



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 高分五号高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 传感器数据的交互对比
作者: 徐涵秋, 孙凤琴, 徐光志
DOI: 10.13203/j.whugis20200586
收稿日期: 2020-10-29
网络首发日期: 2021-01-04
引用格式: 徐涵秋, 孙凤琴, 徐光志. 高分五号高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 传感器数据的交互对比. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200586>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200586

引用格式：

徐涵秋, 孙凤琴, 徐光志. 高分五号高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 传感器数据的交互对比[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI: 10.13203/j.whugis20200586 (XU Hanqiu, SUN Fengqin, XU Guangzhi. Cross Comparison of the Gaofen-5 AHSI and VIMI Sensors[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI: 10.13203/j.whugis20200586)

高分五号高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 传感器数据的交互对比

徐涵秋^{1,2,*} 孙凤琴^{1,2} 徐光志^{1,2}

1 福州大学环境与资源学院, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州, 350116

2 福州大学遥感信息工程研究所, 福建省水土流失遥感监测评价重点实验室, 福州, 350116

摘要：高分五号卫星搭载的对地观测传感器有高光谱传感器(AHSI)和全谱段光谱传感器(VIMI), 但这两种传感器之间的光谱信号是否一致迄今仍鲜有报道。因此, 本次研究通过敦煌定标场和滕州地区的 3 对 AHSI 和 VIMI 同步影像对, 对 2 种传感器辐亮度数据之间的一致性进行了交互对比, 并与同步的 Landsat-8 OLI 辐亮度数据进行验证。结果发现, 2 种传感器的辐亮度数据之间存在着一定的偏差, VIMI 的辐亮度数据明显小于 AHSI, 其偏差率接近 32%, 二者的 R^2 也只有 0.817; 在各个对应波段之间, 红波段的差距最大, 其偏差率超过了 40%。与 Landsat-8 OLI 的验证表明, AHSI 的辐亮度数据与 OLI 很接近, 偏差率小于 5%, 但 VIMI 数据的偏差率则大于 20%。鉴于 VIMI 和 AHSI 的辐亮度数据存在着差距, 在现阶段如需要同时应用二者的数据, 建议要对 VIMI 数据进行转换校正。本次利用敦煌试验区的模型进行的转换结果表明, VIMI 辐亮度数据经转换后可大幅缩小与 AHSI 数据之间的差距, 有利于二者的协同使用。

关键词：高分五号卫星; AHSI; VIMI; 辐亮度; 交互对比

中图分类号：TP732 **文献标志码：**A

我国自 2010 年高分辨率对地观测系统重大专项实施以来, 已先后发射了一系列高分卫星。其中于 2018 年 5 月 9 日发射的高分五号卫星(GF-5)是一颗极具特色的卫星, 它搭载有 6 台不同的传感器, 是首颗实现对陆地和大气综合观测的卫星, 而其中主要承担对地观测使命的是可见光短波红外高光谱传感器 AHSI (Advanced HyperSpectral Imager)和全谱段光谱传感器 VIMI (Visual and Infrared Multispectral Imager)。

收稿日期：2020-10-29

项目资助：国家重点研发计划项目(2016YFA0600302); 国家自然科学基金项目(31971639)

第一作者：徐涵秋, 博士, 教授, 主要研究方向为环境和自然资源遥感。hxxu@fzu.edu.cn

近 20 年来,全世界有众多的新型卫星传感器相继升空,为地球表面观测提供了丰富的数据,并由此引发了各种传感器之间光谱信号交互对比的热点研究。其中开展较多的有美国 Landsat 系列卫星之间的交互对比,如 Landsat TM、ETM+以及 OLI/TIRS 之间的对比^[1-4]。由于 Landsat 系列卫星是世界上定标精度较高的卫星,因此各种卫星传感器与 Landsat TM/ETM+/OLI/TIRS 传感器的交互对比也一直在进行,如 MODIS^[5-6]、ASTER^[7-8]、IRS-P6^[9]、IKONOS^[10]和 Sentinel-2^[11-12]等都先后与 Landsat 对应卫星传感器进行了对比。通过与定标精度高的卫星传感器光谱信号进行对比,可查明被对比传感器的光谱信号差异,提高其定标精度。

近年来,我国国产卫星发展迅速,国产卫星之间的交互对比和定标研究也相继开展。Quan 等对比了环境一号(HJ-1A)和 MODIS 数据,发现二者在 3 个可见光波段的平均相对误差小于 8.5%^[13]。赵凯等则研究了 HJ-1A/B 和 Landsat TM/ETM+植被指数之间的关系,发现它们对应的植被指数之间存在极显著的正相关关系^[14]。张学文等利用 Landsat 8 影像对资源三号卫星(ZY-3)进行了交互对比,结果表明,交互对比和场地定标的结果有较好的吻合性^[15]。徐涵秋等则发现 ZY-3 的植被观测能力和高分一号(GF-1)很接近,二者的差异为 3%^[16]。Li 等对 GF-1 和 Landsat-8 数据的对比表明二者在 4 个多光谱波段的大部分反射率范围内的平均误差小于 5%^[17]。吴晓萍等基于敦煌定标场的同步影像将 GF-1、GF-2 与 Landsat-8 进行对比,结果发现 GF-1、GF-2 与 Landsat-8 数据具有很高的-致性,但也存在着一定的差异,且在近红外波段表现得较为明显^[18]。Chen 等根据新提出的定标参数对 GF-4 和 Landsat-8 数据进行了对比,结果发现二者的反射率差异小于 5%^[19]。Gao 等将 GF-4 数据与 Landsat-8、Sentinel-2 和 MODIS 等多种传感器的多光谱数据进行对比,结果发现它们之间的差异因场地和传感器而异^[20]。GF-5 卫星迄今仍未见交互对比的研究报道,但有少量传感器在轨定标的研究。刘银年等的研究表明 AHSI 高光谱数据的相对辐射定标误差小于 0.5%,场地绝对辐射定标的检验精度误差小于 5%^[21]。

由于光学传感器易受云雨的影响,造成数据的缺失。通过各种不同传感器数据的交互对比,可做到它们之间数据的互为转换,为长时间序列的对地观测和变化监测提供连续的遥感数据。因此,不同传感器之间的交互对比是一项极为重要的基础工作。遥感传感器光谱信号之间精确对比的重要前提就是被对比传感器之间必须具有同步观测的数据。为此美国 Landsat-7 ETM+发射后,为了和先期在轨运行的 Landsat-5 TM 进行交互对比,曾使用编程使二者同日过境,实现同步观测,但仍先后间隔了 20+分钟^[1]。同样,Landsat-8 发射后,也曾将 Landsat-7 ETM+卫星编程实现与 Landsat-8 同日观测和交互对比,但二者的时间间隔同样是 20+分钟^[3]。而 GF-5 的高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 是搭载于同一颗卫星的两个传感器,可实现对同一地面目标严格同步、无时间间隔的观测,为这两个传感器光谱信号的交互对比提供了坚实的基础。本文利用 AHSI 和 VIMI 的 3 对同步影像对,开展 AHSI 和 VIMI 数据的交互对比和验证,并与定标精度较高的 Landsat-8 OLI 数据进行对比,以揭示两种传感器数据之间的异同,这对于二者之间的精确定标和协同使用具有重要的意义。

1 数据与方法

1.1 数据源

GF-5 AHSI 高光谱传感器共 330 个波段, 光谱分辨率分别为 5nm (可见光近红外波段) 和 10 nm (中红外波段), 空间分辨率 30 m, 辐射分辨率 12 bit, 幅宽 60 km。VIMI 全谱段传感器共 12 个波段, 可见光~中红外波段和热红外波段各 6 个波段, 空间分辨率分别为 20 m 和 40 m, 辐射分辨率 12 bit, 幅宽 60 km (<http://gaofenplatform.com/contents/558/1292.html>)。本次试验选用的 3 幅 AHSI 和 VIMI 的同步影像对分别位于甘肃敦煌定标场(2 对)和山东滕州市(1 对)。每对同步影像的过空时间一致, 晴空无云, 太阳天顶角、方位角基本一致, 确保了不同传感器对地物观测的一致性(表 1)。为了使对比结果能够和定标精度较高的 Landsat 卫星进行验证, 还根据影像的可获取性从 Landsat 官网下载了 2 幅同日的 Landsat-8 卫星影像(<https://earthexplorer.usgs.gov>)。

表 1 同步影像对及其参数

Tab.1 Date-coincident image pairs used for the cross comparison

影像对	传感器	轨道号	日期	时间	太阳天顶角/°	太阳方位角/°	试验区特征
敦煌 1	Landsat-8 OLI	138/032		12:26	60.31	162.57	裸土为主
	GF-5 AHSI	356/621	2019-11-14	14:41	60.61	199.39	
	GF-5 VIMI			14:41	60.56	199.40	
敦煌 2	GF-5 AHSI	354/621	2019-07-14	14:38	22.30	214.35	裸土为主, 兼有植被 和少量建筑物
	GF-5 VIMI			14:38	21.45	214.43	
滕州	Landsat-8 OLI	122/036		10:48	23.04	123.05	植被为主, 兼有建筑 物和少量水体
	GF-5 AHSI	310/611	2019-05-22	13:13	20.82	179.80	
	GF-5 VIMI			13:13	20.78	179.80	

分别从 3 幅同步影像对中选取出本次研究的试验区。试验区的选择既要考虑地形的平坦性, 避免高低起伏的地形, 又要考虑兼有低、中、高反射率地物, 使试验区具有较宽的光谱覆盖范围, 以客观地分析各光谱波段在其设计波长范围内的定量关系^[1,22]。因此本次研究从 3 幅影像对中选出了地形较为平坦, 兼有裸土、建筑、植被和少量水体等具有高、中、低反射率地物的 3 个试验区, 分别为敦煌 1、敦煌 2 和滕州试验区 (图 1)。

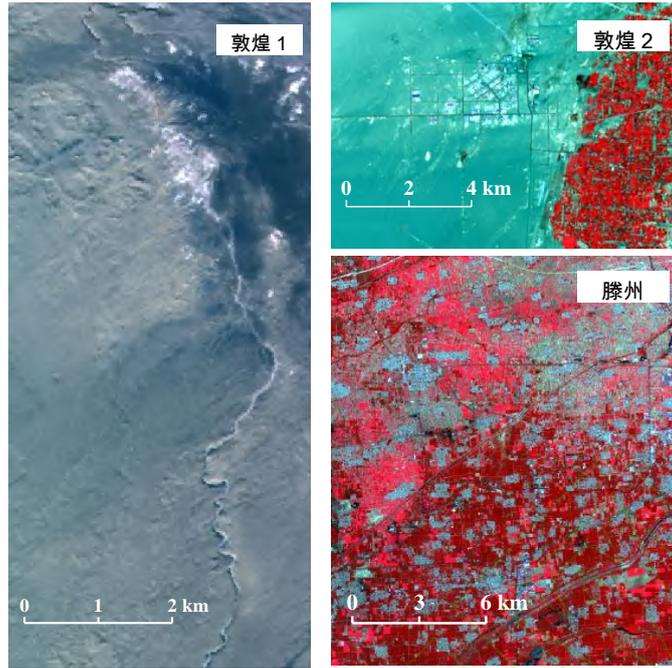


图1 试验区 (RGB: 近红外、红、绿波段合成)

Fig. 1 Three test sites (RGB: NIR, red, and green bands)

1.2 数据预处理

遥感影像进行辐射校正的第一步就是将原始影像的亮度值(DN)转换为辐亮度值(at-sensor radiance),因此辐亮度转换的准确与否,将直接影响辐射校正的准确性。鉴于此,本次试验主要对 AHSI 和 VIMI 这两种传感器的辐亮度进行交互对比,这也是定标研究常用的方法^[23-25]。同样, Landsat-8 OLI 的同步影像也反演成辐亮度以便与 AHSI 和 VIMI 辐亮度数据进行对比验证。辐亮度的计算公式如下:

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L(1)$$

式中: L_{λ} 为波段 λ 的辐亮度值,单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$; Q_{cal} 为波段 λ 的像元亮度值; M_L 和 A_L 为波段 λ 的辐亮度调整因子,它们可以从影像头文件中获取。

本文所采用的 Landsat-8 OLI 影像为已经过系统几何校正的 L1T 级产品,而 GF-5 的 AHSI 和 VIMI 影像为未经过系统几何校正的 L1 级产品,需使用 RPC 参数文件进行系统几何校正,将它们统一至 WGS-84 坐标系和 UTM 投影。但经叠加发现,3 种传感器影像的空间位置并不完全吻合,会有 1 至数个像元的偏差,因此通过坐标平移方法将 AHSI 和 VIMI 影像与 Landsat-8 影像进行配准。由于 VIMI 影像的 20 m 分辨率不同于 AHSI 和 OLI 的 30 m 分辨率,因此将 3 种影像的分辨率按它们之间的最大公约数重采样为 10 m,以保证在重采样的过程中不会发生像元的重组,在保持原始光谱值不变的同时使三者的分辨率一致。

AHSI 具有 330 个波段,而 VIMI 在对应的波长范围内只有 6 个波段,二者的波段数与波长范围完全不一致。如 VIMI 在 440~510 nm 的蓝光波长范围内只有 1 个波段(即 1 波段),而 AHSI 在此波长范围内有 16 个波段(即 13~28 波段)。为了使二者的光谱信号可以交互对比,将 AHSI 与 VIMI 对应波段波长范围内的相关波段相加取平均值,然后与 VIMI 对应波段的光谱信息进行比较,这也是不同光谱波段/波长传感器信号对比常用的方法^[26-28]。本次试验

涉及的 2 种传感器的 6 个共同波段的信息列于表 2，同时列出的还有 Landsat-8 OLI 对应波段的信息。

表 2 GF-5 VIMI、GF-5 AHSI 和 Landsat-8 OLI 对应波段的特征

Tab.2 Specifications of the corresponding bands of GF-5 VIMI, AHSI, and Landsat-8 OLI sensors

波段名	GF-5 VIMI		GF-5 AHSI		Landsat-8 OLI	
	波段号	波长范围/nm	波段号	波长范围/nm	波段号	波长范围/nm
蓝 (Blue)	B1	440~510	B13 - B28	439~508	B2	452~512
绿 (Green)	B2	510~580	B29 - B45	508~581	B3	533~590
红 (Red)	B3	620~680	B55 - B68	619~679	B4	636~673
近红外(NIR)	B4	760~870	B88 - B113	760~871	B5	851~879
中红外 1 (MIR1)	B5	1540~1700	B215 - B233	1541~1700	B6	1566~1651
中红外 2 (MIR2)	B6	2060~2350	B277 - B310	2062~2349	B7	2107~2294

1.3 交互对比方法

本次研究采用试验地点和土地覆盖类型均不同的 3 对影像进行对比，以避免单幅影像对比结果的偶然性。分别将 3 个试验区影像对的对应波段进行逐波段统计，求出各对应波段的决定系数(R^2)、偏差(ME)、绝对偏差率(MAPE)和均方根误差(RMSE)来定量判别各对应波段之间辐亮度的差异，然后对各对应波段影像视试验区的大小按 3×3 或 5×5 网格采样，将各对应波段的所采样点进行线性回归分析，求出各对应波段之间的回归关系方程，以进行转换验证。3 个试验区共采出 545310 样点(像元)，大样本量有助于全面客观分析两种传感器之间的定量关系。ME、MAPE 和 RMSE 的计算公式如下：

$$ME = (\overline{AHSI} - \overline{VIMI})(2)$$

$$MAPE(\%) = |\overline{AHSI} - \overline{VIMI}| \times 100 / \overline{VIMI}(3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum(AHSI - VIMI)^2 / n}(4)$$

式中， \overline{AHSI} 和 \overline{VIMI} 分别为两种传感器各对应波段的辐亮度均值， $AHSI$ 和 $VIMI$ 分别为各对应波段像元的辐亮度值， n 为试验区的像元个数。

2 结果与分析

2.1 AHSI 和 VIMI 传感器数据的比较

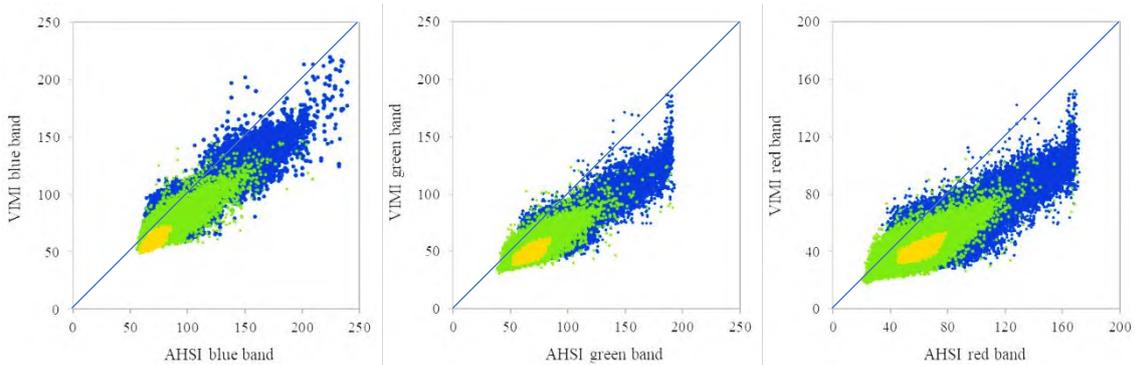
采用公式(1)将 3 个试验区影像的亮度值反演成辐亮度，然后统计辐亮度影像各波段的最小值、最大值、均值、标准差和波段间的决定系数(R^2)，计算各对应波段均值的偏差(ME)、绝对偏差率(MAPE)和均方根差(RMSE)(表 3)。从表 3 中可以看出，AHSI 和 VIMI 数据之间的 R^2 不高，在 3 个试验区中的均值为 0.817 ($P < 0.01$)。从波段的偏差来看，3 个试验区的平均 ME 为 11.93，平均 RMSE 为 12.92，平均偏差率 MAPE 达到 31.9%。总的来看，AHSI 和 VIMI 传感器辐亮度之间的偏差还是比较大的。

表 3 AHSI 和 VIMI 对应波段数据的对比 (单位: $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

Tab. 3 Comparison of the corresponding bands between AHSI and VIMI

波段	GF-5 VIMI				GF-5 AHSI				R^2	ME	MAPE /%	RMSE
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差				
敦煌 1												
蓝	49.55	71.77	55.37	1.48	58.86	84.62	64.89	1.64	0.751	9.52	17.19	9.55
绿	39.09	61.45	45.03	1.69	52.83	84.40	61.29	2.29	0.807	16.26	36.11	16.29
红	32.12	52.54	38.61	1.96	45.81	78.26	55.77	2.82	0.853	17.16	44.44	17.21
近红外	24.36	42.27	30.23	1.72	29.60	52.69	37.25	2.25	0.900	7.02	23.22	7.06
中红外 1	7.28	8.90	8.19	0.34	7.96	13.05	10.65	0.73	0.609	2.46	30.04	2.51
中红外 2	2.18	2.82	2.54	0.13	2.53	4.33	3.49	0.27	0.779	0.95	37.4	0.96
敦煌 2												
蓝	56.27	219.42	98.21	16.17	60.01	239.11	112.74	21.36	0.940	14.53	14.79	15.95
绿	40.01	186.34	81.89	15.61	51.18	192.95	113.05	23.22	0.937	31.16	38.05	32.43
红	24.17	151.71	69.02	16.55	31.15	171.67	103.80	26.90	0.932	34.78	50.39	36.72
近红外	26.55	114.54	66.46	9.86	28.00	159.43	83.94	15.26	0.907	17.48	26.3	20.57
中红外 1	10.01	22.11	14.15	1.54	3.35	50.97	19.59	3.39	0.685	5.44	38.45	5.90
中红外 2	2.15	10.01	4.10	0.79	0.74	17.30	5.77	1.57	0.762	1.67	40.73	1.92
滕州												
蓝	48.56	179.78	67.27	9.50	55.72	211.03	75.16	12.46	0.839	7.89	11.73	9.53
绿	31.19	156.95	51.23	9.32	38.50	191.12	65.22	14.01	0.834	13.99	27.31	15.50
红	17.84	139.57	38.10	11.11	20.53	169.94	50.26	17.64	0.846	12.16	31.92	14.89
近红外	14.56	124.88	65.02	13.21	15.50	167.03	82.64	18.72	0.837	17.62	27.1	19.57
中红外 1	5.69	22.12	9.88	1.88	1.19	48.53	13.67	4.02	0.701	3.79	38.36	4.62
中红外 2	1.07	11.70	2.36	0.69	0.21	16.78	3.32	1.52	0.787	0.96	40.68	1.36
3 个试验区									0.817	11.93	31.90	12.92
均值												

就单波段而言, 在 3 个试验区所对比的 6 个波段的波长范围内, VIMI 辐亮度在各波段的数值范围、均值和标准差都明显小于 AHSI。因为中红外波段的辐亮度值很小, 造成其 ME 和 RMSE 指标明显小于可见光-近红外波段的假象, 因此单波段间的差异以绝对偏差率指标来判定。在 6 个波段中, 红波段的偏差率最大, 3 个试验区的 MAPE 平均达到 42.25%, 其次为中红外 2、1 波段, 分别为 39.60% 和 35.61%, 随后依次为绿波段(33.82%)、近红外波段(25.54%)和蓝波段(14.57%)。从散点分布来看(图 2), VIMI 各波段的散点都基本分布于 1:1 线之下, 而且表现出随着波长增加, 偏离度加大的现象, 其中尤以中红外 1、2 波段的偏离度最大, 其 R^2 在 3 个试验区也都小于 0.8。仔细观察可以发现, 各波段在低值区仍有些散点分布在 1:1 线之上, 说明 VIMI 各波段在低值区的辐亮度值可高于 AHSI。



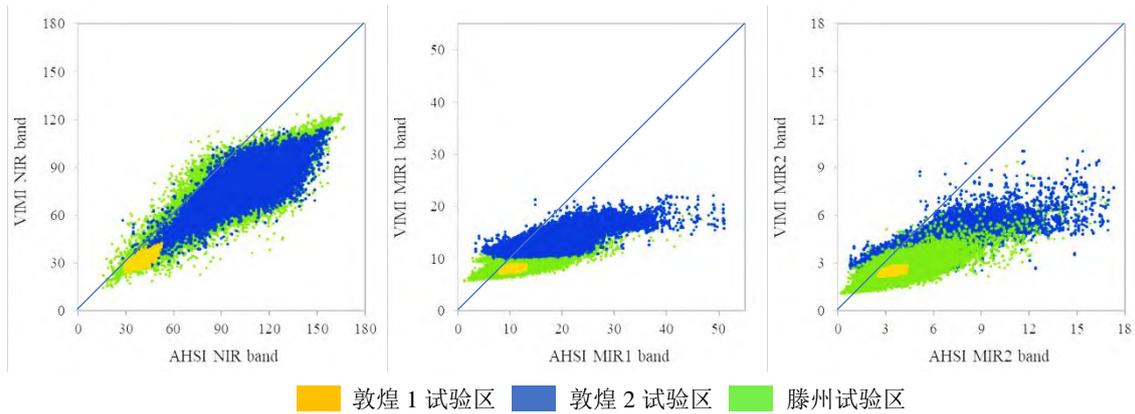


图 2 AHSI 和 VIMI 对应波段的散点分布图

Fig. 2 Scatter plots of the corresponding bands between AHSI and VIMI

2.2 AHSI 和 VIMI 与 Landsat-8 OLI 数据的对比验证

为了判别 AHSI 和 VIMI 辐亮度的准确性，将敦煌 1、滕州试验区的 AHSI 和 VIMI 数据与定标精度较高的 Landsat-8 OLI 数据进行对比验证(敦煌 2 试验区因缺乏同步的 Landsat-8 数据而未进行对比)。从表 4 的验证结果来看，AHSI 的各指标与 Landsat-8 OLI 的差距明显小于 VIMI。在 2 个试验区中，AHSI 与 OLI 的平均偏差率 MAPE 都小于 5%，而 VIMI 则都大于 20%，特别在中红外 2 波段表现得更为明显(图 3)。AHSI 的散点分布靠近 1:1 线，而 VIMI 则明显偏离 1:1 线。总的来看，AHSI 辐亮度数据的定标精度明显优于 VIMI，且与 Landsat-8 OLI 更为接近。

表 4 AHSI 和 VIMI 与 Landsat-8 OLI 数据的对比验证(单位: $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

Tab. 4 Comparison and validation of AHSI and VIMI with Landsat-8 OLI

	Landsat-8 OLI		GF-5 AHSI					GF-5 VIMI				
	数值范围	均值	数值范围	均值	R^2	ME	MAPE /%	数值范围	均值	R^2	ME	MAPE /%
敦煌 1												
蓝	55.40 ~ 84.21	62.26	58.86 ~ 84.62	64.89	0.70	2.63	4.22	49.55 ~ 71.77	55.38	0.68	-6.88	11.05
绿	49.43 ~ 89.32	59.08	52.83 ~ 84.40	61.29	0.74	2.21	3.74	39.09 ~ 61.45	45.04	0.73	-14.04	23.76
红	45.42 ~ 80.79	56.26	45.81 ~ 78.26	55.77	0.79	-0.49	0.87	32.12 ~ 52.54	38.61	0.77	-17.65	31.37
近红外	29.27 ~ 54.73	37.56	29.60 ~ 52.69	37.25	0.82	-0.31	0.83	24.36 ~ 42.27	30.23	0.83	-7.33	19.52
中红外 1	8.46 ~ 15.20	11.64	7.96 ~ 13.05	10.65	0.86	-0.99	8.51	7.28 ~ 8.90	8.19	0.70	-3.45	29.64
中红外 2	2.69 ~ 4.94	3.73	2.53 ~ 4.33	3.49	0.88	-0.24	6.43	2.18 ~ 2.82	2.54	0.80	-1.19	31.90
均值					0.80	0.47	4.10			0.75	-8.42	24.54
滕州												
蓝	50.49 ~ 217.79	69.59	55.72 ~ 211.03	75.16	0.83	5.57	8.00	48.56 ~ 179.78	67.27	0.88	-2.32	3.33
绿	31.22 ~ 215.24	60.76	38.50 ~ 191.12	65.22	0.83	4.46	7.34	31.19 ~ 156.95	51.23	0.90	-9.53	15.68
红	17.73 ~ 216.22	49.08	20.53 ~ 169.94	50.26	0.84	1.18	2.40	17.84 ~ 139.57	38.10	0.89	-10.98	22.37
近红外	6.92 ~ 181.47	87.47	15.50 ~ 167.03	82.64	0.81	-4.83	5.52	14.56 ~ 124.88	65.02	0.86	-22.45	25.67
中红外 1	0.87 ~ 46.82	13.87	1.19 ~ 48.53	13.67	0.85	-0.20	1.44	5.69 ~ 22.12	9.87	0.68	-4.00	28.84
中红外 2	0.24 ~ 22.22	3.32	0.21 ~ 16.78	3.32	0.84	0.00	0.00	1.07 ~ 11.70	2.36	0.78	-0.96	28.92
均值					0.83	1.03	4.12			0.83	-8.37	20.80

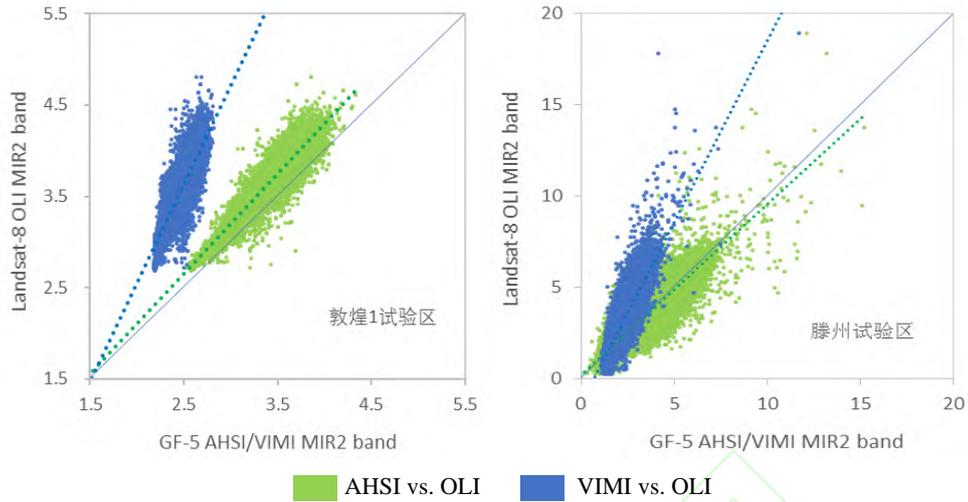


图3 AHSI 和 VIMI 中红外 2 波段与 Landsat-8 OLI 对应波段的对比

Fig. 3 Scatter plots of band MIR2 of AHSI and VIMI vs. band MIR2 of Landsat-8 OLI

2.3 VIMI 与 AHSI 数据的转换验证

由于敦煌 2 试验区取自于我国卫星传感器的标准定标场,且具有裸土、植被和建筑等主要地表覆盖物,比敦煌 1 和滕州试验区具有更好的代表性,因此本次实验采用敦煌 2 试验区获得的 VIMI 与 AHSI 的关系模型来对滕州和敦煌 1 试验区进行验证,表 5 是通过对敦煌 2 试验区 VIMI 与 AHSI 各波段的散点(图 2 中的蓝色散点)进行回归分析获得的二者之间的关系方程(方程均通过 $P < 0.01$ 验证)。

表 5 VIMI 与 AHSI 辐亮度转换方程

Tab. 5 Equations for the conversion of VIMI radiance data to AHSI radiance data

波段	关系方程
蓝	$AHSI = 1.2433VIMI - 9.4078$
绿	$AHSI = 1.4398VIMI - 4.8956$
红	$AHSI = 1.5648VIMI - 4.2369$
近红外	$AHSI = 1.4656VIMI - 11.45$
中红外 1	$AHSI = 1.8276VIMI - 6.2666$
中红外 2	$AHSI = 1.7754VIMI - 1.5173$

将表 5 的关系模型分别代入滕州和敦煌 1 试验区的 VIMI 各对应波段影像,对其辐亮度数据进行逐像元转换,然后统计转换前后的数据特征(表 6);同时采用网格法在 2 个试验区分别采得 85581 和 70981 个样点,绘制出 VIMI 数据转换前后的散点分布图并计算回归关系式(图 4)。

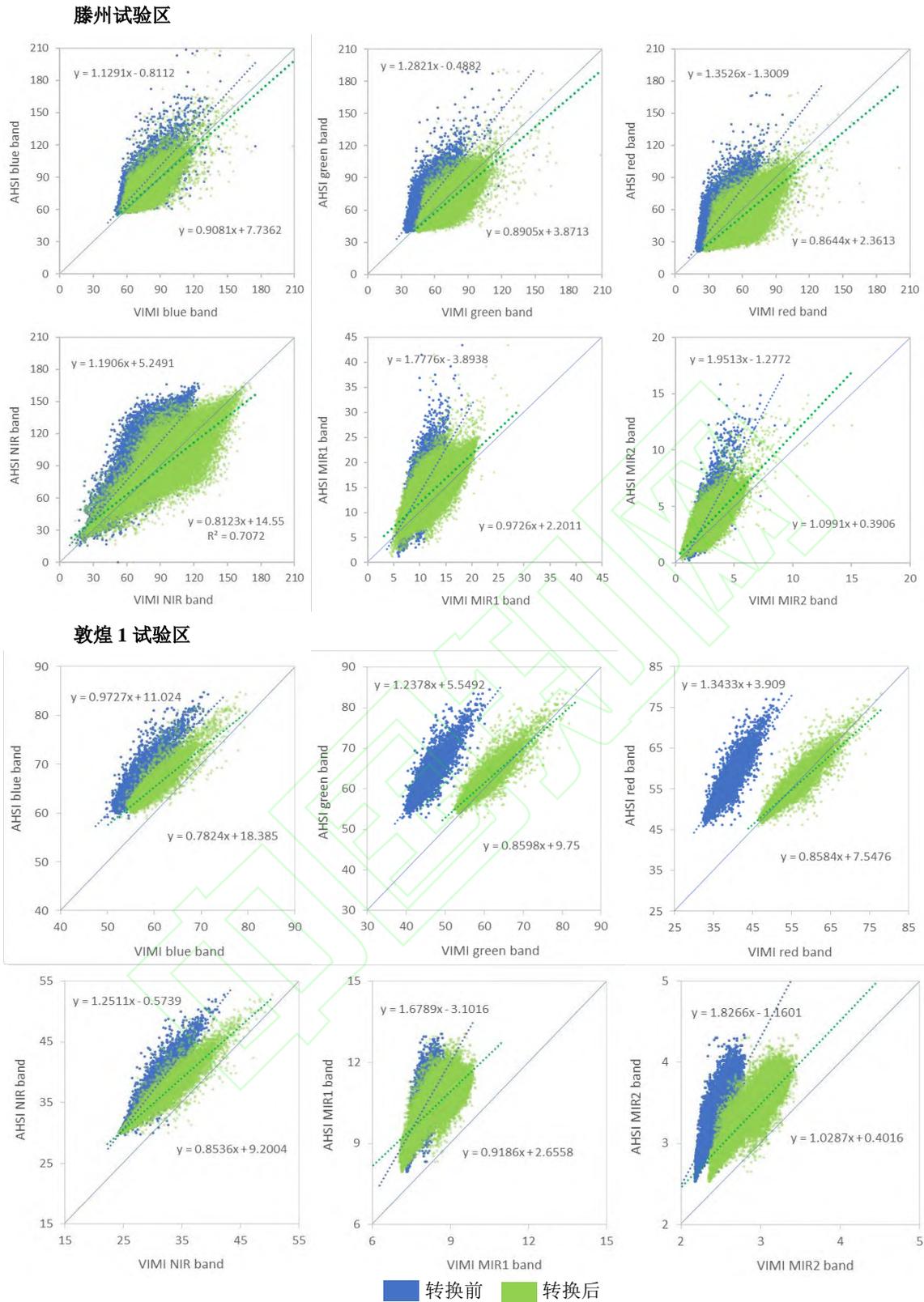


图 4 VIMI 数据转换前后的散点分布和拟合效果对比

Fig. 4. Scatter plots of VIMI radiance data vs. AHSI radiance data before and after conversion

表 6 VIMI 数据转换前后的效果对比

Tab. 6 Comparison of VIMI radiance data before and after Conversion

波段	滕州转换前			滕州转换后			敦煌 1 转换前			敦煌 1 转换后		
	ME	MAPE /%	斜率 差	ME	MAPE /%	斜率 差	ME	MAPE /%	斜率差	ME	MAPE /%	斜率 差
蓝	7.89	11.73	0.129	-0.93	1.25	0.092	9.51	17.18	0.027	5.45	9.17	0.218
绿	13.98	27.29	0.282	3.65	5.30	0.109	16.26	36.10	0.238	1.35	2.25	0.140
红	12.16	31.91	0.353	5.12	9.25	0.136	17.16	44.44	0.343	-0.41	0.73	0.142
近红外	17.62	27.10	0.191	1.20	1.43	0.188	7.01	23.20	0.251	4.39	13.35	0.146
中红外 1	3.79	38.37	0.778	-1.89	16.00	0.027	2.46	30.00	0.679	1.95	22.37	0.081
中红外 2	0.96	40.93	0.951	-0.66	24.79	0.099	0.94	37.03	0.827	0.49	16.25	0.029
均值	9.40	29.56	0.447	1.08	9.67	0.109	8.89	31.33	0.394	2.20	10.69	0.126

注：斜率差取图 4 回归方程的斜率与 1:1 线差值的绝对值

从表 6 可以看出，滕州和敦煌 1 试验区的 VIMI 辐亮度数据通过由敦煌 2 试验区获得的关系方程进行转换后，与 AHSI 数据的差异明显缩小。滕州试验区各波段的平均偏差率 MAPE 从转换前的 29.56% 下降到转换后的 9.67%，大幅下降近 20 个百分点；敦煌 1 试验区经转换后也下降了近 21 个百分点。转换后的散点分布更接近 1:1 线(图 4)，滕州试验区的平均斜率差从 0.447 下降到 0.109，降低了 3.1 倍，敦煌 1 试验区也降低了 2.1 倍。特别要指出的是，敦煌 1 试验区以裸土为主，与敦煌 2 试验区的土地覆盖类型有明显不同，但采用敦煌 2 试验区获得的关系模型进行转换仍能取得较好转换效果，说明由敦煌 2 试验区获得的关系模型可以有效地缩小 VIMI 与 AHSI 二者辐亮度数据之间的差距。

3 讨论

本次研究表明，AHSI 与 VIMI 辐亮度数据之间存在较明显的差距。由于严格采用了同时过空的 AHSI 与 VIMI 同步影像对来进行试验，大气条件完全相同，因此二者辐亮度数据之间的差异不应该是大气因素引起的。

双向反射(bidirectional reflectance)效应是造成不同传感器数据不一致的另一重要原因，但 Liu 等认为，它主要影响的是大观测视角的传感器，且对同步影像的影响是等效的^[29]。Chen 等也认为，双向反射对于小视角传感器且使用同步影像的定标的影响不大，可不必考虑，因为即便有影响，对两种传感器的影响也是相等的^[19]。有研究表明，采用双向反射分布函数 BRDF 对小视角传感器数据进行双向反射效应校正，其误差反而增大^[30-31]，因此，双向反射效应不应该是引起 AHSI 与 VIMI 这类小视角传感器、且为同步影像数据之间差异的因素。

不同传感器影像之间分辨率的不同也是造成它们之间数据差异的原因之一。AHSI 的分辨率为 30 m，而 VIMI 为 20 m，为了考察它们之间分辨率的差异是否会影响辐亮度信号，我们随机选取了 2 块面积为 60 m×60 m 的裸土和植被样区，分别对应 AHSI 的 2×2=4 个像元和 VIMI 的 3×3=9 个像元(图 5)，从图 5 可以看出，由近红外、红、绿波段的辐亮度数据合成的 RGB 影像中，由于像元数的不同，二者合成影像的色彩有所偏差。统计表明，3 个相

关波段的辐亮度值的平均偏差率在裸土和植被分别达到了 39.62% 和 23.77% (表 7)。已有研究表明空间分辨率的差距不应造成这么大的偏差。Chander 等^[9]对比了印度 IRS-P6 卫星同时搭载的 AWiFS 和 LISS-III 传感器数据, 二者的分辨率分别为 56 m 和 23.5 m, 差距近 33 m, 但它们对应波段的平均偏差率只有 5.7%。Angal 等^[5]比较了 MODIS 和 Landsat ETM+数据, 虽然二者的分辨率差距最少的都超过 200 m, 但它们对应波段的偏差率也都不超过 7%。显然, AHSI 与 VIMI 数据之间 10 m 的分辨率差异不应该是造成二者近 32% 平均偏差率的主要原因。



裸土 AHSI 2×2 像元裸土 VIMI 3×3 像元植被 AHSI 2×2 像元植被 VIMI 3×3 像元

图 5 AHSI 与 VIMI 不同空间分辨率的像元数和颜色差异 (RGB: 近红外、红、绿波段合成)

Fig. 5 Paired soil and vegetation samples collected from AHSI and VIMI images of the Dunhuang 2 test site, showing the difference in color and pixel numbers due to the resolution difference between AHSI and VIMI images (RGB: NIR, red, and green bands)

表 7 AHSI 和 VIMI 空间分辨率对辐射亮度值的影响 (单位: $W m^{-2} sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

Tab. 7 The impact of the resolution difference between AHSI and VIMI on radiance data

波段	AHSI 30 m 分辨率 4 个像元的均值	VIMI 20 m 分辨率 9 个像元的均值	MAPE /%
裸土	绿	122.09	87.46
	红	110.14	72.86
	近红外	70.84	56.76
	均值	101.02	72.36
植被	绿	57.24	49.25
	红	33.71	28.60
	近红外	133.16	103.21
	均值	74.70	60.36

不同传感器影像对应波段之间光谱范围和光谱响应函数的不同也是造成它们之间信号差异的又一原因^[1,7]。由于 GF-5 官方网站尚未完全公布 AHSI 各波段的光谱响应函数数据, 因此本次实验无法从光谱响应函数方面进行探究。就波段的光谱范围而言, 经过重组的 AHSI 与 VIMI 各对应波段的波长范围只有 1~3 nm 的差距, 而与 Landsat-8 OLI 的差距要远大于于此 (表 2), 但 AHSI 与 Landsat-8 OLI 辐亮度却很接近, 因此 AHSI 与 VIMI 各对应波段光谱范围的微小差距不应是造成二者辐亮度差距的主要原因。

从现有可获得的公开数据和信息来看, AHSI 和 VIMI 辐亮度数据之间的差异原因还不清楚。本次研究通过和同日的 Landsat-8 OLI 数据的对比发现, AHSI 和 OLI 辐亮度数据之

间的差距很小(<5%), 而 VIMI 和 OLI 的差距可大于 20%, 因此要尽可能地提高 VIMI 数据的定标精度,已有的研究也都建议要提高已发射国产卫星的定标精度^[19, 32]。

值得注意的是, 本次研究还发现 AHSI 辐亮度数据的散点在绿、红波段的高值区有明显的拖尾现象(图 2)。通过分析发现, 这些拖尾的散点主要出现在高亮的建筑物(图 6), 这说明 AHSI 绿、红波段的辐亮度在高亮度地物会出现过饱和现象。

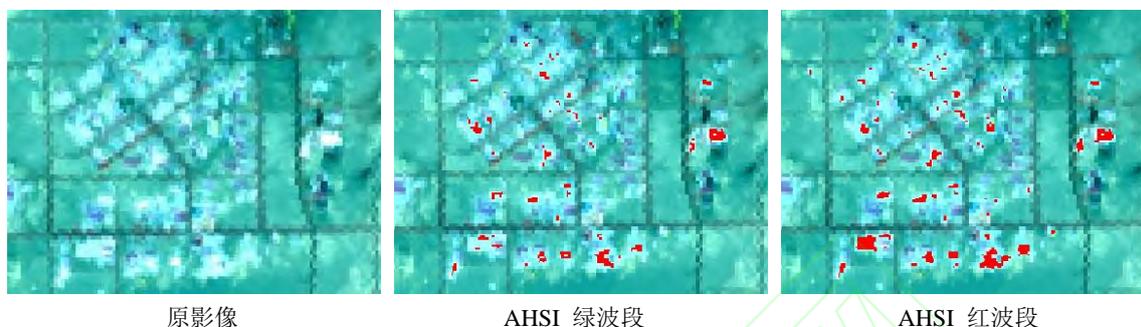


图 6 绿、红波段高值区拖尾的散点对应的高亮度建筑 (红色为拖尾散点所在位置)

Fig. 6 Saturated radiance data of the green and red bands of AHSI sensor in bright areas (red color indicates the saturated pixels)

4 结论

本次研究通过同步的 AHSI 和 VIMI 影像对的交互对比发现, 这两种传感器的辐亮度数据之间存在着一定的偏差, VIMI 的辐亮度数据明显小于 AHSI, 其偏差率在 3 个试验区的均值接近 32%, R^2 也只有 0.817; 在各个对应波段之间, 红波段的差距最大, 其偏差率超过了 40%, 两个中红外波段的偏差率也在 35%~40% 之间。

AHSI 和 VIMI 与同日的 Landsat-8 OLI 辐亮度数据的验证表明, AHSI 数据与 OLI 数据很接近, 偏差率小于 5%, 但 VIMI 数据的偏差率则大于 20%。因此, AHSI 和 VIMI 辐亮度数据的差异有可能主要是后者造成的。加强 VIMI 数据的定标工作, 通过与定标精度高的传感器数据进行更多的交互对比, 将有望改善 VIMI 与 AHSI 以及 Landsat-8 辐亮度数据之间的差距。

鉴于 VIMI 和 AHSI 的辐亮度数据存在着差距, 在现阶段如需要同时应用二者的数据, 建议要对 VIMI 数据进行转换校正。本次利用敦煌 2 试验区的模型对其它两个试验区的 VIMI 数据进行转换的结果表明, 通过转换可大幅度缩小二者辐亮度数据之间的差距, 有利于二者的协同使用。

参考文献

- [1] Teillet P M, Barker J L, Markham B L, et al. Radiometric Cross-Calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM Sensors Based on Tandem Data Sets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1/2): 39-54
- [2] Xu Hanqiu. Retrieval of the Reflectance and Land Surface Temperature of the Newly-Launched Landsat 8 Satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 741-747(徐涵秋. 新型 Landsat8 卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 741-747)
- [3] Mishra N, Haque M, Leigh L, et al. Radiometric Cross Calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12619-12638
- [4] Mancino G, Ferrara A, Padula A, et al. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+)

- Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 291
- [5] Angal A, Xiong XX, Wu A S, et al. Multitemporal Cross-Calibration of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ Reflective Solar Bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 1870-1882
- [6] Zhang Aiyin, Zhang Xiaoli. Land Surface Temperature Retrieved from Landsat-8 and Comparison with MODIS Temperature Product[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(3): 1-13(张爱因, 张晓丽. Landsat-8地表温度反演及其与MODIS温度产品的对比分析[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 1-13)
- [7] Xu H Q, Zhang T J. Assessment of Consistency in Forest-Dominated Vegetation Observations between ASTER and Landsat ETM+ Images in Subtropical Coastal Areas of Southeastern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 168: 1-9
- [8] Xu Hanqiu, Zhang Tiejun, Li Chunhua. Cross Comparison of Thermal Infrared Data between ASTER and Landsat ETM+ Sensors[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 936-940 (徐涵秋, 张铁军, 李春华. ASTER与Landsat ETM+热红外传感器数据的比较研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 936-940)
- [9] Chander G, Coan M J, Scaramuzza P L. Evaluation and Comparison of the IRS-P6 and the Landsat Sensors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 209-221
- [10] Thenkabail P S. Inter-Sensor Relationships between IKONOS and Landsat-7 ETM+ NDVI Data in Three Ecoregions of Africa[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(2): 389-408
- [11] Chastain R, Housman I, Goldstein J, et al. Empirical Cross Sensor Comparison of Sentinel-2A and 2B MSI, Landsat-8 OLI, and Landsat-7 ETM+ Top of Atmosphere Spectral Characteristics over the Conterminous United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 274-285
- [12] Barsi J A, Alhammoud B, Czapla-Myers J, et al. Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI Radiometric Cross Comparison over Desert Sites[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, 51(1): 822-837
- [13] Quan W T. A Multiplatform Approach Using MODIS Sensors to Cross-Calibrate the HJ-1A/CCD1 Sensors over Aquatic Environments[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2015, 43(4): 687-695
- [14] Zhao Kai, Xu Janbo, Zhao Zhizhong, et al. Cross Comparison of HJ-1 A/B CCD and Landsat TM/ETM+ Multispectral Measurements for NDVI, SAVI and EVI Vegetation Index [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(4): 674-680(赵凯, 徐剑波, 赵之重,等. HJ-1 A/B CCD与Landsat TM/ETM+植被指数的交互比较[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(4): 674-680)
- [15] Zhang Xuewen, Fu Qiaoyan, Han Qijin, et al. The Field Radiometric Calibration and Validation of ZY-3 Multispectral Sensor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9): 2476-2480(张学文, 傅俏燕, 韩启金, 等. 资源三号多光谱传感器场地辐射定标与验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2476-2480)
- [16] Xu Hanqiu, Liu Zhicai, Guo Yanbin. Comparison of NDVI Data between GF-1 PMS1 and ZY-3 MUX Sensors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 148-154(徐涵秋, 刘智才, 郭燕滨. GF-1 PMS1与ZY-3 MUX传感器NDVI数据的对比分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 148-154)
- [17] Li J, Feng L, Pang X P, et al. Radiometric Cross Calibration of Gaofen-1 WFV Cameras Using Landsat-8 OLI Images: A Simple Image-Based Method[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 411
- [18] Wu Xiaoping, Xu Hanqiu, Jiang Qiaoling. Cross-Comparison of GF- 1, GF-2 and Landsat-8 OLI Sensor Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 150-158(吴晓萍,徐涵秋,蒋乔灵. GF-1、GF-2与Landsat-8卫星多光谱数据的交互对比[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1):

- [19] Chen Y P, Sun K M, Li D R, et al. Radiometric Cross-Calibration of GF-4 PMS Sensor Based on Assimilation of Landsat-8 OLI Images[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 811
- [20] Gao C X, Liu Y K, Qiu S, et al. Radiometric Cross-Calibration of GF-4/VNIR Sensor with Landsat8/OLI, Sentinel-2/MSI, and Terra/MODIS for Monitoring Its Degradation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2337-2350
- [21] Liu Yinnian, Sun Dexin, Cao Kaiqin, et al. Evaluation of GF-5 AHSI On-Orbit Instrument Radiometric Performance[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 352-359(刘银年, 孙德新, 曹开钦, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机在轨辐射性能评估[J]. *遥感学报*, 2020, 24(4): 352-359)
- [22] Chander G, Haque M O, Micijevic E, et al. A Procedure for Radiometric Recalibration of Landsat 5 TM Reflective-Band Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 556-574
- [23] Choi T, Xiong X, Chander G, et al. Assessment of the Short-term Radiometric Stability between Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ Sensors [C]. 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009
- [24] Yan Lei, Gou Zhiyang, Zhao Hongying, et al. In-Flight Spectral Calibration of UAV Hyperspectral Imager Based on Radiance Matching[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(6): 517-522(晏磊, 勾志阳, 赵红颖, 等. 基于辐亮度匹配的无人机载成像光谱仪外场光谱定标研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 517-522)
- [25] Chander G, Meyer D J, Helder D L. Cross Calibration of the Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI Sensor[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2821-2831
- [26] Chen W, Zhou G. Comparison of Satellite Measured Temperature Using Terra ASTER and Landsat ETM+ Data [J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, 3: 1723-1726
- [27] Meyer D J, Chander G. The Effect of Variations in Relative Spectral Response on the Retrieval of Land Surface Parameters from Multiple Sources of Remotely Sensed Imagery [C]. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007
- [28] Malila W A, Meyers T J. Tasseled-cap Transformation of JERS-1 OPS Multispectral Data-an Initial Version [C], Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS 1995), Firenze, Italy, 1995
- [29] Liu Q Y, Yu T, Gao H L. Radiometric Cross-Calibration of GF-1 PMS Sensor with a New BRDF Model[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 707
- [30] Li Juan, Feng Lian, Pang Xiaoping. Comparison of the Cross-Calibration Methods between Image-Based and RTMBRDF for GF-1 Images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(7): 882-890(李娟, 冯炼, 庞小平. 针对 GF-1 遥感影像的基于影像与基于辐射传输模型两种交叉定标方法比较[J]. *测绘学报*, 2017, 46(7): 882-890)
- [31] Zhang H K, Roy D P, Yan L, et al. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 Top of Atmosphere, Surface, and Nadir BRDF Adjusted Reflectance and NDVI Differences [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 482-494
- [32] Zhao Y G, Ma L L, Li C R, et al. Radiometric Cross-Calibration of Landsat-8/OLI and GF-1/PMS Sensors Using an Instrumented Sand Site[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3822-3829

Cross comparison of the Gaofen-5 AHSI and VIMI sensors

XU Hanqiu^{1,2,} SUN Fengqin^{1,2} XU Guangzhi^{1,2}*

1 College of Environment and Resources, Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information
Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2 Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fujian Provincial Key Laboratory of
Remote Sensing of Soil Erosion, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

Abstract: The Advanced HyperSpectral Imager (AHSI) and the Visual and Infrared Multispectral Imager (VIMI) are the two sensors onboard China's Gaofen-5 remote sensing satellite. These two sensors provide images of different spectral and spatial resolutions. To date, the quantitative relationship between the two sensors' data has not been investigated in detail. To understand the quantitative relationship and the calibration agreement between AHSI and VIMI, date-coincided image pairs of the two sensors from the Dunhuang calibration sites as well as the Tengzhou area were used to conduct a cross comparison. The approach was achieved by evaluating the consistency of the at-sensor radiance data between the two sensors. The results were then validated to those of near-simultaneous Landsat-8 OLI sensor. This study finds that the at-sensor radiance data of VIMI is overall lower than that of AHSI, with a mean absolute percentage error (MAPE) of 32% and an R^2 of 0.817. Among the corresponding bands, the red band has the greatest difference between the two sensors, with a MAPE of more than 40%. The validation to Landsat-8 OLI shows that AHSI's radiance data is close to that of OLI with a MAPE of less than 5%, while the MAPE of VIMI is more than 20%. Given the differences between VIMI and AHSI radiance data revealed in this study, it is suggested to correct VIMI data if both data need to be used together. The conversion using the model developed in this study based on the Dunhuang site shows that the difference between the VIMI and the AHSI radiance data can be greatly reduced after conversion. A synergistic use of AHSI and calibrated VIMI data can greatly benefit the science community by providing a high-quality observation of the Earth.

Keywords: Gaofen-5 satellite; AHSI; VIMI; At-sensor radiance; Cross comparison

First author: XU Hanqiu, PhD, professor, specializes in remote sensing of environment and natural resources. E - mail: hxu@fzu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2016YFA0600302); The National Natural Science Foundation of China (31971639).

网络首发:

标题: 高分五号高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 传感器数据的交互对比

作者: 徐涵秋, 孙凤琴, 徐光志

收稿日期: 2020-10-29

DOI:10.13203/j.whugis20200586

引用格式:

徐涵秋, 孙凤琴, 徐光志. 高分五号高光谱 AHSI 和多光谱 VIMI 传感器数据的交互对比[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI: 10.13203/j.whugis20200586 (XU Hanqiu, SUN Fengqin, XU Guangzhi. Cross Comparison of the Gaofen-5 AHSI and VIMI Sensors[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI: 10.13203/j.whugis20200586)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

利用 AB 算法进行高分四号卫星数据反照率反演

韩谷怀, 秦其明, 任华忠, 汪子豪

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4): 542-549

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180291>

利用 SARA 结合高分一号数据反演气溶胶光学厚度

沈维青, 张丰, 刘仁义, 杜震洪

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 914-922

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190034>