

地表波谱比辐射率便携式测量的三种改进方法

杨永民^{1,2}, 张仁华¹, 苏红波¹, 田静¹, 陈少辉¹, 荣媛^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院 北京, 100101)

摘要:针对便携式傅里叶变换红外光谱仪测量比辐射率的不确定性,提出了三种改进的波谱比辐射率测量方法.方法1和方法2借助于附加设备改变环境辐照度实现病态方程可解.方法3基于灰体假设,使用迭代求解获得最接近样品的真实温度的温度解,进而计算得到样品的比辐射率.使用温度测量和傅里叶光谱仪观测计算获得波谱比辐射率作为参考的比辐射率结果,对三种改进的方法进行对比和验证.结果表明,对于高比辐射率的石英板和纸板,三种改进方法的测量结果和参考值吻合较好.而对于低比辐射率的锈铁板和铝板,方法3最为接近参考比辐射率结果,而方法1,方法2由于需要过多的观测环节,存在一定的偏差.此三种方法将为改进便携式傅里叶变换红外光谱仪测量提供依据.

关键词:傅里叶红外光谱仪;波谱比辐射率;温度和比辐射率分离;灰体法

中图分类号:TP722.5 文献标识码:A

Three improved methods for measuring spectral emissivity based on the FTIR spectrometer

YANG Yong-Min^{1,2}, ZHANG Ren-Hua¹, SU Hong-Bo¹, TIAN Jing¹,
CHEN Shao-Hui¹, RONG Yuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To minimize the uncertainties related to the FTIR spectrometer, three improved methods were proposed to measure the spectral emissivity. For method 1 (M_1) and method 2 (M_2), an invented device was used to change the environment radiation which makes the ill conditioned equation solvable. Method 3 (M_3) is based on the gray body assumption, and an iterative procedure was applied to derive the temperature of samples, then the spectral emissivity can be retrieved based on this temperature and the FTIR measurements. In order to validate these methods, the emissivity derived from the measured temperature was used as a reference. The results indicate that for the samples with high emissivity, such as quartz plates and cardboard, three improved methods have comparable accuracy; while for the samples with low emissivity, such as rusty iron plate and aluminum plate, the M_3 is more reliable than the other two methods. M_1 and M_2 need to go through more procedures than M_3 , and this may lead to some deviation from the reality. Overall, three improved methods greatly improved the spectral emissivity measurements with FTIR spectrometer.

Key words: FTIR spectrometer; spectral emissivity; temperature and emissivity separation (TES); gray body assumption

PACS: 95.75.Fg

引言

地表温度是陆-气耦合和能量平衡的结果,并被

广泛地应用于数值预报、蒸散估算、气候变化等方面的研究^[1-3]. 地表比辐射率是影响地表温度反演精度的重要参量,温度和比辐射率的分离是热红外遥

收稿日期:2012-04-06,修回日期:2012-10-24

Received date: 2012-04-06, revised date: 2012-10-24

基金项目:国家自然科学基金(41171286),国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428403);中科院知识创新工程重点项目(KZCX2-YW-326-1)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41171286), National Basic Research Program(2010CB428403), and the Program of One Hundred Talented People of Chinese Academy of Science(KZCX2-YW-326-1)

作者简介(Biography): 杨永民(1986-),男,甘肃白银人,博士,主要研究领域为热红外遥感、地表温度反演、区域蒸散估算.

E-mail: starboy1986@126.com

感反演中的基础和核心问题^[4-5]. 地表温度和比辐射率分离问题的关键点在于:待求的未知量的个数大于方程的个数,观测方程是一个病态方程组,无法达到同时求解所有未知数的目的^[6]. 针对这一问题,许多学者基于不同假设,提出了不同的温度和比辐射率分离算法^[7-13]. 这些方法大部分是基于 AVHRR, TM, MODIS, ASTER 等多光谱传感器. 近年来,随着热红外观测技术的不断革新,大量的高光谱传感器被研制出来,并成功升空. 基于高光谱热红外数据的温度,比辐射率,大气廓线一体化反演成为研究的热点和难点. 传感器通道的增多并不能本质上改变病态方程的实质,但,高光谱数据可以有效地凸显地物特征光谱,有助于提炼更具有物理意义的假设和约束,从而使得病态方程可解,提高温度和比辐射率的反演精度^[14-15].

本文的研究主要针对便携式傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测量的不确定性,提出了三种改进的波谱比辐射率测定方法,并使用大量实验来验证和分析三种改进的方法,为比辐射率的精确测定提供一定的依据.

1 原理与方法

1.1 便携式傅里叶变换红外光谱仪测量原理

便携式傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, Fourier transform infrared spectrometer) 是由 D&P (Designs & Prototypes) 公司生产的,具有杂散辐射小、光谱范围宽、分辨率高等优点,已成为野外测量光谱比辐射率的主要设备^[16-17]. 由辐射传输理论可知,仪器接收到的热辐射可以采用下式表示:

$$L_s(\lambda) = L_B(T_s, \lambda)\varepsilon(\lambda)\tau_0(\lambda) + L_0^\uparrow(\lambda) + (1 - \varepsilon(\lambda))L_{DWR}(\lambda)\tau_0(\lambda) \quad (1)$$

式中, $L_s(\lambda)$ 为仪器接收到的光谱辐射亮度, $L_B(T_s, \lambda)$ 是温度为 T_s 的黑体的光谱辐射亮度, $\varepsilon(\lambda)$ 为光谱比辐射率, $\tau_0(\lambda)$ 为大气光谱透过率, $L_0^\uparrow(\lambda)$ 和 $L_{DWR}(\lambda)$ 为大气上行和下行光谱辐射亮度. 由于在使用傅里叶光谱仪测量时,测量样品距离探测器距离很短,可以认为 $\tau_0(\lambda)$ 为 1,同时可以忽略大气的上行辐射 $L_0^\uparrow(\lambda)$. 因此,傅里叶测量的公式简化为:

$$L_s(\lambda) = L_B(T_s, \lambda)\varepsilon(\lambda) + (1 - \varepsilon(\lambda))L_{DWR}(\lambda) \quad (2)$$

下行辐射 $L_{DWR}(\lambda)$ 采用标定的金板进行测量,金板的比辐射率约为 0.04. 为了在测量中去除由于金板温度变化造成的下行辐射的测量误差,可以在测量的结果中将金板的热辐射剔除,从而得到较为准确的下行辐射. 这个过程需要使用接触式热电偶来测

量金板的温度. 修订后的下行辐射采用下式计算:

$$L_{DWR}(\lambda) = \frac{L'_{DWR}(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda)L_B(T_G, \lambda)}{1 - \varepsilon_g(\lambda)} \quad (3)$$

$L_{DWR}(\lambda)$ 为采用包含金板自身热辐射在内的下行辐射, $\varepsilon_g(\lambda)$ 为标定金板的比辐射率, $L_B(T_G, \lambda)$ 为同金板温度相同的黑体的光谱辐射亮度, $L'_{DWR}(\lambda)$ 为去除金板自身热辐射后的环境光谱辐射亮度.

由式(2)可得测量物体的波谱比辐射率计算公式为:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_s(\lambda) - L_{DWR}(\lambda)}{L_B(T_s, \lambda) - L_{DWR}(\lambda)} \quad (4)$$

而使用式(4)的关键在于获得与被测样品温度相同的黑体的光谱辐射亮度,即 $L_B(T_s, \lambda)$. 对此,傅里叶光谱仪中提供两种方法:(1)人为地调整和拟合黑体光谱曲线,或者使用热电偶测定样品的温度. 然而,人为调整方法具有很大的主观性,会造成很大的不确定性. 而使用热电偶测定样品温度的方法,对于粗糙度较大、热传导较差、热惯量较小的自然环境下的样品并不合适,如土壤. 温度测量的不准确将直接导致最终计算的比辐射率存在较大误差.(2)假设被测样品在某一波谱比辐射率值为 1,或者使用者已知样品的波谱比辐射率的先验知识,基于参考通道方法的温度和比辐射率分离算法求解获得样品的温度. 对于其他波段的比辐射率,使用参考通道获得的温度,计算出黑体的辐射亮度. 这种方法对于自然环境中,比辐射率接近于 1 的物质测量是比较合理的. 然而对于一些比辐射率较低的碳酸盐类或者人造的低比辐射率的物质或者矿物质,这个假设并不合理,会造成重大的误差. 此外,对于一些物质,需要观测者具有样品比辐射率的先验知识,对于大部分用户并不见得有效,往往显得不切实际.

1.2 三种改进的波谱比辐射率测量方法

在等温封闭系统中,任一表面的有效辐射等于相应温度下的黑体辐射. 在室内测量样品时,张仁华也发现当实验室内四周的环境和被测物体的温度一致时,比辐射率很低的铝板和比辐射率很高的纸板与同温度的黑体具有相同的辐射温度^[18]. 即在同温系统中,比辐射率的差异并不能够体现出来,这种现象被张称为“假黑体现象”. 同时,张指出,对于比辐射率的测量而言,环境辐照度既具有干扰性,又具有控制性的信息价值. 针对傅里叶光谱仪测量中的一些不现实假定,过分地依赖先验知识,提出三种改进的比辐射率测量方法. 前两种方法基于比辐射率的封闭法测量方法,制作了一套附加设备,以便于这两

种改进方法的实现. 附加设备见图 1. 附加设备由两部分组成, 一部分为罩筒部分, 主要为了改变环境辐照度. 另外一部分为和傅里叶光谱仪连接的可伸缩接口. 罩筒部分使用硬质塑料制作, 以满足轻便易用的目的, 罩筒内壁涂以多层中性哑光黑色漆, 其比辐射率可达 0.999.

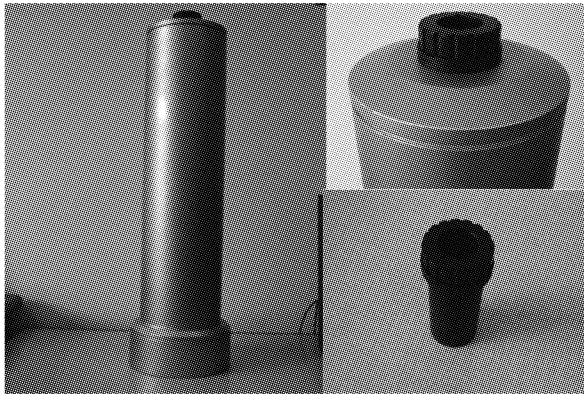


图 1 制作的附加装置
Fig. 1 A device invented to change the environment radiation

测量过程如下:

- (1) 对傅里叶光谱仪进行黑体标定
- (2) 使用傅里叶光谱仪对样品进行采样, 见图 2 (a)
- (3) 使用附加设备罩住被测样品, 在附加设备下进行样品采样, 见图 2 (b)
- (4) 使用标定的金板测量天空的下行辐射, 见图 2 (c).
- (5) 使用附加设备罩住标定的金板, 测量罩筒

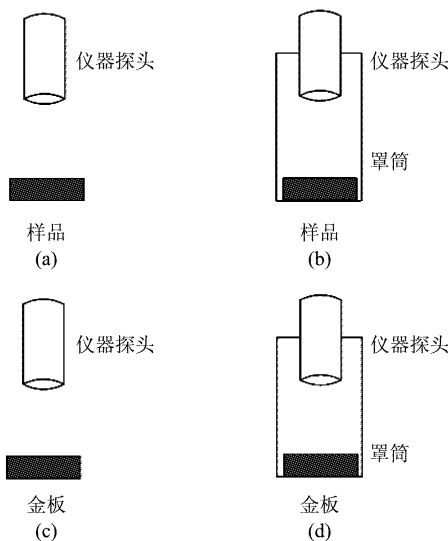


图 2 测量示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the measurement process

下的下行辐射, 见图 2 (d).

整个过程需要快速进行, 以保证在这一小段时间内, 天空下行辐射及样品温度变化不大.

第一种改进方法, 后面称为 M_1 法, 主要基于“假黑体”现象及其内在原理. 当被测样品和周围的环境温度一致时, 即在式 (2) 中, $L_B(T_s, \lambda)$ 和 $L_{DWR}(\lambda)$ 相等时, 此时, 仪器测量到的辐射亮度就是同温度黑体的辐射亮度. 因此, 在计算测量物体的波谱比辐射率的式 (4) 中, $L_B(T_s, \lambda)$ 可以通过创造“假黑体”环境 (等温环境) 而获得. 那么, 比辐射率的测量将不需要任何的先验知识和假定. 而在上面的测量步骤中, 第三步在附加设备罩住被测样品, 在附加设备下进行样品的采样就是为了达到这一目的.

第二种方法, 后面称为 M_2 法, 主要是基于封闭法测量方法^[18]. 改变两次环境辐照度下对样品进行采样, 假设样品在这一快速测量过程中温度并未改变, 描述如下:

$$L_{s,1} = L_B(T_s, \lambda)\epsilon(\lambda) + (1 - \epsilon(\lambda))L_{DWR,1} \quad (5)$$

$$L_{s,2} = L_B(T_s, \lambda)\epsilon(\lambda) + (1 - \epsilon(\lambda))L_{DWR,2} \quad (6)$$

$L_{s,1}(\lambda)$ 为在天空冷辐射下测量的光谱辐射亮度, $L_{DWR,1}(\lambda)$ 为大气下行冷辐射. $L_{s,2}(\lambda)$ 为在附加设备罩下测量的光谱辐射亮度, $L_{DWR,2}(\lambda)$ 为附加设备的下行辐射. 那么比辐射率可以使用下式得出:

$$\epsilon = 1 - \frac{L_{s,1} - L_{s,2}(\lambda)}{L_{DWR,1}(\lambda) - L_{DWR,2}(\lambda)} \quad (7)$$

第三种方法, 后面称为 M_3 法, 基于灰体法^[19], 假设被测样品在某两个通道的比辐射率相等, 从而达到减少未知数求解病态方程的目的. 这种方法在多光谱观测数据中并不见得可靠, 但是对于高光谱观测数据而言, 这种假设是极具潜力的方法.

$$\begin{aligned} \epsilon(\lambda_n) &= \frac{L_s(\lambda_n) - L_{DWR}(\lambda_n)}{L_B(T_s, \lambda_n) - L_{DWR}(\lambda_n)} = \epsilon(\lambda_{n+1}) \\ &= \frac{L_s(\lambda_{n+1}) - L_{DWR}(\lambda_{n+1})}{L_B(T_s, \lambda_{n+1}) - L_{DWR}(\lambda_{n+1})} \quad (8) \end{aligned}$$

具体操作过程, 针对于每两个相邻波段, 通过调整温度使得相邻的两个通道的比辐射率相等, 从而可以获得一系列满足这一条件的解, 对这些数值解进行频率分析, 频率最高的温度值即为最接近观测样品真实温度的温度解, 使用这一温度计算同温黑体波谱辐射, 使用 (2) 式就可以获得样品的波谱比辐射率结果. 对于这一计算的详细过程可见图 3 中给出的迭代计算过程. 对于每个相邻的波段可以迭代求解满足条件的温度结果, 对于没有满足条件的波段处赋值为 999. 为获得真实温度, 需要对于迭代出的一系列满足条件

的温度解进行频率分析,频数最高的温度值为最接近观测样品真实温度的温度解。

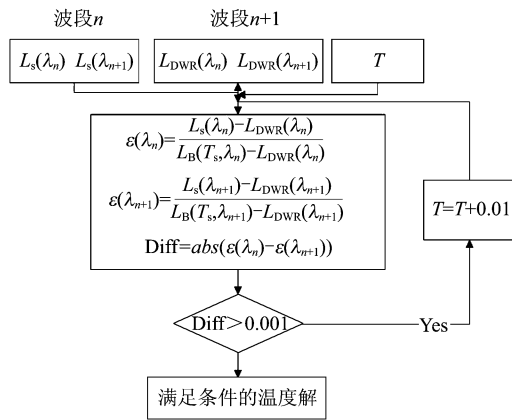


图3 “灰体法”迭代求解过程
Fig. 3 The iterative process of "grey body" method

2 数据获取

2010年9月-10月,选定晴朗、无云、静风的天气,在中科院地理所楼顶开展了多次观测实验.测量的仪器系统主要为D&P公司生产的便携式Model-102型傅立叶变换红外光谱仪,其光谱范围为2~16 μm ,光谱分辨率为2~24 cm^{-1} .傅里叶光谱仪采用液氮制冷,采用可调的冷、热黑体来标定仪器的相应函数.仪器的测量步骤为黑体定标,样品的光谱辐射亮度测量,大气下行辐射测量.对于下行辐射的测量,仪器配备一块标定的金板.为满足两种改进方法的要求,研制了一套附加装置,对附加装置罩下的样品和金板分别进行了测量.测量的样品包括纸板、三合板、铁板、铝板、大理石板等,样品的比辐射率包括高比辐射率和低比辐射率样品,用以验证三种改进方法的有效性.对于方法3,使用IDL语言编写了迭代计算程序,对相邻的波段进行迭代求解,并使用排序法进行温度解的频率分析.

3 结果

3.1 假黑体现象

“假黑体”现象及内在的机理对于比辐射率的封闭法测量具有重要的价值.对此,2010年9月15日,在实验室内使用傅里叶光谱仪对不同样品进行了波谱辐射亮度测量.图4中为六种样品室内测量的波谱辐射亮度结果.对于具有不同的比辐射率的样品,如标定金板(0.04),橡胶板(0.98),其在室内的波谱辐射亮度结果都基本重合.当室内温度和被测样品一致或者差异很小时,此时,比辐射率的差异

可以忽略,测量的波谱辐射亮度和同温黑体的辐射亮度是一致的.这一结果充分证明了,在同温系统中,任何波谱范围内,比辐射率的差异都会受到来自于环境辐射的补偿.这一点对于提出的第一种改进方法至关重要.

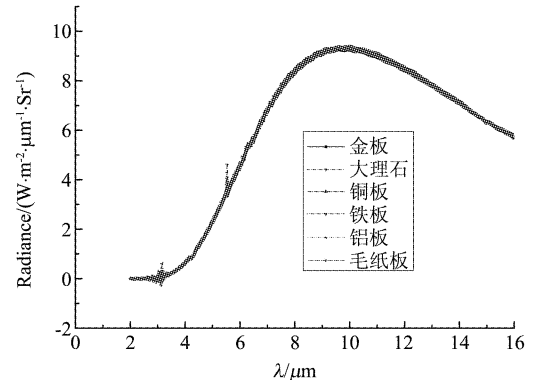


图4 六种样品室内波谱辐射亮度测量结果
Fig. 4 Spectral radiance of six types of samples measured in the laboratory

3.2 改进方法测量结果

为了验证和分析三种改进的测量方法,开展了多次实验.为了说明三种方法的有效性,选用了高(石英板,纸板)、中(锈铁板)、低比辐射率(铝板)的样品进行分析.对样品进行波谱辐射亮度采样之后,立刻使用接触式热电偶测量样品的温度,用此温度模拟黑体的波谱辐射亮度曲线,计算样品的比辐射率,并将这一结果作为参考和验证三种改进方法的参考值,后面称之为参考比辐射率(在图中用real来表示).三种改进的比辐射率测量结果与参考比辐射率结果对比见图5.图5(a)为石英板测量结果,三种改进的测量方法与参考比辐射率结果比较一致,差异较小.尤其在11.5 μm 的峰谷处,三种改进方法和参考比辐射率谱吻合较好,在一定程度上证实了三种改进方法的可靠性.图5(b)为纸板测量结果,在8~10.5 μm 处呈下降趋势,在10.5~14 μm 呈现上升趋势.三种改进的方法获得的波谱比辐射率和参考波谱比辐射率变化趋势一致.图5(c)为锈铁板测量结果, M_1 和 M_2 获得的波谱比辐射率比较一致,而 M_3 获得的比辐射率大于 M_1 和 M_2 获得的比辐射率谱,差值约为0.045.参考比辐射率大于 M_1 , M_2 和方法3的结果.图5(d)为铝板测量结果, M_1 , M_2 和 M_3 的比辐射率测量结果都小于参考比辐射率结果.尤其是 M_2 ,在12~13 μm 测量的结果和参考值的结果偏差可达0.1.实验结果

表明,对于高比辐射率的石英板、纸板,三种改进方法测量的结果比较一致,并和样品的参考比辐射率吻合较好.而对于比辐射率较低的样品,锈铁板和铝板,三种改进的方法和参考值的结果存在一定的差异, M_1 和 M_2 的结果小于参考比辐射率结果,而 M_3 和参考结果比较接近.为了更进一步分析三种方法,表 1 列出了三种改进方法的统计对比结果.

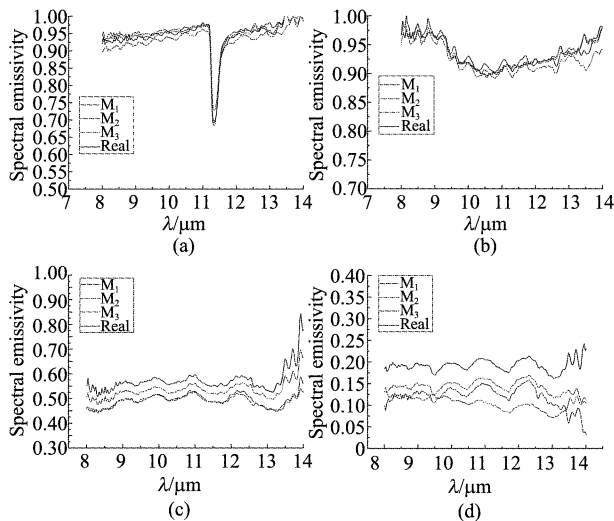


图 5 三种改进的比辐射率测量结果与参考的比辐射率对比结果

Fig. 5 The comparison of spectral emissivity derived from three improved methods and the measured temperature

表 1 四种样品比辐射率测量结果统计表

Table 1 The quantitative measures of spectral emissivity for four samples

| | 大理石 | | | 纸板 | | | 锈铁板 | | | 铝板 | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | M_1 | M_2 | M_3 | M_1 | M_2 | M_3 | M_1 | M_2 | M_3 | M_1 | M_2 | M_3 |
| N | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 | 374 |
| MAD | 0.0250 | 0.0180 | 0.0190 | 0.0080 | 0.0090 | 0.0130 | 0.0780 | 0.0770 | 0.0370 | 0.0700 | 0.0830 | 0.049 |
| RMSD | 0.0280 | 0.0200 | 0.0210 | 0.0100 | 0.0110 | 0.0140 | 0.0840 | 0.0810 | 0.0400 | 0.0730 | 0.0850 | 0.050 |
| R_2 | 0.9570 | 0.9580 | 0.9910 | 0.9400 | 0.9430 | 0.9820 | 0.6130 | 0.7210 | 0.9620 | 0.1730 | 0.2490 | 0.536 |

3.3 误差分析和讨论

三种改进的波谱比辐射率测量方法杜绝了需要样品先验的比辐射率知识的不切实际的要求,然而在上节的分析和对比中发现,三种方法在高比辐射率的样品测量中具有较好的精度,而在中,低比辐射率的锈铁板和铝板测量结果中发现,三种方法存在一定的差异,而且都与参考的比辐射率结果有一定的差异,三种改进的方法测量结果都略低于样品的参考比辐射率结果.图 6 为 M_1 中同温系统黑体的波谱辐射亮度和观测温度模拟的黑体波谱辐射亮度

的对比, M_1 中的同温系统黑体的波谱辐射亮度略大于与样品真实温度同温的黑体的波谱辐射亮度,因此,最终的计算的比辐射率结果略小于真实的波谱比辐射率.造成这微小差异的原因在于采用附加装置来罩住被测样品的方法,不能保证样品和附加装置达到真正的完全同温,两者存在一定的温度差异,造成在附加装置下测量的结果偏离于真实的同温黑体的波谱辐射亮度,造成第一种改进方法产生一定的误差.对于第二种改进方法需要 4 次独立观测,观测时间内各种因素的变化是造成不准确的主要原因.另外一方面,我们采用接触式热电偶来获取样品的真实温度并不是一个合理的办法.接触测量的点远小于仪器的视场大小,此外,张仁华等指出,使用这种接触式测量的结果通常得到的是样品表面温度和空气温度的一个综合结果^[18].因此,这样测量的温度更多的可以作为一种参考温度.而对于 M_3 主要依赖于高光谱的观测结果,则具有观测次数少,减少误差的优势.然而,这种迭代计算需要花费大量的时间.因此,对比改进的三种方法和傅里叶光谱仪中提供的两种方法,可以明确改进方法具有的优势表现在以下方面:(1)不需要任何样品的先验知识,参考通道方法往往需要知道样品在某些波谱的特性,而这对于大部分用户而言是不现实的;(2)可以用来测量比辐射率较低的样品,这对于矿物测量和分析具有重要意义;(3)在一定程度上杜绝了使用接触式热电偶测量的不准确温度来模拟同温黑体波谱辐射亮度的不准确性;(4)对比三种方法, M_3 效果最好, M_1, M_2 可能会在测量低比辐射率样品时造成一定的误差.

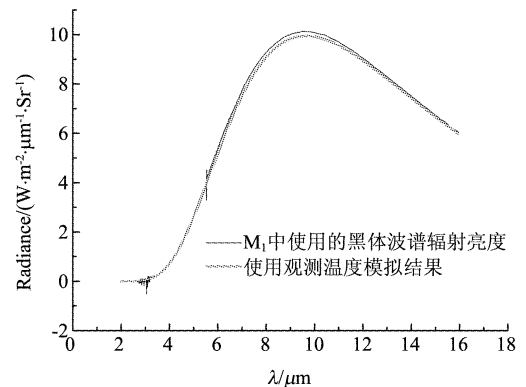


图 6 M_1 方法中同温系统黑体的波谱辐射亮度和观测温度模拟的黑体波谱辐射亮度的对比

Fig. 6 The comparison of the black body spectral radiance measured with M_1 method and simulated with observed temperature

4 结论

比辐射率的精确测定对于地表温度反演精度的提高具有重要价值. 便携式傅里叶变化红外光谱仪是一种在地面精确测定比辐射的重要仪器, 然而, 其所携带比辐射率计算方法存在过分依赖样品比辐射率先验知识的重要缺陷, 致使其在岩石和矿物的测量中不能很好应用. 鉴于便携式傅里叶红外光谱仪的缺陷, 提出了三种改进的测量方法. 三种测量方法可以有效地用来测量高、中、低比辐射率样品的比辐射率谱, 有效地杜绝了需要样品比辐射率的先验知识的不切实际的依赖. 结果表明, M_1 , M_2 和 M_3 方法对于高比辐射率的样品, 测量精度相当, 而对于中比辐射率的铁板和低比辐射率的铝板, 三种改进方法和参考的比辐射率结果存在一定的差异. 分析三种比辐射率测量的改进方法, 认为 M_3 法具有较好的使用价值, 但需要大量的迭代计算. 而对于 M_1 , M_2 方法, 通过额外的附加设备实现假黑体现象, 可以更快捷地得到样品的比辐射率谱, 然而这两种方法由于需要更多的观测环节, 可能会造成一定的不确定性.

REFERENCES

- [1] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 1. Formulation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **213**(1-4): 198 - 212.
- [2] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs .1. Model formulation [J]. *Journal of Climate*, 1996, **9** (4): 676 - 705.
- [3] Friedl M A. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **79**(2-3): 344 - 354.
- [4] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface-temperature from a satellite [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**(10): 1509 - 1522.
- [5] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems [J]. *Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation in Conjunction with Other Sensors*, 1993: 35 - 60.
- [6] Becker F, Li Z L. Temperature-independent spectral indexes in thermal infrared bands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **32**(1): 17 - 33.
- [7] Sobrino J A, Raissouni N, Li Z L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**(2): 256 - 266.
- [8] Valor E, Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **57** (3): 167 - 184.
- [9] Kahle A B, Madura D P, Soha J M. Middle infrared multi-spectral aircraft scanner data - analysis for geological applications [J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(14): 2279 - 2290.
- [10] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**(2): 113 - 116.
- [11] Watson K. 2-temperature method for measuring emissivity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**(2): 117 - 121.
- [12] 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.
- [13] Li Z L, Petitcolin F, Zhang R H. A physically based algorithm for land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data [J]. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 2000, **43**: 23 - 33.
- [14] Cheng J, Liu Q H, Li X W, et al. Correlation-based temperature and emissivity separation algorithm [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2008, **51** (3): 357 - 369.
- [15] Cheng J, Nie A X, Du Y M. The correlation based mid-infrared temperature and emissivity separation algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29** (2): 340 - 345.
- [16] Korb A R, Dybwad P, Wadsworth W, et al. Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(10): 1679 - 1692.
- [17] Hook S J, Kahle A B. The micro Fourier Transform Interferometer (μ FTIR) - A new field spectrometer for acquisition of infrared data of natural surfaces [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **56**(3): 172 - 181.
- [18] ZHANG Ren-Hua. *Remote sensing model and ground surface foundation* [M], The Science Press: Beijing (张仁华. 定量热红外遥感模型及地面实验基础. 北京, 科学出版社), 2009: 90 - 157.
- [19] Barducci A., Pippi I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the "grey body emissivity" method [J]. *Ieee T Geosci Remote*. 1996, **34**: 681 - 695.