

基于高光谱卫星遥感数据的 UPDM 分析方法

张立福¹ 张良培¹ 村松加奈子² 藤原昇³

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)
(2 奈良女子大学理学部情报科学科, 日本奈良市北鱼屋西町, 630-8506)
(3 奈良产业大学情报学部, 日本奈良县生驹郡三乡町立野北, 636-8503)

摘要:提出了一种用于处理多/高光谱卫星数据的 UPDM 分析方法。研究结果证明,该方法应用于 Landsat/TM(ETM⁺)、Terra/MODIS 和 ADEOS-II/GLI 等高光谱卫星传感器时,光谱重构均方根误差小于 0.029,适用于研究高光谱卫星遥感数据。

关键词:高光谱遥感; 光谱混合; 分类

中图分类号:TP751

利用基于光谱混合模型^[1]的模式分解方法(pattern decomposition method, PDM)^[2~4], 大约有 95.5% 的地物覆盖信息可以被成功分解为三种标准地物的光谱线性组合, 每种自由度的误差为 4.2%^[4]。然而, PDM 方法不能直接应用于其他传感器, 针对不同传感器, 必须重新计算三种标准地物规格化反射率值。因此, 由于标准不同, 对于同一地区, 很难比较不同传感器获取的地物覆盖信息。

UPDM (universal pattern decomposition method) 方法对不同的传感器利用相同的规格化方法, 得到标准地物的相同规格化反射率值。因此, 对同一种地物目标或卫星数据的同一像元, 即使是不同的传感器数据, 用该方法也可以计算出几乎相同的 UPDM 系数值。与主分量变换相比, UPDM 转换后的 3 个分量与地面物体相对应, 具有实际意义, 而且, UPDM 方法利用了卫星数据所有可利用波段的信息。

1 UPDM 原理

1.1 PDM 方法

PDM 算法被最早应用于 Landsat/MSS 和 TM 数据分析中^[3]。在 PDM 算法中, 卫星数据每一像元的反射率或亮度值被分解为 3 种标准地

物(水体、植被、土壤)的光谱线性组合^[4]:

$$R_i = C_w \cdot P_{iw} + C_v \cdot P_{iv} + C_s \cdot P_{is} + r_i \quad (1)$$

式中, R_i 代表波段 i 的地物反射率值(地面测量数据或卫星数据); C_w 、 C_v 和 C_s 分别为标准水体、植被、土壤的 PDM 系数; P_{iw} 、 P_{iv} 和 P_{is} 为规格化后的标准水体、植被、土壤的反射率地面测定值; r_i 为残差。

对于 TM 数据, 有:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= C_w \cdot P_{1w} + C_v \cdot P_{1v} + C_s \cdot P_{1s} + r_1 \\ R_2 &= C_w \cdot P_{2w} + C_v \cdot P_{2v} + C_s \cdot P_{2s} + r_2 \\ &\vdots \\ R_6 &= C_w \cdot P_{6w} + C_v \cdot P_{6v} + C_s \cdot P_{6s} + r_6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

用最小二乘法可求出方程(2)的 3 个 PDM 系数。在 PDM 算法中采用了以下限制条件:

$$C_w \geq 0, C_v \geq 0, C_s \geq 0 \quad (3)$$

标准光谱用以下方法进行规格化:

$$\sum_{i=1}^6 |P_k(i)| = 1, k = w, v, s \quad (4)$$

由式(4)可知, 规格化后的反射率值依赖于传感器, 故式(2)计算出的 3 个 PDM 系数值只适用于 TM 数据。

1.2 UPDM 方法

1.2.1 三参数 UPDM

针对 PDM 的不足, 笔者提出了改进的 UP-

DM 方法。在 UPDM 中,采用连续的标准地物光谱数据,波长范围为 350~2 500 nm(不包括水蒸汽严重吸收的范围),其他变量与 PDM 方法相同。与式(4)相比,规格化是在连续波长范围内进行的,方程如下:

$$\int |P_k(\lambda)| d\lambda = \int d\lambda, k = w, v, s \quad (5)$$

这里,式(4)中的离散波段数 i 被换成连续波长 λ , 式(4)右边的 1 用波长范围的积分值 $\int d\lambda$ 代替。 $P_k(\lambda)$ 的计算方法如下:

$$P_k(\lambda) = \frac{\int d\lambda}{\int |R_k(\lambda)| d\lambda} R_k(\lambda), k = w, v, s \quad (6)$$

式中, $R_k(\lambda)$ 为 3 种标准地物光谱反射率; $\int |R_k(\lambda)| d\lambda$ 表示在连续波长范围求光谱反射率的和; $P_k(\lambda)$ 是标准地物反射率在连续波段上的规格化,适用于任何传感器。当它应用于某一特定传感器时,按传感器各波段光谱范围,将 λ 代入,取平均值作为该波段的中心波长处反射率值:

$$P_{ik} = \frac{\int_{\lambda_{si}}^{\lambda_{ei}} P_k(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{si}}^{\lambda_{ei}} d\lambda}, k = w, v, s \quad (7)$$

式中, λ_{si} 和 λ_{ei} 分别为波段 i 的起始波长和终止波长; $\int_{\lambda_{si}}^{\lambda_{ei}} d\lambda$ 是波段 i 的波长宽度。

在 UPDM 中,其他参数的计算与 PDM 相同,只是标准光谱的规格化方法不同。另外,UPDM 中取消了 PDM 中系数必须为非负的限制条件,因此,UPDM 中系数的计算结果可以为负值。PDM 方法既可以被理解成光谱混合方法,也可以被理解成多维空间分析方法。如果将 PDM 理解为多维空间分析方法,则 3 个基本光谱可被看成是三维坐标系,卫星数据每个像素的反射率值被转换成用 3 个坐标值(参数)表示的三维坐标系中的一点。这种情况下,非负限制条件没有意义。如果因某些研究的需要,必须增加非负限制条件,UPDM 同样也可以满足要求。

1.2.2 四参数 UPDM

当需要研究植被细微变化时,三参数不能满足精度要求,需要增加一个参数来抵消这种误差影响,即采用四参数 UPDM。应当说明的是,第四个参数的增加,对 UPDM 系数的计算结果没有影响,即对于同一样本,用三参数 UPDM 和四参数 UPDM,计算出的结果相同。因为第四个参数的坐标轴与前三个标准地物坐标轴垂直,本研究的目的是研究陆地植被变化,因此,选择介于绿色

树叶和枯叶之间的黄色树叶作为第四个标准样本。四参数 UPDM 公式如下:

$$R_i \rightarrow C_w \cdot P_{iw} + C_v \cdot P_{iv} + C_s \cdot P_{is} + C_4 \cdot P_{i4} \quad (8)$$

式中, C_4 是第四个参数的 UPDM 系数; P_{i4} 是第四个参数相对于波段 i 的标准规格化反射率值,该值的计算首先是将其残差值在连续光谱区间上进行规格化,求出规格化值 $P_4(\lambda)$:

$$P_4(\lambda) = \frac{r_4(\lambda) \int d\lambda}{\int |r_4(\lambda)| d\lambda} \quad (9)$$

式中, $r_4(\lambda)$ 是用式(1)计算出的第四个参数的残差。即

$$r_4(\lambda) = R_4(\lambda) - \{C_w P_w(\lambda) + C_v P_v(\lambda) + C_s P_s(\lambda)\} \quad (10)$$

$R_4(\lambda)$ 是第四个参数的地面测定反射率值。然后,再将式(10)代入式(7),就可计算出 P_{i4} 的值。

2 标准地物选择与数据量测

为了得到连续的地物波谱反射率值,本文采用地面观测的方法得到各种地物的反射率,观测仪器为 Field Spec FR 和 MSR7000 光谱仪。实验数据是从连续 8 a 的地面实测数据中选出的有代表性的 600 个样本,基本上涵盖了地面各种地物。标准水体的反射率是采用 1997 年 3 月 9 号在日本纪伊半岛加太港测定的海水的反射率,观测地点为远离海岸的深水区,用 Field Spec FR 仪器垂直测量,太阳高度角 45° 。标准植被采用 1997 年 8 月 28 日测定的健康的枫树叶,室内测定,光源为卤灯, 45° 角方向照射样本, Field Spec FR 仪器的视场角为 1° 。标准土壤选择干燥的裸露土地室外测定,采用仪器为 MSR7000 光谱仪,测定时间为 1998 年 6 月 14 日。表 1 为本研究所选用的波长范围。

表 1 本研究选用的波长范围

Tab. 1 Wavelength Regions Used in This Analysis

序号	波长/nm
1	371.0~900.0
2	991.0~1 100.0
3	1 191.0~1 300.0
4	1 521.0~1 750.0
5	2 081.0~2 360.0

3 精度评价与 UPDM 的应用

本文采用地面测定的 600 个样本的观测数

据,用四参数 UPDM 方法计算了四个 UPDM 参数,然后,用该计算结果重构观测数值,得到了不同传感器的拟合误差值,如图 1 所示。对于三参数 UPDM,采用以下公式评价变换结果的精度:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n r(i)^2 / (n - 3) \quad (11)$$

式中, n 代表某传感器的波段总数; 3 为系数数目, $(n-3)$ 表示波段 n 的自由度。

对于四参数 UPDM, χ^2 的计算公式如下:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n r(i)^2 / (n - 4) \quad (12)$$

其中,MODEL(12 个波段)和 CONTINUE(92 个波段)为虚拟传感器,是为验证 UPDM 而假设的传感器。其他传感器选择波段范围为 350.0~

1 750.0nm,用于研究陆地植被变化的波段。因此,该研究使用的传感器波段为:MSS 和 AVNIR-2 为 4 个波段,ETM⁺ 为 5 个波段,MODIS 为 6 个波段,GLI 为 10 个波段。表 2 为本研究中所用到的各传感器的光谱范围。因为 UPDM 有 4 个未知参数,MSS 和 AVNIR-2 只有 4 个波段,为了比较各传感器的拟合误差,用与各波段对应的 UPDM 参数计算值,拟合 CONTINUE(92 个波段)虚拟传感器的光谱曲线,计算出各个传感器 UPDM 系数的误差,评价指标列于表 3,并用图 1 直观表示。由此可以看出,UPDM 方法对于多/高光谱,光谱重构误差很小,能够满足精度要求。

表 2 本研究选用的各种传感器的光谱范围/nm

Tab. 2 Spectral Bands Used in This Analysis/nm

序号	MSS	AVNIR-2	ETM ⁺	MODIS	GLI	MODEL
1	500.0~600.0	420.0~500.0	450.0~519.0	459.0~479.0	375.0~385.0	385.0~425.0
2	600.0~700.0	520.0~600.0	520.0~600.0	545.0~565.0	455.0~465.0	455.0~465.0
3	700.0~800.0	610.0~690.0	630.0~690.0	620.0~670.0	540.0~550.0	540.0~550.0
4	800.0~1 100.0	760.0~890.0	760.0~900.0	841.0~876.0	673.0~683.0	673.0~683.0
5			1 550.0~1 750.0	1 230.0~1 250.0	705.0~715.0	705.0~715.0
6				1 628.0~1 652.0	759.0~767.0	759.0~767.0
7					855.0~875.0	855.0~875.0
8					1 040.0~1 060.0	991.0~1 010.0
9					1 230.0~1 250.0	1 040.0~1 060.0
10					1 540.0~1 740.0	1 200.0~1 250.0
11						1 540.0~1 640.0
12						1 650.0~1 740.0

表 3 不同传感器的光谱重构拟合误差平均 χ^2 和均方根值

Tab. 3 Average Values and Root Mean Squares of the Reduced χ^2

传感器	MSS	AVNIR-2	ETM ⁺	MODIS	GLI	MODEL	CONTINUE
χ^2	0.208 40	0.013 97	0.000 83	0.000 69	0.000 68	0.000 65	0.000 62
均方根	0.457	0.118	0.029	0.026	0.026	0.025	0.025

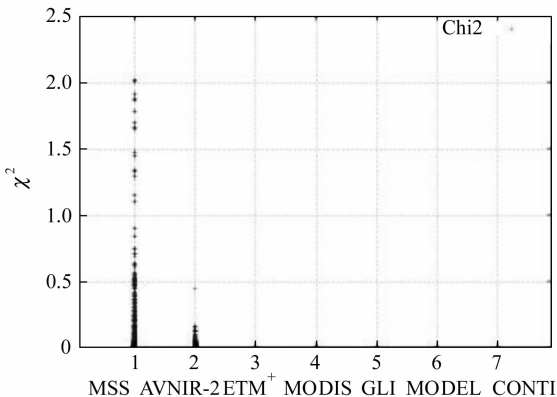


图 1 不同传感器光谱重构 χ^2 值比较
Fig. 1 Reduced χ^2 for Reconstructed Spectra of Deferent Sensor

利用本文的 UPDM 分析方法,作者用 MODIS 遥感影像数据进行了实验。图 2 为用 UPDM 参数值表示的三峡地区 MODIS 遥感影像, C_w 、 C_v 、 C_s 分别对应蓝、绿、红三种颜色。实际上,该图已经是陆地覆盖的粗略分类图了,如果要对地物进一步详细分类,并计算各类别的面积等属性,可以通过设定 C_w 、 C_v 、 C_s 的范围并分配不同的颜色来区分不同的地物。图 3 显示了图 2 中部分地物的 UPDM 系数值, R_1 至 R_7 为波段 1 至 7 的计算残差值(图上数值为放大 1 000 倍之后的数值,未使用波段 7)。从图 1 中,可以看出,不同地物分别对应于不同的 UPDM 参数范围值,据此,可以进行基于 UPDM 的地物分类。

笔者定义了一种基于 PDM 的植被指数

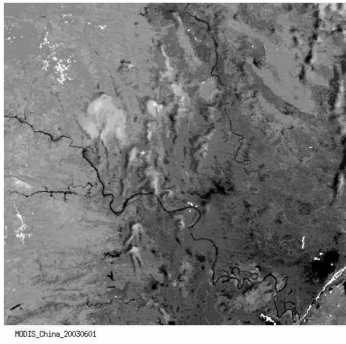


图 2 用 UPDM 系数表示的三峡地区 MODIS 影像图
Fig. 2 MODIS Image Expressed by the UPDM Coefficients Using Data Acquired Over the Three Gorges Regions

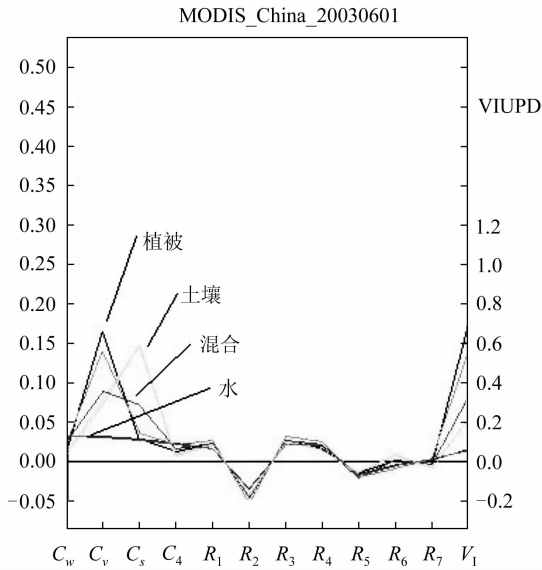


图 3 部分地物的 UPDM 系数和 VIUPD 值
Fig. 3 UPDM Coefficients and VIUPD Values of Some Samples

VIPD。实验证明, VIPD 能较好地反映陆地植被覆盖和植被垂直密度^[5,6],但由于 VIPD 是基于 PDM 算法而定义的,计算公式中的参数具有依赖于传感器的特性,因此,无法对不同传感器的 VIPD 值进行比较。

笔者又重新定义了一种新的基于 UPDM 的植被指数,称为 VIUPD,用 V_1 表示,计算公式为:

$$V_1 = \frac{(C_V - 0.10C_S - C_4)}{C_W + C_V + C_S} \quad (13)$$

式中, C_W 、 C_V 、 C_S 、 C_4 分别为水、植被、土壤、附加参数的 UPDM 系数, C_V 是主要的参数, C_S 、 C_4 是为了消除黄色植被和土壤中的影响部分,并定义 C_S 的系数为 0.1,以便使植被指数对应纯绿色植被为 1,对应枯死植被为 0。 $C_W + C_V + C_S$ 是总反射率值,用该值进行正规化 VIUPD 值,消除地物

阴影的影响,得到稳定的 V_1 结果。

结果显示, V_1 对陆地植被水平和垂直密度很敏感,与植被光合作用中 CO_2 的吸收成线性相关,即能较好地反映植物活性。VIUPD 与 NDVI 相比,在区分黄色树叶和干枯树叶方面,较 NDVI 效果显著。而对于有些黄色树叶,其 NDVI 值却小于干枯树叶,这是因为 NDVI 的计算只利用了近红外和红色波段,由于 VIUPD 的计算包含了一些远红外波段的信息,因此,VIUPD 不仅能较好地反映标准绿色树叶,还能较好地地区分非绿色部分的植被。

图 4 显示了三峡地区 MODIS 数据 VIUPD 影像图。通过比较该影像图的变化,可以监控、研究局部地区乃至全球的植被变化。

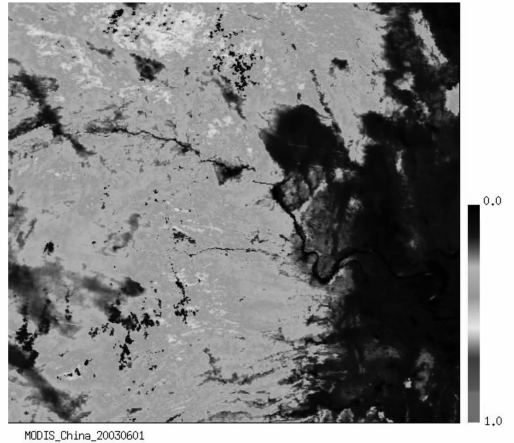


图 4 三峡地区 MODIS 数据 VIUPD 影像图
Fig. 4 VIUPD Image of MODIS Data Acquired Over the Three Gorges Regions

4 结 语

在笔者提出的改进的 UPDM 方法中,假设地表任何一种地物的反射率都可用三种标准地物的光谱线性组合表示。精度分析与实验证明,卫星数据 95.5% 的信息可以用 UPDM 算法成功分解成水、植被、土壤三种地物的线性组合。该方法应用于 Landsat/TM (ETM⁺)、Terra/MODIS 和 ADEOS-II/GLI 等高光谱卫星传感器数据,误差几乎可以忽略。因此,UPDM 方法可用于处理多/高光谱遥感数据。考虑到计算工作量和研究的实际需要,可以选择适合研究目标的波段进行 UPDM 计算。另外,利用 UPDM 方法将高光谱数据表示成三维数据,可方便高维数据计算机彩色显示以及分类研究,例如,通过确定 C_W 、 C_V 、 C_S 值的数值范围,便可以对卫星遥感图像进行计算

机分类。基于 UPDM 的植被指数 VIUPD 能较好地反映植被生长状态和分布,尤其是对非绿色植被的敏感性比 NDVI 好。UPDM 的不足之处是,必须事先测定好地面标准地物(水、植被、土壤)的波谱曲线,并首先在连续波段上进行规格化计算,再截取与某传感器对应的数值,计算稍微复杂一些。标准地物波谱一旦确定,就可作为固定常数使用。

参 考 文 献

- 1 Adams J B, Sabol D E, Kapos V, et al. Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 1995(52):137~154
- 2 Fujiwara N, Muramatsu K, Awa S, et al. Pattern Expansion Method for Satellite Data Analysis. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 1996, 17(3): 17~37(In Japanese)
- 3 Muramatsu K, Furumi S, Fujiwara N, et al. Pattern

- Decomposition Method in the Albedo Space for Landsat TM and MSS Data Analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 21(1):99~119
- 4 Daigo M, Ono A, Fujiwara N, et al. Pattern Decomposition Method for Hyper-multi-spectral Data Analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(6): 1 153~1 166
 - 5 Furumi S, Hayashi A, Murumatsu K, et al. Relation Between Vegetation Vigor and New Vegetation Index Based on Pattern Decomposition Method. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 1998, 18(3):17~34
 - 6 Hayashi A, Muramatsu K, Furumi S, et al. An Algorithm and a New Vegetation Index for ADEOS-II/GLI Data Analysis. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 1998, 18(2):28~50

第一作者简介:张立福,博士生,主要从事高光谱遥感信息处理及遥感应用研究。
E-mail: zhanglif01@hotmail.com

Universal Pattern Decomposition Method Based on Hyper Spectral Satellite Remote Sensing Data

ZHANG Lifu¹ ZHANG Liangpei¹ MURAMATSU Kanako² FUJIWARA Noboru³

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Department of Information and Computer Sciences, Nara Women's University, Nara, Japan 630-8506)

(3 Department of Information and Computer Sciences, Nara Industrial University, Nara, Japan 630-8503)

Abstract: This paper develops a new analysis method based on the hyper-multi spectral satellite data, which is the universal pattern decomposition method (UPDM). The results demonstrate that the mean square root values of reconstruct fitting errors are less than 0.029 when using it on Landsat/TM(ETM⁺), Terra/MODIS and ADEOS-II/GLI satellite sensors. The UPDM is especially suitable for hyper spectral satellite remote sensing data.

Key words: hyper spectral remote sensing; spectral mixing; classification

About the first author: ZHANG Lifu, Ph.D candidate. He is engaged in the research on the information processing of hyper multi-spectral remote sensing and the application of remote sensing.

E-mail: zhanglif01@hotmail.com

(责任编辑:涓涓)