

一种基于高维空间凸面单形体体积的高光谱图像解混算法^{*}

耿修瑞 张兵 张霞 郑兰芬

中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要 基于三角形中一个简单的含量与体积比的关系: 三角形 ABC 内的任何一点 P 与三角形任意两个顶点(比如 B, C)构成的面积 PBC 与整个三角形 ABC 的面积之比即为另一个顶点 A 在 P 中的含量. 将其推广并且严格证明了上述规律对于高维空间中凸面单形体仍然成立. 基于上述结论, 对在 Cuprite 获取的 AVIRIS 数据进行了光谱解混的实验验证, 取得了良好的实验效果.

关键词 高光谱 混合像元 端元 凸面单形体

高光谱分辨率遥感或成像光谱遥感技术的发展是 20 世纪最后 20 年中人类在对地观测方面所取得的重大技术突破之一, 是当前的遥感前沿技术. 从 20 世纪 80 年代初开始, 世界范围的航空高光谱遥感飞速发展. 在“九五”和“十五”期间, 中国科学院上海技术物理研究所成功研制了 PHI 推帚式高光谱成像仪和 OMIS 实用型模块化高光谱成像仪, 它们在促进我国高光谱遥感理论与应用研究方面发挥了重要作用. 在航空遥感技术进步的同时, 航天高光谱遥感也蓬勃发展起来. 近年来, 国外相继发射了一系列高光谱遥感卫星, 如美国 EO-1 卫星中的 HYPERION, MightySat-II 中的 FTHSI, EOS 系统中的 MODIS, ASTER, 美国以及欧空局 ENVISAT 系统中的 MERIS, 欧空局 PROBA 卫星中的 CHRIS 等. 除美国和欧洲以外, 澳大利亚和日本也有自己一套完整的航天高光谱遥感系统发展计划, 澳大利亚有 ARIES 系统, 日本也将在今后 5 年内发射自己的高光谱卫星. 在我国的神舟三号无人飞船中就搭载了一个中分辨率的成像光谱仪(CMODIS), 另外, 在我国的环境与减灾小卫星星座中, 也包括

有高光谱传感器. 通过高光谱成像, 或成像光谱技术所获取的地球表面的图像包含了丰富的空间、辐射和光谱三重信息. 它既表现了地物空间展布的影像特征, 同时也可能以其中某一像元或者像元组获得它们的某些特殊目标的辐射强度以及光谱信息. 影像、辐射与光谱这三个遥感中最重要的特征的合一就成为了高光谱成像.

在遥感图像中, 每一个像元的光谱辐射值都是由此像元对应的地面瞬时视场内的所有目标的辐射叠加而成的, 如果此视场内包括不止一种地物, 那么此像元就为混合像元. 受限于传感器的空间分辨力以及地物的复杂多样性, 一般情况下, 遥感图像中的像元大多为混合像元. 如何有效的解译混合像元是遥感应用中的关键问题之一, 过去光谱解混一直受限于传感器的低光谱分辨力, 成像光谱遥感技术的发展给这一状况带来了转机. 高光谱数据所具有的大量波段的能力使得对复杂场景的解混成为可能, 此外, 也可以根据高光谱图像中的端元直接对图像进行分类.

近些年来, 研究人员提出了许多解译混合像元

2004-01-08 收稿, 2004-02-18 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40271085)、中国科学院遥感研究所知识创新课题(课题号: CX020018)资助项目

E-mail: gengxr@sina.com.cn

的有效算法, 归纳起来, 有线性模型和非线性模型两大类. 其中线性模型更以其简单、有效、实用的特点被广泛研究和应用. 此模型假设图像中的任意像元 P 都可以有一些纯粹像元(端元) $R_i (i=1, \dots, n)$ 线性混合而成:

$$P = \sum_{i=1}^n c_i R_i + E, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i = 1, 0 \leq c_i \leq 1, \quad (2)$$

其中 n 为图像中包含的端元数目, c_i 表示像元 P 中端元 R_i 所占的比例, E 为误差项. 基于线性混合模型的解混算法有很多种, 主要包括最小二乘法^[1]、凸面几何学模型^[2]、滤波向量算法^[3]、独立成分分析^[4]等. 其中本文将提出一种新的几何模型作为我们解混算法的理论依据.

1 算法的背景及分析

光谱解混一般分为两个步骤, 首先需要先求出图像中的所有端元, 然后再根据 (1), (2) 式进行解混. 国际上, 如何从高光谱图像中提取端元一直是一个热点问题, 在这方面, 已经有很多成熟的方法被提出和应用, 比较著名的有 PPI^[5], N-FINDR^[6], ORASIS^[3], MEST^[7], IEA^[8]等. 我们所应用的端元提取算法基于一个与数据维数无关的凸面单形体体积的公式^[1]. 关于解混算法, 最小二乘法是迄今为止应用最为广泛的算法, 它给出了 (1), (2) 式均方误差意义下的最佳解, 但是由于其解的表达式多次用到矩阵的乘积及求逆, 所以时间复杂度比较大; Boardman 的凸面几何学模型给出了一种线性解混的好思路, 但是其算法需要高光谱数据的维数比端元的个数少一, 于是在解混之前必须对进行有效通道的选择或者对数据进行降维处理; 滤波向量法是一种快速的线性解混算法, 它针对所有端元生成了一组匹配滤波器, 其中的每个滤波器只与一个端元相匹配而不让其他的所有端元通过(即与其他的所有端元均正交), 但此算法的主要侧重点是目标探测, 而对解混结果的精度要求不高; 独立成分分析又是一种新颖的解混算法, 它以各种

信号源的统计意义下的相互独立为前提, 但高光谱数据的各个端元一般不满足此要求. 我们根据高光谱数据在高维波段空间中散点的分布为凸面单形体这一特点, 提出了一种新的几何模型, 并将模型成功地应用于高光谱图像的线性解混.

高光谱图像中的每个像元都是其 N 维波段空间中的一个点 (N 为图像的波段数), 其中有一些称之为端元的点构成了高光谱图像的基本元素, 图像中的所有像元都可以由这些端元线性组合而成(省略去误差项 E), 正如 (1), (2) 式所示. 而满足上述两式的所有点的集合正好构成一个 $n-1$ 维空间的凸集, 这些端元则坐落于这个凸面单形体的顶面上. 凸面几何学模型正是以高光谱数据在波段空间的这一特殊的几何特性为基本依据, 我们下面将要给出的解混算法也是以此为重要依据.

以两个波段、3 个端元为例来阐明我们算法的原理, 如图 1, 像元 P 是以端元 A, B, C 为顶点的三角形内部的一个点, 则此像元中端元 A, B, C 对应的地物的含量分别为:

$$c_1 = \frac{S_{PBC}}{S_{ABC}}, c_2 = \frac{S_{PAC}}{S_{ABC}}, c_3 = \frac{S_{PAB}}{S_{ABC}}, \quad (3)$$

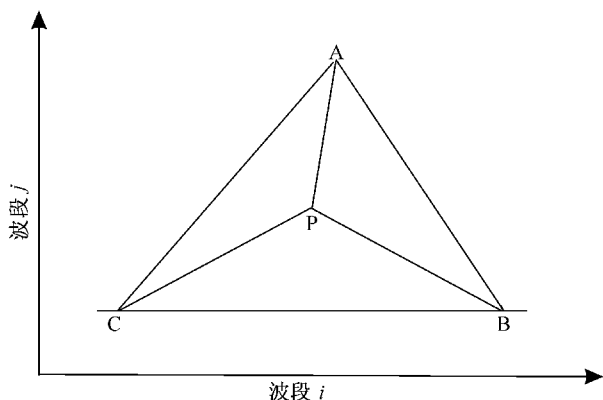


图 1 二维情况下混合像元中各端元比例的几何示意图

其中 S_{ABC} 为三角形 ABC 的面积, S_{PBC} , S_{PAC} 和 S_{PAB} 也分别是相应三角形的面积. 我们把上述结论推广到了高维空间, 并且证明了在高维空间中对于凸面单形体仍有上述规律成立. 我们的光谱解混算法引用高维空间凸面单形体的体积公式^[1]

$$G = (P_1, P_2, \dots, P_n), \quad (4)$$

$$V(O, P_1, P_2, \dots, P_n) = \frac{1}{(n-1)!} \sqrt{|G^T G|}, \quad (5)$$

其中 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为图像中的任意像元. O 为图像波段空间的原点. $V(O, P_1, P_2, \dots, P_n)$ 为以 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 以及原点为顶点 O 的凸面单形体的体积. 这里, 把原点 O 当作图像的一个已知端元, 为了描述方便起见, 下面均把 $V(O, P_1, P_2, \dots, P_n)$ 记为 $V(O, P_1, P_2, \dots, P_n)$. 在给出完整的解混算法之前我们先证明如下引理:

引理 矩阵 G 的初等行(列)变换不改变行列式 $|G^T G|$ 的值.

证 令 $F = F[i, j(k)]$ 表示把矩阵的 j 行的 k 倍加到 i 行的初等矩阵.

则显然有 $|F| = 1$.

令 $B = GF$,

于是有 $|G^T G| = |F^T| \cdot |G^T G| \cdot |F| = |F^T G^T GF| = |B^T B|$.

下面的定理就是我们的光谱解混算法的理论依据:

定理 记 $V_0 = V(R_1, R_2, \dots, R_n)$,

$V_i = V(R_1, \dots, R_{i-1}, P, R_{i+1}, \dots, R_n)$,

则有
$$c_i = \frac{V_i}{V_0}$$

证 令 $D =$

$$\left(\sum_{i=1}^n c_i R_1, R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n \right),$$

由(1)式有

$$\begin{aligned} V_i &= V(R_1, \dots, R_{i-1}, P, R_{i+1}, \dots, R_n) \\ &= V(P, R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n) \\ &= V\left(\sum_{i=1}^n c_i R_1, R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n\right) \\ &= V(D) \\ &= V(DF[1, 2(-c_1)] F[1, 3(-c_2)] \dots F[1, i(-c_{i-1})] F[1, (i+1)(-c_{i+1})] \dots F[1, n(-c_n)]), \\ &= V(c_i R_i, R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n) \\ &= c_i V(R_i, R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n) \\ &= c_i V_0 \end{aligned}$$

从而有

$$c_i = \frac{V_i}{V_0}.$$

定理的意义在于, 它把高光谱图像的混合像元中各个端元所占的比例归结为一个简单的体积比: 凸面单形体内任意一点 P 与凸面单形体的顶点集 $(O, R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n)$ 所围成的体积 V_i 与凸面单形体的所有顶点 $(O, R_1, R_2, \dots, R_n)$ 所围成的体积 V_0 之比即为端元 R_i 在混合像元 P 中所占的比例. 与最小二乘法相比, 由于比例系数 $c_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的求解表达式只用到了矩阵乘积及行列式的运算, 所以时间复杂度会相应降低, 同时不会出现 $c_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为负数的情况; 与凸面几何学模型相比, 虽然都运用了高光谱图像在波段空间中呈现凸面单形体这一几何特性, 但是本文又引入了一种含量与体积比的关系, 并且本文所提出的算法不需要对原始数据降维, 从而不会导致‘忽视’小目标的现象; 滤波向量法是一种快速的混合像元解混算法, 但是匹配滤波向量的本性使得其算法更加侧重于‘求异’, 所以经常被应用于目标探测; 与独立成分分析相比, 本文中的算法显然更加有效利用了高光谱数据本身所特有在波段空间中的几何分布特点以及它们之间内在的含量与体积比的关系, 因而取得更好的解混效果是必然的.

我们的解混算法基于光谱的线性混合模型, 如果光谱的混合严格满足(1)和(2)式, 并且假设我们可以精确地求出图像中的所有端元, 那么定理就给出了线性解混的解析解. 但实际中得到的图像一般不满足以上要求. 首先, 由于阴影、多次反射以及传感器的空间展布函数等因素的影响, 使得光谱混合表现为非线性; 其次, 由于地物的复杂多样性, 一组高光谱影像中一般都存在有多种地物, 即使是同一种地物, 它们之间在光谱表现上也不可能做到完全一致, 理论上求出图像中的所有端元是不可能的; 另外, 图像中部分异常点也有可能被选做端元参与光谱解混, 这样难免会给解混结果带来一定的偏差. 虽然线性混合模型存在有以上不足, 但在实践中它仍然被广泛的应用, 并且取得了不少成功的典例.

2 实验验证

我们利用 ENVI 上自带的在 Cuprite 获取的 AVIRIS 数据进行端元提取及光谱解混的实验(如图

2). AVIRIS 是一种高质量低噪声的高光谱仪器, 包含 224 个波段(波长范围为 400~2500 nm), 这里我们将选取其中短波红外的 50 个连续的波段(1978~2478 nm)进行算法的验证.

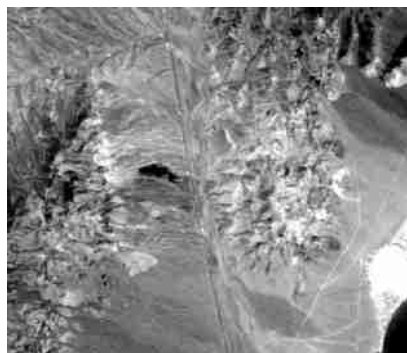


图 2 用于处理 Cuprite 区域的 AVIRIS 数据假彩色合成图
(2101 nm, 2200.8 nm, 2340.2 nm)

首先利用文献[7]中的端元提取算法从图像中求出 8 个端元, 图(3)为从图像中提取的部分端元光谱; 然后利用定理 1 对整个图像进行光谱解混, 图(4)显示了部分光谱解混成分图.

对整个图像进行光谱解混之后, 将得到每个端元所对应地物的成分分布图, 图中每个像元元素的值都与某一端元在高光谱图像同一位置像元中所占的比例相对应. 比如, 图(4)为此区域 3 种矿物的分布情况, 这个结果与文献[8]中的结论有着很好的吻合. 通过光谱解混, 不但对整个高光谱图像中所含地物以及它们的分布情况一目了然, 而且对图像中的任何一个像元内部各种地物的比例关系也有了清晰的了解.

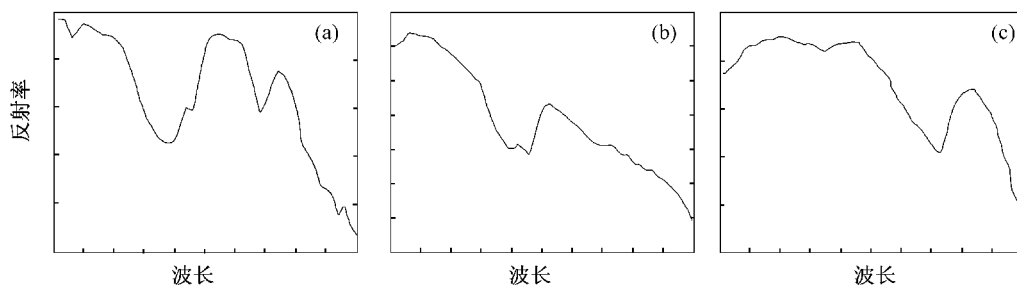


图 3 从 Cuprite 区域的 AVIRIS 数据中获取的三个端元
(a) alunite; (b) kaolinite; (c) calcite

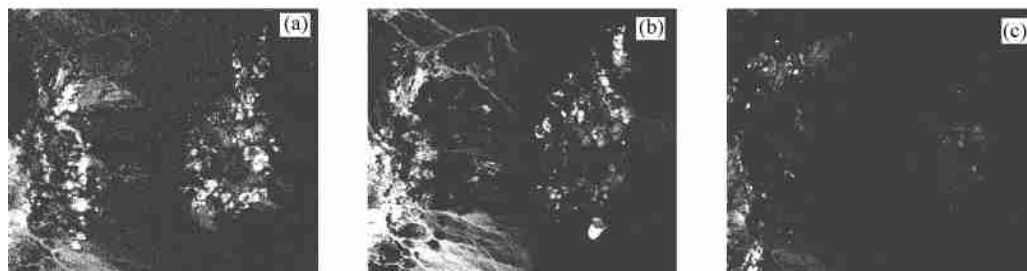


图 4 由我们的解混算法得到的 3 种矿物的分布情况
(a) alunite; (b) kaolinite; (c) calcite

正如前面所述, 由于地物的复杂多样性, 一般情况下, 我们不能够求出图像中的所有端元, 这样就会导致我们所求得的比例系数 c_i 不能满足(2)式, 而是 $\sum_{i=1}^n c_i \geq 1$, 比如我们这个实验中的 c_i 一般都满

足 $\sum_{i=1}^n c_i \geq 2$; 另外光谱混合的非线性也会给我们的光谱解混工作带来一定的偏差. 尽管如此, 我们的算法仍然基本反映了此区域的地物分布状况, 正如图 4 所示.

3 结论

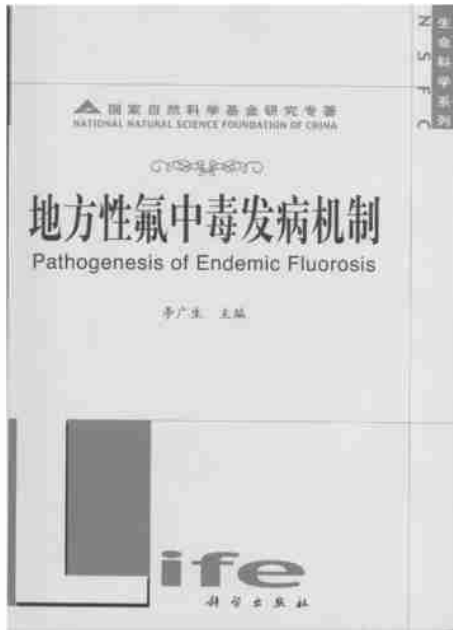
本文把一个三角形中含量与体积比的关系推广到了高维, 严格证明了对于高维凸面单形体仍有此关系成立, 这在理论上是一个非常有意义的结论, 将其应用于 Cuprite 的 AVIRIS 数据, 得到了很好的解混效果; 同时, 我们的算法也已经成功的应用于 PHI 和 OMIS 图像.

随着一些重要航天高光谱卫星系统的成功入轨, 高光谱遥感的普及和更大的发展已为期不远, 这也预示着我们的算法有着良好的应用前景.

参 考 文 献

- 1 Shimabukuro Y E, et al. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29 (1): 16
- 2 Boardman J W. Automating spectral unmixing of AVIRIS data using

- convex geometry concepts. In: 4th Annual JPL Airborne Geo Science Workshop. Pasadena: JPL Pub, 1993. 11
- 3 Bowles J, et al. Use of filter vectors in hyperspectral data analysis. In: Proc SPIE Infrared Spaceborne Remote Sensing III. Washington: SPLE Pub. 1995. 148
- 4 Lennon M, et al. Spectral unmixing of hyperspectral images with the independent component analysis and wavelet packets. In: IGARSS 2001 Conference. Sydney: IGARSS Pub. July 2001. 9
- 5 Theiler J, et al. Using blocks of skewers for faster computation of pixel purity index. In: SPIE Int Conf Optical Science and Technology, Washington: SPLE Pub. 2000. 5
- 6 Winter M E. N-FINDR: An algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data. In: Proc SPIE Imaging Spectrometry V. Washington: SPLE Pub. 1999. 266
- 7 Bateson C A, et al. A tool for manual endmember selection and spectral unmixing. In: Summaries of the V JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena: JPL Pub. 1993. 6
- 8 Resnini R G, et al. Mineral mapping with hyperspectral digital imagery collection experiment (HYDICE) sensor data at Cuprite, Nevada, USA. In: Int J Remote Sensing, 1997. 18: 1553



国家自然科学基金研究专著

《地方性氟中毒发病机制》李广生 主编
科学出版社 定价: 42.00 元

本书是一本全面论述地方性氟中毒发病机制的专著, 是对国家自然科学基金重点项目“氟中毒(地氟病)发病机理”研究成果的系统总结. 全书共分 14 章, 主要讨论地氟病的促发与加重因素, 特别是造成我国贫困地区居民对氟化物耐受力低的因素; 以骨相损害为重点, 阐明过量氟对成骨、破骨活动及胶原代谢的影响; 从分子、细胞和整体多个层次探讨氟骨症、氟斑牙及一些非骨相损害的发生机制.

本书适合地方病、职业病防治工作者及从事地氟病、代谢性骨病、环境病理与毒理、微量元素营养等方面工作的科研、教学人员和研究生阅读参考.