

风云三号黎明星微光探测及应用综述

胡秀清^{1,2}, 徐寒列^{1,2*}, 雷松涛³, 王玲^{1,2}, 于天雷^{1,2}, 王阳³, 高宇⁵, 胡申森⁴,
徐娜^{1,2}, 陈林^{1,2}, 严卫⁴, 孙凌^{1,2}, 丁雷³, 张鹏^{1,2}

¹ 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, 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

² 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

³ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

⁴ 国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073;

⁵ 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 在综述国内外几个典型星载微光遥感仪器的基础上, 详细介绍了风云三号晨昏轨道黎明星(FY-3E)所搭载的中分辨率光谱成像仪微光型(MERSI-LL)的设计原理和部件组成, MERSI-LL 微光通道针对晨昏轨道对地观测辐射信号大动态范围的特点, 采用三增益组合的特殊设计, 并基于太阳漫透板的工作原理设计了 MERSI-LL 的星上定标器。介绍了微光通道数据三增益通道选择和归一化融合处理方法和流程, 并综述了针对微光通道的星上定标、替代定标、地面人工光源定标和交叉定标等多种定标手段。简要概述了 MERSI-LL 具备的定量科学产品反演能力, 示范了基于 MERSI-LL 观测数据生成的准恒定对比度(NCC)图像产品, 重点描述微光通道的典型夜间灯光产品生成过程, 给出其产品示例及其潜在的应用能力。最后在总结黎明星 MERSI-LL 微光通道数据处理和产品生成经验的基础上, 展望了该仪器未来的改进思路和应用前景。

关键词 大气光学; 黎明星; 微光探测; 辐射定标; 城市灯光

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1200003

Overview of Low Light Detection and Application of FY-3 Early Morning Satellite

Hu Xiuqing^{1,2}, Xu Hanlie^{1,2*}, Lei Songtao³, Wang Ling^{1,2}, Yu Tianlei^{1,2},
Wang Yang³, Gao Yu⁵, Hu Shensen⁴, Xu Na^{1,2}, Chen Lin^{1,2},
Yan Wei⁴, Sun Ling^{1,2}, Ding Lei³, Zhang Peng^{1,2}

¹ Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

² Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

³ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

⁴ College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

⁵ Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-05-12

基金项目: 国家重点研发课题(2018YFB0504900, 2018YFB0504901)、国家自然科学基金(41871249)、风云卫星应用先行计划(FY-APP-2021.0509)

通信作者: *xuhanlie@cma.gov.cn

Abstract Throughout the review of several typical space-borne low-light remote sensing devices onboard the domestic and international satellites, this paper introduces the design principle and components of the Medium Resolution Spectral Imager-Low Light (MERSI-LL) onboard FY-3E. It describes the special three gain combination design of MERSI-LL low-light band (LLB) for the characteristic of large dynamic range of radiance signals on the twilight orbit. The working principle of the MERSI-LL onboard calibrator based on solar diffusing/transmission board is described in detail. In this paper, the selection of three gain channels and normalized fusion processing methods are given, and processing procedures of low-light channel data are introduced. The paper summarizes the several calibration methods for LLB including on-board calibration, vicarious calibration, ground-based artificial light source calibration, and cross calibration. The quantitative scientific product retrieval capability of MERSI-LL is briefly summarized, and the near-constant contrast (NCC) image products generated based on MERSI-LL observation data are displayed. The generation process of typical nighttime light products from LLB is mainly described. Examples of its products and potential applications are given. Finally, based on the lessons of data processing and product generation of Early morning Satellite MERSI-LL LLB, the future improvement ideas and application perspectives of the instrument are discussed.

Key words atmosphere optics; early morning satellite; low light detection; radiometric calibration; nighttime lights

1 引言

风云三号是我国第二代极轨气象卫星序列,首发星风云三号 A 星(FY-3A)于 2008 年成功发射,目前已经发射了 FY-3A、风云三号 B 星(FY-3B)、风云三号 C 星(FY-3C)、风云三号 D 星(FY-3D)和风云三号 E 星(FY-3E) 5 颗卫星,实现了技术升级换代和黎明、上午、下午三星组网观测。风云三号极轨气象卫星的首要任务是为数值天气预报模式提供全球观测资料,改善初始场,提高预报时效和精度。风云三号具备大幅宽(2800 km)百米量级空间分辨率多光谱成像能力,通过紫外、可见光、红外和微波的全波段和主被动联合探测,实现了对全球天气、气候、生态环境和自然灾害的综合遥感。风云极轨气象卫星已经实现系列化发展、业务化运行,完全实现了从试验应用型向业务服务型的转变。风云三号序列卫星已经进入第三个批次,03 批卫星包含 4 颗卫星,按照晨昏、上午、下午三颗近极地太阳同步轨道卫星和一颗倾斜轨道降水测量卫星布局。

FY-3E 是风云三号 03 批的首发星,于 2021 年 7 月 5 日发射成功,也是全球首颗太阳同步晨昏轨道民用业务气象卫星,卫星设计寿命为 8 a, FY-3E 与在轨的风云三号上午、下午卫星联合轨道布局进行三星组网,可以实现每 6 h 全球资料完全覆盖,满足数值天气预报 6 h 同化窗口的要求,提高预报精度和时效。FY-3E 星上 11 台遥感仪器可以测量三维大气、洋面风场、夜间微光、太阳和电离层等多种要素,综合提升对天气、气候、大气环境和空间天气的监测分析能力,将在气象预报预测、气候变化应对、气象防灾减灾、生态文明建设、空间天气预报预

警等领域发挥重要作用。

中分辨率光谱成像仪微光型(MERSI-LL)是搭载于晨昏轨道卫星 FY-3E 上的重要光学成像仪器,通过对微光和红外波段多光谱的连续综合观测,实现云、水汽、陆表等地气特征参量的高精度定量反演。MERSI-LL 具备晨昏轨道上的微光和红外探测能力,共设置 7 个通道,包括 1 个微光通道(含 3 个增益)和 6 个热红外通道,同时搭载了 1 个短波红外 1.24 μm 试验通道,其中 2 个红外分裂窗通道的空间分辨率为 250 m,其余通道的空间分辨率为 1000 m。MERSI-LL 的红外通道继承了 FY-3D/MERSI-II 的全部红外通道设置,考虑到晨昏轨道弱光照射条件,太阳反射波段只设置一个全色 400 nm 带宽的微光通道,其可获取晨昏和夜间的可见光谱段地球场景弱光图像,可实现晨昏线附近大动态跨度的可见光成像和定量遥感应用,这是我国风云气象卫星首次实现微光遥感业务观测能力。

世界上第一颗具有微光探测能力的卫星是美国 20 世纪 70 年代发射的国防气象卫星(DMSP),该系列卫星(F10-F18)上搭载的业务线扫描系统(OLS)能够在夜间微光条件下获取可见光、近红外通道的探测数据和城市灯光产品,数据和产品发布一直持续到现在^[1]。利用 OLS 的夜间微光探测数据可探测夜间火灾^[2]、闪电^[3]、极光^[4]、城市灯光^[1]等,在月光照明条件良好的情况下还可以探测雪盖、海冰等地表特征^[5]。OLS 的微光通道数据仅为 6 bit 的量化等级,导致数据出现大面积的饱和,没有星上定标和较低的空间分辨率限制了其数据定量应用。2011 年 10 月发射的美国国家极轨合作伙伴卫星(NPP)搭载了新一代微光遥感探测仪器 VIIRS(Visible/

Infrared Imaging Radiometer Suite), VIIRS 共有 22 个光谱波段(0.4~12 μm),其中一个为白天夜间(DNB)通道,这个通道是对 OLS 微光通道的继承与发展,其空间分辨率为 750 m^[6]。DNB 通道采用了 CCD 面阵和扫描时间延迟积分(TDI)模式实现微光成像^[7]。相较于 OLS, DNB 通道有较高的空间分辨率和精确的辐射定标,而且像元饱和概率大大降低,观测信号覆盖了从白天太阳光照条件到夜间 1/4 月相光照条件的场景变化^[8],这促进了微光遥感定量应用的快速发展。它的三个增益设置(低、中和高)能够检测约 7 个数量级的辐射动态范围^[9]。

2006 年发射的以色列 EROS-B 商业卫星于 2013 年开始公开提供夜间观测服务^[10]。2018 年 6 月发射的珞珈一号(LJ-1 01)卫星是专门针对夜光

遥感的微型试验卫星,装载大视场高灵敏夜光遥感相机,具备 130 m 分辨率、260 km 幅宽的夜光成像能力,完成了中国夜光一张图的成像^[11]。2021 年 11 月发射的可持续发展科学卫星 1 号(SDGSAT-1)搭载了微光成像仪,通过探测夜间灯光进行可持续发展目标的监测与评估,SDGSAT-1 微光成像仪设有 1 个全色波段和 3 个彩色波段,对应的空间分辨率分别为 10 m 和 40 m,实现了彩色微光探测模式^[12]。另外,国际空间站(ISS)的宇航员会用相机拍摄地球夜间照片,并且 ISS 上搭载的一些仪器也可以探测夜间地球图像,这些来自 ISS 的图像是独特的夜光遥感观测数据集,LSO 观测(闪电和精灵闪电观测)实验能够生成约 100 张城市地区的夜间图像^[13]。表 1 为国内外微光成像卫星和仪器参数汇总。

表 1 国内外微光成像卫星和仪器参数汇总

Table 1 Parameters of domestic and foreign low-light imaging satellites and instrument

Satellite	Country	Sensor	Range of spectral band / nm	Spatial resolution / m	Swath / km	Quantization / bit	Application
DMSP	USA	OLS	400–900	2700	3000	6	Weather monitoring or military reconnaissance, cloud detection, lighting, fire, and other applications
NPP/ JPSS-1	USA	VIIRS/ DNB	500–900	750	3040	14 (HGS); 13 (LGS/ MGS)	Quantitative nighttime data detection, and clouds, fishing boats, and fire detection
International Space Station (ISS)	USA/ Russia	LSO	Lightning: 400–1000; Sprite: 763 (757.6–768.4)	400	~200	10	Lightning detection and city light
EROS-B	Israel	Panchromatic band sensor	500–900	0.7	—	16	Commercial high resolution night data acquisition services
LJ-1 01	China	Nighttime light remote sensing camera	480–800	130	260	12	Highly sensitive detection of night light scenes with large dynamic range
SDGSAT-1	China	Low light imager	450–900 (blue: 430–520; green: 520–615; red: 615–900)	10 (panchromatic); 40 (RGB)	300	12	Sustainable development goal monitoring and evaluation
FY-3E	China	MERSI- LL/LLB	500–900	1000	2500	12	Imaging and quantitative remote sensing applications for large dynamic range

本文主要介绍了风云三号晨昏轨道黎明星所搭载的 MERSI-LL 仪器的设计原理和组成部分,重点

描述了该仪器微光通道的探测特点和星上定标设计,综述了微光通道数据处理方法和定标手段,给出

了 FY-3E 卫星 MERSI-LL 的观测数据特征和产品情况,并综述了微光通道的典型遥感产品,重点介绍了城市灯光产品及其潜在的应用能力,展望了未来的仪器改进思路和应用前景。

2 MERSI-LL 仪器介绍

2.1 仪器设计和指标要求

FY-3E/MERSI-LL 继承了前期 MERSI-II 仪器的主要设计框架,由仪器头部、信息处理器、辐冷器、太阳反射波段星上定标器 4 个部分组成,它的 6 个热红外通道完全继承 FY-3D/MERSI-II 仪器设计,将 MERSI-II 的 19 个太阳反射通道减少为 1 个微光通道,可见光星上定标器根据晨昏轨道光照条件进行全新设计,将经过漫透板的太阳光作为定标源,进行星上定标。MERSI-LL 微光通道于 2021 年 7 月 9 日开机并进行对地观测,获取对地观测微光图像,在太空经过 2 个月排气去污后,红外通道于

2021 年 9 月 7 日开机观测。

MERSI-LL 继承了 MERSI-II 采用多探元探测器并扫技术,10 探元和 40 探元通道对应的空间分辨率分别为 1000 m 和 250 m。MERSI-LL 采用 45°扫描镜加消旋 K 镜系统的光机扫描获取宽幅地物目标辐射,采用分色片及滤光片/探测器组合的方式产生不同的光谱通道,用大冷量的辐射制冷红外探测器,以全孔径、全视场方式进行星上微光通道、中长波红外通道的在轨星上定标。卫星在轨期间 MERSI-LL 连续工作,扫描镜以 40 r/min 的转速对星下点两侧跨轨进行扫描成像,星下点太阳一侧安装可抑制杂散光的遮光板 [图 1(a)],它导致对地观测边缘视场被遮挡,这一侧对地扫描视场受限,只有 50°(背对太阳一侧为 54.7°),因此 MERSI-LL 对地扫描幅宽总宽度约为 2500 km。MERSI-LL 仪器参数设计指标见表 2,通道性能指标要求见表 3。

表 2 中分辨率光谱成像仪微光型仪器参数

Table 2 Instrument parameters of MERSI-LL

Serial number	Characteristic	Specification
1	Detector channels	1 channel for low light band, 6 channels for infrared bands
2	Quantization	12 bit
3	Scanned area	-54.7°-50°
4	Scanner speed	40 r·min ⁻¹
5	Number of scan line sampling points	1536(~1000 m), 6144(~250 m)
6	Scanning stability	Stability of scanning period is smaller than 0.25 pixel integration time
7	Band MTF (modulation transfer function)	> 0.3
8	Band registration	Inter-channel registration accuracy is <0.25 pixel
9	Instrument life expectancy	>8 a

表 3 中分辨率光谱成像仪-微光型通道性能要求

Table 3 Channel performance of MERSI-LL

Band number	Spectral band center / μm	Maximum detectable radiance L_{max} or maximum brightness temperature T_{max}	Minimum detectable radiance L_{min} or minimum brightness temperature T_{min}	Typical radiance L_{typ} or typical brightness temperature T_{typ}	Sensitivity	Measurement accuracy
1	0.70	$9 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$3 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	7	50%
				(night), $5 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$		
2	3.80	350 K	186 K	300 K	0.25 K	0.4 K
3	4.05	380 K	185 K	300 K	0.25 K	0.4 K
4	7.20	270 K	186 K	270 K	0.30 K	0.4 K
5	8.55	330 K	185 K	270 K	0.25 K	0.4 K
6	10.80	345 K	185 K	300 K	0.30 K	0.4 K
7	12.00	345 K	185 K	300 K	0.30 K	0.4 K

FY-3E/MERSI-LL 微光通道为我国风云系列气象卫星中首次设置的通道,它是一个中心波长为 700 nm、带宽为 400 nm 的全色宽波段通道,可以实现晨昏线附近辐射亮度为 $3 \times 10^{-5} \sim 90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的大动态范围地面目标观测。为了实现大动态范围内的有效探测,MERSI-LL 微光通道设计了 3 个增益分阶子通道[低增益(LGS)、中增益(MGS)和高增益(HGS)],低增益通道主要针对高亮度目标进行观测,中增益通道为中间亮度信号的增益设计,高增益通道针对低亮度区域进行观测,

相邻增益子通道间的动态范围设计有重叠,可实现不同增益观测数据的搭接处理,以及用于增益间的辐射一致性传递,实现大动态范围辐射一致的对地观测微光辐射数据。为了实现上述目标,设计 MERSI-LL 微光通道探测器排列如图 1(b)所示,MERSI-LL 微光通道的低增益通道和中增益通道均设置 1 列(每列 10 个探元),高增益通道设置 9 列(共 90 探元),每列探元单独完成观测成像,9 列探元亦可融合成一个通道使用,这样可在夜间条件下提高图像信噪比。

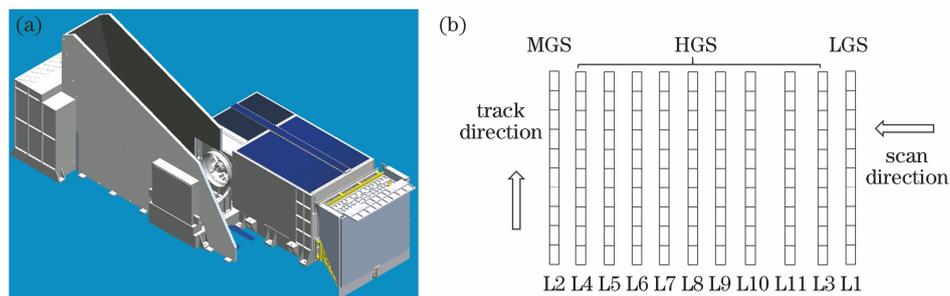


图 1 FY-3E/MERSI-LL 仪器模型和微光通道探测器排布。(a)仪器模型图;(b)微光通道探测器排布图

Fig. 1 FY-3E/MERSI-LL instrument model and low-light band detector arrangement. (a) Instrument model diagram; (b) low-light band detector arrangement

2.2 微光通道星上定标器设计和工作原理

根据 FY-3E 运行于晨昏轨道上的特点,卫星在轨运行时,太阳总是处于卫星的 $-Y_0$ 侧,随着卫星的运动,整年太阳光线相对于卫星本体坐标系在一定锥角内运动,如图 2(a)所示。基于以上特点,MERSI-LL 采用了基于太阳漫透板的星上定标方式,太阳入射方向为卫星坐标系下的 $-Y_0$ 方向。定标时星上定标器保护舱门打开,太阳光照射漫透板,并透过漫透板形成辐亮度已知且均匀的近似朗伯面光源,这为遥感器提供已知辐射输入,实现对遥感器的在轨绝对辐射定标。微光通道的星上定标器包括一个漫透板和漫透板稳定监视器(SDRDM)。漫透板的材质为石英毛玻璃,透过率约为 6%~7%。漫透板稳定监视器是一个设置有两个开口的比辐射计,一个小的太阳光直接入射开口,一个较大的漫透板透射光源入射开口,以稳定的太阳光为参考来监测漫透板的在轨变化情况[图 2(b)]。漫透板和比辐射计太阳入射开口外侧有一个可以开合的太阳遮挡板,只有这个挡板掀开[图 2(b)箭头方向]时才能进行星上定标。比辐射计内部设置 5 个监视探测器,其中心波长分别为 550, 670, 709, 865, 700 nm,其中 700 nm 与微光通道的中心波长相对应。比辐射计通过这 5 个监视探测器对漫透板和太阳光观测

值的比值实现对漫透板信号变化的监视。

MERSI-LL 微光通道的在轨星上定标只能针对低增益通道来进行,将透射过漫透板的稳定太阳光作为星上定标基准,通过观测它来实现在轨的绝对辐射定标和仪器响应衰减跟踪。定标时刻漫透板双向透过率分布函数(BTDF)的获取是实现微光通道星上定标的关键。在发射前,通过实验室和外场试验的方式获取了漫透板的 BTDF,在轨工作后漫透板表面特性会发生一定的变化,其 BTDF 的变化由比辐射计来跟踪,由太阳直接观测值和漫透板观测值的比值随时间的变化来确定。星上定标时机为仪器从黑夜进入白天的过渡时刻,开启 MERSI-LL 对漫透板进行观测,使用比辐射计对漫透板进行观测。为了减少漫透板暴露太阳辐照时间,减小紫外照射导致的漫透板透过率的衰退,在轨初期定标频次较高(一周 1 次或 2 次),仪器响应相对稳定后,开展定标的频次可逐渐降低。在每次星上定标操作时,MERSI-LL 仪器保持对漫透板的观测,当太阳角度合适(太阳水平角在 $\pm 4^\circ$ 以内),比辐射计内 5 个探测器开始采集信号,通过切换装置控制,比辐射计在太阳观测口和漫透板观测口之间来回切换观测。在一次的定标过程中,比辐射计的快门来回切换 8 次,可获得 5 次漫透板的观测和 4 次太阳观测。

对于同一监视探测器,漫透板的观测信号值大于太阳观测信号值,这样设计是为了防止太阳观测信号饱和。通过对不同日期星上定标器长序列观测和跟

踪来分析仪器在轨响应变化,实现 MERSI-LL 的低增益通道在轨响应衰减跟踪。

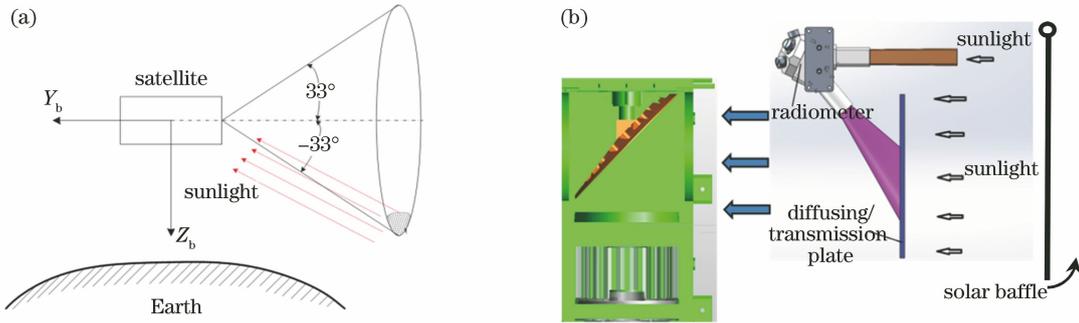


图 2 FY-3E/MERSI-LL 星上定标器设计示意图。(a) 定标器视场和太阳入射角示意图(Y_b 为冷空方向, Z_b 为对地方向); (b) MERSI-LL 微光通道星上定标示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of design of on-board calibrator of FY-3E/MERSI-LL. (a) Schematic diagram of field of view of calibrator and incidence angle of sun (Y_b is direction pointing to cold air, and Z_b is direction pointing to Earth); (b) schematic diagram of MERSI-LL LLB on-board calibration

3 MERSI-LL 数据预处理及 L1 产品精度验证

3.1 微光通道 L1 数据处理

风云三号气象卫星对外发布的遥感产品是 L1 及以上级别数据,其中 L1 数据是卫星原始数据经地面

系统的质检、地理定位和辐射定标处理后得到的基础数据。风云三号地面处理系统对微光通道的数据辐射定标处理流程见图 3。微光通道对地观测数据的预处理主要包括通道配准、增益选择、增益间辐射一致性处理和辐射定标。下面针对微光通道特点的增益选择和增益间辐射一致性处理分别进行说明。

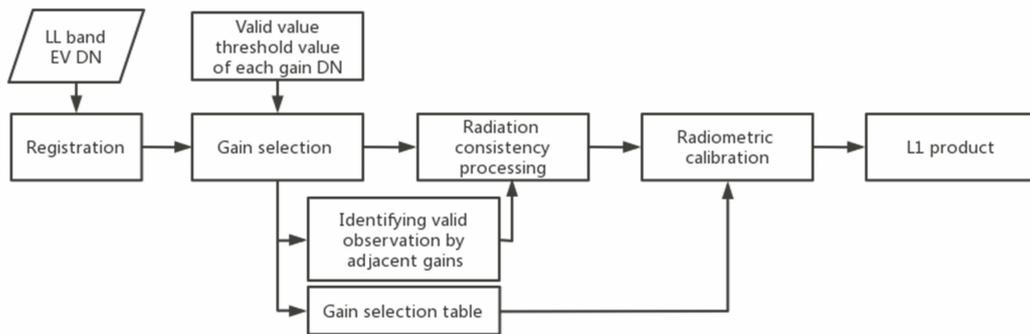


图 3 FY-3E/MERSI-LL 微光通道预处理流程

Fig. 3 Preprocessing of FY-3E/MERSI-LL LLB

由于微光通道观测数据由三个增益通道拼接而成,在地面进行预处理时,首先需要针对每个对地观测像元进行增益选择。MERSI-LL 微光通道的增益选择基于三个增益的有效观测 DN (digital number) 进行。增益选择过程简述如下:首先,结合发射前数据和卫星在轨数据评价结果,确定每个增益观测 DN 值的有效范围;其次,对于每个对地观测像元,考察存在有效观测值的增益档,若只有一档增益为有效观测值,则选择该档增益作为该像元的观测结果,若相邻两档增益均为有效观测,考虑两档中高亮度观测增益档与低亮度观测增益档的信噪比,

选择高亮增益档作为该像元的有效观测。经过上述过程,实现每个对地观测像元的增益选择表,供后续数据处理和定标使用。

微光通道的三增益拼接设计需要考虑增益间拼接处的辐射一致性处理,避免图像中出现接缝和条纹现象。FY-3E/MERSI-LL 的增益间辐射一致性处理算法通过相邻增益共同观测区域的数据和发射前定标系数实现。在设计时,微光通道三个增益中相邻增益存在动态范围的搭接。在进行增益选择时,对相邻增益均为有效观测值的目标进行特殊标注。分别提取 LGS 和 MGS、MGS 和 HGS 的增益

搭接区数据,基于相同观测像元的辐射一致性进行增益一致性处理。

3.2 微光通道辐射精度地面验证

国际上第一代微光探测器 OLS 在设计之初并没有考虑精确的辐射定标,因而限制了微光遥感定量应用的发展。NPP-VIIRS/DNB 观测数据的定标精度有很大提升,高增益通道辐射定标精度的指标要求为 30%,科学家们采用 Railroad Valley Playa (RVP) 沙漠场在夜间用月光条件进行夜间替代定标,得到的不确定度为 15%^[14]。Shao 等^[15]于 2014 年选取南极 Dome C 区域和北极 Greenland 冰盖区域作为定标场地,得到的不确定度优于 8%。Ma 等^[16]于 2015 年选取深对流云进行替代定标,得到近满月条件下的相对误差范围为 $-4.9\% \pm 8.8\%$ 。上述替代定标方法都是夜间月光反射的地球目标,需要精确的辐射传输计算和月光辐射,常用的月球辐照度模型如 MT2009 模型^[17]的不确定度可达到 7%~12%,现有月球模型的精度不足制约了替代定标的精度。微光探测数据能否得到充分应用很大程度上依赖于仪器的精确定标,当前微光通道的定标精度提升具有较大的挑战性^[18]。

基于地面人工灯光源的定标能够避免场地替代定标对于月球辐照度模型精度的依赖,Cao 等^[19]探索了地面灯光源用于微光定标的可行性。Ma 等^[20]系统地提出了一套基于大桥灯光的微光定标方案,结果表明相对误差范围分别是 $-2.9\% \pm 9.3\%$ 和 $-3.9\% \pm 7.2\%$ (1σ)。胡申森^[21]于 2019 年开展了夜间地面人工灯光源的微光定标,初步验证了地面普通金卤灯光源定标的可行性,设计和研制了一套适用于夜间微光定标的特制灯光源,开展了多次外场定标试验。他还提出了一套基于积分球灯光源的微光定标方案,在敦煌场内开展了基于积分球灯光源的微光定标试验,得到总的不确定度为 8.35%。

MERSI-LL 能够在从白天太阳光照条件到晨昏曙暮光的大动态辐射范围下进行对地成像,曙暮光的辐射传输计算远比白天太阳光复杂,利用传统场地定标的观测试验和数据处理均比较复杂。利用新月条件下出射辐射已知且各向均匀的地面灯光源,可以实现微光成像仪基于地面灯光源的光通道辐射定标。基于前期针对 VIIRS 地面人工光源的试验基础^[21],利用自研的积分球灯光源设备,于北京时间 2022 年 1 月 4 日黄昏和 1 月 5 日清晨,在青海省德令哈市天文台内(37.38°N,97.73°E)开展了 FY-3E 卫星微光通道精度的地面验证外场试验

(图 4)。人工灯光源的光谱覆盖了微光成像仪的光谱响应范围,它向天空发射各向均匀的白光辐射,白光辐射经过大气层后被 FY-3E 卫星微光成像仪接收。根据配套的高灵敏度光谱仪实时记录的灯光源出射辐亮度,以及气溶胶激光雷达获取的气溶胶光学厚度等辅助资料,结合大气辐射传输模型计算出大气层顶(TOA)微光成像仪接收的入瞳辐亮度,其与卫星实际观测值相差 20%左右,验证了卫星微光通道精度。未来将在改进地面光源精度和几何辐射耦合分析基础上,进一步提升微光通道基于地面主动光源的定标精度。



图 4 微光通道精度地面验证场景

Fig. 4 Ground verification scene of LLLB accuracy

3.3 基于交叉定标的微光通道辐射精度验证

国外目前针对微光通道的交叉定标方法主要分为两类。一类是不同卫星 DMSP-OLS 传感器之间的交叉定标,这类方法通常采用伪不变特征(PIF)法^[22]和图像的统计特征方法^[23]。另一类是 DMSP-OLS 仪器与 NPP-VIIRS 仪器 DNB 通道之间的交叉定标,Li 等^[24]于 2017 年使用幂函数模型、Zheng 等^[25]于 2019 年使用校正残差的地理加权回归模型(GWRc)、Ma 等^[26]于 2020 年使用 sigmoid 函数加权组合的双相剂量反应(BiDoseResp)模型、Chen 等^[27]于 2021 年基于卷积神经网络的自动编码器(AE)模型对两个仪器的数据进行了处理,经检验发现两个仪器的数据具有良好的精度和时空一致性。

FY-3E 卫星在轨测试期间,由于微光通道高增益受杂散光污染明显,基于交叉定标的微光通道的辐射精度验证仅针对微光通道低增益进行。以美国 JPSS-1/VIIRS 为参考仪器,选择 MERSI-LL 微光通道与 JPSS-1/VIIRS 白天夜间通道的近同时星下点观测(SNO)结果进行比对,实现对 MERSI-LL 微光通道的定标精度验证。两颗卫星的轨道特点使得 SNO 匹配点位于南北高纬度地区,交叉定标的时间阈值为 900 s,样本限定在两载荷星下点两侧,匹配像元空间距离小于 0.1 km,观测天顶角余弦差值小

于 0.1, 匹配区域空间均匀性小于 0.005。经过这些阈值筛选后得到的 2021 年 8 月 10—30 日两个仪器的微观通道的匹配结果如图 5 所示, 图中显示 MERSI-LL 低增益与 VIIRS 的信号偏差在辐亮度较低的目标处较大, 但在辐亮度较高的目标处较小, 在

低增益较高典型辐亮度处, MERSI-LL 略高于 VIIRS 的定标结果, 偏高 4% 以内。由于光照条件一致性样本不足以及 MERSI-LL 受杂散光影响较大, FY-3E/MERSI-LL 微光高增益通道与 VIIRS/DNB 通道在夜间的交叉定标对比验证分析还在进行中。

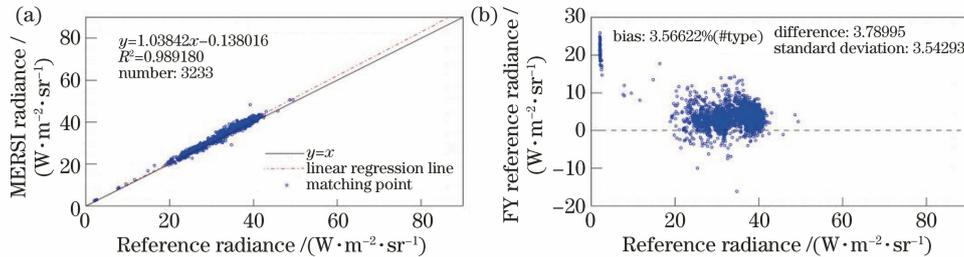


图 5 2021 年 8 月 10—30 日 MERSI-LL 微光通道基于 SNO 的定标精度验证(参考仪器:JPSS-1/VIIRS)。

(a) SNO 匹配散点图; (b) SNO 匹配点的相对偏差分布图

Fig. 5 Calibration accuracy verification of MERSI-LL L1B based on SNO during August 10 to 30, 2021 (reference instrument: JPSS-1/VIIRS). (a) Scatter diagram of SNO matching data; (b) relative bias distribution of SNO matching data

4 MERSI-LL 科学产品及应用潜力

4.1 产品概述

基于 FY-3E/MERSI-LL 微光通道和红外通道的对地观测数据, 可生成云检测、云量、云顶性质、大气可降水、射出长波辐射、极地云导风产品、海表温度、陆表温度、冰雪覆盖产品等多个传统定量遥感产品, 这些产品大多是基于热红外通道反演生产。针对 MERSI-LL 微光通道生产一些新的特色产品, 如准恒定对比度(NCC)图像和夜间城市灯光(NTL)产品已经成功生产, 其他微光通道的试验产品还在陆续开发中, 本文将主要聚焦两个微光通道产品开展介绍和描述。

4.2 准恒定对比度图像

NCC 图像是指利用 MERSI-LL 的微光通道 L1 数据生成的增强一致图像产品。通过调整与太阳或者月球天顶角相关的辐射增益, 生产近乎恒定对比度的图像, 实现晨昏线两侧巨大亮度差异下的归一化辐射图像增强效果展示。NCC 产品主要用于定性的天气分析和图像显示, 可以监测台风、温带气旋等天气系统, 也可与红外图像融合, 帮助用户识别云、雾、积雪、海冰等。

晨昏线白天一侧的典型辐亮度值为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 夜间一侧为 $4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 相差约 7 个数量级。微光通道可以通过低、中、高增益阶段联合观测的设计实现了如此大动态范围的辐亮度观测, 但普通图像无法同时展示晨昏线两侧亮度差异如此大的信息。为此, VIIRS 图像产品研发团

队开发了 NCC 产品, 以减小白天和夜间辐亮度的信号动态对比^[9]。VIIRS 的 NCC 产品采用增益控制算法(GMA), 其基本思路是使用参考辐射值(L_{ref})对卫星接收的辐射值(L)进行标准化处理, 输出伪反照率 $\alpha = L/L_{\text{ref}}$, 其中 L_{ref} 为太阳光和月光照射到一个能代表全球平均状态的非对称反射的近似朗伯面上时所反射的辐射值, 通过日月辐亮度与天顶角关系以及地表反射各向异性因子订正太阳和月球星下点辐照度得到, 其中月球辐照度使用 MT2009 模型计算^[17]。除了 GMA 外, 还有使用误差函数拟合辐亮度的极值、再对辐亮度值进行标准化的 EDS(error function dynamic scaling)方法^[28], 以及使用视星等代替天顶角调节增益函数对辐亮度值进行标准化的 HNCC(high and near constant contrast)方法^[29]。EDS 和 HNCC 都不需要额外的先验信息, 但 GMA 的物理意义更明确。FY-3E 产品生成系统基于 GMA 开发了 NCC 产品。其中, 在计算月球辐照度时使用了国家卫星气象中心研发的月球辐照模型^[30], 该模型相比于 MT2009 增加了天平动、日月和月地距离、月球表面不均匀性的影响。图 6 为 2022 年 2 月 23 日 FY-3E 升轨(黄昏时刻) NCC 产品全球拼图。

4.3 夜间灯光产品

对城市背景灯光合成产品通过微光通道获得的多时相微光遥感数据进行融合, 可以得到城市群夜晚灯光分布图, 统计出城市灯光分布特征。微光通道数据包含辐射亮度值, 辐射亮度值是指单位立体角和投影面积上的辐射通量。微光通道的辐射亮度

值可反映某一区域有无城市灯光以及城市灯光的强度。

获取城市灯光分布需确保选取无云数据,因此利用单一时相的遥感数据无法得到完整的城市灯光分布图像,需要利用同一传感器多时相的数据进行融合操作。FY-3E 的夜间灯光产品包括月、半年和

年产品,空间分辨率为 0.02° 。考虑 FY-3E 在夏半年北半球没有纯夜间数据,月产品的纬度范围不固定,视该月 MERSI-LL 探测的夜间数据的纬度极值而定。夏半年产品为 5 月到 10 月的南半球,冬半年产品为 11 月到次年 4 月的北半球合成灯光,年产品为冬夏半年产品合成的全球灯光。



图 6 2022 年 2 月 23 日 FY-3E 升轨 NCC 产品全球拼图

Fig. 6 Global imagery of FY-3E orbital NCC products on February 23, 2022

夜间灯光是微光探测器在夜间获取的陆地数据在去除月光、杂散光的影响,剔除受云污染的数据、自然光源(如闪电、极光、火点)的数据后得到的反映人工光源的数据产品。当微光图像受杂散光影响时,去除杂散光是得到高质量夜间灯光产品的基础。FY-3E/MERSI-LL 在仪器设计时考虑了杂散光的影响^[31],但分析实际观测资料发现其微光通道在夜间一侧的数据受杂散光污染严重。以 2022 年 1 月

2 日 22:15(UTC)FY-3E 在我国上空的一个 5 min 数据为例[图 7(a)],由太阳高度角可知图像右侧为晨昏区、左侧为黑夜,其左侧的白亮区为受杂散光影响所致。可以看出,一条扫描线上杂散光随扫描角的变化很大,这与 VIIRS 的杂散光特征有很大差异^[32]。另外,因受卫星上其他仪器的影响,MERSI-LL 的杂散光强度存在周期性的帧间变化。针对上述特点,研发了适合 MERSI-LL 的杂散光去除方

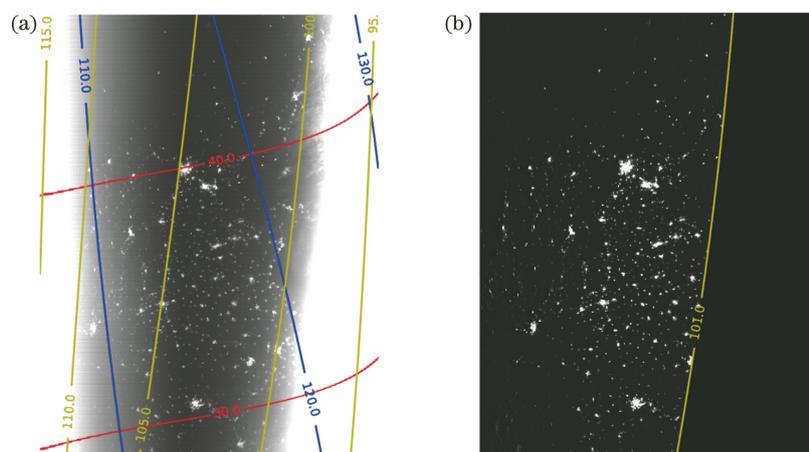


图 7 2022 年 1 月 2 日 22:15(UTC)MERSI-LL 微光通道的 L1 数据微光通道图像及 HGS 去除杂散光之后的图像。

(a) L1 原始图像;(b)去除图 7(a)中杂散光之后的图像,只展示纯夜间区域(太阳高度角 $> 101^\circ$)

Fig. 7 MERSI-LL low-light band image with L1 data and HGS image after removal of stray light at 22:15 on January 2, 2022 (UTC). (a) Original image of L1 data; (b) image after removal of stray light in Fig. 7(a), only showing pure nighttime regions (solar zenith angle is larger than 101°)

案,该方案的基本思路是对 L1 数据逐扫描线进行滑动拟合,将其中的低频信号视为杂散光背景,其优势是可以消除帧间不一致。图 7(a)中的夜间数据(太阳天顶角大于 101°)去除杂散后的效果如图 7(b)所示。去除杂散光之后的另一个重要步骤是剔除受云污染的灯光数据。较厚的云层会完全掩盖灯光,而较薄的云层则会使灯光弥散,使灯光的细

节变得模糊。使用 3×3 像元的变异系数(标准差/平均值)表征图像空间变化的剧烈程度^[33],通过设定变异系数的阈值去除受薄云污染的灯光数据。另外,借鉴 VIIRS 的处理方法,根据图像特征对闪电和高能粒子进行剔除^[34]。目前初版的 FY-3E 夜间灯光产品如图 8 所示(以 2021 年 12 月中国区为例)。



图 8 2021 年 12 月风云三号黎明星亚洲部分地区夜间灯光图

Fig. 8 Nighttime light image of FY-3E in part of Asian area on December 2021

4.4 微光遥感产品应用

夜间灯光的遥感观测能够及时、准确地度量人类活动,同时提供了揭示环境和社会经济问题的独特视角,因此可以实现一系列应用,例如:跟踪城市化进程和社会经济动态,评估武装冲突和灾难,调查渔业,评估温室气体排放和能源使用,并分析光污染和健康影响等。与其他卫星产品相比,夜间灯光观测在量化人类活动强度方面具有显著优势,其与其他地球观测和辅助数据(例如地理位置大数据)结合在一起,为感知变化的世界提供了巨大的潜力。

微光通道能够在全球范围内通过对夜间城市灯光的监测识别出人类居住地,并跟踪城市化进程^[35]和经济活动。Elvidge 等^[36]用 DMSP-OLS 的数据进行区域识别。Yi 等^[37]利用多瞬时 DMSP/OLS NTL 年度复合数据研究了中国东北地区的城市化动态,Zhou 等^[38]开发了一种生成时间和空间一致的全球城市地图的新方法,发现城市面积占全球陆地面积的百分比从 1992 年的 0.23% 增加到 2013 年的 0.53%。夜间灯光监测数据可以作为一个经济活动指标,用来衡量区域的经济状况,并出现一系列衍生产品,例如:城市灯光、GDP 或 GRP、城市人口与人口密度、耗电量等。余越等^[33]用 VIIRS-DNB 数据研究了中国中东部经济快速发展区域的夜间灯光产品,王毓乾等^[39]用基于 DMSP-

OLS 数据建立的模型估算了省域生产总值,Lo 等^[40-41]估算了不同空间水平上的中国人口和人口密度,Lo^[42]建立了中国 35 个省会城市耗电量与照明区域之间的对数关系。

夜间灯光监测数据还可以用于评估灾害或武装冲突的影响。Gillespie 等^[43]展示了 2004 年 12 月印度尼西亚苏门答腊岛地震和海啸影响地区的破坏和恢复情况。Molthan 和 Jedlovec^[44]使用 VIIRS-DNB 灯光数据进行假彩色合成,用来监测飓风桑迪前后变化。Cole 等^[45]结合夜间灯光、人口和公用事业信息统计了飓风桑迪过后东北部各州的停电和恢复情况。夜间灯光亮度的急剧下降还可以作为武装冲突对基础设施造成破坏的一个指标^[46]。Li 等^[47]于 2014 年用 DMSP-OLS 月合成夜间灯光数据来评估叙利亚的暴力冲突,发现自 2011 年 3 月,当地受影响地区灯光亮度急剧降低,12 个省份的夜间灯光损失超过 60%。

夜间灯光数据可有效检测渔业信息,监测火情和碳排放。DMSP-OLS 图像已被广泛用于检测日本海、西南大西洋和秘鲁的渔船灯光的时空变化^[6],美国国家海洋和大气管理局(NOAA)地球观测小组(EOG)为 VIIRS 数据开发了渔船检测算法^[34]。Elvidge 等^[48]于 1996 年针对 DMSP-OLS 微光成像数据开发了夜间生物质燃烧算法,并在区域内实施。

VIIRS 微光通道数据可以用于实际火灾监测^[49],通过夜间火灾区域燃烧发出的可见光识别出目标区域的火情程度^[50]。Oda 等^[51]于 2011 年利用夜间灯光数据还获取了 CO₂ 排放清单。Shi 等^[52]于 2016 年评估中国多个空间尺度上的城市 CO₂ 排放及不同地理区域之间的 CO₂ 排放变化。Su 等^[53]于 2014 年估算了中国的 CO₂ 排放数据,还探讨了可行的减排政策。微光通道的灯光观测还可以用来衡量光污染水平及其对健康的影响,如 Falchi 等^[54]和 Koen 等^[55]研究发现夜间人工光与一些疾病或不健康现象(例如乳腺癌和肥胖)之间存在显著的相关性^[56]。

目前由 FY-3E/MERSI-LL 微光通道观测数据开发的科学产品有 NCC 图像产品和全球城市灯光合成产品等,这些特色产品可以应用于遥感绘图,直观准确地表示出夜晚城市的灯光分布,衡量区域的经济状况,并作为潜在的经济活动指标,制作出一系列衍生产品,例如 GDP 或 GRP、城市人口与人口密度、耗电量等,MERSI-LL 将在研究城市化进程和统计社会经济发展中发挥独特优势。

在新冠病毒疫情还在蔓延的今天,MERS-LL 的微光产品可用于评估疫情对经济发展和人民生活造成的影响。其次,MERS-LL 的微光产品还可根据夜间亮度的变化应用于监测海洋渔业、火情火灾和武装冲突等。总之,MERS-LL 的微光数据可以应用于上述衍生的微光遥感产品开发,具有很大的应用潜力。

5 结 论

综述了国内外卫星微光探测仪器发展概况,重点介绍风云三号黎明星的微光探测仪器设计、星上定标和数据处理,以及产品生成。文中综述了 FY-3E/MERSI-LL 微光通道多增益传递和一致性处理基本原理和流程,并简要介绍微光通道数据辐射定标多种手段,基于太阳漫透板设计的星上定标器只能实现微光通道的低增益通道定标,中、高增益在轨定标需要通过增益间辐射传递实现。本文还介绍了基于人工主动光源的地面定标验证尝试,但是受到光照条件的限制,在我国人工主动光源定标试验只能在冬季开展。本文采用交叉定标方法实现了低增益通道定标检验,精度达到 4% 左右。最后展示了微光通道 NCC 产品和夜间灯光产品的生成试验,在杂散光去除基础上实现了多天观测数据夜间灯光信号的合成处理,初步实现了 FY-3E/MERSI-LL 微光通道全球城市灯光产品生产,该产品可提

供后端用户后续应用试验。

MERSI-LL 受晨昏轨道和弱光敏感等导致的特殊影响,晨昏线附近观测数据杂散光污染剔除十分困难。通过分析 FY-3E/MERSI-LL 微光通道数据发现,大幅宽数据靠近夜间一侧由于杂散光遮挡设计不充分,受严重的杂散光影响,分布特征异常复杂,杂散光去除算法需要长期迭代,这为下一颗黎明星微光仪器设计改进和优化提供了经验,特别是针对杂散光抑制的硬件改进措施。

微光通道数据在监测分析人类活动和研究环境变化与影响方面具有巨大潜力,但是目前 FY-3E/MERSI-LL 数据受晨昏轨道的固有局限性,且纯夜间数据时间空间范围受限,一定程度影响了微光探测数据的精确量化应用,随着风云三号后续微光仪器改进和数据产品算法的进一步优化,未来将会有更加精确的微光定量应用,这有助于加深我们对人类活动和环境变化的感知。

参 考 文 献

- [1] Levin N, Kyba C C M, Zhang Q L, et al. Remote sensing of night lights: a review and an outlook for the future [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111443.
- [2] Prasad V K, Kant Y, Gupta P K, et al. Biomass burning and related trace gas emissions from tropical dry deciduous forests of India: a study using DMSP-OLS data and ground-based measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23 (14): 2837-2851.
- [3] Orville R E, Henderson R W. Global distribution of midnight lightning: September 1977 to August 1978 [J]. *Monthly Weather Review*, 1986, 114 (12): 2640-2653.
- [4] Kelley M C. Intense sheared flow as the origin of large-scale undulations of the edge of the diffuse aurora [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1986, 91(A3): 3225-3230.
- [5] Foster J L, Hall D K. Observations of snow and ice features during the polar winter using moonlight as a source of illumination [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37(2): 77-88.
- [6] Zhao M, Zhou Y, Li X, et al. Applications of satellite remote sensing of nighttime light observations: advances, challenges, and perspectives [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1971.
- [7] Chen H D, Xiong X X, Sun C B, et al. Suomi-NPP VIIRS day-night band on-orbit calibration and performance [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*,

- 2017, 11: 036019.
- [8] Miller S, Straka W III, Mills S, et al. Illuminating the capabilities of the Suomi national polar-orbiting partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6717-6766.
- [9] Liang C K, Mills S, Hauss B I, et al. Improved VIIRS day/night band imagery with near-constant contrast[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 6964-6971.
- [10] Levin N, Johansen K, Hacker J M, et al. A new source for high spatial resolution night time images: the EROS-B commercial satellite[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 1-12.
- [11] 李德仁, 张过, 沈欣, 等. 珞珈一号 01 星夜光遥感设计与处理[J]. *遥感学报*, 2019, 23(6): 1011-1022.
Li D R, Zhang G, Shen X, et al. Design and processing night light remote sensing of LJ-1 01 satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1011-1022.
- [12] 中国科学院空天信息创新研究院. 可持续发展科学卫星 1 号首批影像发布 [EB/OL]. (2021-12-20) [2022-01-04]. https://www.cas.cn/yw/202112/t20211220_4818807.shtml.
Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science. Release of the first batch of images of sustainable development science satellite 1 [EB/OL]. (2021-12-20) [2022-01-04]. https://www.cas.cn/yw/202112/t20211220_4818807.shtml.
- [13] Farges T, Blanc E. Characteristics of lightning, sprites, and human-induced emissions observed by nadir-viewing cameras on board the International Space Station[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(7): 3405-3420.
- [14] Liao L B, Weiss S, Mills S, et al. Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12705-12718.
- [15] Shao X, Cao C Y, Zhang B, et al. Radiometric calibration of DMSP-OLS sensor using VIIRS day/night band [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9264: 56-63.
- [16] Ma S, Yan W, Huang Y X, et al. Vicarious calibration of S-NPP/VIIRS day-night band using deep convective clouds [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 42-55.
- [17] Miller S D, Turner R E. A dynamic lunar spectral irradiance data set for NPOESS/VIIRS day/night band nighttime environmental applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2316-2329.
- [18] 胡申森, 马烁, 江军, 等. 星载微光成像仪辐射定标与资料应用研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1500001.
Hu S S, Ma S, Jiang J, et al. Research progress on radiation calibration and data application of spaceborne low-light imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1500001.
- [19] Cao C Y, Bai Y. Quantitative analysis of VIIRS DNB nighttime point source for light power estimation and stability monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 11915-11935.
- [20] Ma S, Yan W, Huang Y X, et al. Calibration method of low-light sensor based on bridge lights[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(6): 1123-1134.
- [21] 胡申森. VIIRS 微光通道数据辐射定标与应用技术 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
Hu S S. Radiometric calibration and application of VIIRS low-light channel data [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [22] Elvidge C, Ziskin D, Baugh K, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. *Energies*, 2009, 2(3): 595-622.
- [23] Zhang Q L, Pandey B, Seto K C. A robust method to generate a consistent time series from DMSP/OLS nighttime light data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10): 5821-5831.
- [24] Li X, Li D R, Xu H M, et al. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria's major human settlement during Syrian Civil War[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5934-5951.
- [25] Zheng Q M, Weng Q H, Wang K. Developing a new cross-sensor calibration model for DMSP-OLS and Suomi-NPP VIIRS night-light imageries [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 153: 36-47.
- [26] Ma J J, Guo J Y, Ahmad S, et al. Constructing a new inter-calibration method for DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 937.
- [27] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889-906.
- [28] Seaman C J, Miller S D. A dynamic scaling algorithm for the optimized digital display of VIIRS Day/Night

- Band imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(7): 1839-1854.
- [29] Zinke S. A simplified high and near-constant contrast approach for the display of VIIRS day/night band imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(19): 5374-5387.
- [30] Zhang L, Zhang P, Hu X Q, et al. A novel hyperspectral lunar irradiance model based on ROLO and mean equigonal albedo [J]. *Optik*, 2017, 142: 657-664.
- [31] 陈海龙, 陈林, 胡秀清, 等. 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中微光成像仪的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050101.
- Chen H L, Chen L, Hu X Q, et al. Effect of external stray light on low-light imager loaded in Fengyun-3 day/night orbit meteorological satellite [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050101.
- [32] Mills S, Weiss S, Liang C. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8866: 549-566.
- [33] 余越, 胡秀清, 闵敏, 等. NPP/VIIRS 微光图像融合中国中东部城市灯光算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 102804.
- Yu Y, Hu X Q, Min M, et al. NPP/visible infrared image radiometer suite low-light image fusion algorithm for city lights in mid-eastern China [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 102804.
- [34] Elvidge C D, Zhizhin M, Baugh K, et al. Automatic boat identification system for VIIRS low light imaging data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 3020-3036.
- [35] Small C, Elvidge C D. Night on Earth: mapping decadal changes of anthropogenic night light in Asia [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 22: 40-52.
- [36] Elvidge C D, Baugh K E, Dietz J B, et al. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(1): 77-88.
- [37] Yi K P, Tani H, Li Q, et al. Mapping and evaluating the urbanization process in Northeast China using DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 3207-3226.
- [38] Zhou Y Y, Li X C, Asrar G R, et al. A global record of annual urban dynamics (1992—2013) from nighttime lights [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 206-220.
- [39] 王毓乾, 孔轩, 钱宽, 等. DMSP/OLS 数据去饱和处理与省域生产总值反演[J]. *遥感信息*, 2019, 34(4): 16-21.
- Wang Y Q, Kong X, Qian K, et al. DMSP/OLS data desaturation and Chinese gross regional product regression [J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(4): 16-21.
- [40] Lo C P. Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(9): 1037-1047.
- [41] Zhuo L, Ichinose T, Zheng J, et al. Modelling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated night-time light images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(4): 1003-1018.
- [42] Lo C P. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2002, 92(2): 225-240.
- [43] Gillespie T W, Frankenberg E, Fung Chum K, et al. Night-time lights time series of tsunami damage, recovery, and economic metrics in Sumatra, Indonesia [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(3): 286-294.
- [44] Molthan A, Jedlovec G. Satellite observations monitor outages from superstorm sandy [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94(5): 53-54.
- [45] Cole T, Wanik D, Molthan A, et al. Synergistic use of nighttime satellite data, electric utility infrastructure, and ambient population to improve power outage detections in urban areas [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 286.
- [46] Witmer F D W. Remote sensing of violent conflict: eyes from above [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(9): 2326-2352.
- [47] Li X, Li D R. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis? [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(18): 6648-6661.
- [48] Elvidge C D, Kroehl H W, Kihn E A, et al. Algorithm for the retrieval of fire pixels from DMSP operational linescan system data [J]. Cambridge: MIT Press, 1996: 73-85.
- [49] Elvidge C, Zhizhin M, Hsu F C, et al. VIIRS nightfire: satellite pyrometry at night [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(9): 4423-4449.
- [50] Csizsar I, Schroeder W, Giglio L, et al. Active fires from the Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: product status and first evaluation results [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(2): 803-816.

- [51] Oda T, Maksyutov S. A very high-resolution (1 km×1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(2): 543-556.
- [52] Shi K F, Chen Y, Yu B L, et al. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis [J]. Applied Energy, 2016, 168: 523-533.
- [53] Su Y X, Chen X Z, Li Y, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 231-243.
- [54] Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, et al. The new world atlas of artificial night sky brightness [J]. Science Advances, 2016, 2(6): e1600377.
- [55] Koen E L, Minnaar C, Roeber C L, et al. Emerging threat of the 21st century light scape to global biodiversity[J]. Global Change Biology, 2018, 24(6): 2315-2324.
- [56] Rybnikova N A, Portnov B A. Outdoor light and breast cancer incidence: a comparative analysis of DMSP and VIIRS-DNB satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(21): 5952-5961.