

宽波段高光谱成像仪星上波长定标方法

王咏梅^{1,2,3,4}, 石恩涛^{1,2,3}, 王后茂^{1,3}

- (1. 中国科学院国家空间科学中心 空间环境探测研究室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049;
3. 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;
4. 天基空间环境探测北京重点实验室, 北京 100190)

摘要: 高光谱成像探测仪在轨波长漂移和性能衰变是有效载荷在轨长期工作必须解决的问题。利用太阳辐射光谱和大气后向散射辐射光谱中特有的 Fraunhofer 吸收线可作为星上波长定标的基准。针对波长定标精度需求, 优选出高精度的太阳参考光谱, 用仪器狭缝函数卷积后初选出 87 条 Fraunhofer 吸收线, 并分析了由 Fraunhofer 吸收线分布非均匀性引起的系统误差, 以及由仪器探测能力不同而产生的随机误差。综合最大偏差和 RMS, 确定了在满足定标精度优于 0.01 nm 的条件下, 可用的 76 条太阳 Fraunhofer 线的精确位置。该研究为高光谱成像探测载荷在轨高精度波长定标奠定了基础。

关键词: 波长漂移; 波长定标; 太阳参考光谱; 太阳 Fraunhofer 线; 高光谱成像

中图分类号: O433.4; P412.27 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0303006

Method of in-flight wavelength calibration for wide band hyper-spectral imager

Wang Yongmei^{1,2,3,4}, Shi Entao^{1,2,3}, Wang Houmao^{1,3}

- (1. Laboratory of Space Environment Exploration, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China)

Abstract: The wavelength drift and performance decay of hyper-spectral imager are the main problems that must be solved for long-term operation in orbit. The Fraunhofer absorption line, which is unique in the solar radiation spectrum and the atmospheric backscattering radiation spectrum, can be used as the benchmark for the wavelength calibration. According to the requirement for wavelength calibration precision of instrument, the high precision solar reference spectrum was optimized, then 87 Fraunhofer absorption lines were selected by the convolution of instrument slit function. The system error caused by the line asymmetric and the random error caused by the instrument detection capabilities were analyzed.

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 北京市科委专项培育项目(Z151100003615001)

作者简介: 王咏梅(1967-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大气和电离层光学遥感探测技术和应用方面的研究。

Email: wym@nssc.ac.cn

Based on maximum deviation and RMS, the exact positions for available 76 solar Fraunhofer lines were determined under the condition that the calibration accuracy was better than 0.01 nm. This study lays the foundation for high precision wavelength calibration of hyper-spectral imaging on-orbit.

Key words: wavelength shift; wavelength calibration; solar reference spectrum; solar Fraunhofer lines; hyper-spectral imaging

0 引言

宽波段高光谱成像仪由于其丰富的光谱信息和空间信息的同时获取,已广泛用于大气环境探测和植被分析测量中,为了保证产品精度,仪器在地面研制时已经过高精度的地面定标^[1-3],获得了辐射响应度和波长精确位置以及其他的仪器性能参数,为实现量化需求做好了准备。但是由于卫星发射的剧烈振动以及长期在空间环境下运行,其性能必然因空间环境的影响而发生变化,与高分辨率地物遥感相机主要关注在轨辐射定标精度不同^[4],对高光谱大气遥感仪器而言,最主要的问题是探测波长的漂移和探测目标响应度的衰变^[5-7],如何解决这些问题主要取决于良好的星上定标方法。

针对高光谱仪器的波长漂移问题,星上波长定标方法主要分为以下三种,一是携带具有标准发射线的光谱灯,利用光谱灯发射线位置的变化来监测、标定仪器的波长漂移。如 NIMBUS-7/TOMS, GOME, FY-3 紫外臭氧总量光谱仪即采用这种方法进行波长监测^[8-9];二是需要定标时,将已知吸收线位置的标准滤光片切入光路,通过测量吸收线峰值位置的变化实现波长定标。上述两种方法在星载遥感仪器中应用均存在一定不足。如方法二需要转动机构将测试滤光片引入、引出,另外对滤光片的带宽要求也较高;而方法一不仅需要一定的点燃功耗,且单个光谱灯的发射线往往较少,不能满足大光谱范围、高光谱分辨率定标的需求;若采用多个不同类型的光谱灯,则也需要光谱灯的转换机构,进一步增大了对卫星资源的需求,降低了可靠性。因此,对高分辨率光谱仪器而言,近年来国外常采用太阳 Fraunhofer 线进行星载高光谱仪器的波长定标^[10-11]。这种方法,由于利用了仪器所测量的太阳辐射光谱

中固有的特征谱线为标准,因此其所选光谱特征和仪器的探测能力密切相关,如何确定该方法的定标精度是实现定标的前提,但对利用该方法的定标精度分析未见报道。

文中以某型号紫外可见高光谱成像探测仪(UV-VIS Hyperspectral Imager, UVHI)为例,针对较高的光谱分辨率和高定标精度需求,重点讨论了利用太阳光谱测量进行星载光谱仪器波长定标的可行性和定标精度,另外还分析了利用大气辐射光谱进行波长定标的可行性,为实现高精度星上定标提供了依据。

1 太阳 Fraunhofer 线的选取原则

Fraunhofer 线是太阳大气对太阳光球辐射的吸收线,其强弱差别很大,而且分布也很不均匀。虽然在天文上已给出许多强 Fraunhofer 线的精确位置^[12],但这些太阳 Fraunhofer 线是否能用于光谱遥感仪器的波长定标取决于仪器的光谱分辨率。当仪器的光谱分辨率极高,以致于可清晰分辨各较强 Fraunhofer 线时,利用天文上给出的强 Fraunhofer 线进行波长定标是可行的;但是当仪器的光谱分辨率不够高(目前的对地遥感仪器以及文中介绍的 UVHI 均属于此种情况),以致一些强 Fraunhofer 线无法完全分辨时,周围其他吸收线的影响必须加以考虑,这给仪器的波长定标造成一定误差。为此,需对仪器所能测量的太阳光谱进行细致分析,选取适合 UVHI 光谱分辨率情况下的太阳 Fraunhofer 线以用于仪器的波长定标,通常情况下,根据目前高光谱定标的需求,考虑到仪器光谱分辨率和采样率,所采用的参考光谱的光谱分辨率应比仪器的光谱分辨率高五倍以上。

太阳 Fraunhofer 线能否被用于在轨波长定标的

基本判据是波长定标误差。利用太阳 Fraunhofer 线进行高光谱遥感仪器波长定标的误差主要来自以下两个方面。

(1) 仪器光谱分辨率和采样率所引进的误差。由于仪器函数的光谱展宽使得无法清晰地分辨单一太阳 Fraunhofer 线,所测量的太阳 Fraunhofer 线均是在仪器光谱分辨率范围内的卷积结果,卷积后的太阳 Fraunhofer 线因线形影响会有不对称性,当仪器采样率较低时,利用测量值内插获得的太阳 Fraunhofer 线位置和真实太阳 Fraunhofer 线波长位置将存在一定偏差。由于这一偏差,在仪器光谱分辨率和采样率给定后已完全确定,而与仪器的测量信噪比无关,文中称这一偏差为波长定标的“系统误差”。由于在不同波长附近太阳 Fraunhofer 线分布是非均匀的,使得这一“系统误差”也存在较大差别;因此,在遥感仪器光谱分辨率和采样率确定的情况下,是否存在能达到仪器所要求波长定标精度的太阳 Fraunhofer 线,是利用太阳 Fraunhofer 线进行星上波长定标的前提。

(2) 由仪器测量误差引起的太阳 Fraunhofer 线位置的变化,这一变化是由遥感仪器的测量噪声所引起,取决于仪器在响应测量波长的信噪比特性。这里称这一偏差为波长定标的“随机误差”。

综上,用于遥感仪器波长定标的太阳 Fraunhofer 线选取的原则是上述两项误差的均方根误差应小于仪器所要求的波长定标误差。

2 太阳 Fraunhofer 线波长定标误差的分析

2.1 高分辨率太阳光谱

针对 UVHI 在紫外和可见波段光谱分辨率为 0.6 nm,定标精度为 0.01 nm 的需求,采用改进型 SAO2010 太阳参考光谱^[13],该参考光谱是经过多次整合、比较和修订之后正式发布的,该光谱覆盖范围为 200~1 000 nm,光谱分辨率 0.04 nm,采样率 0.01 nm,波长精度优于 0.000 4 nm(>305 nm),辐射强度的绝对精度优于 4%。这些指标均远优于 UVHI 一个量级以上^[14]。表 1 给出了关键参数具体的比较。从表中看出选取 SAO2010 太阳参考光谱作为文中计算分析的标准光谱是合理的。

表 1 SAO2010 光谱与紫外高光谱探测仪光谱性能的比较

Tab.1 Comparison of spectral performance for SAO2010 spectrum and UVHI

Parameters	Spectral range/nm	Spectral resolution/nm	Spectral sampling interval/nm	Wavelength accuracy/nm
SAO2010	200-1 000	0.04	0.01	0.000 4
UVHI	300-500	0.6	0.2	0.01

2.2 理想太阳光谱和拟合测量光谱的获得

根据表 1 所给出的 UVHI 的光谱性能要求以及仪器光谱响应函数,对 SAO2010 太阳参考光谱进行了卷积,得到与仪器光谱分辨率相匹配的太阳光谱。其仪器光谱响应函数为典型高斯函数:

$$F=ae^{-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: a 为拟合系数; x 为采样点序号; x_0 为谱线中心峰对应采样序号; σ 为谱线半高宽。

对 SAO2010 高分辨率太阳参考光谱 $S_{ref}(\lambda)$,将其与仪器响应函数和采样频率对全谱段进行卷积,即可得到响应光谱分辨率下的太阳光谱 $S_{lores}(\lambda)$:

$$S_{lores}(\lambda)=S_{ref}(\lambda)*F \quad (2)$$

当卷积点的波长间隔为探测仪的采样间隔时,该光谱为不考虑测量噪声情况下的测量光谱,即为仪器光谱分辨率下的理想太阳参考光谱。但当测量光谱采样率较低时,采样点通常不会位于太阳 Fraunhofer 线的中心位置,这可能导致太阳 Fraunhofer 线中心位置确定产生偏差。为此,需要根据理想太阳参考光谱初步挑选出太阳 Fraunhofer 线,以便进一步分析。图 1 为用 SAO2010 太阳参考光谱与狭缝函数卷积后的

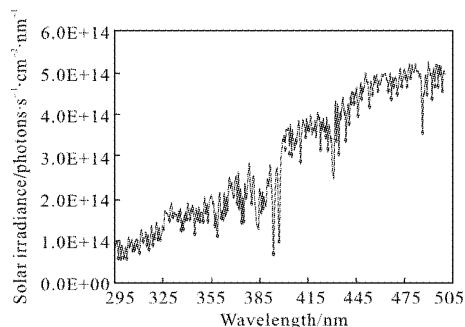


图 1 理想太阳参考光谱和初选太阳 Fraunhofer 线
Fig.1 Solar reference spectrum and original solar Fraunhofer lines

理想太阳参考光谱和初选的太阳 Fraunhofer 线,其中实线为理想太阳参考光谱,而圆点表示初选的太阳 Fraunhofer 线,可以看出,在 295~505 nm 光谱范围内,可以初选出约 87 条太阳 Fraunhofer 线可供进一步分析。

2.3 太阳 Fraunhofer 线位置确定的系统误差

由于理想太阳参考光谱的采样间隔为 0.01 nm,因此,在仪器光谱分辨率条件下,太阳 Fraunhofer 线位置可由理想太阳光谱内插给出。内插方法采用七点拉格朗日多项式内插,所给出的太阳 Fraunhofer 线的波长误差远小于 0.01 nm,满足波长定标精度的要求。

无噪声测量光谱情况下给出的太阳 Fraunhofer 线位置由无噪声测量光谱内插给出。考虑到实际光谱包含测量误差,为了内插方法的一致性,此处太阳 Fraunhofer 线位置仍采用七点五次多项式拟合内插方法给出(选取点附近两边各选三个点)。它与理想参考光谱获得的精确太阳 Fraunhofer 线位置的差别即为太阳 Fraunhofer 线位置确定的系统误差。由于测量光谱各点的波长位置可在正、负半个波长采样间隔间变化,因此,随采样点位置的变化,太阳 Fraunhofer 线位置确定的系统误差也在变化。这一变化大致可分为两类,一是系统误差随采样点位置的变化很小;二是系统误差随采样点位置的变化较大。图 2 给出了这两种情况系统误差随采样点位置变化的示意图,其中图 2(a)给出了两条太阳 Fraunhofer 线(304.12 nm 和 370.87 nm)随采样点波长位置的变化情况,由图可知,所选两条太阳 Fraunhofer 线的系统误差大体相当,但其变化规律完全不同,其中 370.87 nm 线(实线)的系统误差随采样点波长位置的变化幅度小,最大也不大于 0.004 nm;而 304.12 nm 线(虚线)的系统误差随采样点波长位置的变化幅度则完全不同,其最大变化达 0.045 nm。引起这一不同的根本原因是太阳 Fraunhofer 线对称性的差别所致,由于太阳 Fraunhofer 线的非对称性,这一点从图 2(b)中两条太阳 Fraunhofer 线线形的分布细节可明显看出,因此采样点选取位置不同会导致太阳 Fraunhofer 线峰值位置拟合存在差异。对于前一种情况,可采用去除平均偏差的方法减小系统误差的影响;而对后一种情况,采用这一修正的方法对减小系

统误差影响有限。

虽然当仪器装调完毕后,若不考虑仪器的波长漂移,各太阳 Fraunhofer 线相对于 CCD 像元的位置也随即确定,其系统误差会小于文中模拟结果。但考虑到环境因素引起的仪器波长漂移和各批次仪器装调的随机性,因此文中模拟计算的结果更具有较广泛的适用性。

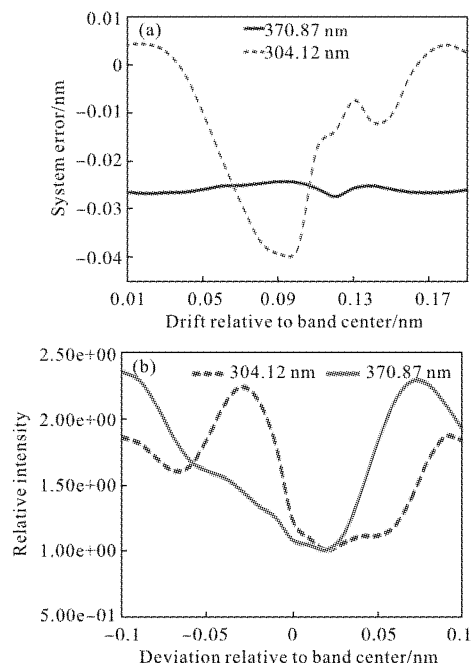
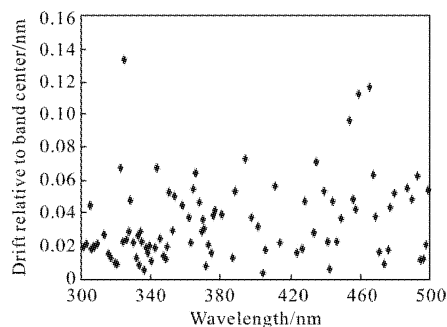


图 2 (a) 系统误差随采样点位置的变化;(b)太阳 Fraunhofer 线(304.12 nm 和 370.87 nm)线型分布

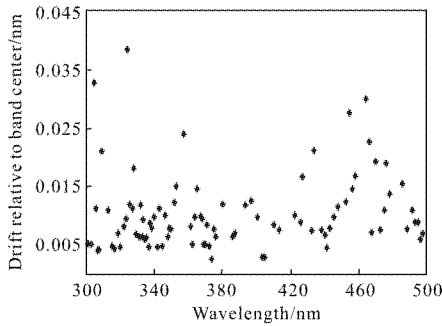
Fig.2 (a)System error at different sample position; (b) Profile of two solar Fraunhofer lines(304.12 nm and 370.87 nm)

图 3 给出了 300~500 nm 波段范围内系统误差订正对选取太阳 Fraunhofer 线的影响。从图 3(a)可以看出,如果不经系统误差订正,其最大系统误差小于 0.01 nm 的太阳 Fraunhofer 线仅有三条;经系统误差



(a) 未订正前的影响

(a) Result before error correction



(b) 订正后的影响

(b) Result after error correction

图 3 系统误差订正对选取太阳 Fraunhofer 线的影响

Fig.3 Effect of system error correction on selecting solar Fraunhofer line

订正后，其最大系统误差小于 0.01 nm 的太阳 Fraunhofer 线增加到 37 条。可见系统误差的订正对太阳 Fraunhofer 线位置的确定和进一步保证定标精度至关重要。

2.4 太阳 Fraunhofer 线确定的随机误差

通过测量太阳光谱确定太阳 Fraunhofer 线位置的不确定性,除上述系统误差外,由于测量光谱存在测量噪声和 AD 量化误差,使得太阳 Fraunhofer 线位置的确定还存在着随机误差。在计算中,首先计算不同波长位置的信噪比,根据信噪比利用随机数组给出该波长信号的 20 个测量噪声值(泊松-高斯),结合 AD 量化误差的考虑给出测量信号的模拟值。利用紫外-可见波段的 20 组带测量噪声的模拟谱进行太阳 Fraunhofer 线中心波长位置的确定,图 4 给出了紫外-可见波段各太阳 Fraunhofer 线波长位置的最大随机误差变化。可以看出,在所测量波段,除极

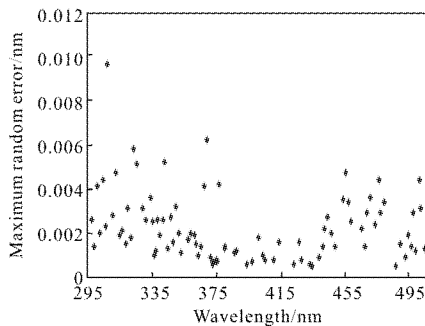


图 4 太阳辐照度测量时太阳 Fraunhofer 线波长位置的最大随机误差

Fig.4 Maximum random error at different positions of solar Fraunhofer line by solar irradiance measurement

个别点外,各太阳 Fraunhofer 线波长位置确定的随机误差均 < 0.006 nm,远小于 0.01 nm 的波长定标精度要求。这表明利用太阳辐照度定标情况下测量的太阳光谱进行波长定标随机误差的影响很小,基本可以忽略。

2.5 大气辐亮度谱太阳 Fraunhofer 线位置确定的误差

利用大气辐亮度谱中太阳 Fraunhofer 线位置进行行星上仪器的波长定标,与利用太阳辐照度谱的主要差别是两者测量的信噪比不同,而导致太阳 Fraunhofer 线位置确定随机误差的不同。由于大气后向散射的辐亮度随太阳天顶角、下垫面的反照率、云层和冰雪覆盖情况等而变化,详细计算各种情况下太阳 Fraunhofer 线位置确定的随机误差十分困难的、也是不必要的。文中选用了北纬 60、下垫面反照率为 0.5 的情况作为一个代表。考虑到进行大气后向散射辐亮度模拟的大气辐射传输模式(MODerate spectral atmospheric TRANsmission, MODTRAN)所使用的太阳光谱精度较低、而且 MODTRAN 的光谱分辨率也较低,直接用它模拟的大气后向散射辐亮度难以与 SAO2010 太阳光谱匹配。为解决这一问题,使用了平均反照率。不同波段的反照率值由 MODTRAN 计算的大气后向散射辐亮度和使用 SAO2010 卷积得到的低分辨率太阳光谱之比给出,由得到的反照率值乘以带噪声的低分辨率太阳光谱,即可得到模拟的大气后向散射辐亮度。采用以上分析太阳 Fraunhofer 线定标的误差分析方法,同理可以得到利用大气后向散射辐亮度的 Fraunhofer 线位置进行定标的误差情况。图 5 给出了在大气测量情况下,紫外-可见波段各太阳 Fraunhofer 线波长位置确定的最大随机误差。

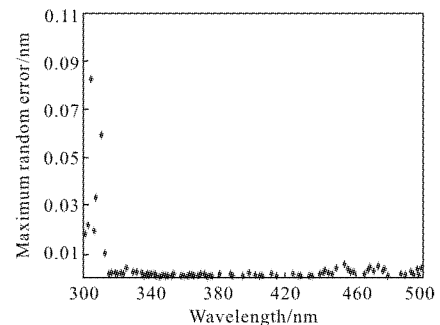


图 5 大气测量时太阳 Fraunhofer 线确定的最大随机误差

Fig.5 Maximum random error at different positions of solar Fraunhofer line by atmosphere radiance measurement

比较图 4 和图 5 可以看出,对<312 nm 的波段,其太阳 Fraunhofer 线波长位置确定的随机误差明显增大,这是由于大气臭氧吸收使这一波长区大气后向散射辐亮度大为减小的原因。基于这一原因,对<312 nm 的太阳 Fraunhofer 线不能用于波长定标,当用大气后向散射辐亮度来进行定标时,可利用的太阳 Fraunhofer 线减小到 79 条。

2.6 星上定标用太阳 Fraunhofer 线的选取结果

根据以上分析,可以优选出星上波长定标用太阳 Fraunhofer 线。当利用太阳辐照度定标光谱进行波长定标时,在紫外-可见全波段可选取太阳 Fraunhofer 线达 76 条线(见图 6),其中 37 条太阳 Fraunhofer 线中心波长位置确定的最大误差小于 0.01 nm,其余 39 条太阳 Fraunhofer 线中心波长位置确定的 RMS 误差小于 0.01 nm,均满足波长定标精度 0.01 nm 的要求,可用于星上波长定标。

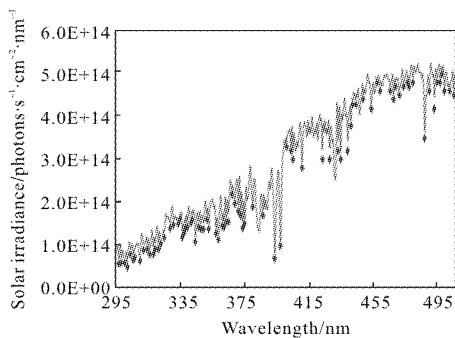


图 6 利用太阳辐照度测量进行波长定标的太阳 Fraunhofer 线

Fig.6 Solar Fraunhofer line for wavelength calibration by solar irradiance measurement

当利用大气后向散射辐亮度谱进行星上波长定标时,由于大气臭氧的吸收,主要问题是无法对<312 nm 的波长范围进行精确的定标,在紫外 295~312 nm 波长区,可用的太阳 Fraunhofer 线减少了 7 条,经模拟分析,可选用的太阳 Fraunhofer 线共 69 条,其中 34 条太阳 Fraunhofer 线中心波长位置确定的最大误差小于 0.01 nm,其余 35 条太阳 Fraunhofer 线中心波长位置确定的 RMS 误差小于 0.01 nm,均满足波长定标精度 0.01 nm 的要求,可见对整个光谱区仍然有足够数据的太阳 Fraunhofer 线可用于星上波长定标。

3 结论

针对宽波段高光谱成像探测仪的特点,利用太

阳辐射光谱中固有的 Fraunhofer 吸收线来作为星上波长定标的基准,使得仪器在轨可以利用辐射定标测量的太阳光谱数据来进行波长监测,提高仪器在轨探测效率。通过分析指出,太阳 Fraunhofer 特征线进行高精度波长定标是可行的,利用太阳辐照度定标光谱进行波长定标可以选取到足够多的太阳 Fraunhofer 线使波长定标精度满足 0.01 nm 的要求;而当利用大气后向散射谱进行波长定标时,对大于 312 nm 的波长也可选取到足够多的太阳 Fraunhofer 线使波长定标精度满足 0.01 nm 的要求;但是由于大气臭氧的吸收使<312 nm 的太阳 Fraunhofer 线无法使用,即不能用大气后向散射谱对这一波长区进行波长定标。当仪器在轨工作时,可以将太阳辐照度和大气后向散射辐射测量用于对星上波长定标综合分析,以保证在轨长期高精度波长定标功能的实现。

参考文献:

- [1] Dirksen R, Dobber M, Voors R, et al. Prelaunch characterization of the Ozone Monitoring Instrument transfer function in the spectral domain [J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (17): 3972-3981.
- [2] Mao Jinghua, Wang Yongmei, Shi Entao, et al. Spectral calibration based on echelle[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 376-382. (in Chinese)
- [3] Lin Chao, Li Chengliang, Wang Long, et al. Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2064-2075. (in Chinese)
- [4] Xu Weiwei, Zhang Liming, Li Xin, et al. On-orbit absolute radiometric calibration of high resolution satellite optical sensor based on gray-scale targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0417005. (in Chinese)
- [5] Voors R, Dobber M, Dirksen R, et al. Calibration method to correct for cloud-induced wavelength shifts in Aura's Ozone Monitoring Instrument [J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (15): 3652-3658.
- [6] Xian Guang, Yan Changxiang, Wu Congjun, et al. Effect of temperature on airborne imaging spectrometer optical properties [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1647-1653. (in Chinese)
- [7] Hilsenrah E, Cebula R P, Deland M T, et al. Global Ozone

- Monitoring Experiment (GOME) on board of ERS 2 [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(5): 1351–1366.
- [8] Dobber M R, Dirksen R J, Levelt P F, et al. Ozone monitoring instrument calibration[J]. *IEEE Trans Geosc Rem Sens*, 2006, 44 (5): 1209–1237.
- [9] Liu Q Q, Zheng Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 566–577. (in Chinese)
- [10] Jos H G M van Geffen, Roeland F van Oss. Wavelength calibration of spectra measured by the Global Ozone Monitoring Instrument: variation along orbits and in time [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(3): 695–706.
- [11] Chance K, Spurr R J D. Ring effect studies: Rayleigh scattering, including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(21): 5224–5230.
- [12] Heath D F, Georgiev G. A new approach for spectroradiometric calibration consistency on the ground and in space[C]//SPIE, 2012, 8528: 85280R.
- [13] Chance K, Kurucz R L. An improved high-resolution solar reference spectrum for earth's atmosphere measurements in the ultraviolet, visible, and near infrared [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111 (9): 1289–1295.
- [14] Thuillier G, Hersé M, Labs D, et al. The solar spectral irradiance from 200 to 2 400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ALTAS and EURECA mission [J]. *Solar Phys*, 2003, 214(1): 1–22.