

# 机载 FTIR 地球大气红外背景辐射光谱特征研究

张天舒, 刘文清, 高闽光, 陆亦怀, 刘建国, 刘 诚, 徐 亮, 朱 军

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

**摘 要** 介绍了机载傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪测量地球大气红外背景辐射的实验过程,对地球/大气的红外背景辐射进行了详细的分析,给出了描述这一辐射过程的理论表达式,证明红外背景辐射主要取决于地表温度、地表发射率、大气透过率和大气温度这四个参数。在理论分析的基础上,对不同观测高度、不同地物背景的实测光谱进行了对比和分析,得到了红外背景辐射的光谱特征。

**主题词** 背景辐射; 傅里叶变换红外; 航空观测

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)06-1018-04

## 引 言

地球大气系统的红外背景辐射直接反映了地球大气系统的物理特性,它是红外遥感、大气辐射传输、辐射气候学研究领域中的重要参数,也是红外遥感设备在设计和使用时需要考虑的重要因素。为了获得真实的地球/大气的红外背景辐射,除了建立大气辐射传输模型进行模拟计算研究外,利用机载光谱仪进行高空对地观测,获得各种地物的实测光谱数据是更为有效的方法。受机载环境条件的限制,光谱仪要满足体积小、重量轻、测量波段宽、扫描速度快、光谱分辨率高、能量效率好等技术要求,傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪是较好的选择。它能够同时测量、记录较宽波段的光谱信息,并以很高的效率采集来自光源的辐射能量,因而具有比传统光谱仪高得多的信噪比、分辨率和测量速度。FTIR光谱仪由于其自身的优越性,已经成为地球和大气红外探测的有力工具。实验使用 BOMEM 公司 MR154 型 FTIR 光谱仪,其参数显示在表 1 中。航空搭载平台是一架经过特殊改装的 Y-12 运输机,机舱底部设有两个观测窗口,可以在起飞后旋转摇柄打开窗口进行观测。实验中飞机在 1 000 m 和 3 500 m 的高度上,对植被、裸土、沙滩及海水等多种类型地表进行了航空观测。

## 1 FTIR 光谱仪辐射定标方法

来自地表和大气的背景辐射  $L'(\nu)$  进入 FTIR 光谱仪后,在其内部的迈克尔逊干涉仪中产生双光束干涉。在仪器没有

误差的理想状态下,干涉图  $I(x)$  与探测器接收到的辐亮度  $B(\nu)$  之间的关系为

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu \quad (1)$$

**Table 1 FTIR spectrometer instrumental specifications**

参数	数值
重量/kg	60
外形尺寸/mm <sup>3</sup>	1 050×650×650
光谱采集波段/cm <sup>-1</sup>	2 000~5 000
采样时间/s	1
相邻光谱时间间隔	间隔 5 s, 连续采集
分辨率/cm <sup>-1</sup>	4
视场角/mrad	28

光谱仪在实际应用中存在着各种误差,测得的干涉图不会很好的符合等式(1)。在辐射定标时必须要考虑各种干扰因素的影响<sup>[1]</sup>。例如,测得的干涉图经傅里叶逆变换还原为光谱时,需要精确定位零级干涉条纹的位置。当定位存在误差  $\xi$  时,将会引入  $2\pi\nu\xi$  的相位偏移。其次,分束器带来的光程差未能很好的补偿也会导致两相干光束之间存在额外的与波数有关的相位偏移;同时,FTIR 光谱仪的两束相干光中,一束通过分束器三次,补偿器一次,另一束通过分束器一次,补偿器三次,如果补偿器、分束器厚度不同,就会引入额外的光程差  $\Delta x$ ,从而带来相位偏差  $2\pi\nu\Delta x$ <sup>[2]</sup>。

复数光谱保留了仪器光学系统和光谱还原时引入的相位偏移信息<sup>[3]</sup>,总的相位偏移  $\Delta\theta$  是测得的光谱矢量  $G(\nu)$  与  $x$  轴之间的夹角,即

收稿日期: 2005-02-26, 修订日期: 2005-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(10274080)资助项目

作者简介: 张天舒, 1977 年生, 中国科学院安徽光学精密机械所在读博士

$$\Delta\theta = \arctg\left(\frac{\text{Im}(G(\nu))}{\text{Re}(G(\nu))}\right) \quad (2)$$

光谱仪正常工作时,探测器工作在其线性范围内,因此可以假设光谱仪是一个线性响应系统,这个系统的输入是实数的光谱辐射亮度  $L(\nu)$ ,输出是复数光谱  $G(\nu)$ ,二者之间的函数关系称为仪器响应函数(IRF),定标就是要确定 IRF。我们假定 IRF 具有如下线性形式

$$G(\nu) = R(\nu) \cdot L(\nu) + O(\nu) \quad (3)$$

IRF 中含有两个未知量  $R(\nu)$ ,  $O(\nu)$ , 分别代表与波数有关的光谱仪的线性增益(Gain)和某些干扰因素导致的测量值相对于零点的偏移(Offset)。

光谱仪在测量时,探测器接收到的辐射量除来自目标源以外,还包括仪器自身的热辐射、辐射传输路径中大气的热辐射及散射到光谱仪入射光瞳上的环境背景辐射等。定标时为了尽量削弱干扰因素,黑体源应充满光谱仪视场,并尽量贴近光谱仪的入射光瞳。这样传输路径中大气的热辐射和环境背景辐射等干扰因素基本可以忽略,但是仪器自身的热辐射(主要是分束器等光学元件)的影响仍不能忽略。若  $L_o(\nu)$  是定标时来自标准黑体的辐射,  $L_i(\nu)$  是仪器自身的辐射,那么

$$G(\nu) = R(\nu)[L_o(\nu) + L_i(\nu)] \quad (4)$$

与式(3)相比可知干扰因素带来的偏移  $O(\nu) = R(\nu)L_i(\nu)$ 。  $O(\nu)$  反映仪器自身的性质,不随外界条件改变而改变,若仪器的工作状况不变,即使目标源的辐射发生改变,偏移仍不变。

光谱仪分别测量冷、热标准黑体辐射源,得到两条复数光谱  $G_c(\nu)$  和  $G_h(\nu)$ , 根据普朗克定律可以计算黑体辐射亮度分别为  $L_c(\nu)$  和  $L_h(\nu)$ 。根据式(2)可以计算得到两复数光谱的相位偏移  $\Delta\theta_c$ 、 $\Delta\theta_h$ ,  $L_c(\nu)$  和  $L_h(\nu)$  进入光谱仪后,会产生同样的相位偏移,因此黑体的辐射亮度也可以用复数表示为

$$\begin{aligned} \vec{L}_c(\nu) &= L_c(\nu)\cos(\Delta\theta_c) + iL_c(\nu)\sin(\Delta\theta_c) \\ \vec{L}_h(\nu) &= L_h(\nu)\cos(\Delta\theta_h) + iL_h(\nu)\sin(\Delta\theta_h) \end{aligned} \quad (5)$$

将冷、热黑体的复数光谱、复数辐射亮度分别带入式(3),解方程组得到仪器响应函数的系数  $R(\nu)$  和  $O(\nu)$ <sup>[4]</sup> 为

$$\begin{aligned} R(\nu) &= \frac{\text{Re}(G_h(\nu)) - \text{Re}(G_c(\nu))}{L_h(\nu)\cos(\Delta\theta_h) - L_c(\nu)\cos(\Delta\theta_c)} + \\ & i \frac{\text{Im}(G_h(\nu)) - \text{Im}(G_c(\nu))}{L_h(\nu)\sin(\Delta\theta_h) - L_c(\nu)\sin(\Delta\theta_c)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} O(\nu) &= \text{Re}(G_h(\nu)) - \text{Re}(R(\nu))L_c(\nu)\cos(\Delta\theta_c) \\ & + i[\text{Im}(G_h(\nu)) - \text{Im}(R(\nu))L_c(\nu)\sin(\Delta\theta_c)] \end{aligned} \quad (7)$$

式(3)的系数确定后,对于辐射强度介于冷、热黑体之间的目标,其复数光谱都可以通过仪器响应函数定标得到辐射亮度,

$$L(\nu) = \left| \frac{G(\nu) - O(\nu)}{R(\nu)} \right| \quad (8)$$

在式(8)中,仪器自身热辐射等干扰因素带来的辐射量偏移得到了校正。

## 2 地表与大气的辐射

从空中对地观测时,地表与大气的辐射都会被光谱仪接

收到。若地表的光谱发射率为  $\epsilon_{surf}(\nu)$ , 则地表发出的辐射为

$$L_{surf} = \epsilon_{surf}(\nu) \frac{C_1 \nu^3}{\exp(C_2 \nu / T_{surf}) - 1} \quad (9)$$

当飞行高度较低时,可以假设被观测的这一层大气温度分布均匀,它发出的辐射为各向同性的传播。可以把大气当作温度为  $T_{atm}$  的灰体来处理,它发出的辐射亮度为

$$L_{atm} = \epsilon_{atm}(\nu) \frac{C_1 \nu^3}{\exp(C_2 \nu / T_{atm}) - 1} \quad (10)$$

处于热力学平衡条件下大气的发射率  $\epsilon_{atm}(\nu)$  与吸收率  $\alpha_{atm}(\nu)$  相等,而吸收率与大气透过率  $\tau_{atm}(\nu)$  的关系为  $\alpha_{atm}(\nu) = 1 - \tau_{atm}(\nu)$ , 所以式(10)可以写为

$$L_{atm} = [1 - \tau_{atm}(\nu)] \frac{C_1 \nu^3}{\exp(C_2 \nu / T_{atm}) - 1} \quad (11)$$

地表除了自身的灰体辐射之外,还会反射来自大气的辐射,反射部分可表示如下,

$$L_{ref} = \rho_{surf}(\nu)L_{atm}(\nu, T_{atm}) \quad (12)$$

这里  $\rho_{surf}(\nu)$  是地表的反射率。大气射向地表的辐射一部分被反射,剩余的部分被地表吸收,

$$L_{abs} = \alpha_{surf}(\nu)L_{atm}(\nu, T_{atm}) \quad (13)$$

式中  $\alpha_{surf}(\nu)$  是地表的吸收率,因能量守恒有  $\rho_{surf}(\nu) + \alpha_{surf}(\nu) = 1$ , 并且地表的吸收率与发射率相等,所以地表的反射率可以表示为  $\rho_{surf}(\nu) = 1 - \epsilon_{surf}(\nu)$ , 式(12)可以重写为

$$L_{ref} = [1 - \epsilon_{surf}(\nu)]L_{atm}(\nu, T_{atm}) \quad (14)$$

当光谱仪在高空垂直向下观测时,接收到的总辐射包括大气的辐射  $L_{atm}$ 、地表自身的辐射  $L_{surf}$  和地表反射的大气辐射  $L_{ref}$  三个部分<sup>[5]</sup>(如图1所示),其中  $L_{surf}$  和  $L_{ref}$  在传输过程中被大气衰减,若  $\tau_{atm}(\nu)$  是传输路径中大气的透过率,那么进入光谱仪的总辐射  $L_T$  可以表示为

$$L_T = L_{atm} + \tau_{atm}(\nu)[L_{surf} + L_{ref}] \quad (15)$$

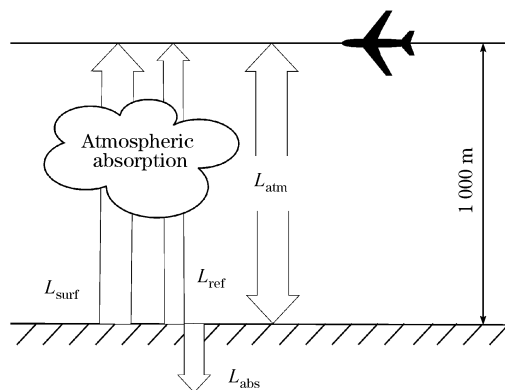


Fig. 1 The radiation of surface and atmosphere received by FTIR

考虑到式(9)、式(11)和式(14),  $L_T$  最后可以写为

$$\begin{aligned} L_T &= \epsilon_{surf}(\nu)\tau_{atm}(\nu) \frac{C_1 \nu^3}{\exp(C_2 \nu / T_{surf}) - 1} \\ & + [1 + \tau_{atm}(\nu) - \epsilon_{surf}(\nu)\tau_{atm}(\nu)] \cdot \\ & [1 - \tau_{atm}(\nu)] \frac{C_1 \nu^3}{\exp(C_2 \nu / T_{atm}) - 1} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)就是 FTIR 光谱仪航空观测时,测得光谱的理论表达式。从中可以看出,地球和大气的红外背景辐射主要取决于

地表温度、地表发射率、大气透过率和大气温度这四个参数。

### 3 结果与讨论

机载 FTIR 测得的复数原始光谱用前面所述的辐射定标方法标定之后,得到辐射亮度谱。在不同地物背景和观测条件下,红外背景辐射具有不同的光谱特征。

#### 3.1 不同地物背景的光谱特征对比

不同地物类型对红外背景辐射的影响是非常明显的。长波辐射主要来自地球表面和大气的自身辐射的贡献,因此影响长波辐射的因素主要是地球表面的温度和传输路径中大气的温度。此次观测处于冬春交际,这时陆地和海洋的温度都开始从最低点缓慢回升,但海水热容量较大,升温较慢,此时海水的温度略低于陆地表面的温度。从图 2a 和图 2b 中可以看出,无论是 1 000 m 还是 3 500 m 的观测结果,海洋上空的红外背景辐射都弱于陆地上空,观测的结果反映了海陆不同地物的表面温度特征。

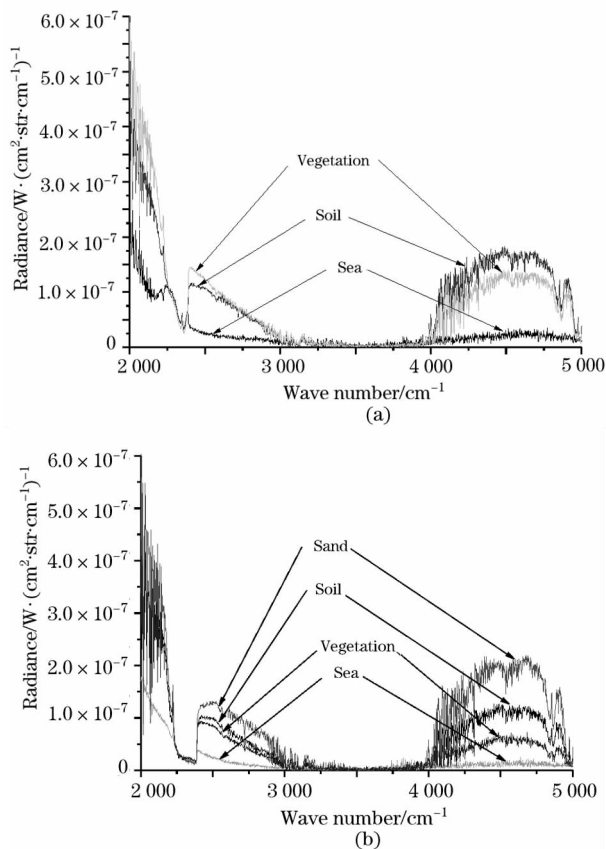


Fig. 2b The comparison of background radiations of various surfaces

(a): Measured at 1 000 m; (b): Measure at 3 500 m

对陆地观测包括三种地物类型:裸土、沙滩和植被,其谱特征都非常相似,强度略有不同。这种差异反映了同样的太阳辐射条件下,不同地物升温的速度不同。沙滩地表升温最快,辐射较强;植被地表升温较慢,辐射较弱;裸土地表介于二者之间。

3 500~4 000  $\text{cm}^{-1}$  是水汽的强吸收波段,这里光谱信号极其微弱,已经小于光谱仪的 NESR(噪声等效光谱辐射亮度,约  $10^{-9} \text{ W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{cm}^{-1})^{-1}$ ),光谱信号被仪器噪声淹没,观测不到有意义的光谱信号。在短波长部分(4 000~5 000  $\text{cm}^{-1}$ ),辐射能量主要来源是反射太阳辐射,光谱辐射亮度的强弱体现了不同地物背景地表反照率的不同。

#### 3.2 海洋背景辐射的高度变化

从图 3 中可以看出,2 200~2 400  $\text{cm}^{-1}$  的  $\text{CO}_2$  吸收带在 1 000 m 的高度和 3 500 m 的高度上有很大不同。3 500 m 高度观测到的光谱在该吸收带位置上出现吸收谷,而 1 000 m 高度观测到的光谱在该吸收带位置上反而出现了一个明显的发射峰。这是由于大气温度的垂直分布造成的。海水和底层大气在日出后接受太阳辐射温度不断上升,至午后二时达到温度的最高点。在海洋表面和底层大气升温的过程中,水热容量大升温很慢,大气热容量较小升温很快,1 000 m 以下大气温度高于海洋表面温度,因而在传输路径中的  $\text{CO}_2$  表现出发射特征。

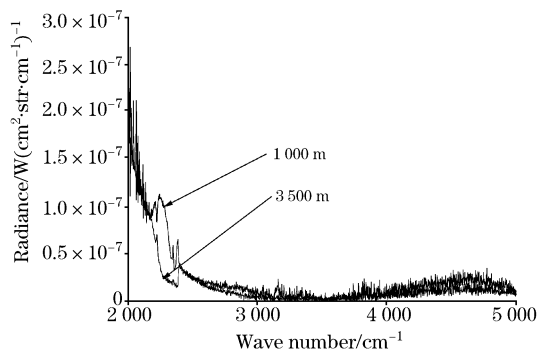


Fig. 3 The change of ocean background radiation at different altitude

### 4 结论

本文对地表和大气的辐射过程进行了详细的分析,证明光谱仪测得的地球和大气辐射主要取决于地表温度、地表发射率、大气透过率和大气温度这四个参数,并给出了描述这一辐射过程的理论表达式。通过对实测光谱的对比和分析,发现了地表温度变化、大气透过率、大气温度垂直变化对红外背景辐射的光谱特征的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Lawrence A Sromovsky. *Appl. Opt.*, 2003, 42: 1779.
- [2] Lindermeir E et al. *Appl. Opt.*, 1992, 31: 4527.
- [3] Revercomb H E, Buijs H. *Appl. Opt.*, 1988, 27: 3210.
- [4] ZHANG Tian-shu, LIU Wen-qing, GAO Min-guang, et al(张天舒, 刘文清, 高闽光, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(3): 430.
- [5] Greg Vaughan. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85: 48.

## The Study of Infrared Background Radiation of Earth and Atmosphere by Airborne FTIR Spectrometer

ZHANG Tian-shu, LIU Wen-qing, GAO Min-guang, LU Yi-huai, LIU Jian-guo, LIU Cheng, XU Liang, ZHU Jun  
Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Machines, Hefei 230031, China

**Abstract** The present article describes the experiment of airborne Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer detecting the background radiation of earth and atmosphere. Considering the surface radiation and atmospheric absorbance and emission, the expression of radiations measured by airborne FTIR is given. It is indicated that the background radiations depend on four parameters: surface temperature, surface emissivity, atmospheric transmission and temperature. Based on theoretic analysis the measured spectra are compared and analyzed according to the differences in altitude and surface. Spectral characters of infrared background radiation are described.

**Keywords** Background radiation; FTIR spectrometer; Aviation measurement

(Received Feb. 26, 2005; accepted May 28, 2005)