

基于卡尔曼滤波的 GF1-WFV 时间序列定标及验证

豆新格¹, 潘军¹, 高海亮^{2,3*}, 王凯司¹, 孙晗¹, 姜鹏¹, 李小英²¹ 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130012;² 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;³ 中国科学院大学, 北京 100094

摘要 为了监测卫星传感器在轨辐射性能的变化、提高定标的频次和精度、满足新时期定量遥感的应用需求,提出了一种基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法。以敦煌辐射校正场为试验场,获取高分一号宽视场成像仪(GF1-WFV)在 2013—2020 年间多景敦煌场地影像,先对影像灰度值进行归一化处理,利用标准差剔除异常值,筛选出有效影像;采用基于稳定目标的历史数据时间序列定标方法计算定标系数,并利用卡尔曼滤波思想对定标系数进行进一步处理,最后分别将本文定标结果与中国资源卫星应用中心(CCRS)定标结果、Landsat8 定标结果进行对比。结果表明:高分一号卫星传感器在轨运行期间的最大年衰减率不超过 0.3%,说明传感器未发生明显衰减;通过对定标结果的对比验证,发现基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法所获得的定标结果比 CCRS 定标结果的精度高,其中各波段的平均相对误差最大可减小 16.14%。由此可见基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法具有较好的可靠性和稳定性。

关键词 大气光学; 高分一号; 宽视场成像仪; 时间序列定标; 卡尔曼滤波; 高精度; 敦煌定标场

中图分类号 TP722.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1201003

Time-Series Calibration and Verification of GF1-WFV Based on Kalman Filtering

Dou Xinge¹, Pan Jun¹, Gao Hailiang^{2,3*}, Wang Kaisi¹, Sun Han¹, Jiang Peng¹, Li Xiaoying²¹ College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;² Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract This paper proposes a time-series calibration method based on Kalman filtering to monitor the changes in the on-orbit radiometric performance of satellite sensors, increase the frequency and accuracy of calibration, and meet the application requirements of quantitative remote sensing in the new era. Taking the Dunhuang radiation calibration field as the test field, we obtain the multi-scene images of the GF1 wide field of view (GF1-WFV) sensor in the sites of Dunhuang from 2013 to 2020. First, the gray values of the images are normalized, and the standard deviation is used to eliminate outliers; thus, valid images are filtered out. Then, the time-series calibration method based on stable targets with historical data is employed to calculate the calibration coefficients, and the idea of Kalman filtering is applied to further process the calibration coefficients. Finally, the calibration results in this paper are compared with the calibration results of the China Centre for Resources Satellite Data and Application (CCRS) and Landsat8 calibration results separately. The results reveal that the maximum annual attenuation rate of the GF1 sensor during the on-orbit operation period does not exceed 0.3%, which indicates that the sensor has not significantly attenuated. Through the comparison and verification of the calibration results, we find that the calibration results obtained by the time-series calibration method based on Kalman filtering are more accurate than

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-04; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504900, 2018YFB0504903)

通信作者: *gaohl@radi.ac.cn

those of CCRS, and the maximum reduction in the average relative error of each band is 16.14%. This demonstrates that the time-series calibration method based on Kalman filtering has good reliability and stability.

Key words atmospheric optics; GF1; wide field of view imager; time-series calibration; Kalman filtering; high accuracy; Dunhuang calibration field

1 引言

卫星传感器在轨运行期间会受到太空环境和元器件老化等各方面因素的影响,其辐射特性不可避免地会出现持续性衰变^[1]。因此,为保证遥感数据产品的高精度和稳定性,需要通过在轨辐射定标的方式对卫星载荷的辐射响应进行标定,以确保传感器观测数据的质量^[2]。对于量化精度较高的应用,长时间不进行定标系数的更新会直接影响遥感产品量化的精度,同时还可能使地物的辐射特性变化无法被准确地识别^[3]。所以,开展卫星传感器的时间序列定标对准确掌握卫星载荷的实际在轨工作状态、及时采取校正措施具有重要意义。

目前,已有相关学者针对国产陆地观测卫星开展了时间序列定标方面的研究。国家卫星气象中心孙凌等^[4]和王玲等^[5],以及中国科学院安徽光学精密机械研究所邱刚刚等^[6]利用多个稳定目标场地分别对风云三号 A 星 (FY-3A) 中分辨率光谱成像仪 (MERSI)、风云三号 C 星 (FY-3A) 中分辨率光谱成像仪 (MERSI)、高分一号宽视场成像仪 (GF1-WFV) 进行了长时序定标,得到了较好的定标结果。高海亮等^[7]使用沙漠场景法、稳定目标法和交叉定标法对 CBERS02B 星的 CCD 相机开展时间序列定标,并比较了三种方法的优缺点;周珂等^[8]通过交叉定标的方法开展了 GF1-WFV 时间序列交叉定标。赵春艳等^[9]采用 2018 年全年过境敦煌辐射校正场的 Suomi-NPP VIRRS 传感器的 51 次有效定标卫

星影像数据,实现 Suomi-NPP VIRRS 的长时序高频次绝对辐射定标。

以上时间序列定标中每次定标都基于一景影像,未考虑不同时相定标系数之间的相关性。然而,传感器的在轨状态是一个稳定的、连续的、随时间逐步变化的过程。因此,多景影像的定标系数之间存在一定的相关关系,每个定标系数不仅与当前时刻的定标有关,还和上一时相的定标相关。为保证卫星传感器获取的辐亮度产品的质量精度,本文提出了一种基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法,实现卫星传感器的时间序列定标,这为卫星传感器的高精度时间序列定标提供一种新思路。

2 数据获取与处理

2.1 研究区与数据

敦煌校正场是我国国家级遥感卫星辐射校正场,具有地表稳定、大气干洁等优点,是在轨定标的理想场地。地表主要由多种岩石碎屑、沙子和少量黏土组成,地表光谱反射率在 350~1000 nm 波段相对稳定,大气气溶胶类型介于沙漠型和大陆型之间,接近沙漠型^[7]。

本文通过中国资源卫星应用中心 (CCRS) 数据服务官网,共下载了高分一号卫星 2013—2020 年的敦煌场地 567 景 WFV 影像,分别对 4 个 WFV 传感器的各个波段开展时间序列定标。其中,WFV 传感器的参数如表 1 所示,光谱响应函数如图 1 所示,获取的 WFV 影像详细数量如表 2 所示。

表 1 WFV 传感器的参数

Table 1 Parameters of WFV sensor

Item	Blue	Green	Red	Near infrared
Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Spectral range /nm	450–520	520–590	630–690	770–890
Center wavelength /nm	482.67	553.92	656.88	824.34
Spatial resolution /m	16	16	16	16

表 2 WFV 影像数量

Table 2 Number of WFV images

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
WFV1	9	33	26	32	12	3	14	12
WFV2	14	31	29	21	12	5	9	18
WFV3	17	25	24	28	12	16	12	11
WFV4	14	40	27	25	6	8	14	8

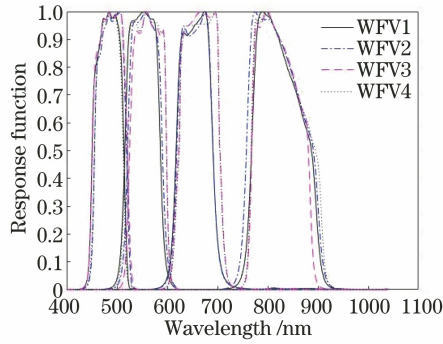


图 1 WFV 传感器的光谱响应函数

Fig. 1 Spectral response function of WFV sensor

2.2 数据预处理

在对 GF1-WFV 进行时间序列定标前,需要对数据进行预处理。云层遮挡目标物、阴影等因素的存在,使得影像质量不能得到保证,因此需要通过对所下载的影像进行筛选获得有效影像以进行分析,主要包括以下步骤:

1) 首先提取影像的灰度值(DN,其值可用 V_{DN} 表示)和对应的太阳天顶角,进行归一化处理,消除太阳角度的影响,获得归一化灰度值:

$$N_{DN,g} = \frac{V_{DN}}{\cos \theta}, \quad (1)$$

式中: V_{DN} 为影像的灰度值; $N_{DN,g}$ 为归一化处理后的灰度值; $\cos \theta$ 为成像时刻所对应的太阳天顶角余弦值。

2) 计算所有归一化灰度值的标准差和均值。

3) 利用标准差对数据进行剔除,计算所有灰度值与均值的差值,将差值与标准差进行比较。

4) 若差值大于标准差,则被认为是异常值,将此异常值剔除。

5) 重复步骤 2)、3)、4),直至所有异常值都剔除。

利用上述方法对高分一号卫星发射初期到 2020 年间的 WFV 影像进行处理,以 WFV1 第一波段为例,结果如图 2~4 所示。

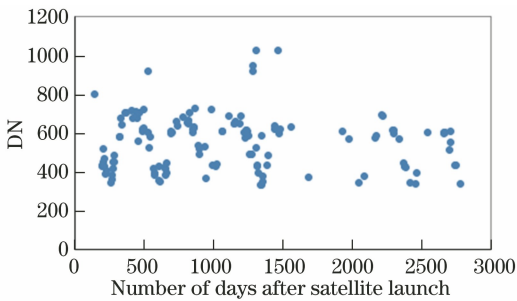


图 2 归一化前的 DN 值

Fig. 2 DN value before normalization

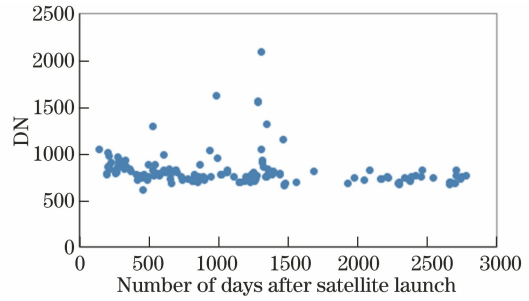


图 3 归一化后的 DN 值

Fig. 3 DN value after normalization

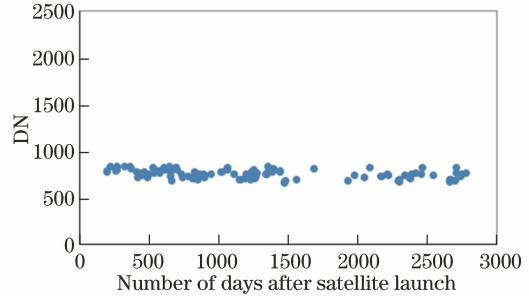


图 4 剔除异常值后的 DN 值

Fig. 4 DN value after excluding outliers

3 基于卡尔曼滤波的时间序列定标原理

卡尔曼滤波是一个多时相数据融合的过程,即通过上一时刻状态的估计值以及当前状态的观测值计算出当前状态的最优估计值^[10]。基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法是:先计算多年间不同时相影像的时间序列定标系数,再利用卡尔曼滤波思想对时间序列定标系数进行处理。时间序列定标系数是基于稳定目标的历史数据时间序列辐射定标方法来获得的,选取大面积均匀稳定的沙漠场地作为研究区,通过辐射传输模型计算大气层顶表观辐亮度,将不同日期模拟得到的表观辐亮度值同影像上敦煌场地区域的平均 DN 值相除,得到对应日期的绝对辐射定标系数。该方法假设研究区域的地表和大气具有稳定性,且地表为朗伯体,即全年的地表反射率被视为保持不变。

本文采用的辐射传输模型为 MODTRAN 辐射传输模型^[11],将卫星过境时刻的几何角度、大气参数、历史地表测量反射率,以及卫星的光谱响应函数输入 MODTRAN 大气辐射传输模型,计算传感器各波段的表观辐亮度。其中,大气廓线类型采用的是美国标准大气廓线,气溶胶类型采用的是沙漠型气溶胶。

对于卫星传感器的第 i 波段,其表观辐亮度 L_i

[单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$]与传感器探测到的 $V_{\text{DN},i}$ 值之间的辐亮度定标公式为

$$L_i(t) = G_i(t) \times V_{\text{DN},i}(t) + B_i(t), \quad (2)$$

式中: $G_i(t)$ 为卫星传感器第 i 波段的定标增益; $B_i(t)$ 为卫星传感器第 i 波段的偏移量; t 为对应的日期。

1958年斯坦利·施密特提出了卡尔曼滤波法,卡尔曼滤波技术是一种基于最小均方误差估计的递归滤波方法,适用于对线性动态系统模型进行实时、最优的估计^[12]。以 $k-1$ 时刻的最优估计为准,预测 k 时刻的状态变量,对该状态进行观测,得到观测变量,通过分析预测量与观测量,得到 k 时刻最优状态估计。

线性随机微分系统可表示为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(k-1) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(k) + \mathbf{W}(k), \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 是 k 时刻的系统状态; $\mathbf{U}(k)$ 是 k 时刻对系统的控制量; $\mathbf{W}(k)$ 表示过程噪声; \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是系统参数矩阵; k 时刻系统的测量值为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k), \quad (4)$$

式中: $\mathbf{V}(k)$ 为测量噪声; \mathbf{H} 是测量系统的参数矩阵。

该算法是一个由前及后的过程,即根据上一状态预测下一状态,其关系可表示为

$$\mathbf{X}(k | k-1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(k-1 | k-1) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(k), \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}(k | k-1)$ 是利用上一状态预测的结果; $\mathbf{X}(k-1 | k-1)$ 是上一状态最优的结果。

当前时刻预测结果的协方差为

$$\mathbf{P}(k | k-1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}(k-1 | k-1) \cdot \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{P}(k | k-1)$ 是 $\mathbf{X}(k | k-1)$ 对应的协方差矩阵; $\mathbf{P}(k-1 | k-1)$ 是 $\mathbf{X}(k-1 | k-1)$ 对应的协方差矩阵; \mathbf{A}^T 表示 \mathbf{A} 的转置矩阵; \mathbf{Q} 是系统过程的协方差矩阵。

式(5)、(6)就是对系统的预测。

当有了当前状态的预测值之后,再结合测量值,就可以得到当前状态,即 k 时刻的最优化估算值 $\mathbf{X}(k | k)$:

$$\mathbf{X}(k | k) = \mathbf{X}(k | k-1) + \mathbf{G}_K(k) \cdot [\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}(k | k-1)], \quad (7)$$

式中: $\mathbf{G}_K(k)$ 为卡尔曼增益(Kalman Gain),其公式为

$$\mathbf{G}_K(k) = \mathbf{P}(k | k-1) \cdot \mathbf{H}^T / [\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}(k | k-1) \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}], \quad (8)$$

式中: \mathbf{H}^T 表示 \mathbf{H} 的转置矩阵。 k 状态对应的协方差矩阵为

$$\mathbf{P}(k | k) = [\mathbf{I} - \mathbf{G}_K(k) \cdot \mathbf{H}] \cdot \mathbf{P}(k | k-1), \quad (9)$$

式中: \mathbf{I} 为 1 矩阵。当系统进入 $k+1$ 状态时, $\mathbf{P}(k | k)$ 就是式(6)的 $\mathbf{P}(k-1 | k-1)$ 。因此算法可以自回归地运算下去。

本文借鉴卡尔曼滤波思想,将卡尔曼滤波法应用到传感器的时间序列定标中,以提高定标的精度。对于某一时刻可获得两个定标系数[系统的预测值(上一时刻的定标系数对当前时刻定标系数的预测值)和测量值(根据当前时刻的数据得到的当前时刻定标系数的测量值)]都是有误差的,根据误差计算卡尔曼增益,通过增益表示两个值的权重,将两个值结合起来以估算出当前时刻实际的定标系数。假设定标系数是恒定的,那么 k 时刻的定标系数和 $k-1$ 时刻是一样的,假设 k 时刻的定标系数是 \tilde{x}_k , 同时该假定值的误差为 Q_k 。另外,在 k 时刻,采用基于稳定目标的历史数据时间序列辐射定标方法可获得一个计算结果,假设结果是 \tilde{z}_k , 同时该值的误差为 R_k 。则 k 时刻的最优定标系数为

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k \times (\tilde{z}_k - \tilde{x}_k), \quad (10)$$

式中: K_k 表示 k 时刻卡尔曼增益,其计算方法如下所示:

$$K_k = Q_k^2 / (Q_k^2 + R_k^2), \quad (11)$$

k 时刻最优值的不确定度为

$$P_k = [(1 - K_k) \times Q_k^2]^{0.5}. \quad (12)$$

根据所获得的 k 时刻的最优定标系数以及 k 时刻估算出的最优值的不确定度,计算 $k+1$ 时刻的定标系数,进行新的最优估算。之后不断进行迭代,直至结束。

依据以上算法,结合 MATLAB 软件对一组数据的定标系数进行进一步处理,结果如图 5 所示。

卡尔曼滤波器将当前时刻的定标系数和上一时

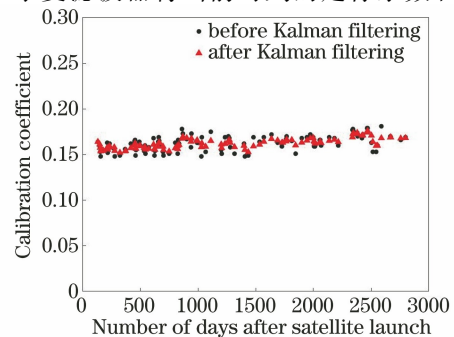


图5 卡尔曼滤波前后的定标系数

Fig. 5 Calibration coefficients before and after Kalman filtering

刻的预测信息进行融合,从而计算出当前时刻的定标系数^[13]。这基于传感器的在轨状态与时间密切相关,每一次定标系数既与当前时刻的定标有关,又与上一时相的定标相关,所得到的定标结果更准确。

4 定标结果分析

本文采用上述基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法,得到了 GF1 的 4 个 WFV 传感器从发射初期到 2020 年间的时间序列定标系数。如图 6 所示,横

轴为 GF1 卫星发射后的天数,纵轴为 GF1 的定标系数,单位为:W/(m² · sr · μm),其中黑色圆点代表滤波前的定标系数值,红色三角点代表滤波后的定标系数值。通过图 6 可以看出,利用卡尔曼滤波对时间序列定标系数做了进一步处理之后,使得不同时相定标系数之间的波动幅度有所降低,时间序列定标结果更具有稳定性、连续性,更符合传感器的在轨状态,即一个稳定的、连续的、随时间逐步变化的过程。

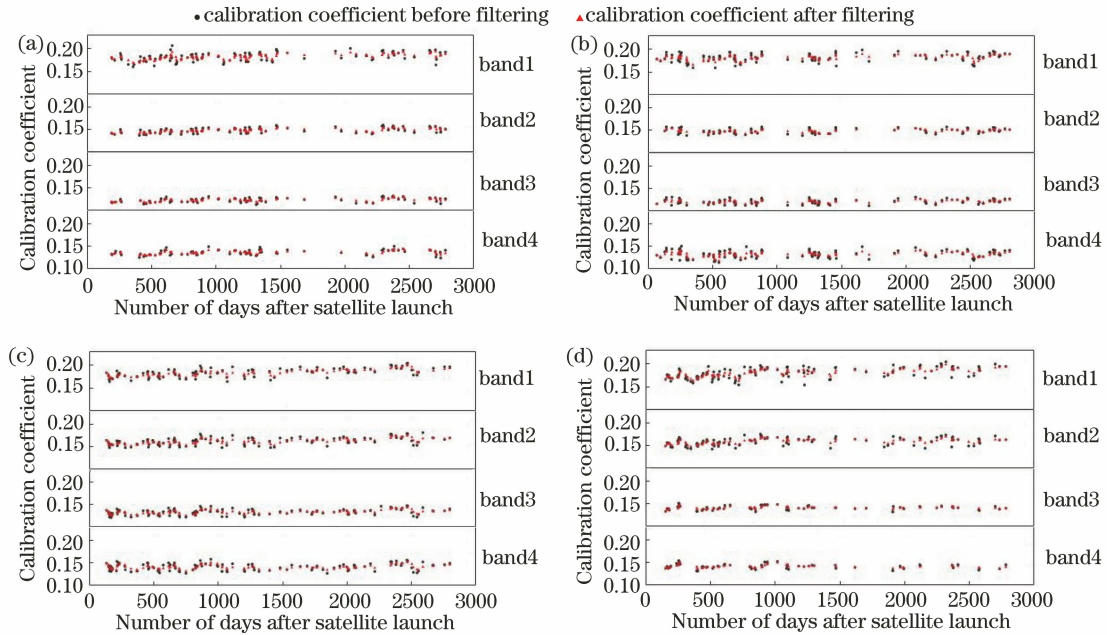


图 6 WFV 时间序列定标结果。(a) WFV1;(b) WFV2;(c) WFV3;(d) WFV4

Fig. 6 WFV time series calibration results. (a) WFV1; (b) WFV2; (c) WFV3; (d) WFV4

对获得的 2013—2020 年间的 GF1-WFV 传感器时间序列定标系数进行线性拟合,构建 WFV 传感器的衰减模型,即衰减公式,如表 3 所示,其中 x 表示卫星发射后天数, y 表示定标系数。可以看出

WFV4 传感器的 band1 衰减最严重,但其年衰减率仅为 0.26%。说明高分一号卫星传感器的性能近 8 年来未发生显著衰减,具有较好的稳定性。

表 3 WFV 传感器各波段的衰减模型公式

Table 3 WFV sensor attenuation model formula for each band

WFV	Band1	Band2	Band3	Band4
WFV1	$y=4.831 \times 10^{-6}x+0.1755$	$y=3.507 \times 10^{-6}x+0.1432$	$y=2.500 \times 10^{-6}x+0.1195$	$y=2.225 \times 10^{-6}x+0.1331$
WFV2	$y=2.397 \times 10^{-6}x+0.1780$	$y=0.950 \times 10^{-6}x+0.1468$	$y=0.852 \times 10^{-6}x+0.1202$	$y=1.155 \times 10^{-6}x+0.1309$
WFV3	$y=7.016 \times 10^{-6}x+0.1744$	$y=4.897 \times 10^{-6}x+0.1560$	$y=2.657 \times 10^{-6}x+0.1299$	$y=1.166 \times 10^{-6}x+0.1394$
WFV4	$y=7.217 \times 10^{-6}x+0.1718$	$y=2.948 \times 10^{-6}x+0.1555$	$y=0.405 \times 10^{-6}x+0.1403$	$y=-0.696 \times 10^{-6}x+0.1419$

5 结果对比验证

为了验证本文基于卡尔曼滤波法所获得的定标系数的可靠性,利用表 3 中各个传感器所对应波段的衰减模型公式,计算 2013—2020 年间每一年 8 月 1 日的定标系数,并与 CCRS 的场地定标结果进行

对比验证,如图 7 所示。由于篇幅有限,此处以 WFV1 传感器为例进行展示。为了更直观地表示本文的定标结果在各年份各波段与资源卫星中心定标结果的差异程度,采用直方图的形式来呈现这种差异,图 8 表示了 WFV1、WFV2、WFV3、WFV4 传感器各波段资源卫星中心定标结果与本文定标结果

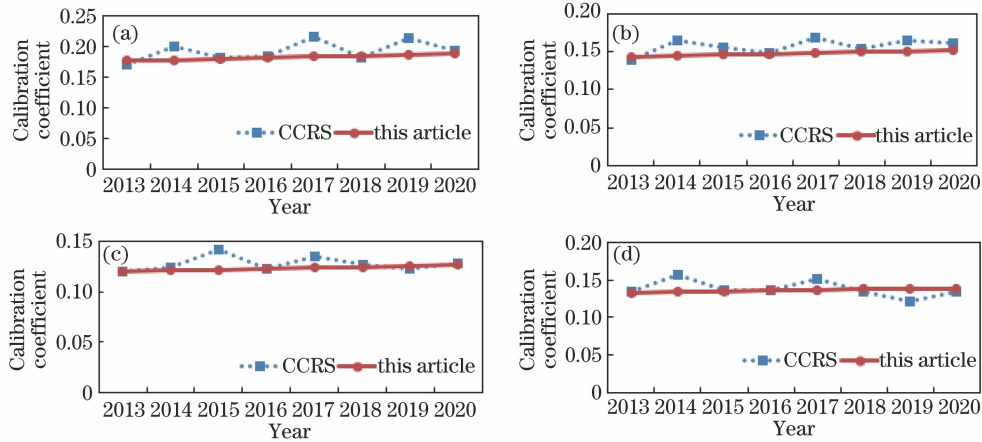


图 7 WFV1 传感器各波段定标系数与 CCRS 定标系数。(a) Band1;(b) band2;(c) band3;(d) band4
Fig. 7 Calibration coefficients of each band of WFV1 sensor and calibration coefficients of CCRS.

(a) Band1; (b) band2; (c) band3; (d) band4

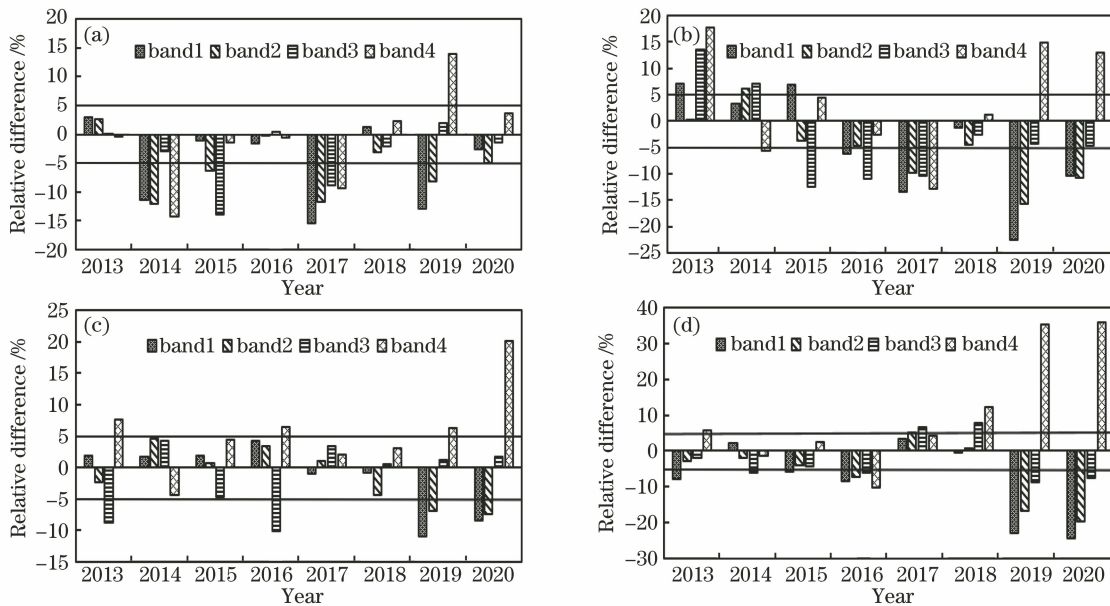


图 8 WFV 传感器的定标系数与 CCRS 定标系数的相对误差直方图。(a) WFV1;(b) WFV2;(c) WFV3;(d) WFV4
Fig. 8 Relative error histograms between calibration coefficient of WFV sensor and calibration coefficient of CCRS.

(a) WFV1; (b) WFV2; (c) WFV3; (d) WFV4

的相对误差直方图。

由图 7 可以看出,相对于 CCRS 发布的定标结果,本文基于卡尔曼滤波所获得的时间序列定标结果的稳定性更好,更符合传感器的在轨运行状态,说明本文的定标结果具有一定的可靠性。通过图 8 可以看出,在 2013—2020 年间 4 个传感器各个波段共 128 个本文定标系数与 CCRS 定标系数的比较结果中,相对误差在 5% 以内的占多数,但差异较大的情况也较多。

因此进一步将本文定标系数与 CCRS 定标系数的相对误差大于 5% 的传感器所对应的波段、年份

挑选出来,分别利用本文定标系数和 CCRS 定标系数计算 GF1 表观辐亮度值,与同时或近同时的相同区域 Landsat8 表观辐亮度值进行比较,计算相对误差。图 9 表示 WFV1、WFV2、WFV3、WFV4 传感器各波段的相对误差。

图 9 中直线表示 CCRS 定标误差,虚线是本文定标误差,通过比较直线和虚线发现:对于 WFV1 传感器来说,除 2019 年的 band4 外,本文定标结果的相对误差均低于 CCRS 定标结果;进一步计算各波段的平均相对误差,结果显示 CCRS 定标结果各波段的平均相对误差分别为 22.05%、14.21%、

11.94%和 16.52%，而本文定标方法得到的各波段的平均相对误差分别降低到 5.91%、3.11%、0.90%和 7.96%。对于 WFV2 传感器来说，多数对比结果同样表明了本文定标结果的相对误差低于 CCRS 定标结果，CCRS 定标得到的各波段的平均相对误差分别为 18.50%、12.41%、14.53%和 7.93%，而本文定标得到的各波段的平均相对误差分别降低到 6.41%、5.09%、6.21%和 7.33%。对于 WFV3 传感器来说，CCRS 定标得到的各波段的平均相对误差

分别为 10.58%、10.30%、3.09%和 4.44%，本文定标得到的 band1 和 band2 的平均相对误差分别降低到 0.29%、2.39%，但是 band3 和 band4 的平均相对误差增加到 6.65%、8.66%。对于 WFV4 传感器来说，多数对比结果表明本文定标结果的相对误差均低于 CCRS 定标结果，CCRS 定标得到的各波段的平均相对误差分别为 16.18%、15.42%、6.73%和 12.68%，而本文定标得到的各波段的平均相对误差分别降低到 2.20%、2.62%、3.06%和 8.88%。

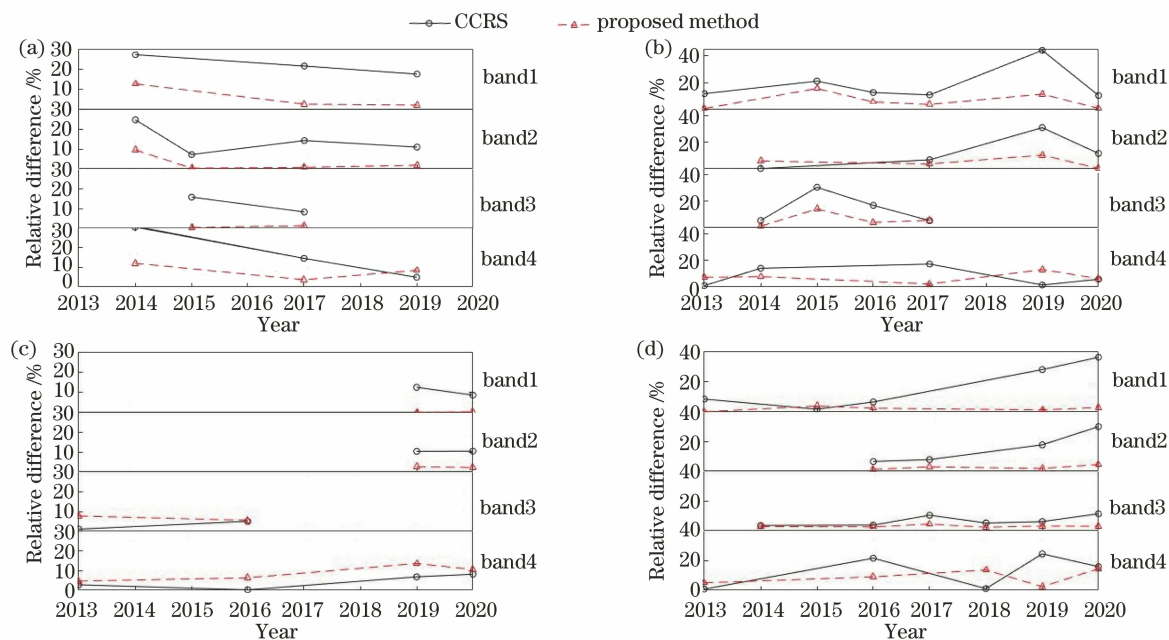


图 9 WFV 传感器 CCRS 定标误差和本文定标误差的比较。(a) WFV1;(b) WFV2;(c) WFV3;(d) WFV4

Fig. 9 Comparison between the calibration error of CCRS and the calibration error of this article.

(a) WFV1; (b) WFV2; (c) WFV3; (d) WFV4

通过对比可以看出，WFV1 传感器 4 个波段的平均相对误差分别降低了 16.14%、11.10%、11.04%和 8.56%；WFV2 传感器 4 个波段的平均相对误差分别降低了 12.09%、7.32%、8.32%和 0.60%；WFV3 传感器 band1 和 band2 的平均相对误差分别降低了 10.29%和 7.91%，band3 和 band4 的平均相对误差分别增加了 3.56%和 4.22%；WFV4 传感器 4 个波段的平均相对误差分别降低了 13.98%、12.80%、3.67%和 3.80%。85%以上的比较结果表明本文的定标结果精度高于 CCRS 定标结果，其中误差降低最明显的是 WFV1 传感器的 band1，相对误差最大可降低 16.14%。

6 结 论

为提高定标频次、精度，适应新时期的遥感应应用需求，提出了一种基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法，以改善目前国产卫星传感器的定标现状。对

时间序列的卫星影像进行定标以提高定标频次，并采用卡尔曼滤波对定标系数进行进一步处理以提高定标精度，最后将 CCRS 定标结果与本文的定标结果进行对比，并且利用 Landsat8 数据对本文定标结果和 CCRS 定标结果进行进一步验证。研究结果表明：高分一号卫星传感器在轨运行期间很稳定，年衰减率小于 0.3%，没有发生显著衰减；通过对定标结果的对比验证，发现基于本文新方法所获得的定标结果比 CCRS 定标结果的精度高。由此可见，基于卡尔曼滤波的时间序列定标方法具有较好的可靠性和稳定性。

本文在计算卫星传感器定标系数的过程中未考虑地面目标的双向反射分布函数(BRDF)特性的影响，在定标场地的选定方面，仅选择了敦煌校正场进行研究。在后期研究中，可进一步开展场地 BRDF 对定标的影响研究，以及选用更多稳定场地来开展多场地的时间序列定标，以实现更可靠、更稳定的在

轨辐射定标,为国产卫星传感器的业务化定标提供方法参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 杨敏, 刘照言, 赵永光, 等. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1828001.
Yang M, Liu Z Y, Zhao Y G, et al. On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou site[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1828001.
- [3] 韦玮, 张艳娜, 张孟, 等. 高分一号宽视场成像仪多场地高频次辐射定标[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0228001.
Wei W, Zhang Y N, Zhang M, et al. Multisite high-frequency radiometric calibration of GF-1 wide field of view[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 0228001.
- [4] 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.
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.
- [5] 王玲, 胡秀清, 陈林. 基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1911-1920.
Wang L, Hu X Q, Chen L. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1911-1920.
- [6] 邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701001.
Qiu G G, Li X, Wei W, et al. Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701001.
- [7] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. CCD 卫星相机时间序列定标: 以 CBERS02B 为例[J]. 测绘学报, 2011, 40(2): 180-187, 193.
Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. Time-series calibration for CCD camera: taking CBERS02B satellite as an example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(2): 180-187, 193.
- [8] 周珂, 刘李, 余涛, 等. 光谱匹配因子对 GF-1/WFV 时间序列交叉定标的影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(12): 3809-3813.
Zhou K, Liu L, Yu T, et al. Sensitivity analysis of spectral band adjustment factors for GF-1/WFV sensor cross-calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(12): 3809-3813.
- [9] 赵春艳, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的 Suomi-NPP VIIRS 长时序定标[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0828001.
Zhao C Y, Wei W, Zhang Y N, et al. Long time series radiometric calibration of Suomi-NPP VIIRS based on surface hyperspectral BRDF model[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0828001.
- [10] 王可东. Kalman 滤波基础及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.
Wang K D. Kalman filtering basis and MATLAB simulation[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2019.
- [11] Berk A, Adler-Golden S M, Ratkowski A J, et al. Exploiting MODTRAN radiation transport for atmospheric correction: the FLASSH algorithm[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002. July 8-11, 2002. Annapolis, MD, USA. New York: IEEE, 2002: 7412147.
- [12] 严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的 PGC 解调非线性误差补偿方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904002.
Yan L P, Zhou C Y, Xie J D, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filtering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904002.
- [13] 赵潇, 杨海马, 强佳, 等. 基于卡尔曼滤波的高精度相干激光测距方法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1412001.
Zhao X, Yang H M, Qiang J, et al. High-precision coherent laser ranging method based on Kalman filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1412001.