

成像光谱仪辐射定标概览

王立朋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 成像光谱仪相关技术研究一直是遥感技术研究前沿, 成像光谱仪完善的辐射定标是完成各种高质量量化产品应用的基础。本文介绍了成像光谱仪辐射定标原理和辐射定标方法, 并对成像光谱仪辐射定标技术进行了展望。

关键词: 辐射定标; 成像光谱仪

中图分类号: O432 文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112812.0073

Overview of Radiometric Calibration of Imaging Spectrometer

WANG Li-peng

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

Abstract: The technique and research relating to the imaging spectrometer are hotpots of the technique of the remote sensing. The radiometric calibration of imaging spectrometer is the basis of getting the quantified data of high quality. The principle and the methods of radiometric calibration are introduced in this article. The direction of the development of the radiometric calibration is forecast.

Keywords: radiometric calibration; imaging spectrometer

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.60538020)

1 引言

成像光谱仪辐射定标的任务是在超光谱成像仪的图谱数据与地面景物光谱辐亮度之间建立定量关系。辐射定标分为相对定标和绝对定标：相对定标是成像光谱仪不同观测时刻不同探测像元仪器的校准，以提高图像的品质和均匀性，相对定标的精度主要决定于标准传递仪器的不确定度、仪器本身的信噪比等；绝对定标是实现成像光谱仪输出相对量到绝对物理量的转换，绝对定标的精度受辐射标准本身的不确定度和相对定标精度的影响。成像光谱仪的辐射定标包括3部分：实验室定标、星上定标和场地替代定标^[1]。其中实验室定标的主要任务是确定成像光谱仪各通道的响应并评估不确定度；星上定标则长期检测成像光谱仪响应的衰变，并可以进行响应均匀性校正；场地替代定标可以验证成像光谱仪的辐射响应并进行多个遥感器的交叉定标。实验室辐射定标是整个辐射定标环节的基础，本文主要介绍成像光谱仪实验室辐射定标的原理和方法，对各种方法进行比较，并对辐射定标发展趋势进行了分析。

2 原理和方法

成像光谱仪辐射定标利用辐射参考标准，通过遥感仪器对辐射参考标准的观测，建立遥感仪器输出图谱数据同传感器接收的入瞳辐射亮度 $L(\lambda)$ 之间的换算关系。通常遥感仪器的这种定标换算关系设计为线性^[2]，即

$$L(\lambda_{ij}) = a_0 + a_1 C(i, j) \quad (1)$$

式中 a_0 、 a_1 为辐射定标系数， a_0 为成像光谱仪暗偏置，即没有信号输入时成像光谱仪采集到的信号值。 $L(\lambda_{ij})$ 为成像光谱仪第 i 行、第 j 个探测器像元对应的光谱辐亮度； $C(\lambda_{ij})$ 为成像光谱仪第 i 行、第 j 个探测器像元输出的数值。辐射定标就是测定出每个探测像元的 a_0 、 a_1 值，实际观测时测量得到 $C(\lambda_{ij})$ 即可计算得到 $L(\lambda_{ij})$ 。

辐射定标系统的建立就是辐射标准的传递及标准的再现、传递载体的选择和研制技术、比对测量等，简而言之，就是对辐射标准不确定度和辐射传递链长度进行控制。

3 辐射定标方法

成像光谱仪辐射定标的一般方法是使用辐照度标准灯和漫反射板组成光谱辐亮度标准定标光谱辐射计，然后使用光谱辐射计定标大积分球，最后使用大积分球定标成像光谱仪。该方法的优点是积分球可以提供大面积无偏振均匀光源，可以实现对成像光谱仪的全视场、全口径的辐射定标。缺点是设备庞大、复杂，并且由于采用的辐射计量标准（辐照度标准灯）的不确定度为3%~5%^[3]，使整个定标方法的定标精度在5%~8%之间，定标精度不高。遥感器AVIRIS^[4]、APEX^[5]、COMPASS^[6]使用该方法进行辐射定标。对于特殊的光学系统TMA，为了实现全视场和全口径的辐射定标，需要改变积分球出口形状，把圆形出口变成长方形进行定标^[7]。

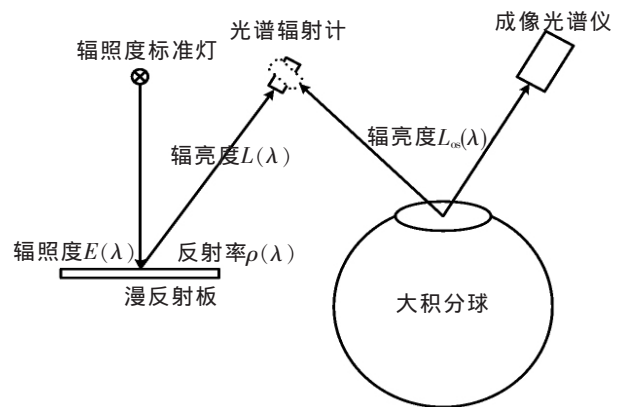


图1 辐照度标准灯作为辐射计量标准的积分球定标法示意图

绝对低温辐射计采用低温超导技术^[8-9]，使辐射测量的精度大大提高，基于探测器的定标方法^[10-11]初级标准的不确定度远远小于基于辐射源的定标方法。溯源于绝对低温辐射计的标准探测器利用多个探测器组成光陷阱，使入射的光经过多次反射后只有很少部分的光反射出光陷阱，实现对辐射的高精度测

量,测量的不确定度可达 0.2%, 远远高于辐照度标准灯的不确定度, 而且该方法可以实现“辐亮度→辐亮度”的比对, 缩减了辐射传递链的长度, 提高了成像光谱仪的辐射定标精度。假定光谱辐射计和成像光谱仪的信噪比 (SNR) 都为 100, 积分球光源不确定度为 2%, 则合成不确定度为 1.48%。缺点是标准探测器溯源的绝对低温辐射计价格昂贵, 维护费用也很高。

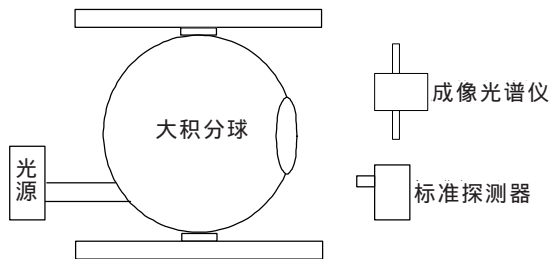


图2 标准探测器作为计量标准的积分球定标法

另外, 使用漫反射板代替上面方法中的大积分球, 同样使用标准探测器作为传递辐射计, 可以简单方便地实现成像光谱仪的辐射定标, 并且可以达到或超过传统辐射定标方法。地球观测 1 号上的 Hyperion 就采用该方法进行定标^[12], 辐射定标中标准探测器测量光谱辐亮度示意图如图 3 所示。漫反射板光谱辐亮度 L 由图中所示的测量功率 Φ 、与滤光片后的精确孔径 S 和相应立体角 Ω 通过计算得到, $L = \Phi / (S\Omega)$ 。利用该方法对成像光谱仪进行辐射定标存在的问题除了价格外, 还有可见光范围内标准探测器是由 3 片或多片硅光电二极管构成光陷阱对光谱

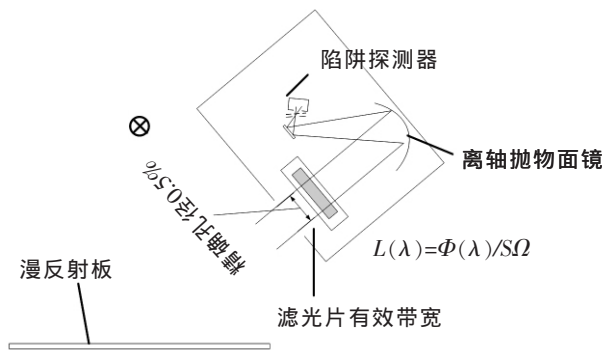


图3 标准探测器测量漫反射板亮度示意图

功率进行准确测量的装置, 如果要测量光谱辐照度或光谱辐亮度, 就需要在它的前边放置窄带干涉滤光片并精确测量标准探测器前的精确孔径或立体角, 滤光片的标定、孔径和立体角的测量精度都是影响最终定标结果的因素。

太阳作为定标源的辐射定标方法^[13-14]具有以下几个优点: (a) 定标源就是实际使用光源, 避免了石英卤钨灯与太阳色温不同, 石英卤钨灯在蓝光和紫外波段输出明显小于太阳; (b) 经过大气校正和照射角校正, 太阳在全球范围内的光谱绝对输出是相同的; (c) 校正了日地距离后, 太阳在很大程度上在可见到红外光谱范围内的输出是稳定的。利用太阳作为定标源的野外定标示意图如图 4 (a) 所示, 使用太阳辐射计测量太阳光谱辐照度, 经漫反射板得到光谱辐亮度, 成像光谱仪观察漫反射板, 通过成

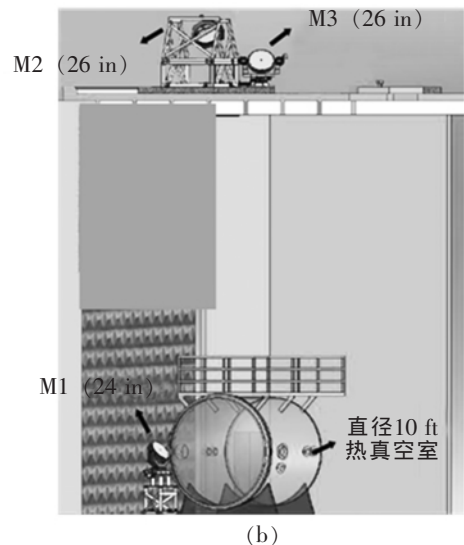
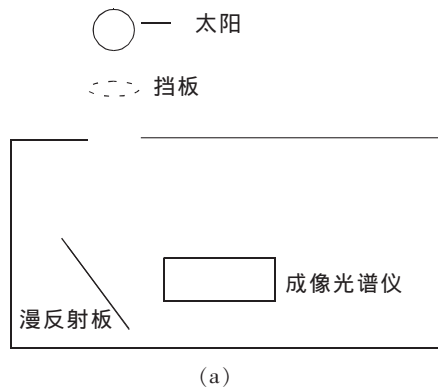


图4 使用太阳作为定标辐射源的辐射定标方法

像光谱仪输出图谱数据与入射光谱辐亮度对比得到定标系数。测量过程中天空散射光对结果产生很大影响,需通过使用挡板去除。这种定标方法的缺点是受大气影响较大,需精确测定大气透过率。

类似的方法是设计太阳反射装置将太阳光引入到实验室的热真空室中^[15],再使用定标好的光谱辐射计定标入射的太阳光,然后对成像光谱仪定标,太阳反射装置如图4(b)所示,其中M1、M2和M3为将太阳光反射进热真空室的反射镜。

4 结 论

提高成像光谱仪辐射定标精度的途径是减小定标过程中辐射源的不确定度和缩短辐射传递链的长度。采用标准探测器作为传递探测器对成像光谱仪进行定标,既减小了定标过程中辐射源的不确定度,又缩短了辐射传递链的长度,是今后成像光谱仪辐射定标的重要方法。利用太阳作为定标源的方法也是未来定标成像光谱仪的重要手段,尤其是利用太阳反射装置对仪器进行定标。

参考文献

- [1] 李照洲, 郑小兵, 唐伶俐, 等. 光学有效载荷高精度绝对辐射定标技术研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 581-588.
- [2] 崔敦杰. 成像光谱仪的定标[J]. 遥感技术与应用, 1996, 11(3): 56-64.
- [3] 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.
- [4] Chrien T G, Green R O. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer AVIRIS[J]. *SPIE*, 1990, 1298: 37-49.
- [5] Schaepman E M, Vos De Lieve, Itten I K. APEX-airborne PRISM experiment: hyperspectral radiometric performance analysis for the simulation of the future ESA land surface processes earth explorer mission[J]. *SPIE*, 1998, 3438: 253-262.
- [6] Simi G C. New procedures for the calibration of COMPASS [J]. *SPIE*, 2004, 5425: 189-196.
- [7] 任建伟, 刘则洵, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
- [8] Larason C T, Bruce S S. *NIST Special Publication 250-41*[M]. Gaithersburg: US Dept. of Commerce, 1998: 25-29.
- [9] 杨华元, 崔敦杰, 任建伟, 等. 基于探测器的成像光谱仪绝对辐射定标方法[J]. 计量学报, 1998, 19(2): 123-128.
- [10] Jerzy P. Optical radiation trap detectors as transfer standards in radiometry[J]. *SPIE*, 1999, 3730: 174-177.
- [11] Jarecke P, Yokoyama K. Radiometric calibration transfer chain from primary standards to the end-to-end hyperion sensor[J]. *SPIE*, 2004, 4135: 254-263.
- [12] Anderson N, Biggar S, Thome K, *et al.* Solar radiation-based calibration of laboratory grade radiometers[J]. *SPIE*, 2007, 6677: 66770X.
- [13] Kuester A M, Thome J K, Biggar F S, *et al.* Solar radiation based calibration of an airborne radiometer for vicarious calibration of earth observing sensors[J]. *SPIE*, 2002, 4483: 85-92.
- [14] Kuester A M, Czaplá-Myers J, Kaptchen P, *et al.* Development of a heliostat facility for solar-radiation-based calibration of earth observing sensors[J]. *SPIE*, 2008, 7081: 708119.

- [15] Czaplá-Myers J, Thome K, Anderson N, *et al.* Transmittance measurement of a heliostat facility used in the preflight radiometric calibration of Earth-observing sensors[J]. *SPIE*, 2009, 7452: 74520P.

作者简介: 王立朋 (1956-), 男, 吉林白山人, 高级工程师, 主要从事光机结构设计方面的研究。

E-mail: wlp200812@yahoo.cn

砷化镓太阳能电池有望打破能效记录

据美国物理学家组织网报道, 美国科学家通过与传统科学研究相反的新思路, 用砷化镓制造出了最高转化效率达28.4%的薄膜太阳能电池。该太阳能电池效率提升的关键并非是其吸收更多光子而是让其释放出更多光子, 未来用砷化镓制造的太阳能电池有望突破能效转化记录的极限。

过去, 科学家们都强调通过增加太阳能吸收光子的数量来提升太阳能电池的效率。太阳能电池吸收阳光后产生的电子必须被作为电提取出来, 而那些没有被足够快速提取出的电子会衰变并释放出自己的能量。

美国能源部下属的劳伦斯伯克利国家实验室科学家伊莱·亚布鲁诺维契领导的研究表明, 如果这些释放的能量作为外部荧光排放出来, 太阳能电池的输出电压就会提高。亚布鲁诺维契说: “我们的研究表明, 太阳能电池释放光子的效率越高, 其能源转化效率和提供的电压就越高。外部荧光是太阳能电池转化效率达到理论最大值——肖克莱·奎塞尔效率极限的关键。对于单p-n结太阳能电池来说, 这个最大值约为33.5%。”

参与研究人员欧文·米勒解释道, 在太阳能电池的开路环境中, 电子无处可去, 就会密密挤在一起, 理想的情况是, 它们排放出外部荧光, 精确地平衡入射的太阳光。

基于此, 由亚布鲁诺维契联合创办的阿尔塔设备公司使用亚布鲁诺维契早期研发的单晶薄膜技术——外延层剥离技术, 用砷化镓制造出了最高转化效率达28.4%的薄膜太阳能电池。这种电池不仅打破了此前的转化效率, 其成本也低于其他太阳能电池。目前效率最高的商用太阳能电池由单晶硅圆制造, 最高转化效率为23%。砷化镓虽然比硅贵, 但其收集光子的效率更高。就性价比而言, 砷化镓是制造太阳能电池的理想材料。

亚布鲁诺维契说: “太阳能电池的高性能与外部荧光有关, 我们的理论将显著改变未来太阳能电池的面貌, 我们将生活在一个太阳能电池非常便宜而且高效的世界中。”