

基于分形信号的高光谱影像增强方法

周子勇

(中国石油大学(北京)地球科学学院,油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:目前常用的高光谱影像增强方法大多继承了多光谱影像的增强处理方法,这类方法没有充分利用光谱信息,而基于混合像元分解的图像增强方法存在端元的选取问题。基于影像的自相似特征,探索运用分形信号进行遥感影像增强的可能性。以3景 Hyperion 高光谱影像数据为基础,把基于地毯的方法进行修正后用于计算高光谱影像中每一像元的分形信号。结果表明,与原始高光谱影像相比,分形信号影像可以更好地突出地物特征,从而达到影像增强的目的,原始曲线形态特征、初始尺度的选择以及采样点数目对分形信号和分形特征尺度均有影响。

关键词:高光谱;分形信号;影像增强

中图分类号:TP 75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)04-0426-06

1 引言

目前遥感影像增强方法主要有两大类,即基于单波段和基于多波段的图像增强处理。基于单波段的图像增强处理又可以分为辐射增强和几何增强。辐射增强技术以亮度直方图为基础,目的是通过线性和非线性变换、直方图均衡化以及密度分割等方法提高影像的对比度。几何增强则是以邻域运算为基础,实现滤波、突出线性特征和边缘特征等目的。几何增强可以在空间域和频率域中进行,空间域处理比较灵活有效,因此目前较常用的还是以空间域处理为主。基于多波段的图像增强处理方法主要是多波段影像的几何运算、彩色合成、光谱变换以及图像融合等。

高光谱遥感影像具有谱像合一的特点,包含的光谱信息也比多光谱影像丰富。然而,相对于多光谱卫星影像,高光谱卫星影像空间分辨率较低。因此对高光谱影像的增强,可以充分发挥其光谱信息的优势,提高地物识别能力。目前高光谱遥感影像增强处理方法有两种思路。一种是继承和改进多光谱遥感影像增强处理方法,如最小噪声分离法(MNF)、图像融合方法^[1-2]等。另一种是从高光谱数据的光谱信息着手,对影像进行增强,如通过混合像元分解进行影像增强等^[3]。混合像元分解过程

中,端元提取及混合模型的选择对分解结果影响最大,目前端元提取方法不少,但还没有一种普适的方法。实际上无论是通过图像融合或混合像元分解进行图像增强,都是基于不同尺度下影像所具有的自相似特征。因此从影像自相似特征出发也可以进行遥感影像的增强。而分形分析方法研究的正是自相似现象,因此基于分形的方法有可能达到图像增强的目的。

分形分析方法用于遥感影像处理,关键是分形维的计算。目前发展了很多分形维的计算方法^[4],这些方法大都可以用于遥感影像分形维的计算,如等值线方法^[5]、地毯方法^[6]以及三角棱柱法^[7]等。而分形分析方法用于高光谱影像处理,目前主要从两个方面入手。一是从空间影像的角度出发计算出每一个波段的空分形维,根据分形维研究影像特征,如根据分形维选择特征波段^[8];另一种思路是从谱的角度出发,计算并分析每个像元光谱曲线的分形维特征^[9]。

实际数据分形维的计算,都是基于统计的方法,求得最佳拟合直线的斜率。由于实际数据的复杂性和随机性,仅仅依靠单一的一个分形维值常常难以反映数据的全貌,基于此,Peleg 等^[6]提出了分形信号的概念,用于描述影像的分形特征,Dong^[10]把这一概念用于高光谱曲线的研究。本文以分形信号为

基础,探讨基于分形信号的高光谱影像增强。文章首先介绍了分形信号的计算方法,然后计算了 3 景 Hyperion 影像的分形信号并对计算结果进行了分析,最后讨论了影响分形信号计算结果的因素及本算法存在的不足。

2 分形维与分形信号

Peleg 等^[6]首先提出了分形信号的概念,用于遥感影像的纹理分析与影像分类中。文中运用基于面积的方法计算出不同影像的分形信号特征。该方法作适当修改可以用于计算高光谱曲线的分形信号。其基本方法如下:

假设一条高光谱曲线 $g(i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$, n 为波段数) 被宽度为 2ϵ 的两条曲线所包围 ($\epsilon = 1, 2, 3, \dots, k$, k 为迭代次数), ϵ 为测量尺度。所包围的曲线分别称为上曲线 (u_ϵ) 和下曲线 (b_ϵ)。设原始曲线为 $\epsilon = 0$ 的曲线,且记 $u_0(i) = b_0(i) = g(i)$, 上曲线和下曲线的构建通过式 (1) 和式 (2) 来实现:

$$u_\epsilon(i) = \max\{u_{\epsilon-1}(i) + 1, \max_{|m-i| \leq 1} u_{\epsilon-1}(i)\} \quad (1)$$

$$b_\epsilon(i) = \max\{b_{\epsilon-1}(i) + 1, \min_{|m-i| \leq 1} b_{\epsilon-1}(i)\} \quad (2)$$

其中: m 为点 i 的左右邻近点,通过式 (1) 可确保生成的 ϵ 尺度下的上曲线 u_ϵ 比 $\epsilon - 1$ 尺度下的曲线 $u_{\epsilon-1}$ 高 ϵ 个单位,同样式 (2) 可确保生成的 ϵ 尺度下的下曲线 b_ϵ 比 $\epsilon - 1$ 尺度下的曲线 $b_{\epsilon-1}$ 低 ϵ 个单位。图 1 给出了高光谱曲线的原始曲线及其 ϵ 和 2ϵ 下生成的上曲线和下曲线。

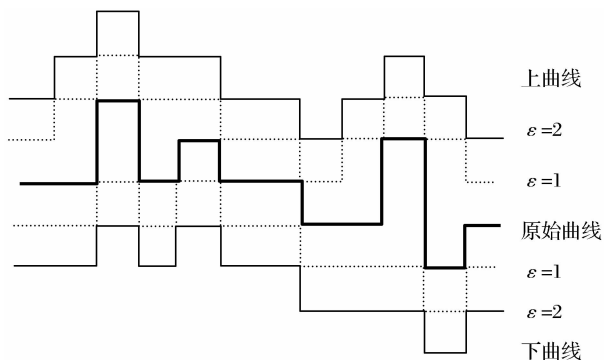


图 1 上曲线及下曲线生成方法示意图

Fig. 1 Illustration of generation of upper and lower curves

上曲线和下曲线所包围的多边形的面积为:

$$S_\epsilon(i) = \sum_i (u_\epsilon(i) - b_\epsilon(i)) \quad (3)$$

曲线的长度按下式定义:

$$A(\epsilon) = \frac{(s_\epsilon - s_{\epsilon-1})}{2} \quad (4)$$

根据 Mandelbrot 的定义,分形曲线的长度表示为:

$$A(\epsilon) = F\epsilon^{D'} \quad (5)$$

其中: F 为常数, D' 为与分形维有关的参数。如果对于任意 ϵ 值或特定区间的 ϵ 值式 (5) 成立,则说明曲线是分形的,或者说在某一特定标度曲线是分形的,而且在 $\log(\epsilon) - \log(A(\epsilon))$ 坐标下是一条直线。但实际情况下,对于曲线是否具有分形特征或者在什么区间具有分形特征并不清楚,为此引入分形信号的概念。对于每一尺度 ϵ ($\epsilon = 2, 3, 4, \dots, n$), 分别取其左右邻点,得到 3 个点,即: $(\log(\epsilon - 1), \log(A(\epsilon - 1)))$, $(\log(\epsilon), \log(A(\epsilon)))$, $(\log(\epsilon + 1), \log(A(\epsilon + 1)))$, 然后求得这 3 点最优拟合直线的斜率,即为尺度 ϵ 对应的分形信号值 $S(\epsilon)$, 称 $S(\epsilon)$ 与 ϵ 的关系为分形信号曲线。若 $S(\epsilon)$ 值在某一尺度 ϵ 出现异常(明显偏大),则称该尺度为分形特征尺度。

由于在某一尺度下所测量的曲线的长度具有不对称性,这种不对称性与曲线的特性有关,为了利用这种不对称性,可分别从“上面”和“下面”测量曲线。则式 (3) 可以分为两部分,即:

$$s_\epsilon^+(i) = \sum_i (u_\epsilon(i) - g_\epsilon(i)) \quad (6)$$

$$s_\epsilon^-(i) = \sum_i (g_\epsilon(i) - b_\epsilon(i)) \quad (7)$$

相应地,“上长度” $A^+(\epsilon)$ 和“下长度” $A^-(\epsilon)$ 分别为:

$$A^+(\epsilon) = S_\epsilon^+ - S_{\epsilon-1}^+ \quad (8)$$

$$A^-(\epsilon) = S_\epsilon^- - S_{\epsilon-1}^- \quad (9)$$

根据式 (8) 和式 (9) 分别求得上分形信号曲线和下分形信号曲线。

分形信号曲线与原始曲线存在以下关系:如果原始曲线是分形的,则 $S(\epsilon)$ 不随 ϵ 变化而变化;如果在某一 ϵ 区间 $S(\epsilon)$ 不随 ϵ 变化,则说明原始曲线在这一标度区间是分形的;如果在不同的 ϵ 区间都满足这一条件,则说明原始曲线具有多重分形特征。

不同的光谱曲线,其分形信号曲线也不同,而且分形信号可以放大曲线的差异,因此通过分形信号可以达到图像增强的目的。本文分形信号所有相关计算均在 ENVI/IDL 环境下编程实现。

3 实验结果与分析

3.1 数据来源与预处理

本文数据来自于 2002 年及 2007 年获得的 3 景 Hyperion 数据。Hyperion 是世界上第一个成功发射的星载民用成像光谱仪,搭载在 EO-1 卫星平台上,于 2000 年 11 月 21 日发射。每景 Hyperion 数据的扫描带宽为 7.5 km,影像的空间分辨率为 30 m,光谱分辨率为 10 nm,一共 220 个定标的波

段,覆盖 400~2 500 nm 的波长范围。影像预处理主要包括波段选取、坏线修复、去条带、辐射值计算。波段选取指从 220 个原始波段中去掉未定标的波段、重复波段、噪声特别大没有有效信息的波段,不

同时相的 Hyperion 影像其有效波段有细微差异,但 10~57、79~119、131~164、182~221 共 163 个波段基本可以保留。图 2 为不同地区 3 景 Hyperion 影像(部分)的标准假彩图(RGB:50,23,16)。

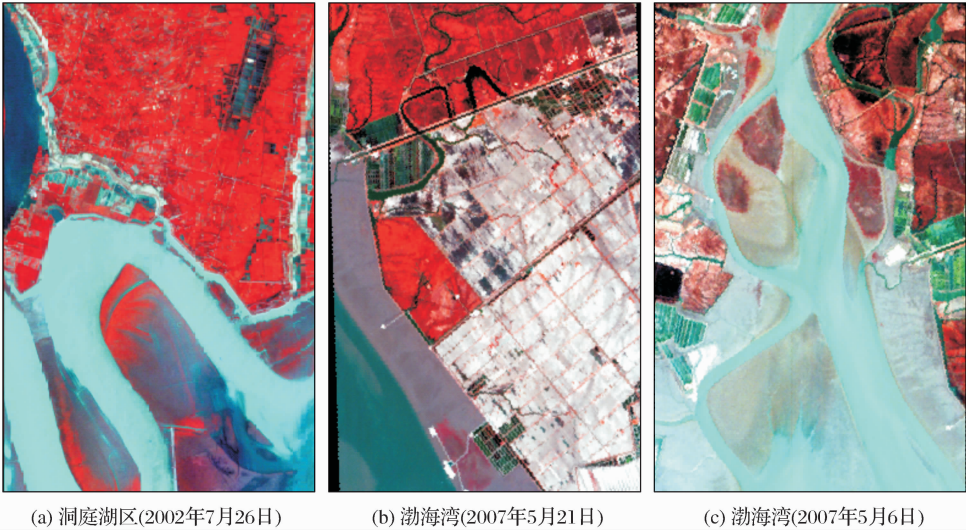


图 2 Hyperion 原始影像(部分)标准假彩图(RGB:50,23,16)

Fig. 2 Standard falsecolor composition (RGB:50,23,16) of Hyperion original images

3.2 实验结果分析

由于每一个像元都对应一条高光谱曲线,因此根据式(5)、(8)、(9)可以计算出每一个像元的上分形信号和下分形信号曲线。根据分形信号计算结果可以得到几点认识:

(1) 不同地物对应的分形信号曲线存在较大差异。这种差异既可表现在不同地物的特征尺度不一样,也可以表现在同一特征尺度上其值大小的差异。如图 3 所示,为图 2(a)影像中几种典型地物的下分形信号。图 3 中横坐标表示尺度,即以初始尺度迭代的次数。

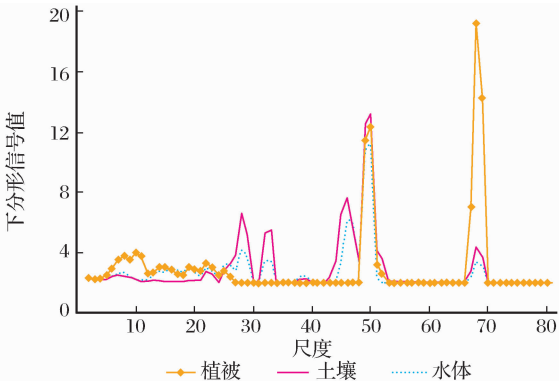


图 3 图 2(a)中不同地物的下分形信号

Fig. 3 Lower fractal signature of different targets in fig. 2(a)

(2) 与原始光谱曲线相比,不同地物的分形信

号差异更明显一些。因此可以根据同一特征尺度下各像元的分形信号值构成分形影像,与原始影像相比,分形信号影像可以更突出特定的地面目标,从而达到图像增强的目的。图 4 为由图 2 中的原始数据求得的下分形信号影像。由图 3 可知,分形信号影像可以更好地突出地物的空间分布和细节特征,如纹理特征、边界等。图 4(a)、4(c)、4(e)中的亮色反映了植被的空间分布,而 4(b)、4(d)、4(f)反映了不同深度的水体空间分布。

4 分形信号影响因素

4.1 上分形信号与下分形信号

由原始影像可以得到上分形信号影像和下分形信号影像。从 Hyperion 影像计算结果来看,下分形信号比上分形信号效果要好(图 3),这是由高光谱曲线形态以及分形信号的计算方法决定的。由于式(1)和式(2)的操作过程主要表现在峰值和谷值的不断收缩,而峰值的形态、高度不同,导致其收缩的速度不一致,在特定尺度下极小值操作峰值收缩得更快些,对应的下分形信号更明显一些。同时由于分形信号对峰值或谷值较敏感,因此与原始影像相比,分形信号影像更能反映出地物的差异。但并不是对所有高光谱数据其下分形信号都比上分形信号效果好,其原因在于数据特征不同。

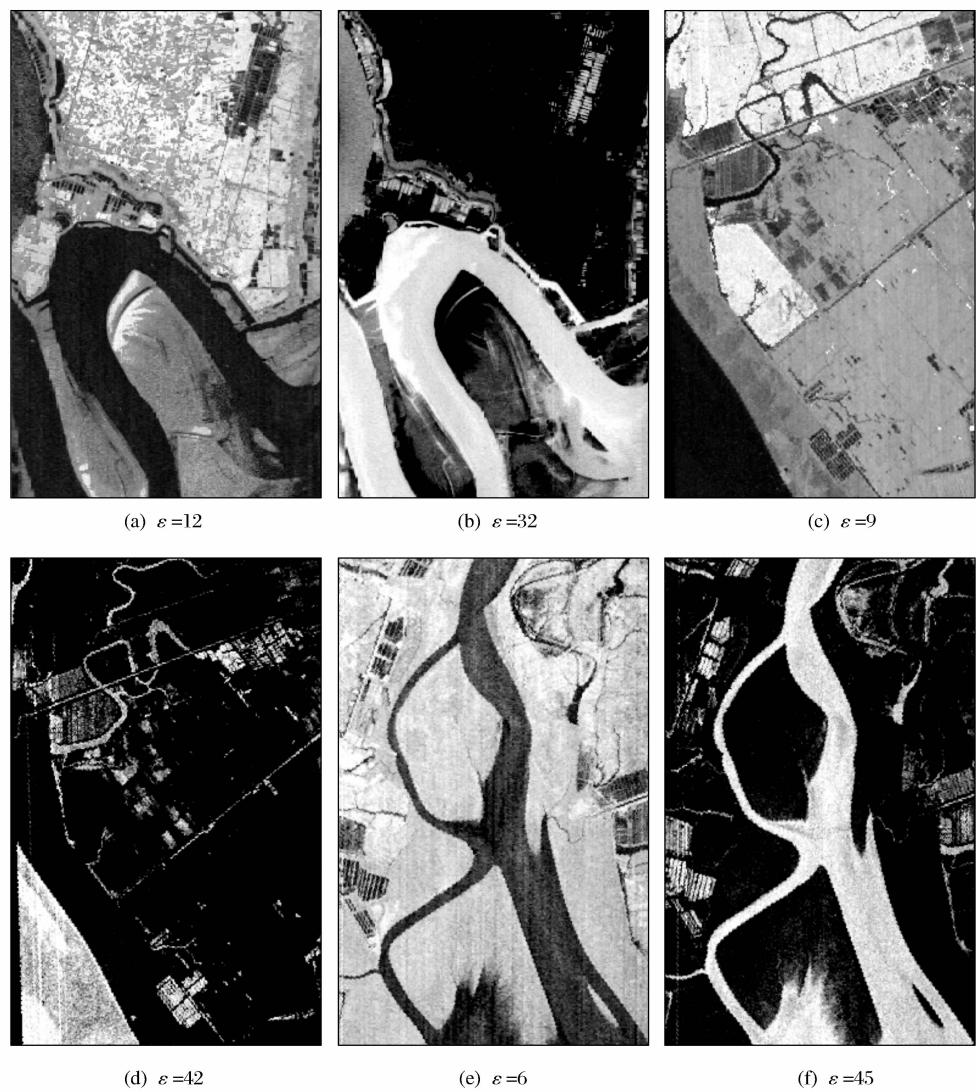


图 4 由原始影像计算得到的不同尺度 ε 的下分形信号影像(初始尺度 $\varepsilon_0=0.1$)

Fig. 4 Lower fractal signature images at different scales(initial scale: $\varepsilon_0=0.1$)

4.2 初始尺度大小的确定

在文献[6]和文献[10]中,直接以遥感影像的 DN 值进行计算。实际计算过程中,取初始尺度 $\varepsilon_0=1$,然后以前一尺度生成的曲线为基础,根据式(1)或式(2)增加一个尺度单位(即 DN 值增加 1)后计算出当前尺度的曲线,再根据得到的新曲线的 DN 值增加 1 计算出下一条曲线,一直重复此过程直到满足给定条件为止。本文采用的数据是经 DN 换算得到的辐射值。通过不同初始尺度进行计算表明,尽管给定的初始尺度不同,但分形特征尺度基本不变,只是分形信号值随初始尺度变小而增加。如图 5 所示,当初始尺度太大时,分形异常基本无法显示出来。因此,如果是以遥感影像的 DN 值为基础进行计算,一般可取初始尺度 $\varepsilon_0=1$ 。但如果以辐射值为基础计算分形信号,则存在一个如何选择初始

尺度大小的问题。初始尺度选择标准,还有待于进一步研究。实际工作中可用不同的初始尺度进行试验,然后选取合适的初始尺度。

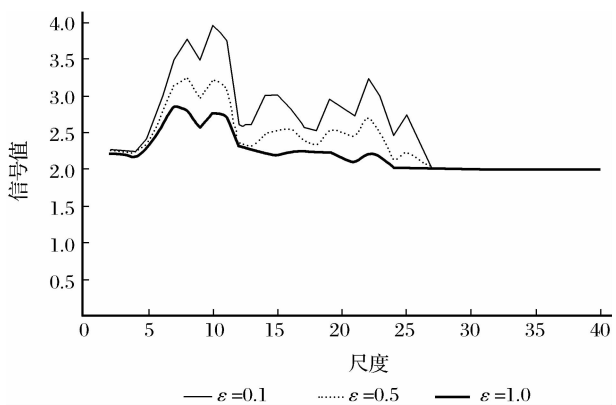


图 5 不同初始尺度下分形信号变化

Fig. 5 Variation of fractal signature with initial scale

4.3 采样点数目与特征尺度的关系

计算结果表明,分形信号特征尺度与高光谱曲线的采样点数存在密切关系。如图 6 为原始曲线按 10 点、8 点、6 点、2 点抽稀后得到的分形信号曲线,可见随着采样点数据的减少,特征尺度也相应减小。这就导致两个问题,一是不同的高光谱影像因为其波段数不同,同一地物所对应的特征尺度也不同,从而没有可比性;其次即使对于同一传感器所得到不同时相的高光谱影像,因其有效波段数可能不一样,其特征信号也会出现差异,从而减少了可比性;另外高光谱影像中的曲线与实测高光谱曲线也难以对比,这些问题无疑对这种方法不利。

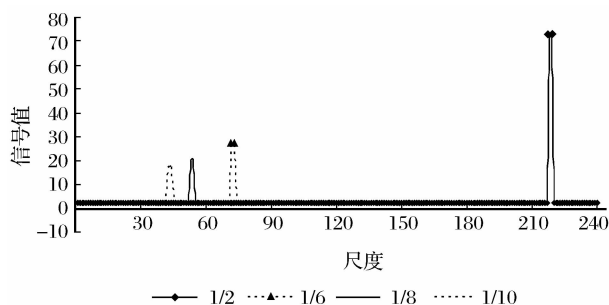


图 6 原始数据点数对分形信号特征尺度的影响

Fig. 6 Impact of the number of samples on fractal signature feature scale

5 结 语

本文从分形信号出发,研究高光谱影像的多尺度特征,通过对 3 景 Hyperion 高光谱影像数据的计算和分析,从波谱的角度对影像分形特征进行分析。得出以下认识:

(1) 分形维反映了曲线的粗糙程度,而分形信号则是对曲线极值的反映。由于不同地物高光谱曲线的峰值形态不同,因此通过分形信号分析可以达到图像增强的目的。

(2) 通过原始高光谱数据可以得到上分形信号影像及下分形信号影像。至于是上分形信号影像还是下分形信号影像更能突出地物的差异,则主要取决于实际的数据。通过对不同地区、不同时相 Hyperion 影像的分形信号分析结果表明,对于 Hyperion 影像数据,下分形信号更能突出地物差异。

(3) 初始尺度对分形信号的大小有影响,但对于分形特征尺度没有影响。初始尺度的确定与原始数据数值大小有关,实际工作中可以通过试验确定合适的初始尺度。原始曲线采样点的数目对分形信

号的大小及特征尺度都有影响,从而影响了不同高光谱影像分形信号的可比性。

(4) 分形信号反映的是分形维的连续变化,因此分形信号特征尺度与原始曲线波谱异常波段没有对应关系,另外上分形和下分形信号特征尺度并不一定完全对应,这样给分形信号影像解释带来了一定的困难;其次基于分形信号的影像增强处理计算量比较大,算法需要进一步优化。另外本文只是对 Hyperion 影像资料进行了分析,对其他高光谱影像是否有较好的图像增强效果有待于进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Capobianco L, Garzelli A, Nencini F, *et al.* Spatial Enhancement of Hyperion Hyperspectral Data Through ALI Panchromatic Image[C]//Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, 2007;5158-5161.
- [2] Eismann M T, Hardie R C. Resolution Enhancement of Hyperspectral Imagery Using Coincident Panchromatic Imagery and a Stochastic Mixing Model[C]// IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data, 2004;282-289.
- [3] Guo Z H, Wittman T, Osher S. L1 Unmixing and Its Application to Hyperspectral Image Enhancement[C]// Proceedings of SPIE Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XV, Orlando, Florida, 2009;73341M-73341M-9.
- [4] Lopes R, Betrouni N. Fractal and Multifractal Analysis: A Review[J]. Medical Image Analysis, 2009, 13(4): 634-649.
- [5] Shelberg M, Lam N, Moellerling H. Measuring the Fractal Dimension of Surfaces[C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on Computer-assisted Cartography AutoCarto, 1983;319-328.
- [6] Peleg S, Naor J, Hartley R, *et al.* Multiple Resolution Texture Analysis and Classification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 661-674.
- [7] Clarke K. Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surfaces Using the Triangular Prism Surface Area Method[J]. Computers & Geosciences, 1986, 12(5): 713-722.
- [8] Qiu H L, Lam N S N, Quattrochi D A, *et al.* Fractal Characterization of Hyperspectral Imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1999, 65(1): 63-71.
- [9] Jayanta K G, Ankur S. Fractal-based Dimensionality Reduction of Hyperspectral Images [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2008, 36(3): 235-241.
- [10] Dong P L. Fractal Signatures for Multiscale Processing of Hyperspectral Image Data [J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1733-1743.

Fractal Signature based Hyperspectral Image Enhancement

ZHOU Zi-yong

*(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of
Petroleum, Beijing 102249, China)*

Abstract: Most of the hyperspectral image enhancement methods, which are applied to multispectral image processing, have not fully used the spectral information of hyperspectral data. The unmixing based enhancement method is limited by endmember selecting. A fractal signature based approach to image enhancement is presented in this paper. According to modified blanket method, the upper and lower fractal signature curve corresponding to original spectral curve of each pixel can be computed, and the formed fractal signature image at each scale is used for image enhancement. Three scenes of Hyperion image are experimented in the work, the corresponding upper and lower fractal signature images are computed. It can be seen from the fractal signature curves and images that ground targets are characterized differently by signature value and feature scale. The experiment result shows that the fractal signature image can outstand targets more saliently than the original data. Thus the proposed approach can be applied to hyperspectral image enhancement. The experimental result shows that the original curve, the selection of initial scale and number of sample has a significant impact on the fractal signature, and a brief discussion on these issue is presented.

Key words: Hyperspectral; Fractal signature; Image enhancement