

航空热红外多光谱数据的地物发射率 谱信息提取模型及其应用研究*

张霞 张兵 郑兰芬 童庆禧

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京, 100101)

汪骏发 舒嵘 薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

TP731

摘要 基于 132 种地物的实验室光谱曲线, 建立适合于模块化机载成像光谱仪(MAIS)热红外多波段的发射率经验关系, 以此修正发射率反演方法(TES)中的 MMD 模型, 在此基础上选用 1997 年 8 月在法国 AVIGNON 农业区获取的一幅 MAIS 热红外多光谱图像, 在利用 LOWTRAN7 实现大气初纠正的前提下, 应用修正后的 TES 算法提取发射率谱信息, 结果表明: 反演所得发射率与实验室光谱在形状上具有很好的一致性, 利用发射率谱结合地表亮温信息进行植被分类是可能的。

关键词 发射率谱, 发射率模型, TES 算法, 航空多光谱。

热红外, 地物 MAIS.

STUDY ON THE RETRIEVAL OF EMISSIVITY SPECTRA FROM AIRBORNE THERMAL INFRARED DATA*

遥感

ZHANG Xia ZHANG Bing ZHENG Lan-Fen TONG Qing-Xi

(Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Applications,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

WANG Jun-Fa SHU Rong XUE Yong-Qi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A newly developed method for separating temperature and emissivity (TES) was revised and applied to the airborne multispectral MAIS images acquired in AVIGNON agricultural area of France, in August, 1997. Based on 132 kinds of emissivity spectra, a significant exponential correlation was established for MAIS between the minimum emissivity and MMD (the difference between maximum and minimum of emissivity ratios). This correlation was used to substitute the MMD model of TES method. Then emissivity was inverted from the MAIS image by the revised TES method. It turned out that, the inverted emissivity spectra were quite consistent in the shape with those measured in laboratory. Vegetation classification was proved possible by combining the inverted emissivity images with the surface brightness temperature image.

Key words emissivity spectra, emissivity model, TES algorithm, airborne multispectr.

引言

地表发射率对地表成分, 特别是构成地表的主要成分——硅酸盐矿物上具有指示性^[1], 是监测土壤演变、侵蚀和稀疏植被区变化的重要因子, 热红外多光谱数据为获取并深入研究地物的发射率谱创造

了条件, 研究方法因对发射率假设不同而异. 其中, NEM 算法假设一个最大发射率(如 0.97), 但它无法满足水体及郁蔽植被等发射率较高的情况^[2]; MMD 算法考虑了发射率波形的变化, 但会导致误差传递^[3]; RAT 算法应用了相邻波段发射率的比值, 能够保持发射率谱波形的特性^[4], 但它获得的仅是发射率谱的形状, 而非真实值, 另外, 由于它无从

* 国家“九·五”攀登基金和国家“973”重点基础研究发展规划(编号 95-预-38)资助项目

稿件收到日期 2000-04-11, 修改稿收到日期 2000-06-30

* The project supported by the Climbing Foundation of China in the Ninth “Five-Year” Plan and by the National “973” Key Basic Research Development program

Received 2000-04-11, revised 2000-06-30

获得真实地表温度,所以谱线形状也不可避免地会有偏差;TES算法吸收了这3种算法的优点,并针对不足之处作出相应改进,对ASTER数据进行模拟计算表明,发射率误差在±0.015范围^[7]。

MAIS是由我国上海技术物理研究所研制的航空成像光谱仪,通过参加欧洲综合遥感试验,MAIS获取了法国AVIGNON农业区7个通道图像数据,为发射率谱信息研究提供了数据源。本文的目的在于通过建立与MAIS相适应的发射率模型,将TES算法应用于MAIS热红外多光谱数据,在验证TES算法可靠性的同时,研究分析地物发射率的性质,进而探讨利用发射率谱识别地物的可能性。

1 数据预处理

1997年8月的这次中法遥感试验在热红外区获取了7个波段数据,对应波长范围依次为8.45~8.9μm,8.9~9.35μm,9.35~9.8μm,9.8~10.25μm,10.25~10.7μm,10.7~11.15μm,11.15~11.6μm,这7个热红外波段为获取地物的发射率谱信息提供了有利的数据源。

1.1 数据定标

由于普朗克函数在一定温度范围内近似为线性关系,因此根据MAIS上配备的准黑体高低温辐射源的两组温度和相应DN值,可以逐波段、逐像元地将DN值转换为传感器入孔辐射亮温。转换公式为

$$T_{ij} = \frac{1}{DN_{BB_2}(i) - DN_{BB_1}(i)} [(T_{BB_2} - T_{BB_1}) \times DN_{ij} + DN_{BB_2}(i) \times T_{BB_1} - DN_{BB_1}(i) \times T_{BB_2}], \quad (1)$$

其中 T_{ij} 为某波段图像上*i*行、*j*列像元的亮度温度值(°K); DN_{BB_2} 、 DN_{BB_1} 为图像上*i*行所对应的热源温度 T_{BB_2} 和冷源温度 T_{BB_1} 的平均灰度值。

1.2 大气初纠正:实现传感器亮温到地面亮温转换
热红外波段的辐射传输方程通常用与单色光辐射传输方程相同的形式表达为

$$L_i [\epsilon_i B_i(T_i) + (1 - \epsilon_i) L_{at} \downarrow] \times t_{0i} + L_{at} \uparrow, \quad (2)$$

其中 L_i 为传感器接收到的第*i*波段的辐射亮度值; ϵ_i 为第*i*波段的比辐射率; $B_i(T_i)$ 为黑体在目标物辐射温度 T_i 下的发射辐射, B_i 表示普朗克函数; t_{0i} 为整层大气对第*i*波段辐射的透过率; $L_{at} \uparrow$ 为第*i*波段的大气上行辐射; $L_{at} \downarrow$ 为第*i*波段的大气下行辐射。需要说明的是,式(2)中的各参数都是波段平均

值,如 $L_{at} \downarrow$ 表达为

$$L_{at} \downarrow = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) \cdot L_{at} \downarrow d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

在式(2)中,令 $L_{gi} = \epsilon_i B_i(T_i) + (1 - \epsilon_i) L_{at} \downarrow$,其中前

表1 Lowtran 7程序计算得到的大气辐射参数
Table 1 Atmospheric parameters calculated by Lowtran 7 model

波段号	$L_{at} \downarrow$	$L_{at} \uparrow$	$L_{at} \downarrow (\theta=0)$	t_{0i}
2	1.56044e-06	1.04374e-06	1.09175e-06	0.8234
3	1.34203e-06	8.76530e-07	9.03837e-07	0.8724
4	1.90857e-06	1.23391e-06	1.28415e-06	0.8378
5	1.53983e-06	9.69721e-07	9.97314e-07	0.8845
6	1.72148e-06	1.08268e-06	1.11303e-06	0.8823
7	1.88533e-06	1.16652e-06	1.19938e-06	0.8827
8	2.28957e-06	1.42198e-06	1.46868e-06	0.8653

一项为地表自身发射辐射,后一项为大气下行辐射被地表反射的部分。因此 L_{gi} 表示来自地面的辐射,它对应的黑体辐射温度称为地表亮温 T_{gi} ,即

$$T_{gi} = \frac{c_2 \lambda}{\ln(1 + \frac{c_1}{L_{gi} \lambda^5})}, \quad (4)$$

$$L_{gi} = (L_i - L_{at} \uparrow) / t_{0i}. \quad (5)$$

在本次实验中,根据同步获得的大气探空数据建立实时大气模式,由LOWTRAN7计算大气透过率和大气上、下行辐射(见表1),带入式(4)和(5)即可完成大气初纠正。由表1分析可见, $L_{at} \downarrow$ 与 $L_{at} \downarrow (\theta=0)$ 的比值在1.42和1.58之间,因此在大气初纠正能够满足要求的情况下,可直接以 $1.5L_{at} \downarrow (\theta=0)$ 代替 $L_{at} \downarrow$,这将大大降低计算的复杂程度。表1中: $L_{at} \downarrow (\theta=0)$ 表示垂直方向的大气下行辐射。

2 发射率反演

2.1 发射率反演(TES)算法^[3]

TES算法是对NEM、MMD和RAT3种算法的综合运用,并作出必要的改进。它首先利用NEM算法估算温度和发射率,然后利用RAT算法计算发射率的波段比值,作为发射率波形的无偏估计,最后利用MMD算法计算最小发射率值,进而获得发射率谱。其主要改进之处表现在:(1)对NEM算法的改进,增加了一个迭代过程,以求尽可能精确地消除大气下行辐射的影响。另外常规NEM算法仅设定一个发射率最大值0.97^[2],这对发射率较高的水体和郁蔽植被(通常为0.985)必定会导致很大误

差. 针对 NEM 算法的这一不足, TES 算法增加了一个迭代过程, 可以灵活调整最大发射率的值, 降低了发射率误差. (2) 对 MMD 算法的改进. MMD 算法发现了发射率经验关系, 即最小发射率与发射率自身最大最小值之差 (称 MMD) 的经验线性关系^[2], 尽管这一线性关系很显著, 但是这会很容易地造成误差的传递^[3], TES 算法发射率比值的最大最小值之差代替 MMD, 由于发射率比值谱一方面能够最大限度地保存发射率谱的形状, 另一方面可以避免误差传递, 因此这一改进必将提高反演精度.

TES 算法的精度取决于两个因素, 即发射率经验关系的可靠性和大气纠正的准确性, 因此在将 TES 应用于不同传感器数据时, 应首先考查并建立相适应的发射率经验关系, 并设法提高大气纠正的精度.

2.2 MAIS 的发射率经验关系的建立

从 Johns Hopkin 大学收集到 130 种地物的室内反射率光谱曲线, 加上在本实验区获得的两条光谱 (裸地和苜蓿), 共计 132 条光谱数据, 地物类型包括水体、植被、土壤和矿物, 基于这些数据, 建立与 MAIS 相适应的发射率经验关系, 步骤如下: (1) 根据基尔霍夫定律 $\epsilon = 1 - r$ 得到相应的发射率谱线. (2) 卷积平均处理得到 7 个波段的有效发射率, 并取其最小发射率 ϵ_{min} , 计算

$$\epsilon_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_i \cdot f_i d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_i f_i d\lambda} \quad (i = 2 \sim 8),$$

其中, f_i 为 MAIS 的波长响应函数, $[\lambda_1, \lambda_2]$ 为第 i 波段的有效响应波长范围. (3) 求发射率比值

$$\beta_i = \frac{\epsilon_i(T)}{\bar{\epsilon}(T)} = \frac{R_i(T)}{B_i(T)} \cdot \frac{\bar{B}(T)}{\bar{R}(T)},$$

其中 $\bar{R} = \sum_{i=2}^8 \epsilon_i \cdot B_i(T)$, $\bar{B}(T) = \frac{1}{7} \sum_{i=2}^8 B_i(T)$, $T = 300K$. (4) 求 $MMD = \max(\beta_i) - \min(\beta_i)$ ($i = 2 \sim 8$). (5) 回归建立 ϵ_{min} 与 MMD 经验关系, 经拟合得到如下显著指数关系 (见图 1):

$$\epsilon_{min} = 0.9926 - 0.7309 \times MMD^{0.762}$$

($r^2 = 0.988, SD = 0.01039$),

将新建立的发射率经验关系修正 TES 算法中的发射率模型, 即可对 MAIS 数据应用于 TES 算法以获取发射率谱信息.

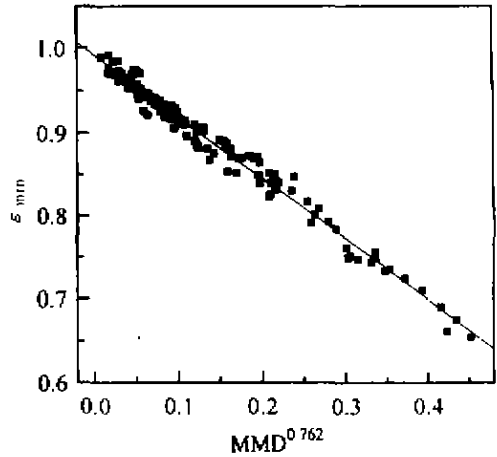


图 1 ϵ_{min} 与 MMD 的指数关系
Fig. 1 The exponential correlation between ϵ_{min} and MMD

3 反演结果分析

3.1 反演发射率与实验室发射率的比较分析

由于实验室测得的发射率仅是样本表面直径不到 1mm 点的信息, 因此它与像元尺度发射率有着巨大采样差异, 另外实验室测量对表面粗糙度极为敏感, 因此两种途径获得的发射率谱只能进行形状的比较.

为进行比较分析, 首先将实验室光谱曲线转换为发射率 ($\epsilon = 1 - r$), 再经 MAIS 的光谱响应函数重采样为波段均值. 由图 3 明显看出, 在形状上紫花苜蓿和裸地与实验室数据都具有很好的—致性, 特别是在较长波段 5、6、7、8; 紫花苜蓿的最大发射率出现在第 8 波段, 这与 Salisbury^[1] 的实验室测量分析结果相符合, 即 11.3~11.6 μm 存在绿色植被的发

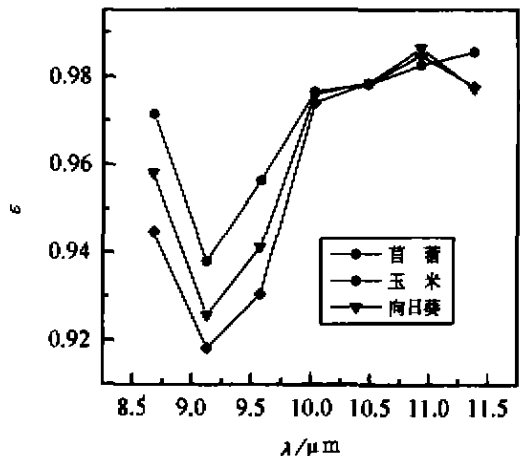


图 2 由图像提取的 3 种植被发射率比较
Fig. 2 Emissivity of three kinds of vegetation extracted from emissivity images

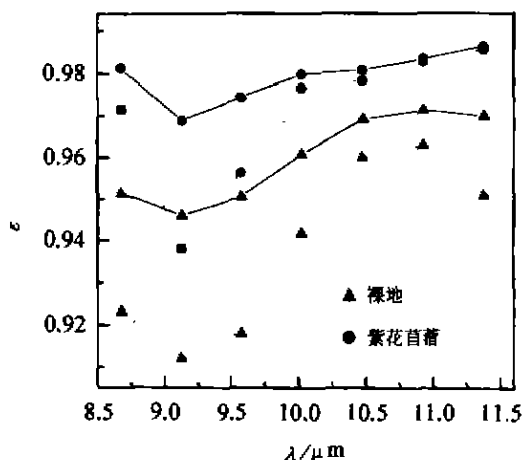


图3 反演所得发射率与实验室测得发射率比较(实线为实验室数据,虚线为反演结果)

Fig. 3 Comparison between the inverted emissivity and that measured in laboratory

射率峰;土壤在第8波段陡然降低,这是由碳酸盐离子引起的^[2]。从图像提取的3种植被,即玉米、向日葵和苜蓿的光谱极为相似(见图2),特别是在波段5、6、7中数值几乎相等,仅在波段8存在小差异,与波段7相比,苜蓿的发射率略有上升,而玉米和向日葵稍有降低,原因可能是后二者未达到郁蔽状态,受土壤影响较大,也可能是大气纠正不足。

3.2 值域分析

由表2可看出,波段5的反射率标准差最小,在图像上表现为对比度较差,进一步分析表明在本波段植被发射率集中在 0.9597 ± 0.0066 范围,裸地的发射率集中在 0.9574 ± 0.0087 范围,这表明在此波段将植被和土壤的发射率设为常量0.96,利用参考通道法^[6]求取发射率曲线是可能的;波段2的发射

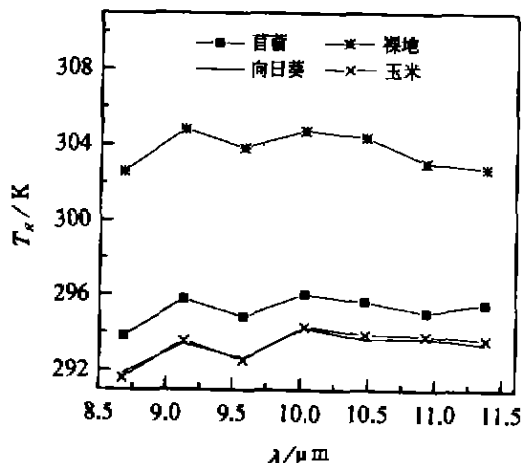


图4 典型地物的地表亮温曲线

Fig. 4 Surface brightness temperature curves of typical ground objects

表2 各波段发射率统计结果

Table 2 Statistical values of emissivity in each band				
波段号	最小值	最大值	平均值	标准差
2	0.7511	0.9787	0.9032	0.0240
3	0.7764	0.9767	0.9458	0.0166
4	0.8232	0.9765	0.9334	0.0198
5	0.7960	0.9791	0.9556	0.0108
6	0.8362	0.9799	0.9445	0.0154
7	0.8412	0.9807	0.9330	0.0197
8	0.8031	0.9807	0.9293	0.0225

率标准差最大,值域也最宽(0.7511~0.9787),图像信息丰富(见图5),此波段可作为区分地物的有效波段,这一判断被去相关拉伸技术所证实,该技术在实现发射率增强时就应用到该波长范围^[7,8];裸地的各波段发射率标准差都不超过0.01,这与裸地均一的地面状况一致。

由地表亮温曲线(见图4)可看出,裸地的亮温在各个通道均都明显大于植被,3种植被的曲线形状大致相同,其中,玉米与向日葵的曲线几乎重合,苜蓿在各个通道温度都比前二者要高2K左右,在图像上大致相当于前二者曲线向上平移两个单位。这可能与它们的植被结构有关系,玉米和向日葵为高株作物,而苜蓿则较之低矮得多,总之,如果仅有温度一个参量,裸地也可以很容易区分出来,苜蓿也是可能的。

3.3 分类尝试

选取地表亮温图像中方差最小的第6波段,与7个热红外发射率图像一起参加分类,采用逐级掩模分类策略:(1)根据地表亮温图像设定阈值将裸地分离出来,生成裸地掩模图像;(2)根据发射率图像数据,利用平行管道法将紫花苜蓿分离出来,生成紫花苜蓿的掩模图像;(3)根据发射率图像数据,使用最大似然分类实现玉米和向日葵的分离;(4)采用简单的代数运算将每个步骤生成的掩模图像合成一个文件,即获得最终的分类图(如图6)。如果定义分类精度为:分类精度=各类中被正确划分的检测样本数÷被划分为该类的检测样本的数目×100%,则计算得到各类别分类精度分别为裸地90%,苜蓿87%,玉米83%,向日葵80%。

4 结论

(1)对于MAIS热红外的7个热红外波段(波段2~8),发射率最小值与MMD(比值发射率最大值与最小值之差)呈显著指数关系

$$\epsilon_{\min} = 0.9926 - 0.7309 \times MMD^{0.762}$$

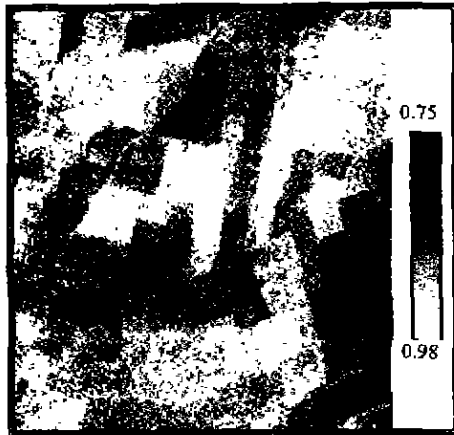


图 5 MAIS 第 2 波段发射率图像
Fig. 5 Emissivity image of MAIS (band 2)

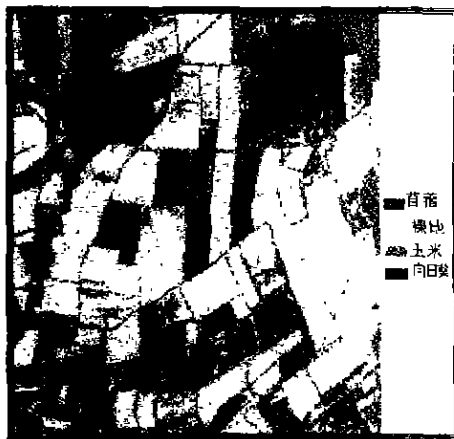


图 6 热红外发射率图像分类结果
Fig. 6 Classification map based on emissivity images

$$(R_2 = 0.988, SD = 0.01039).$$

(2) 与比值加权^[10]等相对发射率提取方法相比, TES 算法可以反演地物的真实发射率信息, 其发射率谱与实验测得光谱在形状上具有很好的一致性; 波段 2 发射率信息最丰富, 可作为区分地物之首选波段; 波段 3 发射率值变化最小, 可以尝试应用参考通道法^[6]反演发射率。

(3) 由 MAIS 热红外发射率图像结合运用地表亮温图像, 采用逐级掩模步骤进行地物识别是可能的。

REFERENCES

- [1] Salsbury J W, D' Aria D M. Emissivity of terrestrial materials in the 8~14 μ m atmospheric window, *Remote Sens. Environ.*, 1992, **42**: 83-106
- [2] Gillespie A R. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS, *The TIMS Data Users' Workshop, June*, 18-19, 1985, JPL Publication 86-38, 1985, 29-44
- [3] Matsunaga T. A temperature-emissivity separation method using an empirical relationship between the mean, the maximum and the minimum of the thermal infrared emissivity spectrum, *Remote Sens. Soc., Japan*, 1994, **14**(2): 230-241
- [4] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity, *Remote Sens. Environ.*, 1992a, **42**: 113-116
- [5] Schmugge T, Hook S J, Coll C. Recovering surface temperature and emissivity from thermal infrared multispectral data, *Remote Sens. Environ.*, 1998, **65**: 121-131
- [6] Hook S J, Gabell A R, Green A A, et al. A comparison for techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies, *Remote Sens. Environ.*, 1992, **42**: 123-135
- [7] Gillespie A R, Kable A B, Walker R E. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HIS contrast stretches, *Remote Sens. Environ.*, 1986, **20**: 209-235
- [8] Gillespie A R. Enhancement of multispectral thermal infrared images; decorrelation contrast stretching, *Remote Sens. Environ.*, 1992, **42**: 147-155
- [9] Kearly P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data; implications for recovering land surface temperatures, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, **31**(6): 1155-1164
- [10] ZHENG Lan-Fen, ZHAO De-Gang, TONG Qing-Xi, et al. Analysis and extraction of emissivity information from an airborne thermal infrared multispectral scanner (ATIMS) data, *J. Infrared Millim. Waves* (郑兰芬, 赵德刚, 童庆禧, 等. 航空热红外多光谱扫描仪(ATIMS)数据发射率信息分析和提取, *红外与毫米波学报*), 1998, **17**(3): 166-170