

# 基于多通道温度与发射率分离算法的 敦煌场地红外特性研究

张允祥<sup>1,2</sup>, 李新<sup>1\*</sup>, 韦玮<sup>1</sup>, 翟文超<sup>1</sup>, 张艳娜<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学辐射定标与表征重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 采用多通道式热红外辐射计 CE312 开展敦煌辐射校正场红外特性的研究, 通过测量场地目标和红外标准板获取地表辐射亮度和大气下行辐射亮度, 再采用多通道温度与发射率分离算法得到场地通道发射率和场地温度, 最后利用最优偏移量法得到场地发射率光谱; 将其与利用 102F 傅里叶变换红外光谱仪对相同目标区域进行测量, 并采用光谱迭代平滑温度与发射率分离算法分离出的结果进行比较, 两种算法获得的通道发射率最大偏差在 0.011 以内, 场地温度偏差在 0.104 K 以内, 说明采用多通道式热红外辐射计可以实现场地温度和发射率的分离, 获得高精度的热红外场地参数。本试验为基于敦煌辐射校正场开展卫星遥感热红外波段场地自动化观测绝对辐射定标提供了参考。

**关键词** 遥感; 辐射定标场; 热红外; 绝对定标; 温度与发射率分离

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1028003

## Infrared Characteristics of Dunhuang Site Based on Multichannel Temperature and Emissivity Separation Algorithm

Zhang Yunxiang<sup>1,2</sup>, Li Xin<sup>1\*</sup>, Wei Wei<sup>1</sup>, Zhai Wenchao<sup>1</sup>,  
Zhang Yanna<sup>1</sup>, Zheng Xiaobing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of General Optical Radiation Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** A multichannel thermal infrared radiometer, called CE312, was used to study the infrared characteristics of the Dunhuang radiometric correction field. Site surface radiance and the downwelling atmospheric radiance were obtained by measuring the target site and the infrared standard plate. The multichannel temperature and emissivity separation algorithm was used to calculate the site channel emissivity and temperature. Finally, the optimal offset method was employed to obtain the site emissivity spectrum. The same target area was measured using a 102F Fourier transform infrared spectrometer. The results separated by the iterative spectral smooth temperature and emissivity algorithm were then compared with those separated by the multichannel temperature and emissivity separation algorithm. The comparison results show that the maximum deviation of the channel emissivity obtained by the two methods is within 0.011, and the site temperature deviation is within 0.104 K, indicating that the usage of the multichannel thermal infrared radiometer can separate the site temperature and emissivity in addition to obtaining high-precision thermal infrared site parameters. This test provides a reference for the automated observational absolute radiometric calibration of the satellite remote sensing thermal infrared band based on the Dunhuang radiometric correction field.

**Key words** remote sensing; radiometric calibration field; thermal infrared; absolute calibration; temperature and emissivity separation

**OCIS codes** 280.6780; 120.0280; 010.0280

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-06-16; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 民用航天技术预先研究项目(D040401)

\* E-mail: xli@aiofm.ac.cn

# 1 引 言

随着我国热红外遥感技术的发展,近年来具有热红外波段探测能力的对地观测卫星陆续发射升空。卫星在轨运行后,除利用星载定标黑体进行定标外,还需开展校正场辐射定标来检验或替代星上定标结果,为后端产品应用提供可靠的高精度定标条件<sup>[1]</sup>。目前,我国针对卫星遥感器热红外通道的在轨绝对辐射定标,主要还是采用人工野外测试获取场地热红外辐射特性的方法,该方法不仅耗费大量人力物力和时间,同时也受天气条件的制约。为提高卫星遥感器场地定标的频次和实效性,场地自动化观测辐射定标的研究日益引起人们的重视<sup>[2-4]</sup>。场地温度和发射率是用于表征场地热红外特性的两个重要参数,也是利用辐射校正场作为标准辐射源进行卫星遥感器热红外波段绝对辐射定标的两个关键影响因子。因此,如何从自动化设备获取的场地辐射数据中分离出高精度的场地温度和发射率,是场地自动化观测辐射定标的重要研究内容。

目前,国内外关于场地温度和发射率分离(TES)提出了许多方法和技术,根据使用热红外通道的个数大致可分为3种算法。第一种是单通道算法,该算法主要通过接触式温度计测量目标温度,并利用红外标准板测量大气下行辐射,再结合辐射传输方程计算得到相应通道的发射率。如戎志国等<sup>[5]</sup>在对FY-2红外通道进行在轨辐射定标时,利用单通道算法测量南海水面发射率。第二种是多通道算法,该算法利用多个热红外通道数据来反演地表温度,主要有包络线法<sup>[6]</sup>、参考通道法<sup>[7]</sup>、发射率归一化法(NEM)<sup>[8]</sup>、 $\alpha$  剩余法<sup>[9]</sup>及最大-最小值差值法(MMD)<sup>[10]</sup>等。其中最具代表性的算法是处理先进的星载热发射和反射辐射计(ASTER)数据时采用的温度与发射率分离算法<sup>[11]</sup>,该算法首先利用NEM估算温度和发射率,然后利用比值法(RAT)<sup>[12-13]</sup>将通道发射率与所有通道发射率平均值相除得到发射率比值,将该发射率比值作为对发射率波形的无偏估计,最后利用MMD中的最小发射率与最大-最小相对发射率差值的经验关系来确定最小发射率,从而获得发射率和温度。第三种是高光谱算法,该算法主要利用热红外高光谱数据进行地表发射率与温度的分离。其中最典型的是Borel<sup>[14]</sup>提出的光谱迭代平滑温度和发射率分离算法(ISSTES)以及Sobrino等<sup>[15]</sup>提出的后经不断改进逐渐形成的黑体桶法。ISSTES利用红外波段地

表的发射率光谱曲线明显比大气下行辐射光谱曲线平滑的特点建立代价函数,再通过迭代方法实现地表温度与发射率的分离。张勇等<sup>[16]</sup>利用BOMEN MR154型傅里叶变换光谱仪和红外标准板开展了敦煌戈壁陆表发射率光谱的野外测量。黑体桶法借助侧壁涂有高反射率材料、无底的黑体桶装置隔离环境辐射,通过更改冷、热桶盖的方式来测量目标辐射和模拟背景辐射,再结合辐射传输方程计算得到目标温度和发射率。该方法能够很好地解决环境辐射和温度发射率的耦合问题。文献<sup>[6]</sup>在黑河遥感综合试验中利用黑体桶法对细沙、植被、水泥地和土壤等地物进行了发射率的测量。

采用高光谱红外辐射计进行场地温度与发射率分离试验,能够很好地保证反演场地温度和发射率的精度。由于高光谱红外辐射计操作比较复杂,需要实时对内部探测器进行液氮制冷,不利于仪器的自动化观测,因此采用多通道式热红外辐射计开展场地温度与发射率分离算法的研究,对开展遥感器热红外波段场地自动化测量辐射定标具有重要的研究意义。本文采用多通道式热红外辐射计CE312开展敦煌定标场地红外特性的研究,实现了场地温度与发射率的分离,并通过最优偏移量法获得了场地发射率光谱曲线。

## 2 基本原理

### 2.1 热红外波段野外测量原理

在热红外光谱波段,大气进行辐射传输时,不仅吸收和散射穿过它的辐射能,大气本身也向外辐射能量。由辐射传输理论可知<sup>[17]</sup>,在晴空条件下,卫星遥感器接收的光谱辐射可表示为

$$L(\lambda) = [\epsilon(\lambda)L(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon(\lambda))L_{\text{atm}}^{\downarrow}(\lambda) + (1 - \epsilon(\lambda))L_s^{\downarrow}(\lambda) + \rho_b(\lambda)E_s(\lambda)\cos(\theta_s)\tau(\lambda, \theta_s)]\tau(\lambda) + L_{\text{atm}}^{\uparrow}(\lambda) + L_s^{\uparrow}(\lambda), \quad (1)$$

式中: $\epsilon(\lambda)$ 表示地面目标发射率光谱;下标s表示地表; $T_s$ 表示地表温度; $L(\lambda, T_s)$ 表示温度为 $T_s$ 的黑体光谱辐射亮度;下标atm表示大气; $L_{\text{atm}}^{\downarrow}(\lambda)$ 和 $L_{\text{atm}}^{\uparrow}(\lambda)$ 分别表示大气路径向下和向上光谱辐射亮度; $L_s^{\downarrow}(\lambda)$ 和 $L_s^{\uparrow}(\lambda)$ 分别表示大气对太阳辐射向下和向上散射所产生的半球辐射通量除以 $\pi$ 后的光谱辐射亮度;下标S表示太阳;下标b表示双向; $\rho_b(\lambda)$ 表示地表双向反射率; $E_s(\lambda)$ 表示大气顶太阳光谱辐射亮度; $\tau(\lambda, \theta_s)$ 表示太阳辐射下行路径大气透过率。

在8~14  $\mu\text{m}$ 热红外波段,太阳入射光中的部

分热辐射可以忽略不计,因此(1)式可简化为

$$L(\lambda) = \{\epsilon(\lambda)L(\lambda, T_s) + [1 - \epsilon(\lambda)]L_{\text{atm}}^{\downarrow}(\lambda)\}\tau(\lambda) + L_{\text{atm}}^{\uparrow}(\lambda). \quad (2)$$

对卫星遥感器热红外通道进行观测时,  $j$  表示遥感器的通道号,  $j = 1, 2, 3, \dots$ , 卫星遥感器通道  $j$  观测的平均辐射亮度可表示为

$$L_j = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_j(\lambda)L(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_j(\lambda)d\lambda}, \quad (3)$$

式中:  $f_k(\lambda)$  表示卫星遥感器热红外通道光谱响应函数;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别表示卫星遥感器通道响应的起止波长。此时, 辐射传输方程可以表示为

$$L_{s,j} = [\epsilon_j L_j(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon_j)L_j^{\downarrow}] \tau_j + L_j^{\uparrow}, \quad (4)$$

式中:  $L_{s,j}$  表示卫星遥感器通道  $j$  接收到的辐射亮度值;  $\epsilon_j$  表示卫星遥感器通道  $j$  的地表发射率;  $L_j(\lambda, T_s)$  表示卫星遥感器通道  $j$  接收到的黑体在目标辐射温度为  $T_s$  下的发射辐射亮度;  $\tau_j$  表示卫星遥感器通道  $j$  的大气透过率,  $L_j^{\downarrow}$  和  $L_j^{\uparrow}$  分别表示卫星遥感器通道  $j$  接收到的大气上行和下行辐射亮度, 可由 MODTRAN 模型计算获得。

利用 CE312 多通道热红外辐射计进行野外测量时, 探测器距离地表的高度在 1 m 以内, 通过 MODTRAN 辐射传输模型对大气透过率及大气上行辐射进行模拟。模拟结果表明, 大气上行辐射亮度的影响可以忽略, 大气透过率近乎为 1<sup>[16]</sup>。因此, CE312 通道  $k$  接收到的热辐射可表示为

$$L_{s,k} = \epsilon_k L_k(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon_k)L_k^{\downarrow}. \quad (5)$$

测量大气下行辐射亮度时, 采用准同步测量一个朗伯体漫反射标准板的方法, 即场地辐射测量完成后, 将红外标准板近地表放置在地物目标上, 使两者的方位基本达到一致。此时辐射计通道  $k$  接收的总辐射  $L_{\text{Au},k}$  表示为

$$L_{\text{Au},k} = L_k(T_{\text{Au}}) + (1 - \epsilon_{\text{Au}})L_{\text{atm},k}^{\downarrow}, \quad (6)$$

式中:  $\epsilon_{\text{Au}}$  表示红外标准板的发射率;  $k$  表示 CE312 的通道号,  $k = 1, \dots, 4$ ;  $L_k(T_{\text{Au}})$  表示 CE312 通道  $k$  接收到的黑体在红外标准板温度为  $T_{\text{Au}}$  时的发射辐射亮度;  $L_{\text{atm},k}^{\downarrow}$  表示大气下行辐射。

为精确计算大气下行辐射, 在测量过程中利用接触式温度计来测量红外标准板的温度, 根据接触式温度计的测量值可计算出红外标准板的热辐射贡献, 则大气下行辐射为

$$L_{\text{atm},k}^{\downarrow} = \frac{L_{\text{Au},k} - L_k(T_{\text{Au}})}{1 - \epsilon_{\text{Au}}}. \quad (7)$$

地表目标的通道发射率为

$$\epsilon_k = \frac{L_{s,k} - L_k^{\downarrow}}{B_k(T_s) - L_k^{\downarrow}}, \quad (8)$$

式中:  $B_k(T_s)$  表示 CE312 通道  $k$  接收到的绝对黑体在温度为  $T_s$  下的发射辐射。

通过(8)式可以看出, 采用辐射测量数据反演地物的温度和发射率时, 无论光谱细分到何种程度, 都属于采用  $N$  个方程组成的方程组来求解  $N+1$  个未知数(一个地表温度和  $N$  个波段的发射率值), 这是一个欠定方程问题。为求解这个欠定方程, 必须引入额外的条件<sup>[6]</sup>, 这种额外的条件通常是对目标发射率波谱形状的某种先验知识, 而先验知识约束条件的不同, 决定了不同的 TES 算法类型。

## 2.2 多通道法场地温度与发射率分离算法

以 CE312 通道式热红外辐射计为例, 采用多通道 TES 算法开展敦煌辐射校正场热红外特性的研究。该算法综合 NEM、RAT、MMD 这 3 种算法的优点并针对其不足进行了相应的改进。首先利用 NEM 估算温度和通道发射率; 然后利用 RAT 将通道发射率与所有通道发射率的平均值相除计算发射率比值, 并将其作为对比发射率波形的无偏估计; 最后利用 MMD 中最小发射率与最大-最小相对发射率差值的经验关系来确定最小发射率, 从而获得各个通道的发射率和温度。多通道法温度与发射率分离算法的流程图如图 1 所示。

对 CE312 测得的场地辐射亮度  $L_{s,k}$  和大气下行辐射亮度  $L_{\text{atm}}^{\downarrow}(\lambda)$  数据处理时, 首先采用 NEM 初步估算场地温度。该算法计算时先假设目标最大发射率值, 再用迭代方法获得 CE312 辐射计 4 个通道的通道发射率估计值, 逐步去除反射的环境辐射, 进而得到目标温度的初步估计和目标发射辐射亮度分量。敦煌场地发射率在 0.84~0.98 之间<sup>[16]</sup>, 这里假设观测目标的最大发射率为 0.98。采用的迭代方法为

$$\begin{cases} T_k = \frac{c_2}{\lambda_0 \lg \left\{ \frac{c_1 \cdot \epsilon_{\max}}{\pi \lambda_0^5 [L_{s,k} - (1 - \epsilon_{\max})L_{\text{atm},k}^{\downarrow}]} \right\}} + 1 \\ T_{\max} = \max(T_k), k = 1, \dots, 4 \\ \epsilon_k = \frac{L_{s,k} - (1 - \epsilon_{\max})L_{\text{atm},k}^{\downarrow}}{L_k(T_{\max})} \end{cases}, \quad (9)$$

式中:  $T_k$  表示 CE312 通道  $k$  反演的场地温度;  $\epsilon_{\max}$  表示 CE312 反演的最大通道发射率;  $L_{s,k}$  表示 CE312 通道  $k$  测量的场地辐射亮度;  $L_{\text{atm},k}^{\downarrow}$  表示 CE312 通

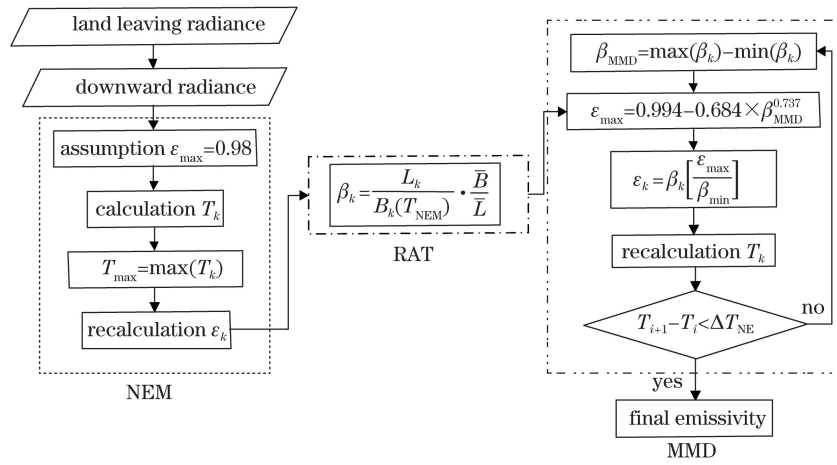


图 1 多通道 TES 算法流程图

Fig. 1 Procedure of multi-channel TES algorithm

道  $k$  测量的大气下行辐射亮度;  $\lambda_0$  为通道中心波长;  $L_k(T_{\max})$  表示 CE312 通道  $k$  接收到的黑体在温度为  $T_{\max}$  下的发射辐射亮度;  $c_1$  和  $c_2$  是两个常数,  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7418 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$ ,  $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

然后, 采用 RAT 获得与温度无关的相对发射率  $\beta_k$ , 表示为

$$\beta_k = \frac{L_{\text{grd},k}}{B_k(T_{\text{NEM}})} \cdot \frac{\bar{B}}{\bar{L}}, k = 1, \dots, 4, \quad (10)$$

式中:  $\bar{B}$  和  $\bar{L}$  是 CE312 辐射计 4 个通道地表辐射亮度  $L_{\text{grd},k}$  和  $B_k(T_{\text{NEM}})$  的平均值。

最后, 采用 MMD 估算最小通道发射率。ASTER 光谱库是提供了土壤、岩石、矿物、植被、水和人造材料等 500 多种材料的光谱数据库<sup>[18]</sup>, 并根据基尔霍夫定律推导了各种材料的发射率光谱<sup>[19]</sup>。Gillespie 等<sup>[11]</sup> 通过对 ASTER 光谱库中的样本进行分析, 建立了多种材料的最小发射率  $\epsilon_{\min}$  与最大相对发射率、最小相对发射率之差之间的经验关系。最大相对发射率与最小相对发射率之差  $\beta_{\text{MMD}}$  表示为

$$\beta_{\text{MMD}} = \max(\beta_k) - \min(\beta_k), \quad (11)$$

式中:  $\max(\beta_k)$  和  $\min(\beta_k)$  分别表示  $k$  通道最大相对发射率与最小相对发射率。

最小发射率  $\epsilon_{\min}$  与  $\beta_{\text{MMD}}$  的关系为

$$\epsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \times \beta_{\text{MMD}}^{0.737}. \quad (12)$$

Payan 等<sup>[20]</sup> 采用 CE312 对 522 种样品的发射率光谱进行了通道最小发射率与 MMD 的拟合分析。分析结果表明, 由于 CE312 各通道波段范围与 ASTER 通道范围非常相似, 故(9)式能很好地表示 CE312 最小通道发射率与 MMD 之间的关系。

得到最小发射率  $\epsilon_{\min}$  后, 就可得到所有通道的

发射率为

$$\epsilon_k = \beta_k \frac{\epsilon_{\min}}{\beta_{\min}}. \quad (13)$$

由计算的发射率  $\epsilon_k$  再次估算各通道的温度, 可表示为

$$\begin{cases} T_k = \frac{c_2}{\lambda_0 \lg \left[ \frac{c_1 \cdot \epsilon_k}{\pi \lambda_0^5 L_{\text{grd},k} - (1 - \epsilon_k) L_{\text{atm},k}^\downarrow} + 1 \right]} \\ T_{\max} = \max(T_k), k = 1, \dots, 4 \\ \epsilon_k = \frac{L_{s,k} - (1 - \epsilon_{\max}) L_{\text{atm},k}^\downarrow}{L_k(T_{\max})} \end{cases}. \quad (14)$$

当各通道温度的变化值小于 CE312 红外辐射计自身的等效噪声温差 ( $\Delta T_{\text{NE}}$ ) 时, 即

$$T_{s,i+1} - T_{s,i} < \Delta T_{\text{NE}}, \quad (15)$$

可认为此时 CE312 各通道的最大温度即为场地真实温度, 对应的通道发射率便是 CE312 各通道的真实发射率值, 其中在  $3 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$  下, CE312 的等效噪声温差为  $0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[21]</sup>。(15) 式中,  $i$  表示迭代次数,  $T_{s,i}$  表示进行  $i$  次迭代计算获得的地表温度。

### 3 敦煌场地野外测量试验与结果分析

#### 3.1 敦煌场地野外测量试验

2018 年 8 月 8 日~9 日中国科学院安徽光学精密机械研究所联合国家卫星气象中心在中国遥感卫星辐射校正陆面场——敦煌戈壁场开展了为期 2 d 的场地红外特性试验。试验选取中心经纬度为  $\text{N } 40.08060^\circ$  和  $\text{E } 94.44824^\circ$  的场区作为测试点, 该场区地势平坦、戈壁表面粒径分布比较均匀, 具有一定的代表性。测量时间选择 13:30~15:30 时间段, 该时间段太阳高度角变化缓慢, 地表温度比较稳定,



有利于测量的准确性。

野外测量系统主要由 D&P 102F 便携式傅里叶变换红外光谱仪、CE312 通道式热红外辐射计、计算机控制系统、红外标准板、接触式温度计、自动气象站及 GPS 定位设备等组成,测量装置如图 2 所示。

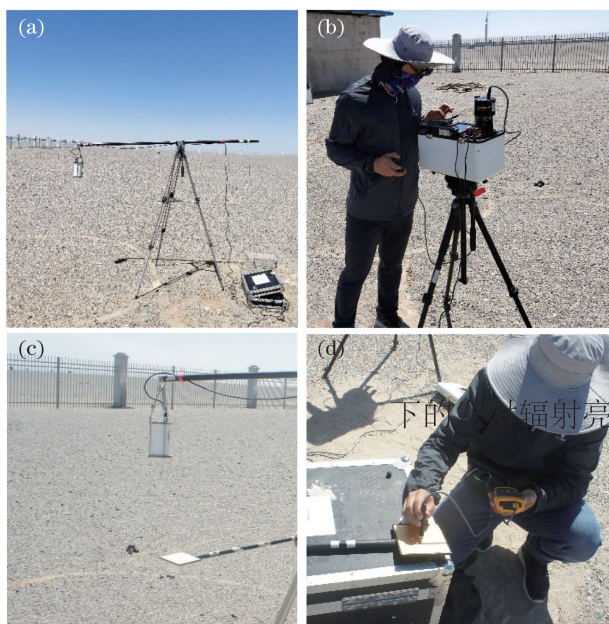


图 2 场地测量系统。(a) CE312;(b) 102F;  
(c) 红外标准板;(d) 点温计

Fig. 2 Field measurement system. (a) CE312; (b) 102F;  
(c) infrared standard board; (d) digimite

D&P 102F 便携式傅里叶变换红外光谱仪用于场地光谱辐射亮度的测量。该光谱仪由美国 D&P Instruments 公司生产,光谱范围为  $2 \sim 16 \mu\text{m}$ ,光谱分辨率为  $4 \text{ cm}^{-1}$ ,光谱准确度为  $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$ ,每秒扫描 1 张光谱,探测器采用 InSb 和 MCT 复合,液氮制冷,观测视场角为  $4.8^\circ$ 。该光谱仪最大的优点就是便携,自带黑体定标源,且光谱分辨率较高。

CE312 通道式热红外辐射计用于场地通道辐射亮度的测量。CE312 是法国 Cimel 公司生产的多通道式热红外辐射计,采用旋转滤光轮进行分光,硅热红外探测器可自动观测并采用内置镀金反射镜对自身发射能量和噪声进行去除。温度分辨率为  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ ,数据重复率优于 99.65%,野外工作测量精度误差小于  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  [22]。

红外标准板用于大气下行辐射亮度的测量。该标准板由美国 Labsphere 公司生产,在近红外、中红外和热红外波段具有 92%~96% 的反射率。

接触式点温计用于红外标准板物理温度的测量。实验中采用 Fluke54-II 单输入数字温度表,它

具有电子补偿功能,可以补偿热电偶误差,极大地提高了测温的准确度,测温精度为  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 多通道地表发射率测量结果

采用多通道场地 TES 算法对试验数据进行处理,实现对敦煌场地温度与发射率的分离,结果如表 1 所示。

表 1 多通道 TES 算法的分离结果

Table 1 Separation results of multi-channel TES algorithm

Wavelength range / $\mu\text{m}$	Emissivity	Temperature / K
8-14	0.9164077	337.7566
11.5-12.5	0.9594690	337.8633
10.3-11.3	0.9309260	337.8271
8.2-9.2	0.8358200	337.5280

本次试验同时利用 D&P 102F 傅里叶变换光谱仪对相同试验区域进行多次场地辐射光谱和大气下行辐射光谱的测量,并采用 ISSTES 实现了对敦煌场地地表温度与发射率光谱的分离,结果如图 3 所示。

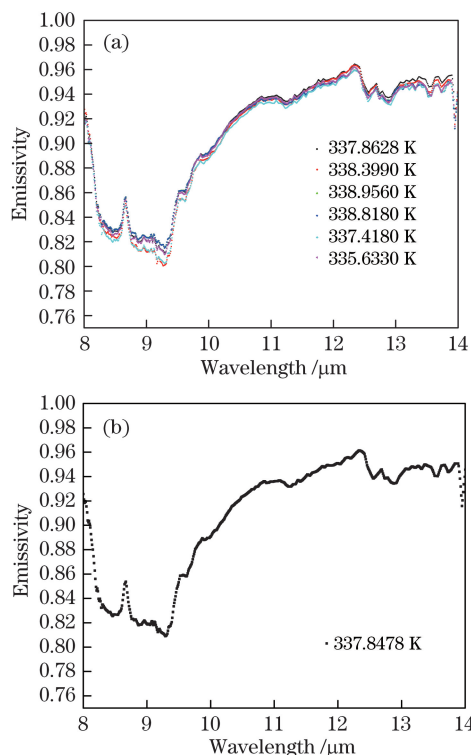


图 3 敦煌场地发射率光谱。(a) 多次测量结果;  
(b) 测量平均值

Fig. 3 Emissivity spectra of Dunhuang site. (a) Results of multiple measurements; (b) measured average value

将 D&P 102F 测量的发射率光谱与 CE312 红外辐射计各通道的光谱响应函数进行积分, 获得与 CE312 各个通道相对应的通道发射率, 将其与 ISSTES 计算得到的通道发射率进行比较, 结果如表 2 所示。

表 2 两种算法分离敦煌场地发射率结果比较  
Table 2 Comparison of two algorithms for separating emissivity of Dunhuang site

Wavelength range / $\mu\text{m}$	Emissivity		
	Multi-channel algorithm	ISSTES	Deviation
8-14	0.9164077	0.915370	0.001038
11.5-12.5	0.9594690	0.956247	0.003222
10.3-11.3	0.9309260	0.933837	-0.002910
8.2-9.2	0.8358200	0.846773	-0.010950

通过图 3 可以看出, 对敦煌场地同一测点开展不同时刻的场地 TES, 场地温度会有所波动, 而场地发射率光谱具有很好的时空稳定性。从表 2 可以看出, 采用多通道法 TES 算法获得的通道发射率与采用 ISSTES 获得的通道发射率具有一致性, 在 8.2~9.2  $\mu\text{m}$  波段范围内的通道发射率偏差最大, 最大偏差值为 0.011。通过图 4 可以看出, 采用 ISSTES 进行的 6 次试验中, 由于跨越的时间周期较长, 获得的场地温度具有一定的波动, 场地温度为 (337.8478 $\pm$ 2.2) K。采用多通道 TES 算法分离出的各通道场地温度具有很好的一致性, 场地温度为 (337.7438 $\pm$ 0.2) K。两种方法分离出的场地平均温度偏差在 0.104 K 以内, 各个通道发射率的偏差均在 0.011 以内, 验证了多通道 TES 算法的可行性和准确性。

### 3.2.2 高光谱地表发射率计算

高光谱地表发射率由多通道地表发射率扩展得到。2018 年 8 月 8 日~9 日采用 D&P 102F 傅里叶变换光谱仪对敦煌场地的代表性区域进行多次高光谱地表发射率测量, 将场地平均发射率曲线作为参考, 利用最优偏移量

$$W = \sqrt{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{\sigma_k} [\epsilon_k - (\Delta + \epsilon_{\text{ref},k})]^2}, \quad (16)$$

得到最优偏移量  $\Delta$ <sup>[23]</sup>, 对参考发射率曲线进行调整可得到场地的高光谱反射率。(16) 式中,  $k$  是 CE312 的通道号,  $\epsilon_k$  是多通道 TES 算法计算得到的 CE312 通道  $k$  的地表发射率,  $\epsilon_{\text{ref},k}$  是参考发射率在 CE312 通道  $k$  的等效发射率,  $\sigma_k$  是多通道 TES 算法

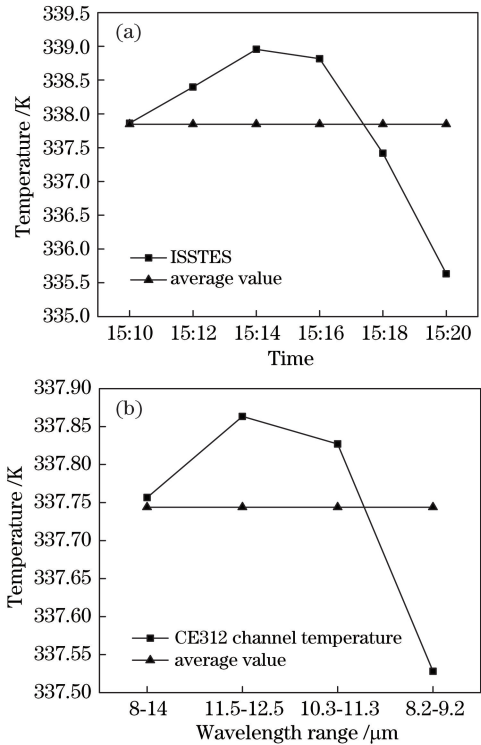


图 4 两种算法分离敦煌场地温度结果比较。

(a) ISSTES; (b) 多通道 TES 算法

Fig. 4 Comparison of two algorithms for separating temperature of Dunhuang site. (a) ISSTES; (b) multi-channel TES algorithm

计算地表发射率的标准偏差,  $\Delta$  是高光谱地表发射率参考曲线需要平移的幅值,  $W$  极小值处对应的  $\Delta$  值便是最优偏移量。图 5 是利用最优偏移量法将场地通道发射率拓展成的场地发射率光谱曲线。

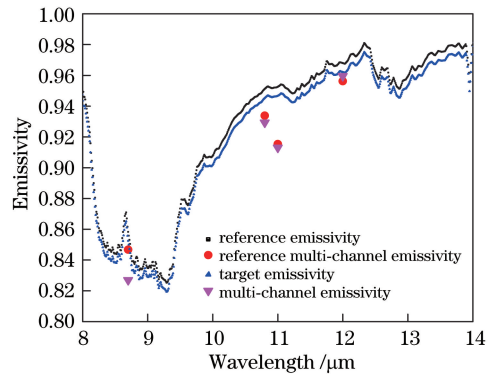


图 5 利用地面多通道发射率反演高光谱发射率

Fig. 5 Hyper-spectral surface emissivity inverted by ground multi-channel emissivity

获得场地发射率光谱及场地温度后, 根据普朗克定律, 就可得到更加精确的场地辐射特性, 表示为

$$L(\lambda) = \epsilon(\lambda) \cdot B(\lambda, T) = \frac{\epsilon(\lambda) c_1}{\pi \lambda^5 \{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1\}} \quad (17)$$

### 3.3 精度分析

采用多通道式热红外辐射计反演敦煌场地温度与发射率,反演过程中的不确定度主要包括测量不确定度和算法分离不确定度两方面。

#### 3.3.1 场地目标辐射和大气下行辐射测量引入的误差

黑体温度不确定度对黑体辐射源的辐射亮度不确定度的影响<sup>[24]</sup>为

$$u_T = \frac{\partial T}{\partial L} \left( \frac{u_L}{L} \right) L(\lambda) = \frac{2hc^3}{\lambda^5} \frac{1}{\ln \left[ \frac{2hc^2}{\lambda^5 L(\lambda)} + 1 \right]} \times \frac{1}{2hc^2 + \lambda^5 L(\lambda)} \frac{u_L}{L(\lambda)}, \quad (18)$$

式中: $u_T$ 表示温度不确定度; $u_L$ 表示辐射亮度不确定度; $L(\lambda)$ 表示黑体光谱辐射亮度。

CE312 通道式热红外辐射计野外工作测量精度误差约为 0.3 °C,此时测量敦煌场地热红外辐射引入的辐射亮度不确定度约为 0.054 W/m<sup>2</sup>·sr·μm (333 K, 11 μm),大气下行辐射引入辐射亮度不确定度约为 0.016 W/m<sup>2</sup>·sr·μm (220 K, 11 μm),等效反演场地温度不确定度约为 0.28 K。

#### 3.3.2 温度与发射率分离算法对反演误差的影响

NEM 是在已知目标最大发射率  $\epsilon_{\max}$  的基础上建立的,因此最大发射率估计的准确性直接影响反演的精度。参考以往敦煌场地发射率测量试验,敦煌场地最大发射率的范围为本试验假设的敦煌场地最大发射率,即  $0.96 < \epsilon_{\max} < 0.98$ 。当假设最大发射率为 0.98 时,对于 333.15 K 的敦煌场地,温度估算的误差范围是 ±2 K,经过迭代方法进一步处理后,误差范围会有一定的缩小,误差范围是 ±1.5 K<sup>[25]</sup>。

RAT 在对目标温度有一个大致估计的前提下,能精确地获得两通道发射率的比值。处理过程中的主要误差来源是系统误差。

MMD 用来对 ASTER 光谱库提供的土壤、岩石、矿物、植被、水和人造材料等 500 多种材料进行发射率光谱的分析,并建立多种材料的最小发射率  $\epsilon_{\min}$  与  $\beta_{\text{MMD}}$  之间的经验关系。 $\beta_{\text{MMD}}$  的准确度取决于测量误差和不完整大气校正的残留误差。对于低  $\beta_{\text{MMD}}$  目标,如水体和植被,不完全大气校正的残留误差对准确度的影响较高,这是由于在低的  $\beta_{\text{MMD}}$  下, $\epsilon_{\min}$  与  $\beta_{\text{MMD}}$  成幂指数关系,微小的  $\beta_{\text{MMD}}$  变化可导致  $\epsilon_{\min}$  较大的变化。为解决这些问题,ASTER TEWG 最初提出一种用于灰体表面的阈值分类法,当  $\beta_{\text{MMD}}$

小于 0.03 时,(12)式中的  $\epsilon_{\min}$  被设定为 0.983,这也是水和大多数植被表面发射率的典型值。这种反演发射率引入的误差在 0.01~0.05 之间(温度为 0.5~3 K)。对于裸露的表面(岩石、土壤和沙石),采用原始的 TES 方法,该方法引入的误差可能高达 2~3 K,但此时的误差主要是由大气校正残留误差引起的。通过使用迭代方法逐步去除大气残留误差的影响,可大大提高反演精度。为验证该算法的可行性,Gillespie 等<sup>[11]</sup> 采用该方法对美国 Railroad Valley 试验场地进行温度与发射率的反演,结果表明反演地表温度误差在 0.4 K 以内,反演地表发射率误差值在 0.003 以内。

## 4 结 论

在热红外波段场地自动化观测辐射定标中,场地温度和发射率是表征场地红外特性的两个关键参数。本文利用多通道式热红外辐射计 CE312 开展敦煌场地红外特性的研究,采用多通道法温度与发射率分离算法实现敦煌辐射定标场的场地温度与场地通道发射率的分离,并采用最优偏移量法得到了场地发射率光谱。与采用光谱迭代平滑温度和发射率分离算法得到的场地通道发射率和温度结果进行比较后可知,场地通道发射率的最大偏差在 0.011 以内,最大温度偏差在 0.104 K 以内,验证了该算法的可行性。利用分离出来的场地温度和发射率光谱数据可以实现对卫星遥感热红外通道进行在轨绝对辐射定标,为采用多通道红外辐射计开展场地自动化观测辐射定标提供了技术支持。后期拟进一步研制自动化观测设备,开展遥感热红外波段场地自动化观测辐射定标技术的研究。

**致谢** 感谢国家卫星气象中心张勇研究员在仪器操作和数据处理中给予的悉心指导与帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Qi G L, Rong Z G. The model and method of radiometric calibration for satellite infrared remote sensor[M]. Beijing: Science Press, 2015: 21-22. 张勇, 祁广利, 戎志国. 卫星红外遥感辐射定标模型与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 21-22.
- [2] Qiu G G, Li X, Wei W, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701001.



- 邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701001.
- [3] Lü J Y, He M Y, Chen L, *et al.* Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801003.  
吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801003.
- [4] Zhang M, Wei W, Zhang Y N, *et al.* High-frequency on-orbit radiometric calibration of SNPP VIIRS based on in-site automated observation technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0428001.  
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地自动化观测技术的 SNPP VIIRS 高频次在轨辐射定标[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0428001.
- [5] Rong Z G, Zhang Y X, Jia F M, *et al.* On-orbit radiometric calibration of fengyun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the South China Sea[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(2): 97-101.  
戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(2): 97-101.
- [6] Tian G L, Liu Q H, Chen L F, *et al.* Thermal remote sensing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2014: 208-213.  
田国良, 柳钦火, 陈良富, 等. 热红外遥感[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 208-213.
- [7] Kahle A B, Rowan L C. Evaluation of multispectral middle infrared aircraft images for lithologic mapping in the East Tintic Mountains, Utah [J]. Geology, 1980, 8(5): 234-239.
- [8] Gillespie A R. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS[C]//The TIMS Data Users' Workshop, June 18-19, 1985. Pasadena, California: JPL Publication, 1985: 29-44.
- [9] Kealy P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(6): 1155-1164.
- [10] 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[J]. International Journal of the Remote Sensing, 1994, 14(3): 230-241.
- [11] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, *et al.* A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1113-1126.
- [12] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42(2): 113-116.
- [13] Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42(2): 117-121.
- [14] Borel C C. Iterative retrieval of surface emissivity and temperature for a hyperspectral sensor[C]//Proceedings for the First JPL Workshop on Remote Sensing of Land Surface Emissivity, May 6-8, 1997, Pasadena, California. [S.l.: s.n.], 1997.
- [15] Sobrino J A, Caselles V. A field method for measuring the thermal infrared emissivity[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1993, 48(3): 24-31.
- [16] Zhang Y, Li Y, Rong Z G, *et al.* Field measurement of gobi surface emissivity spectrum at Dunhuang calibration site of China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1213-1217.  
张勇, 李元, 戎志国, 等. 中国遥感卫星辐射校正场陆表热红外发射率光谱野外测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1213-1217.
- [17] Hook S J, Kahle A B. The micro Fourier transform interferometer ( $\mu$ FTIR): a new field spectrometer for acquisition of infrared data of natural surfaces [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(3): 172-181.
- [18] Hook S J. ASTER spectral library[OL]. [2019-06-27]. <http://speclib.jpl.nasa.gov>.
- [19] Salisbury J W, Wald A, D'Aria D M. Thermal-infrared remote sensing and Kirchhoff's law: 1. Laboratory measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99(B6): 11897-11911.
- [20] Payan V, Royer A. Analysis of temperature emissivity separation (TES) algorithm applicability and sensitivity[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 15-37.
- [21] Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, *et al.* In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using Qinghai Lake[J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 21(4): 370-380.  
胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖对 FY-1C、FY-2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标[J]. 空间科学学报, 2001, 21(4): 370-380.



- [22] Sicard M, Spyak P R. Characterization of a thermal-infrared field radiometer[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3117: 269-280.
- [23] Czapla-Myers J S. Automated ground-based methodology in support of vicarious calibration[D]. Tucson: The University of Arizona, 2006: 41-43, 54-57.
- [24] Xu J. Research on calibration of ambient temperature blackbodies on a thermal-infrared standard radiometer [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 61-64.
- 徐骏. 基于热红外标准辐射亮度计的常温黑体定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2013: 61-64.
- [25] Hulley G, Hook S. HypsIRI level-2 thermal infrared (TIR) land surface temperature and emissivity algorithm theoretical basis document[R]. Pasadena, California, USA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2011.