

doi: 10.3788/gzxb20124106.0672

一种基于修正扩展形态学算子的高光谱遥感 图像端元提取算法

王瀛, 梁楠, 郭雷

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘 要:形态学算子反映了像素的空间相关性信息,将其应用于高光谱遥感图像端元提取可以有效地提升算法性能.本文针对已经普遍用于高光谱遥感图像端元提取的扩展形态学算子在像元排序规则和替换准则上存在的局限性,引入了基准向量的概念并给出计算方法,提出了修正扩展形态学算子.修正后的排序规则和替换准则避免了图像中不同类别交界处的交叉替换现象,保证了正确的覆盖方向,是提高端元提取效果的关键步骤.通过修正扩展形态学算子的基本膨胀和腐蚀运算,定义了相应的开-闭运算和闭-开运算,由此得出了端元判定向量,并给出端元提取算法的详细流程.基于扩展形态学的自动端元提取算法可以综合考虑光谱和空间信息,端元提取效果优于仅依靠光谱信息的算法.算法由IDL7.0实现,并在AVIRIS于Cuprite地区的高光谱遥感图像上进行实验,实验结果从光谱曲线相似性、端元平均相似度和相应地物分布图等方面证明了算法的有效性.

关键词:高光谱图像;端元提取;形态学;混合像元;线性解混

中图分类号:TP751.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)06-0672-6

0 引言

高光谱遥感图像由搭载在航空器或卫星上的光谱成像仪获取,能够在可见光以及短、中、长波红外波段对某一场景或地物进行测量、分析和表征,包含了目标的空间影像、辐射强度以及光谱特性,是当代遥感的前沿技术.针对高光谱遥感图像的特性,在将其用于具体遥感应用前衍生了一些特有的图像预处理技术,包括端元提取、混合像元分解^[1]、数据降维^[2]等.端元是高光谱遥感图像中由单纯地物构成的像元,根据端元的光谱向量可以识别某个实际目标,由于高光谱成像仪的空间分辨率较低,成像瞬时现场通常包含多种地物^[3],因此高光谱遥感图像多由混合像元构成.在缺少先验知识的前提下,从一副高光谱遥感图像中提取端元,进而进行混合像元分解,是多数实际应用前必须的预处理工作,端元提取的正确与否直接影响后续的应用效果,如分类准确度、目标识别准确性等.目前常用的端元提取算法有基于凸面几何学概念的N-FINDR^[4]、最小体积变换^[5](Minimum Volume Transforms, MVT)算法;以平方误差为理论基础结合部分解混的迭代误差分析^[6](Iterative Error Analysis, IEA)算法;独立成

份分析^[7](Independent Component Analysis, ICA)算法等.上述的端元提取算法从高光谱数据的光谱特征信息和像元光谱间的相关性入手,并没有使用像素之间的空间相关性,Antonio Plaza等人将形态学算子引入高光谱遥感图像处理中,提出了扩展形态学算子下的自动形态学端元提取^[8](Automated Morphological Endmember Extraction, AMEE)算法,是一种结合空间和光谱信息的思路.本文在详细分析AMEE算法的基础上,针对该算法存在的局限性,提出了适用于高光谱遥感图像端元提取的修正扩展形态学算子,同时给出关键参量——基准光谱向量的计算方法.并将其用于端元提取,名为修正的自动扩展形态学端元提取(Automated Modified Extended-Morphological Endmember Extraction, AMEMEE)算法.简述了AMEE算法中扩展形态学算子的局限性,并给出修正方法以及关键参量的求取办法,将该算法应用于实际高光谱遥感图像,并将实验结果与常用算法进行了比较.

1 扩展形态学算子的修正方法

形态学算子是一种非线性图像处理技术,其基本概念来源于对空间代数学、拓扑学、随机几何学的

基金项目:国家自然科学基金(No. 60802084)资助

第一作者:王瀛(1976—),男,高级实验师,博士研究生,主要研究方向为高光谱遥感图像处理. Email: wangying@henu.edu.cn

导 师:郭雷(1956—),男,教授,博导,主要研究方向为模式识别与图像处理. Email: lguo@nwpu.edu.cn

收稿日期:2011-12-31; **修回日期:**2012-02-20

研究,最初应用于二值图像处理,而后扩展到灰度图像^[9]、红外图像^[10]等领域.形态学概念在高光谱遥感图像处理上的应用近年来也逐渐展开,在分类、混合像元分析、端元提取等方面都取得了良好的效果.经典形态学算子的处理对象是单波段像素,根据多波段光谱向量在形态学概念中的处理方式,可将形态学概念在高光谱遥感图像中的应用分为两大类:一类是用经典的形态学算子分别处理各个波段的数据(也可以是各个主成分),然后将处理结果融合成向量格式,此种处理方法多用于支持向量机分类^[11-12];另外一类是将光谱向量看作一个整体,用扩展形态学的概念对其进行运算,此种处理方式多用于端元提取和混合像元分析^[13].

1.1 扩展形态学算子

经典形态学算子通过比较结构元素(Structure Element, SE)中所有像素值的大小来决定对中心元素的操作.扩展形态学算子(Extended-Morphological Operator, EMO)将光谱向量作为整体处理,采用何种排序规则将决定对中心光谱向量的替换准则,进而影响扩展形态学算子最终的应用效果. Antonio Plaza 在 AMEE 算法中提出将 SE 中每个光谱向量与 SE 中其它光谱向量的距离之和作为排序准则

$$D_{\text{SUM}}[f(x, y), \text{SE}] = D_{\text{SUM}}[f(x, y), f(x + s, y + t)] = \sum_s \sum_t \text{Dist}[f(x, y), f(x + s, y + t)] \quad \forall (s, t) \in Z^2(B) \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为 N 维光谱向量, N 为波段数, $(x, y) \in Z^2$ 为 $f(x, y)$ 的二维离散空间坐标, $Z^2(B)$ 为结构元素 SE 的空间坐标范围, $\text{Dist}()$ 为两个光谱向量的距离测度,用以表征光谱间的相似性,常用的有欧式距离(Euclidean Minimum Distance, EMD)、光谱角(Spectral Angle Distance, SAD)、马式距离(Mahalanobis Distance, MD)、光谱信息散度(Spectral Information Divergence, SID)等. AMEE 算法中多采用光谱角 SAD.

$$\text{Dist}_{\text{SAD}}(\mathbf{a}_N, \mathbf{b}_N) = \theta_{\mathbf{a}_N, \mathbf{b}_N} = \arccos \frac{\langle \mathbf{a}_N, \mathbf{b}_N \rangle}{\|\mathbf{a}_N\| \|\mathbf{b}_N\|} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{a}_N, \mathbf{b}_N$ 为 N 维光谱向量. 综上, AMEE 定义出高光谱遥感图像适用的扩展形态学算子的膨胀算子为

$$(f \oplus B)(x, y) = \bigvee_{(s, t) \in Z^2(B)} \{D_{\text{SUM}}[f(x + s, y + t), \text{SE}]\} \quad (x, y) \in Z^2 \quad (3)$$

腐蚀算子为

$$(f \otimes B)(x, y) = \bigwedge_{(s, t) \in Z^2(B)} \{D_{\text{SUM}}[f(x - s, y - t), \text{SE}]\} \quad (x, y) \in Z^2 \quad (4)$$

AMEE 算法认为,在高光谱遥感图像上进行扩展膨胀运算可以造成纯像元覆盖混合像元的效果,反之扩展腐蚀运算则是混合像元覆盖纯像元^[14]. 同时, AMEE 算法还定义了形态离心率指数(Morphological Eccentricity Index, MEI)赋给结构元素 SE 中 $D_{\text{SUM}}[\]$ 最大的像元,以表征不同纯像元对结构元素内混合像元的偏离度.

$$\text{MEI}(m, n) = \text{Dist}_{\text{SAD}}[(f \oplus B)(x, y), (f \otimes B)(x, y)] \quad (5)$$

后续的端元提取则通过对整幅图像生成的 MEI 图做阈值分割操作完成.

1.2 扩展形态学算子的局限性及修正

AMEE 算法通过 EMO 中的膨胀和腐蚀运算来分离纯像元和混合像元,而通过大量的实践表明,扩展膨胀运算并不能保证纯像元对混合像元的覆盖,反之亦然. 其原因是受 EMO 中所采用的光谱向量排序规则所限,如式(1)所示,纯像元并不能保证在 SE 中取得最大的 $D_{\text{SUM}}[\]$. 通常情况下, SE 中最大的 $D_{\text{SUM}}[\]$ 值将由 SE 中光谱特征空间中最孤立的光谱向量得到,同理,最小的 $D_{\text{SUM}}[\]$ 值将由光谱特征空间中最大数据云团的中心光谱向量得到. 此外,由于 SE 中孤立的光谱向量易获得较大 $D_{\text{SUM}}[\]$ 值,因此当膨胀算子应用在图像中不同地物类别的边界处时,会造成交叉替换现象,产生“光栅”效应. 本文提出一种修正的扩展形态学算子(Modified Extended-Morphological Operator, MEMO),在原有的 EMO 基础上加以限制,以修正 SE 中像元的替换准则,修正后的膨胀算子为

$$(f \oplus B)_{\text{MEMO}}(x, y) = \text{Dist}[(f \oplus B)(x, y), \mathbf{V}_{\text{Ref}}] \vee \text{Dist}[f(x, y), \mathbf{V}_{\text{Ref}}] \quad (6)$$

修正后的腐蚀算子为

$$(f \otimes B)_{\text{MEMO}}(x, y) = \text{Dist}[(f \otimes B)(x, y), \mathbf{V}_{\text{Ref}}] \wedge \text{Dist}[f(x, y), \mathbf{V}_{\text{Ref}}] \quad (7)$$

式中 \mathbf{V}_{Ref} 为基准向量,将 (x, y) 处原光谱向量以及 EMO 输出光谱向量与基准向量的距离进行比较,来判定光谱向量的纯度,进而决定替换操作.

将 EMO 和 MEMO 中的膨胀算子作用于模拟高光谱图像,可以看出二者在膨胀效果上的区别. 模拟高光谱图像 SimHyp 包含 5 个纯像元目标即端元,分别位于四角和中心位置,背景为由端元线性混合而成的混合像元. SimHyp 空间分辨率为 200×200 ,光谱波段数为 50,端元各占 10×10 空间大小. SimHyp 第 12 波段的灰度拉伸图见图 1(a),分别以空间大小为 3×3 的 SE 对 SimHyp 做 5 次 EMO 和 MEMO 定义下的膨胀运算,结果图分别如图 1(b) 和图 1(c). 由图 1 可以看出,经过上述两种膨胀运

算,端元区域均得到放大,而根据前面所分析 EMO 下膨胀算子的特征,图 1(b)显示了明显的由交叉替换产生的“光栅”效应,产生的原因即 EMO 定义下的光谱向量排序和替换准则;修正的 MEMO 由于加入了限制条件,保证了纯像元的正确替换,如图 1(c).

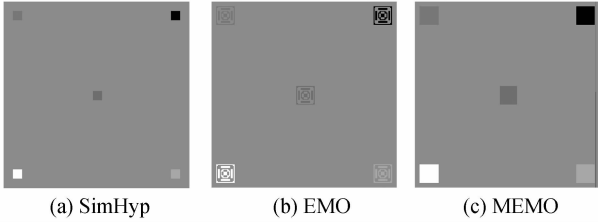


图 1 仿真图像的膨胀运算效果比较

Fig.1 Comparison on dilation results of simulation image

1.3 基准向量的计算

MEMO 通过引入基准向量避免交叉替换现象,以获得正确的膨胀和腐蚀效果,基准向量 \mathbf{V}_{Ref} 的计算和采用合适距离测度是式(6)、(7)的关键.当一副高光谱遥感图像组成不复杂时,如仿真图像 SimHyp,可以采用整幅图像的均值向量作为 \mathbf{V}_{Ref} ,计算简单,便于实现.而现实中高光谱遥感图像空间相关性和光谱相关性都较复杂,采用均值向量无法保证 MEMO 中替换准则的正确性,因此本节提出一种计算 \mathbf{V}_{Ref} 的方法,保证纯像元和 \mathbf{V}_{Ref} 的欧式距离大于混合像元.求取 $\mathbf{V}_{\text{Ref}} = \{x_1 \cdots x_n\}$ 的算法大致分为两步:首先根据 Chein-I Chang 提出的单形体增长算法(Simplex Growing Algorithm, SGA)^[15] 求出特征空间数据云团的 $N+1$ 个边界点 V_0, V_1, \dots, V_N , N 为光谱波段数;然后求解方程组(8).

$$\begin{aligned} \text{Dist}_{\text{EMD}}(\mathbf{V}_{\text{Ref}}, V_0) &= x_{n+1}^2 \\ \text{Dist}_{\text{EMD}}(\mathbf{V}_{\text{Ref}}, V_1) &= x_{n+1}^2 \\ &\vdots \\ \text{Dist}_{\text{EMD}}(\mathbf{V}_{\text{Ref}}, V_N) &= x_{n+1}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\text{Dist}_{\text{EMD}}()$ 为欧式距离,本文用改进的 Powell 混合算法求解上述非线性方程组.

2 基于修正扩展形态学算子的端元提取算法

在进行端元提取的过程中,将 MEMO 中的膨胀和腐蚀运算结合成具有保持目标空间大小能力的开运算和闭运算.

$$(f \circ B)_{\text{MEMO}}(x, y) = ((f \otimes B)_{\text{MEMO}} \oplus B)_{\text{MEMO}} \cdot (x, y) \quad (9)$$

$$(f \cdot B)_{\text{MEMO}}(x, y) = ((f \oplus B)_{\text{MEMO}} \otimes B)_{\text{MEMO}} \cdot (x, y) \quad (10)$$

将开运算和闭运算交替运用于同一个像元,即

组成具有非偏颇、双向性的开-闭运算和闭-开运算.

$$(f, B)_{\text{MEMO}}^{\text{open-close}}(x, y) = ((f \circ B)_{\text{MEMO}} \cdot B)_{\text{MEMO}} \cdot (x, y) \quad (11)$$

$$(f, B)_{\text{MEMO}}^{\text{close-open}}(x, y) = ((f \cdot B)_{\text{MEMO}} \circ B)_{\text{MEMO}} \cdot (x, y) \quad (12)$$

以空间尺寸递增的 SE 对原高光谱遥感图像做 n 次开-闭运算和闭-开运算,定义判定向量为

$$\begin{aligned} DV^{\text{open-close}} &= \{\alpha_0, \dots, \alpha_{n-1}\} \\ \alpha_{k-1} &= \text{Dist}_{\text{SAD}}[(f, B)_{\text{MEMO}}^{\text{open-close}}(x, y)^k, \\ &\quad (f, B)_{\text{MEMO}}^{\text{open-close}}(x, y)^{k-1}] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} DV^{\text{close-open}} &= \{\beta_0, \dots, \beta_{n-1}\} \\ \beta_{k-1} &= \text{Dist}_{\text{SAD}}[(f, B)_{\text{MEMO}}^{\text{close-open}}(x, y)^k, \\ &\quad (f, B)_{\text{MEMO}}^{\text{close-open}}(x, y)^{k-1}] \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $k = (1, \dots, n)$. 实验证明,纯像元判定向量 $DV^{\text{open-close}}$ 的元素值差别较大,最大数值的出现位置与 SE 的空间尺寸有关,而判定向量 $DV^{\text{close-open}}$ 的元素值则无太大变化,一般情况下约等于零;对于混合像元,情况则正好相反.判定向量具备如上特性,结合了光谱信息和空间分布信息,是端元提取的重要依据.

本文提出的 AMEMEE 算法首先对原始高光谱遥感图像做以修正扩展形态学为基础的空间非线性滤波,然后根据得到的判定向量进行端元提取,并在端元提取过程中注意消除已获知端元的影响,具体步骤简述如下:

1) 对于原始高光谱遥感图像,如有先验知识,可先做降维预处理,如没有足够的先验知识或者考虑保持小目标,也可不做降维.

2) 采取虚拟维度法(Virtual Dimensionality, VD)^[16] 估计端元数目或者设定误差限作为算法终止条件.

3) 确定初始 SE 空间尺寸以及迭代次数 n .

4) 计算基准向量 \mathbf{V}_{Ref} .

5) 对原始图像做 n 次基于 MEMO 的开-闭运算和闭-开运算,输出每个像元判定向量 $DV^{\text{open-close}}$ 用于端元提取和 $DV^{\text{close-open}}$ 用于混合像元分析.

6) 将含有最大数值元素 $DV^{\text{open-close}}$ 所对应的像元作为一个端元输出.

7) 消除已获取端元影响,用光谱相似性度量,将与已知端元相似像元所对应的 $DV^{\text{open-close}}$ 置为零;或者向以获取端元的正交子空间投影,将受到压制像元所对应的 $DV^{\text{open-close}}$ 置为零.

8) 若未达到步骤 2) 设定的终止条件,则重复步骤 6).

3 实验与分析

本文实验用于端元提取的高光谱遥感图像来自

于美国内华达州 Cuprite 地区,由机载可见光/红外光谱成像仪 (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS) 获取. AVIRIS 的波长范围为 370~2 480 nm,光谱分辨率 10 nm,Cuprite 数据含 224 个波段,移除水吸收和低信噪比波段后,余 189 个有效波段. 本文采用该数据的短波红外部分 (波长 1 990~2 479 nm),包含 50 个波段,空间分辨

率 350×400,由 ENVI 软件提供. 由于 Cuprite 地区地表多为裸露矿物,且经过多次地面实际堪测,因此 Cuprite 数据多用于验证各种端元提取以及混合像元分析算法. 算法采用正方形的 SE,空间尺寸由 3×3 开始逐次递增,迭代次数 n 设为 10,端元提取结果与参考光谱的比较如图 2.

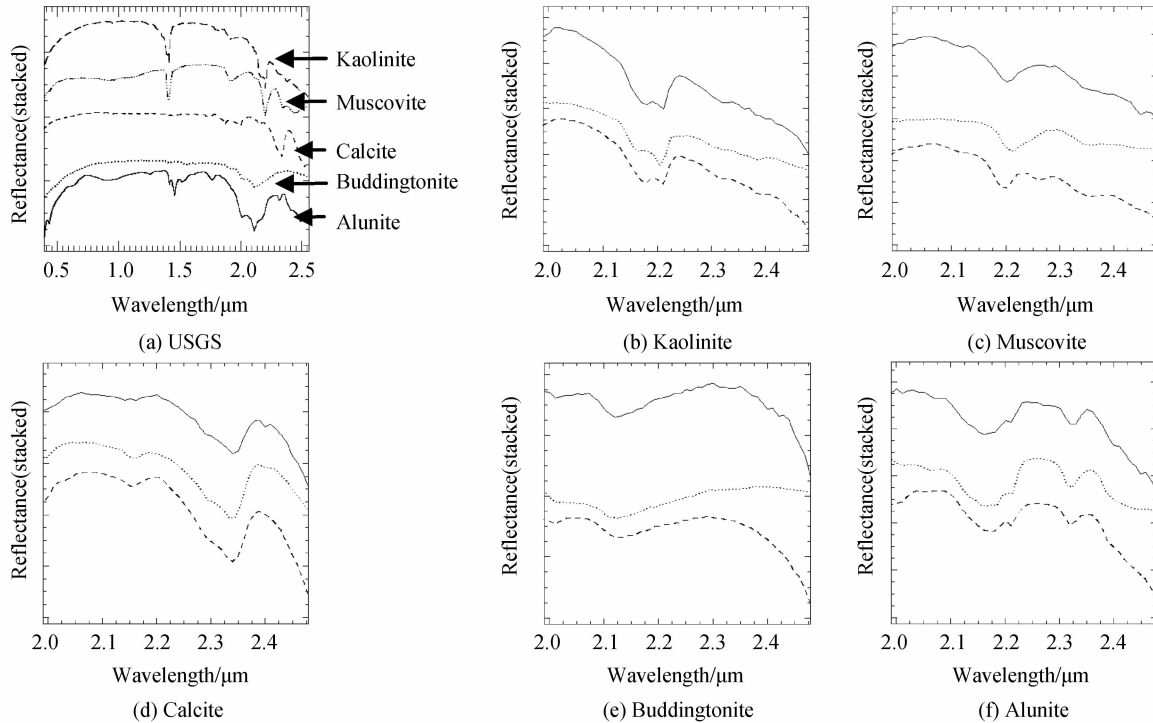


图 2 端元提取效果比较
Fig. 2 Comparison on endmember extraction results

图 2(a) 给出了 Cuprite 地区 5 种常见矿物 USGS 光谱库中的实测光谱曲线,以及本文算法 AMEMEE 提取的端元与实测光谱曲线以及 ENVI 公布的该地物平均端元光谱曲线的比较图 (b)~(f). 为便于观察,光谱曲线采用堆叠方式排列,在 (b)~(f) 中,本文提取端元光谱曲线用实线表示,USGS 光谱库中参考光谱用点线表示,ENVI 给出

的平均光谱用虚线表示. 从图中可以看出,本文提取的端元光谱曲线与参考光谱有较好的吻合,正确反映了不同矿物在不同波段的吸收特征. 以 SAD 为光谱相似性度量,比较本文算法 AMEMEE、AMEE、N-FINDR、PPI、IEA、ENVI 自带端元提取过程 SMACC 等常用算法所输出的端元集与相应实际地物参考光谱的相似度,结果见表 1.

表 1 光谱相似度比较
Table 1 Comparison on spectra similarity

Algorithms	Similarity score (Spectral Angle Distance in radian)							Average similarity
	Kaolinite	Muscovite	Calcite	Buddingtonite	Alunite	Zeolite	Silica	
AMEMEE	0.059 72	0.064 81	0.051 12	0.087 92	0.072 19	0.095 15	0.087 54	0.074 06
AMEE	0.066 81	0.075 41	0.052 17	0.106 88	0.087 25	0.091 58	0.088 17	0.081 18
N-FINDR	0.099 12	0.122 52	0.122 97	0.142 11	0.098 75	0.115 87	0.100 85	0.114 60
PPI	0.122 81	0.154 12	0.115 89	0.121 57	0.100 18	0.134 87	0.111 89	0.123 05
IEA	0.060 57	0.062 18	0.078 12	0.098 12	0.099 95	0.108 78	0.099 82	0.086 79
SMACC	0.078 94	0.072 16	0.065 78	0.100 28	0.087 25	0.127 88	0.100 59	0.090 41

从表 1 的数据可以看出,AMEE 由于综合考虑了空间和光谱信息,端元提取效果优于其他单独依

赖光谱信息的算法,而本文提出的 AMEMEE 算法修正了扩展形态学中的排序和替换准则,进一步提

高了提取端元的纯度. 用提取的端元集对原始图像进行线性解混操作, 即可得到各地物在图像中的分布图. 图 3 给出了由本文算法提取的端元集线性解混得到的 Cuprite 地区三种常见矿物的分布. 通过

比较可以看出, 图 3 显示的地物分布与 USGS 公布的 Cuprite 地区矿物分布和 Fred A. Kruse 在该地区所做的矿物填图工作都有很好的吻合, 这也从侧面证明了本文端元提取算法的有效性.

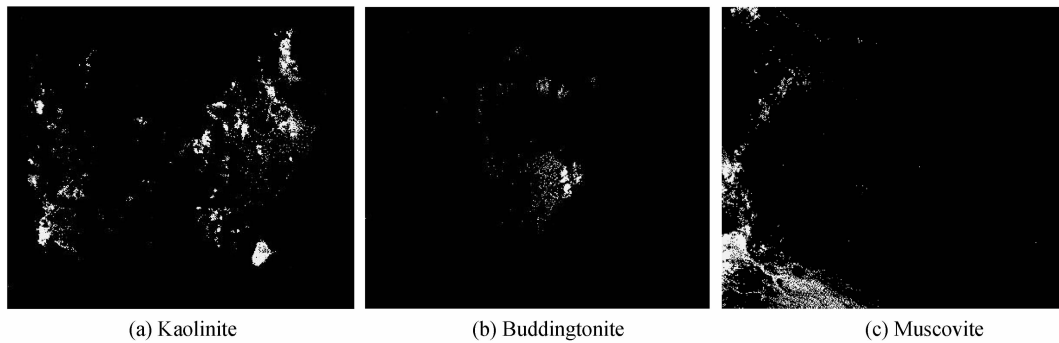


图 3 端元对应的矿物分布图

Fig. 3 Mineral distribution maps for endmembers

4 结论

本文在研究 AMEE 算法——扩展形态学算子的基础上, 从 SE 中像元的排序规则和替换准则入手, 提出了修正扩展形态学算子, 并将其应用于高光谱遥感图像端元提取. 本文提出的 AMEMEE 算法, 克服了原扩展形态学算子造成的像元交叉替换现象, 通过引入基准向量 V_{Ref} , 保证了膨胀和腐蚀的正确替换方向, 同时结合了光谱和空间信息, 从而提升了端元提取效果. 实验数据从端元波形、相似性、相应地物分布制图等方面证明了本文算法的有效性. 本文后续相关工作主要分为两部分, 一是从数据信息本身出发, 结合每次形态学计算结果自适应求取 V_{Ref} , 提升后续形态学滤波的效果; 二是研究扩展形态学算子在高光谱遥感图像其他领域的应用.

参考文献

- [1] LI Xi, CHEN Xue-hong, CHEN Xiao-ling, *et al.* Blind unmixing of hyperspectral mixed pixels assisted by wavelet packet decomposition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 835-842.
李熙, 陈学泓, 陈晓玲, 等. 小波包分解支持下的高光谱混合像元盲分解[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 835-842.
- [2] WANG Shuang, HUANG Min, ZHU Qi-bing. Optimal wavelength selection of hyperspectral scattering images based on UVE-PLS projection analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 428-432.
王爽, 黄敏, 朱启兵. 基于无信息变量和偏最小二乘投影分析的高光谱散射图像最优波段选择[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 428-432.
- [3] KESHAVA N. A survey of spectral unmixing algorithms[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2003, **14**(1): 55-78.
- [4] WINTER M E. A proof of the N-FINDR algorithm for the automated detection of endmembers in a hyperspectral image [C]. *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery X*, Proc. SPIE, 2004, 5425:31-41.
- [5] CRAIG M D. Minimum-volume transforms for remotely sensed data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(3): 542 - 552.
- [6] NEVILLE R A, STAENZ K, SZEREDI T, *et al.* Automatic endmember extraction from hyperspectral data for mineral exploration[C]. in Proc. 21st Can. Symp. Remote Sensing, Ottawa, ON, Canada, 1999.
- [7] WANG Jing, CHANG Chein-i. Applications of independent component analysis in endmember extraction and abundance quantification for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(9): 2601-2616.
- [8] SETOAIN J, PRIETO M, TENLLADO C, *et al.* Parallel morphological endmember extraction using commodity graphics hardware[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2007, **4**(3): 441-445.
- [9] YU Yang, ZHANG Xu-ping. General theory research on morphological correlation for Gray-Scale face recognition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 299-303.
余杨, 张旭苹. 灰度人脸识别形态学相关的一般理论研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 299-303.
- [10] HUI Jian-jiang, LIU Zhao-hui, LIU Wen. Application of mathematical morphology on infrared image of multi-dimensional target[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 626-629.
惠建江, 刘朝晖, 刘文. 数学形态学在红外多弱小目标提取中的应用[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 626-629.
- [11] FAUVEL M, BENEDIKTSSON J A, CHANUSSOT J, *et al.* Spectral and spatial classification of hyperspectral data using SVMs and morphological profiles [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(11): 3804-3814.
- [12] VELASCO-FORERO S, ANGULO J, CHANUSSOT J. Morphological image distances for hyperspectral dimensionality exploration using Kernel-PCA and ISOMAP [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009*, IEEE International, 2009, 3: 109-112.
- [13] PLAZA A, MARTINEZ P, PEREZ R, *et al.* A new approach to mixed pixel classification of hyperspectral imagery based on extended morphological profiles [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(6): 1097-1116.
- [14] PLAZA A, MARTINEZ P, PLAZA J, *et al.* Dimensionality reduction and classification of hyperspectral image data using sequences of extended morphological transformations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005,

- 43(3): 466-479.
- [15] CHANG Chein-i, Wu Chao-cheng, Liu Wei-min, *et al.* A new growing method for simplex-based endmember extraction algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2804-2819.
- [16] CHANG Chein-i, Du Qian. Estimation of number of spectrally distinct signal sources in hyperspectral imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 608-619.

A Hyperspectral Remote Sensing Image Endmember Extraction Algorithm Based on Modified Extended-morphological Operator

WANG Ying, LIANG Nan, GUO Lei

(*Institute of Automatic, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710129, China*)

Abstract: Applying the morphological operator, which characterizes the spatial correlative informations of pixels, to endmember extraction of hyperspectral remote sensing image can improve the performance of algorithm effectively. In order to overcome the limitations in sorting rules and replacing criteria of extended-morphological operator, which is commonly used in hyperspectral remote sensing image to extract endmembers, the modified extended-morphological operator is proposed after introducing the concept and presenting the calculating method of reference vector. The cross-replacement phenomena at the junction of different classes can be avoided and the correct coverage direction can be ensured when the modified sorting rules and replacing criteria have been applied in endmember extraction algorithm to enhance the results as key means. The endmember extraction algorithm using the determine profiles, generated after open-close and close-open operations defined by basic dilation and erosion operations of modified extended morphology, is described in detail. The automated modified extended-morphological endmember extraction algorithm is achieved by using both spatial and spectral information in a combined manner, thus, the endmember extraction result is superior to the approaches designed from a spectral information viewpoint only. The algorithm is implemented in IDL7.0 and tested by using real hyperspectral imagery collected by airborne visible/infrared imaging spectrometer in cuprite area, the experimental results of the similarity on spectral curves, the average similarity and the mineral distribution maps verified the validity of the algorithm.

Key words: Hyperspectral image; Endmember extraction; Morphology; Mixed pixel; Linear unmixing