} + \dots + v_N \cos(2\pi h) \right) \quad (4)$$

$$B_h^{i,j} = \frac{2}{N} \left(v_1 \sin \frac{2\pi h}{N} + v_2 \sin \frac{4\pi h}{N} + \dots + v_N \sin(2\pi h) \right) \quad (5)$$

$$C_h^{i,j} = \sqrt{A_h^{i,j} \times A_h^{i,j} + B_h^{i,j} \times B_h^{i,j}} \quad (6)$$

$$\phi_h^{i,j} = \arctan(A_h^{i,j}/B_h^{i,j}) \quad (7)$$

则变换后的能量谱特征空间如图 2 所示, 维数 $W = 2h + 1$ 。

1.2 HA-SAM 分类模型

1.2.1 SAM 分类器

SAM 分类器是一种通过衡量两光谱之间的相似性来判别地物归属的遥感影像分类方法, 即通过比较待分类地物的光谱向量与训练样本地物光谱向

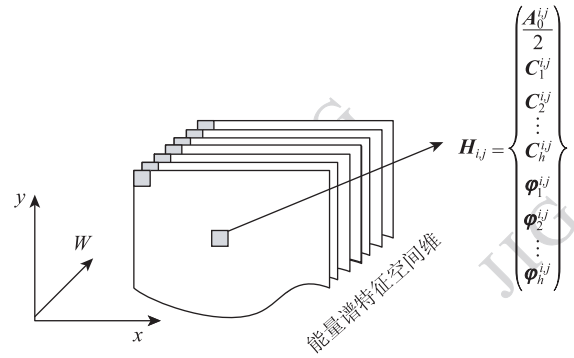


图 2 能量谱特征维空间

Fig. 2 Energy spectral space of the feature dimension

量在光谱空间上所形成的夹角来确定每类地物的属性^[14]。各光谱之间形成的夹角称为光谱角, 在 3 维空间上形成的光谱角如图 3 所示。

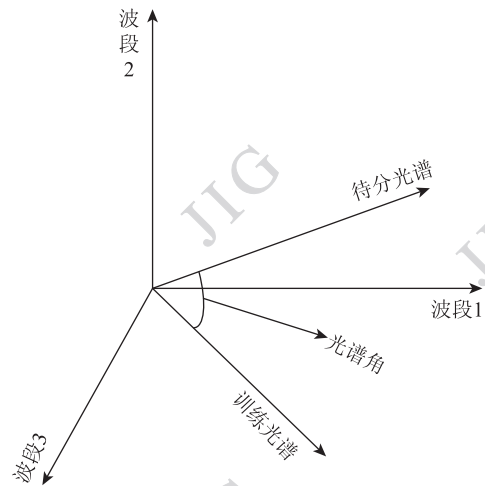


图 3 3 维空间光谱角示意图

Fig. 3 Spectral angle diagram in three dimensional space

N 维空间上光谱角的数学定义为

$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}}{\|\mathbf{X}\| \cdot \|\mathbf{Y}\|} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N y_i^2}} \quad (8)$$

即

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N y_i^2}} \right]$$

式中, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 分别表示在 N 维空间上的像元光谱矢量, N 为高光谱影像的波段数, x_i, y_i 为第 i 波段的亮度值。 α 的取

值范围为 $[0, \pi/2]$, $\cos \alpha$ 的变化范围为 $[0, 1]$ 。光谱角值越小, $\cos \alpha$ 值越大, 待分类像元光谱与训练样本光谱就越相似, 地物特征信息也就越相似, 归为一类的可能性就越高。

SAM 分类器直接应用于高光谱影像分类时只有在待分类像元类内方差较小, 类间方差较大时才能得到良好的分类结果^[15], 高光谱影像中往往夹杂着噪声, 致使像元间类内方差较大, 类间差异不明显, 给分类带来困难; 而且光谱角测度是一种全局性的描述指标, 对像元光谱的局部特征和辐射强度都不敏感^[16]; 高光谱影像波段数较多、波段间相关性高, 利用所有波段数据进行分类, 容易因维数灾难造成分类精度下降, 而且分类效率低。因此直接将 SAM 应用于高光谱影像分类有一定的局限性。

1.2.2 HA-SAM 高光谱影像分类

HA 将高光谱影像像元光谱曲线分解成一系列谐波分量相叠加的形式, 各分量特征系数代表着地物不同的物理辐射特性。其中, 谐波余项($A_0/2$)反映着像元地物电磁波辐射的综合强度, 代表着像元各波段光谱辐射能量的平均水平, 是一种全局性的描述像元地物辐射特征, 并不反映像元光谱的细节特征; 谐波振幅(C_h)表示各次谐波分量能量信息的多少, 客观反映着像元地物在各波段范围内辐射能量的波动的大小。研究发现, 低次谐波分量振幅比较大, 几乎承载了像元地物所有的辐射能量, 对整个像元光谱曲线波形的贡献量最大, 控制着波形的走势, 高次谐波振幅较小, 往往夹杂着噪声。因此可以把振幅作为一种判别地物属性的有利指标; 谐波相位(φ_h)表示各波段辐射能量波动的峰值即振幅产生时的波段位置, 相位值越小, 代表各次谐波振幅出现的波段位置越靠前^[17], 不同地物各次谐波振幅不同, 出现的位置也不一样。相位承载着像元地物的纹理以及光谱辐射的位置信息^[18], 是地物辐射电磁波的特有性质。

基于上述分析, 将谐波分析理论引入到 SAM 高光谱影像分类中, 提出了一种基于谐波分析, 利用 SAM 分类器的高光谱影像分类算法。首先将高光谱影像的各个像元分解为由一系列标准的正余弦波及特征系数组成的形式, 舍弃高次谐波部分, 提取低次谐波的各能量谱特征系数(谐波余项、振幅和相位), 组成能量谱特征向量

$$A_{i,j} =$$

$$\left[\frac{H_0^{i,j}}{2}, C_1^{i,j}, C_2^{i,j}, \dots, C_h^{i,j}, \varphi_1^{i,j}, \varphi_2^{i,j}, \dots, \varphi_h^{i,j} \right]^T \quad (9)$$

用 $H_{i,j}$ 代替 $V_{i,j} = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$, 利用 SAM 分类器对高光谱影像分类, 该算法不仅可以去除了高光谱影像中的噪声、降低了用于分类的数据维数, 而且有效地克服了光谱角对像元光谱局部信息和辐射强度不敏感的缺陷, 提高了 SAM 高光谱影像分类的速度与精度。

2 实验结果与分析

2.1 实验数据

2.1.1 Hyperion 高光谱数据

实验数据为美国 EO-1 卫星于 2007 年 7 月拍于摄美艾奥瓦州一个小镇的 Hyperion 高光谱影像。该地区植被比较茂密, 多为农作物, 居民房屋分布集中, 有一个巨大水库坐落于小镇的东北方向。未经处理的原始高光谱影像共有 242 个波段, 光谱分辨率 10 nm, 光谱范围 400 ~ 2 500 nm, 空间分辨率 30 m。由于原始影像产品等级较低, 几何和辐射误差比较大, 需要对影像进行几何校正、斑点去除和辐射校正等处理, 另外需要剔除受大气、水汽严重影响的波段, 保留其中 157 个有效波段。为更好地选取训练样本, 将该影像与同地区的 ALI (advanced land imager) 高空间分辨率全色波段影像进行融合, 融合后研究区域影像大小为 450 × 450 像素, 空间分辨率为 10 m, 如图 4 所示。

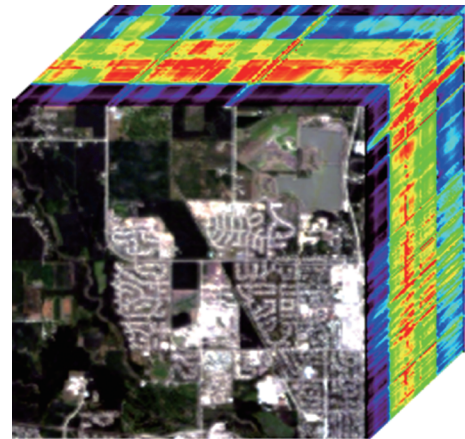


图4 Hyperion 高光谱影像

Fig. 4 Hyperion hyperspectral image

2.1.2 AVIRIS 高光谱数据

以 1998 年拍摄于加拿大阿尔伯塔省贾斯珀某地区的 AVIRIS (airborne visible infrared imaging spectrometer) 高光谱影像为例进行普适性验证,如图 5 所示,该影像经过 FLAASH 大气校正,光谱范围 400 ~ 2 500 nm,共 224 个波段,影像大小 200 × 200 像素,空间分辨率达到 3.5 m。该地区主要为植被、湖泊居和居民地。



图 5 AVIRIS 高光谱影像
Fig. 5 AVIRIS hyperspectral image

2.2 高光谱影像谐波分解及能量谱特征提取

2.2.1 数据的降噪与重构

高光谱影像在摄取过程中由于传感器性能和电磁干扰往往会夹杂着噪声,噪声的影响可能会致使待分类像元类内方差增大,模糊类间的差异性,直接用 SAM 对原始高光谱影像分类,往往得不到良好的分类效果。因此需要对高光谱影像进行去噪处理。通过对 HA 研究发现,光谱能量的特征信息主要集中在低次谐波中,高次谐波往往夹杂着噪声信息。用 HA 对影像坐标为 (307,68)、地物属性为裸地的像元进行谐波分解,提取前 30 次谐波分量进行重构,如图 6、图 7 所示,从图 6、图 7 可以看出,前 30 次谐波分量携带像元光谱的绝大部分能量与信息;对比发现,重构后光谱曲线还消除了部分原始光谱某些波段噪声的影响,从图 7 可以发现,原始光谱在 50 ~ 100 波段间有个波段受噪声影响,形成巨大的尖角,谐波分析重构后不但去除了该噪声,而且还保持了原有波形整体形态变化,因此可有效地提升分类的精度。

2.2.2 谐波最佳分解次数

对高光谱影像进行谐波分解采用 MATLAB 语言编程实现。通过多次实验,得到各次谐波分解次数与相应的分类的总体精度如图 8 所示。

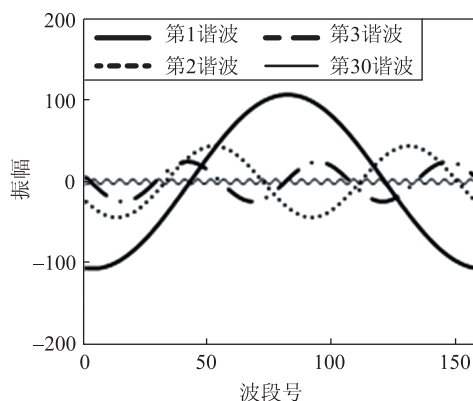


图 6 谐波分量曲线

Fig. 6 Harmonic component curve

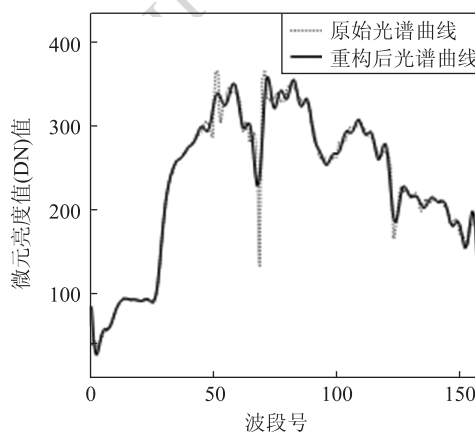


图 7 谐波分量重构前后的光谱曲线

Fig. 7 Before and after harmonic component refactoring of spectral curve

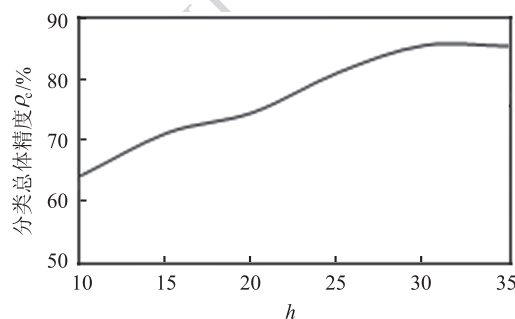


图 8 总体精度随谐波分解次数的变化曲线

Fig. 8 The curves of overall accuracy as the harmonic decomposition number

从图 8 可以看出,分解次数达到 30 次以后,此时分类的总体精度不再随分解次数的增加而增大,并且分解次数大于 30 次的谐波分量多夹杂着噪声,总体精度反而下降。因此本文实验谐波分解次数设定为 30。

2.3 HA-SAM 高光谱影像分类

2.3.1 Hyperion 实验结果与分析

影像很容易通过目视解译,把实验研究区域分为水、植被、房屋、道路和裸地 5 类。在遥感影像分类中,训练样本数量不是用公式直接得到的,而是综合分类的总体精度、分类效率而定,通常为影像波段的 2 倍左右^[19]。训练样本选择的数量与分类总体精度的关系如图 9 所示。从图 9 可以看出,当样本数量达到 100 时,曲线趋向平缓,此时样本数量为能量谱特征维数的 1.64 倍,考虑到分类效率,实验训练样本数量定为 100,因此通过目视解译分别从这 5 种类别地物中提取 20 个像元作为训练样本。然后分别在光谱维空间和能量谱特征维空间计算样本的类内和类间光谱角的余弦值($\cos \alpha$),如表 1、表 2 所示。具体计算过程:同一类内,依次计算每一个样本与其他的 $\cos \alpha$ 值,取平均作为最后结果,由于同一类地物中存在着细微差异,表 1、表 2 对角线的 $\cos \alpha$ 值不可能达到理论值 1;不同类间,分别将某一类的

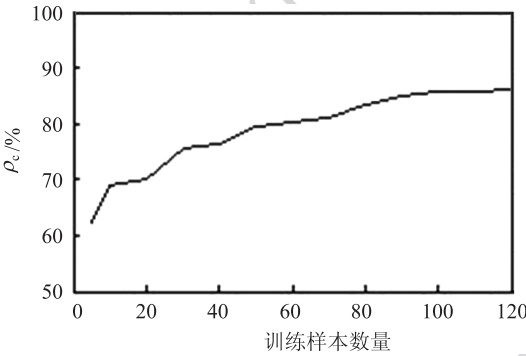


图 9 总体精度随训练样本数量变化曲线
Fig. 9 The curves of overall accuracy as the training sample number

样本依次与另一类的各个样本进行余弦值计算,并取平均作为结果。

表 1 光谱维空间类内类间光谱角余弦值的平均值
Table 1 Average value of spectral Angle cosine between classes in spectral dimension

	水	植被	房屋	道路	裸地
水	0.932 5	0.542 8	0.697 4	0.632 1	0.586 1
植被	0.542 8	0.980 1	0.769	0.683 2	0.851 2
房屋	0.697 4	0.769	0.985 4	0.982 3	0.665 4
道路	0.632 1	0.683 2	0.952 3	0.910 3	0.573 2
裸地	0.586 1	0.851 2	0.665 4	0.573 2	0.962 1

表 2 能量谱特征维地物类内类间光谱角余弦值的平均值
Table 2 Average value of spectral Angle cosine between classes in energy spectrum feature dimension

	水	植被	房屋	道路	裸地
水	0.962 5	0.245 2	0.382 2	0.410 1	0.132 5
植被	0.245 2	0.987 9	0.543 2	0.432 5	0.636 7
房屋	0.382 2	0.543 2	0.990 1	0.745 1	0.356 7
道路	0.410 1	0.432 5	0.845 1	0.973 2	0.432 1
裸地	0.132 5	0.636 7	0.356 7	0.432 1	0.987 4

表 1、表 2 的数据表明,将高光谱影像进行谐波分解,利用能量谱特征维向量进行 SAM 分类,可有效地缩小地物类内差别(表 1、表 2 对角线的数据),放大类间差异(表 1、表 2 对角线以外的数据),因此将 HA-SAM 分类模型应用于高光谱影像具有较高的可行性与可靠度,利用 HA-SAM 分类模型对本实验影像进行分类,分类结果如图 10(b)所示。

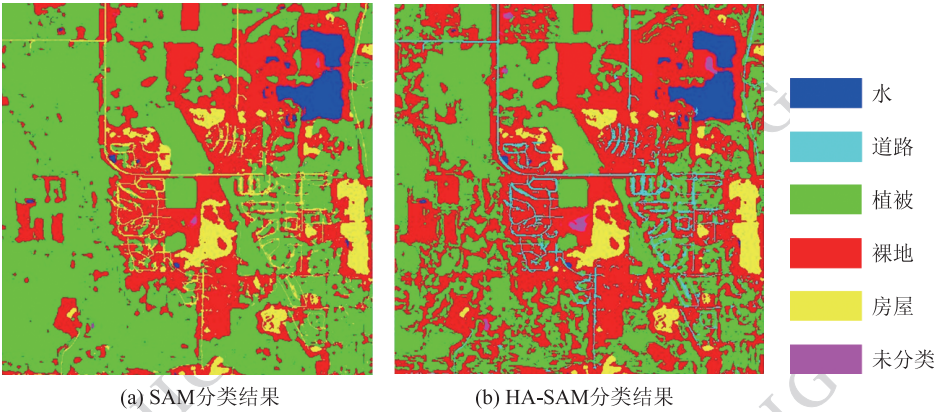


图 10 分类综合结果
Fig. 10 The comprehensive results of classification

在相同的实验平台、训练样本和实验影像和分类阈值下,主要对比 SAM 和 HA-SAM 两种监督分类算法的分类效率与精度。实验采用的实验平台是 acer 笔记本电脑,内存 4 G,2.5 GHz,MATLAB 编程语言实现。将提取好的训练样本分别应用于上述两类方法,根据表 1、表 2 中类内与类间的差异,选择对角线数据的最小值作为光谱角阈值。由于研究影像中植被和裸地可能存在相间分布以及道路和房屋相似性比较大,致使 SAM 得到的提取结果会有部分重叠,因此需要对其进行分类后处理,例如植被和裸地,通过比较这两类地物的单类分类结果图,找到重叠区域位置,以典型植被训练光谱为参照,增大光谱角阈值,以此为界限来区分两类地物,由于重叠类别少、区域较小,不需要进行大量的人工干预。得到分类综合结果如图 10 所示。

判断分类结果精度好坏的 3 个重要指标是总体分类精度、Kappa 系数和用户精度。总体分类精度等于被正确分类的像元总和除以总像元数,正确分类像元是通过地表真实感兴趣区确定像元的真实分类为标准计算得到的。像元总数等于研究区域影像

类中所有像元总和,总体分类精度为

$$\rho_c = \sum_{i=1}^K P_i / N \tag{10}$$

式中, ρ_c 为总体分类精度, K 为分类数, P_i 为第 i 类被正确分类的像元数, N 为像元总数。Kappa 系数是计算精度的另一个重要的指标,计算为

$$\text{Kappa} = \frac{N \sum_{i=1}^K P_i - \sum_{i=1}^K P_i Q_i}{N^2 - \sum_{i=1}^K P_i Q_i} \tag{11}$$

式中, P_i 为真实分类影像中第 i 类的像元总数, Q_i 为待估分类影像中第 i 类的像元总数。用户精度 ρ_i 是指正确分到 i 类的像元总数与分类器将整个影像的像元分为 i 类的像元总数比率,即

$$\rho_i = P_i / Q_i \tag{12}$$

在实验影像中,另外通过目视解译分别提取每类地物的 20 个训练样本作为地表真实感兴趣区,以此来确定真实分类影像。将上述分类结果导入 ENVI 软件中分别计算 SAM 和 HA-SAM 分类结果的总体精度、Kappa 系数和用户精度如表 3 所示。

表 3 SAM 和 HA-SAM 分类精度和效率
Table 3 Accuracy and efficiency of SAM and HA-SAM

	精度/%					平均精度	总体精度	Kappa 系数	运算速度/min
	$\rho_{\text{水}}$	$\rho_{\text{植被}}$	$\rho_{\text{房屋}}$	$\rho_{\text{道路}}$	$\rho_{\text{裸地}}$				
SAM	86.45	72.21	70.87	—	81.25	77.70	75.563 2	0.712 5	2.232 2
HA-SAM	90.31	82.80	80.58	86.45	88.32	85.69	85.643 9	0.802 1	1.064 3

SAM 和 HA-SAM 都能独立地进行高光谱影像分类,而利用 HA 技术将高光谱影像从光谱维空间变换到能量谱特征维空间,从图 6、图 7 可以看到,利用前 30 次的谐波分量对像元光谱进行重构并提取其能量谱特征系数进行 SAM 分类,不但降低了参与 SAM 分类数据的空间维数,而且还有效地消除噪声对类内和类间方差的影响;能量谱特征维空间的谐波余项、相位和振幅能够很好地表示像元地物光谱的特征信息,从表 1、表 2 的数据可以看出,光谱维空间中每类地物的类内差异性(表 1、表 2 对角线上的数据)要大于能量谱特征维空间,而类间的差异性正好相反,特别是房屋和道路在光谱维空间上相似性极高,从图 10(a)可以看出,SAM 没能把道路和房屋区分开来,两者混为一体,而且通过目视解

译植被和裸地区分不明显,出现错分现象。而在能量谱特征空间地物间特性差异性被放大,因此 HA-SAM 能够很好地把它们区分开来,如 10(b)所示。从表 3 可以看出,HA-SAM 的用户精度、总体精度、Kappa 系数都明显高于 SAM,而且运算速度较快,大大提高了分类的效率。很显然 HA-SAM 在处理高光谱影像分类上具有明显的优势。

2.3.2 AVIRIS 实验结果与分析

对该实验影像进行谐波分析,通过分析不同谐波分解次数下的总体精度变化,确定最佳谐波分解次数为 30。从实验影像上可以清晰地将该地区分为水、植被、房屋、道路和裸地五大类,比较分析训练样本数量与总体精度的变化趋势,100 为最优训练样本数量。通过目视解译分别从这五大类地物中提

取20个像元作为训练样本,鉴于此实验是为了验证HA-SAM高光谱影像分类的普适性,仅用HA-SAM对实验影像进行分类,并计算其总体精度和Kappa系数。分类效果如图11所示,由于该影像地物特征明显,空间分辨率高,HA-SAM分类的整体精度达到91.2575%,Kappa高达0.8636。由此可见HA-SAM高光谱影像分类算法普适性较好,在高光谱遥感地物识别与分类领域具有较大的应用潜力。

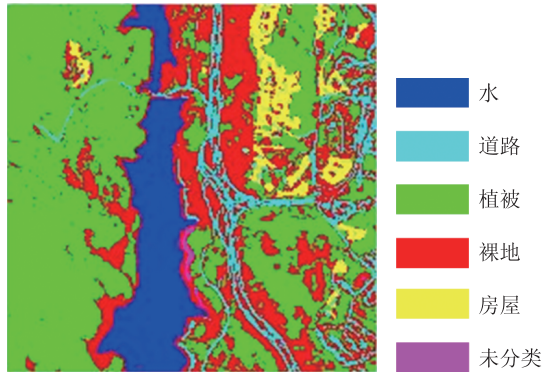


图11 分类综合结果

Fig. 11 The comprehensive results of classification

3 结 论

本文探测性地将SAM分类器应用到能量谱特征维空间的高光谱影像分类中,提出了HA-SAM高光谱影像分类算法,通过实验分析得到以下结论:

1)利用HA技术对高光谱影像像元光谱曲线进行分解,提取低次谐波分量及特征系数,利用特征系数组成的能量谱特征向量进行SAM分类,不但降低了分类数据的空间维数,而且可有效地消除噪声对类内和类间方差的影响,提高了传统SAM分类的效率和精度。

2)HA-SAM克服了SAM对像元光谱的局部特征和辐射强度不敏感的缺陷,能量谱特征有效地缩小了地物类内差别,放大类间差异,提高了SAM对相似地物的识别能力。

由此可见HA-SAM在高光谱影像地物识别和分类领域具有良好的应用前景。

参考文献 (References)

[1] Sun J B. Principle and Application of Remote Sensing[M]. 2nd

ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 1-25. [孙家柄. 遥感原理及应用[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 1-25.]

[2] Xiao Q. Combination of spatial information and spectral information for hyperspectral imagery classification[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. [肖倩. 结合空间信息与光谱信息的高光谱图像分类研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.]

[3] Chen J. On classification method of hyperspectral images[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. [陈进. 高光谱图像分类方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.]

[4] Pu R L, Gong P. Hyper Spectral Remote Sensing and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 50-200. [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 50-200.]

[5] Tang H, Du P J, Fang T, et al. The Analysis of error sources for SAM and its improvement algorithms[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(8): 1180-1183. [唐宏, 杜培军, 方涛, 等. 光谱角制图模型的误差源分析与改进算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1180-1183.] [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0593.2005.08.004]

[6] Hughes G F. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1968, 14(1): 55-63. [DOI:10.1109/TIT.1968.1054102]

[7] Jakubauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 4: 461-470. [DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00116-3]

[8] Tang S Q, Cheng X H. A harmonic measuring approach based on multilayered feed forward neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 90-94. [汤胜清, 程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 90-94.] [DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2006.18.016]

[9] Yang K M, Xue Z H, Jia T T, et al. A harmonic analysis model of small target detection of hyperspectral imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 34-43. [杨可明, 薛朝辉, 贾涛涛, 等. 高光谱影像小目标谐波分析探测模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 34-43.]

[10] Yang K M, Zhang T, Wang L B, et al. A new algorithm on hyperspectral image fusion based on the harmonic analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3): 547-533. [杨可明, 张涛, 王立博, 等. 高光谱影像的谐波分析融合算法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 547-533.] [DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.000146]

[11] Davis J C. Statistics and Data Analysis in Geology[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1986, 151-200.

[12] Rayner J N. An Introduction to Spectral Analysis[M]. London:

- Pion L td, 1971: 121-172.
- [13] Wakilleh G J. Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design[M]. Berlin: Springer, 2001: 23-72.
- [14] Zhang L P, Zhang L F. Hyperspectral Remote Sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005: 122-130. [张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 122-130.]
- [15] Fan Y G, Li X Y, Zhang L, et al. Mapping classification based on the analysis of multi-band no-threshold auto-spectral angle [J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(2): 38-41. [樊彦国, 李翔宇, 张磊, 等. 基于多波段分析的无阈值自动光谱角制图分类法[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 38-41.]
- [16] Chen L, Liu X, Zhang Y, et al. A study of image classification based on MLC combined with spectral angle [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16(3): 40-42. [陈亮, 刘希, 张元, 等. 结合光谱角的最大似然法遥感影像分类[J]. 测绘工程, 2007, 16(3): 40-42.] [DOI: 10.3969/j.issn.1006-7949.2007.03.010]
- [17] Bradley B A, Jacob R W, Hermance J F, et al. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series satellite NDVI data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(2): 137-145. [DOI:10.1016/j.rse.2006.08.002]
- [18] Oppenheim A V, Lim J S. The importance of phase in signals [J]. Proceeding of the IEEE, 1981, 69(5): 529-542. [DOI: 10.1109/PROC.1981.12022]
- [19] Bo S K, Ding L. The effect of the size of training sample on classification accuracy in object-oriented image analysis [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(7): 1106-1111. [薄树奎, 丁琳. 训练样本数目选择对面向对象影像分类方法精度的影响 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(7): 1106-1111.] [DOI: 10.11834/jig.090128]