

基于相关性的中红外温度与发射率分离算法

程洁^{1,3}, 聂爱秀², 杜永明¹

1. 北京师范大学, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

2. 安徽师范大学国土资源学院与旅游, 安徽 芜湖 241000

3. 北京师范大学遥感与GIS研究中心, 北京 100875

摘要 温度和发射率是耦合在一起的。在精确获得大气参数的情况下, 由传感器的辐射测量反演地表的温度与发射率, 仍然是一个病态问题, 必须采取一定的策略进行温度与发射率的分离。因此, 温度与发射率的分离是红外遥感的核心问题。文章在分析无太阳直射光影响时大气下行辐射和含有大气残留的地表发射率之间关系的基础上, 提出了一个针对野外测量中红外高光谱数据的温度与发射率分离算法。该算法利用大气下行辐射和含有大气残留的地表发射率之间的相关性作为判据来优化地表温度, 进而获得地表发射率。基于模拟的中红外高光谱数据, 对算法的精度进行评价。结果表明, 该算法能够获得较高的地表温度和发射率反演精度; 具有较广的适用范围; 对测量过程中大气下行辐射变化不敏感; 同时算法具有一定的抗噪性。

关键词 温度与发射率分离; 中红外; 相关性; 高光谱; 遥感

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)02-0340-06

引言

理论研究表明中红外温度反演对发射率误差的敏感性不到热红外的二分之一^[1,2], 然而, 利用中红外遥感数据的温度反演研究甚少, 除中红外自身的特殊性以外, 与中红外地表发射率信息先验知识的缺乏不无关系。对于利用中红外遥感数据的痕量气体浓度反演, 剥离地表的热辐射贡献, 得到气体本身的热辐射, 需要知道地表的发射率信息^[3-5]。此外, 中红外发射率的野外测量对于卫星遥感影像解译以及温度发射率产品验证具有不可替代的作用。

同时, 基于野外测量数据的地物中红外发射率提取也是比较困难的^[6]。尽管在热红外有很多成熟的温度发射率分离算法^[7-12], 但是大多数外推到中红外都会失效。Wan等^[13]提出四步观测法, 将太阳作为主动光源, 由样本(地物和漫反射板)在光照、遮阳两种观测条件的辐亮度差异确定样本的发射率和温度, 该方法的缺点在于当样本由光照转移到遮阳时, 样本的温度会发生变化, 反之亦然, 无法精确知道温度的变化量。程洁等^[14]在此基础上, 提出针对土壤的中红外发射率提取算法, 算法的关键在于使用与中红外同时观测的热红外的观测数据得到高精度的土壤温度估值, 并用于中红外的发射率提取。然而, 当光谱仪的热红外和中红外通道是分

开的或者阴天无太阳直射光时, 利用中红外自身的光谱信息进行温度与发射率分离显得尤为重要。

1 算法原理

在局地热力平衡状态下, 假设地表为朗伯体, 根据基尔霍夫定律, 传感器接收的辐亮度为,

$$L_{\lambda}(\theta, \phi) = [\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda})(L_{\text{atm} \downarrow \lambda} + E_{\text{sun} \lambda}(\theta) / \pi \tau_{\text{atm} \uparrow \lambda}(\theta, \phi) + L_{\text{atm} \uparrow \lambda}(\theta, \phi))] \quad (1)$$

其中 $L_{\lambda}(\theta, \phi)$ 表示传感器接收到的光谱辐亮度, ε_{λ} 为地物的光谱发射率, $B_{\lambda}(T_s)$ 表示温度为 T_s 时的普朗克函数, $L_{\text{atm} \downarrow \lambda}$ 为等效大气下行辐射, $E_{\text{sun} \lambda}(\theta_s)$ 为达到地表的太阳直射辐照度, θ_s 为太阳天顶角, $\tau_{\text{atm} \uparrow \lambda}(\theta, \phi)$ 是地表和传感器之间的大气透射率, $L_{\text{atm} \uparrow \lambda}(\theta, \phi)$ 为大气的上行辐射。

当没有太阳直射光的照射, (1)可以简化为,

$$L_{\lambda}(\theta, \phi) = [\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\text{atm} \downarrow \lambda}] \tau_{\text{atm} \uparrow \lambda}(\theta, \phi) + L_{\text{atm} \uparrow \lambda}(\theta, \phi) \quad (2)$$

将(2)式中的物理量和传感器的波段响应函数卷积, 得到对应于传感器每个波段的辐亮度的表达式,

$$L_j = \varepsilon_j \tau_j B_j(T_s) + \tau_j (1 - \varepsilon_j) L_{\text{atm} \downarrow, j} + L_{\text{atm} \uparrow, j} \quad (3)$$

野外测量条件下, 忽略传感器和地面之间约为 1 m 路径的大气影响, 得到地表的出射辐射,

收稿日期: 2007-11-12, 修订日期: 2008-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40501042; 40701123)和国家重点基础研究发展项目(2007CB714400)资助

作者简介: 程洁, 1981年生, 北京师范大学遥感与GIS研究中心博士后 e-mail: brucechan2003@126.com

$$L_j = \varepsilon_j B_j(T_s) + (1 - \varepsilon_j) \overline{L_{\text{atm} \downarrow, j}} \quad (4)$$

采用一定的策略(温度与发射率分离算法)即可获得地表温度估值 T , 得到地表的发射率光谱,

$$\varepsilon_j(T) = \frac{L_j - \overline{L_{\text{atm} \downarrow, j}}}{B_j(T) - \overline{L_{\text{atm} \downarrow, j}}} \quad (5)$$

1.1 地表发射率和大气下行辐射的关系

准确的地表温度估值是温度与反射率分离算法成败的关键, 不准确的地表温度估计值会造成地表发射率光谱中的大气光谱的残留, 如图1和图2所示, 模拟时给定的地表真实温度为300 K, 当反演得到的地表温度不等于300 K时, 使用这个温度由式(5)计算的地表发射率光谱中会含有大气光谱残留, 残留的程度主要和大气光谱中发射线的强度有关。

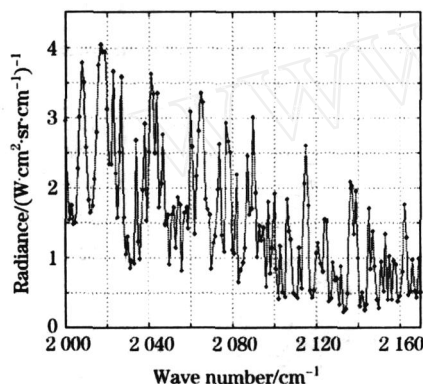


Fig. 1 The simulated atmospheric downward radiance

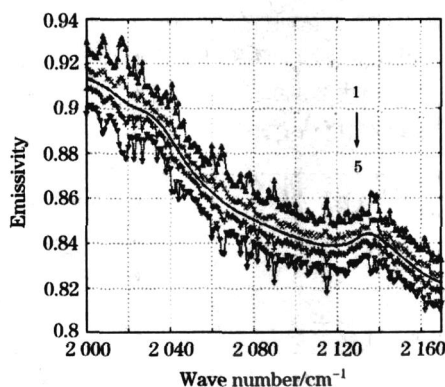


Fig. 2 The emissivity curves corresponding to different soil temperatures

1: 299.7 K; 2: 299.9 K; 3: True emissivity (300 K);
4: 300.1 K; 5: 300.3 K

为了更加清晰阐述两者的关系, 选取 $2096 \sim 2109 \text{ cm}^{-1}$ 光谱区间进行分析, 当地表温度的估值小于真值, 发射率曲线整体偏高, 此时发射率曲线和大气的下行辐射形状相似, 具有很好的正相关; 当地表温度的估值大于真值, 发射率曲线整体偏低, 此时发射率曲线和大气的下行辐射形状相似, 具有很好的负相关(图3, 图4)。相关的程度和地表温度估值与真值的偏差有关, 偏差越大, 相关性越好(这里的相关性指相关系数的绝对值), 而真实的地表发射率和大气下行辐射是没有相关性的。基于以上分析, 我们提出了基于相关性

的中红外温度与发射率分离算法。

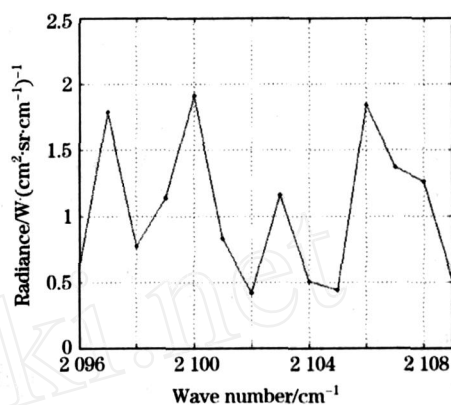


Fig. 3 The simulated atmospheric downward radiance (2096-2109 cm^{-1} spectral region)

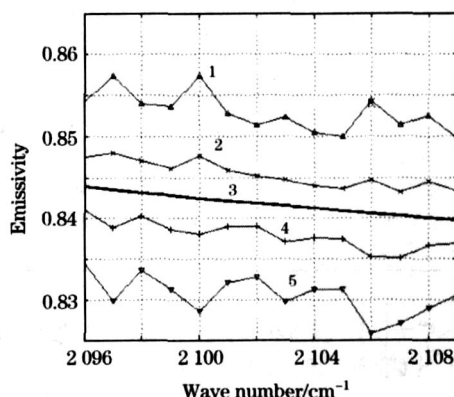


Fig. 4 The emissivity curves corresponding to different soil temperatures (2096-2109 cm^{-1} spectral region)

1: 299.7 K; 2: 299.9 K; 3: True emissivity (300 K);
4: 300.1 K; 5: 300.3 K

1.2 基于相关性的中红外温度与发射率分离算法

算法原理如下, 将地表发射率和大气下行辐射分别看作 n 维的向量 X 和 Y , 给定一个温度分布, 分别计算每个温度对应的发射率曲线 X_i 和大气下行辐射 Y 的相关性, 取其绝对值, 具有最小相关性对应的温度即为地表温度的最佳估值。

$$\text{corr}(i) = \frac{X_i \cdot Y}{\|X_i\| \|Y\|}, \quad X_i \in R^n, Y \in R^n \quad (6)$$

$$\text{optimal } T = T_i |_{\min(\text{abs}(\text{corr}(i)))} \quad (7)$$

其中 $\cdot$ 表示向量内积, $\|\cdot\|$ 表示向量的模, abs 表示取绝对值, $\min$ 表示取最小值。当得到地表温度的最佳估值后, 地表发射率便可由(5)式直接求解。

2 算法验证

算法验证需要兼顾算法的精度和适用范围两个方面。算法的精度采用两个指标来评价, 即温度偏差和均方根误差。温度偏差用来衡量地表温度的反演精度, 均方根误差用来衡

量地表发射率的反演精度, 分别定义为,

$$T_{\text{bias}} = \text{abs}(T - T_{\text{true}}) \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_{i,\text{inv}} - \varepsilon_{i,\text{true}})^2}{N}} \quad (9)$$

其中 T_{bias} 表示温度偏差, T_{true} 表示地表温度的真值, RMSE 表示均方根误差, $\varepsilon_{i,\text{inv}}$ 表示发射率的反演值, $\varepsilon_{i,\text{true}}$ 表示发射率的真值, N 表示样本数。

算法验证采用模拟数据。模拟数据的光谱分辨率为 1 cm^{-1} , 大气的下行辐射使用大气辐射传输程序 MODTRAN4.0 模拟, 模拟中采用的大气模式分别为, 热带大气、1976 美国标准大气、中纬度夏天大气模式、中纬度冬天、副

极带夏季和副极带冬季。地表出射由 (4) 生成。模拟的地表出射和大气下行辐射分别加上均值为零, 标准差为 $2.5 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})^{-1}$ 的随机噪声。

2.1 地表温度反演精度

地表发射率为 ASTER 光谱库和 MODIS UCSB 光谱库中的土壤和植被发射率光谱均值, 地表温度以大气模式中温度廓线的底层温度为中心, 5 K 为间隔, 在 $\pm 15 \text{ K}$ 范围内取值。对于每一个地表温度, 产生 200 条模拟数据, 对于每条模拟数据, 计算温度偏差, 取平均作为每一个地表温度和每一大气模式所对应的算法的温度反演精度。结果见表 1, 相关系数计算使用的光谱区间为 $2096 \sim 2109 \text{ cm}^{-1}$ 。

Table 1 Accuracy of surface temperature inversion using the simulated data generated with the mean value of the ASTER soil emissivities (the MODIS UCSB vegetation emissivities)

Tropical Atmosphere		Standard Atmosphere		Mid-latitude summer		Mid-latitude winter		Sub-arctic summer		Sub-arctic winter	
T/K	T_{bias}/K	T/K	T_{bias}/K	T/K	T_{bias}/K	T/K	T_{bias}/K	T/K	T_{bias}/K	T/K	T_{bias}/K
284.7	-	273.1	-	279.2	-	257.2	-	272.2	-	242.2	-
289.7	-	278.1	0.02(0.02)	284.2	-	262.2	0.03(0.03)	277.2	-	247.2	0.08(0.07)
294.7	0.01(0.01)	283.1	0.03(0.02)	289.2	0.02(0.01)	267.2	0.05(0.04)	282.2	0.02(0.02)	252.2	0.09(0.07)
299.7	0.02(0.01)	288.1	0.03(0.03)	294.2	0.02(0.02)	272.2	0.05(0.05)	287.2	0.03(0.02)	257.2	0.09(0.09)
304.7	0.03(0.01)	293.1	0.03(0.03)	299.2	0.03(0.02)	277.2	0.06(0.05)	292.2	0.04(0.03)	262.2	0.11(0.08)
309.7	0.04(0.02)	298.1	0.04(0.03)	304.2	0.04(0.02)	282.2	0.07(0.06)	297.2	0.04(0.03)	267.2	0.12(0.10)
314.7	0.06(0.02)	303.1	0.05(0.03)	309.2	0.05(0.02)	287.2	0.07(0.06)	302.2	0.04(0.03)	272.2	0.13(0.11)

表 1 中“-”表示温度偏差大于 0.2 K 。由表 1 可以看出, (1) 当地表温度低于大气温度廓线的底层温度 15 K 或 10 K 时, 地表温度反演误差很大。但不影响算法的适用性, 在夜晚, 地表温度和近地面温度是相当的^[15], 白天没有太阳折射光或者人为遮住太阳折射光时, 地表温度和近地面温度相当或高于近地面温度; (2) 当大气模式为中纬度冬天和副极带冬天时, 地表温度的反演精度较低, 主要是此时的地表温度和大气温度非常低, 信噪比急剧下降所致。

2.2 地表发射率的反演精度

根据表 1 的温度反演结果, 选取温度偏差小于 0.13 K 对应的地表温度, 在这个温度范围内, 随机生成地表温度, 使用 ASTER 光谱库中的土壤光谱、MODIS UCSB 光谱库中的植被光谱, 产生模拟数据集。对于每一个大气模式所对应的每一条发射率光谱, 生成 200 条模拟数据, 计算这条发射率光谱每一个波段的均方根误差, 取平均作为最终这个大气模式对应的土壤或植被的发射率反演精度。

图 5 和图 6 分别是不同大气模式对应的土壤和植被每个波段发射率的均方根误差。由图 5、图 6 可以看出, 当大气模式为中纬度冬天和副极带冬季, 由于信噪比的降低, 直接导致地表温度反演精度的降低, 发射率提取误差明显偏大; 当大气模式为其他的 4 个大气模式, 发射率提取误差要小。由于水汽的强吸收, 在 $2000 \sim 2200 \text{ cm}^{-1}$ 光谱区域, 地表发射率光谱中大气吸收线的残留明显, 同时存在异常的发射率, 使发射率提取的误差整体偏高, 约为 0.04 , 在 $2200 \sim 2400 \text{ cm}^{-1}$ 光谱区域, 是二氧化碳的吸收带, 地表发射率提取精度很低, 约为 0.06 , 在 $2400 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$ 光谱区域, 能够获得

较高精度的地表发射率, 约为 0.01 , 这也是 MODIS 三个中红外通道所在的光谱区间; 在 $2900 \sim 3333 \text{ cm}^{-1}$ 光谱区域, 由于仪器信噪比的急剧下降和甲烷的强吸收, 得不到正确的发射率值(图中略去 2900 cm^{-1} 以后的结果), 即使我们能够获得较高精度的温度估值。

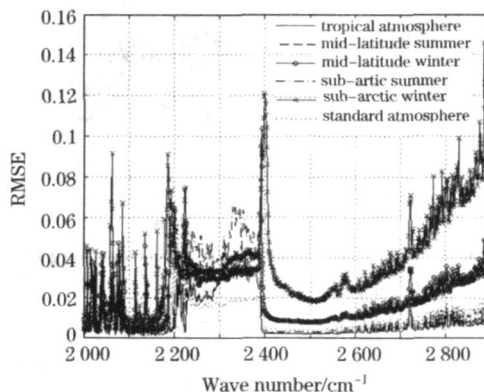


Fig 5 RMSE of each band corresponding to different atmosphere model (soil emissivity spectral of ASTER spectral library)

3 讨论

3.1 仪器定标误差的影响

定标误差属于系统误差范畴。以标准大气模式、MODIS UCSB 光谱库中植被发射率光谱为例, 植被的温度在 278.1

~303.1 K 范围内随机生成,生成模拟数据,进行温度与发射率分离试验。温度偏差随定标误差的增大而增大(见表 2),除 2 200~2 400 cm^{-1} ,发射率的均方根误差几乎不变(图 7)。

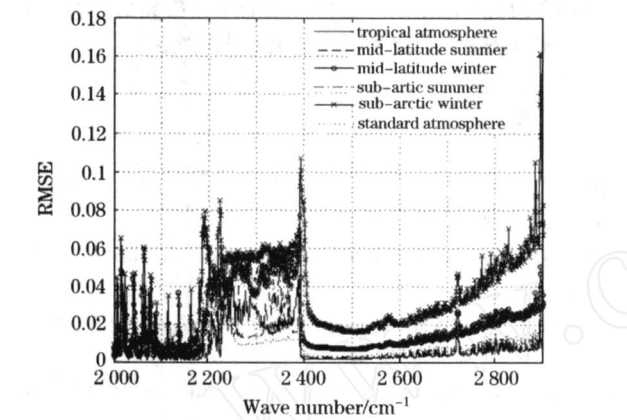


Fig 6 RMSE of each band corresponding to different atmosphere model (vegetation emissivity spectral of MODIS UCSB spectral library)

Table 2 The temperature biases corresponding to different instrumental calibration errors			
Calibration error/ K	0.0	0.5	1.0
$T_{\text{bias}}/ \text{K}$	0.02	0.496	0.996

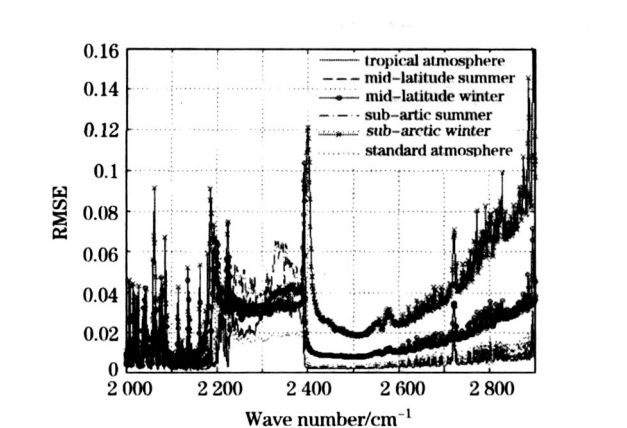


Fig 7 The effects of the instrumental calibration error on the emissivity extraction

3.2 算法对噪声的敏感性

为考察算法对噪声的敏感性,以中纬度夏天大气模式、MODIS UCSB 光谱库中植被发射率光谱为例,植被温度在 289.2~309.2 K 范围内随机生成,产生模拟数据,分别加上 2,4,8 倍的仪器噪声,评价算法对仪器噪声的敏感性,结果见表 3 和图 8。

由表 3 和图 8 可知,当添加 2 倍的仪器噪声,温度偏差为 0.03 K,在 2 400~2 800 cm^{-1} 光谱区域,发射率的波段均方根误差优于 0.02,说明算法的具有一定的抗噪性。

Table 3 The temperature bias under different level of instrumental random noise				
Noise level	1	2	4	8
$T_{\text{bias}}/ \text{K}$	0.02	0.03	0.06	0.12

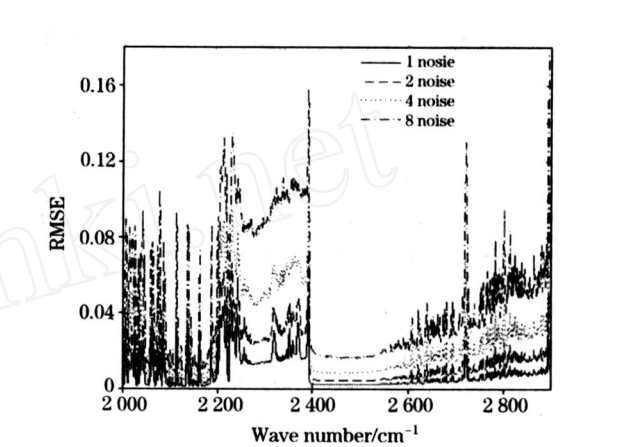


Fig 8 The algorithm's sensitivity to the instrumental random noise

3.3 大气下行辐射误差的影响

分别假设大气下行辐射误差为 2%,5%,10%,以标准大气模式、MODIS UCSB 光谱库中植被发射率光谱为例,植被的温度在 278.1~303.1 K 范围内随机生成,生成模拟数据,由模拟数据进行温度与发射率分离试验。由表 4 和图 7 可知,5%的大气下行辐射误差对发射率提取的影响较小,对温度反演影响较大。

Table 4 The temperature bias due to the change in atmospheric downward radiance				
atmospheric downward radiance error/ %	0	2	5	10
$T_{\text{bias}}/ \text{K}$	0.02	0.04	0.07	0.13

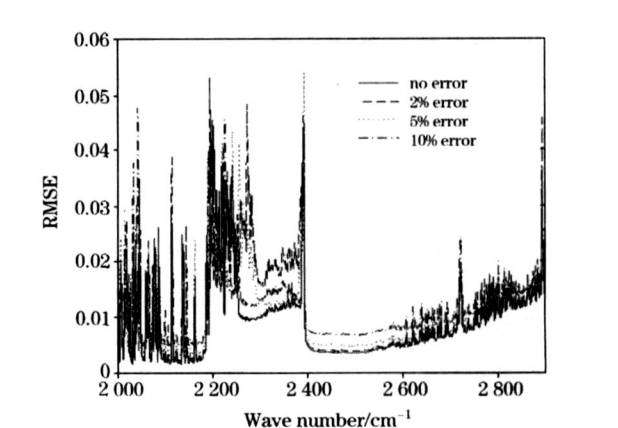


Fig 9 The effects of atmospheric downward radiance error on the emissivity extraction

4 结 论

本文提出了一个针对野外测量中红外高光谱数据的温度与发射率分离算法,该算法利用无太阳直射光影响时大气下行辐射和含有大气残留的地表发射率之间的关系,提炼出地

表温度优化的相关性判据,据此来优化地表温度,实现温度与发射率的分离。模拟计算的结果表明,该算法能够获得较高的温度和发射率提取精度,具有较广的适用范围,对测量过程中大气下行辐射变化不敏感,同时具有一定的抗噪性。可以作为已有的中红外温度与发射率分离算法的有益补充,减少野外测量对仪器和天气状况的依赖性。

参 考 文 献

- [1] Salisbury J W, D'Aria D M. Remote Sens. Environ. , 1994, 47: 345.
- [2] Mushkin A, Balick L K, Gillespie A R. Remote Sens. Environ. , 2005, 98: 141.
- [3] GAO Min-guang, LIU Wen-qing, ZHANG Tian-shu, et al(高闽光, 刘文清, 张天舒, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(12): 2203.
- [4] WEI Xiu-li, LU Yi-huai, GAO Min-guang, et al(魏秀丽, 陆亦怀, 高闽光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(3): 452.
- [5] XU Liang, LIU Jian-guo, GAO Min-guang, et al(徐 亮, 刘建国, 高闽光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(5): 889.
- [6] Korb A R, Dybwad P, Wadsworth W, et al. Applied Optics, 1996, 35(10): 1679.
- [7] Watson K. Remote Sens. Environ. , 1992, 42: 113.
- [8] Barducci A, Pippi I. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1996, 34(3): 681.
- [9] Gillespie A R, Matsunaga T, Rokugawa S, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1998, 36(4): 1113.
- [10] Borel C C. Proceedings of IGARSS98, 1998, 1: 546.
- [11] Becker F, Li Z-L. Remote Sens. Environ. , 1990, 32: 17.
- [12] CHENG Jie, XIAO Qing, LI Xiao-wen, et al(程 洁, 肖 青, 李小文, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(4): 780.
- [13] Wan Z, Ng D, Dozier J. Remote Sensing of Earth's Surface and Atmosphere, 1993, 14(3): 91.
- [14] CHENG Jie, LIU Qin-huo, LI Xiao-wen, et al(程 洁, 柳钦火, 李小文, 等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2008, 27(1): 130.
- [15] QI Shu-hua, LUO Cheng-feng, WANG Chang-yao, et al(齐述华, 骆成凤, 王长耀, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2006, 21(2): 130.

The Correlation Based Mid-Infrared Temperature and Emissivity Separation Algorithm

CHENG Jie^{1,3}, NIE Ai-xiu², DU Yong-ming¹

1. Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100875, China

2. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

3. Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract Temperature and emissivity separation is the key problem in infrared remote sensing. Based on the analysis of the relationship between the atmospheric downward radiance and surface emissivity containing atmosphere residue without the effects of sun irradiation, the present paper puts forward a temperature and emissivity separation algorithm for the ground-based mid-infrared hyperspectral data. The algorithm uses the correlation between the atmospheric downward radiance and surface emissivity containing atmosphere residue as a criterion to optimize the surface temperature, and the correlation between the atmospheric downward radiance and surface emissivity containing atmosphere residue depends on the bias between the estimated surface temperature and true surface temperature. The larger the temperature bias, the greater the correlation. Once we have obtained the surface temperature, the surface emissivity can be calculated easily. The accuracy of the algorithm was evaluated with the simulated mid-infrared hyperspectral data. The results of simulated calculation show that the algorithm can achieve higher accuracy of temperature and emissivity inversion, and also has broad applicability. Meanwhile, the algorithm is insensitive to the instrumental random noise and the change in atmospheric downward radiance during the field measurements.

Keywords Temperature and emissivity separation; Mid-infrared; Correlation; Hyperspectral; Remote sensing

(Received Nov. 12, 2007; accepted Feb. 20, 2008)

《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者,本刊要求作者重写,这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文,要求言简意明、确切地论述文章的主要内容,突出创新之处。

2. 应拥有与论文同等量的主要信息,包括四个要素,即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素,例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下,英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据,如检测限、相对标准偏差等;结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。

3. 句型力求简单,尽量采用被动式,通常应有 2000 个印刷字符,300 个英文单词为宜,不能太短;也不要太长。用 A4 复印纸单面隔行打印。

4. 摘要不应有引言中出现的内容,换言之,摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用的符号和术语;不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号,除相邻专业的读者也能清楚地理解外,在首次出现时必须加以说明,例如用括号写出全称。