

光学遥感器复杂环境下在轨辐射定标方法

包诗薇^{1,2}, 陈洪耀^{1*}, 张黎明¹, 黄文薪¹, 司孝龙¹, 张超³, 陈卓³¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³北京市遥感信息研究所, 北京 100192

摘要 基于反射率基法的大面积均匀场替代定标是目前常见的在轨定标方法, 国内均匀场数量少, 反射率偏低, 定标频次与精度都受到限制。灰阶靶标法已经实现了在均匀场环境下的高精度辐射定标, 但如何突破大面积均匀场单一环境背景限制实现高频次定标, 依然是当前的难题。在经典辐照度基法的基础上, 提出了适用于灰阶靶标的改进辐照度基法, 分析讨论了复杂环境下的在轨辐射定标方法, 并对某光学卫星开展了实验验证。结果表明, 提出的改进辐照度基法与反射率基法的最大差别小于 3.5%, 可实现复杂背景环境下的在轨辐射定标, 为我国光学卫星高频次、高精度在轨辐射定标提供了技术途径。

关键词 遥感; 辐射定标; 灰阶靶标; 辐照度基法

中图分类号 TP722.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0628001

On-Orbit Radiometric Calibration Method of Optical Remote Sensor in Complex Environment

Bao Shiwei^{1,2}, Chen Hongyao^{1*}, Zhang Liming¹, Huang Wenxin¹,
Si Xiaolong¹, Zhang Chao³, Chen Zhuo³¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;³Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China

Abstract Vicarious calibration in large and uniform sites by the reflectance-based method is currently a common on-orbit calibration method. The limited number and low reflectivity of uniform sites in China have restricted calibration frequency and accuracy. The gray-scale target method has achieved high-precision radiometric calibration in a uniform site, but how to break through the single environmental background of a large uniform site to achieve high-frequency calibration is still a tough problem. On the basis of the classic irradiance-based method, this paper proposes an improved irradiance-based method suitable for gray-scale targets, analyzes a method of on-orbit radiometric calibration in complex environments, and experimentally verifies the method on an optical satellite. The results show that the proposed improved irradiance-based method, with a maximum difference of less than 3.5% from the reflectance-based method, can achieve on-orbit radiometric calibration in a complex background. It provides a technical approach for high-frequency and high-precision on-orbit radiometric calibration of optical satellites in China.

Key words remote sensing; radiometric calibration; gray-scale target; irradiance-based method

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-08-20; 录用日期: 2021-08-31

通信作者: *hychen@aiofm.ac.cn

1 引言

辐射定标是实现遥感信息定量化应用的必要前提,从发射前的实验室定标到发射后的在轨定标贯穿了遥感的整个寿命周期。在轨定标主要包括了星上定标与场地替代定标等,场地替代定标的实现需要有均匀稳定的地物目标或人工靶标,20 世纪 80 年代 Slater 等提出的基于大面积均匀场的经典场地替代定标方法依然沿用至今。

场地替代定标方法分为反射率基法、辐照度基法与辐亮度基法,其中反射率基法是常用的方法,其通过卫星过顶时刻场地反射率与大气参数的测量,结合辐射传输模型计算得出卫星的入瞳辐亮度。这一方法的定标精度主要是由场地反射率的测量精度决定,但想要获得准确的场地反射率,除去仪器自身的不确定度以外,还需要考虑到测量过程中天气的变化、选取场地区域的均匀性等因素。考虑到测量场地与其在图像上的对应关系,在测量时还应在附近布设特征点,以便在定标时确定测量区域。Slater 等^[1]曾提到应在所选区域的拐角附近用大型防水油布标记,这有助于识别图像中的位置。但即使是这样,场地反射率的测量精度也只有 2.5% 左右。此外,大面积均匀场方法对场地要求较高、国内均匀场反射率偏低等因素,都是导致均匀场方法定标精度难以进一步提升的重要原因,该方法对于云等高反射率目标需要外推,会产生误差。

随着技术的发展,基于大面积均匀场的定标方法已经很难满足光学卫星遥感器高频次、高精度的定标需求,场地反射率的测量误差与大气带来的影响使得其定标精度难以突破 5%~8% 的限制。随着光学卫星遥感器空间分辨率的不断提高,在此基础上发展的人工靶标则有望突破这一限制,以多处布设人工靶标的方式,将定标背景扩展至多个区域甚至复杂环境下,实现覆盖光学遥感器的全动态范围的高频次场地替代定标^[2]。复杂环境下的辐射定标模型以及如何保持甚至提升定标精度成为了首要解决的难题。基于此,本文初步提出了一种复杂环境下的在轨辐射定标模型方法并以某光学卫星为研究对象,将本文方法与经典的大面积均匀场方法进行了比较验证,并对影响其定标精度的因素进行了讨论与分析。

2 在轨辐射定标模型

2.1 通用辐射定标模型

灰阶靶标法通过布设不同反射率的靶标为目

标,结合影像上靶标目标的计数值,以线性回归的方式计算定标系数。根据辐射传输方程,复杂环境下光学卫星遥感器入瞳的表观反射率可以表述为

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - s\rho_e} [\exp(-\tau/\mu_v)\rho_t + t_d(\theta_v)\rho_e] \right\}, \quad (1)$$

式中: ρ^* 为表观反射率; $T_g(\theta_s, \theta_v)$ 为气体吸收透过率; θ_s 和 θ_v 分别为太阳天顶角及观测天顶角; $T(\theta_s)$ 为太阳到地面的下行散射透过率; $\exp(-\tau/\mu_v)$ 为地面到卫星的上行直射透过率; μ_v 为观测天顶角余弦; $t_d(\theta_v)$ 为上行漫射透过率; s 为球面反照率; ρ_a 为大气程辐射; ρ_t 为目标反射率; ρ_e 为背景反射率。

理论上,在大面积均匀场方法中,目标反射率应与背景反射率一致,即 $\rho_t = \rho_e$ 。但考虑到场地均匀性、测量点与卫星实际观测影像的差距,实际上应是 $\rho_t \approx \rho_e$ 。这一近似也会为均匀场方法引入误差。在 6S 辐射传输模型中对这一部分提出了假设,认为当目标与背景反射率不一致时,(1)式中的背景反射率应为目标反射率与实际背景反射率综合作用的等效背景反射率,以权重因子 $F(r)$ 将等效环境反射率 $\langle \rho \rangle$ 表示为 $\langle \rho \rangle = F(r)\rho_t + [1 - F(r)]\rho_e$,其中 r 为目标半径。也就是说,即使将靶标目标置于均匀场背景下,在进行场地测量时,(1)式里的 ρ_e 也不能简单代入场地实测的背景反射率,而是一个受到目标反射率影响的、接近背景反射率的数值。

2.2 复杂环境下基于灰阶靶标的辐射定标模型

2.1 节从等效背景反射率误差对定标的影响入手,讨论靶标法的定标模型并进行验证。现基于(1)式提出以下三种模型:

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - s\langle \rho \rangle} [\exp(-\tau/\mu_v)\rho_t + t_d(\theta_v)\langle \rho \rangle] \right\}, \quad (2)$$

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - s\rho_e} [\exp(-\tau/\mu_v)\rho_t + t_d(\theta_v)\langle \rho \rangle] \right\}, \quad (3)$$

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - s\rho_e} [\exp(-\tau/\mu_v)\rho_t + t_d(\theta_v)\rho_e] \right\}. \quad (4)$$

上面三种模型分别有以下特点:

1) 模型 1[(2)式]代表的模型考虑背景反射率

误差分别对地面总辐照度(或下行总透过率)与上行漫射辐射的影响;

2) 模型 2[(3)式]代表的模型考虑背景反射率误差对上行漫射辐射的影响,认为其对地面总辐照度的影响可以忽略;

3) 模型 3[(4)式]代表的模型将背景反射率误差带来的影响完全忽略,此时(4)式与(1)式完全一致。

模型 1: 背景反射率误差对地面总辐照度的影响可以由简单的测量方法来检验,在同一天里布设的不同反射率灰阶靶标上分别测量地面总辐照度,所得值基本没有变化,故认为这一误差对地面反射率几乎没有影响。

模型 2: 将等效反射率公式代入(4)式,可得

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - s\rho_e} [\exp(-\tau/\mu_v) + F(r)t_d(\theta_v)]\rho_t + \frac{T(\theta_s)}{1 - s\rho_e} [1 - F(r)]t_d(\theta_v)\rho_e \right\}。 (5)$$

结合靶标线性回归的算法,邻近效应对定标的影响可看作是由环境函数所占比例 $\frac{F(r)t_d(\theta_v)}{\exp(-\tau/\mu_v) + F(r)t_d(\theta_v)}$ 决定。在天气较好即气溶胶光学厚度较小时,邻近效应对面积为 50 m × 50 m 以下靶标的影响不到 1/200^[3-5]。

由此得出结论,在天气较好的情况下,针对靶标法的定标模型可以采用反射率基法模型。但复杂环境下无法获取有效的等效背景反射率,这是反射率基法的定标频次无法提升的重要原因。Biggar 等^[6]提出了辐照度基法,将反射率基法公式改写为

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{\exp(-\tau/\mu_s)}{1 - \alpha_s} \rho (1 - \rho_s) \frac{\exp(-\tau/\mu_v)}{1 - \alpha_v} \right\}, (6)$$

式中: α_s 为太阳到地面方向的漫射-总辐射比; α_v 为地面到观测方向的漫射-总辐射比; μ_s 为太阳天顶角余弦。

考虑到灰阶靶标法具有线性回归的特点,灰阶靶标法具有将上行过程中的目标辐射与非目标辐射分离的优势,故该方法无需考虑上行过程,而只需考虑下行部分的漫射影响,基于此改进的半程辐照度基法的公式为

$$\rho^* = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{\exp(-\tau/\mu_s)}{1 - \alpha_s} [\exp(-\tau/\mu_v)\rho_t + t_d(\theta_v)\rho_e] \right\}。 (7)$$

改进后的辐照度基法无需再去计算观测天顶角下的漫射-总辐射比[以下简称漫总比(DGR)],可以直接基于对不同反射率的灰阶靶标进行线性回归后求得的斜率计算得到定标系数。将(7)式与定标模型相结合,则相机计数值(已扣除暗电流)与定标系数的关系表示为

$$D = A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \frac{\exp(-\tau/\mu_s)}{1 - \alpha_s} \times [\exp(-\tau/\mu_v)\rho_t + t_d(\theta_v)\rho_e] + \rho_a \right\}, (8)$$

式中: D 为相机计数值; E_s 为大气外太阳辐照度; A 为定标系数。以不同目标反射率与对应的相机计数值进行线性回归,则定标系数的计算公式为

$$A = \frac{K}{\frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \frac{\exp(-\tau/\mu_s)}{1 - \alpha_s} \exp(-\tau/\mu_v)\rho_t}, (9)$$

式中: K 为灰阶靶标线性回归的斜率。

这一方法相对于辐照度基法的区别在于其模型的适用性从单一的均匀场定标推广至任意铺设灰阶靶标的场景下,对定标背景不再有要求。但该方法的关键仍与辐照度基法一致,即如何实现漫总比的准确测量。

复杂环境定标与均匀场定标的区别主要在于其环境的复杂性导致了反射率基法的不适用,辐照度基法以实际测量的方式减小对辐射传输计算的依赖性,在此基础上的改进恰好可适用于复杂环境定标。6S 辐射传输模型的适用场景主要是均一大气下的简单环境,基于灰阶靶标法的复杂环境定标在大气上的影响主要体现在太阳-地面的下行阶段,由于环境具有复杂性,辐射传输的计算中下行总透射中的漫射与多次散射均会产生较大的误差,但总透过率与多次散射的比值已经由直射/(1-漫总比)这一比值所替代,故后文聚焦于漫总比测量,不再对大气影响单独进行讨论。

3 在轨辐射定标实验验证

3.1 实验基本情况

为验证改进的辐照度基法在复杂环境下的适用性,于 2020 年 8—9 月在敦煌与北京针对某光学卫星遥感器开展了灰阶靶标定标实验。其中敦煌场地位于中国遥感卫星辐射校正场,为典型的大面积均匀场环境,另外一个场地位于北京东南郊区,周围是村庄和农田,附近还有高速公路,背景环境较为复

杂。两地实验均铺设了超过 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ ^[7] 的 60%、40%、20% 与 5% 反射率的灰阶靶标, 计算时取影像上靶标位置中心 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 均值, 以消除相机的调制传递函数(MTF)带来的影响。分别于 2020 年 8 月 24 日在敦煌、9 月 2 日在北京进行成像。测量仪器使用美国 ASD 公司研制生产的 FieldSpec 可见-近红外光谱辐射计测量反射率、CE318 太阳辐射计测量大气参数, 两地的仪器经过了交叉比对验证, 以确保数据的可靠性。

3.2 同步测量数据

两次实验过顶前后测量的大气光学厚度如图 1、图 2 所示。

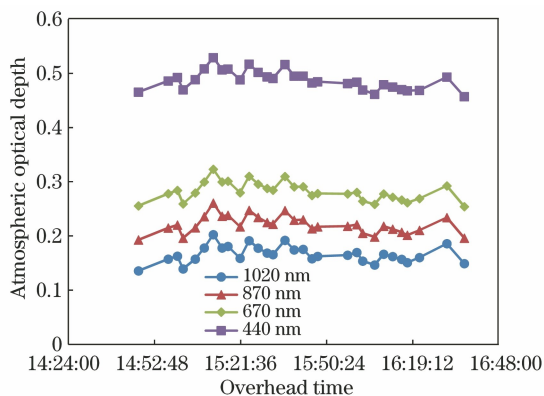


图 1 2020 年 8 月 24 日敦煌场地太阳辐射计测量的大气光学厚度(过顶时间为 15:49)

Fig. 1 Atmospheric optical thickness measured by solar radiometer at Dunhuang site on August 24, 2020 (overhead time is 15:49)

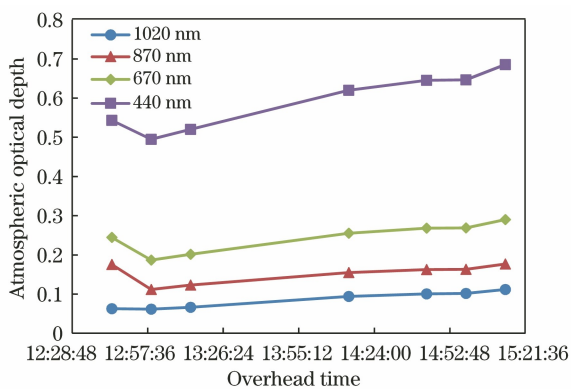


图 2 2020 年 9 月 2 日北京场地太阳辐射计测量的大气光学厚度(过顶时间为 14:11)

Fig. 2 Atmospheric optical thickness measured by solar radiometer at Beijing site on September 2, 2020 (overhead time is 14:11)

可以看到两次过顶前后天气都较为稳定, 计算出过顶附近 550 nm 的气溶胶光学厚度分别为 0.246(2020 年 8 月 24 日敦煌)和 0.272(2020 年 9

月 2 日北京)。结合太阳辐射计测量的 937 nm 水汽通道计算出水汽含量后, 将其输入到辐射传输模型, 计算出透过率等参数。

由相机影像及场地实测的计数值随靶标反射率的变化曲线如图 3、图 4 所示。

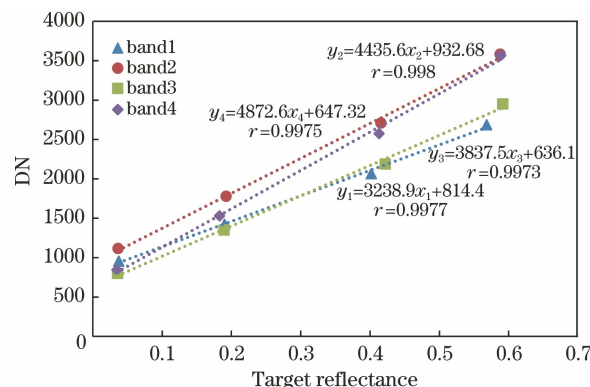


图 3 2020 年 8 月 24 日敦煌场地的计数值-靶标反射率拟合曲线

Fig. 3 Digital number-reflectance fitting curves of targets at Dunhuang site on August 24, 2020

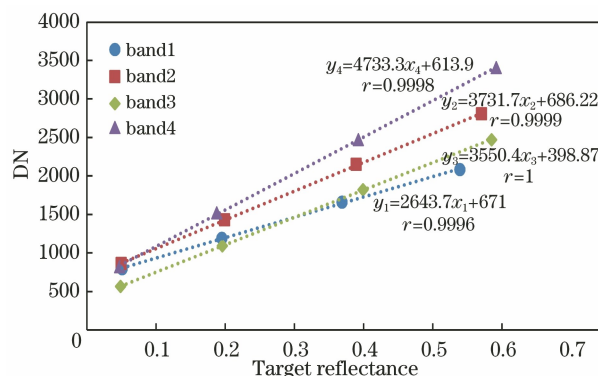


图 4 2020 年 9 月 2 日北京场地的计数值-靶标反射率拟合曲线

Fig. 4 Digital number-reflectance fitting curves of targets at Beijing site on September 2, 2020

至此, 结合场地实测的戈壁滩环境反射率, 即可计算出基于反射率基法模型的定标系数结果。但改进辐照度基法仍缺少漫总比的测量, 由于实验时遮挡法的测量误差较大, 考虑到辐射传输模型的误差主要来自对漫射部分的假设, 采用辐射传输模型计算的直射辐照度、场地测量地面总辐照度计算漫总比。

6S 辐射传输模型将太阳到地面的辐射分为三项: 直射、漫射与地气耦合。漫总比即为后两者占总辐射的比例。这三项中直射与漫射主要由 6S 辐射传输模型计算的直射、漫射透过率决定, 后者主要由环境反射率与球面反照率决定。因此认为在无云天气的均匀场背景下, 6S 辐射传输模型计算的漫总比

是可信的,取敦煌实验数据,将上述方法的计算结果与 6S 辐射传输模型计算的漫总比进行了比对,如图 5 所示,两者之间的绝对差值在 4% 以内。

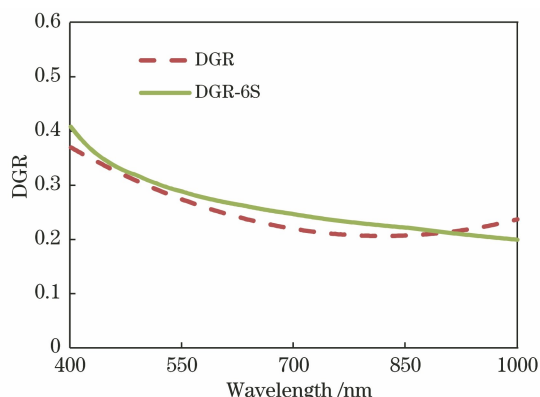


图 5 2020 年 8 月 24 日敦煌场地的漫总比比对

Fig. 5 DGR comparison at Dunhuang site on August 24, 2020

3.3 定标结果比对

基于敦煌实验数据,分别采用反射率基法与改进后的辐照度基法计算定标系数;基于北京实验数据,采用改进后的辐照度基法计算定标系数,以敦煌实验中反射率基法计算得到的定标系数为标准,来判断改进辐照度基法在不同环境下的可行性。计算的定标系数结果如表 1 所示。

表 1 是不同方法得到的定标系数比对。可以看出即使是在北京场地的复杂环境下,用改进辐照度基法计算得到的定标系数差别依然在 3.5% 内。

4 分析与讨论

传统的辐照度基法的优势在于通过在实验中增加漫总比测量,将反射率基法里的上下行总透过率改写为直射透过率与其所占比例的比值,无需再用

表 1 不同方法得到的定标系数比对

Table 1 Comparison of calibration coefficients obtained by different methods

Site	Date	Band	Calibration coefficient obtained by reflectance-based method	Calibration coefficient obtained by improved irradiance-based method	Relative deviation / %
Dunhuang	August 24, 2020	Band1	12.143	12.346	1.7
		Band2	16.586	16.943	2.1
		Band3	15.722	16.265	3.4
		Band4	26.487	27.129	2.4
Beijing	September 2, 2020	Band1	-	12.025	-1.0
		Band2	-	16.008	-3.5
		Band3	-	15.916	1.2
		Band4	-	26.941	1.7

辐射传输计算漫射透过率,这有效减弱了定标过程对辐射传输模型的依赖性。但应用该方法时,由于无法获取卫星观测天顶角对应的漫总比,需要在过顶当日进行持续测量,将数据内插或外推至观测天顶角对应的漫总比数值^[8],这一过程会产生计算误差,对天气及周围环境要求较高,改进的辐照度基法则更适合灰阶靶标定标方法。但无论是哪种方法,决定其精度的关键都在于测量的漫总比数据。

以辐射传输模型计算得到漫总比或者通过直接测量得到漫总比数据,得到漫总比数据的目的是结合测量的大气参数得到地面总辐照度,而后经过上行路径计算卫星入瞳处辐亮度。大气参数的测量可分为相对测量与绝对测量两类,相对测量是以参照标准板作基准的反射比传递测量,利用挡与不挡直射部分两种方式来测量天空总辐照度及漫射照度,绝对测量可用积分球或漫射屏法,将积分球或漫射

屏置于探测器前端,经绝对定标后可直接测得总辐照度,挡掉直射部分后可测得天空漫射照度^[9]。Leisso 等^[10]总结了天空辐照度的多种测量方法,主要有光谱辐射计结合参考板的遮挡测量方法、辐射传输模型结合实测的大气参数进行计算的方法,以及使用太阳辐射计测量天空分布的方法,他们认为由光谱辐射计测量的遮挡法是最为准确的,以其为标准对其他方法的结果进行修正。但实际上,遮挡法所用挡板往往偏大,导致漫总比的测量结果偏小,故仅以遮挡法结果为标准,对其不进行修正是不合适的。

CE318 太阳辐射计测量的直射透过率精度高,计算出的直射辐照度是可信的;光谱仪以标准板测量地面总辐照度,该方法易于实现,且不存在遮挡误差。将二者在气体吸收影响小的波段下得到的漫总比进行二次多项式拟合,得到的数据误差主要来源

于仪器响应度与参考板的双向反射分布函数的影响,将二者进行修正后可得到更高精度的漫总比数据。

5 结 论

分析了反射率基法、辐照度基法在不同环境下的适用性,基于此初步提出了一种基于复杂环境下的改进辐照度基法模型,并开展了外场实验验证。实验结果表明基于辐射传输模型计算出的直射辐照度、场地测量地面总辐照度来计算漫总比的方法较为准确,以此为基础的改进辐照度基法在复杂环境下的定标是可行的,所得结果与反射率基法所得结果的误差在 3.5% 以内。

常用的遮挡法测量漫总比时可以消除仪器响应度的影响,但遮挡板受到多种因素的影响,常常会导致测量结果偏小;积分球照度计的测量受到余弦误差等因素的干扰^[11];辐射传输模型由于云的存在,会影响计算精度。所提出的漫总比计算方法是基于辐射传输模型计算直射辐照度,相对于遮挡法更为准确,而光谱辐射计测量的地面总辐照度无需对漫射部分进行假设,将二者结合后计算得到的漫总比应较为准确。这一方法的缺点是仪器的绝对测量引入了响应度的误差。后续计划对仪器进行太阳定标或以连续测量的方式对遮挡法测得的直射部分进行修正,得到更为准确的漫总比参数,结合天空分布测量与标准参考板的双向反射分布函数修正,形成一套更为完善、更高精度的基于灰阶靶标的通用高频次定标方法。

参 考 文 献

- [1] Slater P N, Biggar S F, Thome K J, et al. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, 13(2): 349-359.
- [2] Chen H Y, Li S L, Si X L, et al. Multispectral imager vicarious radiometric calibration based on gray-scale tarps [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S1): 28-34.
陈洪耀, 李胜利, 司孝龙, 等. 多光谱相机基于灰阶靶标的在轨绝对辐射定标 [J]. *遥感学报*, 2012, 16(S1): 28-34.
- [3] Bao S W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Absolute radiometric calibration of optical remote sensor based on gray-scale targets method and reflectance inversion validation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0428001.
包诗薇, 陈洪耀, 张黎明, 等. 基于灰阶靶标的光学遥感器绝对辐射定标及反射率反演验证 [J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0428001.
- [4] Slater P N. Radiometric considerations in remote sensing [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(6): 997-1011.
- [5] Wang T, Zhou C J, Yi W N, et al. Improving quality of sub-meter satellite image based on atmospheric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1101002.
王涛, 周川杰, 易维宁, 等. 基于大气校正提升亚米级卫星影像质量 [J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1101002.
- [6] Biggar S F, Santer R P, Slater P N. Irradiance-based calibration of imaging sensors [C] // 10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, May 20-24, 1990, College Park, MD, USA. New York: IEEE Press, 1990: 507-510.
- [7] Richter R. On the in-flight absolute calibration of high spatial resolution spaceborne sensors using small ground targets [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2827-2833.
- [8] Hu X Q, Zhang Y X, Qiu K M. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(6): 458-464.
胡秀清, 张玉香, 邱康睦. 采用辐照度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标 [J]. *遥感学报*, 2003, 7(6): 458-464.
- [9] Zhang L M, Wu H Y, Qiao Y L. The integrating sphere method for measuring optical atmosphere parameter [J]. *Geology of Anhui*, 1997, 7(1): 16-20.
张黎明, 吴浩宇, 乔延利. 天空辐照度测量的积分球方法 [J]. *安徽地质*, 1997, 7(1): 16-20.
- [10] Leisso N, Czapla-Myers J. Comparison of diffuse sky irradiance calculation methods and effect on surface reflectance retrieval from an automated radiometric calibration test site [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8153: 815310.
- [11] Liu Z H, Luo D G, Zhang Y J, et al. Cosine error influence of ground-based solar spectral irradiance meter and its correction method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1012003.
刘振海, 骆冬根, 张运杰, 等. 地基太阳光谱辐照度计的余弦误差影响及其校正方法 [J]. *光子学报*, 2018, 47(10): 1012003.