

文章编号 1004-924X(2015)07-1807-06

# 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器 辐射定标基准传递链路

王玉鹏<sup>1</sup>, 胡秀清<sup>2</sup>, 王红睿<sup>1</sup>, 叶新<sup>1</sup>, 方伟<sup>1\*</sup>

- (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. 国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室, 北京 100081)

**摘要:**分析了现行光学遥感仪器辐射定标方法的局限性,以满足定量化遥感的精度及多数据融合比对研究的需求。设计了以空间低温辐射计为初级辐射基准,以太阳为光源,包括太阳单色仪、太阳光谱仪、传递辐射计、太阳漫反射板等组件在内的可在轨溯源的光学遥感仪器辐射定标基准传递链路。首先以低温辐射计和太阳光源建立的光谱辐射基准定标传递辐射计和太阳光谱仪;然后利用传递辐射计定标太阳漫反射板,建立对地光谱辐亮度基准;继而将基准传递至地球光谱成像仪作为对地观测标准,从而实现对其它卫星光学遥感器的交叉定标。对光学遥感仪器辐射定标基准传递链路各个环节的分析显示,辐射定标基准传递链路的测量相对不确定度为 0.75%。结果表明,以此辐射基准传递链路构建覆盖我国空天一体的遥感定标网络可为建立平行于地面基准体系的空间数据质量保障体系奠定技术基础。

**关键词:**空间辐射度学;光学遥感仪器;遥感定标;基准溯源

**中图分类号:**TP732 ;P414.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1807

## Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands

WANG Yu-peng<sup>1</sup>, HU Xiu-qing<sup>2</sup>, WANG Hong-rui<sup>1</sup>, YE Xin<sup>1</sup>, FANG Wei<sup>1\*</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,  
National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)*

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

**Abstract:** The weakness of current radiometric calibration methods for optical remote sensing instruments was analyzed to satisfy the precision needs of quantitative remote sensing and the data fusion coming from multi satellites. A standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability was designed by taking a space cryogenic radiometer as a primary system for radiometric reference and the sun as the light source, which includes a solar monochromator, a transfer radiometer, a solar spectral irradiance monitor and a solar diffuser, etc. In radiometric calibra-

**收稿日期:**2015-03-05; **修订日期:**2015-04-20.

**基金项目:**国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA123703);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前沿领域创新基金资助项目(No. Y3CX1SS14A)

tion, the transfer radiometer and the solar spectral irradiance monitor were calibrated firstly by using spectral radiometric standards provided by the solar monochromator. And then the solar diffuser was calibrated by using the transfer radiometer. The radiometric standard was transferred to an imaging spectrometer for an earth observing standard, so that the radiometric standard could be used for inter calibration of other remote sensing instruments on other satellites. The analysis on the radiometric calibration for the standard transfer chain shows that the uncertainty of optical sensing instruments is 0.75%. It demonstrates that the proposed method is helpful for constructing calibration networks of remote sensing covering China in space and air and provides a technology foundation for developing space data quality assurance system parallel to the ground system of primary radiometric standards.

**Key words:** radiometry in space; optical remote sensing instrument; remote sensing calibration; traceable benchmark

## 1 引言

辐射定标是空间对地观测光学遥感仪器研制中的关键环节,是获取高质量对地遥感数据的重要前提。通过辐射定标,可建立仪器辐射量输入与仪器电子学系统输出之间的数学关系。以各类空间光谱成像仪为例,单机辐射定标的目标是量化光谱成像仪入瞳处辐射亮度与其焦平面光电探测器输出数字信号之间的数学函数,进而明确地球景物辐射亮度与光学遥感仪器图像数码输出之间的函数关系<sup>[1-3]</sup>。

全面、高质量的仪器辐射定标数据,特别是星上辐射定标数据是卫星对地遥感观测资料得以高效应用的基础。具有里程碑意义的 TERRA 卫星中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)在这方面取得了令人瞩目的成绩。作为一台对地观测光学遥感仪器,MODIS/TERRA 能在可见到近红外的光谱范围内,每 2 天将地球表面扫描测量一次,实现全球陆地、海洋和大气的综合探测,生成 40 多种数据产品,从而开启了人类对地遥感观测的新时代<sup>[4-5]</sup>,其中相对成熟的 MODIS 星上辐射定标技术对保障其遥感数据质量功不可没。MODIS 星上辐射定标系统(on-board calibrators)研制人员借鉴了其此前多个同类光学仪器的经验,构建了较为完善的星上辐射定标设备,实现了精度较高的仪器在轨辐射定标。后期相当多的同类光学遥感仪器的设计均参考了 MODIS 星上辐射定标方

案。MODIS 星上辐射定标系统包括太阳漫反射板,太阳漫反射板稳定性监测器,V 型槽黑体和光谱辐射定标装置等单元。其中太阳漫反射板和太阳漫反射板稳定性监视器用于太阳反射谱段的辐射定标,黑体用于热发射谱段的辐射定标。太阳漫反射板稳定性监视器用于监视星上太阳漫反射板双向反射率的衰减。为了减小对同一地球目标的重访时间间隔,MODIS 除了在上行星 TERRA 卫星上运行外,还在每日地方时下午过境美国本土的下午星 AQUA 上对地观测。同系列中分辨率成像光谱仪 MODIS/TERRA 与 MODIS/AQUA 的分轨运行加快了遥感数据的更新频率,每天至少可提供 2 次白昼地球观测数据和 2 次夜间地球观测数据,这为研究全球范围的水循环与能量循环、大气过程和海洋过程等自然现象的短期及长期变化提供了数据支持。然而,中分辨率成像光谱仪 MODIS/TERRA 与 MODIS/AQUA 对同一目标的遥感数据存在一定差异,某些情况下它们之间的光谱辐亮度偏差较大。这种同系列空间光学遥感仪器之间的测量数据偏差甚至可能湮没地物目标在可见光-近红外波段反射率的微小变化,从而增大了多源遥感数据融合工作的难度和复杂度,限制了基于多源数据的高级遥感数据产品生成<sup>[6-7]</sup>。

现有的星上辐射定标系统缺少在轨溯源能力是导致这种遥感数据偏差出现在同系列多个空间光学遥感仪器之间的重要原因。在太阳反射波段的辐射定标中,大多数对地观测光学遥感仪器缺少可溯源至国际单位制的辐射基准。一旦对地观

测光学遥感仪器入轨,单机辐射定标的辐射标度传递链就会产生断裂。天上辐射定标系统中太阳漫反射板、标准灯和其他光电元件的衰减和变化将导致同系列多个空间光学遥感仪器之间的对地遥感数据之间存在一定的数据偏差。现有的对地观测空间光学遥感仪器的绝对辐射定标精度为3%~5%,难以满足资源监测、气候变化等某些领域定量遥感的应用要求,特别是气候研究领域的时间跨度长、精度要求高、数量大的科学数据需求<sup>[1,8]</sup>。

为了满足精细化定量对地遥感数据的紧迫需求,达到在太阳反射光谱段优于1%的绝对辐射定标精度的目标,实现可在轨直接溯源至国际基本单位的高精度绝对辐射定标,本文针对空间对地光学遥感仪器,设计了以空间低温绝对辐射计为初级辐射基准、以太阳为外部定标光源的辐射定标传递链路。

## 2 在轨辐射基准

为了在单机辐射定标中获取已知的仪器入瞳处辐射亮度,某些对地观测空间光学遥感仪器认为太阳辐射已知,通过双向反射率可监测的太阳漫射板来获取稳定的辐射输入;某些对地观测空间光学遥感仪器则将在地面经过精确标定的辐射源(标准灯、积分球光源等)集成在遥感器中获取稳定的辐射输入。但这些辐射定标方法通常都缺少高精度的辐射基准,由于在空间环境下的材料衰减或器件变化等原因,辐射定标的不确定度、稳定性等都不令人满意。目前,对地观测空间光学遥感仪器的辐射定标,多选择黑体、常温辐射计和低温辐射计作为辐射基准<sup>[9-11]</sup>。

黑体是一种重要的辐射标准。中分辨率成像光谱仪 MODIS 使用 V 型槽黑体为辐射基准进行热辐射谱段的单机辐射定标。绝对黑体的热辐射严格遵守普朗克定律。只要黑体的温度已知,其发出的光谱辐射亮度就可由普朗克公式精确描述。20 世纪 70 年代之前,国际计量局和各国国家计量实验室几乎都以辐射源-黑体作为辐射标准。现在空腔黑体可做到温度  $T=3\ 500\ \text{K}$  的高温,黑度达 0.999 99 以上。腔型黑体辐射标准可溯源至国际基本单位的温度测量程度。这种辐射

标准的不确定度主要取决于黑体的温度测量程度。对于太阳反射光谱段的绝对辐射定标,该辐射标准的不确定度为 1%~3%,达到 1% 的绝对辐射定标精度要求存在较大困难。

从 20 世纪 60 年代开始,电定标绝对辐射计开始逐渐替代黑体作为辐射计量标准。同黑体辐射源为标准相反,电定标绝对辐射计以接受辐射的探测器为标准来确定辐射标度。电定标绝对辐射计将空腔黑体作为辐射接收器使用,以电定标的方法标定接受辐射的功率。以绝对辐射计作为辐射标准,可溯源至 SI 基本单位 I 的电流安培(A),辐射功率从电流单位(电流、电压)导出。常温绝对辐射计的辐射测量<sup>[6-10]</sup>不确定度达到了 0.1%,同黑体辐射源相比,精度提高了一个量级(10 倍)。但是常温绝对辐射计的响应度很低,仅能测量 0.2~50  $\mu\text{m}$  宽带波段内的总辐照度,不能进行光谱辐照度测量。

低温辐射计是在液氮温度(4 K)下工作的电校准绝对辐射计。同常温绝对辐射计相比较,由于改善了噪声、热漂移、欧姆功率损耗和光电等效性,提高了热传导性能和黑体腔的吸收率,故其不确定度显著降低。另外,激光技术的发展也提供了单色性好、功率大、各波长连续可调的激光光源。目前,利用低温辐射计、可调谐稳功率激光等建立的新的 SI 辐射基准,其不确定度在总辐射和光谱辐射上都达到了 0.01%~0.02%。低温辐射计已经成为各国标准实验室最高光辐射计量基准<sup>[8]</sup>。

结合空间对地光学遥感仪器在太阳反射光谱段 1% 的绝对辐射定标精度目标,以空间低温绝对辐射计为辐射基准设计了可在轨溯源至国际基本单位的辐射定标基准传递链路。

## 3 辐射定标基准传递链路设计

可在轨溯源至国际基本单位的辐射定标基准传递链路如图 1 所示。作为辐射基准的空间低温绝对辐射计可将光辐射功率溯源至国际基本单位电流 I,通过对太阳单色仪输出单色光功率进行绝对定标,得到以功率响应的光谱辐射基准,以此为辐射标度定标传递辐射计和积分球太阳光谱仪,获得 300~2 500 nm 光谱辐射传递标准;然后利用传递辐射计定标太阳漫反射板,建立对地光

谱辐亮度基准,继而将基准传递至地球光谱成像仪,作为对地观测标准,由此实现对地面定标场地及其它卫星光学遥感器的交叉定标<sup>[11]</sup>。

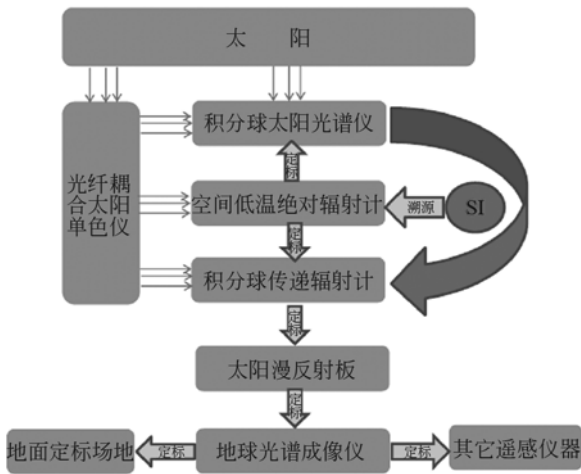


图 1 基准溯源及传递链路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traceability chain

#### 4 辐射基准传递链路不确定度评估

实现辐射定标基准传递链路的在轨辐射定标系统包括空间低温绝对辐射计、光纤耦合太阳单色仪、积分球传递辐射计、积分球太阳光谱仪、对地光谱成像仪、太阳漫射板等。

按照 ISO1993(E)《测量不确定度表示指南》的方法,对光辐射功率或辐照度测量不确定度的评定过程包含由随机效应引入的不确定度分量和由系统效应引入的不确定度分量。两类分量均可采用 A 类或 B 类评定方法。其中由随机效应引入的不确定度分量拟采用 A 类评定方法,即对一个稳定的光源进行多次测量,或用精度更高的探测器与低温辐射计同时测量同一光源,两测量值作比值,考察多次测量的重复性。

##### 4.1 空间低温绝对辐射计

空间低温绝对辐射计采用腔型热电绝对探测器,利用光电等效性原理,用可精确测量的电参量标定光辐射参量,是空间辐射基准系统的主基准探测器,是系统核心组成部分。空间低温辐射计采用 20 K 的机械制冷,并以太阳为光源。它的设计以两种类型的黑体腔为主,总辐照度黑体腔和光谱黑体腔,总辐照度黑体腔的太阳总辐照度的测量不确定度为 0.03%。光谱黑体腔则能实现

10  $\mu\text{W}$ ~10 mW 能量级上 0.2%~0.5% 的功率绝对测量,两种腔动态范围重叠。以太阳光源为光源的在轨辐射定标中,将以总辐照度黑体腔标定光谱黑体腔。

空间低温绝对辐射计的测量过程借鉴了常温辐射计的光电等效电替代定标过程。辐射测量经过光加热阶段和电定标阶段完成。在光加热过程中,黑体腔吸收光功率达到平衡温度;电定标过程中则通过控制加热丝电功率令黑体腔恢复平衡温度。光功率测量结果除了考虑电功率和腔温测量对其精度的影响之外,还需要考虑黑体腔吸收率、窗口透过率、光电不等效系数的影响,不确定度设计值如表 1 所示。当测量到电功率  $P_e$  产生的腔体温度变化与被测光功率基本相同,被测的光功率  $P_L$  为:

$$P_L = \frac{NP_e}{TA}, \quad (1)$$

其中  $T$  为光学窗口透过率,  $N$  为光电不等效系数,  $A$  为黑体腔吸收率。

认为上述各项仪器参数在辐照度电定标或光谱辐照度电定标过程中不相关,空间低温绝对辐射计的测量不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_{c1}^2 + u_{c2}^2 + u_{c3}^2 + u_{c4}^2}. \quad (2)$$

表 1 空间低温辐射计不确定度

Tab. 1 Uncertainty of space cryogenic radiometer		
参数	数值/%	评估方法
腔体吸收率不确定度 $u_{c1}$	0.10	标准板比对测量
光电不等效系数不确定度 $u_{c2}$	0.05	腔温光电响应度测量
加热丝电功率不确定度 $u_{c3}$	0.09	温度传感器读数,包括测量两阶段腔温误差修正
窗口透过率不确定度 $u_{c4}$	0.17	单色光扫描测量和模型计算
低温辐射计不确定度 $u_c$	0.22	不确定度合成

##### 4.2 太阳单色仪

太阳单色仪为基准系统提供适合空间低温绝对辐射计动态范围的单色太阳光源。单色仪部分由干涉滤光片和切换机构组成,以太阳光为光源,

经会聚光学系统聚焦后入射到窄带滤光片上,滤光后形成单色光,再将会聚后的单色光耦合到光纤内进行传输并输出。该装置可提高入射单色光功率水平。在定标过程中通过空间低温辐射计对其输出单色光辐射功率进行定标,作为定标初级基准,太阳单色仪不影响传递链精度。

#### 4.3 传递辐射计

通过空间低温绝对辐射计建立的辐射基准为功率响应的基准,而作为对地观测基准遥感器的地球光谱成像仪则采用亮度响应的定标,积分球传递辐射计(ISTR)作为标准传递探测器,将高精度的绝对测量太阳光谱辐射基准通过太阳漫射板建立亮度响应的光谱辐射基准。积分球传递辐射计由积分球、光电探测器和入口光阑等组成。光电探测器采用Si和InGaAs探测器,响应快、线性好,可实现宽谱段范围快速响应度定标,视场角设计与地球光谱成像仪相匹配,通过与地球成像仪光谱匹配将部分通道辐射基准外推到地球成像仪全部光谱通道。

传递辐射计光谱响应函数为:

$$R(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{E(\lambda)}, \quad (3)$$

其中: $P(\lambda)$ 为定标传递辐射计的光功率, $E(\lambda)$ 为定标时传递辐射计的输出响应:

$$E(\lambda) = I \cdot A \cdot D, \quad (4)$$

其中: $I$ 为传递辐射计探测器噪声、 $A$ 为传递辐射计放大电路噪声, $D$ 为数字化电路系统噪声。

传递辐射计光谱响应函数的测量不确定度为:

$$u_R = \sqrt{u_E^2 + u_I^2}, \quad (5)$$

其中: $u_I$ 为功率测量不确定度, $u_E$ 为传递辐射计电子学系统测量不确定度。光电流信号的噪声相对比值为探测器测量功率值与噪声等效功率的比值,探测器的暗电流一般约为200 pA。光电流噪声以最大值乘以3的噪声水平估计,其不确定度估计为0.10%。后端的放大过程和模数转换过程引入的噪声估计为0.11%,传递辐射计被定标后,使用其测量漫反射板反射光的光通量为:

$$\Phi(\lambda) = E(\lambda) \cdot R(\lambda). \quad (6)$$

传递辐射计光通量测量不确定度为:

$$u_\Phi = \sqrt{u_E^2 + u_R^2}. \quad (7)$$

#### 4.4 太阳漫反射板

太阳漫反射板是重要的定标部件,空间低温绝对辐射计与单色太阳光源建立的高精度、功率响应的绝对辐射基准通过太阳漫射板建立亮度响应的光谱辐射基准,通过积分球传递辐射计对太阳漫反射板的观测定标出漫反射板的光谱反射特性。由于空间环境的影响,太阳漫射板的反射特性发生衰减,但每间隔一定时间对漫射板进行绝对定标,因而太阳漫反射板的性能变化不会影响基准传递精度。该环节太阳漫反射板引入的不确定度优于0.2%。

#### 4.5 积分球太阳光谱仪

考虑到在轨定标一个周期所用的时间应尽量短,同时太阳单色光能量要满足空间低温绝对辐射计光谱腔温响应,以空间低温绝对辐射计定标积分球传递辐射计时,只能以一定的波长间隔在选定波长上进行定标,积分球太阳光谱仪可实现高分辨率、高精度的太阳光谱辐射绝对测量,建立太阳光谱绝对响应曲线,该数据可用于积分球传递辐射计光谱响应曲线内插值,从而建立平滑、高精度的传递辐射计光谱响应曲线。该环节引入的不确定度为 $u_{sp}$ ,优于0.2%。

#### 4.6 绝对辐射定标不确定度

辐射定标基准传递链路将应用到对地观测的辐射定标,地球光谱成像仪以辐射基准传递作为主要应用目的,光谱分辨率、地面分辨率、信噪比等指标与其他高光谱气体探测载荷的需求不同,根据实际应用需求进行设计,同时要考虑与积分球传递辐射计的匹配。成像光谱仪与多光谱传递辐射计通过交替观测漫反射板,实现了其光谱辐射定标。经定标后的光谱成像仪,可作为对地观测标准仪器,通过对地观测目标如沙漠、场地或月球等进行观测定标,从而实现基准的传递应用。地球成像光谱仪的测量不确定度 $u_i$ 为0.50%。

对地光学遥感仪器辐射定标基准传递链路的测量不确定度为:

$$u_{chain} = \sqrt{u_c^2 + u_R^2 + u_\Phi^2 + u_d^2 + u_{sp}^2 + u_i^2}. \quad (8)$$

结合表2中的辐射基准传递链路各环节的不确定度分析结果,对地光学遥感仪器辐射定标基准传递链路的测量不确定度在太阳反射光谱段可达到优于1%的设计目标。

表 2 对地光学遥感仪器辐射定标基准传递链路不确定度分析

Tab.2 Uncertainty evaluation of standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments

项目	测量相对 不确定度/%
低温辐射计光功率定标	0.22
传递辐射计光谱响应函数测量	0.27
传递辐射计光通量	0.31
太阳漫反射板	0.20
积分球太阳光谱仪	0.20
地球成像光谱仪	0.50
其余因素(太阳指向、太阳单色仪等)	0.10
辐射定标基准传递链路	0.75

### 参考文献:

- [1] WIELICKI, B A, YOUNG D F, MLYNCZAK M G, *et al.*. Achieving climate change absolute accuracy in orbit [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(10):1519-1539.
- [2] HELDER D, S KARKI, BHATT R, *et al.*. Radiometric calibration of the Landsat MSS sensor series [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2012, 50(6): 2380-2399.
- [3] HELDER D, MALLA R, METTLER R, *et al.*. Landsat-4 thematic mapper calibration update [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2012, 50(6): 2400-2408.
- [4] XIONG X X, WENNY B N, WU A SH, *et al.*. Aqua MODIS thermal emissive band on-orbit calibration, characterization, and performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 803-814.
- [5] LIANG X M, IGNATOV A. AVHRR, MODIS, and VIIRS radiometric stability and consistency in SST bands [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(6):3161-3171.
- [6] SUN L, HU X, GUO M, *et al.*. Post-launch calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2013, 51(3):1383-1392.

### 作者简介:



王玉鹏(1972—),男,山东沂水人,博士,副研究员,1994年于吉林工业大学获学士学位,2002年于甘肃工业大学获硕士学位,2008年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要研究方向:空间辐射遥感技术、精密仪器研制、太阳精密跟踪技术、太阳辐射测量与定标。E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn

## 5 结 论

本文结合光学、辐射度学、遥感等多学科理论与方法,根据优于1%的在轨可溯源辐射定标精度要求,提出了以空间低温辐射计作为在轨辐射基准,以相对稳定的太阳为光源的卫星对地光学遥感仪器辐射定标方法,并设计了辐射定标基准传递链路,其不确定度为0.75%。以此基准传递链路构建覆盖地面、天空一体乃至全球化遥感定标网络,将极大地提高对地观测精度,同时节约卫星资源,从根本上建立平行于地面基准体系的空间数据质量保障体系,发展我国自主的卫星对地光学遥感仪器辐射定标业务。

- [7] HU X, SUN L, LIU J, *et al.*. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2012, 50(12):4915-4928.
- [8] FOX N, ANDREA K, SCHMUTZ W, *et al.*. Accurate radiometry from space: an essential tool for climate studies [J]. *Philosophical transactions of the Royal society, Series A, Mathematical, Physical, and engineering sciences*, 2011, 369: 4028-4063.
- [9] 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.
- [9] 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)
- [10] ZHANG Y, ZHENG ZH J, HU X Q, *et al.* Lake Qinghai: Chinese site for radiometric calibration of satellite infrared remote sensors [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 4(4): 315-324.
- [11] 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.
- [11] LI N, ZHANG Y F, LIU CH X, *et al.*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2054-2060. (in Chinese)



方伟(1965—),女,辽宁朝阳人,博士,研究员,博士生导师,1987年于山东大学获得学士学位,1997年于长春光机所获得硕士学位,2005年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事辐射计量及空间光学遥感仪器研究。E-mail:fangw@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)