

FY-3D MERSI-II 信号串扰效应在轨检测及订正

肖达¹, 徐娜^{2,3*}, 胡秀清^{2,3}, 吴荣华^{2,3}, 钮新华⁴, 王向华⁴, 何玉青¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

³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;

⁴中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 信号串扰会对焦平面通道的观测图像产生显著的条纹影响。基于地、月观测数据,对 FY-3D 核心载荷中分辨率成像光谱仪(MERSI-II)所有通道的串扰效应进行在轨检测并开展了初步的订正实验。检测发现,MERSI-II 部分焦平面存在显著的通道信号串扰现象,其中短波红外焦平面通道 5,6 以及中长波红外焦平面通道 20,21,22,23 最为显著,分别表现为探元间串扰、通道间串扰两种特征。基于月球点光源成像特性,采用线性近似订正算法计算了串扰系数,并以通道 20 为例对订正算法进行了初步验证。结果表明,串扰订正可有效移除月球图像的串扰信号并能够显著改善地球观测图像的条纹现象,说明算法具有很好的适用性。

关键词 成像系统; MERSI-II; 中分辨率光谱成像; 月球图像; 信号串扰; 串扰订正

中图分类号 TP722; V474.2+4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1011001

On-Orbit Detection and Correction of Crosstalk Effect of FY-3D MERSI-II Signals

Xiao Da¹, Xu Na^{2,3*}, Hu Xiuqing^{2,3}, Wu Ronghua^{2,3}, Niu Xinhua⁴,
Wang Xianghua⁴, He Yuqing¹

¹ School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

³ Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

⁴ Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract Signal crosstalk can produce significant fringing effects on the observed images in a focal plane channel. Based on the earth and lunar observation data, the on-orbit detection of the crosstalk effects of all bands of the medium resolution spectral imager (MERSI-II) as FY-3D core load, and the preliminary correction tests also done. The detection results indicate that there are significant signal crosstalk phenomena of bands in some MERSI-II focal planes, among which the band 5 and band 6 of short-wave infrared focal plane and the bands 20, 21, 22, and 23 of mid and long wave infrared focal plane are suffered most obviously, manifested as inter-band and inter-detector characteristics, respectively. Based on the lunar point source imaging characteristics, the crosstalk coefficient is calculated using the linear approximation correction algorithm. Moreover, this correction algorithm is preliminarily verified through band 20. The results show that crosstalk correction can effectively remove the crosstalk signals of lunar images and significantly improve the fringe phenomena of earth observation images, implying that the proposed algorithm has good applicability.

Key words imaging systems; MERSI-II; medium resolution spectral imaging; lunar image; signal crosstalk; crosstalk correction

OCIS codes 110.4234; 120.4640; 110.2960; 110.3000

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-01-23; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504900, 2018YFB0504802)

* E-mail: xuna@cma.gov.cn

1 引 言

中分辨率成像光谱仪(MERSI)是风云三号系列(FY-3D)卫星上的主要光学成像载荷之一。第二代 MERSI(MERSI-II)在初代基础上进行了改进和性能提升,于 2017 年 11 月搭载 FY-3D 卫星成功发射。MERSI-II 采用长线条跨轨多元并扫方式,具有多光谱成像和较高地面分辨率成像等特点,光谱探测范围覆盖可见-热红外波段,共 25 个通道,包括 19 个太阳反射波段($0.412\sim 2.130\ \mu\text{m}$)和 6 个热发射波段($3.8\sim 12\ \mu\text{m}$)。其中 6 个通道星下分辨率为 250 m,其余 19 个通道空间分辨率为 1000 m,分别对应 40 和 10 个探元。25 个通道分成可见光、可见光/近红外、短波红外、中/长波红外及长波红外 5 个波段,由 5 个子光路完成成像,对应 5 个焦平面组件(FPA)。MERSI-II 能够直接获取地表和大气中的反射、辐射光谱信息,同时其较宽的刈幅又保证了较广阔的地面覆盖,可实现地球表面大气、海洋和陆地的多光谱观测,在生态和环境保护、数值天气预报同化等领域都有重要应用^[1-6]。

信号串扰是多通道系统的一个常见现象,当系统中某一个通道有信号时,常常会对系统中的其他通道产生干扰信号^[7]。尽管在设计上考虑了该问题的影响,信号串扰在多通道光学遥感成像载荷中仍然存在,严重影响在轨观测数据的质量^[7]。实际上,电子串扰对 Terra MODIS 是一个关键问题,在 Terra 航天器发射前就进行了相关研究^[8]。Xiong 等^[9]在 2002 年通过在轨月球图像证实了电子串扰对 MODIS 短波红外焦平面和中红外焦平面通道信号存在干扰。Sun 等^[8]发现电子串扰的存在使得通道对地图像出现强条纹、重影及亮度温度漂移的现象,而且随着器件老化和时间的推移而愈发严重。串扰类型和程度随受影响波段的探元和发送波段的探元的不同而不同,可分为光学串扰与电子串扰。光学串扰指当光通过探元的滤光器后,其从一个通道散射到另一个通道引起的信号串扰。电子串扰会引入与光学串扰相同的伪信号,区别在于光学信号的贡献总是正的而电子串扰可正可负。由于很难区别这两种串扰,本文着重讨论两种串扰的综合效果^[10]。

从 MODIS 通道 2 可观测到两组规则分布的异常像素,其长波红外焦平面通道 27, 28, 29^[11-15]数据均受到同一焦平面上相邻频带通道信号的串扰,一种基于线性近似和月球观测的串扰订正算法被提

出^[8]。2016 年,通道 30 也被发现存在信号串扰现象,利用改进的非线性系数串扰订正算法可得到较好的串扰订正效果^[16]。针对 MODIS 上发现的串扰现象,VIIRS 在仪器设计上进行了针对性的改进,但是该问题仍没有消除。Sun 等^[8]于 2010 年在 SNPP VIIRS 上发现一个不同于 MODIS 特有的串扰现象,即由于探元在焦平面组件上的排列,每个受影响波段的奇数探元和偶数探元具有独特的两组串扰模式^[10]。2017 年, Wilson 等^[17]同时考虑了通道间和通道内探元串扰的影响,认为同一焦平面各通道共用相同的采样电路是产生电子串扰的潜在原因。针对串扰的长期影响,MODIS 和 VIIRS 团队均利用在轨数据进行了大量研究,结果显示信号串扰的问题随着器件老化和时间的推移而愈发严重,如 MODIS 通道 27^[12,15]。

综上,信号串扰普遍存在于多通道光学成像载荷中,会加重数据的条纹化,并随着时间推移而越发严重。MERSI-II 对地图像亦存在较为严重的条纹,考虑到 MERSI 的光学设计与 MODIS 和 VIIRS 相近^[1],因此研究 MERSI 的在轨串扰效应具有重要意义。本文针对 FY-3D 在轨数据,分别利用对地观测和月球观测数据进行信号串扰特征分析和在轨检测,并给出串扰订正算法,并对通道间串扰类型进行了修正和结果验证。

2 信号串扰效应检测与特征分析

2.1 地球视图图像

信号串扰效应会加重对地图像条纹化,影响数据质量。在了解 MERSI-II 焦平面排布的基础上,对 MERSI-II 对地视图图像进行分析,这有助于发现问题和寻找规律。图 1 为分布在 5 个不同焦平面上的 25 个通道的排布位置,其中中间图注为定义的通道序号。

结合通道排布位置观察对地图像,发现当目标近似为点光源时,如极地孤岛和火点目标,不同通道的对地图像面积存在明显差异,这主要是由信号串扰引起的。图 2 为 FY-3D MERSI-II 于 2019-07-18T04:50 极地孤岛($82.40^\circ\text{N}, 77.25^\circ\text{E}$)对地观测图像均衡增强示意图。该岛周边为北极冰水,温度极低,因此孤岛可以看成是一个热源。其中图 2(a)为通道 20 ($3.8\ \mu\text{m}$)观测图像,图 2(b)为通道 21 ($4.05\ \mu\text{m}$)观测图像。比较可知,通道 20 对地视图的孤岛面积远大于通道 21,且其向通道 21 图像所在位置扩展。图 3 为 MERSI-II 于 2019-03-18T04:45

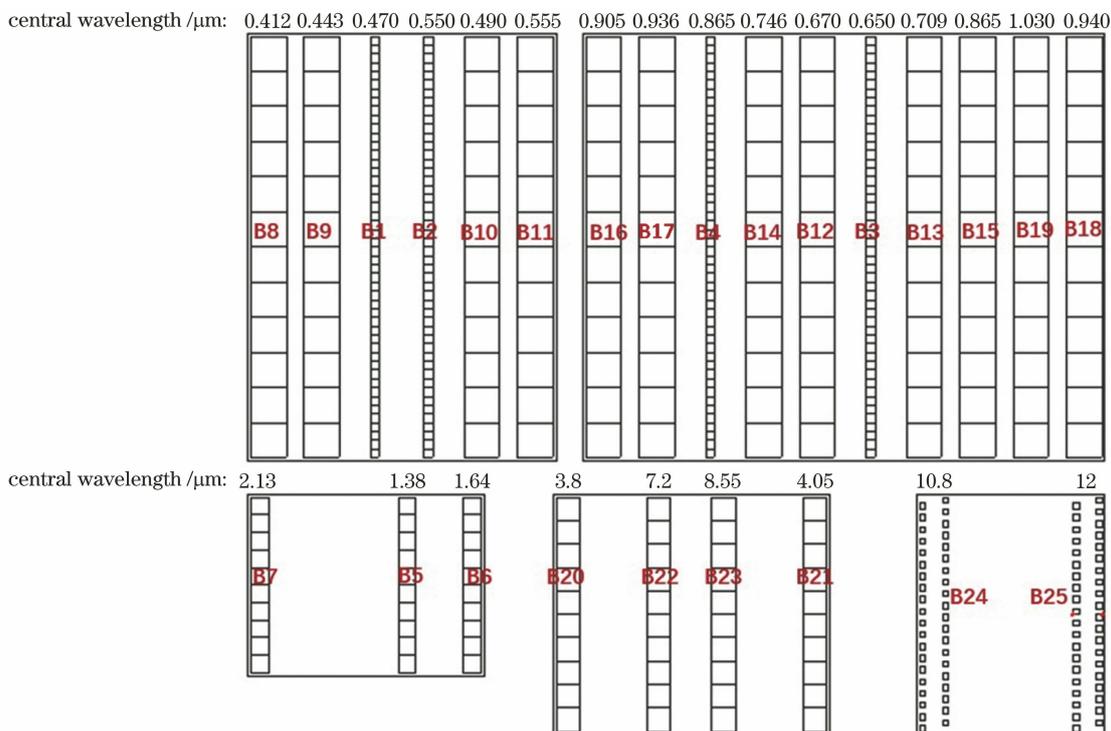


图 1 MERSI-II 焦平面

Fig. 1 Focal plane of MERSI-II

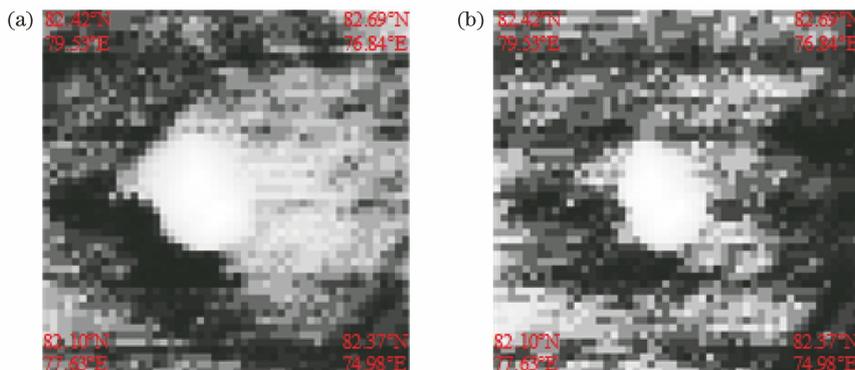


图 2 极地孤岛 MERSI-II 对地观测图像均衡增强示意图(2019 年 7 月 18 日)。(a)通道 20;(b)通道 21

Fig. 2 Polar island images of earth observed by MERSI-II with equalization enhancement (2019-07-18).

(a) Band 20; (b) band 21

火点目标(72.54°N, 79.03°E)通道 20 和通道 21 对地观测高斯增强示意图。相对通道 20, 通道 21 对弱火更为敏感, 因此它对火区的成像范围应该更大。但是, 与图 2 的极地孤岛类似, 图 3 显示通道 20 观测的火点目标面积大于通道 21, 其向通道 21 图像所在位置扩展。上述实例均显示, 相较通道 21, MERSI-II 通道 20 的图像呈现单侧扩展的趋势, 扩展方向为同一焦平面其他通道方向, 而另一侧两幅图像位置几乎重合。这表明在 MERSI-II 对地视图的暗背景像素点上出现了其他通道的目标响应, 即伪像的情况。这一现象主要是由通道间信号串扰污

染引起的, 同时也必将对观测数据精度和可靠性产生严重影响。

图 4 为 MERSI-II 极地孤岛的对地观测图像高斯增强示意图。图 4(a) 在极地孤岛图像附近, 沿扫描方向在一定范围内出现了明显差异的背景, 左侧响应值较低, 右侧响应值较高, 且在垂直方向上出现明显的边界线, 而图 4(b) 的孤岛图像周围背景十分均匀。该现象与图 2、3 有明显区别, 是另一种类型的信号串扰。该串扰来源于同一通道其他探元, 对地图像受到严重的干扰, 数据受到严重污染。

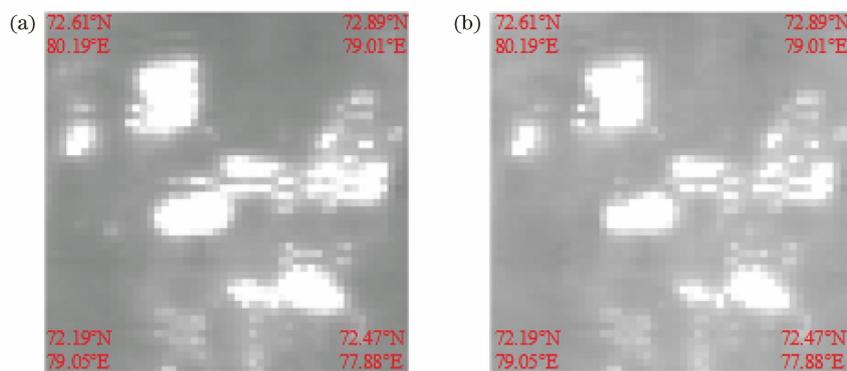


图 3 火点目标 MERSI-II 对地观测图像高斯增强示意图(2019 年 3 月 18 日)。(a)通道 20;(b)通道 21
Fig. 3 Fire point target images of earth observed by MERSI-II with Gaussian enhancement (2019-03-18).
(a) Band 20; (b) band 21

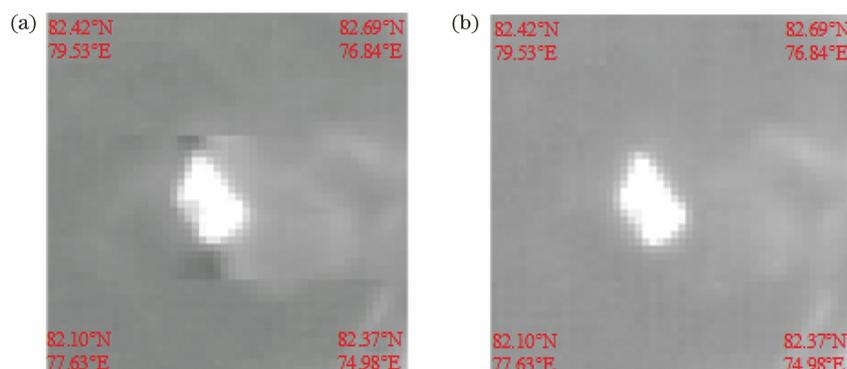


图 4 极地孤岛 MERSI-II 对地观测图像高斯增强示意图(2019 年 7 月 18 日)。(a)通道 6;(b)通道 7
Fig. 4 Polar island images of earth observed by MERSI-II with Gaussian enhancement (2019-07-18).
(a) Band 6; (b) band 7

2.2 月球视图图像

月球具有反射特性稳定、亮度低的特点,常作为星载成像仪的低亮度的辐射定标基准源^[18]。MERSI 可以通过其冷空视场观测到完整的月球图像。在 MERSI 冷空视场中,月球近似为点光源,与冷空背景温度差异十分明显,能良好地检测在轨信号串扰。利用 MERSI-II 单探元多帧扫描图像获得的月球全圆盘图像是检测在轨信号串扰的一种有效方法^[18-20]。

MERSI-II 可以通过两种方式获得月球全圆盘图像。一是利用多探元一次扫描获得完整的月球图像,二是利用单探元逐帧多次扫描获取完整的月球图像。由于多探元之间可能存在非一致性的响应问题,需要后续进行探元响应归一化订正,故本文采用单探元多次扫描的方式获取月球图像。MERSI-II 在在轨飞行过程中对月球进行周期成像,每个周期内特定探元对月球表面不同区域进行成像。选择某特定通道特定探元,通过筛选和提取其周期性月球扫描图像,可以获得完整的月球图像。评估冷空背

景响应灰度(DN)值,能够获得去除探元噪声的月球三维直方图和伪彩色图。以探元 5 为例,图 5 和图 6 显示了短波红外通道 5、6 和中长波红外通道 21、23 的月球三维直方图(左)和伪彩色图(右),最大 DN 值限为 200。经过分析发现,在这几个波段的月球图像上均出现“伪像”,它们对应两种不同类型的串扰现象。在短波红外焦平面上,月球相对较亮,信号响应明显高于暗背景。在没有电子串扰的情况下,月球响应周围为均匀的冷空背景。在通道 5 和通道 6 的卫星飞行方向均出现负值凹陷,如图 5 所示,这表明两个通道存在信号串扰且该串扰属于同一类型,即来自于同一通道的其他探元响应,将这种串扰类型定义为探元间串扰。通常情况下,这种现象主要是由电子串扰引起的^[10]。

图 6 为 2017 年 12 月 26 日中长波红外焦平面单探元多帧扫描冷空月球图像。在中长波红外波段,月球通常情况下为热目标,温度高于或接近饱和值。在通道 21 冷空视图中,月球的右侧冷空区域出现一个小的凸峰;而在通道 23 的观测图像中,在月

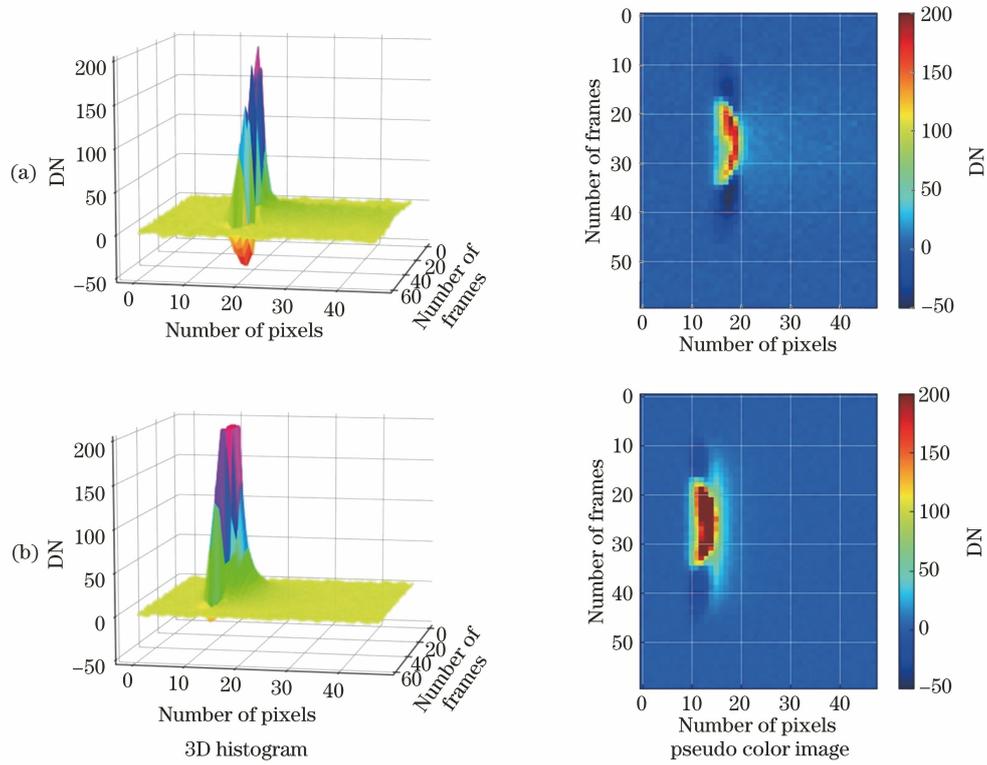


图 5 短波红外焦平面单探元多帧扫描冷空月球图像(2017年12月26日)。(a)通道5探元5;(b)通道6探元5
 Fig. 5 Lunar images obtained by single-detector multi-frame scanning in short-wave infrared focal plane (2017-12-26).
 (a) Band 5 detector 5; (b) band 6 detector 5

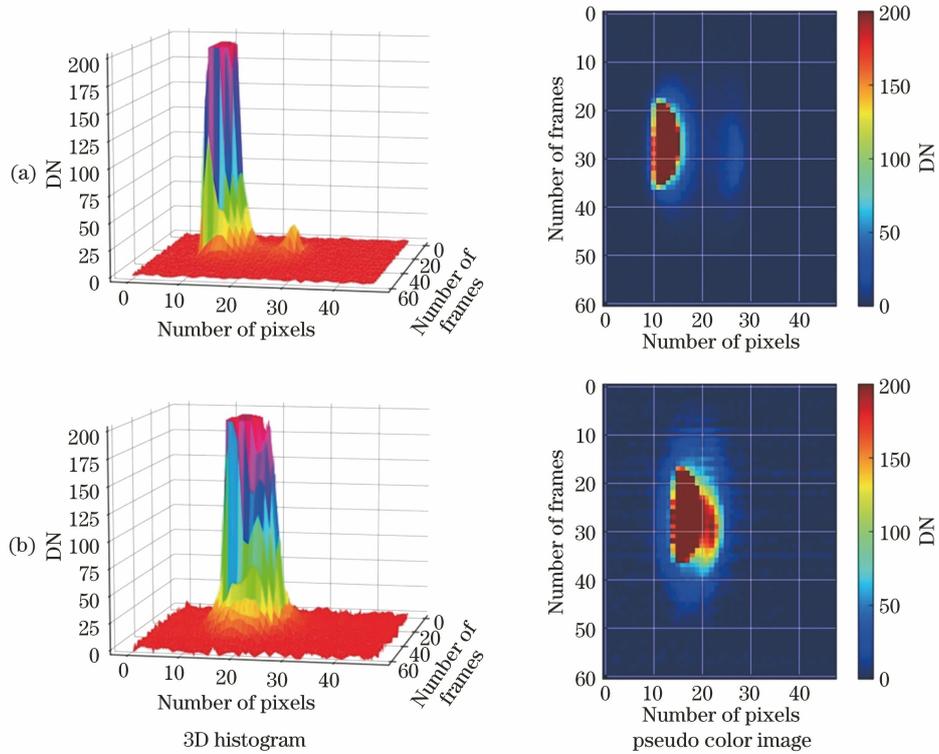


图 6 中长波红外焦平面单探元多帧扫描冷空月球图像(2017年12月26日)。(a)通道21探元5;(b)通道23探元5
 Fig. 6 Lunar images obtained by single-detector multi-frame scanning in mid and long wave infrared focal plane
 (2017-12-26). (a) Band 21 detector 5; (b) band 23 detector 5

球的右侧冷空区域出现一个较大的凸峰,且该凸峰与真实的月球图像重叠。这些凸峰无疑是信号串扰引起的,其位于月球响应扫描方向。两个通道的串扰属于同一类型,即来自于相邻频带的其他通道探元,将这种串扰定义为通道间串扰。这种串扰产生的原因比较复杂,通常是光学串扰和电子串扰综合作用造成的^[10]。

为了定量表示和分析信号串扰对各通道的串扰,信号串扰对各通道的影响权重 C 可表示为

$$C = \frac{X_{\text{ctalk,max}}}{X_{\text{moon,max}}}, \quad (1)$$

表 1 MERSI-II 所有通道串扰检测结果

Table 1 Crosstalk detection results of all bands of MERSI-II

Wavelength range	Band	Wavelength / μm	Source of crosstalk	Crosstalk proportion
Visible (VIS)	1	0.470	No	
	2	0.550	No	
	3	0.650	No	
	4	0.865	No	
Short-wave infrared (SWIR)	5	1.380	From detectors	25%–40%
	6	1.640	From detectors	7%–20%
	7	2.130	No	
	8 (det1)	0.412	From detectors	3%–4%
Visible and near-infrared (VNIR)	9	0.443	No	
	10	0.490	No	
	11	0.555	No	
	12	0.670	No	
	13	0.709	No	
	14	0.746	No	
	15	0.865	No	
	16	0.905	No	
	17	0.936	No	
	18	0.940	No	
	19	1.030	No	
Mid and long wave infrared (MLWIR)	20	3.800	From bands	1.3%–3%
	21	4.050	From bands	1.2%–1.7%
	22	7.200	From bands	Saturation
	23	8.550	From bands	3.5%–5%
Long-wave infrared (LWIR)	24	10.800	From bands	1.5%–2.5%
	25	12.000	From bands	0%–1%

式中: $X_{\text{ctalk,max}}$ 为串扰响应的最大幅值; $X_{\text{moon,max}}$ 为月球响应的最大幅值。

按照以上方式,遍历多个冷空月球图像,总结分析各通道串扰现象与规律,结果如表 1 所示。由于通道 22 探测器响应饱和,因此无法对该通道串扰权重进行统计。在 MERSI-II 的焦平面中,短波红外焦平面、中长波红外焦平面及长波红外焦平面受到程度不一的串扰影响,以短波红外焦平面和中长波红外焦平面最为严重,其中通道 5 的串扰权重可达 40%。根据信号串扰的定义,通道 5 和通道 6 属于探元间串扰,通道 20~25 属于通道间串扰。

3 串扰订正算法

月球近似为一个点光源,与冷空背景有着明显的成像差异。利用这一特性,一种基于线性近似的串扰订正算法得到了广泛应用。通过冷空月球图像分析和计算特定通道的串扰信号分布和串扰系数,并将串扰系数应用于月球图像和对地图像以去除串扰对信号的影响。

3.1 串扰订正算法

假设某一探元产生的串扰污染信号与探元自身响应值(减去了冷空背景)呈线性关系,某一通道某一探元受到的电子串扰污染近似为各个探元串扰贡献的线性之和。因此对串扰接收通道 B_k 探元 D_l 而言,来自同一焦平面的其他通道 B_m 探元 D_n 的串扰污染信号可以表示为

$$\sum_{B_m} \left[\sum_{D_n} c(B_k, D_l, B_m, D_n) \times d_{B_m, D_n}^{\text{msr}}(P, F) \right] = d_{B_k, D_l}^{\text{stalk}}(P, F), \quad (2)$$

式中: B_k 、 D_l 分别为串扰接收通道和探元; B_m 、 D_n 分别为串扰来源通道和探元; k 、 m 分别为串扰接收通道和来源通道序号; l 、 n 分别为串扰接收探元和

来源探元序号; $d_{B_m, D_n}^{\text{msr}}$ 为通道 B_m 探元 D_n 减去背景后的探元响应 DN 值; $d_{B_k, D_l}^{\text{stalk}}$ 为通道 B_k 探元 D_l 去除背景之后的串扰污染信号; $c(B_k, D_l, B_m, D_n)$ 为串扰系数,只与通道和探元有关; P 为沿着扫描方向的像素; F 为扫描次数。需要注意的是,电子串扰只来自于同一焦平面的其他探元。

移除串扰污染信号之后的接收探元响应可以表示为

$$d_{B_k, D_l}(P, F) = d_{B_k, D_l}^{\text{msr}}(P, F) - d_{B_k, D_l}^{\text{stalk}}(P, F), \quad (3)$$

式中: $d_{B_k, D_l}^{\text{msr}}(P, F)$ 是通道 B_k 探元 D_l 测量得到的探元响应。

综合利用(2)、(3)式,即可得到去除串扰污染的探元响应。但在这两个方程中还存在着唯一的未知数,即串扰系数 $c(B_k, D_l, B_m, D_n)$ 。串扰系数对线性订正算法有着重大影响,其数值将直接影响订正结果。

由于月球和周围差异明显,除了月球响应部分,周围均为冷空背景。在对所有信号进行冷空背景剔除时,月球边缘和冷空部分的 DN 值原则上应处于 0 附近。所以将(2)、(3)式联立得

$$d_{B_k, D_l}(P, F) = d_{B_k, D_l}^{\text{msr}}(P, F) - \sum_{B_m} \left[\sum_{D_n} c(B_k, D_l, B_m, D_n) \times d_{B_m, D_n}^{\text{msr}}(P, F) \right]. \quad (4)$$

令(4)式等号左侧为 0,利用最小二乘拟合函数求解串扰系数。对于通道间串扰的情况,串扰污染信号主要出现在冷空背景中,所以可以将冷空背景的信号作为月球响应和串扰污染信号的总和,即冷空没有受到串扰污染时信号为 0。在月球边缘和冷空部分,存在的信号异常部分(凸起或者凹陷)即为受到的串扰污染信号。若存在多个串扰发射通道,则根据串扰位置和通道月球图像焦平面排布位置进行逐通道分离。对于探元间串扰的情况,探元之间距离较小,而月球图像占据的面积比较大,串扰污染信号对月球本身信号具有很大的影响,所以为了计算串扰系数,首先需要假设一个没有受到电子串扰污染的参考信号,再以该参考信号和实际探元探测到的 DN 值之差作为串扰污染信号。

焦平面上各通道每个探元均有对应的串扰系数。显然,逐个求解探元串扰系数十分繁琐,因此将步骤简化,以一个通道的形式求解发射通道所有探元的串扰系数。利用最小二乘拟合来计算串扰系数 $c(B_k, D_l, B_m, D_n)$ 时,对于发射通道 B_m (或自身通道),最小二乘拟合的最优解判断条件为

$$\delta_m^2 = \left[d_{B_k, D_l}^{\text{msr}}(P, F) - d_{B_k, D_l}^{\text{ref}}(P, F) - \sum_{n=1}^N c(B_k, D_l, B_m, D_n) \times d_{B_m, D_n}^{\text{msr}}(P, F) \right]^2, \quad (5)$$

式中: $d_{B_k, D_l}^{\text{ref}}(P, F)$ 为通道 B_k 探元 D_l 去除背景之后的参考信号。当串扰为通道间串扰时, $N=10$;当串扰为探元间串扰时, $N=9$ 。

3.2 串扰系数计算

3.2.1 通道间串扰

串扰类型属于通道间串扰时,各通道月球图像的焦平面排布位置对串扰的分析尤为重要。图7(a)为 2017 年 12 月 26 日通道 20 探元 5 的月球响应示意图,图 7(b)为相对应的中长波红外焦平面所有通道月球响应的焦平面排布位置示意图。可以发现,通道 20 的串扰污染信号由通道 21, 22, 23 共同引起,几个通道的串扰贡献互有重叠,对应图 7(a)中冷空部分(除去背景噪声后)不为 0 的凸起或凹陷,所以分离得到各通道的单独贡献的串扰污染信号是串扰系数计算的重要前提。

对于通道间串扰类型,串扰系数计算可由串扰

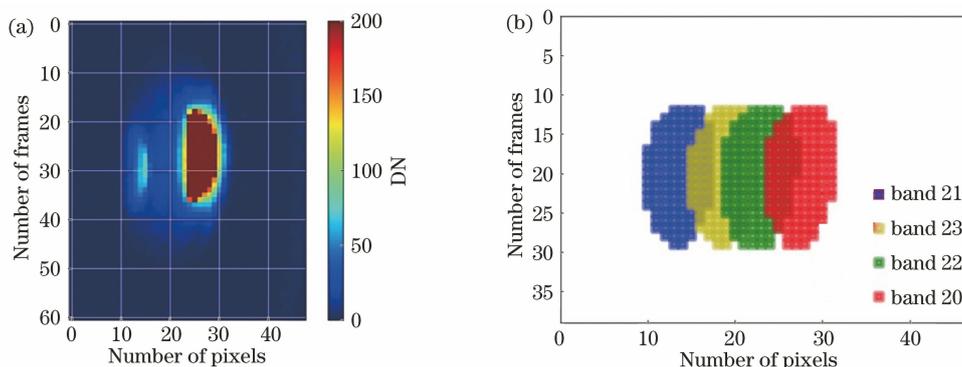


图 7 中长波红外焦平面通道间串扰示意图。(a)通道 20 探元 5 月球响应伪彩色图像;(b)各通道月球排布示意图
Fig. 7 Schematic of crosstalk from bands in mid and long wave infrared focal plane. (a) Lunar pseudo-color image of band 20 detector 5; (b) schematic of the lunar arrangement of each band

接收通道确定、串扰发射通道确定、通道串扰分离、串扰系数计算、串扰计算、通道串扰去除 6 个步骤组成。

1) 串扰接收通道确定:分析焦平面各通道排布位置,选定一个通道的某个探元分析;

2) 串扰发射通道确定:确定串扰发射通道月球响应位置及对应的串扰污染信号范围;

3) 通道串扰分离:根据发射通道月球位置,对污染通道的串扰信号进行通道分离,由远到近,率先得到与污染通道相距最远的发射通道提供的串扰信号范围;

4) 串扰系数计算:在所确定的串扰信号范围内,利用串扰订正(4)式和最小二乘拟合条件(5)式计算发射通道 10 个探元的串扰系数;

5) 串扰计算:利用(2)式将串扰系数应用到该发射通道所有像素,得到该通道在所有像素点产生的串扰污染信号;

6) 通道串扰去除:利用(3)式得到余下的其他发射通道提供的串扰污染信号。

对所有发射通道重复步骤 3)~6),即可得到所有发射通道的串扰系数。

以中长波红外焦平面通道 20 探元 5 作为接收通道分析,先确定距离其最远的通道 21 单独贡献的串扰范围,计算串扰系数;通过串扰系数去除信号中通道 21 的串扰贡献,剩余串扰污染信号即为通道 22 和通道 23 共同的贡献。重复上述步骤,由远至近依次计算通道 23 和 22 的串扰系数,串扰发射通道各探元的串扰系数如表 2 所示。

表 2 通道 20 探元 5 串扰系数汇总(2017 年 12 月 26 日)

Table 2 Crosstalk coefficient summary of band 20 detector 5 (2017-12-26)

Detector	Band 21	Band 23	Band 22
Det1	0.00105634	$1.22514515 \times 10^{-3}$	0.00086126
Det2	0.00544265	$3.43000244 \times 10^{-4}$	0.00128618
Det3	0.00217129	$1.09546923 \times 10^{-3}$	0.00149434
Det4	0.00365741	$6.22984547 \times 10^{-5}$	0.00100561
Det5	-0.00042805	$5.82319004 \times 10^{-4}$	0.00124892
Det6	0.02883502	$2.74452948 \times 10^{-4}$	0.00197744
Det7	0.00882859	$1.02648869 \times 10^{-3}$	0.00065176
Det8	0.00263379	$7.59549995 \times 10^{-4}$	0.00150834
Det9	0.00177946	$6.57615186 \times 10^{-4}$	0.00068722
Det10	0.00385918	$1.03962834 \times 10^{-3}$	0.00109455

3.2.2 探元间串扰

串扰类型属于探元间串扰时,电子串扰仅受同一通道其他探元影响,如短波红外焦平面通道 5 和

通道 6。其串扰系数计算与通道间串扰略有不同,包括 1)串扰接收探元确定、2)串扰发射探元确定、3)参考信号确定、4)串扰系数计算、5)串扰计算、6)

通道串扰去除 6 个步骤。

步骤 3) 中参考信号是不受电子串扰污染的信号。串扰污染信号不仅使得冷空部分出现凹陷或者凸起,还会影响月球响应值大小,因此在串扰系数求解过程中,不受串扰污染的参考信号的获得尤为重要。因此,这里在假设短波红外焦平面各通道相同序号探元响应度关系一致的基础上获得参考信号,即利用短波红外焦平面不受串扰污染的通道 7 各探元响应与通道 5(或 6)响应的缩放关系计算对应的参考信号。具体而言,即利用同一焦平面通道 7 不受串扰污染的特点和不同探测器排布位置的差异性,选择通道 5(6)探元 1 中不受串扰影响的几个像素的 DN 值与通道 7 探元 1 相应的像素的 DN 值进行最小二乘拟合,得到两个探测器的响应 DN 值的缩放关系,在假设两通道探元响应度关系一致的情况下,利用该缩放系数,得到所需通道所有探测器响应的无污染参考信号。因此,利用所得参考信号和最小二乘拟合方法,就可以获得同一通道其余 9 个探元对串扰接收探元的串扰系数。

4 串扰订正效果评价

由串扰检测结果可知,在短波红外焦平面、中长波红外焦平面及长波红外焦平面上,许多通道受到

严重的电子串扰影响,其冷空视图在非月球区域出现非零的凸起或凹陷,这会加重地球视图图像条纹现象。以中长波红外焦平面通道 20 为例,利用线性串扰订正算法分别对月球图像和对地观测图像进行串扰订正。

将表 2 所示的串扰系数应用于当日的冷空月球图像,其订正效果如图 8 所示,最大 DN 值限为 200。图 8(a)为订正前的月球冷空三维时序图和伪彩色示意图,除月球图像外,其左侧冷空区域出现明显的弧形串扰信号。图 8(b)为经过串扰订正后的结果示意图,左侧的串扰信号被成功移除。将所得的串扰系数应用于其他时间(2018 年 1 月 25 日)观测的月球图像,其结果如图 9 所示,最大 DN 值限为 200。由图 9(a)可见,当日冷空月球图像在左侧冷空区域仍存在串扰信号,并且相较 2017 年 12 月 26 日的观测结果,月球信号及串扰信号的形状、大小均有所差异。利用相同的串扰系数进行串扰订正仍取得了令人满意的结果,如图 9(b)所示,月球左侧冷空区域的串扰信号被成功移除,串扰订正取得了很好的效果。

上述结果表明,线性近似串扰订正算法能够实现 MERSI-II 长波红外焦平面通道 20 串扰效应的有效订正,虽然不同时间月相差异使得月球成像大

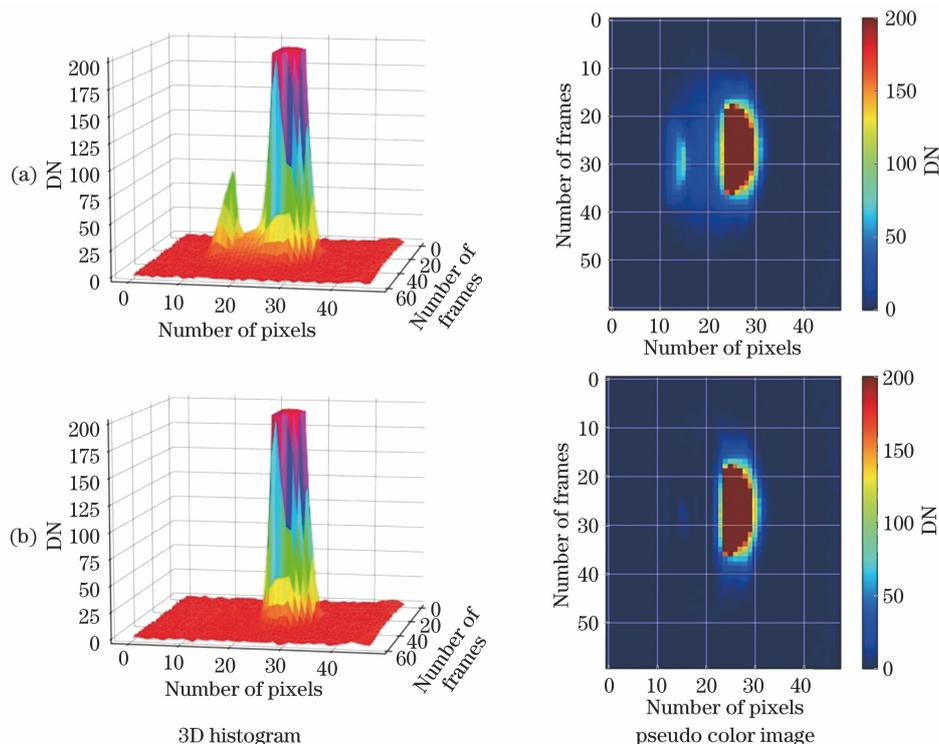


图 8 通道 20 串扰订正前后月球图像(2017 年 12 月 26 日)。(a)未订正;(b)已订正

Fig. 8 Lunar images of band 20 before and after crosstalk correction (2017-12-26).

(a) Without correction; (b) with correction

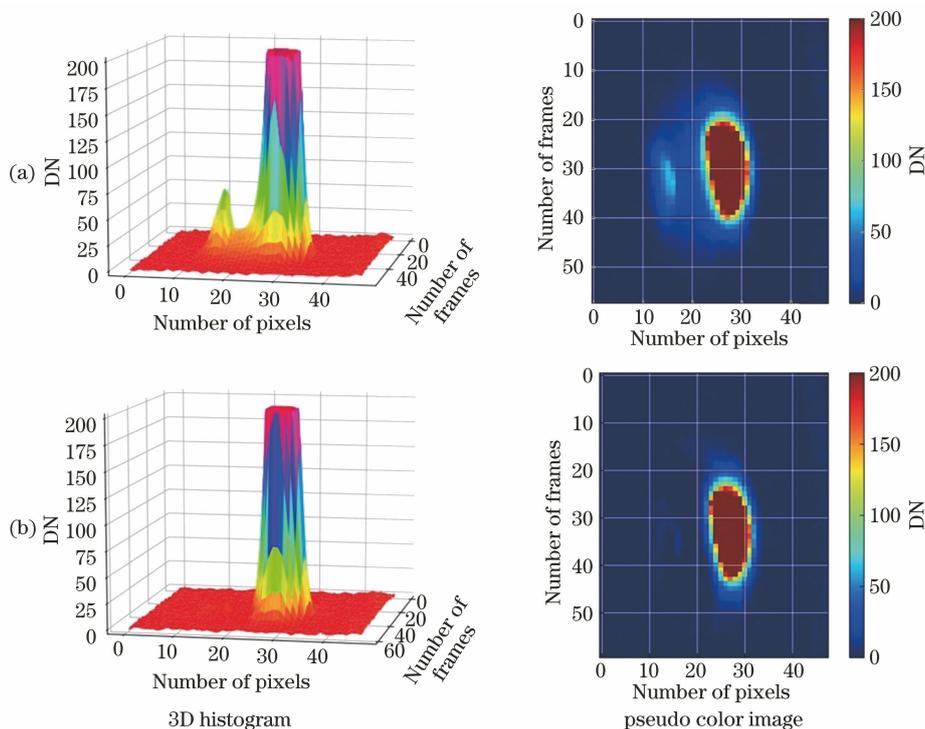


图 9 通道 20 串扰订正前后月球图像(2018 年 1 月 25 日)。(a)未订正; (b)已订正
Fig. 9 Lunar image of band 20 before and after crosstalk correction (2018-01-25).

(a) Without correction; (b) with correction

小和强度不同,但是利用相同的订正系数可以有效移除串扰信号的影响。

将串扰订正系数应用于原始对地观测图像,如图 10 所示。在蓝色海洋区域,经过串扰订正之后,图像的条纹显著减少,图像质量得到改善。因此,串

扰订正算法在对地观测图像上也取得了一定的效果,对地球观测图像的数据质量提升具有一定意义。然而,由于探测器自身响应差异等因素,图像的条纹并没有完全消除。

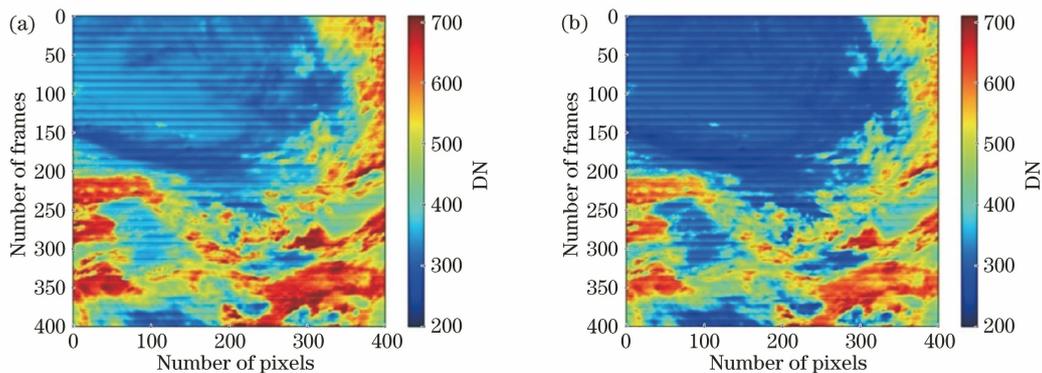


图 10 通道 20 串扰订正前后地球图像(2018 年 1 月 29 日)。(a)未订正; (b)已订正
Fig. 10 Earth images of band 20 before and after crosstalk correction (2018-01-29).

(a) Without correction; (b) with correction

5 结 论

针对 FY-3D MRESI-II 对地视图图像存在的条纹和“伪像”现象,对各通道进行了信号串扰效应研究。基于 MERSI-II 在轨成像原理和焦平面通道排

布规律,利用冷空月球图像的成像特点,对各个焦平面进行串扰在轨检测,并且系统地评估了各焦平面所有通道的信号串扰规律及串扰影响权重。同时,通过线性近似的串扰订正算法以及冷空月球图像计算同一焦平面各通道探元的串扰系数,并将其应用

于不同时间段的冷空月球图像。

利用对地对月的数据,可以发现部分通道与同一焦平面其他通道存在显著差异,具体表现为在飞行方向或扫描方向上存在“伪像”和严重的条纹现象。通过检测 MERSI-II 各焦平面通道的串扰,发现 MERSI-II 短波红外、中长波红外及长波红外焦平面均存在较为显著的串扰现象。短波红外焦平面通道 5($1.36\ \mu\text{m}$)和通道 6($1.64\ \mu\text{m}$)受串扰影响最为严重,串扰权重最大可达 40%,中长波红外焦平面通道 20,21,22,23($3.8\sim 8.55\ \mu\text{m}$)次之,串扰权重在 5%以下,可见-近红外波段的串扰最弱,可以忽略。根据探测原理的不同,MERSI-II 的信号串扰分为通道间串扰、探元间串扰两种类型。短波红外焦平面属于探元间串扰,主要由同一通道其他探元引起,中长波红外焦平面和长波红外焦平面属于通道间串扰,主要由同一焦平面其他通道探元引起。针对中长波红外焦平面通道 20,利用月球冷空视图和线性近似算法计算了串扰系数,并将其分别用于当天和其他时间的月球图像进行串扰信号订正。结果显示,虽然不同时间由于月相差异,月球成像大小和强度不同,但是利用相同的订正系数可以有效移除串扰信号,说明串扰订正算法具有很好的普适性。此外,将串扰订正系数应用于地球观测图像,图像的条纹现象得到了一定程度的改善,这表明串扰订正算法在实际地球图像中仍能起到很好的作用。

对 FY-3D MERSI-II 的信号串扰影响进行了全面分析并进行了初步的订正,这对数据精度的提高和图像质量的提升具有重要意义。然而,由于对地视图图像的条纹问题十分复杂,串扰只是加重条纹的原因之一,要想彻底消除,还需要更全面的研究。同时,对 MERSI-II 串扰效应长时间的变化规律和订正效果还需要进行更加深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xu N, Wu R H, Hu X Q, et al. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228001.
- [3] Xu N, Niu X H, Hu X Q, et al. Prelaunch calibration and radiometric performance of the advanced MERSI II on FengYun-3D [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(8): 4866-4875.
- [4] Guo L L, Wu Z P, Zhao Q C, et al. On-orbit modulation transfer function measurement of medium resolution spectral imager [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0428002.
郭玲玲, 吴泽鹏, 赵其昌, 等. 中分辨率光谱成像仪在轨调制传递函数测量方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0428002.
- [5] Fan A X, Xu N, Xu T F, et al. Identification and normalization of image gain of FY-3A MERSI shortwave infrared bands [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1111001.
樊阿馨, 徐娜, 许廷发, 等. FY-3A MERSI 短波红外通道图像增益突跳自动识别和归一 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1111001.
- [6] 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.
- [7] Jin G. The crosstalk in multi-channel system [J]. Electronic Measurement Technology, 1999, 22(1): 1-3.
金革. 多通道系统中的信号串扰现象 [J]. 电子测量技术, 1999, 22(1): 1-3.
- [8] Sun J, Xiong X, Che N, et al. Terra MODIS band 2 electronic crosstalk: cause, impact, and mitigation [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7826: 78261Y.
- [9] Xiong X X, Sun J Q, Chiang K, et al. MODIS on-orbit characterization using the Moon [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4881: 299-307.
- [10] Sun J Q, Wang M H. Crosstalk effect in SNPP VIIRS [J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 344.
- [11] Sun J, Madhavan S, Wenny B N, et al. Terra MODIS band 27 electronic crosstalk: cause, impact, and mitigation [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8176: 81760Z.
- [12] Sun J Q, Xiong X, Madhavan S, et al. Terra MODIS band 27 electronic crosstalk effect and its removal [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(3): 1551-1561.
- [13] Sun J Q, Madhavan S, Xiong X X, et al. Investigation of the electronic crosstalk in terra MODIS band 28 [J]. IEEE Transactions on

- Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53 (10): 5722-5733.
- [14] Sun J Q, Madhavan S, Xiong X X, et al. Long-term drift induced by the electronic crosstalk in Terra MODIS Band 29 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120 (19): 9944-9954.
- [15] Sun J Q, Xiong X X, Li Y H, et al. Evaluation of radiometric improvements with electronic crosstalk correction for terra MODIS band 27 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6497-6507.
- [16] Sun J Q, Madhavan S, Wang M H. Investigation and mitigation of the crosstalk effect in terra MODIS band 30[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 249.
- [17] Wilson T, Wu A S, Shrestha A, et al. Development and implementation of an electronic crosstalk correction for bands 27-30 in terra MODIS collection 6[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 569.
- [18] Wu R H, Zhang P, Zheng X B, et al. Data collection and irradiance conversion of lunar observation for MERSI[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1819-1827.
- 吴荣华, 张鹏, 郑小兵, 等. 星载成像仪观月数据提取和辐照度转换方法研究 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1819-1827.
- [19] Sun J Q, Xiong X X, Barnes W L, et al. MODIS reflective solar bands on-orbit Lunar calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 2383-2393.
- [20] Sun J, Xiong X, Butler J. NPP VIIRS on-orbit calibration and characterization using the moon [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8510: 85101I.