

## 交叉定标中的不确定度分析及定标系数计算改进

高帅 李元 白廷柱 张玉香 郑小兵

### Uncertainty analysis in cross-calibration and optimization calculation of calibration coefficients

GAO Shuai, LI Yuan, BAI Ting-zhu, ZHANG Yu-xiang, ZHENG Xiao-bing

引用本文:

高帅, 李元, 白廷柱, 张玉香, 郑小兵. 交叉定标中的不确定度分析及定标系数计算改进[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 568–576. doi: 10.3788/CO.2019–0215

GAO Shuai, LI Yuan, BAI Ting-zhu, ZHANG Yu-xiang, ZHENG Xiao-bing. Uncertainty analysis in cross-calibration and optimization calculation of calibration coefficients[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 568-576. doi: 10.3788/CO.2019-0215

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.2019–0215>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 太阳辐射计的衍射效应修正

Diffraction effect correction of solar radiometer

中国光学. 2018, 11(5): 851 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0851>

#### 星载激光测高仪距离参数地面标定方法

Ground calibration method for distance parameters of satellite-borne laser altimeter

中国光学. 2019, 12(4): 896 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0896>

#### 用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

中国光学. 2019, 12(2): 294 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0294>

#### 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system

中国光学. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

# 交叉定标中的不确定度分析及定标系数计算改进

高 帅<sup>1</sup>, 李 元<sup>2\*</sup>, 白廷柱<sup>1</sup>, 张玉香<sup>2</sup>, 郑小兵<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 中国气象局 国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

3. 中国科学院安徽光学精密仪器研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**一般交叉定标方法是利用普通最小二乘法的回归方式对时间、空间、观测几何、光谱匹配得到的近一致观测数据点对来计算定标系数,该方法忽略了各数据点对的质量差异,降低了定标系数的有效性。针对此问题,本文提出了基于不确定度计算的定标改进方法,利用不确定度分析方法计算数据点对中各辐射基准值的不确定度并给出权重系数,采用加权最小二乘法回归定标系数。选取与在研的基准载荷参数最为接近的 HYPERION 作为辐射基准替代载荷,分别利用普通最小二乘法和加权最小二乘法对 MODIS CH1~7 进行了定标,采用 MODIS 官方定标系数作为真值对定标结果进行验证。结果表明,采用加权最小二乘法对 MODIS 的 1、2、4、5、6、7 通道回归的定标系数更接近真值,定标结果的最大相对误差与传统方法相比降低了 3%~5%,平均相对误差降低了 0.5%~1.5%,说明本文的加权最小二乘法可进一步提升交叉定标精度。

**关键词:**基准载荷; 太阳反射波段; 交叉定标; 加权最小二乘法; 不确定度

中图分类号: TP732 文献标志码: A doi: 10.3788/CO.2019-0215

## Uncertainty analysis in cross-calibration and optimization calculation of calibration coefficients

GAO Shuai<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>2\*</sup>, BAI Ting-zhu<sup>1</sup>, ZHANG Yu-xiang<sup>2</sup>, ZHENG Xiao-bing<sup>3</sup>

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: liyuan@cma.gov.cn

**Abstract:** The general cross-calibration method uses the ordinary least square method to regress the calibration coefficient by data points selected after time, spatial, observation geometrics and spectral collocation.

收稿日期: 2019-11-07; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家重点研发计划课题(No. 2018YFB0504601); 国家自然科学基金资助项目(No. 41271373)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0504601); National Natural Science Foundation of China (No. 41271373)

However, the ordinary least square algorithm would reduce the validity of the regressed result because of ignoring the differences in quality between each data point. An optimized method based on the calculation of uncertainty was proposed. This uncertainty analysis method was used to quantify the uncertainty of the radiation standard value for each data point, and their weight factors were calculated. The weighted least square method was used to regress the calibration coefficient. Using HYPERION as a radiance standard, the calibration coefficients of MODIS channels 1 to 7 were each regressed using the ordinary least squares method and the weighted least squares method. The regressed coefficients were compared with the official calibration coefficient. The results show that the calibration coefficients calculated using the weighted least squares method were closer to the official coefficients of MODIS channels 1, 2, 4, 5, 6, and 7. The maximum relative error reduced to 3%~5% and the average relative error decreased to 0.5%~1.5% compared with the ordinary least squares method, which indicates that the weighted least squares method proposed in this paper can further improve the calculation accuracy of cross-calibration.

**Key words:** radiance standard; solar reflective band; cross-calibration; weighted least square; uncertainty

## 1 引 言

在卫星遥感器的发射过程中,周围环境的剧烈变化将导致其物理性能发生改变,在轨后,随着时间的推移其性能也会出现不同程度的衰减,因此需要对遥感器重新进行在轨定标以保证其观测数据的科学准确性<sup>[1]</sup>。

目前,太阳反射波段(RSB)卫星载荷的在轨定标精度在 $10^{-2}$ 量级<sup>[2]</sup>,与观测气候变化所需的 $10^{-3}$ 量级的精度水平还存在一定差距<sup>[3]</sup>,考虑到进一步提高现有定标方法精度的难度较大,各国均将发展空基溯源标准计划列入日程,通过在太空建立辐射基准并采用交叉定标的方法将辐射基准进行传递,从而提高在轨定标精度水平。国际上,已经有 NASA 主导的 CLARREO 计划和 NPL 主导的 THRUTH 计划<sup>[4-6]</sup>。我国近年来也开展了国产高精度在轨辐射基准的相关研制计划<sup>[4-8]</sup>。

交叉定标方法是将在轨辐射基准传递至其他卫星的重要方法之一,是一种利用已有的定标精度较高的卫星作为参考对其他卫星进行定标的方法,其不受定标场景的限制,定标成本低,定标频次高<sup>[1,9]</sup>。目前国际上关于交叉定标的研究已经取得了诸多成果<sup>[1,9]</sup>,针对红外波段(IR)已经建立起基于 METOP IASI 和 AQUA AIRS 的交叉定标系统<sup>[9]</sup>,在 RSB 波段普遍以定标手段丰富且定标精

度较高的 AQUA MODIS 作为辐射基准,传递至其他卫星,但 AQUA MODIS 已在轨运行了 16 年,目前, S-NPP VIIRS 已正成为 RSB 波段交叉定标基准的新选择<sup>[10]</sup>。综合分析可知目前 RSB 波段交叉定标能够达到的平均精度水平在 5% 左右<sup>[1,2,11]</sup>。

一般的交叉定标方法是经过近一致观测筛选匹配后的数据点对代入回归模型中,然后使用普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)得出定标系数。而根据实际的交叉定标流程知,各项匹配环节对基准辐射值的影响有差异,使得各数据点对的质量不同,此时,若继续使用 OLS 回归定标系数将会降低结果的有效性<sup>[12-13]</sup>。针对以上问题,本文提出一种基于不确定度分析的交叉定标改进方法,利用加权最小二乘法(Weighted Least Square, WLS)回归定标系数,从而提高定标结果的准确性。

## 2 方 法

本文将 RSB 高光谱成像仪作为参考仪器对宽通道成像仪进行交叉定标,分析交叉定标过程中的辐射误差传递源,通过蒙特卡罗法量化计算各数据点对中辐射基准值的不确定度,从而解算出权重系数矩阵,利用 WLS 方法回归定标系数,并通过与待定标仪器官方定标系数进行比对来检验 WLS 方法的有效性。

## 2.1 辐射基准替代载荷的选取

因现阶段的基准载荷尚在研制中, 缺乏可用数据, 为提供具体的算法实现以及验证本文所提出 WLS 方法的有效性, 本文通过比较现有的常见 RSB 波段高光谱载荷参数(表 1), 拟选用与基准载荷预定指标(光谱分辨率优于 10 nm、光谱范围在 380~2 350 nm 内)最接近的 EO-1 卫星上搭载的 HYPERION 作为参考载荷, 实现具体的定标算法。

表 1 与基准载荷指标相近的高光谱成像仪参数

Tab. 1 Hyperspectral imager's parameters similar to the radiance standard remote sensor index

载荷名称	光谱覆盖范围/nm	光谱分辨率/nm	空间分辨率/m	幅宽/km	通道数
HICO	380~960	5.7	100	—	—
HYPERION	400~2 500	10	30	7.7	242
LAC	930~1 580	2~6	250	185	256
HIS	450~950	4	100	50	128

由于 TERRA MODIS 与 HYPERION 的轨道交点较多, 易于满足交叉定标的时空匹配条件, 且其定标精度高, 定标系数可以用于验证本文算法, 同时产品数据易获取。因此, 本文利用 HYPERION 作为参考仪器对 TERRA MODIS 1~7 通道进行定标。选取 2012 年 7 月 4 日起连续 10 天内 HYPERION 和 MODIS 的观测数据作为基础数据集<sup>[14-15]</sup>, 通过交叉定标各匹配环节获取满足近一致观测的数据点对, 从而建立起 MODIS 1~7 通道的回归模型。

## 2.2 定标回归模型

交叉定标流程如图 1 所示, 通过时间、空间、观测几何、光谱匹配环节选取多个满足近一致观测的数据点对, 建立起回归模型, 通过线性回归获得待定标仪器的定标系数。值得注意的是, 在使用高光谱遥感器作为参考仪器对宽通道仪器进行定标时, 通常直接采用光谱卷积的方式对其他宽通道式成像仪进行光谱匹配。

设筛选后满足近一致观测的数据点对共  $N$  个, 将来自参考仪器和待定标仪器的数据分别用  $N \times 1$  的列向量  $L_{\text{ref}}$  和  $DN_{\text{cal}}$  表示,  $(L_{\text{ref}i}, DN_{\text{cal}i})$  代表一个数据点对, 回归模型可用矩阵表示为:

$L_{\text{ref}} = DN_{\text{cal}}\beta$ , 即

$$\begin{bmatrix} L_{\text{ref}1} \\ L_{\text{ref}2} \\ \vdots \\ L_{\text{ref}N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & DN_{\text{cal}1} \\ 1 & DN_{\text{cal}2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & DN_{\text{cal}N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中,  $\beta_0$  和  $\beta_1$  为定标系数, 将定标系数用  $2 \times 1$  的列向量  $\beta$  表示。

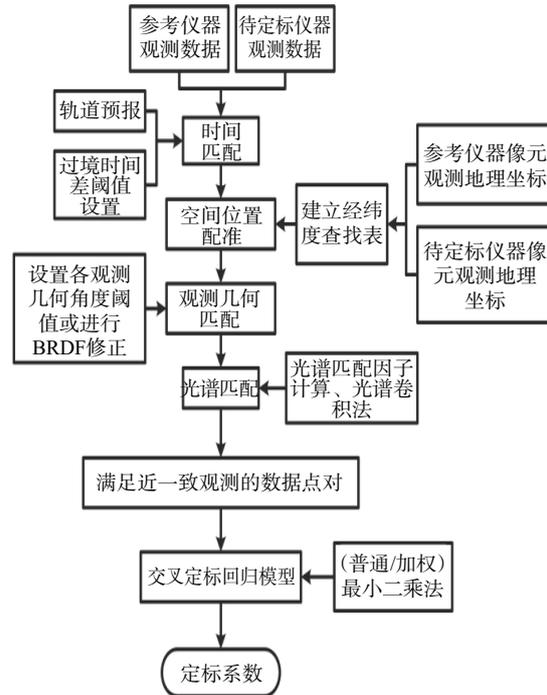


图 1 交叉定标流程图

Fig. 1 Flowchart of cross-calibration approach

一般采用 OLS 对定标系数矩阵进行求解, 得出待定标遥感器的定标系数。OLS 通过寻找系数矩阵使得残差平方和最小来对模型参数进行估计<sup>[13]</sup>, 可以得出  $\beta$  的解为:

$$\beta = (DN_{\text{cal}}^T DN_{\text{cal}})^{-1} DN_{\text{cal}}^T L_{\text{ref}}. \quad (2)$$

考虑交叉定标回归模型, 由于定标过程中各项匹配环节对不同数据点对中基准辐射值的影响不同, 使得获取的各数据点对中辐射基准值的不确定度存在差异, 即数据点对的质量存在差异, 此时若继续使用 OLS 来回归定标系数将会降低定标系数的有效性, 影响定标精度, 此外, 由于交叉定标时各数据点对的获取过程相互独立, 各数据点对相互之间没有影响, 因此本文采用 WLS 法来计算定标系数, 提高定标系数的有效性。

### 2.3 加权最小二乘法

加权最小二乘法通过给获取的每个交叉定标数据点对加上权重系数提高回归结果的有效性, 该权重系数可以反映该定标数据点对的质量以及对定标曲线回归的影响大小, 数据点对对应的权重系数一般用数据点对中自变量不确定度平方的倒数表示<sup>[12-13]</sup>。结合交叉定标回归模型, 权重系数用数据点对中辐射基准值的不确定度平方的倒数表示, 即获取的数据点对中辐射基准值的不确定度越大, 说明数据点对的质量越差, 对应权重系数越小, 则该数据点对对定标系数回归的影响就越小, 第  $i$  个定标数据点对对应的权重系数  $w_i$  可表示为  $1/u^2(L_{ref i})$ 。WLS 法通过最小化广义残差平方和求出模型系数<sup>[12-13]</sup>, 可表示为:

$$\beta = (DN_{cal}^T W DN_{cal})^{-1} DN_{cal}^T W L_{ref}, \quad (3)$$

式中,  $W$  为权重系数矩阵, 结合定标模型, 权重系数矩阵可以表示为:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{u^2(L_{ref 1})} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{u^2(L_{ref 2})} & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{u^2(L_{ref N})} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在交叉定标时, 要使用 WLS 计算定标系数, 则需要计算定标数据点对中辐射基准值的不确定度, 具体的计算方法如下文。

### 2.4 交叉定标误差传递源分析以及不确定度量化方法

在交叉定标数据点对的筛选过程中,  $L_{ref}$  的误差主要来源于以下几点: 参考仪器自身观测的不确定度、时相匹配中过境时间的差异、空间匹配时空间分辨率不一致和空间位置匹配不当产生的误差、地表方向性即观测几何匹配不当引起的误差、光谱匹配时光谱响应函数的衰减和波长漂移等引起的误差<sup>[2,16]</sup>。

在待定标仪器单个像元观测视场内, 将与待定标仪器满足时间, 空间位置, 且观测角度一致的像元输出值设为  $L_0$ , 经过近一致观测后配准的数据点对中辐射基准值表示为  $L_{ref}$ , 并将各环节不确定度对最终获取的辐射基准值的影响看作乘性影

响, 因此, 可在  $L_0$  基础上添加各项乘性因子(参考仪器自身  $K_{ref}$ 、时间匹配  $K_{time}$ 、空间匹配  $K_{space}$ 、观测几何匹配  $K_{angle}$ 、光谱匹配  $K_{spectral}$ ), 则  $L_{ref}$  表示为:

$$L_{ref} = L_0 \cdot K_{ref} \cdot K_{time} \cdot K_{space} \cdot K_{angle} \cdot K_{spectral}. \quad (5)$$

则根据不确定度的表达式<sup>[17]</sup>, 辐射基准值的不确定度可以表示为:

$$\left(\frac{u(L_{ref})}{L_{ref}}\right)^2 = \left(\frac{u(K_{ref})}{K_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_{time})}{K_{time}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_{space})}{K_{space}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_{angle})}{K_{angle}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_{spectral})}{K_{spectral}}\right)^2, \quad (6)$$

式(6)中,  $u(K_{ref})$ 、 $u(K_{time})$ 、 $u(K_{space})$ 、 $u(K_{angle})$ 、 $u(K_{spectral})$  为对应各项  $K$  因子的不确定度, 采用蒙特卡罗法(MCM)计算各  $K$  因子的不确定度。MCM 法在原有输入数据的基础上经过添加扰动项进行重复试验得出输出量的概率分布后, 给定置信概率, 再根据概率分布进行统计得出置信区间, 从而得出输出量的不确定度<sup>[17]</sup>。MCM 法中各项  $K$  因子不确定度的具体计算方法描述如下。

参考仪器自身观测不确定度引起的  $K_{ref}$  不确定度, 采用 MCM 法结合参考仪器自身观测值的不确定度, 在参考仪器观测值的基础上加入适当的扰动, 输入交叉定标流程, 重复试验, 最终得出  $K_{ref}$  的分布, 给定置信率, 从而得出  $K_{ref}$  的不确定度  $u(K_{ref})$ 。

对于时相匹配不当引起的  $K_{time}$  因子的变化, 主要考虑当地气象条件变化的影响, 利用大气辐射传输模型, 结合过境时间差内当地气象参数的变化, 利用 MCM 法得出  $K_{time}$  的分布, 结合置信率给出置信区间, 从而得出其不确定度  $u(K_{time})$ 。

空间位置配准不当则采用滑动窗口法<sup>[16]</sup> 进行分析, 使得两卫星图像在原有的配准基础上发生相对位移, 分析辐亮度值的变化, 利用 MCM 法得出  $K_{space}$  分布及其不确定度  $u(K_{space})$ 。

观测几何匹配不当主要受地表方向的影响, 结合当地的 BRDF 模型和实际的观测几何角度的变化, 输入辐射传输模型, 利用 MCM 方法得出  $K_{angle}$  的分布及其不确定度  $u(K_{angle})$ 。

光谱匹配主要考虑遥感器光谱响应的变化, 通过在已知光谱响应函数的基础上适当地加入扰动, 得出  $K_{spectral}$  的分布及其不确定度  $u(K_{spectral})$ 。

在得出各项  $K$  因子的不确定度后,利用公式(6)得到辐射基准值的合成不确定度,针对每个数据点对都计算其辐射基准值的不确定度,从而得出权重系数矩阵作为 WLS 法回归模型系数。

### 3 验证及比较分析

以 HYPERION 作为参考仪器对 TERRAMODIS 的 1~7 通道进行定标,验证 WLS 方法的有效性。为得出 WLS 法的权重系数矩阵,需要量化定标数据点对中辐射基准值的不确定度。以 2012 年 7 月 10 日卫星过境 Libya4 定标场地经纬度坐标(28.55°N, 23.67°E)对应的数据点对为例,展示单个数据点对中辐射基准值的不确定度的获取过程。图 2(左)、2(右)分别为 HYPERION 和 MODIS 过境 Libya4 场地时的影像。

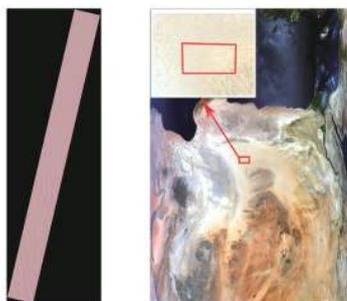


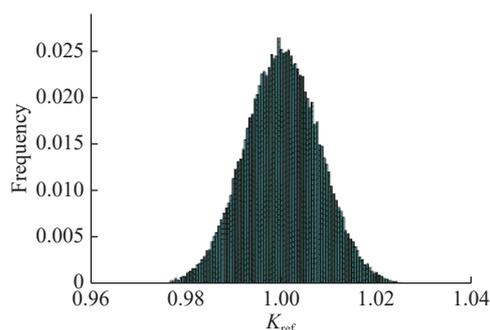
图 2 2012 年 7 月 10 日 HYPERION(左)和 MODIS(右)过境 Libya4 场地时的影像

Fig. 2 Images of HYPERION(left) and MODIS(right) when they passed the Libya4 site on 10th July, 2012

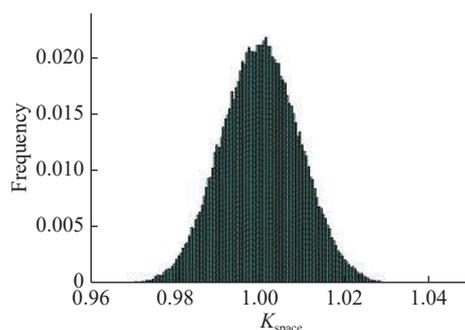
在前文的不确定度分析方法中,关于时间和观测几何匹配引入的不确定度计算需要获取地面配合测量的气象参数,并将其输入至大气传输模型,本文通过选取晴朗无云场景的观测图像以及设置尽量小的过境时间差和观测几何角度差阈值,减小时相匹配和观测几何匹配对数据点对中基准辐射值的影响。对于所有的数据点对中的辐射基准值,忽略了时相和观测几何匹配引入的误差,使  $K_{\text{time}}$  和  $K_{\text{angle}}$  的不确定度近似为零。

已知 HYPERION 自身观测相对不确定度为 3.4%<sup>[11]</sup>;认为 MODIS 和 HYPERION 的空间位置匹配误差不超过单个 MODIS 像素大小,即空间匹配的误差在 1 km 内;MODIS 在轨光谱响应的

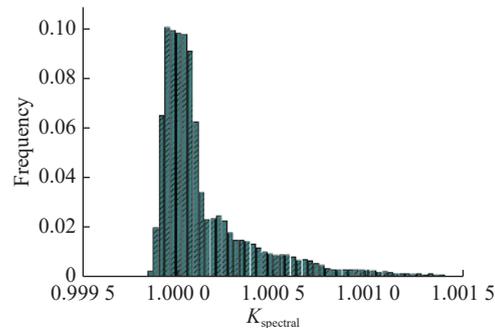
波长漂移在  $-2\sim 2$  nm 范围内,响应度变化在 5% 范围内<sup>[18]</sup>。(对获取的所有数据点对均使用以上条件)采用蒙特卡罗法分别计算  $K_{\text{ref}}$ 、 $K_{\text{space}}$  和  $K_{\text{spectral}}$  的分布,求出置信率为 95% 时对应的置信区间,求得各因子对应的不确定度,忽略时间和观测几何引入的不确定度,计算合成不确定度。针对 MODIS CH01 通道 Libya4 定标场获取的数据点对的辐射基准值,计算其不确定度,获得的各因子的分布如图 3(a)、3(b)、3(c)所示。



(a)  $K_{\text{ref}}$  的概率分布图  
(a) The probability density distribution of  $K_{\text{ref}}$



(b)  $K_{\text{space}}$  的概率分布图  
(b) The probability density distribution of  $K_{\text{space}}$



(c)  $K_{\text{spectral}}$  的概率分布图  
(c) The probability density distribution of  $K_{\text{spectral}}$

图 3 MCM 法各项  $K$  因子概率分布图

Fig. 3 The probability density distribution of  $K$ -factors of each term of MCM

在该数据点对不确定度的量化过程中, 由空间匹配不当引入的不确定度占比最大,  $K_{space}$  的相对不确定度为 1.87%, 其次是遥感器自身观测精度的影响,  $K_{ref}$  的相对不确定度为 1.58%, 由光谱匹配不当引入的不确定度占比最小,  $K_{spectral}$  的相对不确定度为 0.067%。图 3(c) 可以看出, 由光谱匹配不当引起的  $K_{spectral}$  概率分布呈偏斜状, 这是由 MODIS CH1 的光谱响应函数和 HYPERION 观测输出的高光谱辐亮度曲线线型共同作用导致的。针对不同场景获得的高光谱辐亮度曲线不同, 在光谱匹配不确定度分析时获得的  $K_{spectral}$  概率分布图也不尽相同。最终计算得出 MODIS CH01 通道在 Libya4 定标场获取的数据点对中辐射基准值总的相对不确定度为 2.45%。

对所有的数据点对重复上述计算过程, 得出每个数据点对中辐射基准值的不确定度, 从而得出权重系数矩阵, 利用 WLS 和 OLS 分别计算 HYPERION 对 MODIS CH 1~7 通道的定标系数  $\beta_{WLS}$  和  $\beta_{OLS}$ , 并与 MODIS 产品数据中的定标系数  $\beta$  进行比对。为评价两种方法计算出的定标系数的定标效果, 本文利用 WLS 和 OLS 定标系数对同一 DN 值序列进行定标并与官方定标系数的定标结果进行比对, 并分别计算定标结果与官方定标结果的平均相对误差  $\varepsilon$  以及均方根误差 RMSE。设 DN 值序列共包含  $N$  个点, 对 DN 值序列中第  $i$  个 DN 值采用官方系数定标后的辐亮度值为  $L_{0i}$ , 经计算, 获取的系数定标后的辐亮度值为  $L_i$ , 则相对差异计算公式为:

$$\epsilon_i = \frac{|L_i - L_{0i}|}{L_{0i}}, \quad (7)$$

平均相对误差计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum \epsilon_i, \quad (8)$$

均方根误差计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (L_i - L_{0i})^2}. \quad (9)$$

以 HYPERION 对 MODIS CH01 通道定标为例, 所采用的 WLS 和 OLS 的回归曲线如图 4(彩图见期刊电子版) 所示, WLS 和 OLS 计算的定标

系数分别为  $(-0.3253, 0.0261)$ 、 $(-1.9025, 0.0261)$ , 官方定标系数为  $(0.0, 0.0272)$ , 可以看出 WLS 的定标系数要更接近官方定标系数, 同时可以发现两种方法回归得到的定标系数的差异主要体现在截距  $\beta_0$  上。将 WLS 和 OLS 得到的定标系数对同一 DN 值序列进行定标并计算其与官方定标结果的相对差异, 如图 5 所示。从两种回归方法获得的定标系数与官方定标系数差异结果来看, 采用 WLS 计算的定标系数的定标相对误差在低端明显减少, 最大由 9.12% 降低到 4.86%, 平均相对误差由 5.89% 降低到 4.30%, 均方根误差由  $6.905 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$  降低至  $5.455 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ , 说明 WLS 方法有效提高了该通道的定标曲线拟合精度。

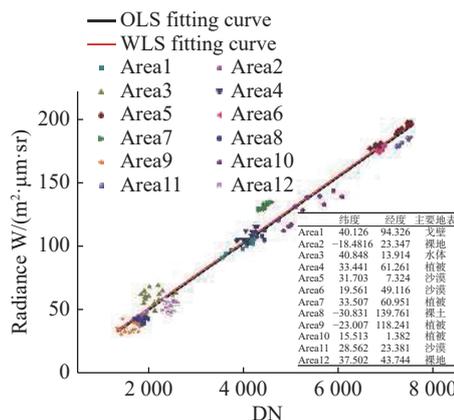


图 4 HYPERION 对 MODIS CH01 定标数据点对以及 OLS 和 WLS 的回归定标线

Fig. 4 The data points of the MODIS CH01 and regression results of WLS and OLS

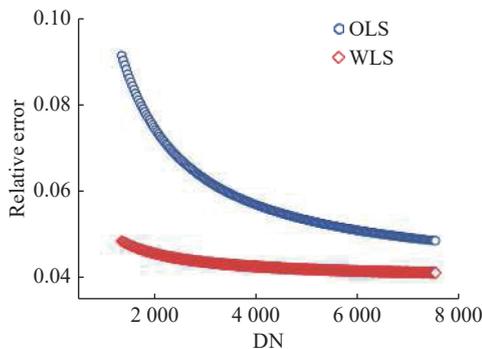


图 5 WLS 和 OLS 计算的回归系数对同一 DN 值序列的定标结果与官方定标结果的相对误差

Fig. 5 The relative error between the regressed coefficients by WLS and OLS calibrating a DN sequence with the official calibrated coefficients

HYPERION 对 MODIS CH1~7 通道的 WLS 和 OLS 计算定标系数结果为  $\beta_{\text{WLS}}$  和  $\beta_{\text{OLS}}$ 、官方定标系数  $\beta$ 、定标评价参数最大相对误差  $\epsilon_{\text{max}}$ 、平

均相对误差  $\epsilon$  以及均方根误差 RMSE 的计算结果如表 2 所示。

表 2 WLS 和 OLS 对 MODIS CH1~7 通道的定标系数回归结果  
Tab. 2 The calibration result of MODIS CH1~7 by WLS and OLS

MODIS CH	1	2	3	4	5	6	7
$\beta_0$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
$\beta_1$	0.027 2	0.010 2	0.036 1	0.024 9	0.005 9	0.002 7	0.000 8
$\beta_{\text{OLS } 0}$	-1.902 5	-1.951 6	-4.023 8	-0.900 5	-2.885 8	-0.746 6	-0.496 0
$\beta_{\text{OLS } 1}$	0.026 1	0.009 6	0.031 8	0.023 4	0.005 3	0.002 4	0.000 8
$\beta_{\text{WLS } 0}$	-0.325 3	-0.288 3	-5.891 5	-2.501 9	-2.379 2	-0.730 2	-0.364 4
$\beta_{\text{WLS } 1}$	0.026 1	0.009 6	0.032 5	0.024 0	0.005 3	0.002 4	0.000 8
$\epsilon_{\text{max OLS}}$	0.091 2	0.110 1	0.215 4	0.062 9	0.213 1	0.142 8	0.229 2
$\epsilon_{\text{max WLS}}$	0.048 6	0.065 4	0.238 6	0.042 0	0.160 9	0.106 0	0.170 2
$\epsilon_{\text{OLS}}$	0.058 9	0.076 1	0.164 7	0.068 9	0.149 9	0.126 5	0.071 6
$\epsilon_{\text{WLS}}$	0.043 0	0.060 4	0.164 3	0.064 9	0.138 8	0.119 4	0.054 4
$RMSE_{\text{OLS}}$	6.904 6	7.364 8	16.573 1	6.934 6	8.633 2	3.893 7	0.466 3
$RMSE_{\text{WLS}}$	5.455 2	6.254 1	16.095 9	5.896 0	8.061 9	3.667 8	0.359 7

从表 2 数据中可以看出,除 MODIS CH3 通道 WLS 和 OLS 的定标评价参数相近外,其余通道 WLS 的定标效果均要好于 OLS 的定标效果。不同的 MODIS 通道在进行光谱匹配后获取的定标数据点对不同,各项  $K$  因子的不确定度计算结果也存在差异,因此 WLS 方法获取的定标结果也不尽相同。对于 MODIS 的 1、2、4、5、6、7 通道, WLS 方法回归得到的定标系数与 OLS 相比,其定标平均相对误差的降幅在 0.5%~1.5% 范围内,在观测低亮度目标时,其定标相对误差降幅在 3%~5% 范围内。针对 MODIS CH3 通道 WLS 方法定标效果不理想的分析原因如下: MODIS CH3 通道带宽较窄(19 nm 左右),仅对应 2 个高光谱通道,相对于其它通道可对应 4~9 个高光谱通道而言,CH3 通道采用光谱卷积得出辐射基准值的准确性较差,各项  $K$  因子的不确定度计算准确度下降权重系数计算不理想,导致最终 WLS 回归结果准确性下降。同时,可以发现采用 WLS 和 OLS 得到的回归系数与官方系数相比,斜率差异不明显,主要体现在截距的差异上。亮度较低

的目标一般存在较大的不确定度,而 WLS 方法的引进可以有效修正低亮度目标对截距的干扰,使定标结果更接近真实值。还需要指出的是, HYPERION 载荷自身的定标精度低于 MODIS 载荷的定标精度,因此, WLS 计算所得的 MODIS 定标系数与官方定标系数还存在一定差异,待我国自研的高精度太阳反射波段高光谱基准载荷在轨后,可使用其作为参考仪器向 MODIS 传递溯源基准,将有望消减该差异,从而更准确地检验 WLS 方法的优点。

## 4 结 论

本文提出的基于不确定度分析的加权最小二乘法的交叉定标方法,在得出近一致观测的数据点对后,利用蒙特卡罗法对各项匹配环节对辐射基准值的影响进行量化,针对每个数据点对都可算出其辐射基准值的不确定度,利用不确定度平方的倒数作为权重系数,采用 WLS 方法回归了定标系数。以 HYPERION 作为参考基准载荷,对

MODISCH1~7通道的定标结果表明,1、2、4、5、6、7通道采用WLS法回归的定标系数的评价参数要优于OLS法,其中定标系数的定标平均相对误差的降幅在0.5%~1.5%范围内,在观测低亮度目标时的定标相对误差降幅在3%~5%范围内,说明WLS方法有效地提高了定标系数的精度,验证了基于不确定度的WLS方法的有效性。

在后续的工作中将进一步评估通道带宽较窄,对应的高光谱通道有限时,基于高光谱地物谱型库的光谱匹配方法对应的不确定度,同时在计

算不确定度时进一步分析时间匹配和观测几何匹配引入的不确定度,从而进一步提高权重系数和定标数据点对的计算精度,提升WLS的回归效果。

致谢:本文由国家重点研发计划课题(2018YFB0504601)以及国家自然科学基金委员会面上项目(41271373)资助。感谢 ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov 提供 MODIS 数据及 earthexplorer.usgs.gov 提供 HYPERION 数据。

### 参考文献:

- [1] CHANDER G, HEWISON T J, FOX N, *et al.*. Overview of intercalibration of satellite instruments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1056-1080.
- [2] LUKASHIN C, WIELICKI B A, YOUNG D F, *et al.*. Uncertainty estimates for imager reference inter-calibration with CLARREO reflected solar spectrometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1425-1436.
- [3] *National Research Council. Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond*[M]. Washington, DC, USA: National Academies Press, 2007.
- [4] CEOS, W M O, GSICS, *et al.*. SI-traceable space-based climate observing system workshop[R]. London, UK: NPL, 2019.
- [5] GORROÑO J, BANKS A C, FOX N P, *et al.*. Radiometric inter-sensor cross-calibration uncertainty using a traceable high accuracy reference hyperspectral imager[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 393-417.
- [6] ROITHMAYR C M, LUKASHIN C, SPETH P W, *et al.*. CLARREO approach for reference intercalibration of reflected solar sensors: on-orbit data matching and sampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6762-6774.
- [7] 王玉鹏, 胡秀清, 王红睿, 等. 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[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1807-1812.  
WANG Y P, HU X Q, WANG H R, *et al.*. Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1807-1812. (in Chinese)
- [8] 陈申玮, 徐娜, 戴铁, 等. 空间辐射基准传递不确定性的光谱敏感性分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0128004.  
CHEN SH W, XU N, DAI T, *et al.*. Sensitivity of intercalibration uncertainty on spectral sampling of space-based radiance standard[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0128004. (in Chinese)
- [9] 赵维宁, 胡秀清, 方伟, 等. 卫星光学仪器辐射交互定标方法的应用和发展[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1921-1931.  
ZHAO W N, HU X Q, FANG W, *et al.*. Development and applications of intercalibration for satellite optical instruments[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1921-1931. (in Chinese)
- [10] XIONG X X, ANGAL A, BUTLER J, *et al.*. Global space-based inter-calibration system reflective solar calibration reference: from Aqua MODIS to S-NPP VIIRS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9881: 98811D.
- [11] 徐文斌, 郑小兵, 易维宁. 基于超光谱成像仪Hyperion的交叉定标方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0528002.  
XU W B, ZHENG X B, YI W N. Cross-calibration method based on hyperspectral imager Hyperion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0528002. (in Chinese)
- [12] HUNG K W, SIU W C. Improved image interpolation using bilateral filter for weighted least square estimation[C]. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Image Processing, IEEE*, 2010.

- [13] PETRAKOS G, ARTELARIS P. European regional convergence revisited: a weighted least squares approach[J]. *Growth and Change*, 2009, 40(2): 314-331.
- [14] USGS. EO-1 HYPERION L1GST product[EB/OL]. USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [2019-03-24].
- [15] NASA. TERRA MODIS Level 1B Calibrated Radiances[EB/OL]. NASA EOSDIS LP DAAC. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>.
- [16] CHANDER G, HELDER D L, AARON D, *et al.*. Assessment of spectral, misregistration, and spatial uncertainties inherent in the cross-calibration study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1282-1296.
- [17] JCGM. JCGM 101: 2008 Evaluation of measurement data – supplement 1 to the “guide to the expression of uncertainty in measurement” – propagation of distributions using a Monte Carlo method[S]. *BIPM Joint Committee for Guides in Metrology*, 2008.
- [18] XIONG X, CHE N, XIE Y, *et al.*. Four-years of on-orbit spectral characterization results for Aqua MODIS reflective solar bands[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6361: 63610S.

#### 作者简介:



高 帅(1995—),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为遥感器交叉定标。E-mail: arcbeacon@foxmail.com



李 元(1978—),女,北京丰台人,工学博士,国家卫星气象中心副研究员,主要从事在轨遥感器定标与产品反演等方面的研究。E-mail: liyuan@cma.gov.cn