

文章编号 1004-924X(2015)07-1880-12

基于航天单色仪的在轨辐射定标应用与发展

夏志伟, 王 凯, 方 伟, 王玉鹏*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:叙述了广泛应用的光栅单色仪的色散原理,介绍了其常用的几种反射式水平成像系统的光学结构型式,描述了其波长定标和能量定标方法。对搭载航天单色仪的几个现有遥感仪器,如中分辨率成像光谱仪(MODIS)、太阳光谱分光计(SOLSPEC)、太阳后向散射紫外辐射计(SBUV)、紫外臭氧垂直探测仪—太阳后向散射紫外探测仪(UOVPP-SBUS)以及欧洲航天局(ESA)的 TRUTHS 项目等在辐射测量、光谱定标和绝对定标方面的应用现状进行了说明。最后讨论了未来航天单色仪可能的发展趋势及应用前景,指出采用太阳光源、航天单色仪和低温绝对辐射计相结合的绝对定标系统将是今后最具潜力的发展方向之一。

关键词:单色仪;低温绝对辐射计;光谱定标;绝对定标;空间遥感

中图分类号:TP722;TP731 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1880

Applications and development of radiation calibration in orbit based on space monochromator

XIA Zhi-wei, WANG Kai, FANG Wei, Wang Yu-peng*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn

Abstract: The dispersion principle of common used monochromators is described. The optical constructs of several kinds of reflective and horizontal imaging systems are introduced and their wavelength calibration and energy calibration methods are given. The application status of current remote sensing instruments boarding on different monochromators is illustrated, such as the applications of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS), Solar Spectrometer(SOLSPEC), Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer(SBUV), Ultraviolet Ozone Vertical Profile Probe(UOVPP-SBUS) and TRUTHS task from European Space Agency(ESA) to radiation measurement, spectral calibration and absolute calibration. Finally, it discusses the possible developing trends and application prospects of space monochromators and points out that the absolute calibration system by taking the sun as the light source and combining a space monochromator with a cryogenic absolute radiometer is one of the most promising trends in the future.

Key words: monochromator; cryogenic absolute radiometer; spectral calibration; absolute calibration; space remote sensing

收稿日期:2015-03-20;**修订日期:**2015-04-15.

基金项目:国家自然科学基金科学仪器基础研究专项基金资助项目(No. 41227003);国家自然科学基金资助项目(No. 41474161);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所领域前沿创新项目(No. Y3CXISS14A)

1 引言

单色仪利用色散元件对光波长进行高分辨率分析和选择,是从事光谱测量及分析的基础仪器。从应用模式上主要可分为光栅型和棱镜型两种。光栅单色仪在一定的工作范围内,可通过正弦机械机构,实现对波长的线性扫描控制,被广泛应用于大气对流层温度检测^[1]、地表及海洋温度遥感^[2]、农作物监测^[3]、海洋生物监测^[4]以及疾病诊断^[5]等领域。

在辐射定标领域,单色仪具有可实现宽光谱范围高精度的中心波长定标和光谱分辨率定标等优点。利用单色仪作为单色光源,并将其出射狭缝成像在平行光管的焦面上,获得定标所需的单色准直平行光,被广泛应用于遥感仪器的地面光谱定标^[6-9],如紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)^[10]、AVIRS^[11](Airborne Visible/infrared Imaging Spectrometer)、COMPASS^[12](COMPACT Airborne Spectral Sensor)、Hyperion^[13]、MODIS^[14](Moderate Resolution Imaging Spectrometer)等遥感仪器都采用该定标方法。

辐射定标的主要任务是确定各光谱通道的中心波长位置、半宽度和光谱响应函数等,或以标准光谱信号为基准,监测仪器工作状态下各通道的波长位置及光谱稳定性,校正波长偏移,并测定光谱响应函数^[6]。通过辐射定标可以确定遥感仪器的光谱特性等指标,为提高仪器本身可信度提供重要依据^[15]。

辐射定标可分为相对定标和绝对定标。相对定标是指用场景的像元辐射率和其它场景的像元辐射率的相对数值,或用一场景像元在不同时间内的相对辐射率以及一谱段间的光谱辐射率和另一谱段的光谱辐射率的相对值来解译目标。绝对定标是指用光谱辐射率、光谱辐照度、功率等基本单位来说明目标,必须用标准源进行直接比对测量,使用探测器入瞳面上以辐射量单位表示的数据,通过传感器的辐射定标把数字量转换为光辐射量。

与相对定标相比,绝对定标具有明显优势。通过实现对不同在轨遥感仪器的绝对定标,提高不同有效载荷之间的一致性,使不同年份、不同卫星间的数据具有可比性,建立多源遥感数据之间

的物理联系,对遥感数据的综合应用具有重要意义^[16]。

目前大多数遥感仪器的地面辐射定标均可达到较高精度的绝对定标,但其在轨定标还处于相对定标阶段。由于航天遥感仪器要经历发射时的高压、冲击等恶劣工况,发射后仪器必须尽快进行在轨定标。仪器在轨运行期间,长期遭受太阳辐射、宇宙粒子的冲击,仪器本身会随时间发生老化,仪器属性不可避免地会发生变化,同样需要通过定期在轨定标来减小测量精度的降低。

光学遥感仪器的星上光谱定标的标准源一般分为灯定标、太阳定标和黑体定标,其光谱定标都是利用波长已知的特征谱线或吸收线作为参考,通过测定像面上若干特征谱线的位置,利用数据处理方法计算得到各光谱通道的中心波长,来校准仪器在轨期间各光谱通道的中心波长^[17]。国际上许多遥感仪器,如 CHRIS^[18](Compact High-resolution Imaging Spectrometer)、MERIS^[19-21](Medium Resolution Imaging Spectrometer)、HIRIS^[22](High Resolution Imaging Spectrometer)、Hyperion^[23]、MOS^[24](Modular Optoelectronic Scanner)、SOLSPEC^[25](SOLAR SPECTRUM spectrometers)等均采用这种方式。但由于特征谱线的个数有限,不能利用单色仪逐个波长扫描精确标定各光谱通道的中心波长,所以该方法存在较大误差,不利于提高光谱定标精度。

由于单色仪光谱分辨率远高于遥感仪器的光谱分辨率,如果将单色仪空间化,则可以连续扫描得到遥感仪器各光谱通道的响应函数,将大大提高星上光谱定标的精度。目前仅有 MODIS^[26]采用将单色仪作为其星上光谱定标装置的方式。

在绝对定标方面,随着遥感技术在各领域的深入应用,遥感仪器的定标精度已不能满足现有需求,迫切需要将现有精度水平提高一个量级。目前 TRUTHS 项目^[27]正在进行该方面的研究工作,其将单色仪与低温辐射计相结合,使定标数据可直接溯源至国际基本单位制(SI),作为在轨光谱辐射基准,经标准传递实现自身和其它在轨仪器的绝对定标,精度水平可以满足研究需求。

本文从航天单色仪的工作原理、结构型式、波长定标和能量定标方法等出发,结合现有搭载单色仪的航天遥感仪器,对其应用现状进行了说明,讨论了未来航天单色仪的发展趋势和应用前景,

并提出一种可行的、适合我国工程应用的星载遥感器绝对辐射定标系统方案。

2 单色仪

2.1 光栅单色仪的色散原理

平行光束入射到平面光栅上,衍射角的正弦与波长成正比,同一波长的衍射光束的方向一致。设光栅的划痕间距为 d ,规定当将光线转向法线,需逆时针转动时,光线与法线的夹角为正。从图 1 中可以看出,光线 11' 和 22' 的光程差 Δ 为:

$$\Delta = d(\sin \varphi + \sin \varphi'). \quad (1)$$

相干光束干涉的极大值条件为:

$$\Delta = \pm k\lambda, \quad (2)$$

其中: k 为整数, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

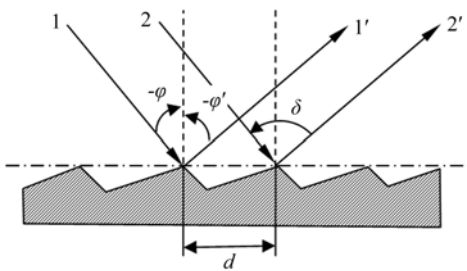


图 1 平面光栅色散原理

Fig. 1 Dispersion law for plane grating

可得平面衍射光栅的色散为:

$$d(\sin \varphi + \sin \varphi') = \pm k\lambda. \quad (3)$$

由式(3)可知,对某一确定光栅,给定入射角时,在某确定光谱级次中,波长越长的光束其衍射角 φ' 越大,光谱按波长产生空间排列。

光栅作为分光元件具有以下优点:光栅不受材料透过率的限制,可在整个光谱区中应用;光栅的角色散率几乎与波长无关,方便了对光谱波长的测量。其缺点为:光栅存在光谱级次的重叠,一个级次的光谱波长的范围不够大;光栅由于刻划误差的影响,会存在假线(鬼线)。

2.2 单色仪的结构型式

反射式成像系统具有在整个光学光谱区内均可应用、不存在色差等优点,在光谱仪器中应用广泛。单色仪多采用反射式水平成像系统,可分为以下几种常用型式:

(1)水平对称式艾伯特-法斯梯成像系统,如

图 2 所示,其基本特点是 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 和 $l_1 = l_2$,即入射狭缝和出射狭缝同时置于反射镜一边,并对称于 CC' 轴,其优点是当入射狭缝和出射狭缝均制成圆弧形且曲率 $R = l_1 = l_2 = f \tan \alpha$ 时,任何波长的谱线弯曲均可获得完全的补偿。

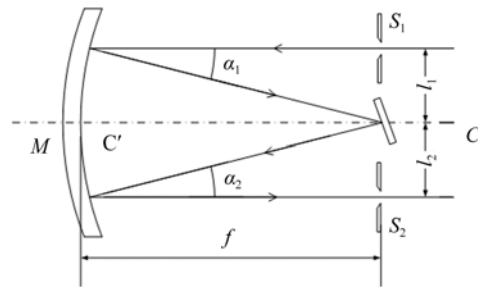


图 2 水平对称式艾伯特-法斯梯成像系统

Fig. 2 Horizontal symmetric Albert-Fastie imaging system

(2)切尔尼-特纳系统:该系统由艾伯特-法斯梯系统演变而成,用 2 块相同的小凹面反射镜分别作为准直和成像反射镜来代替一块大的凹面反射镜,如图 3 所示,由于两镜分离,避免了二次衍射,同时方便了反射镜的加工与装调。

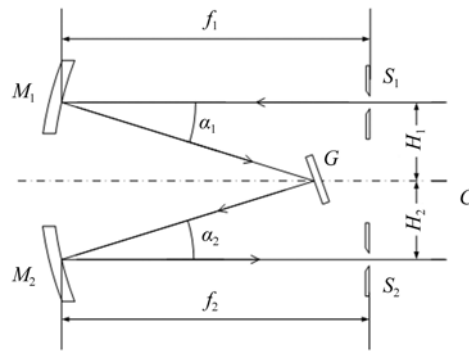


图 3 切尔尼-特纳系统

Fig. 3 Czerny-Turner system

(3)交叉对称水平成像系统,如图 4 所示,该系统的像差比法斯梯水平对称成像系统的像差偏大,但该光路有利于消除杂散光。在 M_1 和 S_2 、 M_2 和 S_1 之间放置光栏,很容易挡住由反射镜 M_1 直接射入出射狭缝和反射镜 M_2 直接返回入射狭缝的杂散光。

(4)牛顿-艾伯特系统,如图 5 所示,其特点是两块分离的球面镜 M_1 和 M_2 的曲率中心重合于光栅的中心点 C 上,平面反射镜 M_3 和 M_4 分别置

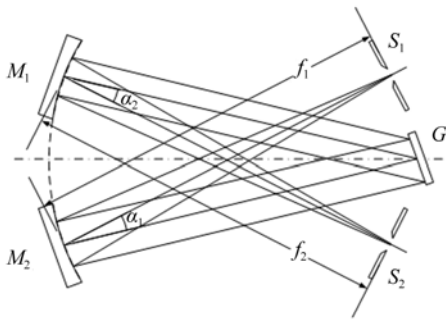


图 4 交叉对称水平成像系统

Fig. 4 Cross symmetry horizon imaging system

于球面镜 M_1 和 M_2 的主光轴上,消除了系统的轴外像差,能获得较高的分辨率;但中央部分被遮挡,约损失 10% 的光能量。

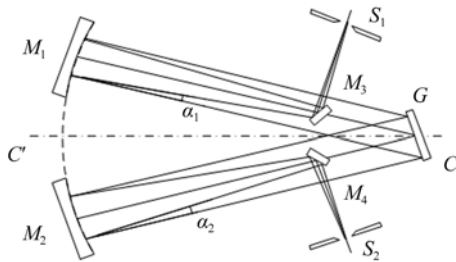


图 5 牛顿-艾伯特系统

Fig. 5 Newton-Albert system

(5)切宁水平成像系统,又称为 Z 型光路系统,如图 6 所示。系统对称,即 $\alpha_1 = \alpha_2 = 2i$,当 M_1 和 M_2 的焦距相同时,则彗差完全可以被消除。因此,该系统适合于作反射式单色仪的成像系统。

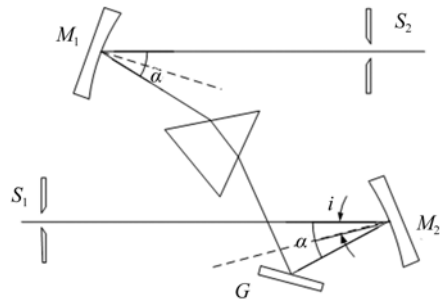


图 6 切宁水平成像系统

Fig. 6 Chernin horizon imaging system

综上所述,水平成像系统可以采用增加狭缝

高度的方法来提高单色仪的光强,狭缝高度的增加对分辨率的影响较小;可以采用离轴抛物面来消除球差,采用 Z 型光路来完全消除彗差。

在星载定标系统中,单色仪作为整个定标系统的单色定标光源,对其出射光功率有较高的要求,因此单色仪的狭缝高度一般较大。同时,其作为空间应用仪器的一部分,对其像差、杂散光抑制等要求也要比地面应用要高得多。综合考虑,航天单色仪的结构形式一般采用反射镜为离轴抛物面的切尔尼-特纳系统。

2.3 单色仪定标

由于航天单色仪在转运、发射以及在轨运行期间,光机结构和电子学器件的性能可能会发生改变,导致实际使用时单色仪输出的单色光波长或光功率产生偏移,所以需要单色仪进行波长定标和能量定标。

2.3.1 单色仪波长定标

单色仪是光谱定标或测量分析中的重要仪器,其波长准确性直接影响定标/测量不确定度。单色仪在使用前需要进行波长标定,以确保输出波长的准确性。

单色仪波长定标可采用谱线灯的光谱定标技术、可调谐激光器的光谱定标技术和气体吸收池的光谱定标技术等^[6,28]。一般步骤为:采用已知波长的谱线光源(如汞灯)、激光或吸收谱线作为定标光源,通过调节单色仪输出谱线,得到单色仪所指示的波长数据与谱线的对应关系并采用适当的算法进行数据处理^[29],如标准差法、相关系数法、最小差值法、极值法等^[30],推导出单色仪输出光谱区域中其他未经定标的波长与单色仪指示波长数据的关系,从而实现精确的波长定标^[31,32],定标过程如图 7 所示。

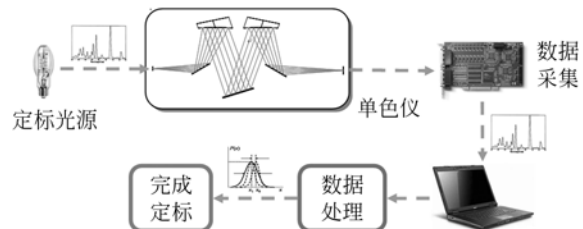


图 7 单色仪波长定标过程

Fig. 7 Process of wavelength calibration for monochromator

2.3.2 单色仪能量定标

单色仪作为绝对定标系统的组成部分,其输出的单色光功率对定标精度具有重要影响。理想情况是将单色仪和低温绝对辐射计相结合,以低温绝对辐射计作为主基准,采用低温辐射测量技术,实现将单色仪的单色光功率直接溯源至国际基本单位制(SI)。

单色仪能量定标步骤为:光源(如太阳、卤钨灯等)经聚光系统进入单色仪,由单色仪分光后,单色光耦合到光纤中传输并输出,然后低温绝对辐射计测量单色光功率,建立在轨光谱辐射基准,经标准传递测量其它遥感仪器不同光谱通道的响应函数,从而在轨遥感仪器的绝对定标,如图 8 所示。

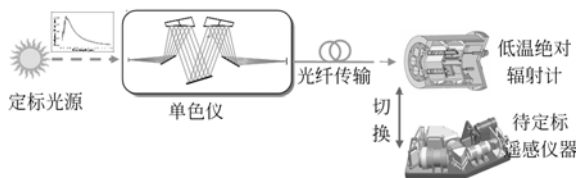


图 8 单色仪能量定标过程

Fig. 8 Process of energy calibration for monochromator

低温绝对辐射计为绝对定标系统的核心,绝对低温辐射计测量的基本原理^[33]为:入射光照射到低温环境下的探测器接收面,达到稳态后采用温度传感器测量其相对于温度恒定热沉的温升;然后关闭快门,调节探测器电加热功率,使探测器的温升到与光加热时的温升相同,则探测器的电加热功率等效于入射到探测器的光功率,从而实现光功率的精密测量。目前低温绝对辐射计在测量光谱功率方面的不确定度可达到 0.2%。

由于光源在短时间内的变化量(如太阳辐照度变化)很小,在单次定标时间段内可以认为是恒定的,因此航天单色仪高分辨率的单色光谱辐射在单次定标时间段内是稳定的,可以准确地将低温绝对辐射计主基准传递到副基准(如滤光片传递辐射计等),不会在标准传递链路中引入额外的传递误差。

3 现有航天产品

现有航天产品中已有不少遥感仪器中搭载有

单色仪,包括 MODIS、SOLSPEC、SUB、SSUBV (/2)等,其中仅 MODIS 将单色仪用作光谱定标装置,其余均用作测量装置。除此之外,还有正在实施中的 TRUTH 项目,将单色仪用作绝对定标系统的组件。

3.1 MODIS

美国的 MODIS 采用单色仪作为星上光谱定标装置^[26],MODIS 的任务是为科学研究团体提供相对于传统传感器更好的观测数据,用于全球陆地、海洋和大气的长期研究^[34]。

MODIS 具有 36 个光谱波段,波长从 412~14 200 nm。单色仪位于 MODIS 的光谱辐射定标组件(SRCA)中,位于光源和输出准直仪之间,如图 9 所示^[26]。光源为直径 25.4 mm 的积分球,内置 4 个 10 W 和 2 个 1 W 的灯。积分球发出的光辐射经单色仪分光后,进入准直仪,经准直扩束后进入 MODIS,进行星上光谱定标。SRCA 是具有光谱自定标功能,在出射狭缝旁边离轴放置 1 个硅光电二极管(SiPD),并在 SiPD 前放置 1 片钕镨玻璃滤光片(Didymium filter),利用滤光片的典型吸收峰和 SiPD 输出信号的极小值,即可建立单色仪光栅转动编码器码值与输出波长之间的关系,从而完成光谱自定标。同时,通过在准直仪中心附近内置 SiPD,可以消除定标光源对相对光谱响应(RSR)测量的影响。SRCA 通过运用光栅和排序滤波器可逐级输出可见、近红外和远红外的带通光谱,实现对 MODIS 各波段的波长定标,以及系统光谱响应和带宽的测量。由于采用了单色仪作为星上光谱定标装置,MODIS 达到了较高的光谱定标精度,在小于 1 μm 的光谱波

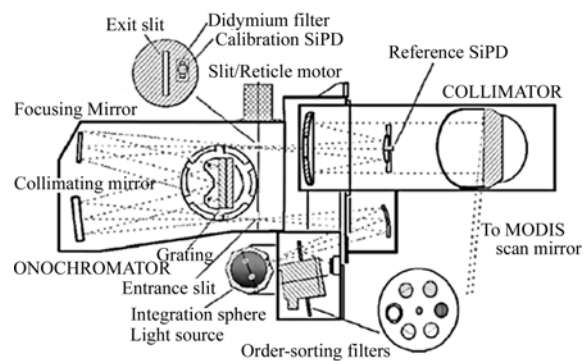


图 9 MODIS 光谱辐射定标组件(SRCA)

Fig. 9 Spectra-radiometric calibration assembly (SRCA) of MODIS

段(由于参考 SiPD 的光谱响应上限的限制),其光谱定标精度小于 1 nm。

MODIS 作为 Terra 和 Aqua 的有效载荷,分别于 1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日发射并投入使用。在其运行期间,共进行了约 79 次在轨光谱定标^[26],如表 1 所示。

表 1 Terra 和 Aqua 上 MODIS SRCA 组件的在轨光谱定标次数

Tab. 1 Number of on-orbit spectral calibrations for Terra and Aqua MODIS SRCA

Satellite	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Terra	6	5	4	4	4	3	2
Aqua	-	-	3	4	4	3	1
Satellite	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Terra	3	3	3	3	4	3	
Aqua	1	3	3	3	4	3	

3.2 SOLSPEC

太阳光谱分光计^[35-36](SOLSPEC)在 ATLAS 任务中实施,其包含 3 个采用全息光栅的双单色仪构成的分光计,分别覆盖紫外波段(200~350 nm)、可见波段(320~850 nm)和红外波段(800~2 500 nm)。3 个分光计采用结构相似的光路,6 块全息光栅安装在由步进电机控制的同一机械轴上,二级滤波器放置在出射狭缝后的光路上。入射狭缝前放置石英漫透射板,以减少信号对进入视场的太阳光与光轴共轴的依赖性。仪器内部安装有内定标灯,2 个用于监测紫外波段的氙灯和 2 个用于监测可见、红外波段的钨带灯,光栅步数和观测波长间的关系及狭缝函数则采用板载氮空心阴极灯。紫外、可见和红外 3 个光谱范围内的数据同时记录耗时约 11 min。SOLSPEC 的光路及结构如图 10 所示。

SOLSPEC 的紫外波段和可见波段的实验室光谱定标采用空心阴极灯提供的 20 根谱线,验证了色散定律的一致性和期望的光栅方程。SOLSPEC 的绝对定标在海德尔堡天文台并采用其黑体辐射标准进行,该标准由纯石墨制成的腔体组成,腔体的加热温度为 3 000 K,腔体温度由经法国柏林的 PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt)校准的高温计负责测量。

SOLSPEC 光谱分辨率高且基本呈线性色

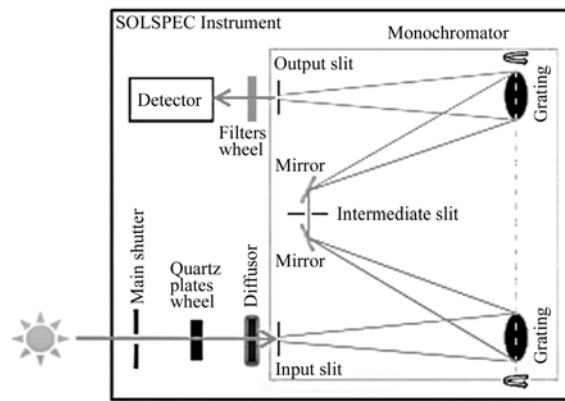


图 10 SOLSPEC 光路及结构示意图

Fig. 10 Optical schematics of SOLSPEC

散,其测量 200~2 500 nm 的太阳光谱辐射时平均精度可达到 3%(±2σ)^[36]。由于每个分光计的仪器响应度不一致,该精度具有一定的波长依赖性。由于采用了双光栅分光,仪器光路较复杂,长期稳定性稍差。

3.3 SBUV(/2)

太阳后向散射紫外辐射计(Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer, SBUV)^[37]的任务是监测臭氧的垂直分布的长期变化,对研究全球臭氧环境、监测南极臭氧空洞和北半球中纬臭氧总量持续减少具有重要意义。SBUV 于 1978 首次发射,搭载在运行于太阳同步极地轨道的 Nimbus-7 卫星上。从 1985 年至今,又有 7 个 SBUV/2 仪器被发射并运行于 NOAA 卫星上,分别为 NOAA-9、NOAA-11、NOAA-14、NOAA-16、NOAA-17、NOAA-18 和 NOAA-19。SBUV/2 的光路如图 11 所示,仪器内部装有双 Ebert-Fastie 光栅单色仪,视场为 11.3°×11.3°,对应星下点 168 km×168 km 地面覆盖范围,该视场内的响应度于发射前已在实验室内被精确标定,可溯源至 NIST(National Institute of Standards and Technology)的二向反射率分布函数(BRDF)标准,其灵敏度变化在 10°×10°的中心区域内小于 10%。光谱为 160~405 nm,光谱带宽为 1.13 nm(半高宽)。采用双单色仪能够较好地抑制杂散光,可将波段外的杂散光消除到 10⁻⁶ 量级。单色仪前端装有消偏器,用来消除大气 Rayleigh 散射的偏振效应。SBUV/2 采用离散测量的方法检测臭氧分布,波长分别为 252.0、273.7、283.2、287.7、292.4、297.6、302.0、305.9、312.7、317.6、331.3

和 339.9 nm, 扫描这 12 个波长需要 24 s, 完成一个扫描周期耗时 32 s。

SBUV/2 前的漫反板的在轨定标每周一次, 并采用星载汞灯的发射谱线进行在轨监测, 以保证反照率定标的精度, 结果表明漫反板的反射率随时间推移不断退化, 如 250 nm 的反射率每年降低约为 3%, 且长波区观测到的退化明显较小。

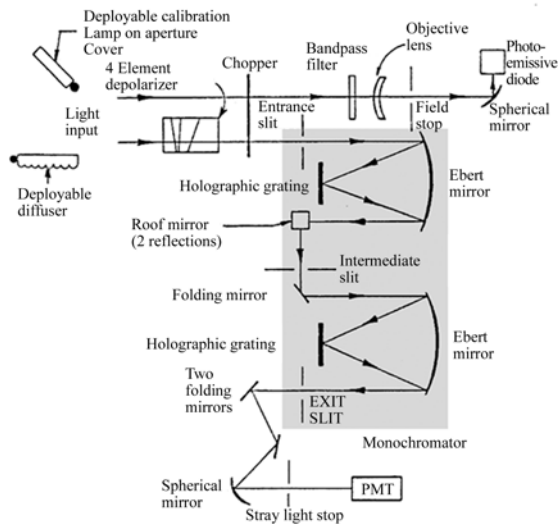


图 11 SBUV 光路示意图

Fig. 11 Optical schematics of SBUV

3.4 SBUS

紫外臭氧垂直探测仪-太阳后向散射紫外探测仪(SBUS)^[38]作为 FY-3A 气象卫星的有效载荷于 2008 年 5 月 27 日首次发射, 于 6 月 4 日投入在轨运行及探测, 其主要任务是测量太阳紫外光谱辐照度及太阳后向散射紫外光谱辐亮度, 进而反演臭氧总量垂直分布, 为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供参数。SBUS 在光学结构和通道波长等都与美国 NOAA 极轨卫星序列携带的紫外臭氧垂直探测仪 SBUV(2) 非常相似。

紫外臭氧垂直探测仪光学系统由定标光源、漫反射器、消偏器、调制器、双光栅单色仪、云层光度计及探测器等组成, 其中双光栅单色仪是对仪器性能指标起决定作用的主要组件之一。双光栅单色仪采用 Ebert-Fastie 结构, 由球面准直-聚光镜、平面和屋脊转向镜、光栅、入射狭缝、中间狭缝和出射狭缝组成, 结构和光路如图 12 所示。在两个单色仪之间采用屋脊反射镜和平面镜进行光学

传递, 使 2 个单色仪的光栅可同轴驱动, 同时双单色仪色散相加。单色仪球面准直-聚光镜焦距为 250 mm, 视场为 $11.3^\circ \times 11.3^\circ$, 光栅刻线面积为 $52 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$, 刻线数为 2 400 1/mm, 衍射效率高于 30%。在双光栅单色仪出射狭缝处, 利用反射型分束器将光束分为两部分, 一部分进入主光路探测器, 另一部分进入参考探测器, 用来修正由于辐照和疲劳等导致的光电倍增管增益的变化。

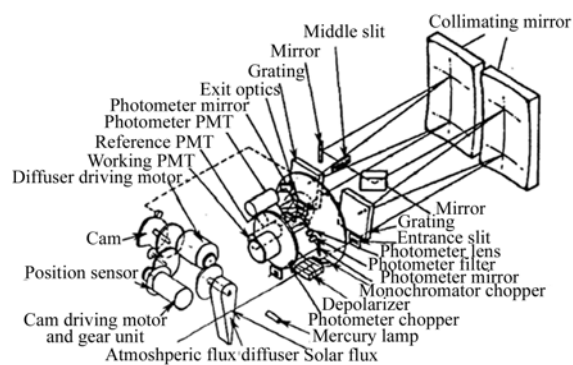


图 12 SBUS 光路及结构图

Fig. 12 Optical schematics of SBUS

SBUS 在发射前进行了高精度的光谱定标和响应度定标, 使用氙灯和 1.5 m 单色仪构建了光谱定标源, 并配合汞灯光谱, 采用一次定标公式, 定标精度达到 $\pm 0.04 \text{ nm}$ ^[39]。为了监测仪器在轨光谱变化, SBUS 装有定标汞灯, 每月进行一次光谱定标。当 SBUS 进入轨道阴影后, 开启汞灯、预热, 标准漫射板移入光路, 分别测量汞灯在真空下的 4 条谱线: 184.950、253.728、296.815 和 365.120 nm。利用 SBUS 扫描汞灯 4 条谱线, 通过高斯拟合找到每条谱线的峰值位置, 再利用修正后的光谱定标公式得到测量的汞灯谱线, 将其与标准谱线比较, 从而对其测量精度进行评估。

在轨运行期间, 紫外臭氧垂直探测仪仪器性能稳定, 通过对 SBUS 数据和 SBUV/2 数据 N 值及臭氧垂直廓线的对比, 发现两种数据具有较好的精度, 在大多数臭氧层, SBUS 廓线数据的平均相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内^[40]。

3.5 TRUTHS

TRUTHS 项目^[27]于 2002 年向欧空局 (ESA) 提交, 主张在轨建立可溯源到国际基本单位 (SI) 的高精度定标基准, 将地面可溯源至 SI 的传递链扩展到空间应用, 使其担当“空间计量实验

室”的角色。TRUTHS 的主要目标以高精度观测 10 年尺度的气候变化,且具有改善其它遥感仪器性能的能力,通过交叉定标使其它它们采集到更好的气候数据。

TRUTHS 系统^[41] 包括光谱定标单色仪 (SCM)、低温辐射计 (CSAR)、太阳光谱辐射监测仪 (SSIM)、偏振传递辐射计 (PTR) 和地球成像仪 (EI) 等。在轨定标系统包括光谱定标单色仪 (SCM)、低温辐射计 (CSAR) 和偏振传递辐射计 (PTR), CSAR 作为主基准是定标系统的核心。SCM 采用了 3 个双光栅单色仪,为 TRUTHS 提供单色光源,如图 13 所示。SCM 分别对 3 个不同的光谱区进行了优化,并将光栅叠放在一起以采用一个公用传动轴。从每个光栅色散出来的光谱辐射被耦合到一束光导纤维内,通过排列布置光纤,将光辐射从矩形狭缝转变为圆形,从而可利用单透镜将其准直为一近似平行的光束。只要保证光纤束的弯曲半径不发生明显的变化,光纤内沿光轴方向的透射能量就不会发生变化。光纤束

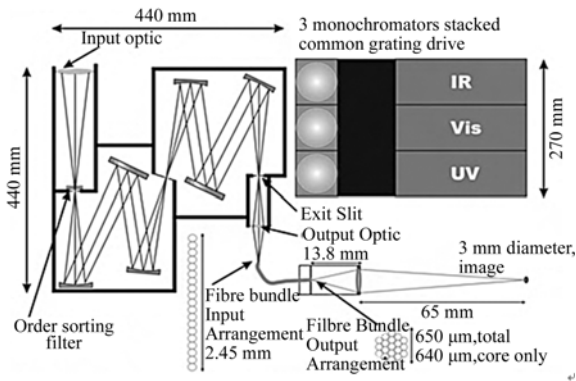


图 13 SCM 光路示意图

Fig. 13 Optical schematics of SCM

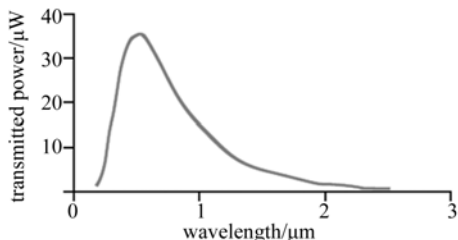


图 14 透过 SCM 和光纤的光谱辐射能量

Fig. 14 Spectral radiation power through SCM and fiber

末端输出的光辐射可以通过低温辐射计 (CSAR) 来测量,并用来校准其它仪器。

SCM 采用太阳光作为光源,其预期的光谱输出如图 14 所示 (带宽 0.5 nm 条件下)。该光谱与太阳直射相比明显偏小,因此 CSAR 中专门设计了具有较高响应度的腔体,确保测量单色仪的输出功率的不确定度小于 0.1%。

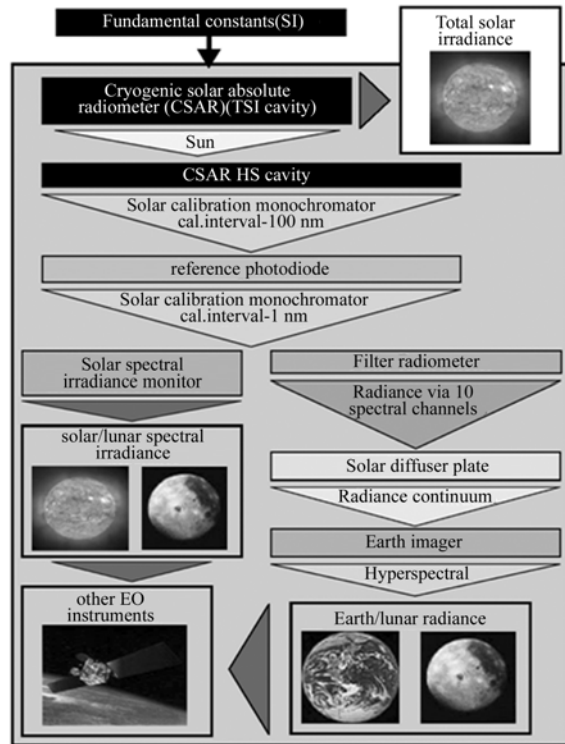


图 15 TRUTHS 的定标链路

Fig. 15 Calibration links of TRUTHS

TRUTHS 的定标传递链^[41] 如图 15 所示。由于短期内的太阳辐射比较稳定,且太阳光的光谱分布与地物目标的光谱分布一致,使太阳成为较理想的定标光源。TRUTHS 采用太阳作为光源,保证了定标源的稳定性。并且低温绝对辐射计测量的是 SCM 光纤输出端的光功率,其定标精度不受光纤光谱透过率及定标组件中光学系统透过率的影响。

TRUTHS 的定标传递链的优势在于低温绝对辐射计的使用,杜绝了定标传递链从地面到空间的中断,保证了定标的一致性。TRUTHS 所能达到的数据测量精度与目前其它遥感仪器的数据精度相比,可提高一个数量级,如表 2 所示。

表 2 TRUTHS 的数据精度和目前其它遥感仪器数据精度比较

Tab. 2 Comparison between precision of TRUTHS data and other remote sensor data

参数	地球辐亮度	太阳总辐照度	太阳光谱辐照度
光谱/ μm	0.32~2.45	0.2~35	0.2~2.5
光谱分辨率/nm	5~10	-	0.5~10
TRUTHS 精度(2σ)/%	0.3	0.02	0.2
其它精度/%	2~5	0.2	~2

3.6 航天单色仪的发展趋势

从现有航天遥感仪器可以看出,单色仪用于遥感光谱测量已趋于成熟,但其测量精度还不能满足要求,绝对定标精度还有待进一步提高。在单色仪用作光谱定标装置方面,MODIS 可以作为成功案例,相信以后会有更多的遥感仪器采用该方案,以提高其有效载荷的光谱定标精度。

单色仪和低温辐射计相结合用作绝对定标系统的组件,已成为单色仪重要的发展方向。由于地球气候变化、空间遥感探测等研究的进一步深入,要求不同遥感器间的测量数据具有更高的一致性,目前的测量数据已不能满足日益增长的精度要求,迫切需要高精度的在轨绝对定标。

综上所述,采用由太阳作为光源、航天单色仪作为星上光谱定标装置和单色光源,结合低温绝对辐射计作为主基准,建立在轨光谱辐射定标基准,实现高精度可溯源至国际基本单位(SI)的绝对定标,对光学遥感仪器的紫外、可见、近红外等各通道进行全系统、全口径的绝对定标,是今后航天单色仪乃至星上在轨定标系统的最具潜力的发展方向之一。

4 适合我国的星载遥感器绝对辐射定标系统方案

目前在轨辐射定标的精度不能满足我国日益增长的应用需求,迫切需要建立一套全新的星载遥感器绝对辐射定标系统方案,如图 16 所示。采用太阳作为光源,航天单色仪作为星上单色光谱光源,结合低温绝对辐射计可建立在轨光谱辐射基准,并由滤光片传递辐射计将其转化为太阳漫

反射板的光谱亮度基准,可以方便地实现其它在轨遥感仪器的光谱定标和绝对辐射定标。且滤光片传递辐射计还可以对地面辐射定标场进行光谱辐亮度定标,从而实现对其他星上遥感仪器的高精度交叉比对定标。

由于采用低温绝对辐射计作为定标系统的主基准,消除了以往光源(如卤钨灯)受空间辐射、老化等带来的绝对定标误差,又由于航天单色仪采用太阳作为光源,太阳光的光谱分布与地物目标的光谱分布一致,同时结合单色仪的高光谱分辨率特性,因而可以连续扫描得到精确的遥感仪器各光谱通道的响应函数(包含光谱响应和辐射响应),从而大大提高星载遥感器的绝对辐射定标精度。

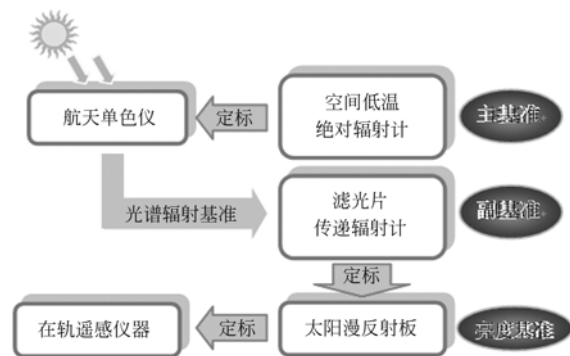


图 16 星载遥感器绝对辐射定标系统方案

Fig. 16 Scheme of absolute radiation calibration system of spaceborne remote sensing instruments

5 结 论

本文从航天单色仪的工作原理、结构型式、定标方法等出发,结合现有搭载单色仪的航天遥感仪器,如 MODIS、TRUTHS 等,对其在辐射测量、光谱定标和绝对定标方面的应用现状进行了说明,并讨论了未来航天单色仪的发展趋势和应用前景,指出采用太阳光源、航天单色仪和低温绝对辐射计相结合的绝对定标系统为最具潜力的发展方向之一。未来十年内,努力发展空间应用技术,有望形成适合我国工程应用的星载遥感器绝对辐射定标系统。

在气候变化研究、月球探测、火星探测等航天任务中,航天单色仪仍面临着诸多挑战,如更宽的

光谱范围、空间环境下更高的仪器可靠性等。应把握航天单色仪的发展趋势、突破和掌握核心关

键技术,提高空间遥感器绝对定标技术和水平,以满足科学研究、国防安全的需要。

参考文献:

- [1] 苏嘉,张寅超,赵日峰,等. 双光栅纯转动拉曼测温激光雷达单色仪的光学设计[J]. 中国激光,2007,34(1):92-96.
SU J, ZHANG Y CH, ZHAO Y F, *et al.*. Optical design of double grating monochromator of a pure rotational Raman-Lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 92-96. (in Chinese)
- [2] 胡秀清,张里阳,郑照军,等. FY-3A中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标[J]. 光学精密工程,2010,18(9):1973-1980.
HU X Q, ZHANG L Y, ZHENG ZH J, *et al.*. FY-3A multi-detector radiometric calibration for infrared band of medium resolution spectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1973-1980. (in Chinese)
- [3] 吴迪,黄凌霞,何勇,等. 作物和杂草叶片的可见-红外反射光谱特性[J]. 光学学报,2008,28(8):1618-1622.
WU D, HUANG L X, HE Y, *et al.*. Visible-near infrared reflection spectroscopy for crop-weed discrimination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1618-1622. (in Chinese)
- [4] 杨跃忠,曹文熙,孙兆华,等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. 光学学报,2009,29(1):102-107.
YANG Y ZH, CAO W X, SUN ZH H, *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 102-107. (in Chinese)
- [5] 李刚,赵静,李家星,等. 可见-近红外反射光谱用于疾病快速筛查[J]. 光学学报,2011,31(3):0317001.
LI G, ZHAO J, LI J X, *et al.*. Visible-infrared reflectance spectroscopy applied in rapid screen of diseases [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0317001. (in Chinese)
- [6] 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):2347-2354.
ZHENG Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2347-2354. (in Chinese)
- [7] 刘倩倩,郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. 中国光学,2012,5(6):566-577.
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)
- [8] 韩启金,傅俏燕,张学文,等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标[J]. 光学精密工程,2014,22(7):1707-1714.
HAN Q J, FU Q Y, ZHANG X W, *et al.*. High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1707-1714. (in Chinese)
- [9] 金辉,姜会林,郑玉权,等. 高光谱遥感器的光谱定标[J]. 发光学报,2013,34(2):235-239.
JIN H, JIANG H L, ZHENG Y Q, *et al.*. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(2): 235-239. (in Chinese)
- [10] 黄富祥,黄煜,LAWRENCE E F,等. 紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)辐射定标和反演臭氧垂直廓线验证[J]. 气象科技进展,2013,3(4):108-115.
HUANG F X, HUANG Y, LAWRENCE E F, *et al.*. Radiometric calibration of the solar backscatter ultraviolet sounder and validation of ozone profile retrievals [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 108-115. (in Chinese)
- [11] THOMAS G C, ROBERT O G, MICHAEL L. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [C]. *SPIE*, 1990, 1298: 37-49.
- [12] JERRY Z, DANIEL G, ROBERT M, *et al.*. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 2004, 5425: 182-188.
- [13] LUSHALAN L, PETER J, DARREL G, *et al.*. Performance characterization of the Hyperion imaging spectrometer instrument [C]. *SPIE*, 2004, 4135: 264-275.
- [14] AMOLD G T, FITZGERALD M F, GRANT P S, *et al.*. MODIS airborne simulator radiometric cali-

- bration[C]. *SPIE*, 1996. 2820: 56-66.
- [15] 齐向东, 撒芑芑, 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*, 2010, 19(12): 2870-2876.
- QI X D, HAN P P, PAN M ZH, *et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 19(12): 2870-2876.
- [16] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展[J]. *遥感信息*, 2010, 4: 117-128.
- GAO H L, GU X F, YU T, *et al.*. The Research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 4: 117-128. (in Chinese)
- [17] WERI J H, KRUIZING A B, OLI J C, *et al.*. Calibration aspects of remote sensing spaceborne spectrometers [J]. *SPIE*, 1996, 2820: 126-137.
- [18] CUTTER M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.*. Integration & testing of the Compact High-Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS) [J]. *SPIE*, 1999, 3753: 180-191.
- [19] BAUDIN G, MATTHEWS S, BESSUDO R, *et al.*. Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) calibration sequence [J]. *SPIE*, 1996, 2819: 141-240.
- [20] DELWART S, HUOT J P, BOURG L. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT[J]. *SPIE*, 2003, 4881: 337- 344.
- [21] LABANDIBAR J Y, BAUDIN G, BAILLION Y. ALCATEL-SPACE in hyper /multispectral earth observation programs, from MERIS to SPECTRA [J]. *SPIE*, 2004, 5234: 232-242.
- [22] BLECHINGER F, CHARLTON D E, DAVANCENS R, *et al.*. High resolution imaging spectrometer(HRIS): optics, focal plane and calibration [J]. *SPIE*, 1993, 1937: 207-224.
- [23] BARRY P S, SHEPANSKI J, SEGAL C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system [J]. *SPIE*, 2002, 4480: 231-235.
- [24] IMMERMANN G, NEUMANN A, SHIMNICH H, *et al.*. MOS /PRIROD-an imaging VIS /NIR spectrometer for ocean remote sensing [J]. *SPIE*, 1993, 1937: 201-206.
- [25] THUILLIER G, HERSE M, SIMON P. Observation of the UV solar irradiance between 200 and 350 nm during the ATLAS-1 mission by the SOLSPEC spectrometer [J]. *Solar Physics*, 1997, 171: 283-302.
- [26] TAEYOUNG C, XIONG X X, WANG ZH P, *et al.*. Terra and aqua MODIS on-orbit spectral characterization for reflective solar bands[J]. *SPIE*, 2013, 8724:87240Y.
- [27] FOX N, AIKEN J, BARNETT J J, *et al.*. Traceable radiometry underpinning terrestrial and helio studies (TRUTHS) [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32, 2253-2261.
- [28] 曹海霞, 吴娜, 冯树龙, 等. 单色仪与成像光谱仪的交互光谱定标[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(10): 2585-2591.
- CAO H X, WU N, FENG SH L, *et al.*. Cross-spectral calibration for monochromator and imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2585-2591. (in Chinese)
- [29] 刘恩超, 郑小兵, 李新, 等. 绝对光谱辐照度仪的波长定标[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(3): 608-615.
- LIU E CH, ZHENG X B, LI X, *et al.*. Wavelength calibration of absolute irradiance spectral-radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 608-615. (in Chinese)
- [30] 张军强, 邵建兵, 颜昌翔, 等. 成像光谱仪星上光谱定标的数据处理[J]. *中国光学*, 2011, 4(2): 175-181.
- ZHANG J Q, SHAO J B, YAN CH X, *et al.*. Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 175-181. (in Chinese)
- [31] OUYANG H, DAI C, HUANG B, *et al.*. Effect of slit widths on wavelength calibration of a Czerny-Turner double monochromator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8201:820122.
- [32] 王鹏程, 原遵东, 于帆, 等. 光栅单色仪的波长标定实验研究[J]. *计量学报*, 2007, 28(3A): 169-173.
- WANG P CH, YUAN Z D, YU F, *et al.*. Experiment and research of calibrating the wavelength of the grating monochromator [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, 28(3A): 169-173. (in Chinese)
- [33] 陈健, 王伟国, 高慧斌, 等. 紫外探测器的辐射定标及标准传递[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 423-429.
- CHEN J, WANG W G, GAO H B, *et al.*. Radia-

- tion calibration for UV detectors and standard transferring [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 423-429. (in Chinese)
- [34] XIONG X, CHIANG K, ESPOSITO J, *et al.*. MODIS on-orbit calibration and characterization [J]. *Metrologia*, 2003, 40: S89-S92.
- [35] THUILLIER G, HERSE M, LABS D, *et al.*. The solar spectral irradiance from 200 to 2 400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions [J]. *Solar Physics*, 2003, 214(1): 1-22.
- [36] HARDER J W, THUILLIER G, RICHARD E C. The solar spectrum: comparison with recent observations [J]. *Solar Phys.*, 2010, 263: 3-24.
- [37] HUANG L K, DELAND M T, Taylor S L, *et al.*. Characterization of in band stray light in SBUV/2 instruments [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7:267-278.
- [38] 王淑荣,李福田,宋克非. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪 [J]. *光学学报*, 2009, 22(9): 2590-2593.
WANG SH R, LI F T, SONG K F, *et al.*. Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 22(9): 2590-2593. (in Chinese)
- [39] 李占峰,王淑荣,黄煜,等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2013, 32(2): 0228002.
LI ZH F, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Research on high-accuracy in-flight spectral calibration of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 32(2): 0228002. (in Chinese)
- [40] 陶玉龙,陈圣波,张恭正,等. FY-3SBUV 数据和 NOAA SBUV_2 数据对比研究 [J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(5): 1118-1123.
TAO Y L, CHEN SH B, ZHANG G ZH, *et al.*. Comparison between FY-3 SBUV Data and NOAA SBUV /2 Data [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(5): 1118-1123. (in Chinese)
- [41] NIGEL F, ANDREA K W, WERNEER S, *et al.*. Accurate radiometry from space an essential tool for climate studies [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2011, 369, 4028-4063.

作者简介:



夏志伟(1982—),男,河南永城人,硕士,助理研究员,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计、辐射定标方面的研究。E-mail: xiazhw@126.com



王玉鹏(1972—),男,山东沂水人,博士,副研究员,主要从事空间遥感技术、精密太阳跟踪、太阳光谱及总辐射测量等方面的研究。E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)