

定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量方法

李 明, 宗肖颖

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘 要: 星上定标系统是卫星遥感器的重要组成部分, 用于实现仪器的星上辐射定标等功能。介绍了安装在某一时间调制型傅里叶变换光谱仪上的星上定标系统, 该星上定标系统采用漫反射板太阳辐射定标方法进行仪器在轨全口径、全光路、全视场的星上辐射定标。定标漫反射板在光谱仪光路最前端反射太阳光, 通过已知的大气外太阳照度和漫反射板的双向反射分布函数 BRDF 确立辐亮度标准。定标漫反射板的 BRDF 需要在实验室进行精确测量。介绍了在光谱仪整机状态下使用太阳模拟器和标准漫反射板进行定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量的方法, 对使用定标漫反射板系统级 BRDF 进行星上辐射定标时的绝对辐射定标精度进行了分析, 绝对辐射定标精度能够满足 $\leq 5\%$ 的指标要求。

关键词: 漫反射板; BRDF; 星上定标系统; 辐射定标

中图分类号: TP73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0117004

In-lab system-level BRDF measurement method of calibration diffuser

Li Ming, Zong Xiaoying

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: The on-board calibration unit is an important part of the space-borne remote sensor and used to achieve the on-board radiometric calibration and other functions. An on-board calibration unit installed on a time-modulated fourier transform spectrometer was introduced. Used the sun as the light source to illuminate the calibration diffuser, the on-board calibration unit carries out the on-board radiometric calibration of the spectrometer in the full aperture, the full optical path and the full field of view. The calibration diffuser was in the front of the optical path of the spectrometer to reflect the sunlight and the standard radiance was obtained by used the known exoatmospheric solar irradiance and the BRDF (bidirectional reflectance distribution function) of the calibration diffuser. The BRDF of the calibration diffuser needs to be measured accurately in the lab. With the whole spectrometer, using the sun simulator and the standard diffuser, the in-lab system-level BRDF test method of the calibration diffuser was introduced. While using the system-level BRDF of the calibration diffuser, the accuracy of the on-board absolute radiometric calibration was analyzed and can satisfy the requirement of $\leq 5\%$.

Key words: diffuser; BRDF; on-board calibration unit; radiometric calibration

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20

作者简介: 李明(1971-), 女, 研究员, 硕士, 主要从事空间遥感相机总体设计方面的研究。Email: 508liming@sina.cn

0 引言

星上定标系统是卫星遥感器的重要组成部分,用于实现仪器的星上辐射定标等功能。通过高精度星上辐射定标,对在轨期间仪器辐射响应的性能变化进行监测和校正^[1-2]。

在星上辐射定标中,漫反射板星上太阳定标方法是被广泛认可的高精度绝对定标方法,SeaWiFS、MODIS、MERIS、OMI 等卫星遥感器相继采用这种星上定标方法^[3]。太阳是一个长期稳定的宽带光源,太阳定标引入太阳辐射作为星上定标的标准源,漫反射板在仪器光路最前端反射太阳光,太阳辐射通过漫反射板衰减到仪器可以接受的范围,通过已知的大气外太阳照度和漫反射板的 BRDF 确立辐亮度标准,在整个太阳反射波段能够以全光路、全孔径、全视场的方式实现卫星遥感器的辐射定标。

采用漫反射板星上太阳定标方法时,漫反射板的 BRDF 需要在实验室进行精确测量。漫反射板通常安装在卫星遥感器的星上定标系统中。在漫反射板未安装到星上定标系统上时,在实验室对其单独进行元件级 BRDF 测量,可以得到漫反射板的元件级 BRDF 测量结果^[4-5]。将装有漫反射板的星上定标系统安装到卫星遥感器上后,考虑到漫反射板的装配误差和仪器杂光的影响,在仪器整机状态下在实验室对漫反射板进行系统级 BRDF 测量,可以得到漫反射板的系统级 BRDF 测量结果。

SeaWiFS、OMI 等卫星遥感器在试验室采用以 FEL 灯或氙灯等为光源、准直角与太阳光对地角相近的光学模拟器进行了定标漫反射板的系统级 BRDF 测量,首先使用光学模拟器照亮定标漫反射板、通过仪器的太阳定标通道进行测量,然后使用光学模拟器照亮 BRDF 值为已知的标准漫反射板、通过仪器的对地观测通道进行测量,将两次测量结果进行比对,计算得到定标漫反射板的系统级 BRDF^[6-7]。在 SeaWiFS、OMI 等卫星遥感器的相关文献中只说明了定标漫反射板系统级 BRDF 的测量方法,未详细介绍测量实现过程、测量误差等方面内容。

文中以某一时间调制型傅里叶变换光谱仪为例介绍了定标漫反射板系统级 BRDF 的测量方法和测量误差,并对使用定标漫反射板系统级 BRDF

进行星上辐射定标时的绝对辐射定标精度进行了分析。

1 光谱仪介绍

某时间调制型傅里叶变换光谱仪由底板、外罩、遮光罩、指向镜、光学系统、星上定标系统、基准镜等组成,光谱仪的主要组成部分如图 1 所示。

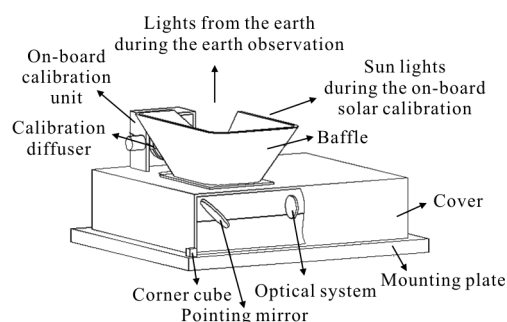


图 1 光谱仪的主要组成部分

Fig.1 Configuration of the spectrometer

光学系统由干涉仪组件、后光学组件和分色汇聚光学组件等组成,干涉仪组件为时间调制型迈克尔逊干涉仪。入射光经指向镜后进入干涉仪组件,光线在干涉仪组件内部进行干涉分光后进入后光学组件,后光学组件将干涉光束进行光束压束,分色汇聚光学组件将光线分为 4 个光谱通道后汇聚到各自谱段的单元探测器上。探测器接收干涉信号,通过傅里叶变换得到目标的光谱信号。

光谱仪有 4 个工作谱段,分别为 B1:0.75~0.77 μm 、B2:1.56~1.72 μm 、B3:1.92~2.08 μm 、B4:2.20~2.38 μm ,B1 谱段的光谱采样间隔为 0.4 cm^{-1} ,B2、B3、B4 谱段的光谱采样间隔为 0.2 cm^{-1} 。光谱仪视场角为 15.8 mrad,在轨工作寿命为 5 年,在轨绝对辐射定标精度要求为 $\leq 5\%$ 。

光谱仪的工作模式包括对地观测模式、星上太阳定标模式等。在对地观测模式下,指向镜位于对地观测位置,来自地物的光线直接经指向镜进入光学系统。在星上太阳定标模式下,指向镜转动到定标位置指向星上定标系统里的定标漫反射板,将经定标漫反射板反射后的太阳光引入光学系统进行定标。光谱仪进行对地观测和星上太阳定标时,光线对于指向镜的入射角和反射角相同。星上太阳定标期间星上定标系统和指向镜的位置关系见图 2。

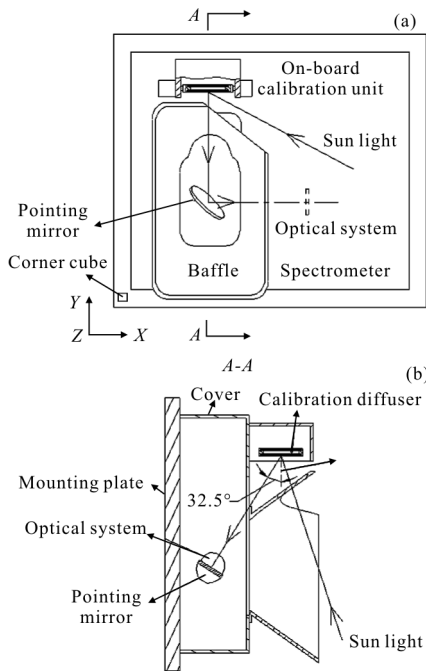


图 2 星上太阳定标期间星上定标系统和指向镜的位置关系
 Fig.2 Positional relationship between the on-board calibration unit and the pointing mirror during the on-board solar calibration

星上定标系统由主结构、电机、轴系结构、漫反射板组件等组成。漫反射板组件前后各安装 1 块漫反射板，分别为定标漫反射板 A（主份）和定标漫反射板 B（备份），采用电机直接驱动漫反射板组件转动实现定标漫反射板 A 和定标漫反射板 B 的位置切换。定标漫反射板 A 每轨工作一次进行星上太阳定标，定标漫反射板 B 每月工作一次进行星上太阳定标、对定标漫反射板 A 的在轨性能变化进行监测。定标漫反射板为 QVD (quasi volume diffuser)漫反射板，材料为石英玻璃。

星上太阳定标期间太阳光与定标漫反射板的夹角关系见图 3，其中 XYZ 为卫星坐标系，X 向为

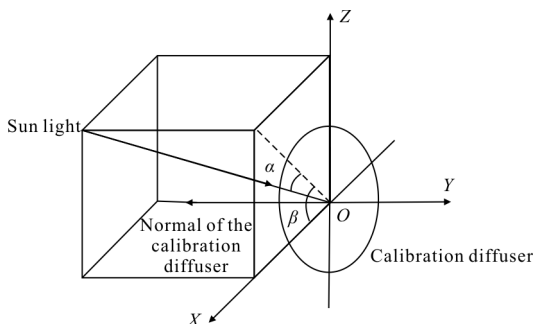


图 3 星上太阳定标期间太阳光与定标漫反射板的夹角关系
 Fig.3 Angular relationship between the sun light and the calibration diffuser during the on-board solar calibration

卫星飞行方向，Y 向为穿轨方向，Z 向为卫星对地方向。星上太阳定标期间太阳光相对 XZ 平面的夹角 α 的变化范围为 $20^\circ\sim 35^\circ$ ，太阳光在 XZ 平面内的投影与 X 轴的夹角 β 的变化范围为 $10^\circ\sim 27^\circ$ 。定标漫反射板表面与 XZ 平面平行，星上太阳定标期间太阳光与定标漫反射板法线的夹角为 $90^\circ-\alpha$ 、变化范围为 $55^\circ\sim 70^\circ$ 。

2 定标漫反射板系统级 BRDF 的测量

2.1 测量方法

光谱仪进行星上太阳定标时，在某一波长 λ 下，太阳光经定标漫反射板反射后入射到仪器的辐亮度 $L(\lambda)$ 为：

$$L(\lambda) = E(\lambda) \cos \theta \text{BRDF}(\lambda) \quad (1)$$

式中： $E(\lambda)$ 为太阳辐照度； θ 为太阳光和定标漫反射板法线的夹角， $\text{BRDF}(\lambda)$ 为定标漫反射板的 BRDF。

以上述时间调制型傅里叶变换光谱仪为例，定标漫反射板的 BRDF 是波长和太阳光入射角度 (α, β) 的函数，需要在不同波长和太阳光入射角度下进行测量。在光谱仪整机状态下，在实验室对定标漫反射板在不同太阳光入射角度下进行系统级 BRDF 测量。使用太阳模拟器作为测试光源，太阳模拟器光线的入射角度 (α, β) 模拟在轨太阳光的入射角度， (α, β) 的定义见图 3。以光谱仪基准镜坐标系代表图 3 中的坐标系，测量太阳模拟器光轴和光谱仪基准镜坐标系的夹角关系确定太阳模拟器光线的入射角度 (α, β) 。

定标漫反射板系统级 BRDF 的测量分为以下步骤：

- (1) 进行太阳定标通道测量。

太阳定标通道测量示意图见图 4。在某一太阳模拟器光线入射角度 (α, β) 下，太阳模拟器面向定标漫反射板，指向镜处于定标位置，太阳模拟器光线经过定标漫反射板反射后通过指向镜进入光学系统。光谱仪安装在二维转台上，通过二维转台的水平旋转和俯仰旋转来调整光谱仪相对于太阳模拟器的角度关系，实现测试要求的太阳模拟器光线入射角度 (α, β) 。太阳模拟器安装在三维平移台上，通过三维平移台的三维平移来调整太阳模拟器相对于光谱仪的位置关系使太阳模拟器光线充满星上定标系统上的太阳光入光口。

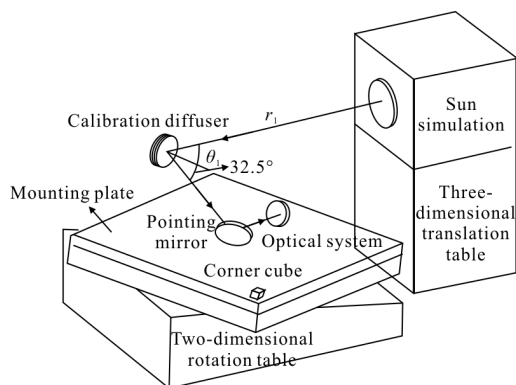


图 4 太阳定标通道测量示意图

Fig.4 Schematic of the solar calibration channel measurement

太阳定标通道测量时在波长 λ 下经暗电平校正后的光谱仪输出的有效信号 $S_1(\lambda)$ 为:

$$S_1(\lambda) = S_1'(\lambda)[1 - k_1(\lambda)] = E_1(\lambda) \cos \theta_1 \text{BRDF}_c(\lambda) A \Omega T(\lambda) M(\lambda) R(\lambda) \quad (2)$$

式中: $S_1'(\lambda)$ 为太阳定标通道测量时经暗电平校正后的光谱仪总输出信号; $k_1(\lambda)$ 为太阳定标通道测量时光谱仪光路的杂光系数; $E_1(\lambda)$ 为太阳模拟器辐照度; θ_1 为太阳模拟器光轴和定标漫反射板法线的夹角; $\text{BRDF}_c(\lambda)$ 为定标漫反射板的系统级 BRDF; $A \Omega$ 为光谱仪有效口径和光谱仪视场角对应立体角的乘积; $T(\lambda)$ 为光谱仪系统透过率; $M(\lambda)$ 为干涉仪调制效率; $R(\lambda)$ 为探测器接收能量与光谱仪输出信号的转换系数。

(2) 进行对地观测通道测量。

对地观测通道测量示意图见图 5。标准漫反射板通过固定工装安装在遮光罩上方, 太阳模拟器面向标准漫反射板, 指向镜处于对地观测位置, 太阳模拟器光线经过标准漫反射板反射后通过指向镜进入光

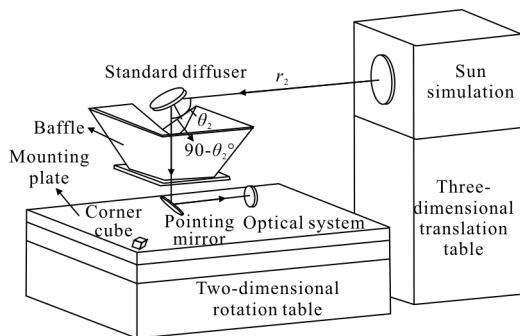


图 5 对地观测通道测量示意图

Fig.5 Schematic of the earth observation channel measurement

学系统。光谱仪安装在二维转台上, 通过二维转台的调整使太阳模拟器光线相对于标准漫反射板的方位角以及太阳模拟器光轴与标准漫反射板法线的夹角 θ_2 满足要求。太阳模拟器安装在三维平移台上, 通过三维平移台的调整使太阳模拟器光线充满星上定标系统上的太阳光入光口。

对地观测通道测量时在波长 λ 下经暗电平校正后的光谱仪输出的有效信号 $S_2(\lambda)$ 为:

$$S_2(\lambda) = S_2'(\lambda)[1 - k_2(\lambda)] = E_2(\lambda) \cos \theta_2 \text{BRDF}_s(\lambda) A \Omega T(\lambda) M(\lambda) R(\lambda) \quad (3)$$

式中: $S_2'(\lambda)$ 为对地观测通道测量时经暗电平校正后的光谱仪总输出信号; $k_2(\lambda)$ 为对地观测通道测量时光谱仪光路的杂光系数; $E_2(\lambda)$ 为太阳模拟器辐照度; θ_2 为太阳模拟器光轴和标准漫反射板法线的夹角; $\text{BRDF}_s(\lambda)$ 为标准漫反射板的 BRDF, 其他参数与太阳定标通道测量时的参数相同。标准漫反射板选用聚四氟乙烯漫反射板, 其 BRDF 值 $\text{BRDF}_s(\lambda)$ 经预先精确测量为已知。

(3) 利用公式(2)、(3), $\text{BRDF}_c(\lambda)$ 为:

$$\text{BRDF}_c(\lambda) = \frac{S_1'(\lambda)[1 - k_1(\lambda)]E_2(\lambda) \cos \theta_2}{S_2'(\lambda)[1 - k_2(\lambda)]E_1(\lambda) \cos \theta_1} \text{BRDF}_s(\lambda) \quad (4)$$

(4) 改变太阳模拟器光线入射角度 (α, β) , 重复步骤(1)、(2)、(3), 完成全部太阳模拟器光线入射角度下定标漫反射板系统级 BRDF 的测量。

在定标漫反射板系统级 BRDF 测量过程中, 太阳模拟器光谱范围覆盖光谱仪全部工作谱段, 太阳模拟器口径需要保证在全部光线入射角度下太阳模拟器光线充满星上定标系统上的太阳光入光口, 取 r_1 和 r_2 为太阳模拟器出光口到其有效辐照面的工作距离, $r_1 = r_2$, 在不考虑误差影响的情况下 $E_1(\lambda) = E_2(\lambda)$, θ_2 取值为 55° 。

光谱仪输出的信号按光谱采样间隔取值。对应某一给定太阳模拟器光线入射角度 (α, β) , 可以获得该角度下光谱仪全部工作谱段内波长按光谱采样间隔取值时定标漫反射板的系统级 BRDF, B1 谱段的波长取值间隔为 0.4 cm^{-1} , B2、B3、B4 谱段的波长取值间隔为 0.2 cm^{-1} 。测量过程中, 太阳模拟器光线入射角度 (α, β) 覆盖星上太阳定标时太阳光的入射角度范围, α 的取值范围为 $20^\circ \sim 35^\circ$, β 的取值范围为

10°~27°, 测量角度间隔的选取需要保证在使用测量角度下的定标漫反射板系统级 BRDF 值插值得到其它光线入射角度下的定标漫反射板系统级 BRDF 值时引入的相对误差对光谱仪星上辐射定标精度的影响满足要求。

分别对定标漫反射板 A 和定标漫反射板 B 进行系统级 BRDF 测量。

2.2 测量结果

定标漫反射板 A 在各谱段中心波长和部分光线入射角度(α,β)下系统级 BRDF 的测量结果见表 1。定标漫反射板 B 有相类似的测量结果。

表 1 定标漫反射板 A 的系统级 BRDF

Tab.1 System-level BRDF of calibration diffuser A

B1/0.76 μm			B2/1.64 μm				
β			β				
α	10°	18.5°	27°	α	10°	18.5°	27°
20°	0.129	0.134	0.143	20°	0.175	0.183	0.191
27.5°	0.128	0.134	0.142	27.5°	0.176	0.184	0.192
35°	0.127	0.134	0.140	35°	0.177	0.184	0.192
B3/2μm			B4/2.29μm				
β			β				
α	10°	18.5°	27°	α	10°	18.5°	27°
20°	0.177	0.185	0.194	20°	0.177	0.184	0.194
27.5°	0.179	0.186	0.195	27.5°	0.179	0.187	0.197
35°	0.180	0.188	0.195	35°	0.181	0.188	0.198

2.3 测量误差

设函数 f 具有 N 个不相关的自变量 x_i, 则函数 f 的相对误差为:

$$\frac{\delta f}{f} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{1}{f} \delta x_i \right)^2} \quad (5)$$

式中: δx_i 为自变量 x_i 的误差。

在测试角度(α,β)下 BRDF_c(λ)按公式(4)计算。在公式(4)中, 令 BRDF_c(λ)=f(S₁' , S₂' , k₁, k₂, E₁, E₂, θ₁, θ₂, BRDF_s), 按照公式(5)进行 BRDF_c(λ)的相对误差计算。以波长 λ 取值为各谱段中心波长时为例, 在测试角度 α=27.5°、β=18.5°下 BRDF_c(λ)的相对误差(用符号 σ₁ 表示)的计算结果见表 2。

表 2 BRDF_c(λ)的相对误差

Tab.2 Relative error of BRDF_c(λ)

Item	B1/ 0.76 μm	B2/ 1.64 μm	B3/ 2 μm	B4/ 2.29 μm
S ₁ ' (DN value)	601 258	711 031	1 381 632	1 471 185
S ₁ ' (DN value)	1 068 045	916 900	1 770 483	1 862 798
k ₁	3.19%	3.93%	2.97%	3.74%
k ₂	4.01%	4.44%	3.92%	4.05%
E ₁ /W·m ⁻² ·μm ⁻¹	1 220	217	113	69.2
E ₂ /W·m ⁻² ·μm ⁻¹	1 220	217	113	69.2
θ ₁ (°)	62.5	62.5	62.5	62.5
θ ₂ (°)	55	55	55	55
BRDF _s (1/sr)	0.19	0.19	0.19	0.19
δS ₁ '/S ₁ '	0.28%	0.25%	0.26%	0.32%
δS ₂ '/S ₂ '	0.21%	0.22%	0.23%	0.29%
δk ₁ /k ₁	20%	20%	20%	20%
δk ₂ /k ₂	20%	20%	20%	20%
δE ₁ /E ₁	1%	1%	1%	1%
δE ₂ /E ₂	1%	1%	1%	1%
δθ ₁ /θ ₁	0.16%	0.16%	0.16%	0.16%
δθ ₂ /θ ₂	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
δBRDF _s /BRDF _s	1.41%	2.24%	2.24%	2.24%
BRDF _c (1/sr)	0.134	0.184	0.186	0.187
δBRDF _c /BRDF _c (σ ₁)	2.32%	2.96%	2.88%	2.94%

设由使用测量角度下的 BRDF_c(λ)通过拟合计算得到其它光线入射角度下的 BRDF_c(λ)时引起的相对误差为 σ₂、由太阳模拟器的光线入射角度与在轨太阳定标时太阳光入射角度差异引起的相对误差为 σ₃、定标漫反射板 BRDF 在轨衰变的影响为 σ₄、5 年寿命末期 BRDF_c(λ) 的相对误差 σ₅ 按公式 σ₅=√σ₁²+σ₂²+σ₃²+σ₄² 计算, 计算结果见表 3。

表 3 5 年寿命末期 BRDF_c(λ)的相对误差

Tab.3 Relative error of BRDF_c(λ) at the end of the 5 years life

Item	B1/ 0.76 μm	B2/ 1.64 μm	B3/ 2 μm	B4/ 2.29 μm
σ ₁	2.32%	2.96%	2.88%	2.94%
σ ₂	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
σ ₃	0.035%	0.035%	0.035%	0.035%
σ ₄	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
σ ₅	2.87%	3.50%	3.42%	3.48%

在其他波长、 (α, β) 角取值下 $BRDF_c(\lambda)$ 的相对误差的计算结果与上述计算结果相类似。

3 角度误差仿真分析

星上太阳定标时太阳光经定标漫反射板反射后光线的辐亮度 $L_c(\lambda)$ 为:

$$L_c(\lambda) = E(\lambda) \cos \theta BRDF_c(\lambda) \quad (6)$$

式中: $E(\lambda)$ 为太阳辐照度; θ 为太阳光和定标漫反射板法线的夹角; $BRDF_c(\lambda)$ 为定标漫反射板的系统级 $BRDF$ 值。

星上太阳定标时经暗电平校正后的光谱仪总输出信号和 $L_c(\lambda)$ 接近似线性关系可表示为:

$$X_c'(\lambda) = A_c(\lambda) L_c(\lambda) \quad (7)$$

式中: $A_c(\lambda)$ 为星上太阳定标确定的绝对定标系数。

利用公式(6)、(7), $A_c(\lambda)$ 为:

$$A_c(\lambda) = \frac{X_c'(\lambda)}{E(\lambda) \cos \theta BRDF_c(\lambda)} \quad (8)$$

利用公式(7), 星上太阳定标时光谱仪输出的有效信号 $X_c(\lambda)$ 为:

$$X_c(\lambda) = X_c'(\lambda) [1 - k_c(\lambda)] = A_c(\lambda) L_c(\lambda) [1 - k_c(\lambda)] \quad (9)$$

式中: $k_c(\lambda)$ 为光谱仪进行星上太阳定标时光谱仪光路的杂光系数。

光谱仪对地观测时, 通过光谱仪对地观测通道辐射定标方程建立光谱仪输出信号与入瞳处的景物辐亮度之间的函数关系, 光谱仪对地观测通道辐射定标方程接近似线性关系可表示为^[8-10]:

$$X'(\lambda) = A(\lambda) L(\lambda) \quad (10)$$

式中: $X'(\lambda)$ 为对地观测时经暗电平校正后的光谱仪总输出信号; $A(\lambda)$ 为对地观测通道辐射定标方程中的绝对定标系数; $L(\lambda)$ 为光谱仪对地观测时入瞳处的景物辐亮度。

利用公式(10), 对地观测时光谱仪输出的有效信号 $X(\lambda)$ 为:

$$X(\lambda) = X'(\lambda) [1 - k(\lambda)] = A(\lambda) L(\lambda) [1 - k(\lambda)] \quad (11)$$

式中: $k(\lambda)$ 为光谱仪进行对地观测时光谱仪光路的杂光系数。

在相同的输入辐亮度下, 无论是进行星上太阳定标还是对地观测, 光谱仪输出的有效信号相同, 因此当 $L(\lambda) = L_c(\lambda)$ 时有 $X(\lambda) = X_c(\lambda)$, 在 $L(\lambda) = L_c(\lambda)$ 、 $X(\lambda) = X_c(\lambda)$ 时, 利用公式(9)、(11)有:

$$A(\lambda) = A_c(\lambda) \frac{1 - k_c(\lambda)}{1 - k(\lambda)} \quad (12)$$

利用公式(8)、(10)、(12), $L(\lambda)$ 为:

$$L(\lambda) = \frac{X'(\lambda)}{A(\lambda)} = \frac{X'(\lambda) E(\lambda) \cos \theta BRDF_c(\lambda) [1 - k(\lambda)]}{X_c'(\lambda) [1 - k_c(\lambda)]} \quad (13)$$

取波长 λ 值为各谱段中心波长, $\alpha = 27.5^\circ$, $\beta = 18.5^\circ$, 对地观测条件为太阳天顶角为 60° 、各谱段地物反照率分别为 $B1: 0.3$ 、 $B2: 0.2$ 、 $B3: 0.1$ 、 $B4: 0.1$, 对公式(13)按照公式(5)进行相对误差计算, $L(\lambda)$ 的相对误差(用符号 σ_6 表示)的计算结果见表 4。

表 4 $L(\lambda)$ 的相对误差

Tab.4 Relative error of $L(\lambda)$

Item	B1/ 0.76 μm	B2/ 1.64 μm	B3/ 2 μm	B4/ 2.29 μm
X' (DN value)	470 685	292 306	237 825	295 632
X_c' (DN value)	598 082	695 320	1 364 589	1 431 795
$E_t/W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	1 220	217	113	69.2
$\theta/(^\circ)$	62.5	62.5	62.5	62.5
$BRDF_c(1/\text{sr})$	0.134	0.184	0.186	0.187
k	1.40%	1.10%	0.90%	0.95%
k_c	1.90%	1.60%	1.40%	1.45%
$\delta X'/X'$	0.31%	0.38%	0.63%	0.71%
$\delta X_c'/X_c'$	0.28%	0.25%	0.26%	0.32%
$\delta E/E_t$	2%	2%	2%	2%
$\delta \theta/\theta$	0.24	0.24	0.24	0.24
$\delta BRDF_c/BRDF_c(\sigma_3)$	2.87%	3.50%	3.42%	3.48%
$\delta k/k$	20%	20%	20%	20%
$\delta k_c/k_c$	20%	20%	20%	20%
$L/W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	59.71%	7.79%	1.7%	1.24%
$\delta L/L(\sigma_6)$	3.59%	4.11%	4.07%	4.14%

设由光谱仪系统信号非线性引起的相对误差为 σ_7 , 考虑光谱仪系统信号非线性误差后 $L(\lambda)$ 的相对误差 σ_8 按公式 $\sigma_8 = \sqrt{\sigma_6^2 + \sigma_7^2}$ 计算, 计算结果见表 5。

表 5 考虑光谱仪系统信号非线性误差后 $L(\lambda)$ 的相对误差

Tab.5 Relative error of $L(\lambda)$ while considering the nonlinearity error of the spectrometer signal

Item	B1/ 0.76 μm	B2/ 1.64 μm	B3/ 2 μm	B4/ 2.29 μm
σ_6	3.59%	4.11%	4.07%	4.14%
σ_7	1%	1%	1%	1%
σ_8	3.73%	4.23%	4.19%	4.26%

从表 5 数据可以看出,光谱仪各谱段 $L(\lambda)$ 的相对误差均 $<5\%$, 说明在 5 年寿命末期光谱仪的星上辐射定标精度可以满足 $\leq 5\%$ 的指标要求。在其他波长、 (α, β) 角取值和对地观测条件下 $L(\lambda)$ 的相对误差的计算结果与上述计算结果相类似。

4 结 论

对某一时间调制型傅里叶变换光谱仪进行了介绍, 该光谱仪上的星上定标系统采用漫反射板星上太阳定标方法进行仪器的星上绝对辐射定标。介绍了使用太阳模拟器和标准漫反射板对定标漫反射板进行实验室系统级 BRDF 测量的方法。与定标漫反射板的元件级 BRDF 测量相比, 定标漫反射板的系统级 BRDF 测量考虑了定标漫反射板在光谱仪上的装配误差和光谱仪整机的杂光影响, 反映了光谱仪的真实工作状态。太阳模拟器的精度和标准漫反射板 BRDF 的测量误差是影响定标漫反射板系统级 BRDF 测量误差的主要因素, 需要对其提出较高的要求。对使用定标漫反射板实验室系统级 BRDF 值时的星上绝对辐射定标精度进行了分析, 星上绝对辐射定标精度能够满足 $\leq 5\%$ 的指标要求。文中介绍的定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量方法也可以应用于采用漫反射板太阳辐射定标的光栅光谱仪等其它类型卫星遥感器。

参考文献:

- [1] Han Qijin, Zhang Xuewen, Qiao Zhiyuan, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 127-133. (in Chinese)
韩启金, 张学文, 乔志远, 等. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 127-133.
- [2] Han Qijin, Fu Qiaoyan, Pan Zhiqiang, et al. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 167-173. (in Chinese)
韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 等. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 167-173.
- [3] Xiaoxiong X, Jim B. MODIS solar reflective calibration traceability [C]//SPIE, 2009, 7452: 74520K.
- [4] Yang Benyong, Zhang Liming, Shen Zhengguo, et al. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1851-1858. (in Chinese)
杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1851-1858.
- [5] Wang Long, Lin Chao, Zheng Yuquan. Fabrication and experiment of aluminum diffuser for CO₂ detector calibration on orbit [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 591-599. (in Chinese)
王龙, 蔺超, 郑玉权. CO₂ 探测仪星上定标铝漫反射板的制备与试验[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 591-599.
- [6] Robert A B, Steven W B, Keith R L, et al. System-level pre-launch calibration of on-board solar diffusers [C]//SPIE, 2007, 6677: 667704.
- [7] Marcel R D, Ruud J D, Pieterneel F L, et al. Ozone monitoring instrument calibration [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1209-1238.
- [8] Wang Min, He Mingyuan, Zhang Shuiping, et al. Calibration methods of visible-near infrared channel-type satellite radiometric sensor[J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(1): 114-120. (in Chinese)
王敏, 何明元, 张水平, 等. 通道式可见光近红外卫星遥感器辐射定标方法综述[J]. 遥感信息, 2014, 29(1): 114-120.
- [9] Zhang Baogui, Zhang Yufeng. Analysis of relative radiometric calibration algorithm of space CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(1): 91-96. (in Chinese)
张保贵, 张宇烽. 空间 CCD 相机辐射校正算法分析[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(1): 91-96.
- [10] Li Ning, Zhang Yunfeng, Liu Chunxiang, et al. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2054-2060. (in Chinese)
李宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1 m 口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2054-2060.