

光学载荷多场地地基综合验证定权方法

刘京儒^{1,2}, 高彩霞^{1*}, 刘耀开¹, 赵永光¹, 马灵玲¹, 邱实¹, 李传荣¹, 唐伶俐¹, 钱永刚¹, 王宁¹

¹中国科学院空天信息创新研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;

²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要 光学载荷辐射定标结果的地基验证受地-气系统中多个因素的综合影响, 导致单场地单次验证结果存在差异, 且无法对结果进行有效对比和综合分析。考虑了目标特性、大气环境等因素对单场地单次验证结果的影响, 提出了一种以验证结果不确定度为权重的基于加权平均值综合定权方法, 获取更接近真实值的关键比较参考值(KCRV), 实现对单场地单次验证结果的对比和综合分析。同时, 基于国家高分辨遥感综合定标场不同反射特性的地面目标对国产高分辨率载荷 ZY-3/MUX 的辐射定标结果进行综合验证。结果表明, 基于 12 个验证样本的 KCRV 在蓝光、绿光、红光、近红外波段分别为 3.88%、5.42%、6.14%、9.81%, 对应的不确定度分别为 1.79%、1.87%、1.96%、2.02%, 其中, 9 个验证样本的等效度小于 0.1, 证明这些样本的验证结果更接近 KCRV。

关键词 地基验证; 不确定性分析; 定权; 关键比较参考值

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1712002

Weight Determination Method for Multi-Site Ground Comprehensive Validation of Optical Sensors

Liu Jingru^{1,2}, Gao Caixia^{1*}, Liu Yaokai¹, Zhao Yongguang¹,

Ma Lingling¹, Qiu Shi¹, Li Chuanrong¹, Tang Lingli¹, Qian Yonggang¹, Wang Ning¹

¹Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information

Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The ground validation of radiometric calibration results of optical sensors is comprehensive affected by many uncertainty factors in earth-atmosphere system, which leads to the difference of single verification results in single site, and unable to effectively compare and comprehensively analyze the results. In this study, in consideration of the influence of target characteristics, atmospheric environment, and other factors on the single verification results of single site, a comprehensive weighting method based on weighted average value with the uncertainty of verification results as the weight is proposed to obtain the key comparative reference value (KCRV) closer to the real value, so as to realize the comparison and comprehensive analysis of single site verification results. Meanwhile, the radiometric calibration results of ZY-3/MUX made in China are comprehensively verified based on the ground targets with different reflection characteristics in the national high resolution remote sensing integrated calibration field. The results show that the KCRVs of 12 validation samples in blue, green, red and near-infrared bands are 3.88%, 5.42%, 6.14%, 9.81% respectively, the corresponding uncertainty is 1.79%, 1.87%, 1.96%, and 2.02%, respectively. Among them, the equivalence degrees of 9 validation samples are less than 0.1, prove that the validation results of these samples are closer to KCRV.

Key words ground validation; uncertainty analysis; weight determination; key comparison reference value

OCIS codes 110.3000; 120.0280; 120.3940; 280.4788

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-05-03; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(6170011903)、国家重点研发计划(2018YFB0504800)、中国科学院大科学计划(181811KYSB20160040)、中科院先导项目(XDA13030402)

* E-mail: gaocaixia@aoe.ac.cn

1 引 言

可溯源至国际单位制(SI)的地基验证技术是检验载荷定标结果、辐射性能及数据产品可靠性的有效手段,也是保证不同来源定量遥感信息可比性的关键^[1]。与传统场地定标相同,地基验证需要在精准获取地面测试目标和大气特性数据的基础上,提供可与载荷观测进行对比的地基验证辐射产品^[2-3]。近年来,人们在外场地基验证方面开展了大量探索性研究^[4-10]。亚利桑那大学利用 White Sands 定标场和 Railroad Valley Playa 定标场^[4-5]、中国资源卫星应用中心利用敦煌定标场^[6]、中国科学院光电研究院利用国家高分辨遥感综合定标场(简称包头场)^[7]开展了可见光-近红外谱段 Landsat-5/TM、CBERS-04/MUX、Landsat-8/OLI 等卫星的光学载荷外场定标及地基验证。由于外场地基验证耗费人力物力大,效率低,且不同操作人员采集数据的标准难以完全一致,导致外场地基验证距离高频次、高精度、可追溯至 SI 的载荷外场定标与验证相差甚远。

国际定标与验证工作组(WGCV)启动了全球自主辐射定标网络(RadCalNet)计划,旨在通过优选具备自动化地面和大气参数观测能力的测试场地,联合开展常态化运行的外场自动定标技术研究,构建具备全球统一质量标准的定标数据处理中心,以共享定标数据和应用典型光学载荷定标。首批优选了美国 Railroad Valley Playa、法国 La Crau、中国包头场,欧空局 Gobabeb 场,共同构成示范场地网络。该网络可为载荷性能与数据质量检测提供更精准、高频次的参考基准,并探索出一条可实现的高频次在轨外场定标道路,有效提升了定量遥感信息质量控制的水平。但地基验证结果的场地不同,导致无法对各场地验证结果之间的一致性进行有效对比和综合分析。

本文参考国际光度和辐射度咨询委员会(CCPR)国际测量基准对比结果分析方法^[11],提出了一种通过验证结果不确定度确定权重的综合定权方法,以获取更接近真实验证结果的关键比较参考值(KCRV),可对每个场地的验证结果进行有效对比和综合分析。同时,以国产高分辨率光学载荷 ZY-3/MUX 为示范,基于包头场黑色靶标、灰色靶标和沙地目标进行了验证实验。

2 光学载荷地基验证综合定权原理及方法

2.1 光学载荷地基验证综合定权原理

在国际计量局(BIPM)的组织协调下,38 个国家和 2 个国际组织的代表于 1999 年在巴黎签署了《国家计量基(标)准和国家计量院签发的校准与测量证书互认协议》(CIPM MRA)。CIPM MRA 是通过各个国家计量院(NMI)的运行质量体系,计算接近于 SI 的 KCRV,并对各个国家的计量基准进行对比,实现各个 NMI 计量溯源性的相互认证。在此背景下,CCPR 确定了用于光谱范围为 250 ~ 2500 nm 的光谱辐照度测量结果的关键比较指南,即 CCPR 关键比较 K1-a^[11]理论。实验在借鉴国际测量基准等效互认方法的基础上,依据 CCPR 关键比较 K1-a 理论,提出了一种基于样本不确定度的 KCRV 综合定权方法,实现了单场地单次验证结果的对比和综合分析。

光学载荷地基验证综合定权方法流程如图 1 所示,首先,基于同步测量得到地表反射率和大气参数,利用 Modtran5.0 大气辐射传输模型模拟得到大气层顶(TOA)的辐亮度/反射率,并将其与载荷观测辐亮度/反射率进行对比,得到二者之间的相对差异。为了保证地基验证结果可溯源至 SI,利用蒙特卡罗数值模拟方法对实验室-外场地-星上传递链路的量值不确定度进行细致分析,并根据不确定度传递理论^[12]计算 TOA 的模拟反射率不确定度,进而计算每个验证样本相对差异的总体不确定度。在此基础上,依据 CCPR 关键比较 K1-a 理论,假设各验证样本相互独立,确定每个验证样本的权重,获取多样本的 KCRV 及其总体不确定度。最后,利用卡方检验方法对各样本间相互独立性的假设进行检验,并用各样本的等效度评估其接近真实值的程度。

2.2 基于蒙特卡罗理论的不确定性分析方法

光学载荷地基验证不确定性涉及大气环境的特性差异、目标特性观测数据等多方面因素,且各因素之间的相互耦合没有明确的解析式,实验采用蒙特卡罗数值模拟方法逐项分析地基验证链路中各环节的不确定性因素,并分析其对单场地验证结果的不确定度贡献。

蒙特卡罗数值模拟方法是一种通过重复采样实现分布传播的数值方法,首先对输入量 X 的概率分

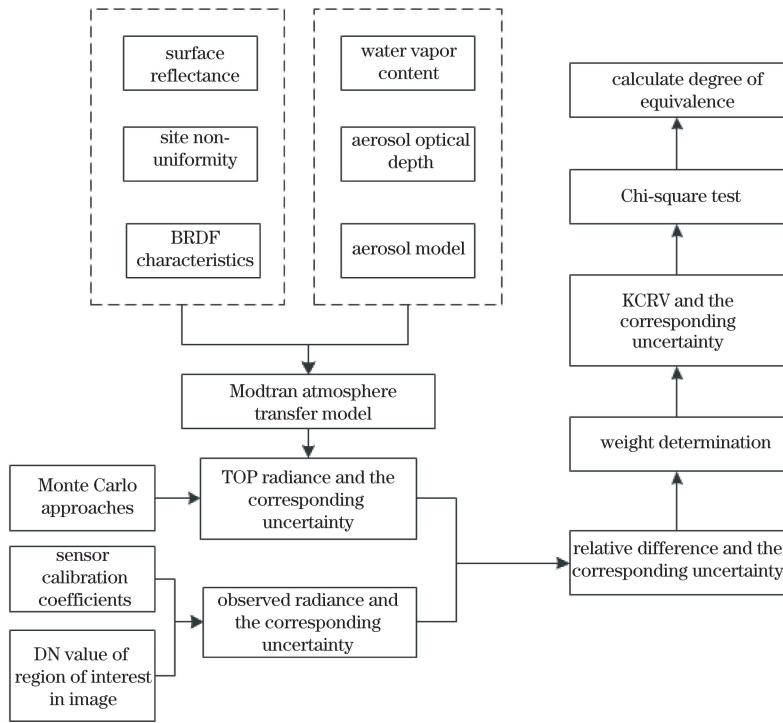


图 1 光学载荷多场地基综合验证定权方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the weight determination method for multi-site ground comprehensive validation of optical sensors

布函数进行离散采样,由测量模型传播输入量分布,计算输出量 Y 概率分布函数的离散采样值,然后由输出量的离散分布获得输出量的标准不确定度^[13]。增加模拟实验的次数,可以改善输出量的标准不确定度计算结果,通过测试输出量标准差的稳定性将模拟实验次数设置为 1000 次。

以地表反射率反演不确定度为例,介绍了基于蒙特卡罗模拟方法的不确定性分析方法。1)计算目标区域地表反射率的反演不确定度,并将其作为标准差。利用蒙特卡罗模拟方法随机生成 N ($N = 1000$)组符合正态分布的地表反射率输入值,保持其他参数不变,由大气辐射传输模型(Modtran5.0)模拟生成对应的 N 组 TOA 辐亮度/反射率。2)计算引入和未引入地表反射率反演不确定度时 TOA 辐亮度/反射率的相对误差。3)将计算得到的 N 组相对误差的标准差作为地表反射率反演不确定度导致的 TOA 辐亮度/反射率的不确定度。

2.3 基于加权平均值的综合定权方法

参照 CCPR 关键比较 K1-a 理论,提出了一种基于加权平均值的综合定权方法。具体计算步骤如下。

1) 针对特定卫星载荷波段 i 的第 j 个地基验证样本,其 TOA 的模拟反射率为 $E_{i,j}$,对应的观测反射率为 $E_{i,j}^p$,两者之间的相对差异 $\Delta_{i,j}$ 为

$$\Delta_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{E_{i,j}^p} - 1. \quad (1)$$

相对差异对应的不确定度 $u(\Delta_{i,j})$ 为

$$u(\Delta_{i,j}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(E_{i,j}) + u_{\text{rel}}^2(E_{i,j}^p)}, \quad (2)$$

式中, $u_{\text{rel}}(E_{i,j})$ 为 TOA 的模拟反射率不确定度, $u_{\text{rel}}(E_{i,j}^p)$ 为 TOA 的观测反射率不确定度。

2) 确定调整后的不确定度 $u_{\text{adj}}(\Delta_{i,j})$ 。为了避免给不确定度过小的验证样本赋予过大的权重,用截止不确定度 $u_{\text{cut-off}}$ 对各验证样本的不确定度进行截断,如果某个验证样本的不确定度小于等于多个场地不确定度的中值,则将这几个场地不确定度的平均值作为截止不确定度^[14],可表示为

$$u_{\text{cut-off}} = X_{\text{average}}[u(\Delta_{i,j})], \\ u(\Delta_{i,j}) \leq X_{\text{median}}[u(\Delta_{i,j})], \quad (3)$$

式中, $X_{\text{median}}[u(\Delta_{i,j})]$ 为多个场地不确定度的中值, $X_{\text{average}}[u(\Delta_{i,j})]$ 为小于等于 $X_{\text{median}}[u(\Delta_{i,j})]$ 的场地不确定度平均值。用截止不确定度调整后的单场地不确定度为

$$u_{\text{adj}}(\Delta_{i,j}) = \begin{cases} u(\Delta_{i,j}), & u(\Delta_{i,j}) \geq u_{\text{cut-off}} \\ u_{\text{cut-off}}, & u(\Delta_{i,j}) < u_{\text{cut-off}} \end{cases}. \quad (4)$$

3) 对于特定卫星载荷波段 i ,第 j 个验证样本的权重系数 $w_{i,j}$ 为

$$w_{i,j} = \frac{u_{\text{adj}}^{-2}(\Delta_{i,j})}{\sum_{j=1}^N u_{\text{adj}}^{-2}(\Delta_{i,j})}. \quad (5)$$

4) 定义特定卫星载荷波段 i 的地基验证相对差异加权平均值为 y , 可表示为

$$y = \frac{\frac{\Delta_{i,1}}{u_{\text{adj}}^2(\Delta_{i,1})} + \dots + \frac{\Delta_{i,N}}{u_{\text{adj}}^2(\Delta_{i,N})}}{\frac{1}{u_{\text{adj}}^2(\Delta_{i,1})} + \dots + \frac{1}{u_{\text{adj}}^2(\Delta_{i,N})}} = \sum_{j=1}^N w_{i,j} \cdot \Delta_{i,j} \quad (6)$$

y 的不确定度, 即多场地的总体不确定度 $u(y)$ 可表示为

$$u(y) = \frac{1}{\sqrt{u_{\text{adj}}^{-2}(\Delta_{i,1}) + \dots + u_{\text{adj}}^{-2}(\Delta_{i,N})}} \quad (7)$$

5) 用卡方检验方法检验所得结果的总体一致性。首先, 假设不同样本之间的测量是相互独立的, 计算所有样本的卡方值, 卡方值越大, 表明变量之间的相关性越大。其次, 通过对应的自由度和卡方检验临界值表查找卡方分布的临界值, 如果卡方值小于该临界值, 则接受原假设; 否则拒绝原假设, 即假设不成立。卡方值可表示为

$$\chi_{\text{obs}}^2 = \frac{(\Delta_{i,1} - y)^2}{u_{\text{adj}}^2(\Delta_{i,1})} + \dots + \frac{(\Delta_{i,N} - y)^2}{u_{\text{adj}}^2(\Delta_{i,N})} \quad (8)$$

6) 计算等效度。等效度是衡量每个样本地基验证结果相对差异与总体相对差异之间的接近程度, 等效度 d_i 可表示为

$$d_i = \Delta_{i,j} - y \quad (9)$$

3 数据的获取与处理

实验选用 2018 年 5 月 27 日、6 月 6 日、7 月 25 日、9 月 22 日国产高分辨率光学载荷 ZY-3/MUX 卫星

过境包头场黑色靶标、灰色靶标和沙地目标的 12 个验证样本进行实例验证。

3.1 地面同步测量数据的获取与处理

包头场位于内蒙古自治区巴彦淖尔市(北纬 40.85° , 东经 109.62°), 定标场内包含不同反射率砾石铺设的人工固定靶标(尺寸为 $48 \text{ m} \times 48 \text{ m}$)和沙地自然目标(尺寸为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$), 其中, 黑色靶标、灰色靶标和沙地目标的地表反射率如图 2 所示。定标场配备的目标特性自动观测系统与 CE318 型太阳光度计^[15] 可获取目标反射率特性及大气光学特性, 如图 3 所示。其中, CE318 型太阳光度计为全球气溶胶观测网(AERONET)站点之一, 已经实现了测量数据的标准化处理。实验通过 AERONET 数据中心下载并插值获取了包头场卫星过境时刻在波长为 550 nm 处的气溶胶光学厚度(AOD)和水汽含量(WVC), 并将其作为输入参数利用 Modtran5.0 大气辐射传输模型模拟得到 TOA 的反射率。

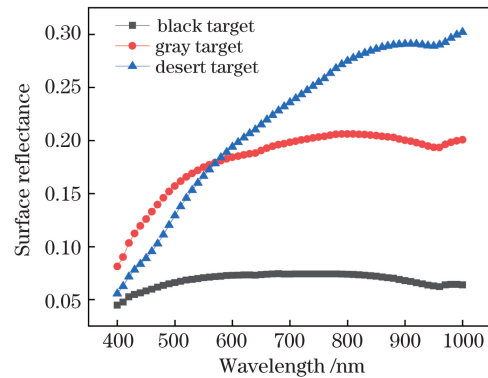


图 2 不同靶标的地表反射率

Fig. 2 Surface reflectance of different targets



图 3 包头场自动观测系统。(a)固定靶标;(b)沙地目标;(c)CE318 太阳光度计

Fig. 3 Automatic measurement system of Baotou site. (a) Permanent target; (b) desert target; (c) CE318 sun photometer

3.2 卫星影像数据获取与处理

资源三号卫星于 2012 年 1 月 9 日成功发射, 搭载了 4 台光学相机, 包括一台地面分辨率为 2.1 m

的正视全色 TDI CCD 相机, 两台地面分辨率为 3.6 m 的前视和后视全色 TDI CCD 相机和一台地面分辨率为 5.8 m 的正视多光谱相机(MUX)。考

考虑到包头场不同靶标和沙地目标的尺寸大小,选择地面分辨率为 5.8 m 的 ZY-3/MUX 载荷作为待验证载荷,其光谱响应函数如图 4 所示。

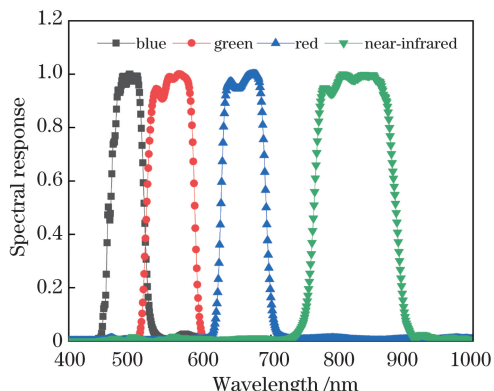


图 4 ZY-3/MUX 光谱响应函数曲线

Fig. 4 Spectral response function of ZY-3/MUX

表 1 ZY-3/MUX 过境包头场的成像几何信息和对应的大气参数

Table 1 Imaging geometry information of ZY-3/MUX over Baotou site and corresponding atmospheric parameter

Data	Time	VZA / (°)	VAA / (°)	SZA / (°)	SAA / (°)	AOD	WVC / (g·cm ⁻²)
2018-05-27	3:24:17	7.13	14.55	25.17	135.93	0.1135	0.5803
2018-06-06	3:21:41	7.92	44.67	24.61	132.15	0.2137	0.9625
2018-07-25	3:25:49	6.48	11.21	27.60	134.31	0.0577	1.4378
2018-09-22	3:28:29	6.48	11.19	43.32	155.27	0.0330	0.4235

4 结果对比与分析

4.1 地基验证辐射产品不确定度结果及分析

包头场地基验证辐射产品 (TOA 的模拟辐亮度/反射率) 的不确定度包含大气底部 (BOA) 反射率不确定度、大气参数、Modtran5.0 模型不确定度等因素对 TOA 模拟辐亮度/反射率不确定度的贡献,具体分析如下。

1) BOA 的反射率不确定度

BOA 的反射率不确定度包括地表反射率的反演不确定度、目标非均匀性、观测角度差异。其中,地表反射率的反演不确定度由辐亮度测量不确定度和到达地表的总辐照度不确定度组成。辐亮度测量不确定度包括测量仪器的实验室定标不确定度、光谱仪的稳定性、光谱仪的温度敏感性。其中,仪器的实验室定标不确定度和光谱仪的温度敏感性由中国计量研究院给出;光谱仪的稳定性是在外场实验环境中对目标进行连续测量得到的。考虑了到达地表总辐照度由大气辐射传输模型模拟得到,其不确定度的来源为大气参数 (AOD、WVC 及气溶胶类型) 不确定度、Modtran5.0 模型不确定度

为了获取载荷过境包头场目标区域 TOA 的观测反射率,提取 ZY-3/MUX 影像目标区域的像元灰度 (DN),并结合中国资源卫星应用中心公布的各波段定标系数,计算得到波段 i 的 TOA 观测辐亮度 L_i ,利用 (10) 式得到 TOA 的观测反射率 $E_{i,j}^p$ 。从 ZY-3/MUX 影像头文件信息中提取 4 组影像的成像时间和观测的几何信息,作为 Modtran5.0 大气辐射传输模型的输入参数,得到 TOA 的反射率,结果如表 1 所示。其中,VZA 为观测天顶角,VAA 为观测方位角,SZA 为太阳天顶角,SAA 为太阳方位角。

$$E_{i,j}^p = \pi L_i d_s^2 / (E_{0i} \cos \theta), \quad (10)$$

式中, d_s 为日-地距离, E_{0i} 为波段 i 的大气外层太阳辐照度, θ 为太阳天顶角。

(优于 2%)^[16] 以及太阳辐照度模型不确定度^[17]。其中,AOD 和 WVC 的不确定度分别为 0.01 和 12%^[18]。到达地表总辐照度不确定度由蒙特卡罗模拟方法获取,设置“乡村型”和“沙漠型”两种不同气溶胶类型,模拟得到两组到达地表的总辐照度,通过计算二者之间的相对差异得到由气溶胶类型差异引起的到达地表总辐照度不确定度。以 2018 年 5 月 27 日的沙地目标为例,BOA 的反射率不确定度结果如图 5(a) 所示,可以发现,在 500~900 nm 波长范围内,BOA 的反射率总体不确定度小于 4.7%。

2) 大气参数不确定度

大气参数对 TOA 反射率不确定度的贡献来源于 AOD、WVC 和气溶胶类型差异,不确定度分析方法与 BOA 反射率不确定度类似。以 2018 年 5 月 27 日沙地目标为例,大气参数对 TOA 反射率不确定度的分析结果如图 5(b) 所示。可以发现,AOD 对 TOA 反射率不确定度的贡献小于 0.16%,WVC 对 TOA 反射率不确定度的贡献小于 2.61%。在非水汽吸收带内,WVC 对 TOA 反射率不确定度的贡献小于 0.23%,气溶胶模式差异对 TOA 反射率不

确定度的贡献小于 0.89%。

3) TOA 模拟辐亮度或反射率总体不确定度

基于不确定度传递理论,将 BOA 反射率不确定度、大气参数不确定度、Modtran5.0 模型不确定度(优于 2%)^[16] 以及太阳辐照度模型不确定度^[17]

对 TOA 模拟辐亮度/反射率总体不确定度的贡献进行合成,以 2018 年 5 月 27 日的沙地目标为例,TOA 反射率的总体不确定度如图 5(c)所示。可以发现,在 400~1000 nm 波长范围内,TOA 的反射率总体不确定度小于 5.2%。

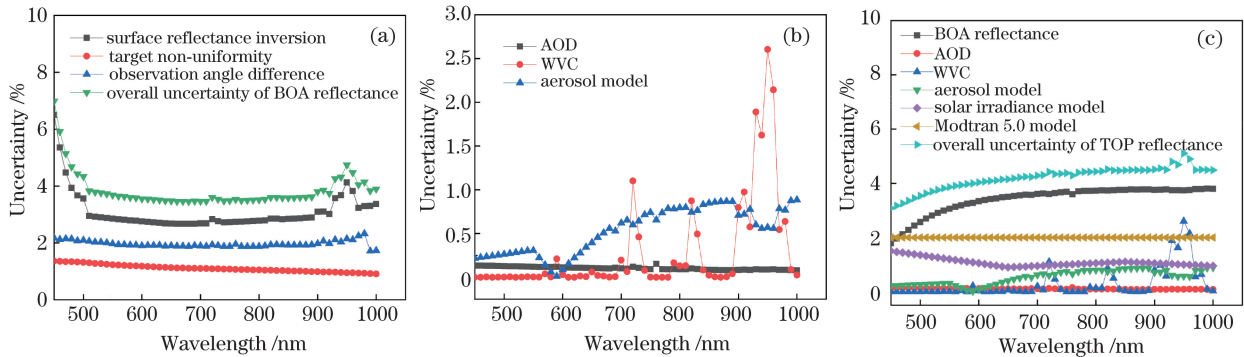


图 5 模拟 TOA 反射率的不确定度。(a) BOA;(b) 大气参数;(c) 总体不确定度

Fig. 5 Uncertainty analysis results of simulated TOA reflectance. (a) BOA; (b) atmospheric parameters; (c) overall uncertainty

ZY-3/MUX 载荷在蓝光、绿光、红光、近红外(NIR)波段 TOA 反射率总体不确定度如表 2 所示。其中,样本 1~4 分别为 2018 年 5 月 27 日、6 月 6 日、7 月 25 日、9 月 22 日的黑色靶标验证样本;样本 5~

8 分别为对应日期的灰色靶标验证样本;样本 9~12 分别为对应日期的沙地目标验证样本。可以发现,除近红外波段,其他 3 个波段的 TOA 反射率总体不确定度均小于 4.91%。

表 2 ZY-3/MUX 的 TOA 反射率总体不确定度

Table 2 Overall uncertainty of TOA reflectance of ZY-3/MUX

unit: %

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Blue	3.50	3.44	3.45	3.36	4.07	4.00	4.24	4.04	3.42	3.46	3.53	3.36
Green	4.08	3.99	4.01	3.87	4.51	4.43	4.61	4.46	3.88	3.92	3.95	3.76
Red	4.68	4.60	4.69	4.58	4.85	4.80	4.91	4.77	4.20	4.31	4.29	4.01
NIR	5.12	5.02	5.15	5.07	5.08	5.10	5.08	4.97	4.40	4.62	4.45	4.18

4.2 网络化地基综合验证结果及分析

1) 单场地单次地基验证结果及分析

包头场 12 个样本的验证结果如图 6 所示,可以发现,大部分样本的验证结果比较理想。其中,样本 1~6 和样本 8~12 在蓝光波段的 TOA 观测和模拟反射率,样本 1~6 和样本 9~12 在绿光和红光波段的 TOA 观测和模拟反射率,样本 5~6 和样本 8~12 在近红外波段的 TOA 观测和模拟反射率非常接近,相对差异均小于 10%。总体来看,沙地目标的地基验证结果是最理想的。

根据不确定性传递理论^[12],将所有样本的 TOA 反射率总体不确定度和 ZY-3/MUX 的定标不确定度(约为 5%)进行合成,得到模拟值与观测值相对差异的不确定度,如表 3 所示。结果表明,两者的不确定度在蓝光、绿光、红光、近红外波段均呈

递增趋势,其不确定度最大值通常出现在近红外波段,原因是近红外波段是由大气水汽强吸收波段组成。其中,黑色靶标(样本 1~4)的不确定度集中分布在 6.03%~7.17%;灰色靶标(样本 5~8)的不确定度集中分布在 6.40%~7.14%;沙地目标(样本 9~12)的不确定度集中分布在 6.03%~6.81%。

2) 基于加权平均值的综合定权结果

根据(5)式,计算得到 12 个验证样本的权重系数,如表 4 所示。可以发现,12 个验证样本的权重系数都小于 0.1。其中,黑色靶标权重系数最大值为 0.0872,灰色靶标权重系数最大值为 0.0824,沙地目标权重系数最大值为 0.0886。原因是权重系数与调整后的单场地不确定度成反比,而灰色靶标调整后的单场地不确定度最大,黑色靶标调整后的单场地不确定度居中,沙地目标调整后的单场地不

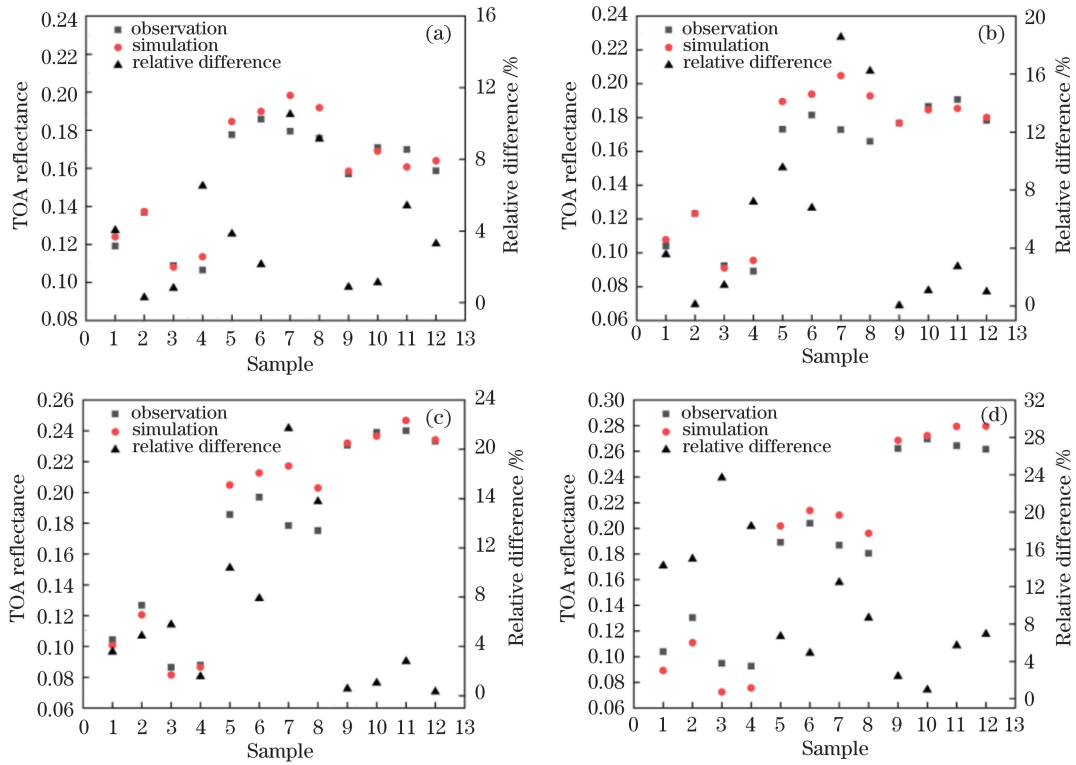


图 6 12 个样本的对比结果。(a)蓝波;(b)绿波;(c)红波;(d) NIR

Fig. 6 Compared results for 12 samples. (a) Blue; (b) green; (c) red; (d) NIR

表 3 模拟值和观测值的相对差异不确定度

Table 3 Uncertainty of relative difference between simulated value and observed value

unit: %

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Blue	6.10	6.07	6.07	6.03	6.45	6.40	6.56	6.43	6.06	6.08	6.12	6.00
Green	6.45	6.40	6.41	6.32	6.73	6.68	6.80	6.70	6.33	6.35	6.37	6.25
Red	6.85	6.79	6.86	6.78	6.96	6.93	7.01	6.91	6.53	6.60	6.59	6.41
NIR	7.15	7.09	7.17	7.12	7.13	7.14	7.13	7.05	6.66	6.81	6.69	6.52

表 4 12 个样本的权重系数

Table 4 Weighting coefficients of 12 samples

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Blue	0.0860	0.0869	0.0869	0.0871	0.0769	0.0781	0.0744	0.0774	0.0871	0.0866	0.0854	0.0871
Green	0.0843	0.0856	0.0853	0.0872	0.0774	0.0786	0.0758	0.0781	0.0872	0.0869	0.0864	0.0872
Red	0.0820	0.0834	0.0817	0.0837	0.0794	0.0801	0.0783	0.0805	0.0878	0.0878	0.0878	0.0878
NIR	0.0801	0.0815	0.0797	0.0808	0.0806	0.0803	0.0806	0.0824	0.0886	0.0883	0.0886	0.0886

确定度最小。

基于 12 个样本的地基验证结果,利用(6)式和(7)式,得到更接近真实值的 KCRV 及其相应的不确定度 $u(y)$,如表 5 所示。可以发现,蓝光、绿光、红光、近红外波段的 KCRV 分别为 3.88%、5.42%、6.14%和 9.81%,对应的不确定度分别为 1.79%、1.87%、1.96%和 2.02%。此外,利用卡方检验对各样本间的相互独立性假设进行总体一致性检验,利

表 5 12 KCRV 及其不确定度

Table 5 KCRV and its uncertainty

unit: %

Band	Blue	Green	Red	NIR
KCRV	3.88	5.42	6.14	9.81
$u(y)$	1.79	1.87	1.96	2.02

用(8)式得到 4 个波段上的卡方值分别为 3.09、9.82、10.27 和 10.40。实验利用的验证样本数为 12,即

对应的自由度为 11,通过卡方检验临界值表得到对应的卡方分布临界值为 19.68。比较发现,4 个波段对应的卡方值都小于 19.68,这表明基于加权平均值的综合定权方法是可行的。

以 KCRV 为参照,根据(9)式计算得到 12 个验证样本的等效度,如表 6 所示。可以发现,样本 1~2、样本 4~6、样本 9~12 的等效度均小于 0.1,表明这些样本的验证结果更接近 KCRV。

表 6 12 个样本的等效度

Table 6 Degrees of equivalence of 12 samples

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Blue	0.0016	0.0360	0.0308	0.0263	0.0004	0.0175	0.0663	0.0525	0.0302	0.0276	0.0153	0.0059
Green	0.0186	0.0531	0.0398	0.0176	0.0413	0.0135	0.1312	0.1079	0.0538	0.0434	0.0269	0.0442
Red	0.0257	0.0127	0.0036	0.0458	0.0422	0.0177	0.1556	0.0963	0.0557	0.0510	0.0336	0.0581
NIR	0.0444	0.0516	0.1388	0.0866	0.0312	0.0491	0.0268	0.0115	0.0740	0.0886	0.0411	0.0288

5 结 论

目前光学载荷地基验证结果因场地不同,导致验证结果之间的一致性难以进行有效对比和评估,因此,提出了一种以验证结果不确定度为权重的基于加权平均值综合定权方法,可得到更接近真实值的 KCRV,并实现了单场地单次验证结果的对比和综合分析。基于包头场黑色靶标、灰色靶标和沙地目标对 ZY-3/MUX 光学载荷进行了实例验证,结果表明,基于 12 个验证样本的 KCRV 在蓝光、绿光、红光、近红外波段上分别为 3.88%、5.42%、6.14%、9.81%,对应的不确定度分别为 1.79%、1.87%、1.96%、2.02%。同时,利用卡方检验对 12 个验证样本间的相互独立性假设进行检验,结果表明本方法是可行的。其中,9 个验证样本的等效度均小于 0.1,表明这些样本的验证结果更接近 KCRV。

参 考 文 献

- [1] Liang S L. Quantitative remote sensing of land surfaces[M]. Fan W J., Transl. Beijing: Science Press, 2009.
梁顺林. 定量遥感[M]. 范文捷,译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] Zhang M, Wei W, Zhang Y N, et al. On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0528002.
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. Hyperion 高光谱遥感器的在轨自动化定标[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0528002.
- [3] Lü J Y, He M Y, Chen L, et al. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801003.
吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801003.
- [4] 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.
- [5] Czaplá-Myers J S, McCorkel J, Anderson N J, et al. The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat8 OLI[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 600-626.
- [6] Liu L, Fu Q Y, Pan Z Q, et al. Site calibration of CBERS-04 WFI using reflectance-based method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(1): 89-96.
刘李, 傅俏燕, 潘志强, 等. CBERS-04 卫星宽视场成像仪在轨场地辐射定标[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(1): 89-96.
- [7] Liu Y K, Ma LL, Wang N, et al. Vicarious radiometric calibration/validation of Landsat-8 operational land imager using a ground reflected radiance-based approach with Baotou site in China [J]. Journal of Applied Remote Sensing. 2017, 11(4), 044004.
- [8] Chen W, Yan L, Li Z Q, et al. In-flight absolute calibration of an airborne wide-view multispectral imager using a reflectance-based method and its validation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(6): 1995-2005.
- [9] Sun L, Guo M H, Xu N, et al. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1869-1877.
孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. 光谱学

- 与光谱分析, 2012, 32(7): 1869-1877.
- [10] Han Q J, Zhang X W, Qiao Z Y, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 127-133.
韩启金, 张学文, 乔志远, 等. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 127-133.
- [11] Woolliams E R, Fox N, Cox M G, et al. Final report on CCPR K1-a: spectral irradiance from 250 nm to 2500 nm[J]. *Metrologia*, 2006, 43(1A): 02003.
- [12] Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)—supplement 1: numerical methods for the propagation of distributions[EB/OL]. [2020-04-02]. http://www.ufrgs.br/medterm/areas/area-i/ISO_GUM_sup1.pdf.
- [13] Yan L L, Cheng Y B, Chen X H, et al. Monte Carlo method to verify the uncertainty A-class evaluation method[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 39(5): 17-20.
严玲玲, 程银宝, 陈晓怀, 等. 蒙特卡洛法验证不确定度 A 类评定方法[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(5): 17-20.
- [14] Khlevnoy B, Sapritsky V, Rougie B, et al. CCPR-S1 supplementary comparison for spectral radiance in the range of 220 nm to 2500 nm[J]. *Metrologia*, 2009, 46(4): S174-S180.
- [15] Li C R, Tang L L, Ma L L, et al. Comprehensive calibration and validation site for information remote sensing [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XL-7/W3: 1233-1240.
- [16] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN5: 2006 update[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6233: 62331F.
- [17] Thuillier G, Hersé M, Labs D, et al. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureka missions[J]. *Solar Physics*, 2003, 214(1): 1-22.
- [18] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. Aeronet's version 2.0 quality assurance criteria[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6408: 64080Q.