

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

包诗薇^{1,2*}, 陈洪耀^{1**}, 张黎明¹, 王先华¹

¹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

摘要 光学遥感器在轨绝对辐射定标精度决定着量化应用的广度和深度, 反射率法、辐照度法以及辐亮度法等基于大面积均匀场的在轨替代定标发挥着重要作用, 但由于存在场地数量有限、定标频次低、场地反射率低以及单点定标无法实现全动态范围定标的问题, 定标精度限制在 5%~8% 之间。光学遥感器空间分辨率的提高, 使得基于光谱平坦性好、朗伯性好的灰阶靶标的绝对辐射定标成为可能。本文研究了基于灰阶靶标的定标方法的原理、定标流程及影响因素, 并在此基础上提出了简化辐射传输计算的方法。考虑到高分辨多光谱相机响应线性及暗电流等的影响, 本文采用带偏置的一次函数响应模型, 对某多光谱相机进行了三次试验, 求出了定标增益与偏置, 定标不确定度优于 5%。利用铺设的彩色靶标进行了反射率反演验证, 结果显示, 在 5%~70% 的反射率内, 绝对差值不到 0.01。所提绝对辐射定标方法可以实现光学卫星遥感器大动态范围的绝对辐射定标, 解决了在响应低端定标精度普遍较低的问题。

关键词 遥感; 辐射定标; 灰阶靶标; 反射率基法

中图分类号 TP722.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0428001

Absolute Radiometric Calibration of Optical Remote Sensor Based on Gray-Scale Targets Method and Reflectance Inversion Validation

Bao Shiwei^{1,2*}, Chen Hongyao^{1**}, Zhang Liming¹, Wang Xianhua¹

¹Key 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

Abstract The accuracy of on-orbit absolute radiometric calibration of optical remote sensors directly affects the breadth and depth of quantitative applications, and thus the on-orbit vicarious calibration of the reflectance-based, irradiance-based, and radiance-based methods based on large and uniform sites plays an important role. However, due to a limited number of sites, low calibration frequency, low site reflectance, and single-point calibration cannot achieve full dynamic range calibration, the calibration accuracy is limited to 5%–8%. The improvement of the spatial resolution of optical remote sensors makes it possible for the targets-based absolute radiometric calibration with good spectral flatness and Lambert property. In this paper, the calibration principle, process and influencing factors of the gray-scale targets method are studied, and a simplified method for radiative transfer calculation is proposed. Furthermore, considering the response nonlinearity and dark current of high-resolution multispectral cameras, we apply the first-order function response model with bias to test a multispectral camera three time and obtain the calibration gain and bias, with the calibration uncertainty being better than 5%. In addition, the reflectance inversion validation is carried out on the laid color targets, and the results show that the absolute difference within 5%–70% reflectance is less than 0.01. In conclusion, the method proposed in this paper can

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-09-24; 录用日期: 2020-10-09

* E-mail: 973131953@qq.com; ** E-mail: hychen@aiofm.ac.cn

realize the absolute radiometric calibration of optical satellite remote sensors in a large dynamic range and solve the common problem that the accuracy of radiometric calibration is generally not high in low-end quantitative applications.

Key words remote sensing; radiometric calibration; gray-scale targets; reflectance-based method

OCIS codes 280.4788; 110.4234; 040.1490; 030.5620

1 引言

对地观测光学遥感用于获取诸如地球表面或天空被观测目标的辐射信息,包括被观测目标的辐射响应特性(辐射、反射、透射)、空间位置(数量、尺寸、分布)、光谱成分、时间变化以及偏振特性等,据此可解译或反演目标的本征属性^[1]。辐射定标是实现遥感信息量化的关键技术之一。

光学遥感器绝对辐射定标包括发射前的实验室定标、发射后的在轨定标。在轨定标方法主要包括场地替代定标、星上定标等方法。以美国亚利桑那大学光学科学中心 Slater 教授为代表的一批科学家提出了利用地球表面大面积均匀稳定的地物目标来实现现在轨卫星遥感器辐射校正的大面积均匀场定标方法。这些场地足够大、均一、无云,而且可以很好地了解地面特性,因此这些场地可以被用来作为辐射亮度和反射率定标的参考目标。然而,随着有效载荷数量增加,现有定标场地数量不足,难以满足基于大面积均匀场的场地定标方法对定标时效性的要求,且现有场地的辐射特性单一,难以满足载荷差异性的定标要求。光学遥感器空间分辨率的提高,使得基于光谱平坦、空间均匀、具有近似朗伯体特性的人工靶标的高精度、高频次在轨绝对辐射定标成为可能^[2-5]。灰阶靶标法在大面积均匀场的基础上进行了改进,通过铺设不同反射率的人工靶标,实现了多点反射率的定标,突破了场地的限制,但同时也引入了环境的影响。因此,本文对基于大面积均匀场和基于灰阶靶标的场地定标方法进行了对比,着重讨论了环境对靶标法定标精度带来的影响。

场地定标常用的方法有三种:反射率基法、辐照度基法与辐亮度基法。反射率基法依赖于场地反射率的精确测量,其测量精度直接决定了最终的整体精度。但在测量过程中,辐射计通道的带外响应、参考板区域的视场角、测量过程中存在的云,以及辐射计本身对测量区域产生的阴影均会导致反射率的测量结果出现差异^[6]。

本文以反射率基法为基础,结合辐射传输模型,对基于大面积均匀场的场地定标方法与基于灰阶靶标的场地定标方法进行对比,用试验数据具体比较

分析二者的区别,并在此基础上提出了简化辐射传输计算的方法;然后采用带偏置的一次函数响应模型计算得到了定标系数及偏置,并以反射率反演的方法对定标结果进行了验证。

2 原理方法

2.1 经典在轨辐射定标理论

根据辐射传输模型,卫星传感器入瞳处的辐射信息主要由大气程辐射、目标反射辐射与环境辐射三部分构成,如图 1 所示。

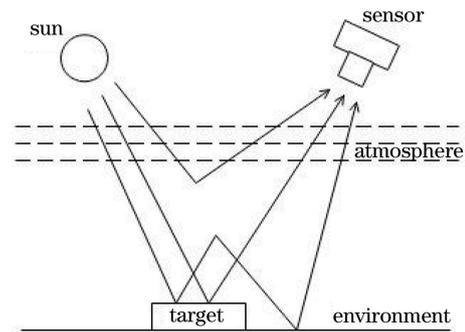


图 1 太阳辐射-目标-传感器相互作用示意图

Fig. 1 Schematic of sun, target and sensor's reciprocity

假设目标是朗伯体,当大气水平均一变化时,卫星入瞳处的表现反射率为

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu_s E_s}, \quad (1)$$

式中: L 为测量的卫星入瞳辐亮度; E_s 为大气顶层的太阳辐照度; $\mu_s = \cos\theta_s$, θ_s 为太阳天顶角。

传感器入瞳处的表现反射率可以表示为

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) = T_g(\theta_s, \theta_v) \left[\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{\rho}{1 - \rho S} T(\theta_s) T(\theta_v) \right], \quad (2)$$

式中: $T_g(\theta_s, \theta_v)$ 为气体吸收透过率; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v)$ 为大气程辐射反射率; S 为球面反照率; $T(\theta_s) = \exp(-\tau/\mu_s) + t_d(\theta_s)$ 为下行散射透过率,其中 $\exp(-\tau/\mu_s)$ 为下行直射透过率, $t_d(\theta_s)$ 为下行漫射透过率; $T(\theta_v) = \exp(\tau/\mu_v) + t_d(\theta_v)$ 为上行散射透过率,其中 $\exp(-\tau/\mu_v)$ 为上行直射透过率, $t_d(\theta_v)$ 为上行漫射透过率。

当遥感器对地观测时,有

$$D = AL, \quad (3)$$

式中: A 为定标系数; D 为扣除暗电流后的相机计数数值(DN)。因此,结合(1)、(3)式,可以得到均匀场方法的定标公式为

$$D_{\text{site}} = A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \times \left[\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho(M) \rangle S} T(\theta_v) \rho \right]. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,大面积均匀场方法以场地测量反射率与辐射传输计算为主,测量方式较为简便,但其对场地面积、场地反射率的测量精度要求较高,且过分依赖于辐射传输计算结果,该结果对定标精度的影响较大。在此基础上提出的灰阶靶标法则有所改进,通过在均匀场铺设不同反射率的灰阶靶标,以数据拟合的方法分离目标辐射与非目标辐射,有效减少了建立辐射传输模型的假设条件,并降低了

对反射率测量精度的要求。但这种方法会因目标反射率与环境反射率不一致而引入新的误差项(2.3节会详细介绍)。

2.2 基于灰阶靶标的简化辐射传输计算的理论

2.1 节提到,大面积均匀场方法结合辐射传输计算与场地反射率测量计算得到卫星入瞳处的辐亮度,然后通过单点定标的方式计算出定标系数。但在实际情况下,除去反射率测量误差与辐射传输模型的精度误差外,还存在相机响应模型误差(包括相机响应线性、相对定标未扣尽的暗电流及杂散光等)。考虑到这部分的影响,本文引入带偏置的一次函数响应模型,将定标公式改写为

$$D - D_{\text{offset}} = AL, \quad (5)$$

式中: D_{offset} 为相机响应模型误差引入的偏置。同时,相对于大面积均匀场方法来说,灰阶靶标法由于铺设了与背景反射率不一致的靶标,在进行表观反射率的计算时,需要将(2)式改写为

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_t(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho(M) \rangle S} [\rho_t \exp(-\tau/\mu_v) + \langle \rho(M) \rangle t_d(\theta_v)] \right\}, \quad (6)$$

式中: ρ_t 为目标反射率; $\langle \rho(M) \rangle$ 为等效环境反射率,即目标与背景相互作用后的环境反射率。通过对目标进行线性回归得到了目标反射率-图像计数值的拟合曲线,结合(5)、(6)两式可知曲线的斜率与截距分别为

$$K = A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho(M) \rangle S} \exp(-\tau/\mu_v), \quad (7)$$

$$b = D_{\text{offset}} + A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \times \left[\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho(M) \rangle S} \langle \rho(M) \rangle t_d(\theta_v) \right]. \quad (8)$$

可以看出,灰阶靶标法的计算公式将目标辐射与非目标辐射完全分离为斜率与截距两部分。用斜率部分计算定标系数,不但排除了大气程辐射与环境辐射引起的误差,还排除了相机响应模型引入的稳定误差。但以斜率计算定标系数成立的一个重要前提是,需要将靶标反射率不一致引起的地气耦合辐射视为常数,下节将对此进行详细分析。

2.3 调制传递函数的影响及模拟计算

人工铺设的灰阶靶标相对于均匀场来说,可视为小目标,因此在计算时必须考虑其边缘处受

到的调制传递函数(MTF)的影响。Richter^[7]提出,在考虑相机点扩散函数(PSF)影响的情况下,表观辐亮度可表示为

$$L(x, y) = L_p + \frac{E_g}{\pi} \tau_{\text{dir}} \rho_g + \frac{E_g}{\pi} \tau_{\text{dir}} \rho_t \iint_{\text{target}} \text{PSF}(x', y') dx' dy' + \frac{E_g}{\pi} \tau_{\text{dir}} \rho_b \iint_{\text{localbackground}} \text{PSF}(x', y') dx' dy'. \quad (9)$$

据此,可将相机 PSF 的影响看作是加在各部分的权重因子。以某一像素为中心,计算不同像素范围内的权重因子,得出的结论是:当像素范围取大于 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 时,在中间 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 区域内,相机 PSF 的影响可以忽略不计。因此,在定标时铺设大于 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 的目标,即可取中间 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的均值作为目标的 DN 值。

除去相机自身的 MTF 外,大气 MTF 同样会对灰阶靶标定标方法产生影响。邻近效应是由背景反射辐射经过多次大气散射后进入遥感器入瞳引起的图像边缘模糊,通常采用邻近效应的校正来消除大气 MTF 的影响。这一部分影响也正是(6)式中地气耦合部分的影响。在天气条件较好的情况下(440 nm 处的总光学厚度为 0.3),邻近效应可能存

在,但很难检测到^[8]。

本文提出了一种以辐射传输公式为出发点,对灰阶靶标进行邻近效应评估的方法。上文提到,在 6S 辐射传输模型中,当目标与背景反射率不一致时,(6)式成立,且其中提到公式中环境辐射的反射率 $\langle\rho(M)\rangle$ 不再是单一的背景反射率,而是受到目标与环境邻近效应影响的等效环境反射率,即

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) = T_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle\rho(M)\rangle S} [\exp(-\tau/\mu_v) + F(r)t_d(\theta_v)] \rho_t + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle\rho(M)\rangle S} [1 - F(r)] t_d(\theta_v) \rho_e \right\} \quad (11)$$

由于靶标法已经通过线性回归的方式分离出目标辐射,因此,邻近效应的影响反映在目标反射率前面的系数 $\exp(-\tau/\mu_v) + F(r)t_d(\theta_v)$ 上,可以用 $F(r)$ 所在项的比例 $\frac{F(r)t_d(\theta_v)}{\exp(-\tau/\mu_v) + F(r)t_d(\theta_v)}$ 衡量这部分邻近效应的影响。

除此之外,考虑到不同反射率靶标的铺设方式,以每一反射率靶标为研究目标,则周围靶标铺设及背景环境对其均有不同程度的影响。假设以某一靶标中心为原点,以(10)式为出发点,将邻近靶标所在区域的环境反射率替换为靶标反射率,即可将(10)式改写为

$$\langle\rho(M)\rangle = F(r)\rho_t + \sum_{i=1}^n F_i'(r')\rho_{ti} + [1 - F(r) - \sum_{i=1}^n F_i'(r')] \rho_e, \quad (12)$$

式中: $F_i'(r')$ 是以目标靶标为中心,分别以邻近靶标的最近与最远距离为半径作圆,通过计算邻近靶标的面积占圆环比例求得的环境函数。将该式计算所得结果与(10)式计算结果作比对,即可求得多种反射率靶标之间邻近效应的影响。2.2 节所提到的截距部分环境辐射的变化,实际上可拆分为上述两个部分,一部分可以看作是目标靶标与环境之间的相互影响,另一部分则是靶标周围均匀场环境中其余几种反射率靶标对整体环境造成的影响,而这一部分才是对环境辐射的直接影响。

综上所述,本文主要对灰阶靶标的大气 MTF 部分进行了讨论和模拟计算,以(10)~(12)式为基础讨论靶标与环境间邻近效应的影响。本文分别以 4 种反射率(60%、40%、20%、5%)的靶标为目标靶标,对不同波长、靶标尺寸、气溶胶光学厚度(AOT)

$\langle\rho(M)\rangle = F(r)\rho_t + [1 - F(r)]\rho_e$, (10) 式中: $F(r)$ 为环境函数,6S 模型中给出了它的定义及计算公式,它描述了半径为 r 的目标对等效环境反射率的贡献; ρ_e 为背景反射率。 $F(r)$ 的计算方法详见 6S 关于环境的子程序,此处不再赘述。将等效环境反射率与环境函数的关系式代入(6)式中,有

及目标物半径进行讨论,计算了不同情况下邻近效应对靶标法的影响。结果如图 2 所示。

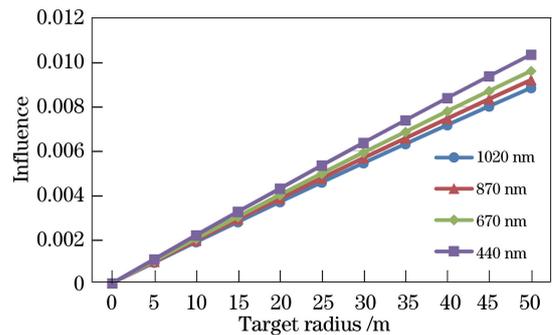


图 2 AOT 为 0.15 时靶标与环境间邻近效应的影响
Fig. 2 Influence of adjacency effect between target and environment when AOT is 0.15

由图 2 和图 3 可以直观地看到目标物半径及波长对靶标与环境间邻近效应的影响。目标物半径的增加会导致环境函数 $F(r)$ 增大,从而改变邻近效应的影响;随着波长增加,邻近效应的影响逐渐变小,这是由于瑞利散射受波长的影响而导致上行漫射透过率发生了改变。随着气溶胶光学厚度增大,大气

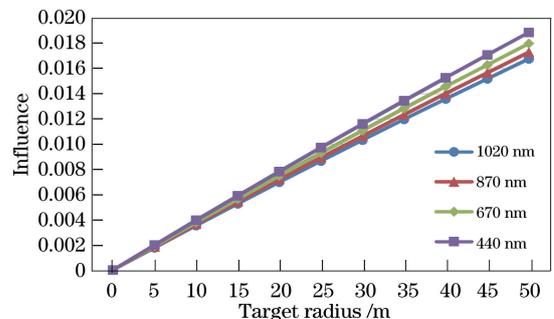


图 3 AOT 为 0.3 时靶标与环境间邻近效应的影响
Fig. 3 Influence of adjacency effect between target and environment when AOT is 0.3

影响导致漫射透过率增大,从而对计算结果产生了影响。因此可以得出如下结论:在大气条件较为理想的情况下(气溶胶光学厚度为 0.15 时),靶标与环境间邻近效应的影响不超过 1.2%;而在气溶胶光学厚度为 0.3 的情况下,靶标与环境间邻近效应的影响不超过 2%。此外,从定标时的实际情况来看,靶标尺寸一般不会铺设至 100 m,并且也会尽量选

择晴天等气溶胶光学厚度较小的天气进行试验。以本文试验数据为例,由靶标铺设结合图 2~3 可知,靶标与环境间邻近效应的影响小于 0.6%。

同样以(10)~(12)式讨论目标靶标与周边邻近靶标的相互作用,并以周边靶标对目标靶标造成的等效环境反射率差异来衡量它们的相互作用。结果如表 1 所示。

表 1 周边靶标的影响

Table 1 Influence of surrounding targets

Wavelength /nm	Target reflectance	$\langle \rho(M) \rangle$	$\langle \rho'(M) \rangle$	Relative deviation /%
440	60%	0.169011	0.168476	0.316884
	40%	0.166188	0.165146	0.628609
	20%	0.161831	0.161817	0.008710
	5%	0.159441	0.159319	0.076292
670	60%	0.266634	0.266117	0.193973
	40%	0.261788	0.260687	0.421173
	20%	0.254559	0.255258	-0.274280
	5%	0.250898	0.251186	-0.114580
870	60%	0.274963	0.274420	0.197776
	40%	0.269556	0.268385	0.435242
	20%	0.261511	0.262350	-0.320310
	5%	0.257462	0.257824	-0.140280
1020	60%	0.282148	0.281618	0.188101
	40%	0.276555	0.275399	0.419138
	20%	0.268255	0.269180	-0.344330
	5%	0.264102	0.264516	-0.156430

可以看出,不同反射率目标靶标造成的影响是不一致的,这部分影响是无法通过线性回归消除的。结合本次试验靶标的铺设方式可得出如下结论:由邻近靶标反射率不一致带来的邻近效应的影响不超过 0.7%。

综上,在大气条件理想的情况下,当目标物半径在一定范围内时,将截距部分视为常数的方法是可行的。对于本文提到的试验来说,结合铺设靶标的半径及大气参数,可以认为邻近效应对本次试验的影响不到 1%。

3 外场试验

3.1 试验场地及数据的获取

敦煌辐射校正场位于甘肃省敦煌市以西 15 km 处,平均海拔高度大于 1 km,场地面积大于 30 km \times 30 km,地势平坦,无植被覆盖,且大气干洁,无污染。2018 年 8 月在该场区铺设灰阶靶标,采用某高分辨多光谱相机进行了多次均匀场及靶标试验,并分别在 8 月 18 日、8 月 22 日与 9 月 20 日三次成功成像。

靶标布设示意图及靶标反射率分别如图 4 和图 5 所示。灰阶靶标采用湿法 PU 革制作,具有光谱平坦性好、传感器观测视场范围接近理想朗伯体、反射率覆盖相机动态范围等特点。靶标铺设超过 10 pixel \times 10 pixel,计算时取图像中心 3 pixel \times 3 pixel 范围内的平均计数值,以消除 MTF 的影响。

在相机过顶前后,多次测量靶标及环境反射率,并在多个位置进行多次测量,以减小随机误差的干扰,取测量的均值为实测反射率。用太阳辐射计 CE318 进行测量,得到四个波长(440, 670, 870, 1020 nm)下的光学厚度,然后用 Langley 法计算 550 nm 波长下气溶胶的光学厚度,并将其输入到辐射传输模型中,选择合适的参数进行计算。

3.2 定标计算

将三次试验所得数据代入(7)式进行计算,采用灰阶靶标法计算定标系数,计算结果如表 2 所示。

选择上述三次试验中一次试验的数据,采用均匀场法进行定标系数的计算,并将计算结果与灰阶靶标法的计算结果进行对比,结果如表 3 所示。

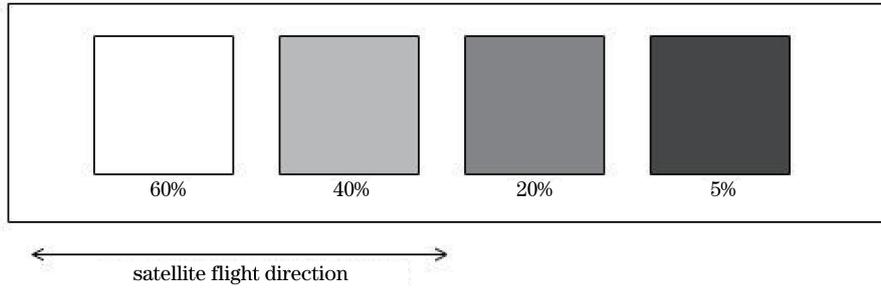


图 4 靶标铺设示意图

Fig. 4 Schematic of target laying

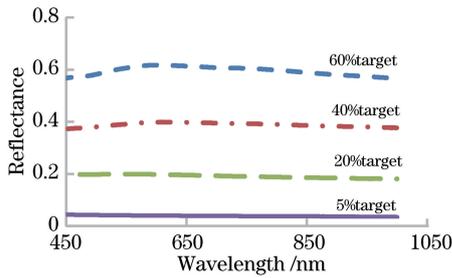


图 5 靶标反射率

Fig. 5 Target reflectance

表 2 采用灰阶靶标法计算得到的定标系数

Table 2 Calibration coefficient calculated by gray-scale targets method

Band	Calibration coefficient			Relative standard deviation /%
	Aug. 18	Sept. 20	Aug. 22	
Band 1	2.637748	2.595359	2.601729	0.875
Band 2	3.357519	3.288545	3.290493	1.186
Band 3	2.979735	2.946425	2.999565	0.903
Band 4	3.452361	3.430652	3.406411	0.670

由表 3 可知,大面积均匀场方法和灰阶靶标法计算的定标系数相差较大。下面讨论定标系数相差较大的原因。用三次试验的均匀场反射率及其图像计数值绘制靶标拟合曲线,如图 6~8 所示。

表 3 采用大面积均匀场方法和灰阶靶标法计算的定标系数

Table 3 Calibration coefficients calculated by large uniform site method and gray-scale targets method

Band	Gray-scale targets method calibration coefficient on Sept. 20	Large uniform site method calibration coefficient on Sept. 20	Relative deviation /%
	Band 1	2.595359	
Band 2	3.288545	3.63666	10.054
Band 3	2.946425	3.223276	8.975
Band 4	3.430652	3.746692	8.807

由图 6~8 可见,均匀场描点与靶标回归曲线几乎一致。因此,定标系数的差距在于截距。上文提到,靶标在线性回归时不但排除了大气程辐射与环境辐射的影响,还消除了由相机响应模型引起的固定偏置,而定标模型是否存在偏置,正是二者计算时的差异性所在。为深入研究该问题,对均匀场法也引入由相机响应模型引起的固定偏置 D_{offset} ,对(4)式作如下处理:

$$D_{site} - D_{offset} = A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \times \left[\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)}{1 - \rho_S} \rho \right]. \quad (13)$$

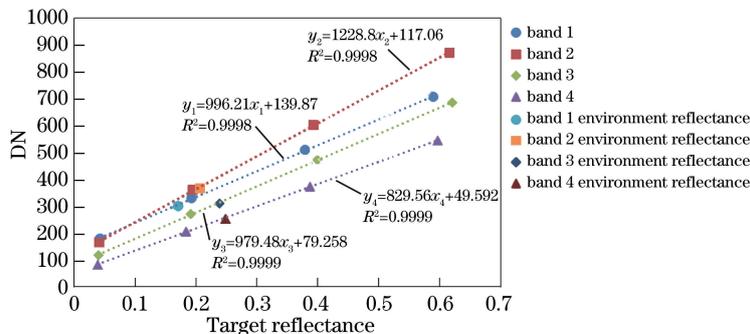


图 6 8 月 18 日的反射率-计数值拟合曲线

Fig. 6 Reflectance-digital number fitting curve on August 18

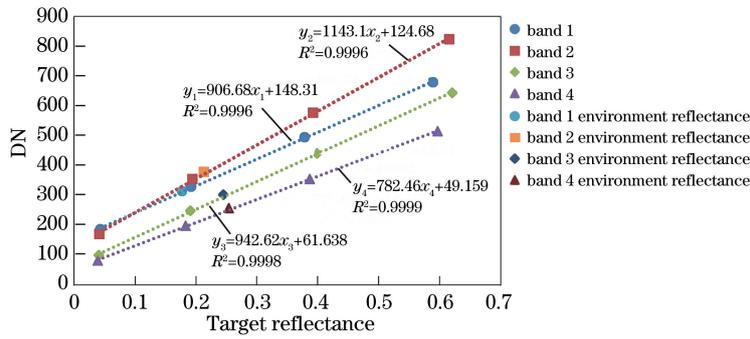


图 7 8 月 22 日的反射率-计数拟合曲线

Fig. 7 Reflectance-digital number fitting curve on August 22

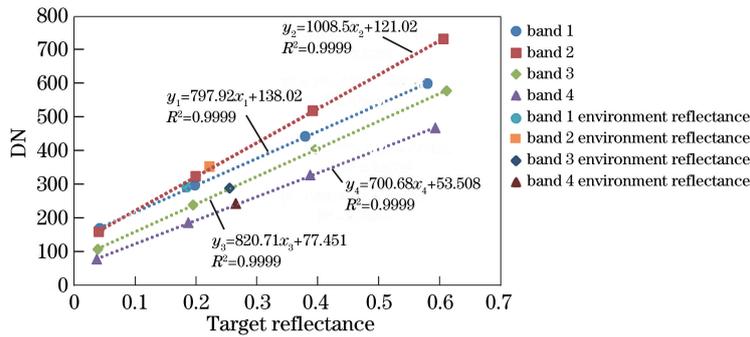


图 8 9 月 12 日的反射率-计数拟合曲线

Fig. 8 Reflectance-digital number fitting curve on September 12

靶标法的偏置公式如(8)式所示。将(8)式和(13)式中的定标系数 A 与偏置 D_{offset} 视为未知数,并令其相等以求出 D_{offset} 。对多次试验均作相同的处理,最终以其均值作为固定偏置,以此对计数值

进行偏置修正后,再重新使用均匀场方法计算定标系数。将修正后的计算结果与表 2 所示的靶标法计算得到的定标系数进行比对,得到的结果如表 4 所示。

表 4 两种方法得到的定标系数的比对

Table 4 Comparison of calibration coefficients obtained by two methods

Band	Gray-scale targets method calibration coefficient on Sept. 20	Large uniform site method calibration coefficient on Sept. 20 (after correction)	Relative deviation /%
Band 1	2.595359	2.609543	0.545
Band 2	3.288545	3.349324	1.831
Band 3	2.946425	3.005511	1.985
Band 4	3.430652	3.497758	1.937

由表 4 可以看出,对计数值进行处理后,均匀场方法计算所得定标系数与靶标法计算结果相差不到 2%,且均匀场方法校正后的多次试验结果之间的偏差亦均在 2%以内。这足以证明存在的稳定偏置接近常数,同样也验证了上文所提带偏置的一次函数定标模型是合理的。

4 定标不确定度评估分析

根据前面所述的辐射定标原理方法可知,影响定标不确定度的因素主要有地面总辐照度的计算、靶标的双向反射分布函数(BRDF)测量、上行大气

透过率计算以及邻近效应、几何因子等。

地面总辐照度的不确定度主要来源于辐射传输模型,而传输模型的不确定度主要来自气溶胶模型的假设与大气外太阳辐照度的计算等,据此认为该项不确定度小于 3%。灰阶靶标具有光谱平坦、相机观测条件下接近理想朗伯体等特点,因此认为其 BRDF 测量不确定度小于 2%。上行大气透过率不确定度主要来自气溶胶散射。辐射传输中的参数可以采用朗利法对太阳辐射计测量的大气光学厚度进行计算得到,其中大气光学厚度测量的不确定度主要来自太阳辐射计的定标,测量不确定度小于 2%。

邻近效应在 3.2 节已给出不确定度分析,认为其不确定度小于 1%。

综上所述,基于灰阶靶标的辐射定标方法的综合不确定度为 4.4%,不确定度分配如表 5 所示。

表 5 灰阶靶标法的不确定度

Table 5 Uncertainty analysis of gray-scale targets method

Uncertainty factor	Relative uncertainty /%
Calculation of total ground irradiance	3
Target BRDF measurement	2
Calculation of upward transmittance	2
Adjacency effect calculation	1
Others (geometric factors, etc.)	1
Comprehensive uncertainty	4.4

5 反射率反演验证

5.1 反射率反演验证流程

在上述讨论中,对相机存在稳定偏置的猜测并未影响靶标的计算结果,这是因为用线性回归法有效区分了目标辐射与非目标辐射,将目标辐射分离开作了单独计算。因此,本文提出了反射率反演以验证靶标法的合理性。由于偏置的存在,此处不再讨论大面积均匀场法的结果。

在 8 月 18 日的试验中,本研究团队在附近其他场地布设了彩色靶标,但受到条件限制,靶标反射率非过顶当日测量,考虑到其自身稳定性好,且多次测量数据均较为接近,因此仍取其附近日期所测反射率作为参照。测量的彩色靶标的反射率如图 9 所示。

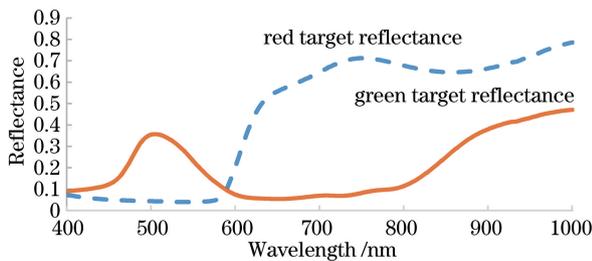


图 9 彩色靶标的反射率

Fig. 9 Reflectance of color target reflectance

由上述原理及方法可知,彩色靶标计数值与反射率之间的关系满足

$$D - D_{\text{offset}} = A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g(\theta_s, \theta_v) \times \left\{ \rho_a + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} [\rho_i \exp(-\tau/\mu_v) + \rho_e t_d(\theta_v)] \right\}. \quad (14)$$

将上述采用灰阶靶标法计算所得的定标系数代入(14)式中反演出彩色靶标的反射率,并将其与场地实测反射率进行比对。考虑到彩色靶标成像时与某次试验时间一致,且与灰阶靶标同时成像在同一影像内,为证明其反演的可信度,作如下公式推导:

$$\text{令 } A' = A \frac{\mu_s E_s}{\pi} T_g, \text{ 结合(7)式所示的靶标斜率}$$

公式,有

$$A' = \frac{K}{\frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho \rangle S} \exp(-\tau/\mu_v)}. \quad (15)$$

将(15)式代入(13)式,有

$$\rho_i = \frac{\frac{D - D_{\text{offset}}}{A'} - \rho_a - \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} \rho_e t_d(\theta_v)}{\frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} \exp(-\tau/\mu_v)} = \frac{\frac{D - D_{\text{offset}}}{K} - \frac{\rho_a}{\frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} \exp(-\tau/\mu_v)} - \frac{\rho_e t_d(\theta_v)}{\exp(-\tau/\mu_v)}}{\frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} \exp(-\tau/\mu_v)}. \quad (16)$$

到此可知,虽然处于同一大气条件下,但辐射传输计算所得的大气参数依然对反演结果存在影响。即在同一幅影像中,反演结果的不确定度依然由定标系数与辐射传输计算的不确定度共同决定。因此,以这一结果与实测反射率进行比较来验证定标系数的精度是可行的。

5.2 反射率反演验证结果

5.1 节所述方法的计算结果如表 6 所示。

表 6 反射率反演结果的比对

Table 6 Comparison of reflectance inversion results

Band	Red target		Absolute difference	Green target		Absolute difference
	Inversion	Measurement		Inversion	Measurement	
Band 1	0.047843	0.050505	0.00266	0.268581	0.277531	0.00895
Band 2	0.042354	0.049642	0.00729	0.209395	0.213367	0.00397
Band 3	0.568769	0.565991	0.00278	0.061904	0.062679	0.00078
Band 4	0.663567	0.654416	0.00915	0.196434	0.198960	0.00253

由表 6 可知,两种彩色靶标在不同波段覆盖的反射率范围为 5%~70%,反演的绝对差值在 0.01 以内。考虑到反射率数据反演结果与实测值不在同一时间,因此上述结果足以说明了靶标自身的反射率稳定性,同时可以说明计算得到的定标系数的精度是非常高的。

6 结 论

常用的大面积均匀场方法具有背景均一、不受邻近效应影响等优点。但其反射率单一,不但会在单点定标时引入辐射传输模型中对程辐射等参数的假设误差,还会在相机响应模型不确定度较大或是有其他误差存在的情况下,导致计算结果出现较大差异。与大面积均匀场法相比,靶标法以具有良好朗伯性与光谱平坦性的灰阶靶标作为参照目标,用不同反射率目标线性回归方法分离了目标辐射与非目标辐射,排除了相机响应模型的不确定度以及传输模型中对程辐射的假设,直接对目标辐射进行计算。本文将二者结合起来,相互参照,用靶标法对均匀场法中的非目标辐射进行校正,再用均匀场法对靶标法计算得出的偏置进行验证,最终以彩色靶标反射率反演的方法证明了靶标法计算所得的定标系数不但精度更高,还解决了响应低端验证的问题。

由于缺少漫总比数据,因此本文均以反射率基法为基础进行计算,但反射率基法过分依赖于辐射传输模型中大气参数的计算。此外,在表观反射率的计算中,由于忽略了邻近效应的影响,因此将计算所需的等效环境反射率直接用测量的环境反射率代替,这一近似也会直接影响到整体的精度,如果能进行漫总比测量,以文中原理一节中提到的半程辐照度基法代替反射率基法,即可消去此误差项,这样靶标法中的目标辐射才更准确。而在均匀场方法中,由于目标与环境的反射率一致,无需作此近似处理,这也是均匀场方法的优点之一。

参 考 文 献

- [1] Wyatt C L. Electro-optical system design: for information processing [EB/OL]. [2020-09-08]. https://www.researchgate.net/publication/46950143_Electro-Optical_System_Design_For_Inform_Processing.
- [2] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, et al. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11-37.
- [3] Gu X F. Principles and methods of radiation calibration for aerospace optical remote sensors[M]. Beijing: Science Press, 2013: 72-82.
顾行发. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 72-82.
- [4] Zheng X B. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(1): 2-8.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] Slater P N. Radiometric considerations in remote sensing[C]//*Proceedings of the IEEE*. New York: IEEE Press, 1985: 997-1011.