

# 基于智能检测不变像元的 FY-3A/MERSI 仪器响应衰变分析

王俊伟<sup>1</sup>, 胡秀清<sup>2,3\*</sup>, 何玉青<sup>1</sup>, 高昆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

<sup>3</sup>中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

**摘要** 提出一种智能方法来分析风云三号 A 星(FY-3A)中分辨率光谱成像仪(MERSI)的长期响应衰变。该方法通过使用迭代加权多元变化检测(IR-MAD)算法识别同一区域、不同时相卫星图像的不变像元,基于这些不变像元的信号变化评估仪器在该时段的响应衰变。先用 IR-MAD 方法分析图像场景的不变像元,通过两幅图像不变像元的正交回归获取仪器的相对衰变;再对多个图像对的长时间序列进行分析,采用多项式拟合获得传感器衰变随时间的变化曲线。采用所提方法研究了 FY-3A/MERSI 北非地区和中国西北部地区的数据,并与其他相关研究得到的仪器衰变结果进行比较。结果显示,所提方法与其他方法获取的仪器衰减规律具有良好的一致性(差异在 2% 以内),而且从北非地区与中国西北地区得到的结果相吻合(大部分通道的差异在 1% 以内),验证了本文方法的通用性与可重复性。

**关键词** 测量;中分辨率光谱成像仪;迭代加权多元变化检测;不变特征;相对辐射校准;传感器衰变

中图分类号 TP731

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0912001

## Response Degradation Analysis of Fengyun-3A Medium-Resolution Spectral Imager Based on Intelligent Detection of Invariant Pixels

Wang Junwei<sup>1</sup>, Hu Xiuqing<sup>2,3\*</sup>, He Yuqing<sup>1</sup>, Gao Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,

China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** We develop an intelligent method to monitor the long-term instrumental response degradation of the Fengyun-3A (FY-3A) satellite medium-resolution spectral imager (MERSI). This method assesses the instrumental response degradation during the interval between the capturing of two images using an iteratively reweighted multivariate alteration detection (IR-MAD) algorithm to statistically select invariant pixels from the different-temporal satellite images, which are obtained from the same geographic region. First, the IR-MAD algorithm is used to analyze the invariant pixels from the image scene; subsequently, the orthogonal regression of invariant pixels from two images is conducted to obtain the relative degradation of the sensor during this interval. Next, all the long-term sequence images are processed in a similar manner and the polynomial fitting is used to obtain the relative degradation curve of the sensor over the entire period of time. Herein, we conduct this procedure using the data of FY-3A/MERSI obtained from north Africa and northwestern China, and compare the obtained results with the instrumental degradation results obtained from other relevant researches. The verification results denote that the proposed method is in good agreement with other methods (the difference is less than 2%). The results obtained in north Africa are consistent with those obtained in northwestern China (the differences are less than 1% in majority of the bands), indicating the universality and reproducibility of the proposed method.

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-04-17; 录用日期: 2019-05-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018FYB0504900, 2018FYB0504901)、国家自然科学基金(41471302, 41871249, 61875013, 61827814)、科技部重大科学仪器设备开发专项(2017YFF0107102)

\* E-mail: huxq@cma.cn

**Key words** measurement; medium-resolution spectral imager; iteratively re-weighted multivariate alteration detection; invariant feature; relative radiometric calibration; degradation of sensor

**OCIS codes** 120.0280; 120.1880; 280.4788

## 1 引 言

随着航天和遥感技术的进步,遥感应用领域愈加宽泛,如农业估产、土地覆盖类型检测、环境动态变化检测、气候变化研究等。这些应用领域对卫星提供的观测数据精度和质量要求越来越高,无论是在区域还是全球范围内,都要求卫星遥感能提供长时间序列的一致性观测数据<sup>[1]</sup>。获取一致性卫星遥感观测数据需要对仪器进行不间断定标,尤其是在获取不同时间、不同地点的数据过程中,需要特别注意传感器衰变对地球辐射观测信号响应的影响,确保通过传感器获得的数据能准确反映所测地球物理量的真实变化趋势,而不是由传感器衰变产生的虚假信息<sup>[2]</sup>。

在遥感术语中,有两个常用的辐射定标概念:绝对辐射定标和相对辐射定标。绝对定标是将仪器响应与已知辐射源进行比较获取仪器绝对响应系数<sup>[3]</sup>;而相对定标是通过在不同时间获得的数据进行相对辐射归一化的过程,不需要获得准确的辐射绝对量值<sup>[4]</sup>。在绝对辐射定标中,卫星观测的辐射量值通常需要通过其他方法或者数据获得观测期间的目标绝对辐射,例如场地辐射校正需要获得精确的地表反射率和大气特性参数(气溶胶、水汽等)。因此,在不需要获得地球表面绝对辐射的情况下,基于地表固有的辐射信息相对归一化是一种不错的选择<sup>[5]</sup>。

通常将地球表面具有稳定反射率且较大面积的均匀区域称为伪不变目标(场)。人们主要通过对不同地球表面类型的伪不变场进行卫星数据归一化来获取卫星图像的相对辐射定标<sup>[6-10]</sup>。该方法依靠人工选取地面上的稳定目标,如沙漠目标<sup>[11]</sup>和高原、极地冰川冰雪目标<sup>[12-13]</sup>等,通过不同时间的卫星观测信号获得传感器的相对衰变。这种方法需要对目标场有一定的先验知识,且处理过程耗时耗力,在选取了伪不变场之后仍需进行严格的均匀性判断及必要的双向反射分布函数(BRDF)校正,以排除环境和观测条件的影响。Vermote等<sup>[14]</sup>和Brest等<sup>[15]</sup>分别选择海上亮云和多种覆盖类型的土地作为目标,并对所选择的目标进行细致的处理,以减小环境(表面和大气)和观测条件(太阳照射几何条件)的影响。

随着信息技术的发展和统计分析方法的广泛应用,一些数学方法也逐渐被应用于卫星数据处理和分析中。基于多通道卫星数据,Nielsen等<sup>[16]</sup>提出了一种基于典型相关分析(CCA)的多元变化检测变换(MAD),并用其来综合卫星数据各个通道的信息,以进行变化检测的研究。通过MAD变换获得的MAD变量既可以消除自身通道内部之间的相关性,也可以消除两个时相间不同通道之间的相关性,因此被广泛应用于多元变量的变化检测中。

基于MAD变换的线性不变性,Schmidt等<sup>[17]</sup>提出了一种完全自动化的变化检测方法,并将其应用于卫星观测场景中不变特征的检测,该方法后来也被成功应用于AVHRR短波通道仪器响应随时间的变化分析中,实践结果表明该方法的检测精度与手动选取伪不变特征进行归一化分析方法的检测精度相当。在此基础上,Canty等<sup>[18]</sup>提出了改进的迭代加权MAD(IR-MAD)变换,它建立了一种更好的不变背景,在这个背景下可以检测场景中主要的变化。IR-MAD变换对变化目标的识别能力优于普通的MAD变换,特别是对不变像素所占比例相对较小的场景识别。因此,IR-MAD变换也能更好地选取适合用于相对辐射归一化的不变像素点。

本文针对风云-3A卫星(FY-3A)上的中分辨率光谱成像仪(MERSI)超过5年的卫星遥感数据开展辐射归一化研究,从而获得探测器在这个期间内的相对衰变。首先对一系列不同时相的卫星图像对进行分析,然后将这些图像对的相对校准衔接起来,建立一个连续时间序列卫星数据的变化趋势。本文的目标是开发一种新技术来监测FY-3A/MERSI各个通道传感器的辐射响应变化。鉴于数据分析的年代跨度较长,本文方法在操作过程中尽可能地减少人工干预,从而高效快速地对长时间序列卫星数据进行分析处理,分析了FY-3A/MERSI大部分通道的在轨辐射响应衰变规律,并与相关的研究结果进行了对比验证。

## 2 数据和方法

### 2.1 FY-3A/MERSI 简介

风云三号(FY-3)是中国第二代极轨气象卫星,目前风云三号系列已经有4颗卫星(3A~3D)在轨

运行。其中 FY-3A 星于 2008 年 5 月 27 日发射升空,运行于 836 km 高的近极地太阳同步轨道上,赤交点时间为当地时间上午 10:30。FY-3A 携带有 11 个遥感仪器,具有全球多光谱综合观测地球系统的能力<sup>[19]</sup>。搭载于 FY-3A 的 MERSI 具有 19 个反射太阳波段(0.41~2.13  $\mu\text{m}$ )和 1 个热红外波段(11.25  $\mu\text{m}$ ),覆盖了可见近红外、短波红外和热红外等波段,星下点空间分辨率有 250 m 和 1000 m 两种,具体参数见表 1<sup>[20]</sup>。FY-3A/MERSI 是一个

跨轨多探元并扫式辐射计,采用 45°扫描镜和消旋 K 镜,扫描周期为 1.5 s,可对星下点 $\pm 55.1^\circ$ 的视场进行对地观测,提供一个 2900 km(跨轨) $\times$  10 km(沿轨,星下点)的扫描带(10 或 40 个探元),可实现每天一次的全球扫描覆盖,为大气、陆地和海洋的科学研究与应用提供有用的信息<sup>[21]</sup>。本研究使用的数据为 FY-3A/MERSI 从 2008 年 11 月 12 日至 2013 年 12 月 28 日的 1 km 空间分辨率的 L1 数据。

表 1 FY-3A/MERSI 各光谱波段指标

Table 1 Specifications of each spectral band of FY-3A/MERSI

Band	$C_w / \mu\text{m}$	$B_w / \mu\text{m}$	$R_{es} / \text{m}$	$r_{sto} / \%$	$D_R / \%$	Band	$C_w / \mu\text{m}$	$B_w / \mu\text{m}$	$R_{es} / \text{m}$	$r_{sto} / \%$	$D_R / \%$
1	0.470	0.05	250	0.40	100	11	0.520	0.02	1000	0.05	80
2	0.550	0.05	250	0.40	100	12	0.565	0.02	1000	0.05	80
3	0.650	0.05	250	0.40	100	13	0.650	0.02	1000	0.05	80
4	0.865	0.05	250	0.40	100	14	0.685	0.02	1000	0.05	80
5	11.250	2.50	250	-	-	15	0.765	0.02	1000	0.05	80
6	1.640	0.05	1000	0.08	90	16	0.865	0.02	1000	0.05	80
7	2.130	0.05	1000	0.07	90	17	0.905	0.02	1000	0.10	90
8	0.412	0.02	1000	0.10	80	18	0.940	0.02	1000	0.10	90
9	0.443	0.02	1000	0.10	80	19	0.980	0.02	1000	0.10	90
10	0.490	0.02	1000	0.05	80	20	1.030	0.02	1000	0.10	90

Note:  $C_w$  is central wavelength,  $B_w$  is band width,  $R_{es}$  is spatial resolution on nadir,  $r_{sto}$  is signal-to-noise ratio,  $D_R$  is dynamic range; band 5 is one infrared emissive channel, whose signal-to-noise ratio and dynamic range are different from those of other bands, and its signal-to-noise is 0.4 K and dynamic range is 330 K.

为了验证 IR-MAD 方法的可实现与可操作性,将 FY-3A/MERSI 北非地区作为研究区域,同时为了验证本文方法的通用性,还选用了中国西北部的新疆甘肃地区进行比对验证,并将结果与其他方法获得的 MERSI 仪器衰变进行比较。选择这些地区是因为其覆盖有大片沙漠和裸地,植被相对稀疏地区的地表反射率随季节的变化较小,同时兼顾有高中低亮度的样本目标,并且这些区域气候干燥,人类活动少,在非沙尘天气,可将大气水汽和气溶胶对地表反射率的影响降至最小。

## 2.2 研究方法和流程

Nielsen 等<sup>[16]</sup>于 1998 年指出 MAD 变换可自动选取地面的不变目标、不变点(NCP)。Canty 等成功地将其应用于 Landsat 和 SPOT 的高分辨率数据中进行自动相对辐射归一化<sup>[5]</sup>,并改进发展为 IR-MAD 方法<sup>[18]</sup>。本文将 IR-MAD 变换方法应用在  $t_1$  和  $t_2$  时刻 FY-3A/MERSI 获取的两幅多光谱卫星图像中,根据数据的统计特性,只需要设定一个系数

$k$ ,便能自动选取地表的不变点(像元)。

经过 IR-MAD 变换后的 MAD 分量可以通过向量系数  $a$  和  $b$  对  $I_i(t_1)$  和  $I_i(t_2)$  的线性变换来确定。这可以通过解一个广义的特征方程来获得, MAD 分量的定义为

$$M_i = a_i I_i(t_1) - b_i I_i(t_2), i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中:  $N$  位光谱通道总数;  $i$  为光谱通道编号;  $I(\cdot)$  为卫星影像数据。

在线性变换下, MAD 分量是不变的。因此,只

要满足  $\sum_{i=1}^N (M_i / \sigma_{M_i})^2 < k$  的像素点即可视为不变点,即 NCPs。其中  $\sigma_{M_i}$  为  $M_i$  的标准差,  $k$  为具有  $N$  个自由度的卡方分布( $\chi^2$ )的分位数。本研究选择  $k = \chi_{N,p}^2$ , 其中  $p$  表示观察值小于等于  $k$  的概率。这些在没有地表先验知识的情况下选择的 NCPs, 应与  $t_1$  和  $t_2$  时刻的图像之间的不变特征相对应。本研究根据数据的统计特性来确定 NCPs, 因此 NCPs 的位置很可能随图像对的变化而改变。

对于本研究使用的数据,即 FY-3A/MERSI 从 2008 年 11 月 12 日至 2013 年 12 月 28 日的 1 km 空间分辨率的 L1 级数据,采用固定的定标系数(如卫星在轨运行初期的定标系数)来计算该区域中各点的表观反射率,即

$$\rho_i = (\alpha_i D_i + \beta_i) \frac{d^2}{\cos \theta_s}, \quad (2)$$

式中: $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别为 MERSI 第  $i$  波段的定标斜率和截距; $d^2$  为日地距离修正因子; $D_i$  为该点处由 MERSI 第  $i$  波段对地观测计数值; $\theta_s$  为太阳天顶角。

根据 Schmidt 提出的定标方法<sup>[17]</sup>,采用响应度系数  $S_i$  来表征仪器的响应度,将响应度系数进一步分离为固定的初始响应度和随时间变化的相对响应度,即

$$S_i(t) = S_{0_i} S_{R_i}(t), \quad (3)$$

式中: $S_{0_i}$  表示绝对(发射初期)定标; $S_{R_i}(t)$  表示随时间变化的相对校准; $t$  表示自卫星发射以来的时间。

假设传感器的辐射测量差异是由线性效应引起的,则  $t_1$  和  $t_2$  时刻之间的不变点(NCPs)的关系可以表示为

$$\begin{aligned} S_{R_i}(t_2) \rho_{i,t_1} [N_{CP}(t_1, t_2)] = \\ S_{R_i}(t_1) \rho_{i,t_2} [N_{CP}(t_1, t_2)], \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $N_{CP}$  为场景中的不变像元; $S_{R_i}(t_1)$  和  $S_{R_i}(t_2)$  分别为  $t_1$  和  $t_2$  时刻的相对传感器响应系数。

$$\frac{S_{R_i}(t_2)}{S_{R_i}(t_1)} = \frac{\rho_{i,t_2} [N_{CP}(t_1, t_2)]}{\rho_{i,t_1} [N_{CP}(t_1, t_2)]} = m_i(t_1, t_2), \quad (5)$$

其中  $m_i(t_1, t_2)$  是根据图像对的 NCPs 的线性回归计算出来的。因此,一幅  $t_1$  时刻的图像与另一幅  $t_2$  时刻图像的比较结果即为两幅图像期间传感器响应度变化的测量值。通过将相隔几天甚至几年的图像对进行多次比较,可以获得一个多间隔的传感器相对增益的  $m_i(t_1, t_2)$  测量值的数据集序列。通过上述分析可获得传感器随时间变化的连续记录,并用拟合多项式函数来描述传感器衰变随时间的变化情况。

基于 IR-MAD 变换方法获得 FY-3A/MERSI 各太阳反射波段随时间衰变情况的处理过程如图 1 所示,具体细节将在第 4 节的具体实施过程中详细介绍。

### 3 具体实施过程

#### 3.1 MERSI 数据预处理

采用固定定标系数的方法将遥感器观测到的原

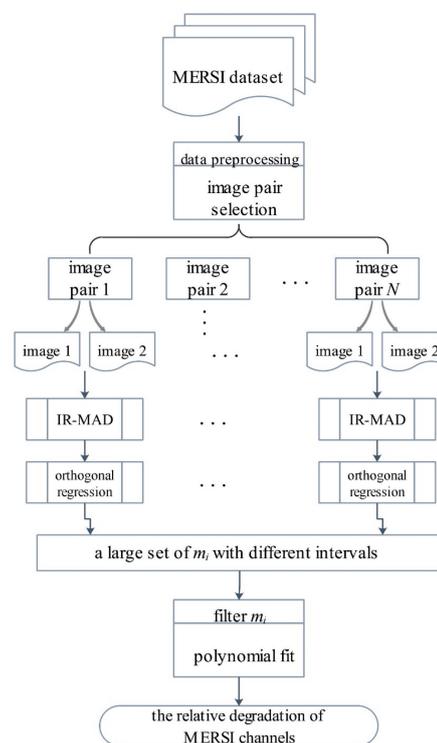


图 1 基于 IR-MAD 的 MERSI 定标过程流程图  
Fig. 1 Flow chart of IR-MAD-based calibration procedure of MERSI

始信号(DN 值)转换成目标辐射信号,并根据太阳-地球距离导致的太阳辐射变化和太阳天顶角的余弦归一化公式<sup>[(2)式]</sup>,将原始的观测信号转化为目标大气外界(TOA)表观反射率。在使用 IR-MAD 方法确定 NCPs 之前应该进行大气校正,减少大气对地球表面目标的影响,但这需要详细的大气水汽和气溶胶信息,它们不能直接从 FY-3A/MERSI 数据集中获取,因此本文方法直接略去大气校正处理,一方面可避免因使用了不准确的大气参数而引入的偏差,另一方面 IR-MAD 方法可直接过滤掉两幅图像中水汽和气溶胶变化较大的像元。

此外, FY-3A/MERSI 的第 5 通道为长波红外波段通道,不参与 IR-MAD 分析;第 6、7 通道星上多档增益跳变频繁<sup>[20]</sup>;第 18 通道为水汽强烈吸收通道,受大气影响严重。上述通道均不属于本研究方法的适用范畴,因此本研究只对 MERSI 的 16 个太阳反射波段的仪器衰变情况进行分析。

##### 3.1.1 图像配准

为了便于图像数据的分析比对,首先将设定的卫星过境区域的轨道数据投影到一个  $0.01^\circ$  的固定地理栅格上。由于不同日期卫星过境轨道和姿态存在差异,地理定位精度稍有不同,不同时间的数据投影到同一个地理栅格上会存在微小的地理偏差,因

此图像配准是进行下一步操作之前首先需要解决的问题。

图像配准就是确保不同日期获得的卫星数据被投影到同一个地理栅格之后,每一像素能完全相互对准。实际处理过程中发现两幅图像之间的配准偏移主要有两种类型:水平方向和垂直方向的平移偏差、沿图像平面内某一个方向的旋转偏移。图像的平移偏差和旋转偏差将直接影响图像对的比对和不变点识别。

如前所述,假设传感器接收到的两幅场景的辐射差异主要来自传感器衰变引起的线性变化,因此两幅已配准图像之间的相关性应该是最大的,微小的图像平移偏差和旋转偏差都会导致两幅图像的相关性降低。将其中一幅图像作为参考图像,根据预设的图像偏差范围,用另一幅图像对其求 Pearson 相关系数。当第二幅图像在某个偏移上与参考图像有最大的相关系数时,该偏移量即为这幅图像相对于参考图像的偏移量,从而实现两幅图像的精确配准。

### 3.1.2 海洋水体掩模及云掩模

本研究的主要目的是检测图像中的不变像元,但必须先剔除图像中显著变化的目标,例如云、沙尘等,否则将影响后续计算的速度和效率。另外,水体及海洋区域对不同波段的反射特性光谱差异较大,部分波段信号非常微弱。为了提高本文方法的灵敏度,本实验剔除了水体目标、海洋及被云层覆盖的区域。

采用 FY-3A/MERSI 数据提供的陆地海洋掩模板进行水体目标及海洋区域的去除。另外, MERSI L1 数据不具有云掩模数据,云层覆盖区域的准确识别和去除是一个复杂的过程,卫星数据不同,对应的云检测产品和方法也不同。针对图像中被云覆盖的区域,本研究选用比较简化的阈值判别法进行简单的去云操作。云层覆盖区域占比过大的数据不利于后面的 IR-MAD 变换的统计分析,直接将其从数据集中剔除,不进行后续分析。

### 3.2 图像对的组织

鉴于本实验处理的数据为超过 5 年的大量数据,而且 IR-MAD 分析法对两幅图像有严格要求,本文算法设定一系列的准则来选取可进行相对辐射归一化的图像对。假设图像对识别出的不变像元 NCPs 之间的辐射(反射率)差异主要由传感器响应变化引起,因此需要先排除或减少其他因素导致的辐射差异,如环境(地球表面和大气)和观察条件(传

感器观测几何和太阳照射几何)的差异所造成的影响。另外,为了保证两幅图像对应像元偏离星下点的像元变形相近,需要在具有接近星下点轨迹的轨道(赤道交点的精度相差在  $\pm 1^\circ$  内,根据 MERSI 分辨率,相当于 100 个像素宽度)图像中选择图像对,这样图像对中每个像素的观测和太阳照射几何条件基本相似。

为了最大限度地减小地表季节性变化以及太阳赤纬和平流层臭氧浓度变化引起的地球目标辐射的季节性差异,将两幅图像获取间隔限定在  $(365.25y \pm 20) d$  ( $y=0,1,2,3,\dots$ ),以确保所比较的图像是季节相同或者日期相差 20 d 内的两幅图像。

### 3.3 图像对的比较与分析

一旦选择了两个具有相近地面轨道并且在一年中相似时间观测的场景之后,再进行掩模处理,剔除云和海洋像元。随后,采用 IR-MAD 方法确定 NCPs 样本集,其中样本的数量主要取决于两幅图像的相对观测几何条件以及云、大气和地表等条件。根据 Canty 等提出的相对辐射归一化方法<sup>[5]</sup>,用正交回归来估计每个通道传感器响应变化  $m_i(t_1, t_2)$ 。对于每一个图像对,由 IR-MAD 方法确定的 NCPs 数量应在 300 以上,以提供足够多的样本进行正交回归。图 2 分别是相隔 16 d 和 4 年的图像对所确定的 NCPs 在 4 个典型通道的回归图(通道 1、4、8、20),其中通道 4 为稳定通道,通道 1、8、20 为具有不同衰减度的通道,不同通道中回归点的相关系数均大于 0.99。由图 2 可知:对于相隔 16 d 的图像对,由于相隔时间很短,各通道不变像元对应的表观反射率回归斜率接近 1;对于相隔 4 年的图像对,其在通道 1、8、20 上具有不同程度的回归斜率偏离,偏离越大,表明通道衰减越大,通道 8 是回归斜率偏离 1 最大的通道。由此可见,不同时间间隔的图像对的 NCPs 回归斜率确实能表征传感器的衰变情况。

为了更好地根据 IR-MAD 方法进行统计分析和选取可靠的 NCPs,首先需要确定一系列不变像元选择准则。这些准则包括传感器观测天顶角(VZA)的限定、IR-MAD 迭代停止阈值以及不变点选取的决策阈值  $k$ ,它们的取值将通过其对 NCPs 影响以及回归效果的变化来确定。

由于卫星观测天顶角较大位置的 MERSI 像元变形严重,空间分辨率较低,尽管本实验已经选取了具有接近地面轨道的数据作为图像对,但为了更加准确地统计分析和选取不变点,需要对 VZA 进行限制并确定将哪些像素输入到 IR-MAD 变换中。

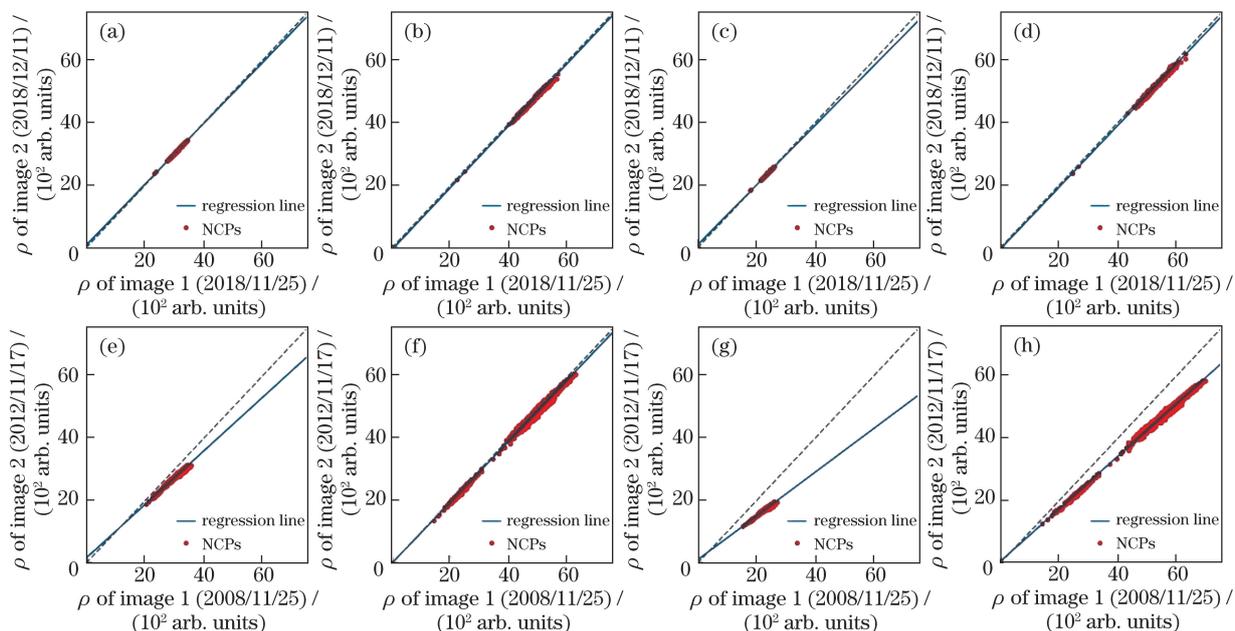


图 2 两个不同时间间隔的图像对在不同通道处的正交回归结果。(a)(e)通道 1;(b)(f)通道 4;  
(c)(g)通道 8;(d)(h)通道 20

Fig. 2 Orthogonal regression results of two image pairs with different intervals in different channels.

(a)(e) Channel 1; (b)(f) channel 4; (c)(g) channel 8; (d)(h) channel 20

在  $5^{\circ} \sim 50^{\circ}$  之间以  $5^{\circ}$  为增量改变 VZA 的大小, 上述相隔 16 d 的图像对的前 4 个通道的回归斜率及

NCPs 的数量如图 3 所示。由于两幅图像仅相差 16 d, 因此它们的回归斜率应接近 1。

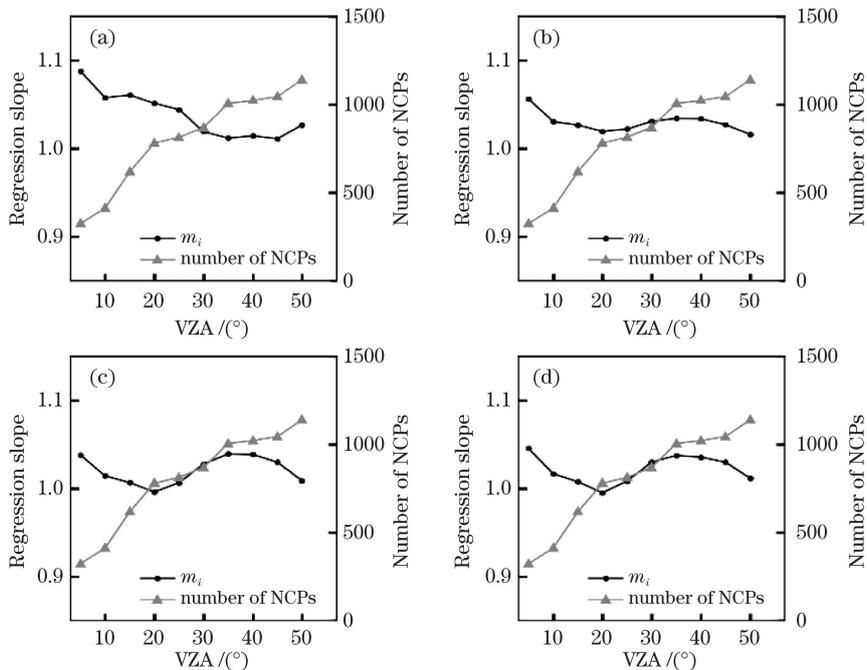


图 3 不同通道回归斜率及 NCPs 的数量随 VZA 的变化。(a)通道 1;(b)通道 2;(c)通道 3;(d)通道 4

Fig. 3 Regression slopes and number of NCPs as functions of VZA in different channels.

(a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3; (d) channel 4

根据几十个图像对的测试结果, 选取间隔从几天到 5 年的图像对, 最终选择两幅图像中卫星观测天顶角小于  $30^{\circ}$  的区域进行 IR-MAD 变换得到 NCPs。同

时, 由于 VZA 较大的区域图像分辨率已发生较大变化, 而且像元变形也较大, 故本研究尽量选择 NCPs 分布在星下点轨迹附近 ( $\leq 15^{\circ}$ ) 的像元。这是在最大

化 NCPs 数量和保证回归效果之间的一种折中方案。后续分析均使用这些标准来进行数据选择。

IR-MAD 变换处理要进行多次迭代,直到典型变量之间的相关系数变化达到预期值,或者达到设定的最大迭代次数为止<sup>[18]</sup>。本研究对迭代停止阈值进行了测试,结果如图 4 所示,NCPs 的数量在迭代初期极速下降,在迭代次数达到 15 次以后,典型变量之间的相关系数收敛趋于稳定,同时获得的 NCPs 数量也趋于稳定,因此将典型变量的相关系数变化小于 0.1 且最大迭代次数为 30 设定为 IR-MAD 变换的迭代停止条件。在 7.96 和 11.91 之间对不变点的决策阈值  $k$  进行测试,增量为 0.3。当  $k=9$  时, FY-3A/MERSI 数据的回归效果和 NCPs 数量的平衡性最好。这意味着笔者有 90% ( $\chi_{16,0.1}^2=9.31$ ) 以上把握认为选取的 NCPs 是理想不变像元。

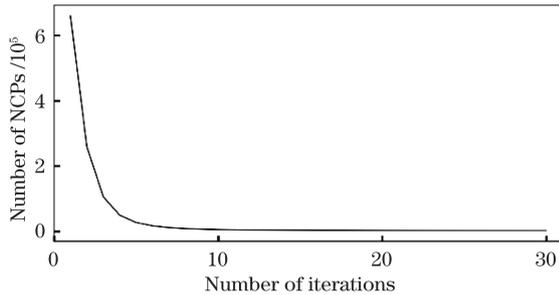


图 4 NCPs 数量随迭代次数的变化

Fig. 4 Number of NCPs as a function of number of iterations

### 3.4 长序列衰减的多项式拟合

采用以上处理方法和流程,对北非地区超过 5 年的 FY-3A/MERSI 时间序列数据进行分析,获得不同时期及不同时间间隔的传感器相对增益的  $m_i(t_1, t_2)$  测量值的序列数据集。按照上述图像对的配对准则,其中有些图像的重复使用次数多达 10 次,有些图像的使用次数较少。

本文方法容易受到两幅图像中大气水汽和气溶

胶显著变化的影响,比如某些图像中有沙尘暴发生。为排除图像对在 IR-MAD 分析时存在受大气影响强烈的场景,根据回归曲线的截距制定了图像对过滤准则,即在图像对的两幅场景比较过程中,去除回归截距反射率大于 3% 的通道。这一规则很有必要的,因为某些情况下只有一个或某几个通道受到干扰时,并不需要抛弃图像对的其他通道数据的回归。同时,对于仍然存在图像地理位置配准偏差的图像对,采用 NCPs 的相关系数及回归残差方差进行图像对分析过滤。

可采用多项式  $P_i(t)$  来拟合任一通道的传感器响应衰变随时间的变化曲线,即

$$P_i(t, c_l) = 1 + \sum_{l=1}^M c_l t^l, \quad (6)$$

式中:  $c_l$  为多项式中各个单项式的系数;  $l$  为单项式的次数;  $M$  为多项式的阶数,且  $P_i(0)=1$  (或  $c_0=1$ )。

在已经获取时间间隔  $[t_1, t_2]$  内相对变化的情形下,确定  $P_i$  就是估计在这两个时间处多项式的比值  $\frac{P_i(t_{2j}, c_l)}{P_i(t_{1j}, c_l)}$ , 其中  $j$  表示不同的图像对。因此,问题可归结于推算这个间隔内的相对变化 [即  $m_i(t_1, t_2)$ ] 和求解多项式系数  $c_l$ 。

多项式的系数 ( $c_l$ ) 由非线性最小二乘拟合 (Nelder-Mead 单纯形法<sup>[22]</sup>) 确定,即最小化:

$$c_l = \sum_{j=1}^N \left[ \frac{P_i(t_{2j}, c_l)}{P_i(t_{1j}, c_l)} - m_{ij}(t_1, t_2) \right]^2. \quad (7)$$

## 4 结果分析

基于传感器衰变特征的初步分析,选取多项式的阶数为 2。一共进行了 6241 次比较,对 16 个通道分别应用上述过滤方法之后,在每个通道获得了数量不等的图像对回归样本,其样本数量及拟合系数见表 2 ( $C_V$  为变异系数)。

表 2 各通道  $m_i$  数量、多项式拟合系数及归一化后样本点的  $C_V$  值

Table 2 Numbers of  $m_i$ , coefficients of polynomial fitting, and  $C_V$  values of normalized sample points in each channel

Band	Number of NCPs	$a_1$	$a_2$	$C_V / \%$	Band	Number of NCPs	$a_1$	$a_2$	$C_V / \%$
1	4606	$-1.53 \times 10^{-4}$	$4.84 \times 10^{-8}$	5.53	12	5694	$-4.03 \times 10^{-5}$	$1.55 \times 10^{-8}$	4.25
2	5350	$-8.16 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-8}$	4.08	13	5470	$1.36 \times 10^{-5}$	$1.46 \times 10^{-9}$	3.63
3	5268	$1.28 \times 10^{-5}$	$3.12 \times 10^{-9}$	2.89	14	5384	$9.04 \times 10^{-6}$	$3.07 \times 10^{-9}$	3.15
4	5177	$7.23 \times 10^{-6}$	$-7.95 \times 10^{-9}$	3.07	15	5825	$-1.18 \times 10^{-5}$	$5.11 \times 10^{-9}$	3.35
8	5058	$-3.25 \times 10^{-4}$	$7.48 \times 10^{-8}$	7.76	16	5380	$7.79 \times 10^{-6}$	$-9.84 \times 10^{-9}$	2.73
9	5440	$-1.62 \times 10^{-4}$	$1.68 \times 10^{-8}$	7.55	17	3263	$-6.38 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-8}$	6.16
10	5498	$-1.12 \times 10^{-4}$	$2.60 \times 10^{-8}$	6.14	19	3423	$-6.78 \times 10^{-5}$	$7.97 \times 10^{-9}$	5.65
11	5392	$-8.88 \times 10^{-5}$	$2.65 \times 10^{-8}$	4.91	20	5175	$-8.57 \times 10^{-5}$	$-7.52 \times 10^{-9}$	3.24

选取北非数据通道 4(稳定通道)及通道 20(具有较大衰减的通道)的结果,这两个通道长序列图像对过滤之后的回归斜率分布如图 5 所示。对于每一个  $m_i(t_1, t_2), t_1 < t_2$ , 以  $t_2$  作为其横坐标, 根据图像对中两幅图像的时间间隔采用不同的颜色和形状以示区别。图 5 显示了北非地区图像在两个典型通道的回归斜率序列。可以看到, 在所有进行比较的图像对中, 时间间隔越短的图像对越多, 且不同类型的点具有明显的层次性, 即在短时间间隔内传感器衰变也更小, 稳定在 1 附近, 而较长时间间隔图像对的回归斜率偏离较大。根据各通道的多项式拟合系数, 可以得

到 MERSI 各个通道传感器随时间的衰变曲线, 如图 6 所示。

总体来看: 短波长波段通道的衰减较大, 其中第 8 通道的衰减最为明显; 红光至近红外波段通道的衰减较小, 第 13~16 通道的衰减几乎为零。根据拟合的衰减曲线对各个  $m_i$  样本进行归一化订正(即  $m_i(t_1, t_2) \left[ \frac{P_i(t_2)}{P_i(t_1)} \right]^{-1}$ ), 然后采用与图 5 相同的方式进行绘图, 结果如图 7 所示。可以看到: 经过归一化之后的  $m_i$  都集中在 0.95~1.05 范围内, 其频率分布直方图均值为 1 且分布非常集中, 即方差很小, 这表明拟合结果与实际推算的传感器衰变一

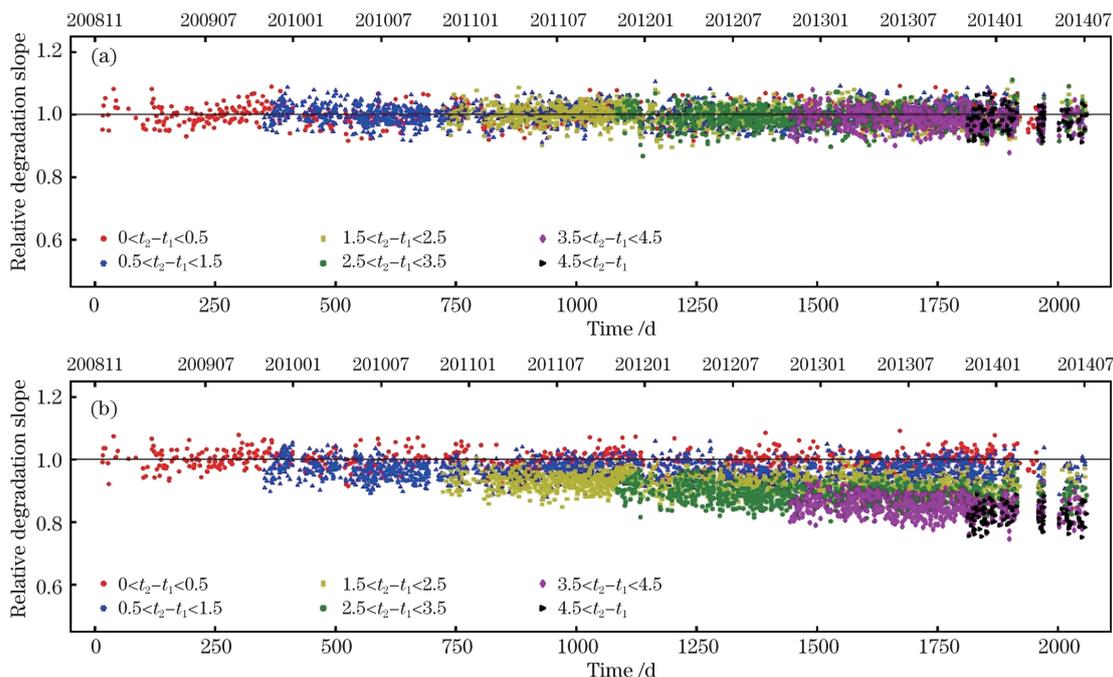


图 5 北非数据所有图像对比较结果的散点分布图。(a)通道 4;(b)通道 20

Fig. 5 Scatter distributions of comparison results from all image pairs over north Africa dataset.

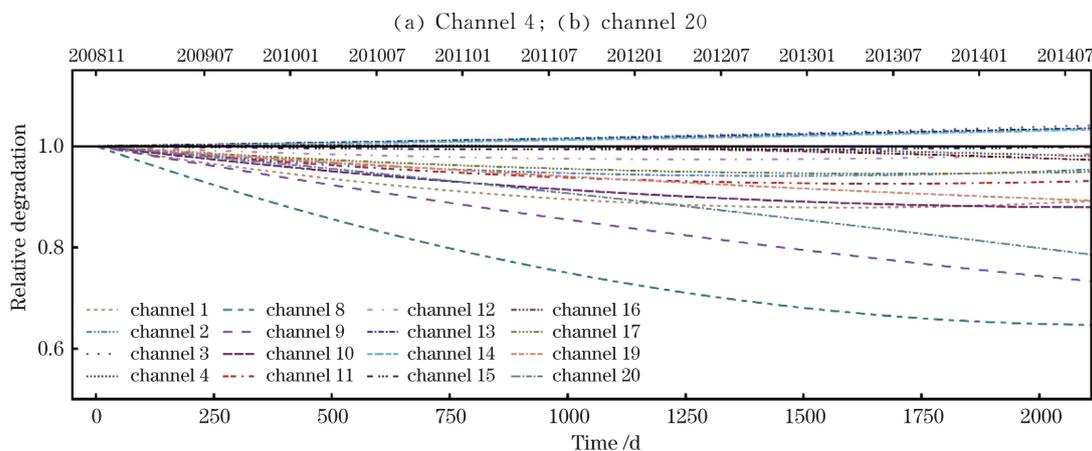


图 6 传感器各通道随时间的衰变曲线

Fig. 6 Degradation curves of each sensor channel with time

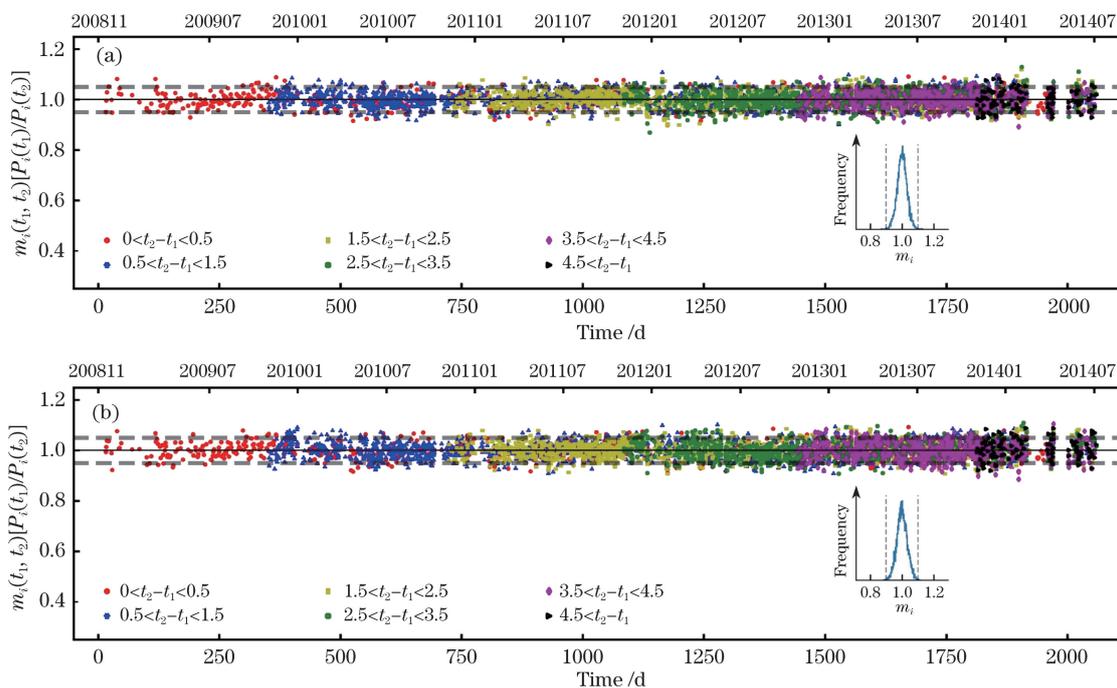


图 7 北非数据所有图像对比较结果归一化后的散点分布图。(a)通道 4;(b)通道 20

Fig. 7 Scatter distributions of normalized comparison results from all image pairs over north Africa dataset.

(a) Channel 4; (b) channel 20

致。归一化之后各通道的  $m_i$  的变异系数 ( $C_v = \frac{\sigma}{\mu}$ , 其中  $\sigma$  为标准差,  $\mu$  为均值) 如表 2 所示, 其反映该方法各个通道归一化之后  $m_i$  样本的离散程度。由此可见, 大部分通道的  $C_v$  值都在 5% 以内, 第 8、9 通道的  $C_v$  值最大, 但也小于 8%。这两个通道  $C_v$  值较大的原因是第 8、9 通道为短波的蓝光波段, 其受大气气溶胶与分子的散射影响较大。

为了验证基于 IR-MAD 变换所得到的 MERSI 各个通道传感器随时间的衰变是否正确, 将本文方法结果与其他方法得到的仪器衰减结果进行比较。Chen 等<sup>[2]</sup>对 FY-3A/MERSI 在太阳反射波段在轨

响应的变化进行研究, 分析了基于深对流云 (DCC) 目标 MERSI 在 2008 年 8 月至 2012 年 8 月的在轨响应变化, 并将孙凌等<sup>[23]</sup>提出的基于敦煌辐射校正场多年定标系数序列研究的 MERSI 在 2008 年 9 月至 2011 年 12 月的在轨响应变化, 以及基于多个地球稳定目标研究的 2008 年 9 月至 2011 年 8 月的在轨响应变化<sup>[24]</sup>统一到了 2008 年 8 月至 2012 年 8 月。另外王玲等<sup>[25]</sup>基于极地冰雪目标对 MERSI 在轨响应进行了研究, 并对不同方法得到的同一时间段 (2008 年 11 月—2012 年 8 月) 的 MERSI 各个通道总衰减率进行了比较。本文方法与上述方法所获得的结果的对比如图 8 所示。

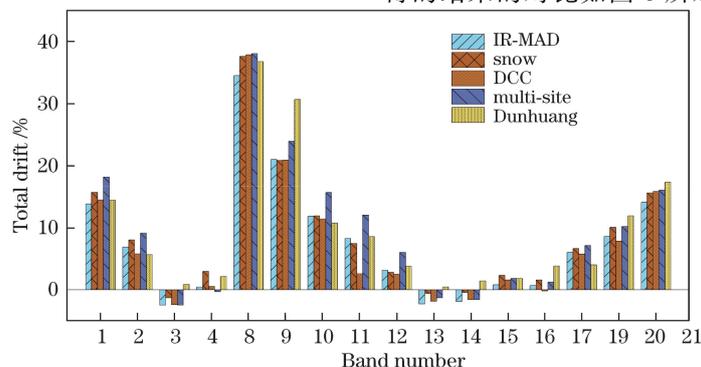


图 8 5 种不同方法获得的 FY-3A/MERSI 在 2008 年 11 月至 2012 年 8 月的反射太阳通道总衰减率对比

Fig. 8 Comparison of total degradation rates of reflected solar channels of FY-3A/MERSI derived by five different methods from November 2008 to August 2012

本文方法与其他 4 种方法具有高度的一致性。从本文方法与其他 4 种方法的均方根误差值可以看出,本文方法与基于 snow 的方法的结果最为接近。除了第 8 通道与其余 4 种方法的结果相差较大外(偏差为 4%~5%),大部分通道的偏差都为 1%~2%,这是因为第 8 通道是短波蓝色通道,受气溶胶和大气散射的影响较大,说明本文方法也主要受大气的影响。

为了验证本文方法的通用性,本研究还对中国西北部新疆地区的数据进行了分析。结果表明,这两个区域内各个通道所得到的传感器衰减差异都小于 1%,说明本文方法不受区域内地理环境的影响,在数据区域上具有较高的通用性与可重复性。

## 5 结 论

采用 IR-MAD 方法甄别传感器获取同一区域两幅图像的不变像元,并基于多个图像对的不变像元反射率回归分析来评估 FY-3A/MERSI 传感器随时间的衰变情况。通过对图像对进行数据预处理及样本筛选实现每个图像对不变像元表观反射率的回归分析,从而确定两个数据日期之间的相对传感器退化。在超过 5 年的 MERSI 时间序列数据中获得大量图像对,并采用多项式拟合仪器的长期衰减率,然后应用于校正该段时间内的 FY-3A/MERSI 数据,有效消除了传感器退化对反射时间序列变化趋势的影响。基于 IR-MAD 方法实现 FY-3A/MERSI 的长序列数据一致性的校准方法是一种全新的方法,它不仅可用于验证其他方法的校准结果,还可以以其丰富的分析样本实现长序列数据的连续性分析。本文方法的结果与通过其他方法得到的传感器衰变结果符合得很好,其结果一致性都在 2% 以内,所分析的北非地区与中国西北部两个区域的各个通道传感器衰减差异都小于 1%。

应该重申的是,IR-MAD 分析前的数据预处理(如图像配准和显著变化目标的剔除)都会影响结果的不确定度。另外,本研究尚未对目标的 BRDF 进行校正,这也会对分析结果有一定的影响。但是由于本文采用的样本数量巨大,这些不确定要素产生的误差对分析结果的影响微乎其微。

本文方法中的参数决策阈值  $k$  一旦被设定,基于 IR-MAD 的校准方法基本是通用的,它并不局限于任何特定的传感器或地理区域,这为进一步应用卫星长序列历史数据再定标分析提供了机会。这种校准方法的成本低、效益高,因为它不需要来自场景

的先验知识,也不依赖于通常随时间或环境而改变的伪不变特征,并且由于 IR-MAD 方法可应用于大型空间数据集,因此在较大的时间尺度上,不易受当地环境变化的影响。

当然,本研究所采用的 MAD 变换和 IR-MAD 变换也存在不足,那就是忽略了图像数据的空间结构特征。Nielsen 等<sup>[16]</sup>曾提出对 MAD 变换进行最大自相关因子(MAF)变换,可在保留 MAD 变换优势的情况下综合数据的空间特征。MAF 可能在不不变特征检测中具有更高的准确性。这是进一步完善 MAD 变换,并将其用于不变像元检测的思路,希望通过改进本文算法的稳健性,使其具有更高的精度和更广的适用范围。

**致谢** 感谢国家卫星气象中心的王鹏和王宁在将卫星数据投影到地理栅格过程中给予的技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] Heidinger A K, Cao C Y, Sullivan J T. Using moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D23): AAC 11.
- [2] Chen L, Hu X Q, Xu N, *et al.* The application of deep convective clouds in the calibration and response monitoring of the reflective solar bands of FY-3A/MERSI (medium resolution spectral imager)[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6958-6975.
- [3] Teillet P M, Slater P N, Ding Y, *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.
- [4] Dinguirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3): 194-205.
- [5] Canty M J, Nielsen A A, Schmidt M. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 441-451.
- [6] Du Y, Teillet P M, Cihlar J. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(1): 123-134.
- [7] Furby S L, Campbell N A. Calibrating images from different dates to 'like-value' digital counts[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77(2): 186-196.
- [8] Hall F G, Strebel D E, Nickeson J E, *et al.* Radiometric rectification: toward a common radiometric

- response among multirate, multisensor images [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(1): 11-27.
- [9] Schott J R, Salvaggio C, Volchok W J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 26(1): 1-16.
- [10] Yang X J, Lo C P. Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(8): 967-980.
- [11] Bhatt R, Doelling D, Wu A S, *et al.* Initial stability assessment of S-NPP VIIRS reflective solar band calibration using invariant desert and deep convective cloud targets [J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 2809-2826.
- [12] Wu A S. Using Dome C for moderate resolution imaging spectroradiometer calibration stability and consistency [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 033520.
- [13] Masonis S J, Warren S G. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional reflectance of Antarctic and Greenland snow [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(8): 1495-1520.
- [14] Vermote E, Kaufman Y J. Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(13): 2317-2340.
- [15] Brest C L, Rossow W B, Roiter M D. Update of radiance calibrations for ISCCP [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(5): 1091-1109.
- [16] Nielsen A A, Conradsen K, Simpson J J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: new approaches to change detection studies [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 64(1): 1-19.
- [17] Schmidt M, King E A, McVicar T R. A method for operational calibration of AVHRR reflective time series data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1117-1129.
- [18] Canty M J, Nielsen A A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1025-1036.
- [19] Dong C H, Yang J, Zhang W J, *et al.* An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(10): 1531-1544.
- [20] Hu X Q, Sun L, Liu J, *et al.* Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4915-4928.
- [21] Zhang P, Yang H, Qiu H, *et al.* Quantitative remote sensing from the current fengyun 3 satellites [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(4): 6-11.  
张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力 [J]. 气象科技进展, 2012, 2(4): 6-11.
- [22] Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, *et al.* Numerical recipes: the art of scientific computing [M]. New York: Cambridge University Press, 1986.
- [23] 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.  
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.
- [24] Sun L, Hu X Q, Guo M H, *et al.* Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(4): 84-96.  
孙凌, 胡秀清, 郭茂华, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场地定标跟踪 [J]. 气象科技进展, 2013, 3(4): 84-96.
- [25] Wang L, Hu X Q, Zheng Z J, *et al.* Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212003.  
王玲, 胡秀清, 郑照军, 等. 联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0212003.