

HJ-1B热红外辐射定标对地表温度反演的影响

陈峰¹, 殷守敬², 朱利², 尹锴³, 何报寅⁴, 杨崧¹

1. 中山大学 大气科学学院, 地球气候与环境系统研究院, 广东 广州 510275;

2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094;

3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094;

4. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077

摘要: 辐射定标是地表温度反演的关键环节。在实际应用中, 定标参数的选取直接影响辐射定标结果。由于卫星在轨定标系统的灵敏度会随时间发生改变, 这使得实际的辐射定标存在不确定性。本文基于单波段热红外辐射传输方程给出了辐射定标影响地表温度反演的敏感性分析模型, 并重点对HJ-1B热红外波段的辐射定标问题及其对地表温度反演的影响进行讨论和分析。敏感性分析模型显示, 在一般的情形下, 辐射定标偏差与地表温度反演误差的比值在数值上约为1:11, 即0.1个单位($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)的辐射定标偏差可能引起1.1 K左右的温度反演误差。由于对HJ-1B热红外波段定标参数的更新存在滞后, 即使仅考虑相邻年份间的定标偏差, 相应的地表温度平均绝对误差也在1.0—2.0 K左右。在更严重的情形下, 因辐射定标偏差引起的地表温度误差甚至高达5.0 K以上。同时, 分析结果也表明对HJ-1B的存档影像, 无论使用其头文件中的定标参数还是当年公布的定标参数, 定标后辐射亮度值的偏差均存在一定的不稳定性。针对当前在HJ-1B定标参数更新方面的不足, 本文假定传感器辐射性能变化是匀速稳定的, 相应地提出了线性内插修正法和线性外推法两个定标参数估计/修正方案。通过线性内插的方法进行辐射定标修正后, 在一定程度上减小了误差的不稳定性, 与MODIS B31波段的亮温相比, 偏差在1.0 K以内(约为0.5 K)。当定标参数尚未公布时, 由线性外推法修正后的辐射定标结果所得亮温的偏差约为1.0 K。与在大亚湾核电站附近海域进行的一次卫星同步观测(2011年12月18日)相比, 经两个方案修正后的海表温度偏差分别约为0.2 K和0.7 K。案例分析的结果表明, 在现阶段, 线性内插修正法和线性外推法是简单有效的, 可供用户在实际应用中参考和使用。

关键词: 辐射定标, 热红外遥感, 地表温度, 敏感性, HJ-1B

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A

引用格式: 陈峰, 殷守敬, 朱利, 尹锴, 何报寅, 杨崧. 2016. HJ-1B热红外辐射定标对地表温度反演的影响. 遥感学报, 20(4): 601–609

Chen F, Yin S J, Zhu L, Yin K, He B Y and Yang S. 2016. Radiometric calibration of the HJ-1B thermal channel and its effects on land surface temperature retrieval. Journal of Remote Sensing, 20(4): 601–609 [DOI:10.11834/jrs.20164227]

1 引言

目前, 热红外卫星遥感技术被认为是获取区域和全球尺度地表温度信息的一个可行且有效的手段。一些常用的卫星上均搭载有热红外传感器, 如Terra/Aqua MODIS、NOAA AVHRR、Landsat系列 TM/ETM+/TIRS、Terra ASTER以及国

产卫星CBERS-01/-02/-04和HJ-1B等。针对不同的传感器特征已提出了相应的地表温度反演方法, 如劈窗算法(Wan和Dozier, 1996)、单窗(通道)算法(Qin 等, 2001; Jiménez-Muñoz和Sobrino, 2003; 张勇 等, 2006; 段四波 等, 2008)、温度/比辐射率分离算法(Gillespie 等, 1998; Schmugge 等, 2002), 以及基于影像特征的反演策略(陈峰 等,

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2016-03-09; 优先数字出版日期: 2016-03-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(编号: 2014CB953900); 国家自然科学基金项目(编号: 41375081); 中山大学"985工程"第三期项目的联合资助

第一作者简介: 陈峰(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事环境遥感和气候变化方面的研究。E-mail: chenfeng105@gmail.com, chenf45@mail2.

sysu.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2014; Chen 等, 2015)。Li 等人(2013)对卫星遥感地表温度反演的现状做了全面的总结。

热红外遥感的定量应用离不开辐射定标, 准确的辐射定标是实施上述反演方法的首要环节。辐射定标就是建立遥感传感器的数字量化输出值(DN值)与对应观测视场中辐射亮度值之间的定量关系, 一般包括发射前的实验室定标、卫星运行中的在轨定标和场地定标(童进军等, 2005)。由于卫星在轨定标系统的灵敏度会随时间发生改变, 甚至可能是不稳定的变化(Barsi 等, 2006, 2007; 徐涵秋, 2015), 在卫星发射后, 还需要通过外场定标的方法来获得可靠的定标参数。

HJ-1A/B星(环境与灾害监测预报小卫星星座)于2008年9月6日成功发射。HJ-1B星搭载了CCD相机和红外相机(IRS), 其中, CCD相机可获取4个可见光谱段, 地面像元分辨率为30 m; IRS相机可获取近短中长4个红外光谱谱段, 在热红外波段(10.5—12.5 μm)的空间分辨率为300 m (<http://www.cresda.com/>)。该红外波段的辐射量化比特数为10, 可探测温度范围在200—340 K(王桥等, 2010)。由于HJ-1B采用的是全光路星上定标系统, 发射前HJ-1B热红外传感器测量的是黑体的辐照度, 而在定量遥感的实际应用过程中, 使用的是辐射亮度, 二者的转化需要考虑传感器通道的有效波段宽度(李家国等, 2011)。基于查找表法的有效波段宽度计算能很好地应用于HJ-1B热红外波段在轨定标(李家国等, 2011)。对卫星遥感热红外辐射的场地定标一般选择在稳定、均一的场地进行, 如中国的青海湖。常规的在轨场地定标需要在场地做同步观测, 因而限制了定标的次数, 通常一年只能进行1—2次(童进军等, 2005)。为了弥补常规场地定标在次数上的不足, 有学者提出了在轨交叉定标法(Barsi 等, 2014; 孙珂等, 2010; 韩启金等, 2009)和用自动水表温度监测与再分析资料结合的定标策略(童进军等, 2005)。

目前, 一般每年7—9月间对HJ-1A/B星进行一次场地定标试验, 并于当年年底左右公布定标参数(<http://www.cresda.com/>)。当前的定标参数更新策略可能无法准确、及时地反映传感器的辐射性能变化, 会在一定程度上影响HJ-1A/B卫星数据的定量应用。已有的研究提及了HJ-1B热红外波段辐射定标的重要性(陈峰等, 2014; Chen 等, 2015), 但并未对相关问题进行深入地分析。因

此, 本文的主要目的: (1)针对HJ-1B的热红外波段, 给出辐射定标影响地表温度反演的误差分析模型和误差系数的分布模式; (2)分析当前的HJ-1B定标参数更新方案对辐射定标以及地表温度反演的潜在影响; (3)在此基础上, 提出相应的辐射定标修正与估计方法。

2 辐射定标影响地表温度反演的敏感性分析

2.1 敏感性分析模型

假定地表对热红外辐射具有朗伯体性质, 则单波段热红外传感器所接收的辐射能量(L^s)主要包括3部分: (1)经大气消减后被传感器接收的地表热辐射($\varepsilon \cdot \tau \cdot B(T_s)$); (2)大气下行辐射($L^{\text{atm}\downarrow}$)经地表反射后再被大气消减后的辐射($(1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot L^{\text{atm}\downarrow}$); (3)大气上行辐射($L^{\text{atm}\uparrow}$)。

$$L^s = \{\varepsilon \cdot B(T_s) + (1 - \varepsilon) \cdot L^{\text{atm}\downarrow}\} \cdot \tau + L^{\text{atm}\uparrow} \quad (1)$$

式中, ε 是地表比辐射率; $B(T_s)$ 是地表温度为 T_s 的黑体辐射亮度; τ 是地表到传感器之间的大气透过率。

式(1)中的各变量均是经光谱响应函数积分并归一化后的结果。式(2)为热红外波段归一化黑体辐射亮度。其中, $B_\lambda(T_s)$ 是黑体辐射度与温度和波长的定量关系式, 即普朗克方程, R_λ 为热红外波段的光谱响应函数, λ_s 和 λ_E 分别为该热红外波段的起、止波长。

$$B(T_s) = \frac{\int_{\lambda_s}^{\lambda_E} B_\lambda(T_s) \cdot R_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_s}^{\lambda_E} R_\lambda d\lambda} \quad (2)$$

由辐射方程(式(1))导出辐射定标偏差(ΔL^s)影响地表温度反演(ΔT_s)的敏感性分析模型:

$$\Delta T_s = \frac{\partial T_s}{\partial L^s} \cdot \Delta L^s = \frac{\partial T_s}{\partial B(T_s)} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot \Delta L^s \quad (3)$$

为了给出 $\frac{\partial T_s}{\partial B(T_s)}$ 的简明解析式, 本文首先建立热红外波段辐射亮度与温度的二次经验关系式(何立明等, 2005)。具体做法为: 在所考查的温度范围内(253.15—333.15 K), 以1 K为间隔, 由式(2)计算每个温度值对应的辐射亮度值, 得到一组 $[(T_s)_i, B(T_s)_i]$ ($i=1, 2, 3, \dots, 81$)样本; 基于该样本, 拟合得到二次经验关系式(式(4))。拟合结果显

示, 平均温度绝对误差为0.007 K, 均方根误差为0.008 K; 相应地, 平均辐射亮度绝对误差为0.0009 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 均方根误差为0.0011 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。由于考查温度范围的差异, 本文的拟合结果与Li 等人(2010)略有偏差。结合式(3)和式(4), 得到HJ-1B热红外波段辐射定标偏差影响地表温度反演的分析式(式(5))。

$$B(T_s) = 0.00050115 \cdot T_s^2 - 0.1709 \cdot T_s + 15.3632 \quad (R^2 = 1.00) \quad (4)$$

$$\Delta T_s = \left[\frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot \frac{1}{(0.0010023 \cdot T_s - 0.1709)} \right] \cdot \Delta L^s \quad (5)$$

2.2. 误差系数的分布

由式(5)可知, 地表温度误差与地表温度、地表比辐射率、大气透射率和辐射定标误差有关。为了表述的方便, 将式(5)中中括号所示部分, 即地表温度误差与辐射定标误差的比值, 定义为误差系数。如图1显示, 一般情形下, 误差系数大致为11.0 $\text{K}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$, 即0.1个单位的辐射定标误差所引起的温度反演误差约为1.1 K。误差系数的分布模式表明, 辐射定标偏差对地表温度的影响可能存在区域性和季节性特征。

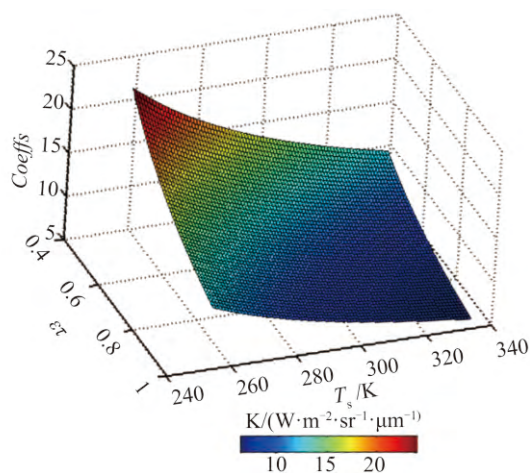


图1 误差系数(Coeffs)与地表温度(T_s)和综合参数($\varepsilon\tau$)的分布模式

Fig. 1 Relationship between error coefficients(Coeffs) and land surface temperature(T_s) and the integrated variable($\varepsilon\tau$)

利用2003年—2013年Terra MODIS的月平均资料MOD11_C3和MOD08_M3(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)给出了在中国中东部(90°—125°E, 20°—46°N)范围内的误差系数在不同季节的纬向分布情

况(图2)。为了计算图2中的误差系数, 本文使用了段四波等人(2008)提出的经验模型式估算大气透射率。整体上, 低纬度地区的误差系数要大于高纬度地区的误差系数; 误差系数的纬向差异在夏季最明显, 误差系数的大值主要出现在夏季低纬度地区; 误差系数在低纬度地区呈现明显的季节变化(主要受大气水分含量变化的影响)。误差系数的时空分布特征表明辐射定标误差会给低纬度地区的季节间地表温度对比分析带来更大的不确定性。值得注意的是, 图1和图2仅给出了辐射定标偏差导致地表温度反演误差的可能分布, 具体的影响还与实际的观测条件有关。

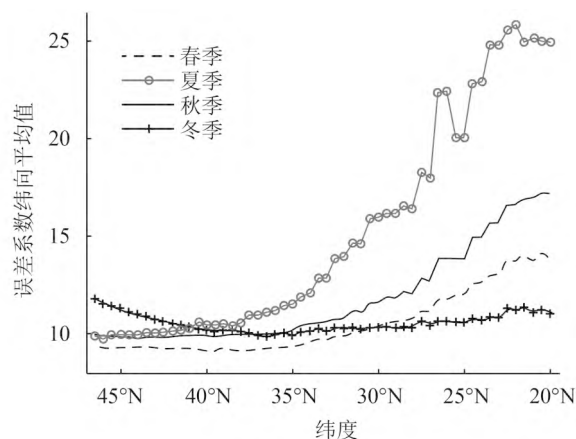


图2 误差系数的纬向分布情况(90°E—125°E, 20°N—46°N)

Fig. 2 Latitudinal distribution of error coefficients over(90°E—125°E, 20°N—46°N)

3 对现有定标参数的分析

截至2015年10月, 已公布的HJ-1B定标文件给出了热红外波段的定标参数(表1)和定标公式(式(6))(<http://www.cresda.com/>)。

$$L^s = (DN - bias) / gains \quad (6)$$

式中, DN 为HJ-1B热红外波段的原始影像记录, $bias$ 和 $gains$ 分别为热红外波段的偏移量和增益量。

在温度253.0—331.0 K范围内, 因定标参数不同导致的平均定标绝对偏差见表2。由表2可知, 若选取定标参数不当, 将导致较明显的辐射定标偏差, 即使是在两个相邻年份(除2008年与2009年间外)这种偏差也是不可忽视的。同时, 随着传感器的持续老化, 因定标参数使用不当所引起的辐

射定标偏差问题显得越来越突出。即使仅考虑相邻年份的定标偏差，相应地表温度的平均绝对误差大致在1.0—2.0 K左右，在更严重的情形下则可以达到5.0 K以上。

表 1 已正式公布的HJ-1B热红外波段的定标参数
Table 1 Calibration parameters for the HJ-1B thermal infrared channel

参数	年份							
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>gains</i> ^a	61.472	59.421	60.713	56.277	47.744	—	—	—
<i>bias</i>	-44.598	-25.441	-25.441	12.625	70.185	—	—	—

注：单位为DN/(W·m⁻²·sr⁻¹·m⁻¹)；2013年、2014年和2015年定标文件中未包含热红外波段的定标参数。

表 2 平均绝对偏差(MAE)统计结果
Table 2 Mean Absolute Errors(MAE)of radiation

	/(W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹)				
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
2008年	—	0.082	0.203	0.257	0.693
2009年	0.082	—	0.192	0.191	0.615
2010年	0.203	0.192	—	0.190	0.709
2011年	0.257	0.191	0.190	—	0.537
2012年	0.693	0.615	0.709	0.537	—

采用不同获取时相和区域的HJ-1B热红外影像(共6景)进行具体的案例分析，影像信息如表3所示，表3中的标识仅为了表述的方便。从各影像中分别选取一个无明显云层覆盖的兴趣区(约400×400个像元范围)作为最终的研究范围。表1和表3显示，相应影像头文件中所含的定标参数实际上是上一个年份公布的结果。采用不同的定标参

数(头文件中的参数和当年公布的参数)所带来的辐射定标差异表现出一定的区域和时相性(表4)。多数情况下，绝对辐射偏差在0.02—0.04 W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹，而最大偏差在0.05—0.08 W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹；在某些情况下，则出现更明显的偏差，如BJ2012的最大偏差达到0.34 W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹，区域平均偏差超过0.10 W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹。

表 3 影像头文件中的定标参数
Table 3 Calibration parameters stored in the imagery header files

	XM2009	WH2010	SZ2011	SZ2012	BJ2011	BJ2012
获取时相	2009-11-06	2010-10-31	2011-07-05	2012-03-26	2011-01-25	2012-01-23
path/row	452/90	455/77	454/90	454/91	454/70	453/70
<i>gains</i>	61.472	59.421	60.713	56.277	60.713	56.277
<i>bias</i>	-44.598	-25.441	-25.441	12.625	-25.441	12.625

4 修正方法与实例分析

现阶段，一般是在每年的7—9月期间，在敦煌绝对辐射校正场和青海湖辐射校正场开展HJ-1A/B的外场定标试验。定标参数公布给用户时

间一般在同年的12月左右(<http://www.cresda.com/>)。即使公布的定标参数准确无误，定标参数更新滞后也可能引起辐射定标误差，影响地表温度反演的结果。在实际应用中，如何选择合适的定标参数和处理方法就显得至关重要。

表4 不同定标参数(影像采集年份和头文件)导致的绝对辐射定标差异

Table 4 Absolute differences in calibrated radiation caused by using different calibration parameters(ones issued in the same year as the imagery acquisition, and ones stored in the imagery header file)

	XM2009	WH2010	SZ2011	SZ2012	BJ2011	BJ2012
最小偏差	0.000	0.015	0.000	0.000	0.077	0.080
最大偏差	0.054	0.058	0.079	0.072	0.149	0.341
平均偏差	0.025	0.038	0.020	0.034	0.098	0.110

如图3中实线所示,两次已有定标试验的间隔约1年(m_2-m_1),对在此期间所获取的影像(如 T_1 时相),采用哪个定标参数合适。若获取影像时对应年份的定标试验和参数均未完成(如图5中虚线部分所示的 T_2 和 T_3 时相),此时该如何确定定标参数。针对这两类情形,本文分别提出两种简单的解决方案,具体讨论如下:

(1)针对第一类情况,假定在两次定标实验之间(m_1 和 m_2 ,仅精确到月份),传感器辐射性能改变的速度是稳定的,采用线性内插的方式来对辐射测量值进行修正(式(7))。

$$L^s = \frac{m-m_1}{m_2-m_1} \cdot (L_2^s - L_1^s) + L_1^s \quad (7)$$

式中, L_1^s , L_2^s 分别是按前一年和后一年的定标参数得到的辐射定标值, $m-m_1$ 为影像获取时相与前一定标时相的时间距离(m 对应图3中的 T_1),

m_2-m_1 为两次定标时相差(约为1年,按12个月计)。如前所述,为了方便处理,将每年的定标时相统一设定为8月份。

(2)针对第二类情况,假定当年的传感器辐射性能变化速度与前一年的情形相同,依据前一年的定标参数变化情形进行线性外推(式(8))。

$$L^s = \frac{m-m_2}{m_2-m_1} \cdot (L_2^s - L_1^s) + L_2^s \quad (8)$$

式中, $m-m_2$ 为影像获取时相与最近一次定标时相的时间距离(m 对应图3中的 T_2 或 T_3),其他参数与式(7)中的一致。

韩启金等人(2010)和孙珂等人(2010)分别用交叉定标的方法对HJ-1B热红外波段进行了定标试验。韩启金等人(2010)的定标参数与表1中2009年的结果相同,而孙珂等人(2010)的定标公式如下:

$$L^s = 0.0159DN + 0.7611 \quad (9)$$

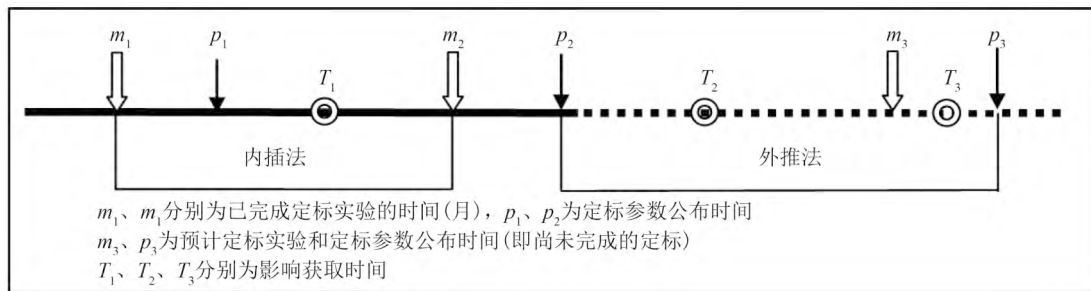


图3 现有场地定标的方案及本文相应的修正与估计方案示意图

Fig. 3 Current routine of field calibration for HJ-1B and illustration of the proposed methodology in this paper

考虑HJ-1B与Terra MODIS卫星过境的时相差异,本文采用BJ2011和BJ2012的星上亮温来比较不同辐射定标结果。同时,为了减小因空间分辨率差异带来的影响,仅对影像中亮温分布相对均一的水体区域分析,具体采样过程参见文献(Chen等,2011,2015;陈峰等,2014)。结合Terra MODIS B31波段和HJ-1B热红外波段的光谱响应函数,以

及水体光谱曲线(来自MODIS UCSB光谱库, <http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>),分析了因光谱设置差异导致的亮温偏差情况。实验结果表明本实例中,因MODIS B31波段与HJ-1B热红外光谱设置差异引起的亮温偏差在0.3—0.4 K之间。表5中的误差指标是对修正后HJ-1B亮温的评价结果

表 5 对两个兴趣区亮温比较的统计结果

Table 5 Assessments of the brightness temperature of the two interested regions

	BJ2011					BJ2012				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
SE/K	-0.51	1.39	2.79	0.61	0.85	-0.86	0.22	3.27	-0.22	-0.52
RMSE	0.59	1.43	2.81	0.68	0.90	0.93	0.42	3.29	0.43	0.63
MAE	0.51	1.40	2.80	0.61	0.85	0.87	0.23	3.22	0.26	0.54

注：采用影像获取当年所公布的定标参数；B：直接利用影像头文件中的定标参数；C：采用孙珂等提出的交叉定标公式(式(9))；D：基于线性内插的修正(式(7))；E：采用线性外推法估计(式(8))；SE为平均误差；RMSE为均方根误差；MAE为平均绝对误差。

亮温误差的评价结果表明(表5)，若采用A或B的辐射定标方案，将出现亮温误差不稳定；而通过线性内插的方法修正后，可在一定程度上减小误差的不稳定，亮温偏差在1 K以内(约为0.5 K)。经式(9)辐射定标后的亮温存在较明显的误差(约为3.0 K)。同时，假定在处理BJ2011和BJ2012时，所获年份的定标参数未知，仅通过式(8)和前两年的定标参数来外推估计辐射测量值。表5中的3个误差评价结果显示，由线性外推法所得亮温的偏差值大致在1 K左右，表明该方法能较好地解决当定标参数尚未公布时的辐射定标问题。亮温误差的情况显示，线性内插法要略优于线性外推法，表明传感器辐射性能变化存在一定的年际差异。

因此，尽管式(9)在试验时(2008年)是准确的，由于传感器老化等因素的影响，其对新获取的影像可能已不再适用。

此外，利用在大亚湾核电站附近海域进行的一次卫星同步观测(2011年12月18日)的资料(朱利等，2014)，来对比不同辐射定标结果。以卫星过境前后20 min内远离核电站热排放口区域的16个采样点的水温观测和相近时相的Terra MODIS海温标准产品为参考(表6)。结果显示，由线性内插法修正后的辐射定标结果更准确。另外，对比不同定标结果和相应的海温差异，也表明2.2节中的论述“一般情形下，误差系数大致为 $11.0 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ ”是合理的。

表 6 不同辐射定标结果的比较

Table 6 Comparison among different calibrations

	<i>In situ</i>	MODIS	A	B	C	D	E
平均辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	—	—	7.703	7.767	7.854	7.760	7.681
海温平均值/K	291.92	292.05	291.48	292.22	293.21	292.14	291.24
海温中值	291.78	291.98	291.36	292.10	293.11	292.00	291.11
海温标准差	0.59	0.35	0.42	0.39	0.37	0.44	0.43

注：表中A、B、C、D和E与表5中的含义相同。

因此，对于HJ-1B的历史影像，无论使用其头文件中的定标参数还是当年公布的定标参数，定标后辐射亮度值的偏差均存在一定的不稳定性。给用户在定标参数的选取和辐射定标结果的评价方面均带来困难。本文的实例分析结果显示：采用简单的线性内插法对辐射定标结果进行修正，可使得误差相对稳定。对于新采集的影像，若当年的定标参数尚未公布，线性外推法可用来估计辐射值。

5 结 论

准确的辐射定标是地表温度反演的首要环节。模型分析和模拟实验表明，辐射定标对地表温度反演结果的影响程度与地物自身性质(温度和比辐射率)和大气条件有关，表现出一定的区域和季节性。总体而言，辐射定标偏差对地表温度反演结果的影响在低纬度地区更明显，尤其是在夏季。在一般情况下，就HJ-1B热红外波段而言，辐

射定标偏差与地表温度反演误差的比值在数值上约为1:11,即0.1个单位的辐射定标偏差($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)所导致的地表温度误差约为1.1 K。目前,由于HJ-1B热红外的定标参数的更新存在滞后,影响了辐射定标的精度,造成一定程度上的辐射测量偏差。实验结果显示,即使仅考虑相邻年份的偏差,不恰当的定标参数可能引起地表温度的平均绝对误差在1.0—2.0 K左右,更严重的情况下则达到5.0 K以上。因此,本文提出了相应的辐射定标修正估计方案,即线性内插修正法和线性外推法。两个方案所依据的前提条件是:(1)已公布的定标参数是准确无误的;(2)传感器辐射性能变化是匀速稳定的。很显然,两个假定条件的满足与否会潜在影响辐射估算的准确性。由于受到获取资料的限制,作者尚无法证明两个假定条件的合理性。案例分析的结果表明,在现阶段,两个修正处理方案是简单有效的,具有一定的实用价值,能在一定程度上减小因当前HJ-1B定标参数公布滞后所带来的影响。对HJ-1B热红外波段的准确辐射定标还需要通过提高定标参数的时效性来实现。除了实际的场地定标外,如何结合其他信息,利用交叉定标等手段进行实时定标也值得探讨。通过本文的讨论,希望数据使用者在定量应用HJ-1B热红外数据时能重视辐射定标参数的选择以及潜在的影响。由于HJ-1B热红外影像在时间和空间方面均具有相对较高的分辨率,随着有关问题的逐步解决,其必将在资源环境领域发挥更大的作用。

志 谢 中国资源卫星应用中心(CRESDA)、美国国家宇航局(NASA)和加州大学圣芭芭拉分校的Wan Zhengming博士分别免费提供了本文中所使用的HJ-1A/B数据及定标文件、MODIS数据和MODIS UCSB辐射光谱库资料。

参考文献(References)

- Barsi J A, Hook S J, Palluconi F D, Schott J R and Raqueno N G. 2006. Landsat TM and ETM+ thermal band calibration // Proceedings of SPIE 6296, Earth Observing Systems XI. San Diego, CA: SPIE: 62960F [DOI: 10.1117/12.683212]
- Barsi J A, Hook S J, Schott J R, Raqueno N G and Markham B L. 2007. Landsat-5 thematic mapper thermal band calibration update. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 4(4): 552 – 555 [DOI: 10.1109/LGRS.2007.896322]
- Barsi J A, Schott J R, Hook S J, Raqueno N G, Markham B L and Radocinski R G. 2014. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. Remote Sensing, 6(11): 11607 – 11626 [DOI: 10.3390/rs6111607]
- Chen F, Zhao X F, Ye H and Hu H Y. 2011. Retrieving land surface temperature from Landsat TM using different atmospheric products as ancillary data // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM). Fuzhou, China: IEEE: 421 – 426 [DOI: 10.1109/ICSDM.2011.5969079]
- Chen F, Zhao X F, Quan Y and Liu L. 2014. Single-channel method based on temporal and spatial information for retrieving land surface temperature from remote sensing data. Journal of Remote Sensing, 18(3): 657 – 672 (陈峰, 赵小峰, 全元, 柳林. 2014. 利用时空信息的单波段地表温度遥感反演. 遥感学报, 18(3): 657 – 672) [DOI: 10.11834/jrs.20143167]
- Chen F, Yang S, Su Z and He B Y. 2015. A new single-channel method for estimating land surface temperature based on the image inherent information: the HJ-1B case. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 101: 80 – 88 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.008]
- Duan S B, Yuan G J, Qian Y G, Li Z L, Jiang X G and Li X W. 2008. Two single-channel algorithms for retrieving land surface temperature from simulated HJ-1B data. Progress in Natural Science, 18(9): 1001 – 1008 (段四波, 阎广建, 钱永刚, 李召良, 姜小光, 李小文. 2008. 利用HJ-1B模拟数据反演地表温度的两种单通道算法. 自然科学进展, 18(9): 1001 – 1008) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2008.09.006]
- Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, Cothorn J S, Hook S and Kahle A B. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4): 1113 – 1126 [DOI: 10.1109/36.700995]
- Han Q J, Min X J and Fu Q Y. 2009. Research of onboard calibration and cross-calibration for thermal infrared channel of HJ-1B. Space Craft Recovery and Remote Sensing, 30(4): 42 – 48, 56 (韩启金, 闵祥军, 傅俏燕. 2009. “环境一号”B星热红外通道星上定标与交叉定标研究. 航天返回与遥感, 30(4): 42 – 48, 56)
- Han Q J, Min X J and Fu Q Y. 2010. In-flight absolute radiometric calibration for thermal infrared band of HJ-1B. Journal of Remote Sensing, 14(6): 1212 – 1225 (韩启金, 闵祥军, 傅俏燕. 2010. HJ-1B热红外波段在轨绝对辐射定标. 遥感学报, 14(6): 1212–1225) [DOI: 10.11834/jrs.20100611]
- He L M, Yan G J, Wang H and Li X W. 2005. Band response function and emissivity effect on component temperatures retrieval for wide band thermal—infrared sensor. Journal of Remote Sensing, 9(3): 234 – 241 (何立明, 阎广建, 王华, 李小文. 2005. 从宽波段热红外图像反演组分温度的相关问题讨论——通道响应函数和比辐射率波段变化的影响. 遥感学报, 9(3): 234–241)
- Jiménez-Muñoz J C and Sobrino J A. 2003. A generalized single-channel

- nel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22): 4688 [DOI: 10.1029/2003JD003480]
- Li H, Liu Q H, Zhong B, Du Y M, Wang H S and Wang Q. 2010. A single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from HJ-1B/IRS data based on a parametric model // *Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Honolulu, Hawaii: IEEE: 2448 – 2451 [DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5649801]
- Li J G, Gu X F, Yu T, Han Q J, Guo H and Wang S Y. 2011. Lookup table method of effective bandwidth for HJ-1B B08 on-board radiometric calibration. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 60 – 72 (李家国, 顾行发, 余涛, 韩启金, 郭宏, 王苏颖. 2011. HJ-1B B08在轨星上定标有效波段宽度计算的查找表法. *遥感学报*, 15(1): 60 – 72) [DOI: 10.11834/jrs.20110105]
- Li Z L, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Wan Z M, Trigo I F and Sobrino J A. 2013. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131: 14 – 37 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008]
- Qin Z H, Karnieli A and Berliner P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18): 3719 – 3746 [DOI: 10.1080/01431160010006971]
- Schmugge T, French A, Ritchie J C, Rango A and Pelgrum H. 2002. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations. *Remote Sensing of Environment*, 79(2/3): 189 – 198 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00272-3]
- Sun K, Fu Q Y and Qi X Y. 2010. Radiometric cross-calibration of thermal infrared channel of IRS sensor on HJ-1B satellite. *Infrared and Laser Engineering*, 39(5): 785 – 790 (孙珂, 傅俏燕, 亓学勇. 2010. HJ-1B卫星IRS传感器热红外通道交叉定标. *红外与激光工程*, 39(5): 785 – 790)
- Tong J J, Qiu K M and Li X W. 2005. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 24(4): 277 – 280 (童进军, 邱康睦, 李小龙. 2005. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法. *红外与毫米波学报*, 24(4): 277 – 280)
- Wan Z M and Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 892 – 905 [DOI: 10.1109/36.508406]
- Wang Q, Wu C Q and Li Q. 2010. Environment Satellite 1 and its application in environmental monitoring. *Journal of Remote Sensing*, 14(1): 104 – 121 (王桥, 吴传庆, 厉青. 2010. 环境一号卫星及其在环境监测中的应用. *遥感学报*, 14(1): 104–121) [DOI: 10.11834/jrs.20100109]
- Xu H Q. 2015. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(3): 741 – 747 (徐涵秋. 2015. 新型Landsat 8卫星影像的反射率和地表温度反演. *地球物理学报*, 58(3): 741 – 747) [DOI: 10.6038/cjg20150304]
- Zhang Y, Yu T, Gu X F, Zhang Y X, Chen L F, Yu S S, Zhang W J and Li X W. 2006. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS Thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect. *Journal of Remote Sensing*, 10(5): 789 – 797 (张勇, 余涛, 顾行发, 张玉香, 陈良富, 余珊珊, 张文君, 李小龙. 2006. CBERS-02 IRMSS热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用. *遥感学报*, 10(5): 789 – 797)
- Zhu L, Zhao L M, Wang Q, Zhang A L, Wu C Q, Li J G and Shi J X. 2014. Monitoring the thermal plume from coastal nuclear power plant using satellite remote sensing data: modeling and Validation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(11): 3079 – 3084 (朱利, 赵利民, 王桥, 张爱玲, 吴传庆, 李家国, 石继香. 2014. 核电站温排水分布卫星遥感监测及验证. *光谱学与光谱分析*, 34(11): 3079 – 3084)

Radiometric calibration of the HJ-1B thermal channel and its effects on land surface temperature retrieval

CHEN Feng¹, YIN Shoujing², ZHU Li², YIN Kai³, HE Baoyin⁴, YANG Song¹

1. Institute of Earth Climate and Environment System, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China;

3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: Radiometric calibration is a procedure to obtain at-sensor radiance from digital number records. Accurately calibrated radiation is critical in retrieving brightness temperature and Land Surface Temperature (LST). Uncertainty in radiometric calibration typically becomes increasingly obvious because of the decay of the sensor during in-orbit operation. In practice, radiometric calibration is determined by calibration of the sensor. This paper presents a new method for radiometric calibration of the HJ-1B thermal channel. The method is based on the radiometric calibration of the Landsat 5 TM sensor. The results show that the method can effectively reduce the uncertainty of the radiometric calibration. The method can be applied to other satellite sensors. (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

ration parameters. In this study, radiometric calibration of the HJ-1B thermal channel and the effects of calibration uncertainty on LST retrieval are investigated.

A sensitivity model based on the radiative transfer model is proposed to assess the effects of radiometric calibration on LST retrieval. The calibration parameters for HJ-1B imagery are not updated in a timely manner (always annually); this lack of timeliness inevitably results in errors in radiometric calibration. Therefore, two methods are proposed for two specific cases to estimate radiation properly. These two methods are linear interpolation and linear extrapolation.

The sensitivity model shows that in terms of the numerical value, the ratio of radiometric calibration deviation to the LST error is approximately 1:11. Under a moderate condition, a $0.1 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ uncertainty in radiometric calibration may result in an error of 1.1 K in the final LST result. Simulations based on the calibration parameters of the HJ-1B thermal channel are conducted. The errors in radiometric calibration result from the improper selection of calibration parameters. Generally, even the calibration differences between two neighboring years are considered. The mean absolute errors of LST that approximate 1.0—2.0 K and highly significant LST errors (larger than 5.0 K) could be obtained under poor conditions. Case studies show that the calibration parameters in the header file of the HJ-1B imagery are always the parameters updated in the previous year or even two years ago. The calibration parameters for the HJ-1B thermal channel have not been updated since 2012. Thus, two estimation methods based on linear models are proposed to obtain radiometric calibration properly. A case study illustrates that under the current situation, the proposed estimation methods are simple but effective. Therefore, they are recommended to general users as references and for application.

The calibration parameters in the header file of the HJ-1B imagery are always not updated timely and frequently. Thus, uncertainty in the radiometric calibration of the HJ-1B thermal channel is inevitable. The LST errors resulting from radiometric calibration uncertainty are influenced by several factors, including surface characteristics (i.e., temperature and emissivity) and atmospheric conditions. The actual effects depend on seasonal and regional variations, which emphasize the challenge of accurately obtaining LST from the HJ-1B thermal channel. Two methods are proposed and assessed for the radiometric calibration of the HJ-1B thermal channel. Although the estimation methods are generally acceptable because of their simplicity and effectiveness, additional efforts are required to clarify the actual performance of the sensor. General users should consider radiometric calibration uncertainty in quantitative applications of the HJ-1B thermal imagery.

Key words: radiometric calibration, thermal remote sensing, land surface temperature, sensitivity, HJ-1B

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2014CB953900); National Natural Science Foundation of China (No. 41375081)