

谱线漂移对星载成像光谱仪辐射测量精度的影响

张军强¹ 颜昌翔¹ 辛久元²

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 分析了谱线漂移在地面辐射定标、星上辐射定标和在轨对地观测等环节对成像光谱仪辐射测量的影响,建立了从实验室辐射定标到星上辐射定标再到在轨对地观测全过程的辐射传递模型,并通过仿真分析求解了成像光谱仪入瞳处辐射测量不确定与谱线漂移之间的关系。结果表明,谱线漂移导致的辐射测量误差与谱线漂移量和入瞳辐亮度的分布梯度成正比;光谱带宽偏差对测量精度的影响程度较中心波长误差高一个数量级。对于可见近红外(VNIR)波段平均光谱带宽 10 nm、短波红外(SWIR)波段平均光谱带宽 20 nm 的典型成像光谱仪,要保证谱线漂移引起的辐射测量不确定度小于 6%,实现成像光谱仪在轨观测时入瞳处的辐射测量绝对精度优于 10%,可见近红外波段中心波长偏差应不大于 2 nm,光谱带宽偏差应不大于 0.1 nm,短波红外波段中心波长偏差应不大于 3 nm,光谱带宽偏差应不大于 0.1 nm。

关键词 测量;成像光谱仪;谱线漂移;辐射测量;仿真分析

中图分类号 TH73; O433.4; TP391.9 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0212001

Effect of Spectral-Line Shift on Radiometric Measurement Accuracy of Spaceborne Imaging Spectrometer

Zhang Junqiang¹ Yan Changxiang¹ Xin Jiuyuan²

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The effect of spectral-line shift on radiometric measurement accuracy of spaceborne imaging spectrometer during laboratory radiometric calibration, onboard radiometric calibration and onboard radiometric measurement is analyzed. Radiometric transmission model from laboratory radiometric calibration to onboard radiometric measurement has been established, and relationship between the uncertainty of radiometric measurement on entrance pupil and spectral-line shift is simulated. Results show that radiometric measurement error is linear to spectral-line shift and radiance distribution gradient on entrance pupil of imaging spectrometer. The radiometric measurement error caused by spectral width deviation is one order of magnitude larger than that caused by central wavelength deviation. For a typical imaging spectrometer [10 nm spectral width in visible near infrared spectroscopy (VNIR) band and 20 nm in shortwave infrared (SWIR) band], central wavelength deviation is less than 2 nm and spectral width deviation is less than 0.1 nm in VNIR band, or central wavelength deviation is less than 3 nm and spectral width deviation is less than 0.1 nm in SWIR band, which is necessary to ensure the uncertainty of radiometric measurement caused by spectral line-shift less than 6% and absolute accuracy of radiometric measurement on entrance pupil is superior to 10%.

Key words measurement; imaging spectrometer; spectral-line shift; radiometric measurement; simulation analysis

OCIS codes 590.2030; 460.4035; 520.6020; 140.3010; 140.3025

收稿日期: 2012-08-06; 收到修改稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)和国防预研基金(05001SA050)资助课题。

作者简介: 张军强(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事空间光学遥感仪器研制、光机系统整体性能评价等方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com

1 引 言

成像光谱仪是在原有的多光谱成像仪基础上发展起来的新型探测识别技术,它将传统的二维(空间)遥感信息拓展到三维(空间、光谱),能够对地物反射光谱进行连续的光谱采样,实现地物精细识别和分类^[1~3]。成像光谱仪从20世纪80年代末开始研究,目前已经发展成为一种成熟的侦察技术,并在民用和军用领域得到了广泛的应用^[1,4]。成像光谱仪按光谱分光方式不同可分为色散型(包括棱镜色散型和光栅色散型)、傅里叶变换型、可调谐滤光片型、光楔成像型和层析成像型等多种,其中色散型成像光谱仪技术成熟,应用也最为广泛^[5~7]。

对于色散型成像光谱仪,温度等环境的变化使成像光谱仪CCD光敏面上将发生谱线漂移,导致光谱方向每个像元对应的中心波长或光谱带宽发生变化,从而影响成像光谱仪的辐射测量精度^[8]。成像光谱仪的应用以量化的数据为基础。在成像光谱仪的研制过程中,深入分析谱线漂移对成像光谱仪辐射测量精度的影响是很有必要的。Green^[9]在分析光谱定标精度对星载成像光谱仪在轨辐射测量影响后指出,光谱定标精度优于1%时才不会给大气上行辐射测量带来明显的偏差;冯玉涛等^[10,11]分析了谱线弯曲对成像光谱仪辐射信号采集的影响;李幼平等^[12]在研究了成像光谱仪辐射定标的物理过程、测量链、测量不确定度和合成标准不确定度后指出,光谱辐照度标准的不确定度在3%~5%,辐射定标中其他影响量的测量不确定度限制在1%~2%时,成像光谱仪辐射定标的绝对精度才能达到

5%~8%。目前,关于谱线漂移在整个辐射定标的测量链中对辐射定标精度的影响尚无报道。

本文将谱线漂移引起的在轨辐射测量误差作为评价函数,综合分析了谱线漂移在地面辐射定标、星上辐射定标、在轨对地观测等各环节对成像光谱仪辐射测量的影响,建立了从实验室辐射定标到星上辐射定标,再到在轨对地观测全过程的辐射传递模型,并通过仿真分析求解了成像光谱仪入瞳处辐射测量不确定与谱线漂移之间的关系。

2 成像光谱仪辐射测量模型

成像光谱仪的典型工作波段是400~2500 nm,辐射定标的目的是确定成像光谱仪数字量输出 O 与入射光的光谱辐亮度 L 之间的关系,辐射测量过程就是一个辐射标准的传递过程:实验室辐射定标时,将标准灯、标准白板导出辐射标准传递到定标用积分球,再将积分球的辐亮度传递到星上定标光源;在轨观测时,将星上定标光源的辐亮度标准传递到成像光谱仪入瞳处的地物光谱辐亮度,进而实现绝对辐射定标,如图1所示^[12],其中 $E_s(\lambda)$ 为标准灯的光谱辐照度, $L^a(\lambda)$ 为标准灯光谱辐射经标准漫反射板反射后的光谱辐亮度, $L^s(\lambda)$ 为实验室辐射定标时积分球的光谱辐亮度, $L^1(\lambda)$ 为实验室辐射定标时,星上定标光源的光谱辐亮度, $L^2(\lambda)$ 为在轨辐射定标时,星上定标光源的辐亮度, $L^R(\lambda)$ 为在轨观测时,成像光谱仪入瞳处的地物光谱辐亮度, $L(\lambda)$ 为地球表面物体的光谱辐亮度。

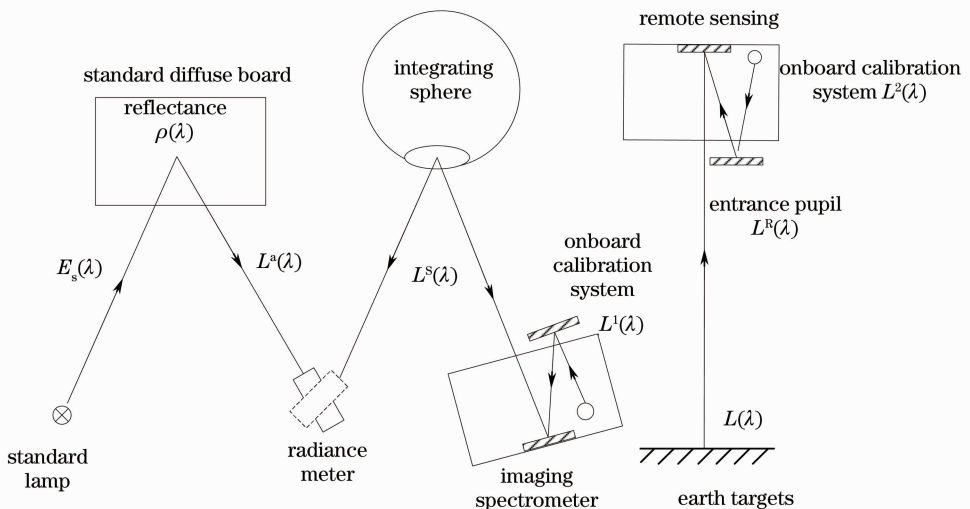


图1 辐射定标测量链

Fig. 1 Measurement chain of radiometric calibration

成像光谱仪某个像元的数字量输出 $O_{i,j}$ 是该像元接收到的光谱辐亮度 $L_{i,j}$ 与探测器光电响应 $\alpha_{i,j}$ 的卷积, 而像元接收到的光谱辐亮度 $L_{i,j}$ 是仪器入瞳处的光谱辐亮度 L 与光谱仪光谱响应函数 $T_{i,j}$ 的卷积

$$O_{i,j} = \alpha_{i,j}(\lambda) * L_{i,j}(\lambda) + b_{i,j} = \alpha_{i,j}(\lambda) * L(\lambda) * T_{i,j}(\lambda) + b_{i,j}, \quad (1)$$

式中 $*$ 为卷积。在实际工程应用中, 辐射定标常用的光源是卤钨灯, 辐射特性接近 3000 K 的黑体辐射, 各波长的辐亮度连续分布, 且光谱仪的光谱响应函数 $T_{i,j}$ 可以认为是近似的高斯分布, 所以, (1) 式可以简化为

$$O_{i,j} \approx A_{i,j}L(\lambda_{i,j}) + b_{i,j}, \quad (2)$$

式中 $L(\lambda_{i,j})$ 为光源波长 $\lambda_{i,j}$ 处的光谱辐亮度; $A_{i,j}$ 为光谱仪的第 i 行、 j 列像元的辐射响应度系数, 取决于仪器的固有属性和工作状态; $b_{i,j}$ 为光谱仪的第 i 行、 j 列像元的暗噪声。

在实验室辐射定标时, 将成像光谱仪正对积分球, 得到光谱仪数字量输出 $O_{i,j}^S$; 切换至星上定标状态时, 得到光谱仪数字量输出 $O_{i,j}^1$:

$$O_{i,j}^S = A_{i,j}^S L^S(\lambda_{i,j}) + b_{i,j}^S, \quad (3)$$

$$O_{i,j}^1 = A_{i,j}^1 L^1(\lambda_{i,j}) + b_{i,j}^1, \quad (4)$$

式中, 上标 S 表示实验室积分球定标状态, 上标 1 表示实验室星上定标状态, 其余符号含义同(2)式。

由(3)、(4)式可得星上定标积分球的出射光谱辐亮度为

$$L^1(\lambda_{i,j}) = \frac{O_{i,j}^1 - b_{i,j}^1}{O_{i,j}^S - b_{i,j}^S} \frac{A_{i,j}^S}{A_{i,j}^1} L^S(\lambda_{i,j}) = \frac{O_{i,j}^1 - b_{i,j}^1}{O_{i,j}^S - b_{i,j}^S} L^S(\lambda_{i,j}). \quad (5)$$

实际在轨工作时, 对地观测的光谱仪数字量输出 $O_{i,j}^R$, 星上定标的光谱仪数字量输出 $O_{i,j}^2$ 可表示为

$$O_{i,j}^R = A_{i,j}^R L^R(\lambda_{i,j}) + b_{i,j}^R, \quad (6)$$

$$O_{i,j}^2 = A_{i,j}^2 L^2(\lambda_{i,j}) + b_{i,j}^2, \quad (7)$$

式中上脚标 R 表示对地观测状态, 上脚标 2 表示在轨星上定标状态, 其余符号含义同(2)式。

由(5)~(7)式可得光谱仪入瞳处的光谱辐亮度为

$$L^R(\lambda_{i,j}) = \frac{O_{i,j}^R - b_{i,j}^R}{O_{i,j}^2 - b_{i,j}^2} \frac{A_{i,j}^2}{A_{i,j}^R} L^2(\lambda_{i,j}) = \frac{O_{i,j}^R - b_{i,j}^R}{O_{i,j}^2 - b_{i,j}^2} L^1(\lambda_{i,j}) = \frac{O_{i,j}^R - b_{i,j}^R}{O_{i,j}^2 - b_{i,j}^2} \frac{O_{i,j}^1 - b_{i,j}^1}{O_{i,j}^S - b_{i,j}^S} L^S(\lambda_{i,j}). \quad (8)$$

利用(8)式求解在轨对地观测时, 光谱仪入瞳处的光谱辐亮度较方便, 但并不适合光谱辐亮度测量

误差分析。为此, 可将(1)式代入(8)式得

$$L^R(\lambda_{i,j}) = \frac{\alpha_{i,j}^R * L^R(\lambda) * T_{i,j}^R(\lambda)}{\alpha_{i,j}^2 * L^2(\lambda) * T_{i,j}^2(\lambda)} \cdot \frac{\alpha_{i,j}^1 * L^1(\lambda) * T_{i,j}^1(\lambda)}{\alpha_{i,j}^S * L^S(\lambda) * T_{i,j}^S(\lambda)} L^S(\lambda_{i,j}). \quad (9)$$

成像光谱仪的光谱带宽一般较窄(10~20nm), 窄带内探测器的光电响应 $\alpha_{i,j}$ 可以认为是一个常数; 实验室光谱定标时, 积分球光谱辐亮度传递到星上定标光源辐亮度的时间间隔较短(间隔数小时), 可以认为探测器光电响应不变, 即 $\alpha_{i,j}^1 = \alpha_{i,j}^S$ 且为常数; 在轨光谱定标时, 星上定标光源光谱辐亮度传递到光谱仪入瞳辐亮度的时间间隔较短(间隔数小时或数天), 可以认为探测器光电响应不变, 即 $\alpha_{i,j}^2 = \alpha_{i,j}^R$ 且为常数。所以, (9)式可简化为

$$L^R(\lambda_{i,j}) = \frac{L^R(\lambda) * T_{i,j}^R(\lambda) / L^1(\lambda) * T_{i,j}^1(\lambda)}{L^2(\lambda) * T_{i,j}^2(\lambda) / L^S(\lambda) * T_{i,j}^S(\lambda)} \cdot L^S(\lambda_{i,j}) = \frac{L_R(i,j) / L_1(i,j)}{L_2(i,j) / L_S(i,j)} L^S(\lambda_{i,j}), \quad (10)$$

式中 $L^S(\lambda_{i,j})$ 为实验室辐射定标时, 积分球在第 i 行、 j 列像元中心波长位置对应的光谱辐亮度; $T_{i,j}^1(\lambda)$ 、 $T_{i,j}^S(\lambda)$ 、 $T_{i,j}^2(\lambda)$ 、 $T_{i,j}^R(\lambda)$ 分别为星上定标光源实验室辐射定标、积分球光源实验室辐射定标、星上定标光源在轨辐射定标和在轨观测四种模式下成像光谱仪的光谱响应函数, 均近似满足高斯分布^[9,13]; $L_S(i,j) = L^S(\lambda) * T_{i,j}^S(\lambda)$ 为实验室积分球辐射定标时, 探测器第 i 行、 j 列像元接受的光谱辐亮度值; $L_1(i,j) = L^1(\lambda) * T_{i,j}^1(\lambda)$ 为实验室星上定标光源辐射定标时, 探测器第 i 行、 j 列像元接受的光谱辐亮度值; $L_R(i,j) = L^R(\lambda) * T_{i,j}^R(\lambda)$ 为在轨观测时, 探测器第 i 行、 j 列像元接受的光谱辐亮度值; $L_2(i,j) = L^2(\lambda) * T_{i,j}^2(\lambda)$ 为在轨辐射定标时, 探测器第 i 行、 j 列像元接受的光谱辐亮度值。

3 谱线漂移对成像光谱仪辐射测量精度的影响

在成像光谱仪辐射定标过程中, 除了文献[12]分析的影响辐射定标精度的 11 项影响量外, 成像光谱仪谱线漂移导致的光谱响应函数标定误差是影响辐射标准在“定标积分球——星上定标光源——对地观测”链中传递精度的主要原因之一。成像光谱仪的谱线漂移包括中心波长偏差和光谱带宽偏差两方面, 两者均影响光谱仪光谱响应函数 $T_{i,j}$ 的稳定性, 进而影响仪器的辐射测量精度。所以, 要提高成像光谱仪的辐射测量精度, 不仅要提高仪器的光谱、

辐射定标精度^[13~15],而且要保证辐射基准传递过程中光谱仪的谱线稳定性。

由成像光谱仪的辐射定标测量链可知,不同工况下成像光谱仪探测器第 i 行、 j 列像元接受的光谱

$$(\sigma^R)^2 = \left[\frac{\Delta L^R(\lambda_{i,j})}{L^R(\lambda_{i,j})} \right]^2 = \left[\frac{\Delta L_S(i,j)}{L_S(i,j)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_1(i,j)}{L_1(i,j)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L^S(\lambda_{i,j})}{L^S(\lambda_{i,j})} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_R(i,j)}{L_R(i,j)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L_2(i,j)}{L_2(i,j)} \right]^2. \quad (11)$$

谱线漂移导致的光谱仪入瞳处光谱辐亮度的不确定度为

$$u^R = \sqrt{(u_S)^2 + (u_1)^2 + (u^S)^2 + (u_R)^2 + (u_2)^2}. \quad (12)$$

由(12)式可知,谱线漂移对成像光谱仪辐射测量精度的影响主要表现在以下三方面:

1) 地面光谱响应函数标定误差导致的在轨辐射测量误差 u_S, u_1 , 实验室辐射定标时,若某个像元的中心波长或光谱半峰全宽(FWHM)存在标定误差或者辐射定标时某个像元的中心波长或光谱半峰全宽与光谱定标时发生了变化,则在积分球光源和星上定标光源两种模式下,光谱仪的光谱响应函数 $T_{i,j}^S(\lambda), T_{i,j}^L(\lambda)$ 的位置或形状将发生相对变化,导致探测器接收到的辐亮度 $L_S(i,j), L_1(i,j)$ 产生相对误差,即 u_S, u_1 ;

2) 积分球辐亮度插值误差导致的在轨辐射测量误差 u^S 。当中心波长标定存在误差 $\Delta\lambda$ 时,会用中心波长 $\lambda_{i,j}$ 位置对应的积分球光谱辐亮度 $L^S(\lambda_{i,j})$ 反演第 i 行、 j 列像元对应光谱仪入瞳处的地物光谱辐亮度,而第 i 行、 j 列像元实际的中心波长为 $\lambda_{i,j} + \Delta\lambda$,实际对应的积分球光谱辐亮度 $L^S(\lambda_{i,j} + \Delta\lambda)$,这将导致在轨辐射测量误差,即 u^S ;

3) 在轨光谱响应函数标定误差导致的在轨辐射测量误差 u_R, u_2 。在轨观测时,若某个像元的中心波长或光谱半峰全宽存在标定误差,或者观测时某个像元的中心波长或光谱半峰全宽与在轨光谱定标时发生了变化,则在地对地观测和星上光谱定标两种模式下,光谱仪的光谱响应函数的 $T_{i,j}^R(\lambda), T_{i,j}^L(\lambda)$ 位置或形状将会发生相对变化,导致探测器接收到的辐亮度 $L_R(i,j), L_2(i,j)$ 产生相对误差,即 u_R, u_2 。

根据李幼平等^[12]的研究,在成像光谱仪辐射定标过程中,通过选择合适的仪器设备和光辐射测试技术,光谱仪辐射定标的绝对精度可以达到 5%~8%。所以,要实现成像光谱仪在轨观测时入瞳处的辐射测量绝对精度优于 10%,谱线漂移引起的辐射

辐亮度值 $L_S(i,j), L_1(i,j), L_R(i,j), L_2(i,j)$ 相互独立,可用微分法求解光谱仪在轨观测时,光谱仪入瞳处的光谱辐亮度的相对测量误差

测量不确定度应小于 6% (即 $u^R \leq 6\%$)。

为了综合分析了谱线漂移在地面辐射定标、星上辐射定标和在轨对地观测各环节对成像光谱仪辐射测量的影响,进行了数值仿真分析。光谱仪的光谱响应函数 $T_{i,j}(\lambda)$ 用高斯函数近似表示,可见近红外波段半峰全宽为 10 nm,短波红外波段半峰全宽为 20 nm^[13];实验室辐射定标积分球和星上定标常用的光源均为卤钨灯,辐射特性接近 3000 K 的黑体辐射如图 2 所示;成像光谱仪工作于太阳反射波段,典型遥感条件下,地球大气外垂直对地观测的光谱辐亮度如图 3 所示。

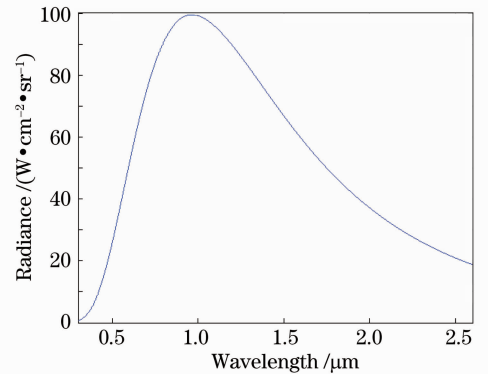


图 2 卤钨灯辐射特性(3000 K 黑体)

Fig. 2 Radiation characteristic of tungsten-halogen lamp(3000 K black-body)

实验室辐射定标时,由于中心波长偏差导致的辐射测量误差如图 4 所示,由光谱带宽偏差导致的辐射测量误差如图 5 所示,由中心波长偏差导致的积分球辐亮度插值误差如图 6 所示。

由图 2、4 可知,由于卤钨灯在可见近红外波段的辐亮度分布梯度较大,中心波长偏差导致的可见近红外波段辐射测量误差远大于短波红外波段。由图 5 可知,光谱带宽偏差导致的辐射测量误差与波长无关,与偏移量成正比,光谱带宽偏差导致的相对辐射测量误差与光谱带宽的相对偏移量基本相等。由图 4、6 可知,中心波长偏差导致的积分球辐亮度插值误差与辐射测量误差基本相同。由于地面积分

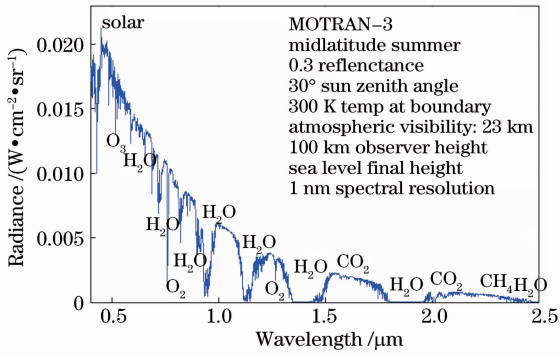


图3 典型遥感条件下,地球大气外垂直对地观测的光谱辐亮度

Fig. 3 Spectral radiance injecting in entrance pupil in vertical observation of ground outside earth atmosphere on the typical remote sensing condition

偏差导致的测量误差如图8所示。

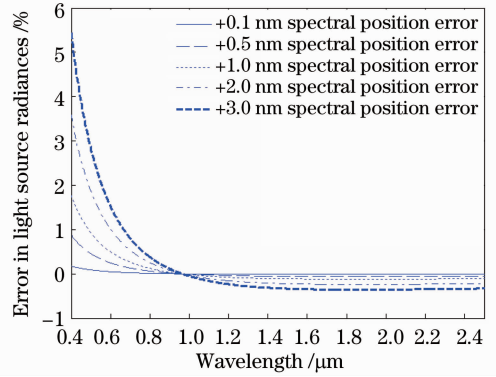


图6 中心波长偏差导致的积分球辐亮度插值误差

Fig. 6 Interpolation error of integrating sphere radiance caused by central-wavelength deviation

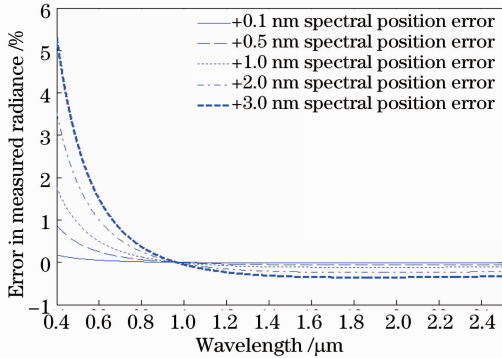


图4 中心波长偏差导致的实验室辐射标定测量误差

Fig. 4 Laboratory radiometric calibration error caused by central wavelength deviation

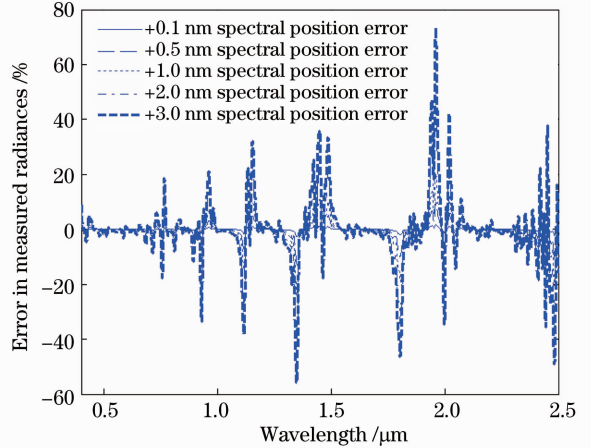


图7 在轨观测时,中心波长偏差导致的大气上行辐射测量误差

Fig. 7 Onboard radiometric measurement error of upgoing atmosphere caused by central-wavelength deviation

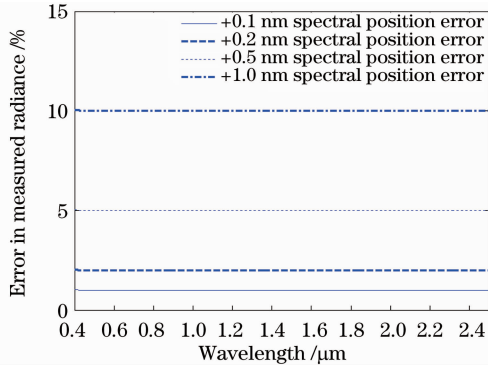


图5 光谱带宽偏差导致的实验室辐射标定测量误差

Fig. 5 Laboratory radiometric calibration error caused by FWHM deviation

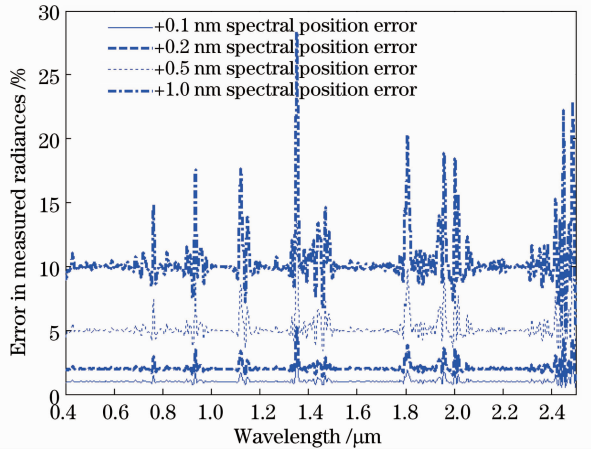


图8 在轨观测时,光谱带宽偏差导致的大气上行辐射测量误差

Fig. 8 Onboard radiometric measurement error of upgoing atmosphere caused by FWHM deviation

球辐射定标、地面星上光源辐射定标和在轨辐射定标采用的都是卤钨灯光源,辐射特性都接近3000 K的黑体,所以三者由于中心波长偏差和光谱带宽偏差导致的辐射测量误差相同。

成像光谱仪工作时,由于中心波长偏差导致的大气上行辐射测量误差如图7所示,由于光谱带宽

由图 7、8 可知,在轨观测时,中心波长偏差导致大气上行辐射的测量误差在 O₂、H₂O、CO₂ 等大气吸收峰附近表现得最为显著;光谱带宽偏差导致大气上行辐射的测量误差与偏移量成正比,光谱带宽偏差导致的相对辐射测量误差与光谱带宽的相对偏移量基本相等,但在大气吸收峰处表现得异常显著。

表 1 可见近红外波段,谱线漂移引起的辐射测量不确定度

Table 1 Uncertainty of radiometric measurement caused by spectral-line drift in VNIR band

| Items | Offset /nm | Single-factor uncertainty /% | | | | | Combined uncertainty /% |
|-----------------------------|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| | | u_S | u_1 | u^S | u_R | u_2 | |
| Spectral position error | 0.1 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.21 | 0.09 | 0.28 |
| | 0.5 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 1.03 | 0.46 | 1.38 |
| | 1 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 1.84 | 0.93 | 2.62 |
| | 2 | 1.87 | 1.87 | 1.87 | 3.81 | 1.87 | 5.34 |
| | 3 | 2.78 | 2.78 | 2.78 | 5.56 | 2.78 | 7.86 |
| Spectral-width error (FWHM) | 0.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.24 |
| | 0.2 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 4.47 |
| | 0.5 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 11.18 |
| | 1 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 22.36 |

表 2 短波红外波段,谱线漂移引起的辐射测量不确定度

Table 2 Uncertainty of radiometric measurement caused by spectral-line drift in SWIR band

| Items | Offset /nm | Single-factor uncertainty /% | | | | | Combined uncertainty /% |
|-----------------------------|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| | | u_S | u_1 | u^S | u_R | u_2 | |
| Spectral position error | 0.1 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | 0.21 | -0.01 | 0.21 |
| | 0.5 | -0.05 | -0.05 | -0.05 | 1.03 | -0.05 | 1.03 |
| | 1 | -0.12 | -0.12 | -0.12 | 1.84 | -0.12 | 1.86 |
| | 2 | -0.22 | -0.22 | -0.22 | 3.81 | -0.22 | 3.84 |
| | 3 | -0.35 | -0.35 | -0.35 | 5.56 | -0.35 | 5.60 |
| Spectral width error (FWHM) | 0.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.24 |
| | 0.2 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 4.47 |
| | 0.5 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 11.18 |
| | 1 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 22.36 |

所以,为了满足谱线漂移引起的辐射测量不确定度小于 6%,可见近红外波段中心波长偏差应不大于 2 nm,光谱带宽偏差应不大于 0.1 nm,此时谱线漂移引起的辐射测量不确定度为

$$u_{VNIR}^R = \frac{\sqrt{5.34^2 + 2.24^2}}{100} = 5.79\% \quad (13)$$

短波红外波段中心波长偏差应不大于 3 nm,光谱带宽偏差应不大于 0.1 nm,此时谱线漂移引起的辐射测量不确定度为

$$u_{SWIR}^R = \frac{\sqrt{5.60^2 + 2.24^2}}{100} = 6.03\% \quad (14)$$

综合考虑信噪比等因素,不考虑较强大气吸收峰附近的影响,可见近红外(VNIR)波段谱线漂移对光谱仪入瞳处光谱辐亮度不确定度的影响如表 1 所示,短波红外(SWIR)波段谱线漂移对光谱仪入瞳处光谱辐亮度不确定度的影响如表 2 所示。

仪器的绝对辐射标定精度,是导致光谱仪在轨辐射测量误差的重要原因之一。本文研究表明,在“定标积分球——星上定标光源——对地观测”的辐射标准传递过程中,谱线漂移导致的辐射测量误差与谱线漂移量成正比,与入瞳辐亮度的分布梯度成正比;光谱带宽偏差对测量精度的影响程度较中心波长误差高一个数量级。对于可见近红外波段平均光谱带宽 10 nm、短波红外波段平均光谱带宽 20 nm 的典型成像光谱仪,要保证谱线漂移引起的辐射测量不确定度小于 6%,实现成像光谱仪在轨观测时入瞳处的辐射测量绝对精度优于 10%,可见近红外波段中心波长偏差应不大于 2 nm,光谱带宽偏差应不大于 0.1 nm,短波红外波段中心波长偏差应不大于 3 nm,光谱带宽偏差应不大于 0.1 nm。

4 结 论

谱线漂移是成像光谱仪的固有特性,直接影响

参 考 文 献

- 1 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622004
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622004
- 2 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨率星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822001
- 3 Wang Yun, Yan Changxiang. Sub-pixel image registration of spectrometer images[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 661~667
王运, 颜昌翔. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(3): 661~667
- 4 A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**(4704): 1147~1153
- 5 Zheng Yunquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometer[J]. *J. Remote Sensing*, 2002, **6**(1): 75~80
郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(1): 75~80
- 6 Yu Bingxi. Research of high resolution imaging spectrometer[J]. *OME Information*, 2000, **17**(4): 1~5
禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪(C-HRIS)研究[J]. *光机电信息*, 2000, **17**(4): 1~5
- 7 Wang Yiqun, Yan Changxiang, Miao Chun'an. Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyper-spectral imager[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(4): 304~308
汪逸群, 颜昌翔, 苗春安. 星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(4): 304~308
- 8 Zhang Junqiang, Yan Changxiang, Lin Chao. Thermal effect on spectral-line shift of space-borne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0528001
张军强, 颜昌翔, 蔺超. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0528001
- 9 R. O. Green. Spectral calibration requirement for Earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(4): 683~690
- 10 Feng Yutao, Xiang Yang. Effects of spectral position offset on radiance measurement of imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 1083~1086
冯玉涛, 向阳. 光谱移位对成像光谱仪辐射测量的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(6): 1083~1086
- 11 Feng Yutao, Xiang Yang. Effects of spectral position offset on radiance measurement of imaging spectrometer [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 20~25
冯玉涛, 向阳. 谱线弯曲对成像光谱仪辐射信号采集的影响[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 20~25
- 12 Li Youping, Yu Bingxi, Wang Yupeng *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 822~828
李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 822~828
- 13 Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2348~2354
郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(11): 2348~2354
- 14 Zhang Chunlei, Xiang Yang. Accuracy analysis of calibration for imaging spectrometer by using diffuser method [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2829~2836
张春雷, 向阳. 漫反射板法标定成像光谱仪的精度分析[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12): 2829~2836
- 15 Qi Xiangdong, Han Pengpeng, Pan Mingzhong *et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2871~2876
齐向东, 撒芃芃, 潘明忠等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12): 2871~2876

栏目编辑：何卓铭