

# 高光谱遥感图像的单形体分析方法

夏学齐 田庆久 杜凤兰

(南京大学国际地球系统科学研究所 南京大学城市与资源学系, 南京 210093)

**摘要** 将  $n$  个波段的高光谱图像像元与  $n$  维空间里的散点联系起来, 结合凸体几何中单形体概念研究高光谱遥感图像纯净像元提取方法, 实现图像的地物精确分类识别及像元波谱分解。寻找高光谱遥感图像  $n$  维空间里的单形体并认知分析单形体是该研究方法的重要环节。通过 MNF (minimum noise fraction) 变换和 PPI (pixel purity index) 计算技术找到单形体, 基于单形体进行像元分解分析单形体, 并结合应用实例和 SAM (spectral angle mapper) 分类技术完成高光谱图像地物精确分类制图, 验证了该研究方法的可操作性。该研究方法的优点在于不需要用户提供地物波谱信息, 用于制图和波谱分解的终端单元可由图像本身得到, 并由用户控制分类制图和波谱分解的详细程度。

**关键词** 高光谱遥感 单形体 像元 波谱分类 波谱分解

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)12-1486-05

## Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Images Using a Simplex Method

XIA Xue-qi, TIAN Qing-jiu, DU Feng-lan

(International Institute for Earth System Science, the Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** One advantage of hyperspectral remote sensing is that it has more bands so more information could be used to recognize ground objects and estimate relative contents of materials. In this paper, pixels of hyperspectral remote sensing images of  $n$  bands are connected with points in an  $n$ -dimensional scatterplot. Pure pixels can be extracted using a method of simplex, which is a concept in convex geometry, and thus accurate hyperspectral image classification and spectral unmixing can be realized. The focus of this method is to find the simplex and to analyze it. The simplex can be found using MNF (minimum noise fraction) transform and PPI (pixel purity index) calculation, and the mapping methods used here are SAM (spectral angle mapper) classification and an unmixing method based on the simplex. All techniques here have been proved feasible by an application example. This paper also gives a procedure of the techniques. The advantages of the techniques and the procedure are that the endmembers for spectral mapping and unmixing can be extracted from the images themselves, and that spectral mapping and unmixing scale can be determined by users.

**Keywords** hyperspectral remote sensing, simplex, pixel, spectral classification, spectral unmixing

## 1 引言

随着高光谱遥感的发展, 许多新的数据处理与分析技术也相应地发展起来<sup>[1]</sup>。最小噪音比变换技术(MNF, minimum noise fraction)是对高光谱遥感

图像进行降维的有效方法<sup>[2]</sup>。最小噪音比变换相当于两次重叠的主成份变换<sup>[3,4]</sup>, 比主成分分析更好地达到降低图像的维度、隔离噪音<sup>[5]</sup>、消除波段间的相关性、压缩数据量的目的。通过纯净像元指数(PPI, pixel purity index)技术可计算并表征遥感图像中每个像元的“纯度”, PPI 数值越大, 说明对应的像元

越“纯”,因为图像像元在  $n$  维空间中对应的点所形成的“云”的外围包裹着一个最小的单形体,而越纯净的像元越靠近这个单形体的顶点,PPI 的计算过程就是寻找单形体顶点的过程<sup>[6]</sup>。波谱角度制图技术(SAM,spectral angle mapper)通过计算各像元与各终端单元波谱矢量的夹角来计算类间的距离,以此确定各目标像元的类别归属<sup>[1,7]</sup>。

在上述新的数据处理方法与分析技术的基础上,把高光谱图像的像元与  $n$  ( $n$  为图像的波段数)维空间里的散点联系起来,把图像分类和像元分解看作几何问题来研究,从而研究并提出利用单形体理论和方法对高光谱遥感图像进行纯净像元提取及其地物的精确分类和识别方法和过程。设高光谱遥感图像的波段数为  $n$ ,每个像元对应着  $n$  个有序的数值可看作  $n$  维空间的向量,因而一幅高光谱图像可看作  $n$  维空间的散点图。对于这些散点也存在一个单形体刚好包裹它们,即一幅高光谱图像对应于一个单形体。纯净像元可以理解为单一类地物形成的波谱,而单形体的顶点对应着图像上的纯净像元波谱,它们构成图像的终端单元(endmember)。混合像元的波谱是由终端单元波谱混合而形成的,因此混合像元对应的散点分布在单形体内部除顶点以外的地方(单形体内部或顶点连线上)<sup>[6,8,9]</sup>。

2 单形体

在  $n$  维空间中,取  $n+1$  个无关的点(即向量  $(p_i-p_1)$  线性无关), $p_1, p_2, \dots, p_n, p_{n+1}$ , 这些点相互连接,可以构成  $n$  维空间的一个单形体<sup>[10,11]</sup>。对于  $n$  维空间中的任意有限点集,都能找到一个最小的单形体刚好包裹这个点集,该点集即为单形体的一个子集。在 1 维空间中,线段是单形体,在 2 维空间中,三角形是单形体,在 3 维空间中,四面体是单形体,依此类类推,但更高维空间的单形体不便于用图形简单地表示出来。单形体形成凸集成为一种凸体,由此可将以凸体为对象的凸体几何理论应用于该研究领域。单形体内部的任意点  $p$  是其顶点的线性组合,如图 1 所示,3 维空间中单形体的任意点  $p$  是 4 个顶点  $p_1, p_2, p_3, p_4$  的线性组合。

单形体内部的点可表示为

$$p = k_1p_1 + \dots + k_ip_i + \dots + k_{n+1}p_{n+1} \quad (1)$$

其中,组合系数  $k_i$  大于等于零且和为 1,即

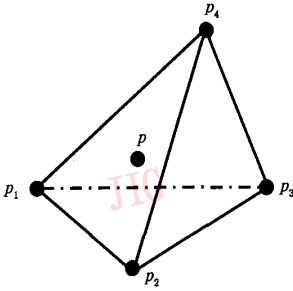


图 1 3 维空间中的单形体

$$k_i \geq 0, \sum_{i=1}^{n+1} k_i = 1$$

对于一幅  $n$  个波段的高光谱图像,其真实空间维度  $n$  应该等于它的终端单元数减 1,即  $n+1$  个点构成  $n$  维空间中的单形体。以 3 维空间为例,如图 1 所示, $p_1, p_2, p_3, p_4$  代表图像纯净像元(终端单元), $p$  为混合像元。由此, $n$  维高光谱遥感图像具有  $n+1$  个终端单元,并对应着  $n+1$  个单形体顶点, $n$  维高光谱图像的散点图分布于这个单形体中<sup>[8]</sup>。高光谱图像纯净像元提取过程就是认知和寻找单形体的过程。

3 纯净像元提取方法

图 2 所示表明高光谱遥感图像纯净像元提取方法及步骤,寻找单形体和分析单形体是该研究方法的重要环节。寻找单形体是指确定要处理的单形体,

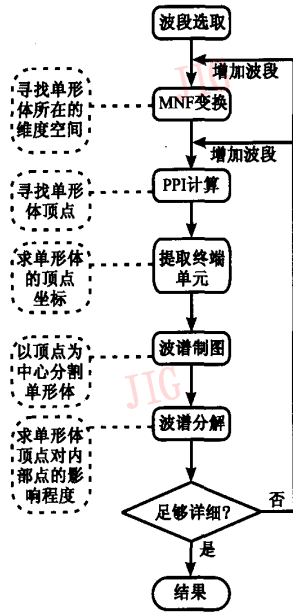


图 2 单形体提取和分析的方法与步骤流程图

找到单形体所在空间的维度(维度数加一就是要处理的单形体的顶点数)和单形体的顶点坐标;分析单形体是指对单形体进行空间划分和内部点与各顶点的相对位置计算,进而完成高光谱遥感图像终端单元提取和精确分类与制图。

寻找单形体的过程中,主要使用的是最小噪音比变换(MNF)技术和纯净像元指数(PPI)计算技术。对高光谱遥感图像进行最小噪音比变换,在变换后所组成的图像质量逐渐降低的序列图像中,除去噪音构成的特征值接近1的图像,保留其他包含有用信息的图像波段。图像的真实维度由所有这些波段决定,按照一定的规则,选择前几个主要成份,先简化图像信息,然后在不断重复处理中,逐渐加入更多细节,直到达到目标。如果选取前 $n$ 个波段就可找到要处理的单形体的维度, $n+1$ 即为要处理的单形体顶点数。

之后,结合PPI技术寻找单形体顶点的位置,即超维空间里的坐标,顶点像元就是要提取的终端单元。继之,把MNF和PPI图像中的像元输入到模拟的 $n$ 维空间中进行可视化观察,以验证计算结果,抽取进行制图的终端单元波谱<sup>[3]</sup>,在这个基础上,用SAM制图方法对单形体进行空间划分,认为分出来的每块与顶点具有相同的性质,从而完成对高光谱遥感图像地物的精确分类和识别。

最后,进一步基于单形体进行波谱分解。从凸体几何概念理解,像元波谱分解方法是求单形体顶点对其内部某点位置的影响程度,或者说求线性组合系数 $k_i$ ,根据公式(1)知,单形体的内部任意点都可看作顶点的线形组合,系数为正且和为一。知道了各顶点和任意目标点的坐标,可以用下式通过解方程求出系数 $k_i$ 。

$$\begin{aligned} p &= k_1 p_1 + k_2 p_2 + \cdots + k_i p_i + \cdots + k_{n+1} p_{n+1} \\ p &= (d_1, d_2, \cdots, d_j, \cdots, d_n) \\ p_i &= (d_{i1}, d_{i2}, \cdots, d_{ij}, \cdots, d_{in}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} k_i = 1$$

其中, $p_i$ 表示第 $i$ 个顶点的坐标,对应各终端单元波谱; $p$ 表示目标点的坐标,对应目标的波谱; $k_i$ 是组合系数。需要注意的是,混合像元的反射率的组成因素即包括线形因素,也包括非线性因素(比如临边效应)。对于大尺度和简单混合的像元可以认为波谱是线性混合的<sup>[12]</sup>,对于小尺度甚至微粒尺度的和复杂混合的像元误差则不能再认为波谱的混合是线性

的<sup>[13,14]</sup>,这时用式(2)计算的 $k_i$ 与终端单元的丰度是不对应的。

由图2可以看到,本研究是一种由简到繁的方法,即先把图像处理为维度较小的单形体,确定主要的终端单元,掌握图像全局,然后根据应用目标进行逐渐详细分类和分解,即在开始时选取较少的波段参与MNF变换,并选取较少波段参与进一步处理,先得到较为简单的能反映主要地物类型的分类图像,之后不段增加处理波段,直到达到地物精确分类和识别的预期目标。

## 4 应用验证

采用2002年5月在江苏省宜兴地区航空获取的128个波段OMIS高光谱遥感数据,该数据的128个波段覆盖了可见光至热红外波段(0.4~12.5 $\mu\text{m}$ ),图像空间分辨率为6.6m,可见光至近红外波段带宽为10nm,短波红外波段为40nm,热红外波段为250nm或500nm。本研究基于几何精纠正和大气订正处理后的数据,并剔除了由于成像光谱仪器件造成的失效波段。实验区地物类型多水系,靠近河岸分布茂密的水草、农田和居民区等。

考虑到高光谱遥感数据波段数多,相邻波段相关性强的特点,在波段域上选用了9个波段进行研究。波段选取遵循原则:波段相关性弱,保证选取波段能够区分图像上不同的主要地物类型,并尽量选取噪音少的波段。所选取的9个波段的中心波长为515.3nm、540.5nm、710.9nm、883.9nm、1016.3nm、1255.2nm、1605.4nm、2078.2nm、2328.9nm。

图3是对这9个波段进行MNF变换后的9个波段图像序列,图4为相应的特征值曲线。由图4可看到,对应图3中的波段图像序列,越到后面的波段图像,其特征值越小,直至图像特征值接近1,即表明最后的波段图像基本上是噪音形成。本研究取图3中保留主要信息的前3个波段图像进行进一步处理。

图5为针对所选择的MNF处理后的前3个波段3维空间里的单形体(四面体)进行PPI计算的结果。把PPI计算得出的PPI指数大的点输入到ENVI图像处理系统中的 $n$ 维空间工具里观察,可以看到这些点在 $n$ 维空间中的分布情况,并导出图像的终端单元,即是单形体的顶点在 $n$ 维空间里的坐标。

图版1图1显示了提取到的终端单元在MNF空间里的波谱,利用这些终端单元来进行下一步的



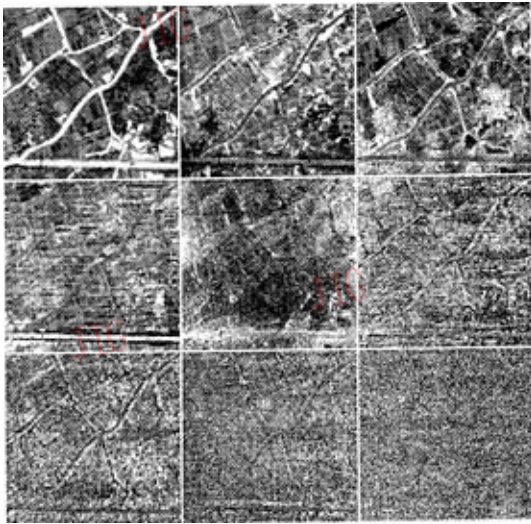


图 3 9 个波段的 MNF 变换图像序列  
(图像信息依次减少直至噪音图像)

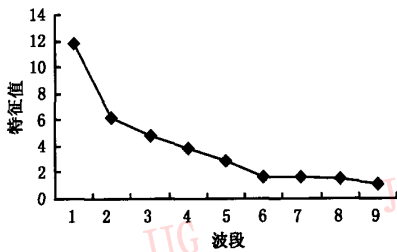


图 4 MNF 变换的特征值曲线图

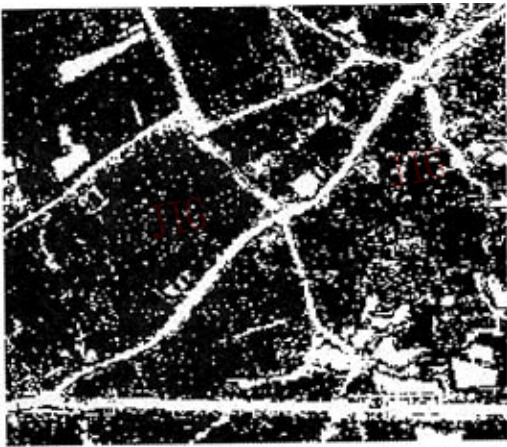


图 5 纯净像元指数图像

地物精确分类制图和波谱分解研究。  
在完成上述寻找单形体和分析单形体过程的基础上,对该图像纯净像元提取并进行地物精确分类

和制图。图版 I 图 2 所示为采用导出的终端单元进行 SAM 制图的结果。再利用式(2)可以进行波谱分解,对于 4 个终端单元的 3 维单形体来讲,式(2)对应 4 个线性方程组。写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} & d_{41} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} & d_{42} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} & d_{43} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用 IDL 语言编制程序对上述矩阵求解,从而得到系数  $k_1, k_2, k_3, k_4$ ,并产生对应 4 个终端单元图像如图 6 所示,分别对应道路居民地、水域、茂盛的植物和田地这 4 种主要地物类型。图像中的像元值是一个小数,它表达了对应终端单元在这个像元中的丰度,可用来描述地物分类精度及定量估算。

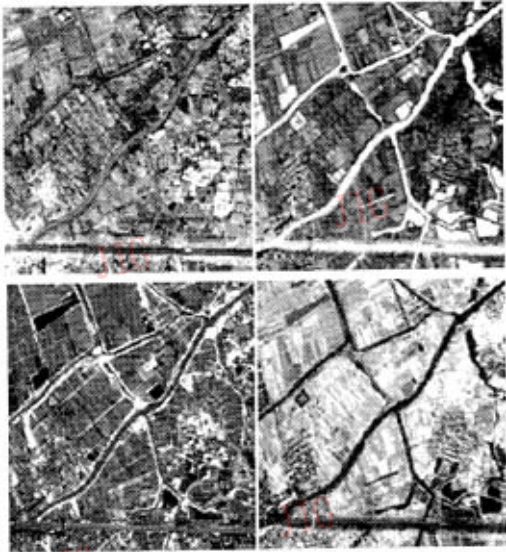


图 6 对应道路居民地、水域、茂盛的植物、田地的 4 个终端单元遥感图像

5 结 论

本研究把高光谱遥感图像纯净像元提取及地物精确分类识别过程看作单形体的计算和求解过程,并从凸体几何概念对该处理过程进行理解。该研究方法优点在于通过图像本身信息直接找到终端单元(纯净像元),可避免由用户提供终端单元数目或波谱与图像不符,而造成的图像分类或波谱分解失败;但该研究方法要求图像的所有终端单元存在于图像上,否则会因为找不到正确的单形体而引起图像分

类的无效。在大多数高光谱遥感图像上都可以找到接近正确的单形体,从而进行地物的精确分类识别和波谱分解。

一幅高光谱图像的真实维度通常是要求所有波段参与 MNF 变换,并由特征值大于 1 的所有波段的数目来决定的<sup>[15~17]</sup>。本研究仅使用了高光谱遥感图像的 MNF 技术处理的前 3 个波段图像,把图像处理为 3 维空间里的单形体,首先从图像中得到主要大类地物的分布状况,之后逐渐增加处理波段并得到地物的精确分类结果,此方法是一种实用方法,并可以除去一些不必要的细节信息。使用这种方法是考虑到图像类别的层次性(hierarchy),这种方法使地物分类的类别不断增加,分类的尺度(scale)和级别(level)不断变化,最后使地物分类结果达到应用需要所确定的尺度,并进入确定的级别<sup>[18,19]</sup>。

### 参考文献

- 1 浦瑞良,官鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 2 Green A A, Berman M, Switzer P, *et al.* A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(1):65~74.
- 3 Research Systems Incorporated. ENVI 3. 5 User's Guide[R]. Boulder, CO, US, 2000:337~374.
- 4 Lee J B, Woodyatt A S, Berman M. Enhancement of high spectral resolution remote sensing data by a noise-adjusted principal components transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(3):295~304.
- 5 Osmar Abilio de Carvalho Jr, Ana Paula Ferreira de Carvalho, Paulo Roberto Meneses. Sequential minimum noise fraction use: an approach to noise elimination[EB/OL]. [ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/00\\_docs/osmar\\_3\\_carvalho\\_web.pdf](ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/00_docs/osmar_3_carvalho_web.pdf), 2004-6-16.
- 6 Boardman J W, Kruse F A, Green R O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data; in Summaries [A]. In: Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop [C]. Pasadena, CA, US, JPL Publication, 1995, **1**(1):23~26.
- 7 Kruse F A, Lefkoff A B, Boardman J B, *et al.* The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44**(special):145~163.
- 8 Boardman J W. Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts; in summaries [A]. In: Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop [C]. Pasadena, CA, US; JPL Publication, 1993, **26**(1):11~14.
- 9 Boardman J W, Kruse F A. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada [A]. In: Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing [C]. Environmental Research Institute of Michigan, An, Arbor, MI, US. 1994:1407~1418.
- 10 沈文选. 单形论导引——三角形的高维推广研究[M]. 长沙:湖南师范大学出版社,2000.
- 11 吴敏金. 图象形态学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.
- 12 Singer R B, McCord T B. Mars: large scale mixing of bright and dark surface materials and implications for analysis of spectral reflectance [A]. In: Proceedings Lunar and Planetary Science Conference, 10th [C], Houston, Tex, US. 1979:1835~1848.
- 13 Nash E B, Conel J E. Spectral reflectance systematics for mixtures of powdered hypersthene, labradorite, and ilmenite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, **79**(11):1615~1621.
- 14 Singer R B. Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures; systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, **86**(B6):7967~7982.
- 15 Christopher Small. Spectral dimensionality and scale of urban radiance [EB/OL]. <http://www.ldeo.columbia.edu/~small/Urban/Small Urban AVIRIS2001.pdf>, 2003-06-20.
- 16 Green R O, Boardman J W. Exploration of the relationship between information content and signal/noise ratio and spatial resolution in AVIRIS spectral data [A]. In: Proceedings of the Ninth JPL Airborne Earth Science Workshop [C], Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 2000:195~206.
- 17 Boardman J W, Green R O. Exploring the spectral variability of the earth as measured by AVIRIS in 1999 [A]. In: Proceedings of the Ninth JPL Airborne Earth Science Workshop [C], Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 2000:195~206.
- 18 Quattrochi D, Goodchild M. Scale in Remote Sensing and GIS [M]. New York: CRC Press, Lewis Publishers, 1997.
- 19 Woodcock C, Strahler A. The factor of scale in remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **21**(3):311~322.



**夏学齐** 1979年生。2002年毕业于西  
南师范大学资源环境科学学院,现为南京大  
学地球科学系地球化学专业博士研究生。目  
前主要研究领域为高光谱遥感以及遥感和  
地理信息系统技术在地学中的应用。  
E-mail:mg0227069@ymail.nju.edu.cn



**田庆久** 1964年生。教授、博士生导师。  
2003年于南京大学获地理信息系统专  
业博士学位。主要致力于高光谱遥感、遥感  
信息量化、地物波谱分析与建模等的研  
究。共发表论文 50 余篇,其中 SCI/EI 收录  
文章 10 余篇。



**杜凤兰** 1980年生。2002年毕业于烟  
台师范学院地理系,现为南京大学城市与  
资源学系地图学与地理信息专业硕士研究  
生。主要研究领域为高空间分辨率遥感的  
应用。