

高光谱影像纹理特征编码分形特征研究

舒 宁¹ 苏俊英¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:提出了一种基于分形测度分析高光谱影像纹理的技术。根据高光谱影像纹理单元中相邻光谱矢量的相关关系构造方向性纹理特征,得到了一组纹理特征编码值,从纹理特征编码值本身、相同地物纹理特征编码自相似性和使用不同尺度测量纹理特征编码值构成的曲线所表现出来的幂指数关系三个方面,说明高光谱影像纹理特征编码曲线具有分形特征。设计了纹理特征编码曲线构建模型,采用纹理编码曲线的分形维值表征不同的纹理特征,达到区分和判别不同纹理的目的。试验表明,该方法对提取地物纹理特性具有可行性。

关键词:高光谱影像;纹理编码;分形分析

中图法分类号:P237.3

影像纹理是影像的一个重要属性,在影像分析中占据十分重要的地位。高光谱影像亦具有纹理,高光谱影像纹理分析可通过对光谱响应曲线的相似性编码、主成分分析编码、光谱空间密度分析编码等方法^[1],将高光谱数据映射为纹理特征编码影像,并在此基础上进行分类。因此,可将高光谱影像和光谱数据转化为数据代码,以代码向量匹配来推断影像的纹理类别,进行影像的纹理分析,为高光谱影像地物目标类别分析和识别奠定基础^[2]。光谱数据源自非线性的光谱成像过程,高光谱影像一个像元的纹理编码一般是通过光谱数据计算得到,这些编码可以看作一个不连续点的集合。采用分形测度对点集进行计算和分析,发现其具有分形特征,从而可以计算其分形维值,在分形维特征空间实现纹理特征编码的分析,来提高纹理编码的分析效率。

1 高光谱影像纹理及纹理特征编码

文献[1]指出,多(高)光谱影像纹理概念可以扩展和引申为光谱空间中地物目标光谱矢量在地物分布二维空间上的排列,或具有某种意义的分布,是地物光谱空间中点到地物分布二维空间的一种“映射模式”,不同的映射模式就是不同的纹理。对于高光谱影像纹理,只要设法解决地物光

谱空间点到它们的二维投影空间的映射模式,就可以解决高光谱影像纹理表达和分析问题^[1]。设地物目标光谱空间中的点集为 S ,地物目标二维投影空间为 P 。 S 中的每一个点是地物辐射(包括反射和发射)量测值矢量,通常也可以用地物光谱响应数值(影像灰度)来表示。地物目标为 $o(X,Y,Z,A)$,其中 (X,Y,Z) 是其空间坐标,如某一大地坐标系内的坐标, A 是其主要属性,那么, S 到 P 的映射关系可以表示为:

$$P = f(S) = \{o(i,j) \mid o(i,j) \in P, o(i,j) = g(l), l = m(s), s = b(o(X,Y,Z,A)), s \in S\} \quad (1)$$

式中, m 表示成像关系,是地物目标光谱矢量 s 到影像像元灰度矢量 l 的表达; s 是地物目标光谱特征的某种组合方式,可能是同一类型的地物目标光谱特征的组合,也可能是不同地物目标光谱特征的组合; $g(l)$ 是将地物光谱响应曲线编码的结果。

根据高光谱影像纹理概念,可以将高光谱数据按照某种映射关系转化为数据代码,这些数据代码的编码可用来表示高光谱影像纹理。通常可以通过计算纹理单元内光谱响应曲线的相关性、主成分分析和光谱空间密度分析等对高光谱影像进行纹理编码。对高光谱影像一个像元按照某种映射关系可以计算中心像元与邻域像元的关系,构成纹理单元。因此,一个像元与周围相邻像元

组成的纹理单元,其纹理编码实际上可以用不同方向上的纹理特征(如相关系数、光谱角等)依次排列来描述,表示在二维平面上就是一条纹理特征响应曲线,横坐标是方向,纵坐标是纹理特征值。纹理编码的思想是通过对比纹理特征响应曲线按照阈值法、差分法、特征提取法等进行编码,但這些方法形成的纹理编码都需要較多的数据来刻画纹理单元的特征,后续的分类计算也较为复杂。本文提出了一种分形测度刻画纹理特征编码的方法,通过分形维来表征纹理单元的纹理特征编码。

2 高光谱影像纹理编码的分形特征

遥感影像在空间上具有分形特征^[3-6],高光谱影像光谱响应曲线同样具有分形特征^[7],通过高光谱响应曲线计算得到的高光谱影像纹理特征编码也具有分形特点。

2.1 高光谱影像纹理特征编码曲线的非线性性质

分别取不同类型的地物,按照高光谱纹理编码方法,以中心像元的光谱响应曲线为基准,取 5 像素×5 像素窗口中各像元的光谱响应曲线计算其与中心像元光谱响应曲线的相似性。相似性的计算方法为:

$$\rho_{ij} = \rho(v_{ij}, v_{00}) = \frac{\sum_{k=1}^N g_{ij,k} g_{00,k}}{\sum_{k=1}^N g_{00,k}^2}$$

(2)

当 $\rho_{ij} > 1$ 时,
 $\rho_{ij} = 2 - \rho_{ij}, i = -2, -1, 0, 1, 2,$
 $j = -2, -1, 0, 1, 2$

式中, N 为波段数; $g_{00,k}$ 为中心像元第 k 波段的灰度值; $g_{ij,k}$ 表示 5 像素×5 像素窗口中编号为 ij 像元第 k 波段的灰度值。

由式(2)可见,由纹理编码值构成的纹理特征曲线是非线性的。对某一地区 30 个波段的 MAIS 影像(本文试验数据均取自该影像),分别选取河流、居民地和植被等地物中按照上述方法计算纹理编码值,其构成的纹理特征曲线如图 1 所示。

由图 1 可见,由纹理单元特征编码构成的曲线也是非线性的,与理论分析相符。

2.2 相同地物纹理单元编码构成的特征曲线具有统计自相似性

对于高光谱影像而言,光谱响应曲线之间的

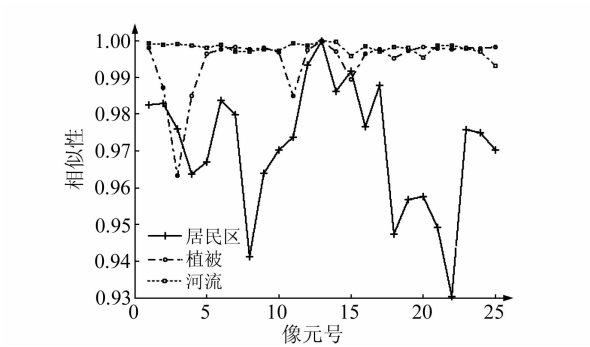


图 1 不同地物的纹理特征编码曲线
Fig. 1 Curve of Texture Feature Code of Different Objects

相关系数可衡量它们之间的相似程度,两个像元的光谱响应曲线之间的相关系数越大,表明它们在光谱空间中越接近,其差异越小。而对于一个像元与周围相邻像元组成的纹理单元的编码,经纹理特征编码统计分析,“相似性”较大的认为它们是具有某种相同类型纹理。因此,对于同样的地物而言,纹理单元编码相似性就大,此即纹理分析用于影像分类的基础。可见,相同地物纹理单元编码构成的特征曲线具有统计自相似性。

2.3 纹理单元特征编码曲线的分形特征

从 MAIS 影像选取河流、居民地和植被等地物样本计算其纹理编码特征曲线。对纹理单元编码构成的特征曲线按照不同步长 ϵ “测量”曲线长度 N_ϵ ,其初始步长为曲线长度的 $1/2N$,其中 N 为波段数,结果如表 1。

表 1 不同步长测量的纹理特征编码曲线长度
Tab. 1 Texture Code Curve Length Under Different Measurement Unit

居民地		植被		河流	
ϵ	N_ϵ	ϵ	N_ϵ	ϵ	N_ϵ
0.015 4	575.039 3	0.014 7	575.779 3	0.016 1	574.759 9
0.030 8	287.141 1	0.029 4	287.771 5	0.032 2	287.293 4
0.046 2	191.029 5	0.044 1	191.579 7	0.048 3	190.662 8
0.061 6	143.468 4	0.058 8	143.645 8	0.064 4	142.451 4
0.077 0	114.402 4	0.073 5	115.128 5	0.080 5	113.487 4
0.092 4	94.739 6	0.088 2	95.716 4	0.096 6	95.015 2
0.107 8	81.184 2	0.102 9	81.952 3	0.112 7	81.276 7
0.123 2	71.368 9	0.117 6	71.632 0	0.128 8	70.678 9
0.138 6	63.490 4	0.132 3	63.731 1	0.144 9	62.875 6
0.153 9	56.871 7	0.147 0	57.130 1	0.161 0	56.636 9
0.169 3	51.397 4	0.161 7	51.997 7	0.177 0	51.061 0
0.184 7	47.334 4	0.176 4	47.782 5	0.193 1	46.287 0
0.200 1	43.623 1	0.1911	43.880 1	0.209 2	43.239 2
0.215 5	40.530 0	0.205 8	40.958 4	0.225 3	39.920 3
0.230 9	37.731 2	0.220 5	38.193 1	0.241 4	37.225 5
0.246 3	35.417 1	0.235 2	35.719 1	0.257 5	35.313 0

由表 1 可知,随着步长增大,“测量”的曲线长度减小,并且减速趋缓,表现出纹理特征编码构成

的曲线长度与步长存在着类似幂指数关系的性质,表明纹理单元特征编码构成的曲线可以用分形维进行描述。记分形维为 D ,则有:

$$D = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\lg(N_{\epsilon})}{\lg(\epsilon)} \tag{3}$$

实际上,由于 ϵ 不可能趋于零,通常给定 ϵ 取值的一个集合,取 $\lg N_{\epsilon}$ 和 $\lg \epsilon$ 点对的线性拟合,拟合直线的斜率即为分形维 D 。以 $\lg N_{\epsilon}$ 为纵坐标, $\lg \epsilon$ 为横坐标,在双对数坐标系中拟合出直线,如图 2。

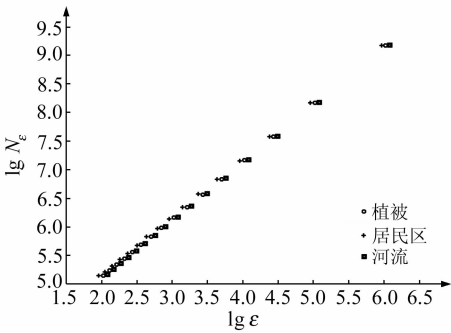


图 2 纹理编码特征曲线的分形特征

Fig. 2 Fractal Characteristic of Texture Code Curve

图 2 显示 $\lg \epsilon - \lg N_{\epsilon}$ 之间呈比较明显的线性关系。进行直线回归的结果表明,它们都达到了 $\alpha < 0.02$ 的显著性水平,表明该曲线具有分形特征。进而利用分形维值就可以刻画每一个像元所在纹理单元的纹理编码,为高光谱影像纹理编码分析提供了一种分形方法,为高光谱影像的纹理分析与判别提供了一条新的途径。

3 高光谱影像纹理特征编码的分形曲线模型

由于纹理是有方向性的,像元所在的纹理单元编码构成纹理特征曲线时,不同的构造方法影响到分形维值对纹理特征描述的准确性和精细性。选取一个 5 像素 \times 5 像素的区域作为纹理单元,以中心像元为 T 的纹理单元的像元编号如图 3(a)。纹理编码特征曲线由各个像元在纹理单元中的特征值(或编码值)构成,对于各个像元与中心像元计算的纹理特征值在纹理单元 5 像素 \times 5 像素的区域具有很多的灵活性,因此,需要对构成纹理特征曲线的各个像元特征值按照一定的顺序排列。同时,考虑到与中心像元距离不同的邻域点在同一纹理单元中的重要性不同,距离近的像元赋予较大的权值,距离远的相应权值小。纹理单元各像元的权值定义如图 3(b)。

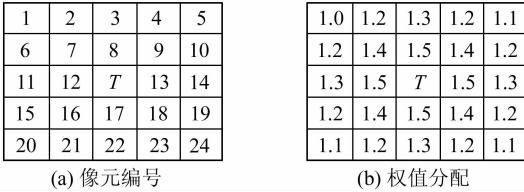


图 3 5 \times 5 纹理单元编码模型
Fig. 3 5 \times 5 Coding Model of Texture Unit

根据纹理单元各像元计算的纹理编码对中心像元的贡献,考虑到纹理编码的方向性以及分类比较的统一,提出按照如下模型构建纹理编码分形曲线。

1) 以中心像元 T 上方像元为起点,按顺时针方向分别取各个像元与中心像元 T 的光谱矢量相关系数构成曲线特征点,如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} \rho_{8,T} & \rho_{9,T} & \rho_{13,T} & \rho_{18,T} & \rho_{17,T} & \rho_{16,T} & \rho_{12,T} & \rho_{7,T} \\ \rho_{2,T} & \rho_{3,T} & \rho_{4,T} & \rho_{5,T} & \rho_{10,T} & \rho_{14,T} & \rho_{19,T} & \rho_{24,T} \\ \rho_{23,T} & \rho_{22,T} & \rho_{21,T} & \rho_{20,T} & \rho_{15,T} & \rho_{11,T} & \rho_{6,T} & \rho_{1,T} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, $\rho_{i,T}$ 表示编号为 i 的像元与中心像元 T 光谱矢量间的相关系数。

2) 按照图 3(b)分配的权值,以式(4)对曲线特征点加权,形成纹理编码的分形曲线:

$$C = \{w_i \rho_{i,T}, i = 8, 9, 13, 18, 17, 16, 12, 7, 2, 3, 4, 5, 10, 14, 19, 24, 23, 22, 21, 20, 15, 11, 6, 1\} \tag{5}$$

式中, w_i 表示编号为 i 的像元的权值, C 为纹理单元编码构成的分形特征曲线。图 4 给出了按照本文提出的基于纹理编码分形曲线构建模型在 30 个波段的 MAIS 影像分别选取河流、居民地和植被地物计算的纹理编码分形特征曲线。

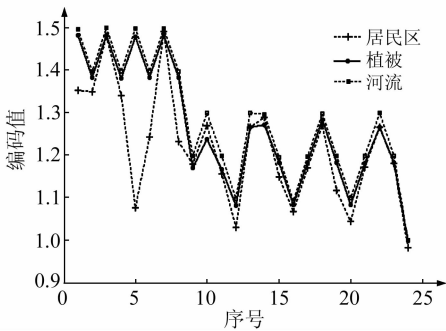


图 4 不同地物的纹理编码分形曲线
Fig. 4 Texture Codes Fractal Curve of Different Objects

由图 4 和图 1 可见,不同方向或顺序构造的纹理编码分形曲线有很大区别,构建的编码曲线模型如能使不同地物间这种方向性差别扩大将有利于地物的区分。本文提出的编码模型与图 1 直接顺

序构建的特征曲线相比,地物间的层次更加清晰,如河流和植被,曲线间的交叉减少,对于曲线的区分有利。同时,植被和居民区的纹理编码特征曲线间的差异越大,对于基于纹理编码曲线的分类处理更加有利,为后续建立在纹理编码特征曲线上的分形维生成的特征影像分析奠定了良好基础。

4 试验与结论

为了验证算法的有效性,按照上述纹理编码分形分析法对 MAIS 高光谱 30 个波段的影像计算得到纹理编码分形维特征影像。作为对比分析,又计算了纹理单元内各像元与中心像元间相关系数的方差,得到基于方差的纹理特征影像。分别对这两类影像进行非监督 ISODATA 分割,类别数为 10,迭代次数为 30。图 5 给出了 MAIS 高光谱影像基于纹理编码分形维值的特征影像分割结果,图 6 则给出了基于纹理单元相关系数方差的特征影像分割结果。



图 5 基于纹理编码分形特征的分割影像
Fig. 5 Image Segment Based on Texture Code Fractal Features



图 6 基于方差纹理特征的分割影像
Fig. 6 Image Segment Based on Texture Deviation Features

从图 5 可以看出,采用纹理编码分形特征影像分割时,植被、河流、居民地和空地均得到较好

的区分,分割对象的边界清晰。由于光谱特性和空间特性的融合,即使在一些居民地、空地内部,植被和道路都得到了较好的分割效果。纹理单元的分形维特征较传统的方差特征在细分地物和表现边界特征方面效果要好,表现在图 6 纹理方差特征影像的分割结果对左上角上的河流边滩上一些较小的水域、植被的误分,且分割结果间的边界不如分形维特征影像。试验结果表明,利用地物空间相关性和光谱特性进行纹理编码,进而采用分形测度计算纹理编码的分形维值,不但可以利用传统纹理分析方法中利用粗糙度和方向性判别不同纹理的思想,还将丰富的光谱信息充分地融入到纹理分析中,且计算相对直接对纹理编码匹配分类简单,取得了比较理想的效果,为高光谱影像的分割分类指出了一种新的方法,也为进一步研究分形测度在高光谱影像中的应用提供了思路。但本文算法在纹理编码曲线模型构建上比较简单,纹理是有方向的,不同类型纹理方向性一般不同,在构造纹理编码曲线模型方面还需进一步结合不同纹理类型考虑纹理的多方向性。

参 考 文 献

[1] 舒宁. 关于多光谱和高光谱影像的纹理问题[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(4): 292-295

[2] 刘楠, 舒宁. 多光谱影像纹理特征编码的算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 30(1): 15-18

[3] 舒宁. 卫星遥感影像纹理分析和分形分维方法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 370-373

[4] Shu Ning. Edge Extraction from Multi-spectral Images and Density Analysis of Super-dimensional Spectral Space[J]. SPIE, 2001, 4 550: 63-66

[5] Qiu H L, Lam N S N, Quattrochi D A. Fractal Characterization of Hyper Spectral Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 65: 63-71

[6] Weng Q. Fractal Analysis of Satellite-detected Urban Heat Island Effect[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69: 555-566

[7] 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·自然科学版, 2005, 26(6): 451-454

第一作者简介: 舒宁, 教授, 博士生导师。主要从事遥感影像分析处理及智能化研究。
E-mail: nshuwu@126.com