

MODIS 的 HJ-1B 红外通道星上定标系数交叉验证

刘 李¹, 傅俏燕¹, 史婷婷², 潘志强¹, 韩启金¹

(1. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: HJ-1B 卫星自发射以红外通道共进行了 7 次星上黑体定标, 针对星上定标系数的验证工作开展较少, 以 MODIS 第 31、32 通道为参考源, 分别基于光谱响应差异和线性统计关系两种方法对 HJ-1B 红外通道星上定标系数进行验证。首先, 计算两个传感器表观辐亮度的匹配关系, 进而计算出 HJ-1B 红外通道的等效离表亮温, 通过与 HJ-1B 红外通道基于星上定标系数反演得到的离表亮温进行比较, 实现对星上定标系数的验证。通过半高宽法、矩方法和查找表法这三种不同的方法计算得到了 2009 年 9 月 14 日星上定标系数。结果表明: 三种方法中, 查找表法精度较高, 且 HJ-1B 查找表法星上定标系数反演亮温与基于光谱响应差异和线性统计关系计算的等效亮温偏差较小, 分别为 0.02 K 和 0.81 K。这两种交叉验证方法的精度均在 1 K 以内, 证明了该方法的可行性, 且基于光谱响应差异的验证方法精度更高。该研究为光学载荷在轨辐射定标的验证提供了理论基础。

关键词: 星上定标; 红外; 交叉验证

中图分类号: TP732.2; TP722.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)11-3638-08

Cross-validation of HJ-1B infrared channels onboard calibration coefficients using MODIS

Liu Li¹, Fu Qiaoyan¹, Shi Tingting², Pan Zhiqiang¹, Han Qijin¹

(1. China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Since HJ-1B has been launched, 7 sets of blackbody data were used to calculate onboard calibration coefficients, but the research work on the validation of coefficients is rare. MODIS 31, 32 channels were selected as the reference sensor for the validation of the HJ-1B infrared channel onboard calibration coefficients by using the methods of spectral response divergence and linear statistical relationship. Firstly, the relationship of top of atmosphere (TOA) radiance between the HJ-1B thermal infrared channel and MODIS 31, 32 channels is calculated, and based on which the surface leaving brightness temperature is calculated to validate the brightness temperature calculated through the onboard calibration coefficients. According to the onboard calibration principle, calibration coefficients of HJ-1B infrared channel on Sep 14th, 2009 are calculated with the Half-width, moments and look-up table methods. The results show that calibration coefficients calculated by the look-up table method has better precision. The difference between the brightness temperature of look-up table method and spectral response divergence and linear statistical relationship methods are within 1 K, 0.02 K and 0.81 K,

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA12A302)

作者简介: 刘李(1984-), 男, 工程师, 博士, 主要从事传感器辐射定标方面的研究。Email: liulicugb@126.com

respectively, which demonstrate the feasibility of both validation methods and the spectral response divergence method has high accuracy. The study may contribute to fundamental basis for the validation of in-flight calibration of optical payload.

Key words: onboard calibration; infrared; cross validation

0 引言

国产 HJ-1B 卫星自 2008 年 9 月 6 日进入太阳同步轨道后,运行稳定,被广泛应用于旱、涝、火、雪等环境灾害监测方面,在环境减灾、监测业务化系统中发挥着关键作用。传感器辐射定标是实现卫星数据由计数值到物理量的转换,保障遥感数据定量化应用的重要手段。

目前,针对红外传感器的辐射定标以星上定标精度最高。HJ-1B 卫星红外传感器自发射以来,分别在 2008 年 9 月 14 日、2008 年 11 月 9 日、2008 年 12 月 1 日、2008 年 12 月 8 日、2009 年 8 月 5 日、2009 年 8 月 14 日和 2009 年 9 月 14 日进行了 7 次星上黑体辐射定标。由于星上定标系统的稳定性下降,2009 年后未采用星上黑体开展在轨星上定标。因此,基于青海湖和内蒙古达里湖水体的场地定标及 MODIS 等国外高定标精度载荷的交叉定标被用来开展 HJ-1B 红外通道定标。由于受到测量条件、自然因素和人力、物力等影响,场地定标方法局限性较大。相比较而言,针对多传感器,多时相卫星数据的无场地交叉定标的优势明显^[1-2]。

针对 HJ-1B 红外通道星上定标系数的验证工作开展较少的情况,韩启金在 2009 年利用 MODIS 第 31 通道与 HJ-1B 红外通道进行交叉定标,通过与 HJ-1B 星上定标结果对比分析,认为其星上定标精度较高^[3]。并于 2010 年利用 7 次星上定标数据进行星上定标,通过半高宽法有效波段宽度计算实现了辐照度与辐亮度的转换,并使用星上定标前后的 MODIS 第 31、32 通道的合成辐亮度对 HJ-1B 红外通道星上定标结果进行检验,认为星上定标系数精度下降了 1.5%^[4]。李家国构建了 HJ-1B 红外通道在轨星上定标有效波段宽度的查找表法。分别利用查找表法、半高宽法和矩方法对 2009 年 8 月 5 日和 8 月 14 日星上定标数据进行处理,并以 2009 年 8 月 12 日青海湖星地同步观测实验数据和 Terra MODIS 数据

分别对星上定标的结果进行验证。结果表明,查找表法星上定标结果精度更高^[5]。文中以 MODIS 传感器为参考传感器,借鉴无场地交叉定标的方法对星上定标系数开展验证。首先,通过查找表法、半高宽法和矩方法计算 HJ-1B 红外通道星上定标系数。分别基于光谱响应差异和线性统计关系两种方法进行两传感器表观辐亮度的匹配关系,从而计算出 HJ-1B 红外通道的等效离表亮温,与 HJ-1B 红外通道基于星上定标系数得到的反演离表亮温进行比较,从而实现对星上定标系数的验证。

1 原理与流程

交叉验证需要考虑不同传感器间的时间差异、几何差异及光谱差异。以具有较高定标精度的 MODIS 第 31、32 通道作为参考源,计算 HJ-1B 红外通道的等效离表亮温,与 HJ-1B 红外通道基于定标系数反演得到的离表亮温进行比较,分析两者差异,达到验证定标系数的目的。

1.1 原理

交叉验证主要包括辐射传输模拟计算和匹配统计数据统计分析^[6]。辐射传输模拟计算通过 MODTRAN 辐射传输模型实现。匹配统计数据统计分析分别基于 MODIS 第 31、32 通道和 HJ-1B 对应红外通道的光谱响应差异和两传感器入瞳处通道辐亮度的定量线性关系进行。

(1) 基于传感器光谱响应差异的数据匹配

由于 MODIS 与 HJ-1B 红外通道的光谱响应不一致,需要对 MODIS 于 HJ-1B 红外通道进行光谱匹配。选取 BOMEM M-154 红外光谱仪测量青海湖水获取的红外光谱作为基准,将 MODIS 第 31、32 通道和 HJ-1B 红外通道的光谱响应分别与该水体红外光谱进行通道归一化,将两通道归一化辐亮度的比值作为修正因子^[7],如公式(1)所示。

$$L_{HJ-1B} = k_{HJ-MODIS} \cdot (L_{MODIS31} + L_{MODIS32}) \quad (1)$$

式中: $L_{MODIS31}$ 和 $L_{MODIS32}$ 分别代表 MODIS 第 31、32 通

道的表观辐亮度值; L_{HJ-1B} 为 HJ-1B 红外通道的等效表观辐亮度; $k_{HJ-MODIS}$ 为修正因子, 具体见公式(2)。

$$k_{HJ-MODIS} = 2 \frac{\int L_M(\lambda) f_{HJ-1B}(\lambda) d\lambda}{\int f_{HJ-1B}(\lambda) d\lambda} / \left(\frac{\int L_M(\lambda) f_{MODIS31}(\lambda) d\lambda}{\int f_{MODIS31}(\lambda) d\lambda} + \frac{\int L_M(\lambda) f_{MODIS32}(\lambda) d\lambda}{\int f_{MODIS32}(\lambda) d\lambda} \right) \quad (2)$$

式中: $L_M(\lambda)$ 为 BOMEM M-154 红外光谱仪测量青海湖水面获取的红外光谱; $f_{HJ-1B}(\lambda)$ 、 $f_{MODIS31}(\lambda)$ 和 $f_{MODIS32}(\lambda)$ 分别代表 HJ-1B 红外通道和 MODIS 第 31、32 通道的光谱响应函数。

(2) 基于线性统计关系的数据匹配

首先对 HJ1B IRS 通道图像和 MODIS31、32 通道图像进行几何校正。选择感兴趣区域, 借鉴 SST 算法^[6], 通过模拟不同下垫面温度, 大气廓线, 观测几何, 结合两传感器通道光谱响应函数, 建立两传感器不同时相入瞳辐亮度的定量线性关系^[9]。

1.2 流程

基于上述原理, 使用如下流程实现使用 MODIS 数据^[10]对 HJ-1B 卫星红外通道的星上定标系数的验证与评价, 主要流程如图 1 所示。

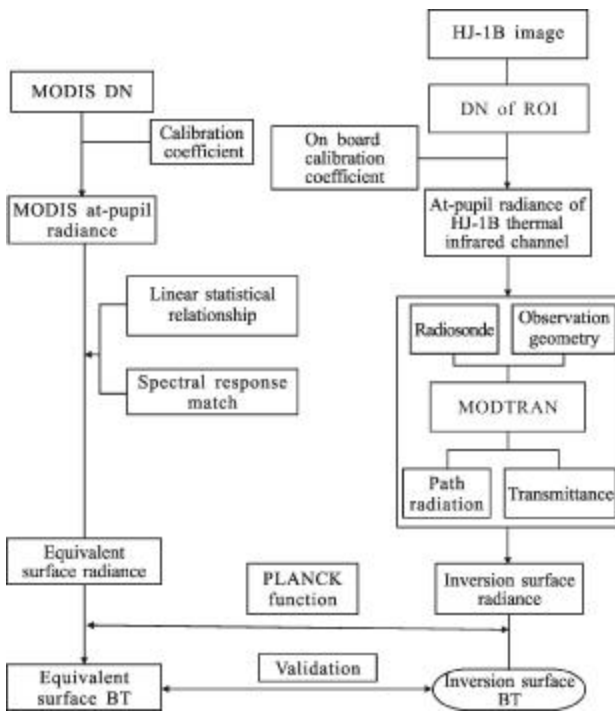


图 1 交叉验证流程

Fig.1 Flowchart of cross-validation

一方面, 通过 HJ-1B 卫星过境时刻的同步影像, 获取实验区域计数值, 根据星上定标系数将计数值转化为入瞳辐亮度。根据辐射传输模型计算大气程辐射和卫星观测路径的大气透过率, 反演得到离表辐亮度。另一方面, 通过获取 MODIS 第 31、32 通道遥感影像中感兴趣区的计数值和对应通道的定标系数, 计算其入瞳辐亮度。分别基于 MODIS 第 31、32 通道与 HJ-1B 红外通道的光谱响应差异和通过辐射传输模拟建立两传感器表观辐亮度间的线性统计关系, 计算 HJ-1B 红外通道等效表观辐亮度。经大气辐射传输计算, 得到 HJ-1B 红外通道的等效离表辐亮度^[11]。经 Planck 公式完成辐亮度到亮温的转换, 最终, 通过对 HJ-1B 红外通道反演离表亮温的验证, 实现对其星上定标系数的验证。

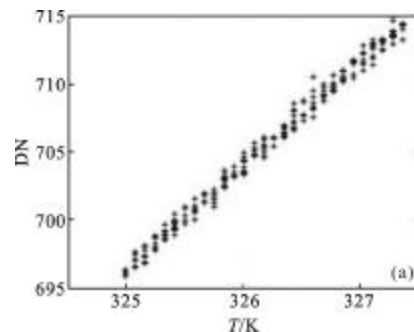
2 数据处理

实验数据主要包括 2009 年 9 月 14 日 HJ-1B 红外通道星上定标数据; 2009 年 9 月 15 日 HJ-1B 红外通道星上下传数据; 2009 年 9 月 20 日青海湖区域的 MODIS 第 31、32 通道和 HJ-1B 红外通道遥感影像; MODIS 第 31、32 通道和 HJ-1B 红外通道光谱响应函数。

2.1 星上定标系数计算

利用 HJ-1B 卫星红外通道 2009 年 9 月 14 日的星上校正黑体高温点数据和邻近的 2009 年 9 月 15 日星上校正黑体的常温点数据, 计算其星上定标系数。HJ-1B 红外通道共有 10 个探元, 由于各个探元的响应存在差异, 因此进行了逐探元计算, 并给出了 10 个探元的均值。

根据 HJ-1B 卫星数传系统的设计, 通过处理星上下传的 RCP 文件和 CAL 辅助文件, 获取红外相机星上校正黑体温度数据 T 和观测校正黑体时记录的通道计数值 DN, 结果如图 2 所示。



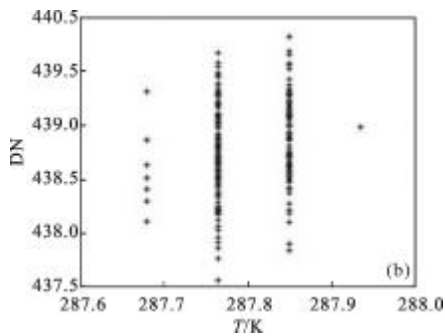


图 2 T-DN 探元均值散点图

Fig.2 T-DN scatter diagram of detectors average value

通过发射前实验室定标建立的温度-辐射量转换经验公式,实现校正黑体温度对应到该温度下标准面源黑体的辐射量的转换^[3]。由于 HJ-1B 红外波段通过双面镜观测成像,双面镜温度对内部光路系统具有辐射贡献,因此通过对双面镜的辐射贡献进行纠正,得到纠正后的辐照度 N_c ,结果如图 3 所示。

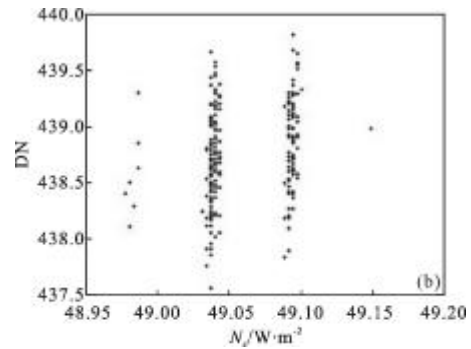
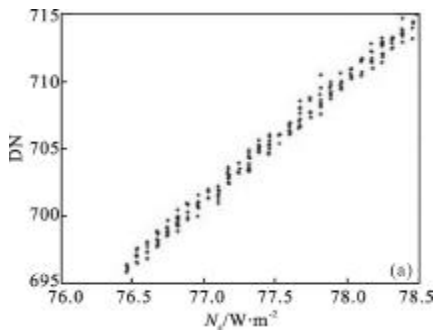


图 3 Nc-DN 探元均值散点图

Fig.3 Nc-DN scatter diagram of detectors average value

由于实验室建立的是整个光路系统辐照度与被观测的面源黑体温度之间的关系,而在遥感实际的应用过程中使用的是辐亮度,需要通过公式 $L = N_c / (\Delta\lambda \times \pi)$ 进行转换。此处 $\Delta\lambda$ 为有效波段宽度。按照半高宽法、矩方法^[12]计算结果分别为 $1.9300 \mu\text{m}$ 、 $2.3877 \mu\text{m}$ 。查找表法通过构建辐照度和辐亮度的函数关系建立不同黑体温度下的 HJ-1B 红外通道有效波段宽度查找表^[13],结合星上下传数据,得到高温点和常温点对应的有效波段宽度分别为 $2.0153 \mu\text{m}$ 、 $2.0109 \mu\text{m}$ 。据此,分别计算得到高温点和常温点对应的辐亮度值,统计结果见表 1。

表 1 星上定标结果

Tab.1 Onboard calibration results

Calibration methods	Radiance/ $\text{W} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$		DN		Coefficient	
	High temperature point	Normal temperature point	High temperature point	Normal temperature point	Gain	Bias
Half-width	12.775 9	8.091 2			56.915	-21.721 1
Moments	10.326 9	6.540 2	705.418 5	438.787 1	70.412 4	-21.721 1
Look-up table	12.235 1	7.765 7			59.655 9	-24.479 4

2.2 定标系数验证

在传感器星上定标系数短时间内不会发生衰变的假设下,为避免受到云覆盖的影响,选择 2009 年 9 月 20 日青海湖区域的 MODIS 第 31、32 通道和 HJ-1B 红外通道遥感影像,实现对 HJ-1B 红外通道 2009 年 9 月 14 日星上定标结果的验证。

2.2.1 传感器红外通道表观辐亮度

根据 2009 年 9 月 20 日 MODIS 第 31、32 通道的遥感影像,在几何校正的基础上,提取感兴趣区域的计数值,已知对应通道的定标系数,由 MODIS 定标公式转换得到 MODIS 第 31、32 通道入瞳处表观辐亮度,结果见表 2^[14]。同理,在 2009

年 9 月 20 日 HJ-1B 红外通道遥感影像中, 选择对应经纬度的感兴趣区域, 根据 2009 年 9 月 14

日星上定标, 得到半高宽法、矩方法和查找表法对应的表观辐亮度。

表 2 MODIS 第 31、32 通道感兴趣区域表观辐亮度计算
Tab.2 ROI at-pupil radiance of MODIS 31th, 32th channels

Channels	DN		$g/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$	b	At-pupil radiance $/W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
MODIS 31th	10 569.2		0.000 84	1 577.34	7.553 4
MODIS 32th	11 465.96		0.000 73	1 658.22	7.156 7
		Half-width	56.915	-21.721 1	7.650 0
HJ-1B infrared	413.68	Moments	70.412 4	-21.721 1	6.183 6
		Look-up table	59.655 9	-24.479 4	7.344 8

2.2.2 辐射传输模拟计算

使用 MODTRAN4.0 内置中纬度夏季的标准大气模式, 以 HJ-1B 和 MODIS 卫星过境时刻的观测天顶角 157.27° 、 166.4° 和青海湖场地的下垫面数据为输入参数, 进行辐射传输模拟, 模拟出分谱的大气透过率和大气程辐射^[6], 然后将它们与 HJ1B 卫星 IRS 通道的通道响应函数进行积分, 得到等效大气透过率和大气程辐射分别为 HJ-1B 0.9229, MODIS 0.9262 和 HJ-1B 0.4075, MODIS 0.3904 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。如图 4、5 所示。

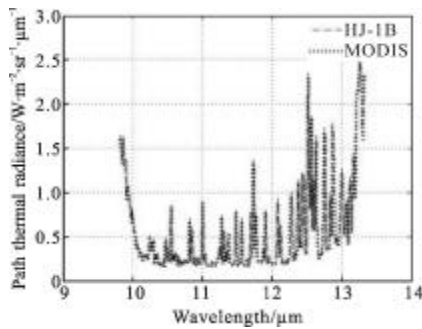


图 4 大气程辐射

Fig.4 Spectral atmospheric path radiation

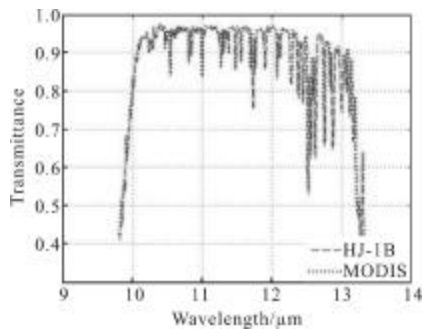


图 5 大气透过率

Fig.5 Spectral atmospheric transmittance

2.2.3 基于光谱响应差异的数据匹配

基于传感器光谱响应差异的数据匹配原理, 结合 MODIS 第 31、32 通道^[16]和 HJ-1B 红外通道的光谱响应(见图 6), 计算得到 MODIS 等效表观辐亮度为 $7.355 0 W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。

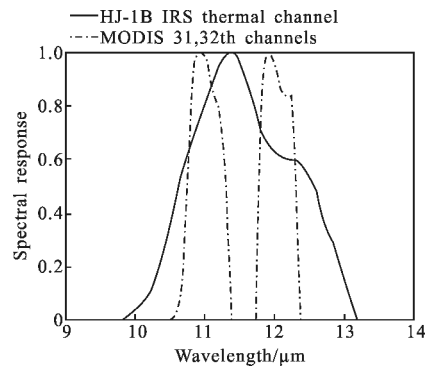


图 6 HJ-1B 红外通道和 MODIS 第 31、32 通道光谱响应

Fig.6 Response function of HJ-1B infrared channel and MODIS 31th, 32th channels

2.2.4 基于线性统计关系的数据匹配

利用辐射传输模型 MODTRAN 进行模拟, 考虑下垫面为湖面的情况下, 模拟不同时相水表温度从 260 K 以 5 K 为步长变化至 310 K, 同时利用 MODTRAN 不同时相对应的标准大气廓线模式, 并结合观测几何条件, 及两个传感器红外通道光谱响应函数, 得到 HJ-1B 红外通道与 MODIS 第 31、32 通道的辐亮度(见表 3), 最终建立两个传感器入瞳处通道辐亮度的定量线性关系^[17]。

根据表 3 中不同条件下模拟得到的两个传感器入瞳辐亮度进行线性拟合, 得到 HJ-1B 红外通道与 MODIS

第 31、32 通道的入瞳辐亮度线性关系表达式为:

计算得到 MODIS 等效表观辐亮度为 7.265 8 W/

$$L_b=0.126 8+0.970 2L_{31}-0.477 7(L_{31}-L_{32}) \quad (3) \quad (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)。$$

表 3 HJ-1B 红外通道与 MODIS 第 31、32 通道表观辐亮度模拟

Tab.3 Simulation of at-pupil radiance of HJ-1B infrared channel and MODSI 31th, 32th channels

Surface/K	HJ-1B infrared channel's radiance/W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹	MODIS 31th channel's radiance/W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹	MODIS 32th channel's radiance/W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹
260	4.851 012	4.892 086	4.845 555
265	5.276 76	5.355 332	5.259 127
270	5.725 783	5.845 578	5.693 613
275	6.198 184	6.363 028	6.149 007
280	6.694 028	6.907 848	6.625 268
285	7.213 33	7.480 142	7.122 33
290	7.756 094	8.079 982	7.640 098
295	8.322 277	8.707 4	8.178 45
300	8.911 808	9.362 375	8.737 246
305	9.524 591	10.044 87	9.316 321
310	10.160 5	10.754 81	9.915 497

3 验证结果与评价

3.1 验证结果

已知 HJ-1B 红外通道 2009 年 9 月 20 日青海湖实验场的计数值,经半高宽法、矩方法和查找表法星上定标系数转换得到对应的表观辐亮度,通过 MODTRAN 辐射传输模型计算大气程辐射和透过

率,得到对应的离表辐亮度,进而得到离表亮温。同时,提取同一天 MODIS 第 31、32 通道的青海湖实验场区域的计数值,经 MODIS 对应通道的定标系数转换为表观辐亮度,分别基于光谱响应差异和线性统计得到的 HJ-1B 等效表观辐亮度,结合大气程辐射和大气透过率,计算得到 HJ-1B 等效离表辐亮度和离表亮温值,具体结果见表4。

表 4 HJ-1B 红外通道和 MODIS 第 31、32 通道离表亮温

Tab.4 Surface brightness temperature of HJ-1B infrared channel and MODSI I 31th, 32th channels

	At-pupil radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹	Path radiation /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹	Transmittance	Surface radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹	Surface brightness temperature/K	Difference1 /K	Difference2 /K	
Half-width	7.650 0			7.847 7	288.77	2.80	3.63	
Inversion	Moments	6.183 6	0.407 5	0.922 9	6.258 7	274.52	-11.46	-10.62
	Look-up table	7.344 8			7.517 0	285.95	-0.02	0.81
	Spectral response divergence	7.355 0			7.519 7	285.97	-	-
Equivalent	Linear statistical relationship	7.265 8	0.390 4	0.926 2	7.423 4	285.14	-	-

3.2 结果评价

根据表 4, 针对 HJ-1B 红外通道离表亮温的反演值与等效值进行比较分析。可知, 基于光谱响应差异法的离表亮温等效值与 HJ-1B 红外通道基于半高宽法、矩方法和查找表法星上定标系数的离表亮温反演值偏差分别为 2.80 K、-11.46 K 和 -0.02 K, 基于线性统计法的离表亮温等效值与 HJ-1B 红外通道基于半高宽法、矩方法和查找表法星上定标系数的离表亮温反演值偏差分别为 3.63 K、-10.62 K 和 0.81 K。

查找表法星上定标系数对应得到的 HJ-1B 红外通道离表亮温反演值与基于光谱响应差异和线性统计关系的等效离表亮温值偏差较小, 分别为 0.02 K 和 0.81 K。其中, 基于光谱响应差异的等效离表亮温值较线性统计关系精度更高。这种优势同样体现在半高宽法星上定标系数所计算的结果中。半高宽法、矩方法星上定标系数所得离表反演值与等效值偏差较大, 分别在 3.2 K、11 K 左右。

4 结论

基于 MODIS 第 31、32 通道的 HJ-1B 红外通道星上定标结果验证, 以具有较高定标精度的 MODIS 作为参考源, 分别基于光谱响应差异和线性统计关系两种方法进行两传感器表观辐亮度的匹配, 从而计算出 HJ-1B 红外通道的等效离表亮温, 通过与 HJ-1B 红外通道基于星上定标系数得到的反演离表亮温进行比较, 实现对星上定标系数的验证。结论如下:

相对于半高宽法、矩方法, 查找表法星上定标系数反演得到的 HJ-1B 红外通道离表亮温与 MODIS 等效离表亮温偏差较小, 查找表法星上定标系数精度更高。基于光谱响应特性差异和表观辐亮度线性统计关系的 MODIS 第 31、32 通道与 HJ-1B 红外通道定标系数的交叉验证是可行的, 且基于光谱响应差异的验证方法物理意义明晰, 且精度更高。

基于线性统计关系的定标系数验证方法精度受到建模过程中下垫面温度、大气、观测几何等模型要素对样本数量限制的影响。另外, 文中仅使用一对影像针对 HJ-1B 红外通道在青海湖内陆水体均匀区域开展验证, 数据样本少, 下垫面、传感器、观测几何条件单一。因此, 结合实测地基数据和大气探空数据, 开展验证方法在多种载荷、下垫面、观测几何条件下的敏感性分析, 将有利于为后续光学载荷的定

标系数验证提供支持。

参考文献:

- [1] Merchanr C J, Simpson J J, Harris A R. A cross-calibration of GMS-5 thermal channels against ATSR-2 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(2): 268-282.
- [2] Yang Zhongdong, Gu Songyan, Qiu Hong, et al. Research on the algorithm of cross calibration about IRMSS ABORD on CBERS-1[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2003, 22(4): 281-285. (in Chinese)
杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(4): 281-285.
- [3] Han Qijin, Min Xiangjun, Fu Qiaoyan. Research of onboard calibration and cross-calibration for thermal infrared channel of HJ-1B[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(4): 42-48. (in Chinese)
韩启金, 闵祥军, 傅俏燕. “环境一号”B 星热红外通道星上定标与交叉定标研究[J]. *航天返回与遥感*, 2009, 30(4): 42-48.
- [4] Han Qijin, Min Xiangjun, Fu Qiaoyan, et al. Analysis of onboard calibration accuracy of HJ-1B infrared multispectral camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(3): 41-47. (in Chinese)
韩启金, 闵祥军, 傅俏燕, 等. HJ-1B 卫星红外多光谱相机星上定标精度分析[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(3): 41-47.
- [5] Li Jianguo, Gu Xingfa, Li Xiaoying, et al. Validation of HJ-1B thermal band on-board calibration and its sensitivity analysis[J]. *Remote Sensing Information*, 2011, 1(1): 3-8. (in Chinese)
李家国, 顾行发, 李小英, 等. 热红外通道星上定标精度检验与敏感性分析[J]. *遥感信息*, 2011, 1(1): 3-8.
- [6] Gu Songyan, Qiu Hong, Fan Tianxi. Inter-calibration between FY-2A IR channel and GMS-5 IRA channel [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(1): 79-84. (in Chinese)
谷松岩, 邱红, 范天锡. FY-2A 与 GMS-5 红外通道遥感数据的辐射定标[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(1): 79-84.
- [7] Liu Li, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. HJ-1B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 4(5): 1119-1126. (in Chinese)
刘李, 顾行发, 余涛, 等. HJ-1B 卫星热红外通道在轨场地定标与验证[J]. *红外与激光工程*, 2012, 4(5): 1119-1126.

- [8] Minnett P J, Evans R H, Kearns E J, et al. Sea-surface temperature measured by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)[C]//GARSS, 2002: 1177-1179.
- [9] Haines S L, Jedlovec G J, Lazarus S M. A MODIS sea surface temperature composite for regional applications [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(9): 2919-2927.
- [10] Thome K J. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1): 27-38.
- [11] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (1): 261-274.
- [12] Palmer J M. Effective bandwidths for Landsat -4 and Landsat -D' multispectral scanner and thematic mapper subsystems. *Geoscience and Remote Sensing [J]. Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 3: 336-338.
- [13] Li Jianguo, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. Look up table method of effective bandwidth for HJ-1B B08 on-board radiometric calibration[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(1): 60-72. (in Chinese)
- 李家国, 顾行发, 余涛, 等. 在轨星上定标有效波段宽度计算的查找表法[J]. *遥感学报*, 2011, 15(1): 60-72.
- [14] Xiong X, Chiang K, Esposito J, et al. MODIS on-orbit calibration and characterization[J]. *Metrologia*, 2003, 40: S89-92.
- [15] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS[J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 65: 367-375.
- [16] Li Y H, Wu A S, Xiong X X. Evaluating calibration of MODIS thermal emissive bands using infrared atmospheric sounding interferometer measurements: ocean sensing and monitoring V[C]//SPIE, 2013: 87240X-1-10.
- [17] Liu Li, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. Time series of cross-calibration of HJ -1B thermal infrared channel: seventh international symposium on multispectral image processing and pattern recognition (MIPPR2011) [C]//SPIE, 2011: 800602-1.