

基于均匀目标的 GF-1WV 与 SJ-9A PMS 相机 交叉定标

韩启金* 潘志强 张学文 刘 李 王爱春

(中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要 为检测 SJ-9A 卫星 PMS 相机在轨辐射特性, 获取准确的 PMS 相机绝对辐射定标系数, 提出了基于均匀目标的 GF-1 WFV 与 SJ-9A PMS 交叉定标方法。介绍交叉定标原理和均匀目标样区的概况, 并对比两个遥感器的波段设置和光谱响应差异。基于敦煌辐射校正场均匀目标历史数据和 2013 年 8 月 2 日 GF-1WV 与 SJ-9A PMS 同时观测图像, 实现了 WFV 与 PMS 的交叉定标。讨论了 GF-1WV 与 PMS 相机交叉定标的影响因素及其不确定度。结果表明: 利用 GF-1WV 相机对 SJ-9A PMS 相机进行交叉定标是可行的; 以敦煌场区 GF-1 WFV 观测数据为参考, 获取的 SJ-9A PMS 相机交叉定标结果不确定度小于 5.24%。该成果可用于 SJ-9A 卫星在轨性能评估和后续数据量化应用, 并为我国自主卫星遥感器间的交叉定标提供借鉴。

关键词 遥感; SJ-9A PMS 相机; GF-1 WFV 相机; 光谱匹配; 交叉定标; 不确定度

中图分类号 TP722.4; TP721.1; TP731 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0628003

Cross-calibration of GF-1 WFV and SJ-9A PMS Sensors Based on Homogeneous Land Surface Targets

Han Qijin Pan Zhiqiang Zhang Xuewen Liu Li Wang Aichun

(China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

Abstract To validate on-orbit radiometric performance of PMS sensor onboard SJ-9A satellite, and obtain accuracy absolute radiometric calibration coefficients of PMS, a cross-calibration method between GF-1 WFV and SJ-9A PMS sensor based on homogeneous land surface targets is established. This paper describes the theory of cross-calibration and characteristic of homogeneous field targets, and analyzes the parameters and spectral bands responsibility between PMS and WFV. Then, the cross-calibration of WFV and PMS is performed based on historical measurements data of Dunhuang sites and simultaneously observation images of two sensors on August 2, 2013. The influence factors and uncertainty of cross-calibration between WFV and PMS are discussed. The results indicate that this method for cross-calibrating PMS is doable and the spectral band matching factors is stabile and has lower sensitivity with field reflectance changing. The uncertainty of cross-calibration results of PMS is less than 5.24%. This study production can lay the foundation for on-board radiometric properties evaluation and quantitative application of SJ-9A satellite, and supply reference to cross-calibration between Chinese satellite remote sensors.

Key words remote sensing; SJ-9A PMS camera; GF-1 WFV camera; spectral matching; cross-calibration; uncertainty

OCIS codes 280.4788; 040.1520; 120.0280; 120.4640

1 引言

近年来, 对地观测卫星遥感器正朝着高分辨率、高精度、高可靠、长寿命的方向发展, 在保证一定空

间分辨率和时间分辨率的前提下, 还要确保卫星元器件的高可靠性, 以延长遥感器工作寿命, 确保长时间序列的对地观测数据的时序性和准确性^[1-2]。同

收稿日期: 2013-12-10; 收到修改稿日期: 2014-02-17

基金项目: 国家 863 计划(2012AA12A302)

作者简介: 韩启金(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事卫星光学遥感器在轨定标与综合性能检测方面的研究。

E-mail: cresda_hanjin@126.com

时,各种科学研究和区域监测等领域的遥感数据应用也由定性分析走向深入的定量应用,这对卫星遥感传感器在轨辐射特性的稳定性和测量精度均提出了更高的要求^[3]。为突破制约我国遥感卫星运行寿命的关键技术瓶颈,解决遥感器的高精度、高性能与元器件可靠性之间的矛盾,我国于2012年10月14日在太原卫星发射中心成功发射了实践九号A、B两颗小卫星(简称SJ-9A/B),作为我国民用新技术试验卫星系列规划中的首颗星,在突破各种新技术前提下,相应遥感器的在轨辐射性能检测评价对于后续高精度长寿命卫星的研制同样具有重大参考价值。搭载于SJ-9A卫星的全色多光谱相机(PMS)可同时获取2.5 m全色和10 m多光谱遥感数据,这些数据在我国资源调查、环境保护及灾害监测等领域的应用效果是该卫星遥感器在轨综合性能的主要体现。而上述各领域的SJ-9A卫星PMS遥感数据的深入应用示范是建立在遥感数据量化信息的基础上的,即经过在轨绝对辐射定标后的遥感数据产品,由此可见,在轨绝对辐射定标工作是整个SJ-9A卫星系统工程和后续地面处理系统的重要组成部分。

卫星遥感器在轨运行过程中,辐射特性会随外界环境和系统老化等因素的影响发生一定变化^[4],而SJ-9A卫星自发射以来,建立SJ-9A卫星PMS相机实时辐射定标方法,获取在轨辐射定标系数已成为该卫星地面处理系统亟待解决的问题。卫星遥感器辐射定标方法主要有星上定标、交叉定标以及场地定标等^[5],但因卫星供电、重量和空间的限制,SJ-9A卫星不具备星上定标功能,而场地定标方法需要耗费大量的人力、物力和财力开展同步观测试验,不但受到场地数量、种类、天气和地表特征等因素的限制,而且利用该方法难以实现卫星遥感器的高频次在轨定标与辐射特性实时监测^[6]。交叉定标由于不受目标卫星遥感器系统本身和地面同步测量等因素的限制而得到了快速的发展,可有效修正不同卫星遥感器因响应差异产生的输出数据不一致性,并能实现不具备星上定标功能的卫星遥感器在轨实时辐射定标^[7]。许多学者以恒星源、云层、海洋、沙漠以及其他光学特性稳定均匀的地物为匹配目标进行了交叉定标技术研究,解决了不同卫星遥感器间光谱响应差异修正、空间匹配等关键技术,并成功应用于MODIS、Landsat、CBERS、FY、EO-1以及SeaWiFS等卫星遥感器间的交叉定标^[8-9]。由于我国卫星遥感器与国外同类卫星遥感器间的分辨率、光谱范围和辐射响应特性均存在较大差别,使得

基于国外高精度卫星遥感器对我国高分辨率卫星遥感器进行交叉定标受到了较大限制^[10],开展我国自主同类卫星遥感器间的交叉定标研究,对于我国在轨定标体系的建立具有重要意义。我国近期发射的高分一号卫星(GF-1)搭载了空间分辨率为16 m、幅宽达800 km的宽视场成像仪(WFV相机),该卫星的遥感数据采用了星上手段对暗噪声进行控制,并采用多种参考目标法进行宽动态定标^[11],定标精度相对较高(该卫星地面系统在轨测试结果也证明了其定标精度高于以往的国产卫星遥感器),为SJ-9A卫星的在轨实时交叉定标提供了数据资源。

本文针对SJ-9A卫星PMS相机技术指标特征和交叉定标中不同遥感器光谱差异修正、观测路径校正等关键环节,以GF-1卫星WFV相机为参考,基于我国首个国家辐射校正场及周边均匀目标为匹配样区,开展SJ-9A卫星PMS相机的交叉定标方法研究。介绍了交叉定标的基本原理,并对不同遥感器的特性和匹配样区数据进行了对比分析;采用敦煌场区同时相遥感观测图像实现了GF-1卫星WFV相机与SJ-9A卫星PMS相机的交叉定标,获取了PMS相机的在轨定标系数。对基于均匀目标场景的GF-1卫星WFV相机与SJ-9A卫星PMS相机交叉定标影响因素和不确定度进行了检验分析,以为后续SJ-9A卫星PMS相机的在轨实时定标和我国自主卫星遥感器间的交叉定标体系建立提供相关借鉴。

2 交叉定标原理

交叉定标是采用高精度定标的卫星遥感器为参考,选取两个不同遥感器同一时刻对同一目标的观测数据,对待定标遥感器进行交叉辐射定标,其中参考遥感器与待定标遥感器之间的光谱差异、成像时间及观测路径差异等是影响定标精度的主要因素^[12]。当不同卫星遥感器同时对同一目标进行观测成像时,首先对参考卫星遥感器观测数据进行绝对辐射定标获取对应的辐亮度,在考虑观测时间差异和观测路径差异的基础上计算两个遥感器对应光谱通道间的光谱匹配因子,最后在光谱差异修正和空间匹配处理的基础上获取待定标遥感器对应通道的等效辐亮度,结合匹配区域观测图像输出的通道计数值信息,推导出交叉定标系数^[13],详细技术流程如图1所示。

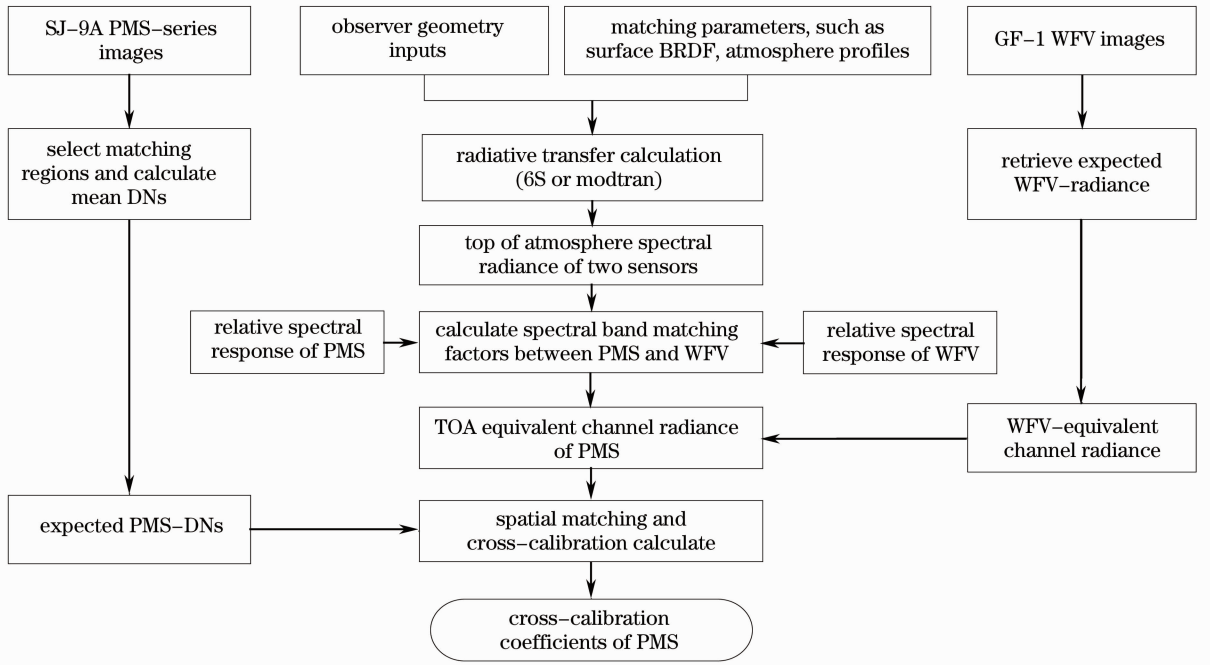


图 1 不同卫星遥感器交叉定标流程

Fig. 1 Cross-calibration of different remote sensors

利用 GF-1 卫星宽视场成像仪 (WFOV) 相机对 SJ-9A 卫星 PMS 相机进行交叉定标时, PMS 相机通道等效辐亮度推算公式如下:

$$L_e^*(\lambda_j) = k \cdot L_{GF-1}(\lambda_i), \quad (1)$$

式中 $L_e^*(\lambda_j)$ 为 PMS 相机通道 j 等效表观辐亮度, $L_{GF-1}(\lambda_i)$ 为 WFOV 相机通道 i 等效表观辐亮度, k 为 PMS 相机通道 j 与 WFOV 相机通道 i 间的光谱匹配因子, 该参数是在两个遥感器对地物、大气的响应差异以及不同观测几何路径的影响的基础上由 (2) 式计算得出, 表示 WFOV 和 PMS 同时观测同一地物目标时, 在不同观测路径、不同光谱响应情况下对应通道所接收的辐亮度之间的比值, 即光谱匹配因子。

$$k = \frac{\int_{\lambda_{j,\min}}^{\lambda_{j,\max}} L_{TOA-SJ}(\lambda) f_j(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{i,\min}}^{\lambda_{i,\max}} L_{TOA-GF}(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中 $\lambda_{j,\max}$ 为 PMS 相机通道 j 的最大波长, $\lambda_{j,\min}$ 为 PMS 相机通道 j 的最小波长, $\lambda_{i,\max}$ 为 WFOV 相机通道 i 最大波长, $\lambda_{i,\min}$ 为 WFOV 相机通道 i 最小波长, $L_{TOA-SJ}(\lambda)$ 和 $L_{TOA-GF}(\lambda)$ 分别为 PMS 相机和 WFOV 相机成像条件下对应的大气顶层光谱辐亮度, 单位 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, 可由 MODTRAN 或 6S 辐射传输模型模拟计算, $f_j(\lambda)$ 为 PMS 相机通道 j 光谱响应函数, $f_i(\lambda)$ 为 WFOV 相机通道 i 光谱响应函数。

SJ-9A 卫星 PMS 相机辐射特性采用线性设计, 即具有 (3) 式中的数量关系, 则根据上述推算的 PMS 相机通道 j 入瞳处等效辐亮度和对应通道计数值 DN 拟合出 PMS 相机通道 j 绝对辐射定标系数 G 和 B 。

$$L_e^*(\lambda_j) = G \cdot DN_j + B, \quad (3)$$

式中 G 为定标增益, B 为定标截距, 单位均为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, DN_j 为 PMS 相机通道 j 的观测计数值。

3 定标数据

3.1 遥感器特性对比

SJ-9A 卫星是我国首颗民用新技术试验系列卫星, 搭载的 PMS 相机采用焦距为 2.6 m、视场角为 2.67° 的小相对孔径全发射式光学系统, 具有全色、红、绿、蓝和近红外 5 个工作谱段。GF-1 卫星是我国 2013 年 4 月 26 日成功发射的高分辨率对地观测系统首颗卫星, 该星轨道高度为 645 km, 轨道倾角为 97.96° , 星上搭载有 2 台全色多光谱和 4 台 16 m WFOV, 其中 4 台 WFOV 相机覆盖宽度大于 800 km, 且该相机在轨绝对辐射定标系数精度优于 5%, 可作为 PMS 相机在轨交叉定标的参考遥感器, 两个卫星遥感器的参数对比如表 1 所示。

表 1 不同卫星遥感器技术参数对比

Table 1 Comparison of sensors parameters of different satellites

Parameters	SJ-9A PMS sensor	GF-1 WFV sensor
Spectral channels / μm	P : 0.45~0.89	
	B1 : 0.45~0.52	B1 : 0.45~0.52
	B2 : 0.52~0.59	B2 : 0.52~0.59
	B3 : 0.63~0.69	B3 : 0.63~0.69
	B4 : 0.77~0.89	B4 : 0.77~0.89
Spatial resolution /m	Panchromatic band ≤ 2.5 m	≥ 16 m
	Multispectral bands ≤ 10 m	
Width /km	30	800
Quantization level /bit	10	10
Service lifetime /years	3	5

由于 PMS 相机和 WFV 相机均采用相同 CCD 器件和制造工艺研制,两个遥感器对应通道的光谱范围一致,各通道的光谱响应会对大气外太阳辐照度、大气透光率及地表反射率作用产生一定的差异,交叉定标过程中需要对两个卫星遥感器对应通道的光谱响应差异进行修订,同时考虑不同成像时间、观测几何路径的差异影响。

3.2 匹配样区及数据分析

经分析选择大气特性干洁的敦煌辐射校正场以及周边地表类型单一、光谱反射特性均匀的高反射

目标和水体目标作为交叉定标匹配区域,其中敦煌辐射校正场(戈壁场)是我国首个中等反射特性的光学定标场,场地面积约 $40 \text{ km} \times 30 \text{ km}$,地表光谱反射率在 $350 \sim 1000 \text{ nm}$ 通道范围内相对稳定;戈壁场北侧约 20 km 处是一个高反射特性的均匀石膏晶目标,面积约为 $4 \text{ km} \times 6 \text{ km}$,戈壁场南侧分布有一个低反射率水体目标区,且历史实测数据处理结果表明:上述 3 个场地表面反射特性稳定,在 $350 \sim 1000 \text{ nm}$ 通道范围内光谱反射率相对差异均小于 1% ^[14](图 2)。

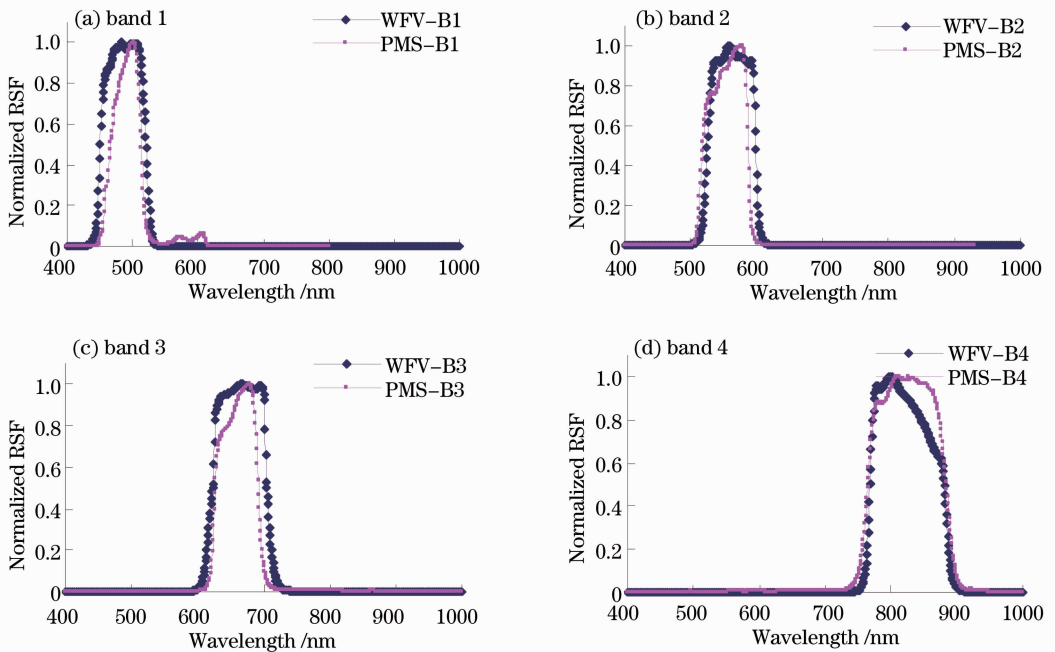


图 2 PMS 相机与 WFV 相机各通道的相对光谱响应对比

Fig. 2 Relative spectral responses function of PMS and WFV spectral bands

依据 SJ-9A PMS 相机和 GF-1 WFV 相机重叠轨道测算结果,获取了 2013 年 8 月 2 日敦煌场区 3 景 PMS 遥感图像以及与其相匹配的 1 景同时相 WFV 遥感图像,参数如表 2 所示。针对交叉定标

的关键环节-光谱匹配因子计算,以及不同观测路径参数、匹配区域地表特性参数和大气状态下的辐射传输问题,以敦煌辐射校正场、北侧石膏场区和水体目标多年积累的光谱数据和当地气象部门提供的大

气状态参数作为光谱匹配因子估算的参考数据,并结合不同卫星遥感器观测几何参数推算 PMS 相机和 WFV 相机的光谱匹配因子。考虑到匹配场区的

光谱稳定性和一致性,以历史实测场地反射光谱数据的均值和晴空条件下的大气状态作为辐射传输模拟的输入辅助数据(图 3)。

表 2 交叉定标匹配参数对比

Table 2 Parameters comparison of cross-calibration matching images

Sensors	Observing regions	Observing time /UTM	Solar zenith /($^{\circ}$)	Solar azimuth /($^{\circ}$)	Sensor zenith /($^{\circ}$)	Sensor azimuth /($^{\circ}$)
GF-1 WFV	Three sites	04:56:30	25.679	144.968	17.584	283.099
	Gypsum	04:45:56	26.426	144.833	1.6876	301.491
SJ-9A PMS	Gobi	04:45:52	26.252	144.431	1.6877	301.459
	Water	04:45:48	26.079	144.025	1.6879	301.445

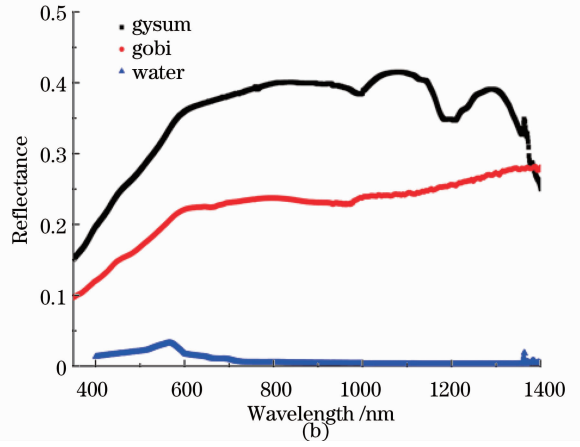
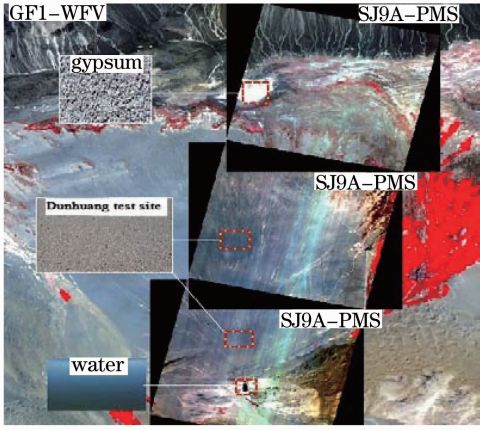


图 3 PMS 与 WFV 交叉定标匹配样区 (a)同步观测图像匹配图; (b)匹配样区参考光谱反射率

Fig. 3 Matching regions of cross-calibration between PMS and WFV (a) synchronous observing images; (b) reference spectral reflectance of matching regions

4 结果与讨论

4.1 定标结果计算

基于 PMS 相机和 WFV 相机各通道光谱响应函数对匹配区域地面光谱基准进行卷积处理,获取对应通道的等效反射率,利用 MODTRAN 辐射传输模型模拟不同匹配区域对应各遥感器观测几何条

件下的大气顶层对应通道等效辐亮度,计算 PMS 相机和 WFV 相机对应通道光谱匹配因子。石膏场区对应的各通道匹配因子分别为 0.96、1.00、1.00 和 0.98;戈壁场区对应的各通道匹配因子分别为 0.98、1.00、1.00 和 0.98;水体场区对应的各通道匹配因子分别为 0.94、0.99、0.95 和 0.94。由上述结

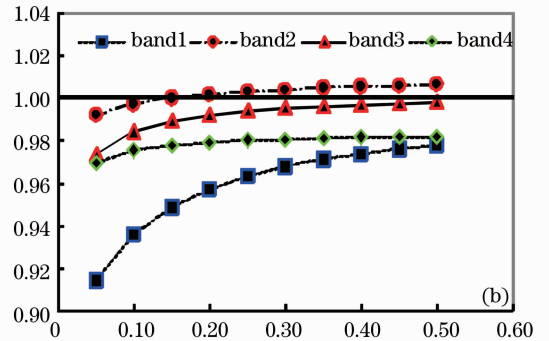
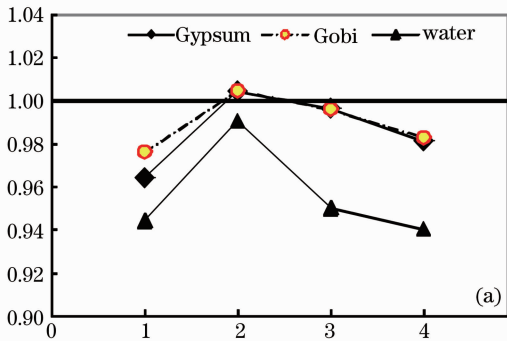


图 4 PMS 与 WFV 光谱匹配因子(a)2013 年 8 月 2 日匹配因子; (b)匹配因子随地物类型变化

Fig. 4 Spectral band matching factors of PMS and WFV (a) factors k on August, 2th, 2013; (b) matching factors changing with different land surface

果可知, PMS 相机与 WFV 相机对应通道的光谱匹配因子对于不同反射特性目标相对差异较小, 且计算结果接近于 1(图 4)。

利用 WFV 相机定标系数反演的辐亮度图像和基于 PMS 相机同时相遥感图像提取的匹配区域 DN 信息, 计算 WFV 相机对 PMS 相机各通道的交叉辐射定标系数。分别选取涵盖不同反射特性的 3 个匹配区域中相对均匀的 10×10 个像元数据作为样本点, 根据(3)式中线性关系拟合出交叉定标系数, 交叉定标拟合系数和曲线图(表 3 和图 5)表明: GF-1 WFV 与 SJ-9A PMS 的交叉定标结果线性度较好, 定标系数对不同反射特性目标的敏感性(即相对差异)较低。

表 3 GF-1 卫星 WFV 与 SJ-9A 卫星 PMS 交叉定标拟合结果

Table 3 Cross-calibration fit linear results between GF-1 WFV and SJ-9A PMS

Channel of PMS	a (G)	b (B)	R^2
Band1	0.16661	7.15603	0.99326
Band2	0.17499	-14.8015	0.97089
Band3	0.12095	7.92704	0.97089
Band4	0.12799	-1.79881	0.98398

Calibration equation: $y = a * x + b$

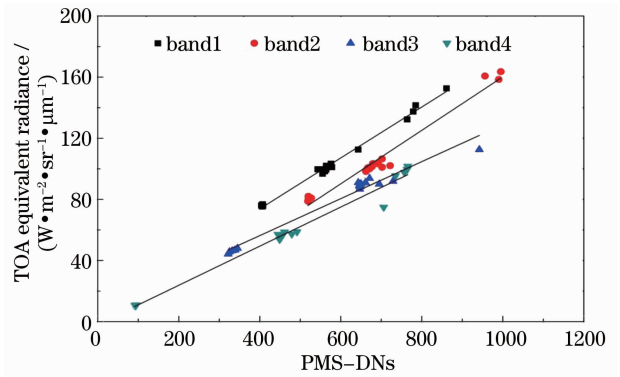


图 5 PMS 相机交叉定标系数拟合结果

Fig. 5 Fitting linear results of PMS cross-calibration coefficients

4.2 不确定度分析与讨论

不同遥感器间的交叉定标精度与对应通道光谱匹配因子、空间匹配与尺度转换精度等因素有关, 而 PMS 相机与 WFV 的空间分辨率分别为 10 m 和 16 m, 经分析二者的相关性较高, 在以 WFV 遥感图像为参考进行空间匹配校准时, 空间匹配误差小于 0.5 pixel, 因此针对大面积均匀地物目标, PMS 遥感图像在转换为 16 m 空间分辨率过程中, 引起的 DN 值变化可忽略不计, PMS 与 GF-1 WFV 交叉定标主要考虑观测路径差异和光谱匹配因子的影响。

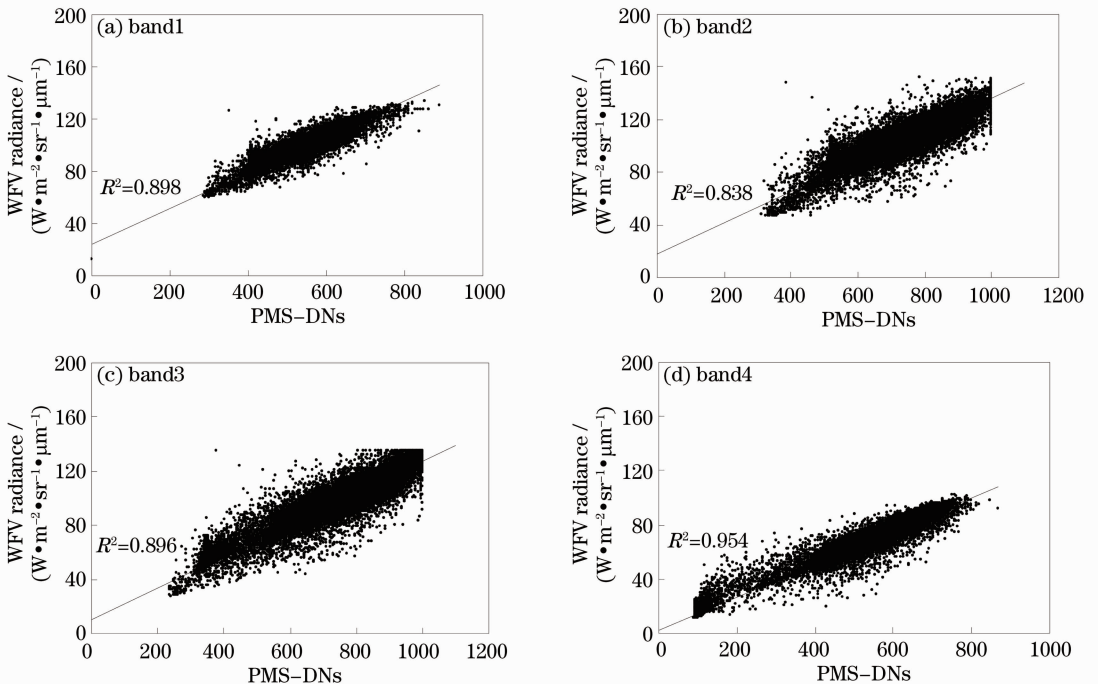


图 6 光谱匹配因子为 1 条件下交叉定标拟合结果

Fig. 6 Cross-calibration fitting results supposing that spectral band matching factors is 1

光谱匹配因子可基于不同地物光谱数据,利用辐射传输模拟结果进行计算,总体上影响因素包括地物类型、观测几何和大气条件等^[15]。其中观测几何与大气条件假设对光谱匹配的影响主要由大气路径变化和地物 BRDF 特性决定,由于敦煌地区海拔高、大气干洁、水汽含量低,且石膏和戈壁目标光学特性稳定,在计算光谱匹配因子的过程中,针对实际 PMS 和 WV 观测几何条件,可忽略因大气模型和地物类型假设引入的计算误差^[16]。光谱匹配误差重点考虑地物类型的影响,针对地表类型单一、光谱特性稳定的大面积均匀地物目标,在不考虑地物

BRDF 特性时,地物反照率在 0.05~0.50 之间变化时,PMS 与 WV 的 1~4 通道光谱匹配因子的最大差异分别为 6.93%、1.44%、2.54%和 1.30%,同时 PMS 和 WV 相机各对应通道光谱差异随地物反射特性的增强而减小,即匹配系数逐渐接近于 1 [图 4(b)]。如假设 PMS 与 WV 相机光谱匹配因子恒等于 1,则基于 2013 年 8 月 2 日 GF-1 WV 和 PMS 匹配图像的全动态范围采样点进行交叉定标系数拟合(图 6),得到 PMS 相机各通道对应光谱匹配因子为 1 条件下的全动态范围交叉定标结果(表 4)。

表 4 不同光谱匹配因子条件下定标结果分析

Table 4 Analysis of cross-calibration results with different spectral band matching factors

Channels	Using actual matching factors		Suppose matching factor equal to 1		Relative difference of G / %
	G	B	G	B	
Band1	0.167	7.156	0.138	24.267	17.37
Band2	0.175	-14.801	0.118	17.893	32.57
Band3	0.121	7.927	0.117	10.494	3.31
Band4	0.128	-1.799	0.122	2.504	4.69

分析不同光谱匹配因子和样本点条件下的交叉定标结果,PMS 相机通道 1~4 的定标增益相对差异分别为 17.37%、32.57%、3.31%和 4.69%,同时 PMS 相机通道 1、2 的定标截距随光谱匹配因子的差异变化较大,也进一步说明 PMS 相机通道 1、2 的光谱匹配因子受地物类型的影响较大,而 WV 与 PMS 相机通道 3、4 的定标增益和截距随光谱匹配因子的变化影响较小,说明 PMS 相机通道 3、4 的定标结果受地物类型的影响较小。

利用 GF-1 WV 相机对 SJ-9A PMS 相机进行交叉定标时,结果精度是建立在 WV 相机自身定标的基础之上,而 WV 定标系数的不确定度约为 5%;基于敦煌各场地目标历史反射率光谱数据计算光谱匹配因子,由于各场地光谱反射率波动误差小于 1%,且 2013 年 8 月 2 日 PMS 与 WV 成像时间相差约 10 min,忽略地表大气变化的情况下,MODTRAN 模拟的误差约为 1.2%,则总的光谱匹配因子计算误差约 1.56%,该因子的计算已将成像时间、观测路径、光谱范围及响应等因素的影响考虑在内;综合所有误差影响,利用 2013 年 8 月 2 日 GF-1 卫星 WV 相机敦煌准同步图像对 SJ-9A PMS 交叉定标的总不确定度约为 5.24%。

星传感器为参考,对 SJ-9A 卫星进行交叉定标研究。针对交叉定标过程中光谱响应差异修正、观测目标光学特性校正以及观测路径订正等关键环节,选取大面积均匀地物目标为研究区域,在考虑多种影响因素修正的基础上,基于 2013 年 8 月 2 日 GF-1 卫星 WV 相机和 SJ-9A 卫星 PMS 相机同一时间观测敦煌同一区域的遥感图像实现了 PMS 相机的在轨交叉定标。采用现有辐射传输模型 MODTRAN 对上述交叉定标的影响因素和方法敏感性进行了分析,并讨论了 GF-1 WV 相机与 SJ-9A PMS 相机间交叉定标的不确定度。结果表明:1)以敦煌场区大面积均匀地物目标的同时相 GF-1 卫星 WV 观测图像与 SJ-9A 卫星 PMS 观测图像为参考,在综合考虑光谱响应差异、观测时间与观测路径等因素的基础上,获取的 WV 与 PMS 相机交叉定标结果准确可靠;2)GF-1 卫星 WV 相机与 SJ-9A 卫星 PMS 相机的通道光谱匹配因子对地物光学特性的敏感性较低,其中通道 1 和通道 2 的光谱匹配因子受地物反射特性影响较大;3)基于均匀目标的 GF-1 WV 相机与 SJ-9A PMS 交叉定标的总不确定度小于 5.24%,且主要取决于 GF-1 WV 相机的定标精度。

本文获取的 SJ-9A 卫星 PMS 交叉定标结果可进一步用于该卫星遥感数据的定量应用示范,由于缺少 SJ-9A 卫星 PMS 相机的地面同步观测数据,因此后续有必要开展相应的试验研究工作,以对国产自主卫

5 结 论

以通道设置和分辨率特点相似的国产 GF-1 卫

星间交叉定标的适用性和精度进一步验证。

参 考 文 献

- 1 Qu Hongsong, Jin Guang, Zhang Ye. NextView program and progress in optical remote sensing satellites [J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2009, 2(6): 467-476.
曲宏松, 金光, 张叶. “NextView 计划”与光学遥感卫星的发展趋势[J]. 中国光学, 2009, 2(6): 467-476.
- 2 Qu Yi. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring [J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2013, 6(6): 834-840.
曲艺. 大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 834-840.
- 3 Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. Radiometric Calibration Theory and Method of Space Optical Sensors [M]. Beijing: China Science Press, 2013. 1-6.
顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学传感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 1-6.
- 4 Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan, *et al.*. Influence of motion status on multispectral optical characteristics of satellite [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1004002.
王付刚, 张伟, 汪洪源, 等. 运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1004002.
- 5 Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.*. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space borne optical remote sensors [J]. Remote Sensing Information, 2010, (4): 117-128.
高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学传感器可见光近红外通道辐射定标研究进展[J]. 遥感信息, 2010, (4): 117-128.
- 6 P M Teillet, P N Slater, Y Ding, *et al.*. Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 31(2): 105-120.
- 7 Gyanesh Chander, David J Meyer, L Dennis, *et al.*. 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.
- 8 S F Biggar. In-flight methods for satellite payload absolute radiometric calibration [P]. Dissertaion of Ph D, Tucson: University of Arizona, USA. 1990.
- 9 Gyanesh Chander, Tim J Hewison, Wu Xiangqian, *et al.*. Overview of intercalibration of satellite instruments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1056-1080.
- 10 P M Teillet, B L Markham, Richard R Irish, *et al.*. Landsat cross-calibration based on near simultaneous imaging of common ground targets [J]. Remote Sensing and Environment, 2006, 102(3): 264-270.
- 11 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Bendong, *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale targets [J]. Acta Optical Sinica, 2012, 32(2): 0212007.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多级灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212007.
- 12 Xu Wenbin, Zheng Xiaobing, Yi Weining. Cross-calibration method based on hyperspectral imager Hyperion [J]. Acta Optical Sinica, 2013, 33(5): 0528002.
徐文斌, 郑小兵, 易维宁. 基于超光谱成像仪 Hyperion 的交叉定标[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528002.
- 13 P M Teillet, J L Barker, B L Markham, *et al.*. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets [J]. Remote Sensing and Environment, 2001, 78(1): 39-54.
- 14 Han Qijin, Fu Qiaoyan, Pan Zhiqiang, *et al.*. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 167-173.
韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 等. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 167-173.
- 15 Li Xiaoying, Gu Xingfa, Min Xiangjun, *et al.*. Cross-radiometric calibration of CCD camera of CBERS-02B satellite using MODIS [J]. Sci China Tech Sci E, 2005, 35(S1): 41-58.
李小英, 顾行发, 闵祥军, 等. 利用 MODIS 对 CBERS-02 卫星 CCD 相机进行辐射交叉定标[J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(增刊 D): 41-58.
- 16 Chen Feng, Zheng Xiaobing. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 415-419.
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学传感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.

栏目编辑: 殷建芳