基于多重分形参数的高光谱数据特征提取

赵慧洁 蔡 辉 李 娜

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 针对单一分形维数不能表征高光谱数据光谱局部吸收特征的问题,提出了基于光谱概率测度的多重分形参数特征提取方法. 基于光谱信息度量进行光谱概率测度的计算,基于配分函数法估计得到尺度函数;通过对尺度函数求导计算出 Holder 指数,并对尺度函数勒让德 Legendre 变换计算出多重分形谱;从多重分形谱和 Holder 指数之间的函数关系提取表征多重分形谱形态的 4 个多重分形谱参数作为光谱特征参数;并应用于基于最小距离准则的航空推扫式高光谱成像仪(PHI,Prush-broom Hyperspectral Imager)图像监督分类. 结果证明:利用基于光谱概率测度的多重分形参数特征提取方法提取的光谱特征参数进行分类得到的总体分类正确率达 94.789%,分类精度明显高于利用信息量维数和多重分形谱特征提取方法进行分类的结果,证明了基于光谱概率测度的多重分形参数特征提取方法提取的多重分形参数的有效性和可靠性.

关 键 词: 高光谱遥感; 特征提取; 多重分形谱参数; 尺度函数; 推扫式高光谱成像仪

中图分类号: TP 775

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1317-04

Feature extraction method based on multifractal parameters for hyperspectral imagery

Zhao Huijie Cai Hui Li Na

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Multi-fractal parameter extraction method based on spectral probability measurement was proposed to resolve the problem that the local absorption characteristics of hyperspectral data can not be described by the single fractal dimension. The method of spectral information measurement was used to calculate the spectral probability. The scaling function was estimated with the partition function. The differential coefficient of scaling function was calculated to obtain Holder exponent, and the multi-fractal spectrum was computed with Legendre transformation of scaling function. Four multi-fractal parameters can be extracted from multi-fractal spectrum and Holder exponent. The minimum Euclidean distance rule with the characteristic extraction based on multi-fractal parameters was applied to hyperspectral image supervised classification. The hyperspectral image was collected by airborne push-broom hyperspectral imager (PHI). The applied results show that the efficiency and reliability of the proposed method and its classification accuracy are about 94.789%, which is better than the classification accuracy of information fractal dimension and multi-fractal spectrum.

Key words: hyperspectral remote sensing; feature extraction; multi-fractal parameters; scaling function; push-broom hyperspectral imager

收稿日期: 2011-12-15; **网络出版时间**: 2012-09-26 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120926.1104.012.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61008047,61177008); 中国地质调查局地质调查资助项目(1212011120227); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0705)

作者简介: 赵慧洁(1966 -),女,黑龙江齐齐哈尔人,教授,hjzhao@buaa.edu.cn.

高光谱遥感数据具有图谱合一的特点,提供丰富信息的同时波段之间具有较强的相互性和冗余性,降低了数据处理的效率,甚至精度. 特征提取为上述问题提供了有效的技术手段. 高光谱数据特征提取方法主要包括基于光谱特征参量提取、基于数学变换以及基于光谱空间子集的方法,特征参量提取的方法仅仅考虑了光谱局部吸收特征,光谱子集方法不改变光谱物理特性但会造成数据细节信息的缺失,基于数学变换方法可以从统计、物理、波形变化趋势等方面实现光谱特征提取;为了提取稳定的光谱特征,如何有效地综合利用光谱局部吸收特征以及光谱波形幅值与变化趋势是特征提取的热点研究方向. 因此,针对上述问题,本文将分形理论引入到高光谱数据光谱特征提取,从反射波谱的形成过程来看,光谱曲线不仅具有自相似性而且具有一定的奇异性,其具有某种分形体的特征.

分形理论是非线性科学的一个重要的分支,在遥感应用中,常常被用来研究遥感影像的空间分形特征[1-3],近年国内外开始针对光谱曲线进行分形特征分析,但是仅限于 Hausdorff 维数、关联维数在光谱识别中的应用研究[4-5],分形维数不能有效表征高光谱数据稳定的光谱特征以及局部细节光谱特征,因此,本文引入多重分形的理论,多重分形谱是描述多标度复合分形生长形成的复杂体系,它定量的刻画了分形子集上的具有不同标度和标度指数的分形子集的局部标度性,光谱曲线是具有多重分形特征的复杂信号. 理论上多重分形谱具有无限高维数,实际应用中采用估计方法得到的多重分形谱维数一般在 50 以上才能代表信号包含奇异性对应的分形维数分布. 为了将多重分形理论应用到高光谱图像处理中,有必要从分形谱中提取一组包含多重分形谱大部分信息的参数[6],作为光谱特征参数,为进一步分类、识别等应用提供良好的基础. 针对高光谱数据的特点与应用需求以及如何有效表征多重分形谱参数等问题,提出了基于光谱概率测度的多重分形谱参数光谱特征提取方法,并应用于高光谱数据监督分类中,有效地提高地物分类精度,验证了特征提取参数的有效性和可靠性.

1 光谱曲线多重分形谱及参数提取

多重分形谱 $f(\alpha)$ 是一个以 Holder 指数 α 为自变量的函数,其函数值可以理解为过程在时间 $[0,T]$ 内随机抽取的时刻,具有给定 Holder 指数 α 的概率.

1.1 多重分形谱计算方法

为了实现多重分形谱提取引入光谱概率测度以及配分函数等方法实现多重分形谱的计算:利用光谱信息度量 (SIM,Spectral Information Measurement)[7] 的方法计算出光谱概率测度 $P(\delta)$,采用文献[8]提出的配分函数法,通过勒让德 Legendre 变换计算多重分形谱.

1) 光谱概率测度计算. 对于高光谱数据某一地物光谱曲线,沿波长方向划分为尺寸为 δ 的 $N(\delta)$ 个一维小盒子,$S_i(\delta)$ 表示尺寸为 δ 的第 i 个小盒子内所有光谱波段的辐亮度/反射率值之和,则 i 个小盒子内光谱曲线的概率测度表示为

$$P_i(\delta) = \frac{S_i(\delta)}{\sum_{i=1}^{N(\delta)} S_i(\delta)} \tag{1}$$

其中, $\sum S_i(\delta)$ 为所有光谱波段辐亮度/反射率之和,$i=1,2,\cdots,N(\delta)$.

2) 配分函数构造. 光谱曲线的配分函数[9] $\chi_q(\delta)$ 为

$$\chi_q(\delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} P_i^q \tag{2}$$

其中,q 为权重因子.

3) 尺度函数估计. 在无标度的自相似区域内 $\chi_q(\delta)$ 与 δ 之间存在的幂率关系:

$$\chi_q(\delta) \sim \delta^{\tau(q)} \tag{3}$$

$\log_2\chi_q(\delta_i)$ 作为 $\log_2\delta_i$ 的函数拟合得到尺度函数 $\tau(q)$:

$$\log_2\chi_q(\delta_i) \approx \tau(q)\log_2\delta_i + C(q) \tag{4}$$

4) 多重分形谱和 Holder 指数计算. 式(4)利用尺度指数 $\tau(q)$ 测量了 $\chi_q(\delta)$ 随权重因子 q 的渐近衰减性. 尺度指数、Holder 指数和多重分形谱满足 Legendre 变换:

$$\left.\begin{aligned} \alpha(q) &= \frac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}q} \\ f(\alpha) &= q\cdot\alpha(q) - \tau(q) = q\cdot\frac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}q} - \tau(q) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

$f(\alpha)$ 是描述多重分形子集维数的连续谱,如果研究对象是单分形的,则 $f(\alpha)$ 为一定值;如果研究对象是多分形的,则 $f(\alpha)$ 为单峰曲线.

1.2 多重分形谱参数

不同地物具有不同的分形谱曲线,根据多重分形谱可以进行地物的分类与识别. 由于高光谱数据提供空间信息的同时提供了连续的光谱曲线,因此,为了将多重分形理论应用于高光谱图像分类、识别等应用,需从多重分形谱中提取一组表

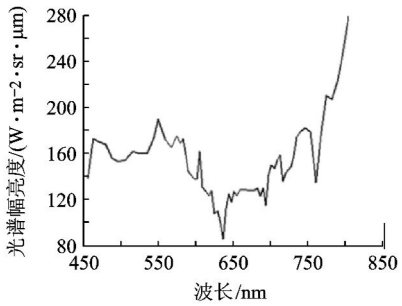
征多重分形谱特征的参数[6].

多重分形谱包含 Holder 指数 α 和分形谱 $f(\alpha)$ 两个参量,为了使提取的参数能够有效地表征多重分形谱,参数包含了表征多重分形谱形态的具有特殊性质的点,一般情况下多重分形谱为一单峰曲线[10],因此,本文选择多重分形谱的对称轴、横坐标极大与极小点以及极小点对应的分形维数作为特征参数,如表 1 所示.

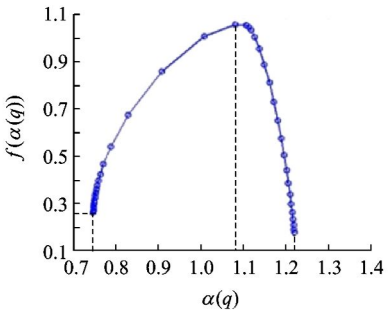
表 1　多重分形谱参数及其表达式

参数名称	表达式
α^*	$f(\alpha^*)=\max(f(\alpha))$
$\alpha_{\min}$	$\min(\alpha)$
$\alpha_{\max}$	$\max(\alpha)$
$f(\alpha_{\min})$	$f(\alpha_{\min})=f(\min(\alpha))$

$\alpha_{\min}$ 和 $\alpha_{\max}$ 表示给定 q 条件下概率奇异性的最小值和最大值,度量了整个奇异性分布的宽度;α^* 为多重分形谱 $f(\alpha)$ 最大值点对应的 Holder 指数,反映了分形谱的对称性;$f(\alpha_{\min})$ 为光谱曲线上 Holder 指数取最小值的波段子集分形维数. $f(\alpha_{\min})$ 和 $f(\alpha_{\max})$ 分别对应于 $q>0$ 和 $q<0$ 的分形维数,$f(\alpha_{\min})$ 描述的是大波动特征,$f(\alpha_{\max})$ 描述的是小波动特征,光谱曲线的峰和谷特征为大波动特征,要准确的度量光谱特征应该选用 $f(\alpha_{\min})$. $f(\alpha_{\max})$ 描述的小波动特征放大了噪声及其它带来小误差的因素的影响,抑制了峰谷特征,因而不能用作特征参数. 利用 PHI(Prush-broom Hyperspectral Imager)数据某地物光谱曲线(如图 1a)进行多重分形谱及其参数描述(如图 1b).



a　PHI 数据光谱曲线



b　多重分形谱参数描述

图 1　PHI 数据地物光谱及其多重分形谱参数

2　实验结果与分析

航空高光谱成像光谱仪 PHI(光谱分辨率5 ~ 10 nm,波长范围 400 ~ 850 nm,瞬时视场角 1.0 mrad,信噪比大于 200)获得的江苏方麓茶场航空数据进行实验,验证本文方法的性能. 为了验证特征提取性能(可分性与所含信息量等),实验中以最小欧氏距离(MED,Minimum Euclidear Distance)作为分类准则,应用数据大小为 210 × 150 × 64. 地物类型标识与采用的测试样本如表 2 所示.

表 2　各类别地物标识与测试样本

类别名称	地物标识	测试样本数目
茶树	T7	306
竹子	T6	255
红薯	V2	197
香菜	V13	246
水稻	C4	743
水体	W2	468
裸土	S2	165
总和		2 380

各类别的多重分形谱参数如表 3. 以信息量维数(FDI,Fractal Dimension of Information)、多重分形谱(MFS,Multi-Fractal Spectrum)和多重分形谱参数(MFSP,Multi-Fractal Spectral Parameters)为特征,采用 MED 进行监督分类,结果统计参数如表 4 所示,分类精度比较如图 2 所示.

表 3　参考光谱多重分形参数

地物	α^*	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$f(\alpha)$
水稻(C4)	1.08	0.72	1.24	0.26
竹子(T6)	1.01	0.73	1.06	0.03
茶树(T7)	1.02	0.72	1.12	0.07
红薯(V2)	1.09	0.72	1.21	0.32
香菜(V13)	1.06	0.87	1.07	0.27
水(W2)	1.07	0.83	1.16	0.02

表 4　分类结果统计

分类方法	特征参数	Kappa 系数	正确率/%
MED	FDI	0.593	67.356
	MFS	0.800	84.559
	MFSP	0.933	94.789

从图 3 可以看出,当地物光谱特征能够显著区别于其它地物时,单一分形维数也能够取得较好的分类效果,如 FDI 对红薯的分类正确率达 94%;当地物光谱较为相似时,MFS 和 MFSP 的优越性更加明显,图 3 中 MFS,MFSP 的分类精度明显高于 FDI;MFS,MFSP 的总体分类精度分别达 84% 和 94% 以上,显著高于 FDI 的 67.356%. Kappa 系数体现分类结果的一致性,表 3 结果显

示,MFSP 分类的 Kappa 系数达 0.933,说明每个单一类别的分类正确率都高,分类结果的一致性高.

利用 MFS,MFSP 特征进行 MED 的分类结果如图 3 所示. 图 3a、图 3b 中红薯、水稻、香菜、水体均得到了较好的分类结果;由于竹子和茶树分布混合较多且光谱接近,图 3a中的错分现象较图 3b 明显.

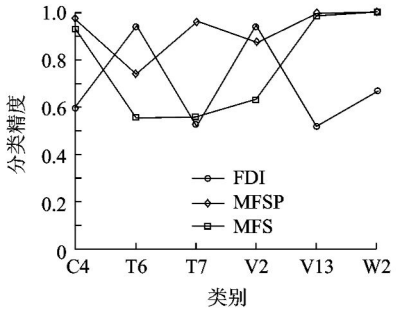
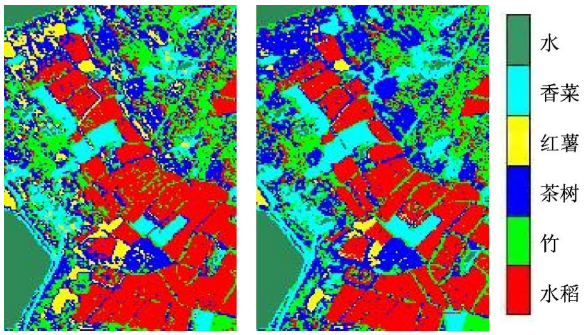


图 2 各地物分类精度



a MFS 分类结果 b MFSP 分类结果

图 3 MFS 和 MFSP 监督分类结果图比较

3 结 论

本文提出的基于光谱概率测度的多重分形谱参数特征提取方法,利用表征多重分形谱的形态参量,有效地结合了 $\alpha \sim f(\alpha)$ 包含的光谱曲线奇异性特征和分形特征,放大了光谱较大的波动特征(吸收特征),充分考虑了高光谱数据局部吸收特征,增加了具有相似光谱地物之间的可分性. 将本文方法应用于 PHI 数据地物分类,实验结果证明:利用本文方法提取的特征进行监督分类获得了 94.789% 的总体分类精度,并有效地提高了易错分地物之间的分类精度.

参考文献(References)

[1] Zhou Ziyong. Multifractal based hyperion hyperspectral data mining[C]//The Seventh International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovery. USA,NJ:IEEE,2010:2109 - 2113

[2] Tzeng Y C,Fan K T,Su Y J,et. al. A parallel differential box counting algorithm applied to hyperspectral image classification [C]//IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS). USA,NJ:IEEE,2009:V216 - V219

[3] 张峰,邹焕新,雷琳. 一种基于局部分形维的 CFAR 检测算法[J]. 信号处理,2012,28(1):205 - 211
Zhang Feng,Zou Huanxin,Lei Lin. A CFAR detection algorithm based on local fractal dimension[J]. Signal Processing,2012,28(1):205 - 211(in Chinese)

[4] Zhang Huaguo,Huang Weigen,Zhou Changbao. Fractal characterization of IKONOS imagery[C]//Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications. Bellingham:SPIE,2003,4897:292 - 301

[5] 周子勇,李朝阳. 高光谱遥感数据光谱曲线分形特征研究[J]. 中北大学学报,2005,26(6):451 - 454
Zhou Ziyong,Li Chaoyang. Fractal feature of hyperspectral remote sensing spectral curves[J]. Journal of North China Institute of Technology,2005,26(6):451 - 454 (in Chinese)

[6] Abadi M,Grandchamp E. Legendre spectrum for texture classification[C]//The 8th International Conference on Signal Processing. USA,NJ:IEEE,2006,2:16 - 20

[7] Chang Chein I. Spectral information divergence for hyperspectral image analysis[C]//IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS). USA,NJ:IEEE,1999,1:509 - 511

[8] Halsey T C,Jensen M H,Kadanoff L P,et al. Fractal measures and their singularities:the characterization of strange sets [J]. Physical Review A,1986,33(2):1141 - 1151

[9] 周炜星,王延杰,于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性Ⅱ. 配分函数法[J]. 华东理工大学学报,2000,26(4):390 - 395
Zhou Weixing,Wang Yanjie,Yu Zunhong. Geometrical characteristics of singularity spectral of multifractal Ⅱ Partion function definition[J]. Journal of East China University of Science and Technology,2000,26(4):390 - 395(in Chinese)

[10] 李彤,商朋见. 多重分形在掌纹识别中的研究[J]. 物理学报,2007,56(8):4393 - 4400
Li Tong,Shang Pengjian. A multifractal approach to palmprint recognition[J]. Acta Physica Sinica,2007,56(8):4393 - 4400(in Chinese)

(编 辑:刘登敏)