

文章编号: 0253-2239(2010)05-1321-06

空间调制干涉光谱成像仪的室外定标技术研究

高 静^{1,2} 计忠瑛¹ 崔 燕² 王忠厚¹ 石大莲^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 空间调制干涉光谱成像仪通过干涉仪分光, 在探测器上得到干涉条纹, 经过软件复原后最终得到目标的光谱信息。发射前的室外辐射定标中的定标光源为太阳, 可以有效地弥补实验室辐射定标时定标光源(太阳模拟器)短波波段辐亮度低, 导致干涉光谱成像仪短波输出信噪比低、光谱复原精度低的缺点, 通过室外辐射定标模拟遥感光谱仪探测地物目标的太阳反射光谱特性, 可以得到地物目标的准确光谱信息, 并与实验室定标的结果进行相互验证。经过理论研究和计算, 使用了两种定标方法—大气漫射板测量法和标准传递辐亮度法进行室外定标, 在大理的室外定标结果表明, 大气漫射板测量法的定标不确定度为 6.3%, 标准传递辐亮度法的定标不确定度为 6.0%。

关键词 空间调制; 傅里叶变换; 室外定标; 大气漫射板测量法; 不确定度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1321

Outfield Calibration Analysis of Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer

Gao Jing^{1,2} Ji Zhongying¹ Cui Yan² Wang Zhonghou¹ Shi Dalian^{1,2}

¹ Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer (SMIFTS) is an instrument that depended on interference, it can obtain interferential information and achieve spectral information by Fourier transform. The lamp-house of outdoor calibration is sun, which can offset effective lamp-house of laboratory calibration (sun simulation)'s disadvantage of low shortwave radiation and signal to noise ratio (SNR), also simulate sun reflection spectrum speciality availably of SMIFTS object, obtained interferential information exactly, result of laboratory radiation calibration is validated. Principle, method and result of the experiment are shown, used sun-aerosphere-diffuse reflection method and standard-radiation-transfer method to accomplish outfield calibration in Dali. The results indicated that the uncertainty of sun-aerosphere-diffuse reflection method is 6.3%, uncertainty of sun-aerosphere-diffuse reflection method is 6.0%.

Key words spatial modulation; Fourier transform; outdoor calibration; sun-aerosphere-diffuse reflection method; uncertainty

1 引 言

空间调制干涉光谱成像仪(SMIFTS)作为无动件的干涉光谱成像仪, 与传统色散型光谱成像仪的区别在于它是基于干涉仪的干涉, 在探测器上得到地物目标的一维空间信息和一维光谱信息, 并通过推扫成像得到地物目标的另一维空间信息, 因此近几年在航空航天领域、地矿产资源的判别、减灾预报及环保、生物医学诊断和军事侦察等方面的应用发展很快^[1]。

干涉光谱成像仪的发射前, 定标是干涉光谱成像技术应用的一个重要环节, 是各种辐射定标方法的基础, 是确定光谱成像仪输出准确数值的过程^[2-9]。发射前定标主要包括实验室定标和室外辐射定标。室外辐射定标中以太阳为定标光源, 可以有效地弥补实验室辐射定标时定标光源(太阳模拟器)短波辐亮度低, 导致干涉光谱成像仪短波输出信噪比(SNR)低的缺点, 更准确地模拟遥感光谱仪探

收稿日期: 2009-04-14; 收到修改稿日期: 2009-06-25

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)和国家自然科学基金(60532070)资助课题。

作者简介: 高 静(1973—), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事光谱成像仪定标方面的研究。E-mail: gaojing@opt.ac.cn

导师简介: 王忠厚(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱成像仪设计方面的研究。E-mail: wxdz@opt.ac.cn

测地物目标时的太阳反射光谱特性,从而得到地物目标的真实光谱信息,并可以与实验室辐射定标的结果进行相互验证。因此利用太阳为光源的室外定标是一种非常有效的定标方法。

本文研究的空间调制型干涉光谱成像仪由前置物镜、横向剪切干涉仪、准直成像镜组(包括傅里叶变换镜及柱面镜)和 CCD 信号采集处理系统组成,技术指标为:工作谱段 450~950 nm,谱段数 115。空间调制干涉光谱成像仪采用了大气漫射板测量法和标准传递辐亮度法两种方法进行了室外定标,对这两种方法的原理、实验方法及结果进行了研究,并评价了这两种室外定标方法的不确定度。

2 室外定标原理

以太阳光源的室外辐射定标,一般采用一组有不同反射率的漫反射板作为辐射传递参考标准。选择大气较稳定的地区和晴朗干洁的气象条件,用遥感仪器逐一对有不同反射率参考板的太阳反射辐射进行测量,并建立遥感仪器输出反射率(或反射辐亮度)的定标换算关系。以下介绍以太阳光源的野外辐射定标的两种方法^[10~12]。

2.1 太阳大气漫射板测量法

太阳大气漫射板测量方法(如图 1 所示)以非常稳定的大气外太阳照度 $E_0(\lambda)$ 为标准,通过大气透射率 $T(\lambda, \theta, \varphi)$ 测量、天空漫射(包括地物背景)反射/总辐射反射比测量,结合漫射板反射比因子、标准大气数据和辐射传输计算得到漫射板反射光谱辐亮度。

在某一给定的太阳位置(用太阳天顶角 θ 表示)时,根据 Bear 定律,在地面上所观测到的波长为 λ 的直接太阳辐射的辐照度 $E(\lambda, \theta, \varphi)$ 可表示为

$$E(\lambda, \theta, \varphi) = E_0(\lambda) \exp[-m(\theta)\tau(\lambda)], \quad (1)$$

这里忽略了天空散射辐射的影响。 $E_0(\lambda)$ 是大气层顶的太阳单色辐照度, $m(\theta)$ 是沿天顶角 θ 的光路上的相对大气质量, $\tau(\lambda)$ 是波长为 λ 的指向天顶方向的大气光学厚度。则大气斜程透射率为

$$T(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{E(\lambda, \theta, \varphi)}{E_0(\lambda)} = \exp[-m(\theta)\tau(\lambda)], \quad (2)$$

太阳辐射计在定标测量时刻同时测量不同波长的太阳直接辐射和天空散射辐射,由测量的太阳直接辐射结果结合太阳辐射计定标参数、地理信息参数和照明几何条件可计算得到测量波段的大气透射率。

漫射板[反射率为 $R_{\text{BRF}}(\lambda, \theta, \varphi)$]被太阳直射光和天空漫射(半球空间)光照射的反射辐亮度为

$$L_r(\lambda, \theta, \varphi) = L_r(\lambda, \theta, \varphi) + L_s(\lambda, \theta, \varphi), \quad (3)$$

式中 $L_r(\lambda, \theta, \varphi)$ 为太阳直射光被反射的辐亮度; $L_s(\lambda, \theta, \varphi)$ 为天空漫射光被反射的辐亮度。它们分别可表示为

$$L_r(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{E_0(\lambda) \cos \theta}{\pi} R_{\text{BRF}}(\lambda, \theta, \varphi) T(\lambda, \theta, \varphi), \quad (4)$$

$$L_s(\lambda, \theta, \varphi) = \int \frac{L_0(\lambda, \theta, \varphi) \cdot R_{\text{BRF}}(\lambda, \theta, \varphi) \cos \theta}{\pi r^2} ds, \quad (5)$$

式中 $E_0(\lambda)$ 为太阳常数是太阳在大气层外的辐照度; $L_0(\lambda, \theta, \varphi)$ 为天空在 (θ, φ) 方向的辐亮度; ds/r^2 为单元立体角。

由于 $L_0(\lambda, \theta, \varphi)$ 在天空的分布是不均匀的,积分很难求解。因此,测量中不挡太阳直射时测得 $L_t = L_r + L_s$,挡太阳直射时只测得 L_s ,两次相减得出 L_r 。

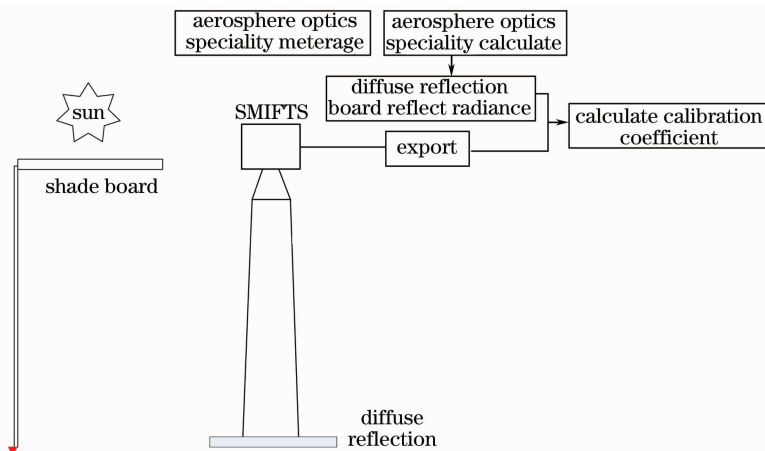


图 1 太阳大气漫反板测量法的光学系统原理

Fig. 1 Optical principle schematic of sun-aerosphere-diffuse reflection method

太阳大气漫射板测量方法中所用的漫射板双向反射比因子由实验室测量给出。方法中所引用的大气外太阳常数参照 ASTM E-490, 大气数据引用 MODETRAN 标准大气数据库。

2.2 标准传递辐亮度法

标准传递辐亮度测量法(如图 2 所示)是把实验室的辐亮度标准用光谱辐射计直接传递到外场 $R_{\text{BRF}}(\lambda, \theta, \varphi)$ 上, 用已知辐亮度的 R_{BRF} 定标干涉光谱成像仪, 给出光谱成像仪入瞳光谱辐亮度。

空间调制型干涉光谱成像仪的辐亮度标准由标准灯板系统传递, 标准灯漫反板标定系统主要由标准灯、标准漫反射板、光谱辐射计、光学导轨、电源和电流计等监控装置构成。

其中光谱辐射照度标准灯为中国计量科学研究所研制的工作基准 1000 W 标准灯 F07, 工作电流为 8.5 A, 灯丝中心平面与漫反板之间的距离为 650 mm。

标准漫反射板是由中国科学院安徽光机所研制的聚四氟乙烯(F4)粉料压制板。聚四氟乙烯的化学特性稳定、耐高温、耐腐蚀和不吸水。光学特性和物理特性均很好。在 250~2500 nm 波段反射率变化平坦, 漫射性好, 反射率为 95.5%~99.5%。

光谱辐射计为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec VNIR7052, 谱段范围为 350~1050 nm, 光谱采样间隔为 1.4 nm, 光谱分辨率为 3.5 nm, 视场角为 1°。

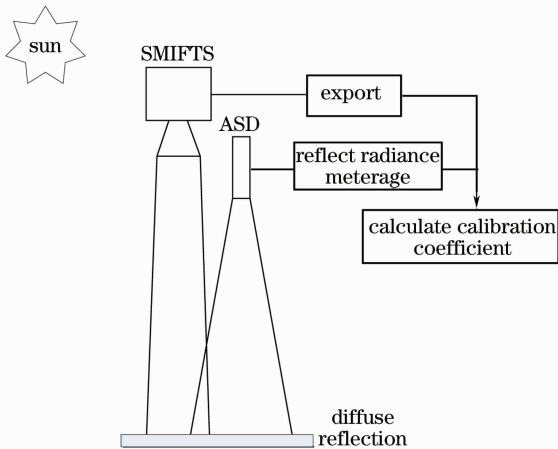


图 2 标准传递辐亮度法的光学系统原理

Fig. 2 Optical principle schematic of standard-radiation-transfer method

对于一定反射率参考板, 在一定太阳天顶角状况下, 已标定辐射计的辐亮度测值为 L_{AS} , 同时观测的光谱仪输出为 L_{AR} , 对不同太阳天顶角状况下, 不同反射率参考板, 进行上述观测和相应数据处理, 则可建立反射辐亮度和光谱仪输出的定标换算关系。

$$L_{\text{AR}} = GL_{\text{AS}} \quad (6)$$

由辐亮度计算公式可知, 已标定辐射计的辐亮度测值 L_{AS} 为

$$L_{\text{AS}} = \frac{R_{\text{BRF}}(0, 45^\circ, \lambda) E_s(\lambda)}{\pi} \times \frac{L_w(\theta, 0, \lambda)}{L_s(0, 45^\circ, \lambda)} \quad (7)$$

式中 $E_s(\lambda)$ 为标准灯光谱辐照度; $R_{\text{BRF}}(0, 45^\circ, \lambda)$ 为标准漫射板双向反射比因子; $L_w(\theta, 0, \lambda)$ 为光谱辐射计的室外漫射板反射测量辐亮度值; $L_s(0, 45^\circ, \lambda)$ 为光谱辐射计的实验室定标测量辐亮度值。

3 外场定标的测试方法

为了减少大气质量不稳定产生的误差, 选择纬度低、大气透明度高和稳定性好的地点作为定标场地。要求晴朗无云, 大气宁静, 大气的水平能见度不小于 15 km, 湿度不大于 60%。由各时刻直射太阳到达水平地面的衰减系数可知, 水平地面的太阳辐照在上午和下午变化较快, 而中午则变化较慢, 其中 10:30~11:00 的 30 min 内, 水平地面的直射照度变化了约 20%, 考虑到测量设备、漫射板的切换需要一定的时间, 实验安排在 10:30~15:30 之间进行。

为便于实验过程中识别漫射板, 编号如下: 99%-1J # J, 80%-2J # J, 65%-3J # J, 50%-4J # J, 30%-5J # J 和 15%-6J # J。

参试的光谱辐射计、太阳辐射计和光谱照度计均应在实验前完成辐射定标、响应线性检测和稳定性检测。

实验步骤如下: 1) 对六块不同反射率的漫反射板每块反射率板测量两次, 即不挡光和挡光, 分别获取一组数据, 包括记录光谱成像仪的输出灰度值和北京时间, 光谱辐射计同时采集漫反板的辐亮度值, 并记录太阳辐射相对值, 作为判定大气稳定性和宁静度的参考; 2) 按照反射率高低的顺序, 重复步骤 1); 3) 在每天 10:30~15:30 的时间内, 每 30~40 min 重复步骤 1) 和 2), 重复试验 2~3 天。

光谱辐射计、光谱成像仪测量程序如图 3 所示。

4 外场定标测试结果

干涉型超光谱成像仪的光谱辐射度绝对定标是为了确定各探测单元的光谱响应函数, 建立复原光谱值与入射光谱辐亮度间的定量关系^[13]。

对干涉光谱成像仪来说, 由于探测器各像元接收到的是目标全谱段的综合信号, 同时它还要获得精确的光谱信息, 因此干涉光谱成像仪的辐射定标

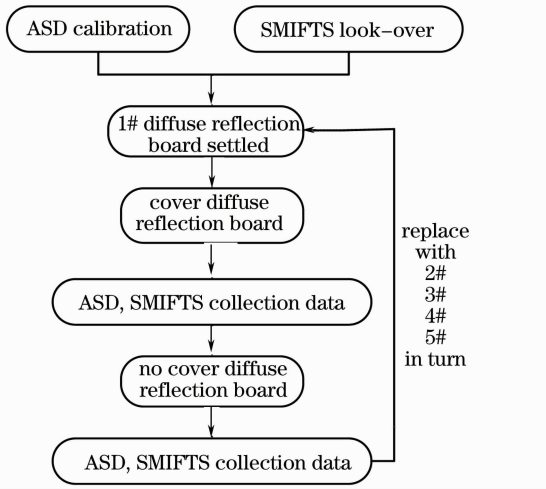


图 3 外场试验测量流程图

Fig. 3 Flow chart of outfield experiment

需要标定各个像元在不同光谱通道的辐射响应,即一个像元点要标定出一条光谱辐射响应曲线。而色散型光谱成像仪只需标定某一行像元在某一个光谱通道的辐射响应即可。由此可见,干涉光谱成像仪的辐射定标更复杂,复原修正运算量也更大^[14]。

已知光谱强度分布为 $B(\nu)$ 的均匀定标光进入干涉光谱成像仪,得到 CCD 像面的干涉强度分布 (DN 值)

$$I_{i,j}(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} C(i,j) R(i,j,\nu) t(\nu) B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu + I'_{i,j}, \quad (8)$$

式中 x 为光程差; ν 为波数 (cm^{-1}); $I'_{i,j}$ 为像元 (i,j) 的零输入响应; $C(i,j)$ 为相对定标系数; $R(i,j,\nu)$ 为光谱响应函数; $t(\nu)$ 即为仪器线型函数。

提取零光程差列某个像元 i 的点干涉图(光谱方向的一行干涉强度数据),经过相应像元的零输入响应修正(去除暗电流)、相对定标的像元响应不均匀性修正(平场)、滤波、相位修正和傅里叶变换后,得到 k 谱段复原光谱强度分布^[8]

$$B'_k(\nu) = \mathcal{F}\{I_j\}. \quad (9)$$

将此复原光谱与输入标准光谱 $B(\nu)$ 进行比对,得到 k 谱段绝对定标系数

$$A_k = \frac{B'_k(\nu)}{B_k(\nu)}. \quad (10)$$

图 4 为干涉光谱成像仪外场定标时得到的干涉光谱成像仪 0.7, 1.0, 1.4 和 1.7 四个增益的响应线性度。

图 5 为干涉光谱成像仪室外定标时得到的原始干涉图。图 6 为实验室标准传递辐亮度法得到的光谱成像仪入瞳光谱辐亮度曲线和太阳大气漫射板测

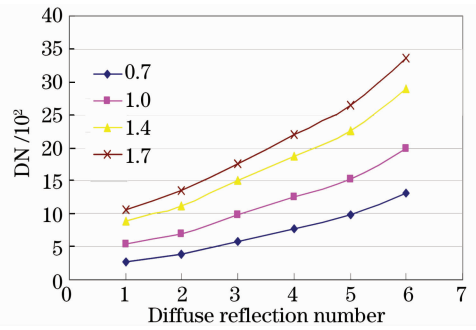


图 4 光谱仪的辐射响应线性度

Fig. 4 Radiance respond Flow chart of outfield experiment



图 5 SMIFTS 的外场太阳光干涉图

Fig. 5 Outfield sun Interferogram of SMIFTS

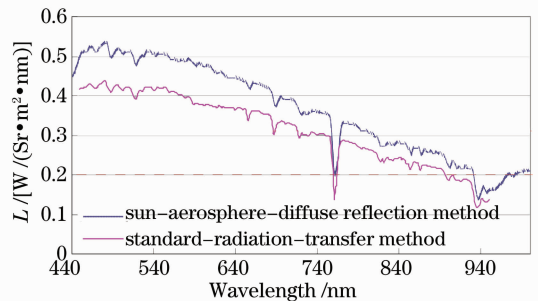


图 6 两种方法得到的光谱曲线比较

Fig. 6 Compare of two spectrum curves

量法外推得到的光谱成像仪入瞳光谱辐亮度曲线。从图 6 中可以看出,用太阳大气漫射板测量法外推得到的光谱成像仪入瞳光谱辐亮度曲线明显高于实验室标准传递辐亮度法,这是由于用于标准传递的光谱辐射计的标定精度限制和室外定标时环境中存在的杂散光影响所致造成了测量值偏低。

图 7 和图 8 分别为用两种不同的方法得到的光谱仪的相同条件下的数据进行光谱复原后的结果举例。用光谱仪的采集数据第五轮的 3J#J(反射率 65%)漫反板 1.7 倍增益下得到的两种方法的定标系数分别对采集数据第六轮的 4J#J(反射率 50%)漫反板 1.7 倍增益下得到的光谱仪数据进行复原,再与光谱辐射计采集的相应标准谱进行比较,可以

看出：实验室标准传递辐亮度法复原结果的相对误差较大，尤其在吸收峰位置的最大相对误差可达

0.09，而太阳大气漫反板测量法在 550 nm 以下和 950 nm 附近的相对误差较大约为 0.07。

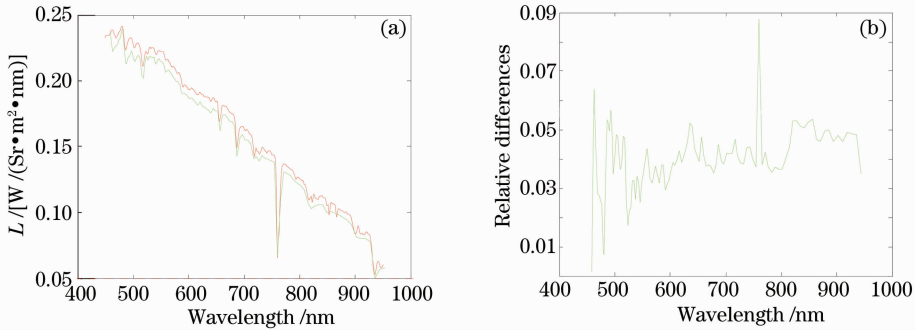


图 7 实验室标准传递辐亮度法得到的 1.7 倍增益时的复原光谱比较和相对误差。(a)复原光谱与标准谱；(b)二者的相对误差

Fig. 7 Restitute curve and relative differences of standard-radiation-transfer method (1.7 gain). (a) restitute curve; (b) relative differences

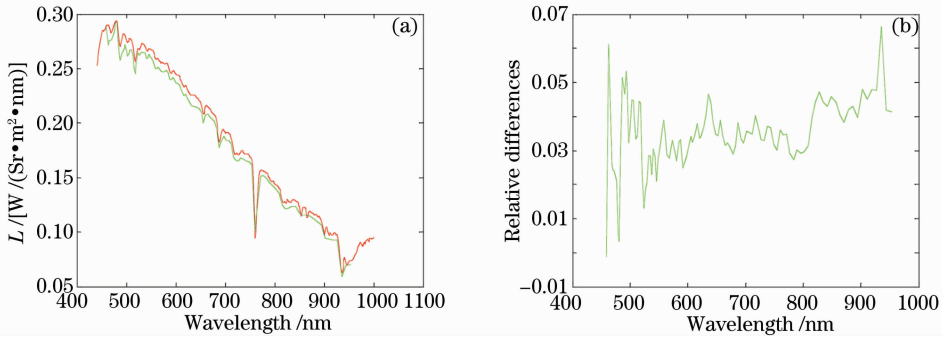


图 8 太阳大气漫反板测量法得到的 1.7 倍增益时的复原光谱和相对误差。(a)复原光谱与标准谱；(b)二者的相对误差

Fig. 8 Restitute curve and relative differences of sun-aerosphere-diffuse reflection method (1.7 gain).

(a) restitute curve; (b) relative differences

光谱复原误差是干涉光谱成像仪绝对辐射定标特有的不确定度因子。确定的方法一般是采用标准光谱数据分析法进行。选取标准光谱数据 $B_k(\nu)$ ，经过傅里叶变换得到标准干涉数据 $I(x)$ ，再经过逆傅里叶变换得到复原光谱数据 $B'_k(\nu)$ 。采用最大误差法计算某增益 k 个谱段光谱复原相对标准不确定度为

$$u_z(X_{gf}) = \frac{S(x_{gf})}{X_{gf}} = \frac{c'_n}{K} \sum_{k=1}^K \max \left| \frac{B'_k(\nu) - B_k(\nu)}{B_k(\nu)} \right|, \quad (11)$$

其中不同测量次数的系数 c'_n 查表可得。

由表 1 可知，太阳大气漫射板测量方法的光谱复原相对标准不确定度为 2.7%，实验室标准传递辐亮度法的光谱复原相对标准不确定度为 3.1%。

表 1 4 种增益下的光谱复原平均相对误差数据表

Table 1 Relative differences data of spectrum restitute under 4 gain

Method	$u_{0.7}/\%$	$u_{1.0}/\%$	$u_{1.4}/\%$	$u_{1.7}/\%$	\bar{u}
Sun-aerosphere-diffuse reflection method	1.9	1.4	3.8	3.5	2.7
Standard-radiation-transfer method	2.8	1.2	4.3	4.0	3.1

图 9 为实验室辐射定标时 1.0 倍增益下得到的复原光谱与标准谱的比较，由图中可以看出，在短波部分复原光谱与标准谱的偏差较大，受此影响其整个谱段的光谱复原相对标准不确定度为 4.7%，比室外定标的两种方法得到的都大。

5 不确定度分析

任何遥感数据都具有一定的不确定度，它表征遥感数据的可置信程度。根据误差理论及测量不确定度的评定理论分析，此时的外场定标精度为影响外场定标精度的各个环节的标准不确定度的加权和

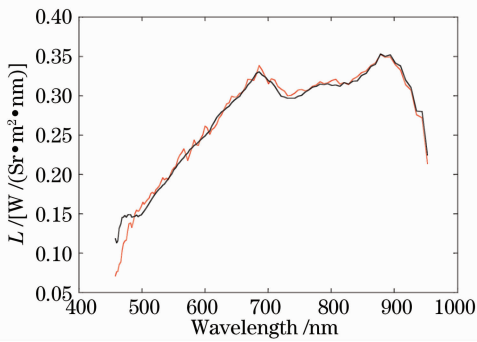


图9 实验室辐射定标得到的1.0增益时的
复原光谱与标准光谱

Fig. 9 Restitute curve and standard curve of laboratory
radiation calibration (1.0 gain)

的正平方根^[15]。

太阳大气漫射板测量法对天气环境条件的要求较高,影响其定标精度的因素来自多方面,根据初步推算,太阳大气漫射板测量方法的不确定度分析为太阳常数为2.0%,太阳辐射计测量为2.0%,辐射传输计算为2.0%,遮挡误差为2.5%,漫射/总辐射比测量为2.5%,漫射板反射比因子为2.0%,同步非一致性为2.0%,光谱复原相对不确定度为2.7%,合成不确定度为6.3%。

实验室标准传递辐亮度法对标准辐射计的标定精度和辐射计光谱响应的测量精度要求较高,影响实验室标准传递的辐亮度法的不确定度分析为标准灯标准照度传递为3.1%,漫反射板反射率为2.1%,距离测量的误差为0.3%,其它测量误差为2.0%,环境/视场一致性为2.0%,同步非一致性为2.0%,光谱复原相对不确定度为3.1%,合成不确定度为6.0%。

6 结 论

本文对空间调制干涉光谱成像仪室外定标的两种定标方法,太阳大气漫射板测量法和实验室标准传递辐亮度法的定标原理及实验方法进行了研究,并对两种外场定标方法进行了对比实验。结果表明,太阳大气漫射板测量法的光谱复原平均相对误差为2.7%,不确定度为6.3%;实验室标准传递辐亮度法的光谱复原平均相对误差为3.1%,不确定度为6.0%。采用发射前的室外定标与实验室定标结果相验证,可以较好地提高空间调制干涉光谱成像仪辐射度定标的精度,从而保证高光谱分辨率仪器真实有效地获得地物目标光谱,使空间调制型干涉光谱成像仪在航天遥感方面得到更大的应用。

致谢 该项测量实验工作在云南大理进行,得到了中国科学院安徽光机所张黎明研究员、郑小兵研究员和吴浩宇高工等许多同志的大力协作支持,在此向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18~22
- J. B. Rafert, R. G. Sellar, J. Blatt. Monolithic Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(31): 7228~7230
- E. M. Granger. A calibration method for radiometric and wavelength calibration of a spectrometer [C]. *SPIE*, 1998, **3648**: 237~241
- K. J. Thome, E. E. Whittington, N. Smith *et al.*. Ground-reference techniques for the absolute radiometric calibration of MODIS [C]. *SPIE*, 2000, **4135**: 60~70
- N. Anderson, F. Biggar Stuart, Burkhart Charles *et al.*. Bi-directional calibration results for the cleaning of spectralon reference panels [C]. *SPIE*, 2002, **4814**: 201~210
- Qiu Jinhuan, Yang Liquan. Broadband radiation methods to determine aerosol optical depth and imaginary part of its refractive index and their applications [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 2003, **42**(11): 1611~1625
- T. R. Gentile, J. M. Houston, J. E. Hardis *et al.*. The NIST high accuracy cryogenic radiometer [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1056~1068
- D. L. Smith, J. Delderfield, D. Drummond, T *et al.*. Pre-launch calibration of the advanced along track scanning radiometer (AATSR)[C]. *SPIE*, 1999, **3870**: 377~388
- William L. Barnes, Thomas S. Pagano, Salomonson *et al.*. Pre-launch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS AMI [J]. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, 1998, **36**: 1088~1100
- Chen Fuchun, Chen Guilin, Zhan Lishan. Visible outfield calibration for FY-2 multi-channel scan radiometer [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(2): 295~298
陈福春, 陈桂林, 詹丽珊. FY-2 多通道扫描辐射计的可见光外场定标[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(2): 295~298
- Peng Nina, Luo Jun, Yi Weining *et al.*. Comparisons and analyses of pre-launch field radiometric calibration methods for the visible channel of scanning radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 597~601
彭妮娜, 罗 军, 易维宁 等. 扫描辐射计可见通道发射前外场定标方法对比[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5): 597~601
- Zhou Lei, Peng Nina, Zhang Liming *et al.*. Detector based field radiometric calibration for the visible band of multi-channel scanning radiometer of satellite FY-2-05 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, **22**(1): 20~25
周 磊, 彭妮娜, 张黎明 等. 基于标准探测器的FY-2(05)星扫描辐射计可见通道外场定标[J]. *遥感技术与应用*, 2007, **22**(1): 20~25
- Xiangli Bin, Ji Zhongying, Huang Min *et al.*. On the calibration of the spatially imaging fourier transform spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 850~853
相里斌, 计忠瑛, 黄 旻 等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 850~853
- Xiangli Bin, Yuan Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1869~1874
相里斌, 袁 艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1869~1874
- Qian Shaosheng. Uncertainty in MeasureMent [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002, 1
钱绍圣. 测量不确定度[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002, 1