

星载微光成像仪辐射定标与资料应用研究进展

胡申森¹, 马烁^{1*}, 江军², 艾未华¹, 严卫¹¹国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073;²北京应用气象研究所, 北京 100029

摘要 随着光电技术的发展,低照度条件下的微光成像及其应用成为近年来的研究热点之一。对于定量遥感的气象海洋环境卫星,微光成像仪辐射定标与资料应用的研究也受到普遍的关注。以目前国际上最具代表性的微光成像仪载荷 VIIRS/DNB 为例,系统阐述了夜间不同月相条件下传感器绝对辐射定标与气象海洋环境资料应用等技术问题的研究进展,以期对相关科学研究和实际工程应用提供有用信息。

关键词 遥感; 微光成像仪; 辐射定标; 灯光源定标; 积分球; 微光资料应用

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1500001

Research Progress on Radiation Calibration and Data Application of Spaceborne Low-Light Imager

Hu Shensen¹, Ma Shuo^{1*}, Jiang Jun², Ai Weihua¹, Yan Wei¹¹ College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;² Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China

Abstract With the development of optoelectronic technologies, low-light imaging and its application under low illumination conditions have become one of the research hotspots in recent years. For the meteorological and marine environment satellites of quantitative remote sensing, the research on radiometric calibration and data application of low-light imagers has also received widespread attention. This paper takes the most representative low-light imager load VIIRS/DNB in the world as an example, and systematically illustrates the research progress on the sensor absolute radiation calibration and data application in the meteorological and marine environment under different moon phases at night, in order to provide useful information for scientific research and practical engineering applications.

Key words remote sensing; low-light imager; radiation calibration; light source calibration; integrating sphere; low-light data application

OCIS codes 280.4788; 010.0280; 010.7295

1 引言

微光成像仪通过光电倍增管等技术增强可见光通道的灵敏度,从而实现夜间四分之一以上月光等低照度条件下的成像。在实现精确辐射定标后,微光成像仪独特的微光探测能力能够极大地拓展夜间低照度条件下气象海洋环境遥感应用范围。微光成

像仪具有重要的应用前景和科学研究价值,逐渐成为气象海洋环境卫星上的基本配置。

20 世纪 60 年代,随着第一颗美国国防气象卫星 (Defense Meteorology Satellite Program, DMSP) 的成功发射,人类正式迈入了夜间微光遥感的新纪元^[1-7]。该卫星上搭载的业务线扫描系统 (Operational Linescan System, OLS) 能够在夜间

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(41775027)

通信作者: *mashuo0601@163.com

微光条件下获取可见光近红外通道的探测数据,首次实现了夜间天基微光成像,帮助我们从太空视角欣赏具有独特魅力的夜间地球场景。OLS最初以云为对象提供主要产品,但是随着科学研究的深入,发现其对夜间地面可见光源的分布也具有较好的表征能力。因此,基于夜间微光探测数据逐步地发展出了夜间火灾监测^[8]、闪电定位^[9]、极光监测^[10]、人造灯光源监测^[11]以及经济社会发展监测^[12]等一系列独具特色的微光遥感应用。但是,由于技术条件的限制,OLS的微光通道数据尚不具备辐射定标能力,相关应用基本停留在初步定性研究上。

2011年,美国S-NPP(Suomi-National Polar-orbiting Partnership)卫星成功发射,这是微光遥感发展史上的一个重大里程碑。该卫星上搭载的可见光红外成像辐射计(Visible/Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS)拥有比OLS更加出色的白天夜间波段(Day Night Band, DNB)微光通道^[13],其较高的空间分辨率和星上在轨辐射定标使微光遥感应用从定性到定量成为可能^[14],基于微光通道数据的遥感应用技术正处于加速发展的阶段^[15]。国内外学者对微光成像仪探测数据的深入研究结果表明,精确辐射定标的微光数据能够直接用于夜间气象海洋环境的监测,加快新一代数值天气预报模式的发展。基于微光通道数据逐步发展起来的夜间低云大雾监测、夜间火灾监测、夜间海洋内波监测等应用产品可以很好地应用于社会防灾减灾。

作为一种经过辐射定标的经典微光成像仪,其VIIRS/DNB数据免费公开发布,在全世界范围内得到了广泛运用。由于其辐射动态范围超过了7个量级,VIIRS/DNB的辐射定标相对于常见的白天使用的成像仪难度要大。尽管设计团队通过巧妙的三个增益阶段传递定标的方法实现了辐射定标,解决了星上在轨辐射定标的有无问题,但是在最微弱月光条件下,辐射定标不确定度的设计指标仅为15%^[16],相对于目前白天成像仪通常优于2%的不确定度^[17],仍有许多技术问题需要解决,迫切需要提高定量化遥感应用水平。

本文首先介绍了微光成像仪载荷的发展历程,并主要针对VIIRS/DNB这一代表性微光载荷,介绍了近年来国内外学者在微光成像仪辐射定标领域取得的主要研究进展,探讨了对微光探测数据开展高精度在轨辐射定标的可行途径,最后分析讨论了当前微光探测数据在不同月相条件下的典型遥感应用。

2 微光成像仪载荷的发展

2.1 DMSP/OLS

虽然美国空军早在20世纪60年代就开始运行DMSP,但是其遥感数据直到1973年才公开。作为全世界最早的星载微光成像仪载荷,DMSP搭载的OLS将白天对云的成像能力延展到夜晚月光条件下,首次实现了天基夜间对云成像,并作为卫星系列不断得到完善发展。

DMSP采用AM 06:00轨道和AM 10:30轨道的双星运行体制,每隔6h可以提供一次全球云图,整个卫星系统一天就能够提供黎明、白天、黄昏和夜晚四个时段的观测数据^[18]。OLS的扫描辐射单元由两个光学扫描镜和一个光学倍增管组成,采用摆镜正弦扫描成像的工作模式,每条扫描线包含1465个像元,其地面分辨率基本一致,成像幅宽大约为3000 km。OLS的0.51~0.86 μm 微光通道横跨电磁波谱中的可见光和近红外波段区域^[15]。

OLS设计的最初目的是通过增强可见光光源来实现晨昏时段及月光条件下的云探测,所以OLS的微光数据并没有进行精确的辐射定标,仅被划分为有限的64个辐射等级,这在一定程度上限制了其在定量环境遥感中的应用。

2.2 VIIRS/DNB

S-NPP卫星于2011年10月发射,卫星运行的轨道倾角大约为 98.7° ,降交点时间为当地时间01:30。绕地球飞行一圈大约需要102 min,因此每天可以环绕地球大约14圈^[19]。S-NPP卫星及其后续的JPSS(Joint Polar Satellite System)系列上都搭载了VIIRS,用来探测云和地表环境要素^[18,20]。作为当今世界上最先进遥感探测技术的集大成者,VIIRS继承了先进甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)、中分辨率成像光谱辐射仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、海洋观测宽视场传感器(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, SeaWiFS)以及OLS等仪器的优点,是目前全球综合探测能力最强的成像辐射计^[21-28]。VIIRS属于摆扫型辐射计,在跨轨方向上的视场角为 112.56° ,拥有3060 km的刈幅宽度,每天都能实现地球表面的全覆盖扫描。

VIIRS共有22个不同的光谱波段,分布在0.4~12.5 μm 的波长范围内,包括16个星下分辨率为750 m的中分辨率窄波段(M-band)、5个星下

分辨率为 375 m 的成像窄波段(I-band)以及全分辨率为 750 m 的宽波段 DNB^[29-30]。作为全色太阳反射波段, DNB 的光谱响应范围为 0.5~0.9 μm 。DNB 微光通道不仅能够在白天对地球场景进行成像, 而且能够在夜间仅有微弱月光、星光等条件下对地球进行观测。尽管从严格意义上讲, DNB 的部分光谱范围在可见光范围之外, 但通常仍然把 DNB 微光通道看作典型的微光通道^[19]。DNB 微光通道是在 OLS 微光探测的基础上发展起来的, 与 OLS 相比, 具有 5 个比较明显的优点^[29], 包括像素饱和现象减少, 更小的瞬时视场角降低了空间模糊现象的出现频率, 精确的辐射定标促使量化水平提高, 多光谱探测能力增强, 以及基本恒定的较高空间分辨率消除了跨轨像素大小的变化。通过采用一种背面接收辐射的电荷耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD) 面阵, DNB 微光通道在扫描时利用时间延迟积分 (Time Delay Integration, TDI) 模式实现成像。与其他波段相比, DNB 的子像元集成方法具有明显的差异。在沿轨方向上, DNB 微光通道拥有 672 个子探测元, 组成 16 个探测器同时进行扫描^[26]。为了实现跨轨扫描方向上的全分辨率一致, DNB 的子像元集成模式共使用了 32 个集成单元, 在天底条件下每个像元由 42 个沿轨子像元与 66 个跨轨子像元组成, 在扫描边缘时每个像元由 20 个沿轨子像元与 11 个跨轨子像元组成。与 OLS 相比, DNB 微光通道的空间分辨率在天底提高了 14 倍, 在扫描边缘时甚至达到了 53 倍^[31]。

2.3 其他微光成像仪载荷

近年来, 国内外对夜间微光遥感的需求不断增强, 研制并发射了许多具有微光探测能力的成像载荷。与 VIIRS/DNB 相比, 它们往往具有高时间分辨率、高空间分辨率、高光谱分辨率的特点, 但是扫描成像的刈幅宽度相对较小, 目前在气象海洋环境遥感中的应用相对较少, 而更多地被应用在社会科学研究中。

以色列于 2006 年发射的 EROS-B 地球观测卫星^[32], 卫星质量约为 300 kg, 重访周期为 5 d, 运行周期为 94.8 min, 运行在 500 km 左右的高度, 光谱范围为 0.5~0.9 μm , 具有标准成像模式和条带模式, 能够获取 0.7 m 空间分辨率的白天和夜间的地表图像。

国内“吉林一号”商业小卫星系列^[33]自 2015 年首颗发射以来, 截至 2020 年底已发射了二十余颗卫星, 计划到 2030 年实现 138 颗卫星组网, 轨道高度为 650 km, 重访周期为 3.3 d。“吉林一号”系列中的部分光学成像卫星搭载了微光载荷, 能够实现夜

间微光成像, 空间分辨率已达到了亚米级。

国内武汉大学于 2018 年发射的“珞珈一号”科学实验卫星 01 星^[34], 轨道标称高度为 500~600 km, 采用 0.5~0.9 μm 通道进行夜间微光成像, 光谱辐亮度的实验室绝对定标精度优于 7%, 可在 15 d 内完成全球夜间图像的绘制, 空间分辨率为 100~150 m。

3 微光成像仪辐射定标技术

受当时卫星数据传输能力的限制, 第一代微光探测器 OLS 仅仅根据各个像元的明暗程度, 将微光辐亮度数据划分成了 64 个辐射等级, 并没有进行精确的辐射定标。随着定量遥感需求的不断增强, 当微光探测载荷发展到 DNB 阶段时, 探测数据的精确辐射定标已经成为了必然要求。根据设计时的技术指标^[16], 在夜间低照度条件下, DNB 辐射定标不确定度最高需要达到 30%。下面介绍 VIIRS 定标团队业务化使用的星上传递定标方法以及国内外学者为了进一步提高夜间低照度条件下的定标精度而开展的场地替代定标和灯光源主动定标方法。

3.1 星上传递定标

DNB 微光通道能够探测辐亮度在 $3 \times 10^{-9} \sim 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 范围内的地球场景, 对应的光照条件分别是四分之一月相时的月光和白天时段最强烈的太阳光, 辐射动态范围跨度可以达到 7 个量级。为了实现巨大跨度的辐射动态范围, DNB 微光通道在星上在轨定标时动态采用了三种不同的增益阶段, 包括低增益阶段 (Low-Gain Stage, LGS)、中增益阶段 (Medium-Gain Stage, MGS) 和高增益阶段 (High-Gain Stage, HGS)。LGS 对应于白天太阳光照条件, MGS 对应于晨昏曙暮光条件, HGS 对应于夜间低照度条件, 对于每一个成像像元而言, DNB 微光通道都会从三个增益阶段中选择出最合适的一个增益阶段来成像。

DNB 微光通道巧妙地利用不同增益之间的交叉过渡阶段来实现辐射定标。在三个增益转换之间有两个过渡区域, 利用这两个过渡区域可确定 LGS 与 MGS 以及 MGS 与 HGS 的增益比例关系。由于 LGS 的辐射定标与一般白天可见光辐射定标类似, 可利用太阳漫反射板通过星上在轨定标确定, 因此通过传递机制可推知 MGS 与 HGS 的增益, 从而实现 DNB 全增益阶段的辐射定标^[11]。巧妙的传递定标设计解决了在巨大跨度的辐射动态范围下进行精确辐射定标的难题, 实现了 DNB 在轨运行阶段的

星上定标,这种辐射定标方案在 S-NPP 以及后续的 JPSS 系列卫星上都得到了运用,但是在其传递定标的中间过程中,不可避免地引入了更多的不确定因素。因此,这种间接定标方法会极大地限制定标精度,这种影响在夜间的 HGS 阶段更为明显。

3.2 场地替代定标

鉴于星上传递定标的局限性,在 S-NPP 卫星发射升空之后,为了进一步提高 DNB/HGS 的定标精度,国内外学者开展了大量的深入研究,探索绕过其他两个增益阶段,在夜间直接对 HGS 进行辐射定标的方法。场地替代定标是目前评判传感器稳定运行性能最常用也是最为有效的一种方法,其在白天太阳光照条件下的运用已经非常成熟,研究人员将场地替代定标方法拓展到夜间的辐射定标中,探索夜间替代定标的方法^[35-38]。

白天场地替代定标方法通常将地球上反射特性均匀的场地作为替代目标,沙漠场景是一种广泛应用的替代目标。2013 年, Liao 等^[16]选取了美国 RVP(Railroad Valley Playa)沙漠地区作为替代定标场地,分析了 2012 年 3—10 月期间近满月条件下的 18 次有效观测,利用 MODTRAN 软件开展了大气辐射传输计算,结合 ROLO 月亮辐照度模型,模拟计算了大气层顶的入瞳辐亮度,首次实现了 HGS 的夜间替代定标,相对误差范围为 $-6.1\% \pm 8.9\%$,进而确定 HGS 的辐射定标不确定度为 15%。

极地的冰盖场景也常被用来进行场地替代定标。Shao 等^[39]和 Qiu 等^[40]分别选取南极 Dome C 区域和北极 Greenland 冰盖区域作为替代定标场地,基于 Dome C 区域 2012 年 5—8 月和 2013 年 5—7 月期间的 20 次有效观测以及 Greenland 区域 2012 年 11 月—2013 年 1 月期间的 8 次有效观测,利用 MT2009 月亮辐照度模型计算区域的地表反射率,与 EO-1 卫星 Hyperion 传感器对应的产品对比,结果表明,计算出的地表反射率与卫星产品具有较好的一致性,得出辐射定标的不确定度优于 8% 的结论。

Hu 等^[41]通过对 2012 年 8 月—2013 年 7 月期间 Dome C 和 RVP 地区长达 1 年的观测,利用 SCIATRAN 软件开展了大气辐射传输计算,将模拟计算得到的入瞳辐亮度与卫星入瞳辐亮度进行对比,结果表明,两个地区的平均相对偏差分别为 -7.41% 和 -4.14% 。

为了验证在白天场地替代定标中常用的敦煌辐射校正场的可行性,胡申森^[42]以敦煌辐射校正场作为夜间替代定标实验场地,利用 2012 年 9 月—2014

年 7 月的 DNB 观测数据,选取了符合标准的 14 组有效观测事件,通过 SCIATRAN 开展了大气辐射传输计算,得到了大气层顶的模拟卫星入瞳辐亮度,与 DNB 的实际观测辐亮度进行对比,结果表明,观测辐亮度和模拟辐亮度总体上还是比较吻合的,相对误差范围为 $-6.2\% \pm 8.6\%$ 。

这些经典的场地替代定标方法都是选取地表具有较高反射率的沙漠、戈壁或者冰盖区域作为替代定标场地,大气中的气体分子、气溶胶等都会对大气辐射传输过程造成一定的影响,目前的大气辐射传输模型还不能完备地描述这些影响。为了避免大气效应对定标结果的可能影响, Ma 等^[43]选取了具有较高反射率的深对流云作为替代定标场地,利用 2012 年 8 月—2013 年 7 月全球范围内的深对流云进行替代定标,将模拟计算的目标反射率与实际观测的表观反射率进行对比,结果表明,近满月条件下日平均的相对误差范围为 $-4.9\% \pm 8.8\%$; 2013 年 4 月相对误差突然减小,这一现象显示官方在发布数据产品时使用了修正的 DNB 相对响应函数。

上述这些替代定标方法都是基于场地目标对月光反射的机制,需要精确地计算辐射传输过程各阶段的月光辐射,不可避免地会引入月亮光谱模型本身的误差。常用的月亮辐照度模型如 MT2009 模型^[44],其不确定度可达到 $7\% \sim 12\%$,从而导致定标精度在现有月亮辐照度模型条件下难以得到进一步提高。此外,当月相角较大时,经地表反射的月光辐射变得相当微弱。受限于传感器接收信号的信噪比,此时的观测数据难以用来进行场地替代定标。场地替代定标方法对月相条件的苛刻限制大幅减少了满足辐射定标要求的有效观测事件数目。

针对夜间微光条件下的场地替代定标方法,国内外学者普遍认为,将深对流云作为替代目标的定标方法能够取得更高的定标精度,目前国内外的研究工作主要集中于开发能够更加准确定量描述月光辐射的月亮辐照度模型^[45-46]。

3.3 灯光源主动定标

早在 DMSP/OLS 时期,研究人员通过观察微光云图,就已经发现在较大月相角的月亮光照条件下,照射到地球的月亮辐射非常微弱,地表、云等目标反射的月亮辐射也比较微弱,较低的信噪比导致 DNB 微光通道对地表、云等目标的成像效果相比满月条件时要差很多。但是,地面灯光源自身向外发出的灯光辐射比较稳定,基本不会受到变化的月亮辐射的影响,因此在微光图像中,周围背景像元越暗

淡,灯光辐射的信噪比就越高,地面灯光源目标的成像效果也就越好。基于上述机制,利用发射辐射较为稳定的地面灯光源,通过精确计算其到达大气层顶的上行辐射并与微光传感器的观测结果进行对比,理论上可以实现微光数据的辐射定标。基于地面灯光源的微光定标方法不依赖于月相条件和精确月亮辐照度模型,已逐渐成为微光辐射定标领域新的研究热点。

最初,Cao 等^[47]对夜间现有的一些地面灯光源,如油井火光、渔船灯光、发电厂灯光、大桥灯光等,进行了初步的定量分析,探索其用于微光定标的可行性,结果表明,基于光源装置自身特性估算得到的灯光功率与根据卫星观测数据推算得到的灯光功率吻合较好,并提出设计特制的灯光源用于微光定标。

考虑到跨海大桥灯光源位于黑暗的海水背景中间且辐射相对比较稳定等特点,Ma 等^[48]选取中国的杭州湾大桥和东海大桥上的夜间桥面路灯作为灯光源,假设经桥面反射的路灯灯光满足朗伯余弦特性,分析目标区域 2012 年 8 月—2014 年 7 月的卫星观测数据,通过将模拟计算的入瞳辐亮度与卫星实际观测的入瞳辐亮度进行对比,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,基于杭州湾大桥的微光定标方案的相对误差为 $-2.9\% \pm 9.3\%$,基于东海大桥的微光定标方案的相对误差为 $-3.9\% \pm 7.2\%$ 。

前期灯光源主动定标的相关研究工作都是基于夜间现有的地面灯光源进行微光定标研究的,而这些光源并不是针对辐射定标专门设计的,因此在微光定标过程中存在一些问题。首先,光源自身的辐射稳定性没有经过严格测定,有待深入分析;其次,大气辐射传输过程需要准确地输入光源的发射辐射,受地面光源的类型、位置等因素影响,难以对其进行直接测量,因此只能通过估算的方式给出;另外,这些地面灯光源容易受到其他光源的影响,以跨海大桥为例,来往的车辆川流不息,车灯发出的辐射会干扰路灯辐射,因此限制了这种基于大桥灯光进行微光定标方法的精度水平。

基于地面灯光源的微光定标方法需要使用能够长期稳定工作且直接向天空发射辐射的灯光源。Hu 等^[49]总结了灯光源设计过程中需要满足的关键要求,设计并研制了一套适用于微光定标的地面灯光源,该光源具有一定的辐射强度各向均匀性,并且于 2017 年 5 月 27 日—5 月 29 日新月期间在安徽省明光市东南的大黄寨地区进行了连续三天的微光定标实验,如图 1 所示。对相应的卫星观测数据进行处理,三次实验的相对误差分别是 14.8%、13.4% 和 5.4%。总体而言,基于特制灯光源的微光定标实验结果与目前星上定标结果具有较好的一致性,初步验证了基于特制灯光源的微光定标方案的可行性。

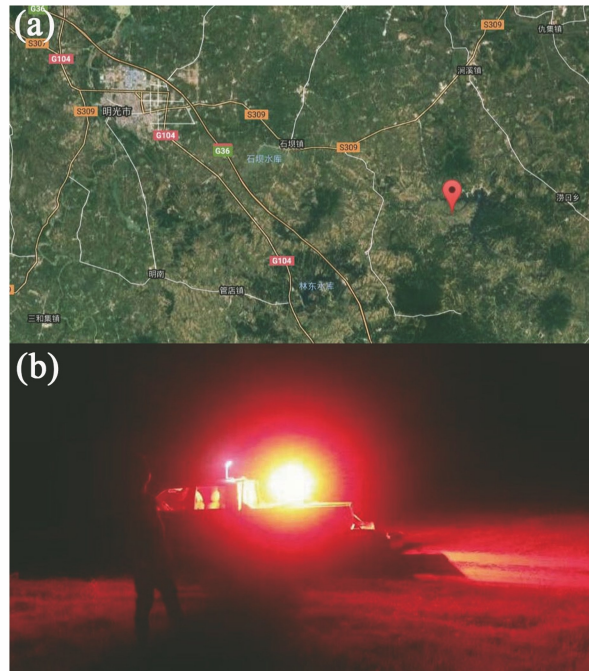


图 1 地面灯光源定标实验^[42]。(a)实验地点;(b)工作场景

Fig. 1 Ground light source calibration test^[42]. (a) Test site; (b) working scene

为了进一步提高定标精度及探索灯光源在业务化辐射定标中的可行性,国防科技大学微光定标团队联合中国科学院安徽光学精密机械研究所设计并研制了基于积分球的外场微光定标灯光源,该光源具有良好的辐亮度各向均匀性以及稳定的发射辐射;推导了目标像元与背景像元之间模拟辐亮度差值的表达式,建立了积分球灯光源工作时灯光辐射向上传输的模型,并提出了一套基于积分球灯光源的微光定标方案,在实验室辐射特性测试分析的基础上,在 2018 年 10 月 6 日—11 月 12 日于敦煌场内开展了连续 38 d 的基于积分球灯光源的微光定标实验,如图 2 所示,计算得到观测辐亮度差值与模拟辐亮度差值的平均相对误差为 -8.30% ,合成不确定度为 8.35% ^[42]。类似地, Ryan 等^[50]研制了一台 TerraVega 积分球灯光源,其自身的辐射稳定性优于 1% ,并针对 S-NPP 卫星和 JPSS-1 (又叫 NOAA-20) 卫星分别进行了三次新月条件下的外场实验,模拟辐亮度与观测辐亮度相差 $1\% \sim 11\%$ 。

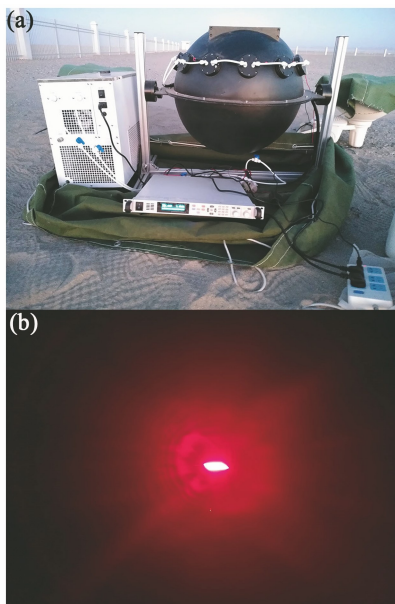


图 2 积分球灯光源定标实验^[42]。(a)实物图;(b)工作场景
Fig. 2 Integrating sphere light source calibration test^[42].

(a) Physical image; (b) working scene

目前,积分球灯光源的稳定性已经达到了非常高的水平,灯光源的主动定标方法理论上可以达到较高的定标精度。但是,目前人们对点光源上行灯光的辐射传输过程还存在认识局限性,尚无直接用于计算到达大气层顶的上行灯光辐射的模型,灯光源方法的定标精度仍然有比较大的提升空间。

4 微光成像仪的应用技术

自从 1973 年 OLS 遥感数据得到解密,夜间微光遥感就凭借其独特的微光通道而成为遥感领域的研究热点。特别是在 S-NPP 卫星发射升空后, DNB 的微光通道数据经过了较为精确的辐射定标,国内外学者利用 DNB 探测数据开展了大量与量化微光遥感相关的研究工作,微光资料展现出了广阔的应用前景^[12, 51-57]。

月亮是夜间天空中最为明亮的自然光源,月光照度(月相角)条件会严重影响微光成像仪对地球上各类目标的成像。如图 3(a)所示,在月相角较小的条件下, DNB 能被用于探测地球上各类目标所反射的月光辐射,如陆地、海洋、冰雪、云雾等,通过反射率的差异来识别目标。当月相角较大时,照射到地球的月光比较微弱,此时地表、云雾等目标在 DNB 处的成像效果相比满月时要差很多,如图 3(b)所示。地面人造灯光源或者大气光源固有的发光能力与月相无关,自身发出的辐射不会受月光变化的影响,因此在黑暗的背景下反而具有更高的信噪比。

4.1 在月相角较小的条件下

在月相角较小的条件下,照射到地球的月光辐射相对较强,典型的 DNB 微光遥感应用包括雪覆盖、低云大雾、海面粗糙度和内波等要素的遥感。

4.1.1 雪覆盖

雪覆盖对于确定大气和地面间的热量交换具有重要的意义。在裸地和云的背景下,白天多光谱卫星观测并识别雪覆盖的能力已经相当成熟,能够进行雪覆盖面积、积雪反照率等要素的遥感监测^[58-61]。但是,夜间雪地上空边界层辐射冷却的加快往往会导致辐射雾的形成,通过可见光手段识别夜间雪覆盖仍然面临着较大的挑战^[62]。由于雪地和无雪背景的温度差异不大,通过热红外图像识别雪覆盖也比较困难。随着微光遥感技术的发展,利用 DMSP/OLS 月光图像,可针对极地地区绘制冬季的冰雪分布情况,同时通过结合其他卫星(如 GOES 卫星)的热红外通道,就能够提供多光谱的夜间雪覆盖资料^[63]。S-NPP/VIIRS 传感器搭载了辐射定标的微光通道,结合自身其他红外通道,具备雪覆盖的定量监测能力^[11, 64]。图 4 是 2018 年 10 月 23 日 20:14 UTC 的 DNB 局部微光图像,可以看出,在青藏高原等高海拔地区存在大范围的雪覆盖,通过相关的定量算法能够提供雪覆盖产品。

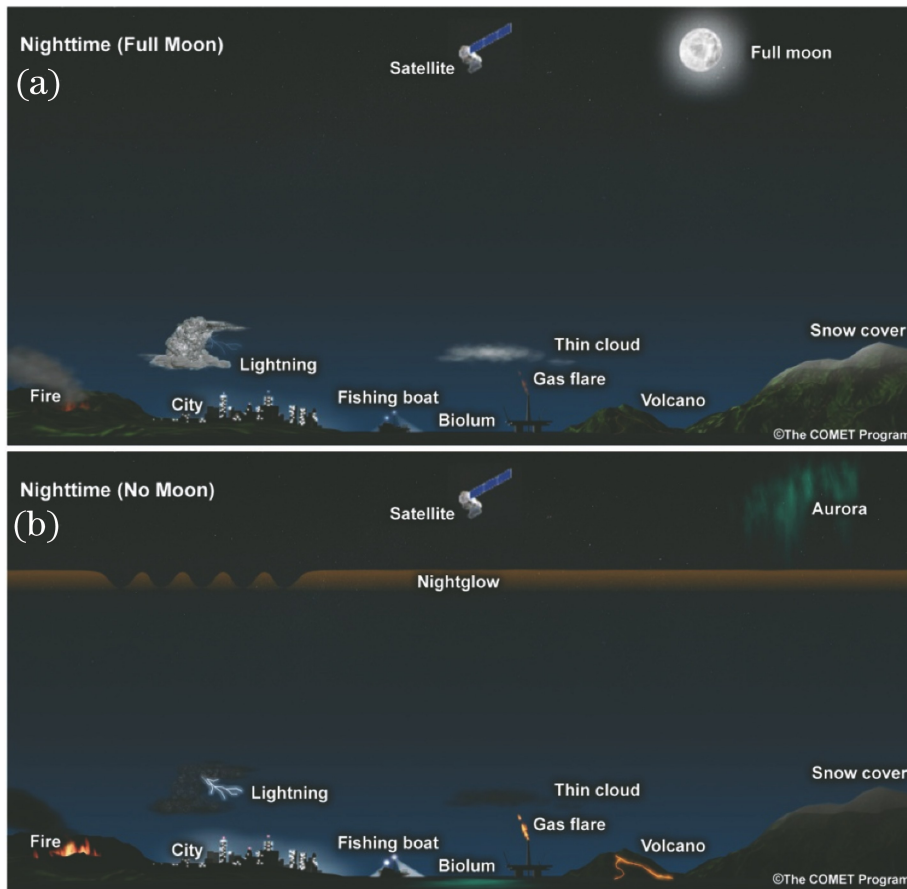


图 3 不同月相条件下的 DNB 探测目标^[19]。(a)月相角较小;(b)月相角较大

Fig. 3 DNB detection targets under different moon phase conditions^[19]. (a) Small moon phase angle; (b) large moon phase angle

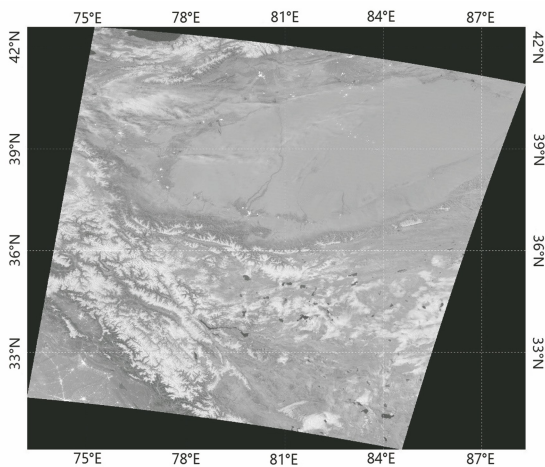


图 4 2018 年 10 月 23 日 20:14 UTC 的 DNB 局部微光图像^[42]

Fig. 4 Partial low-light image of DNB at 20:14 UTC on October 23, 2018^[42]

4.1.2 低云大雾

低云大雾是一种常见的灾害性天气,较低的能见度和较差的空气质量会极大地影响交通运输以及

人们的生产生活^[65]。传统的基于卫星资料的白天低云大雾监测主要是根据低云大雾在光谱、几何、纹理等方面的特征,利用可见光、红外通道的数据来实现与其他目标的区分。理论上,在 $3.7 \mu\text{m}$ 的短波红外通道和 $11 \mu\text{m}$ 的长波红外通道处,低云大雾目标的辐射率相比其他目标有着明显的不同^[66],基于该理论逐渐发展出了低云大雾监测的亮温差值法^[67-70]。由于夜间光照强度非常微弱,在当时的技术条件下,只能在白天太阳光照时加入可见光通道,而夜间低云大雾监测无法利用可见光通道。随着微光技术的发展,DMSP/OLS 以及后面的 VIIRS/DNB 都能探测到夜间地面以及低云大雾目标反射的微弱月光辐射。DNB 微光通道能够提供精确辐射定标的微光数据,在一定月相条件下,低云大雾具有明显的纹理特征,通过结合 VIIRS 的多个红外通道数据,能够实现准确的夜间低云大雾监测^[71-72]。图 5 是 2013 年 1 月 27 日 18:12 UTC 的 DNB 局部微光图像,可以看出,在华北、华中多个省份的上空,存在大范围的低云大雾区域。

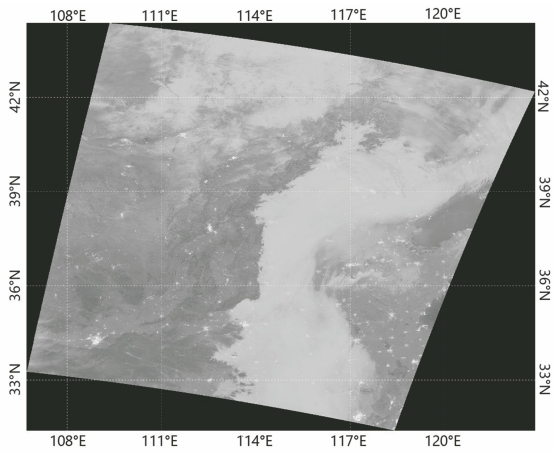


图5 2013年1月27日18:12 UTC的DNB局部微光图像^[42]
Fig. 5 Partial low-light image of DNB at 18:12 UTC on January 27, 2013^[42]

4.1.3 海面粗糙度和海洋内波

在卫星可见光图像中,海洋表面由于其较低的反射率而通常呈现明显的暗色。但是如果特定区域内直接照射的太阳或者月亮光源与观测卫星在位置上呈现近镜像几何关系,卫星观测到的海表反射率就会迅速增大,这种区域就叫做太阳耀光区(Sun Glint)或月亮耀光区^[73-74]。不同于海洋表面强烈的镜面反射,耀光区内大多数陆地表面的镜面反射可以忽略。海洋表面不同的粗糙度会导致目标呈现差异巨大的太阳光(月光)反射率,从而大幅度改变耀光区内部的卫星观测辐亮度。

海洋内波是海洋中普遍存在的一种中小尺度动力过程,通常在海洋内部两个密度分层之间传播,可以延伸至非常远的距离^[75]。内孤立波是海洋内波的一种,能够大幅度影响海面粗糙度,进而影响卫星观测辐亮度。在白天的卫星可见光图像中,利用太阳耀光区能够识别出明暗相间的条纹图案,从而观测到海洋内波的存在^[76-81]。与之类似,在夜间时段利用DNB微光图像,也能够通过月亮耀光区观测到海洋内波^[19,82]。图6是2013年1月30日17:24 UTC的DNB局部微光图像,可以看出,在菲律宾南部的西里伯斯海区域,存在三条明暗相间的暗条纹,这是由于水下内波改变了海面粗糙度,进而出现了月光反射率差异。

4.2 在月相角较大的条件下

在月相角较大的条件下,照射到地球的月光辐射相对较弱,对于自身不发光的的目标而言,夜间的卫星观测辐亮度会变得非常低,而自身能够发光的的目标,包括人造光源和自然光源,就会具有相对较高的夜间观测辐亮度。典型的DNB微光遥感应用包括

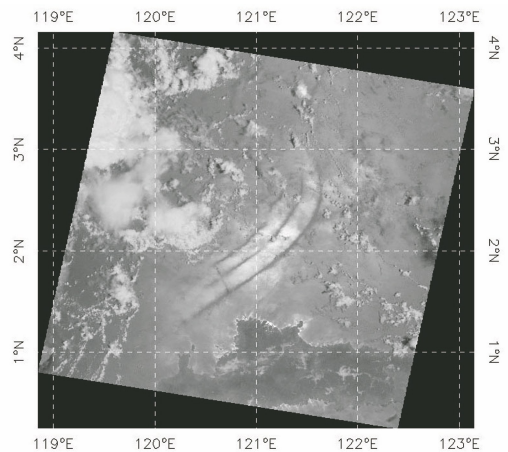


图6 2013年1月30日17:24 UTC的DNB局部微光图像^[42]
Fig. 6 Partial low-light image of DNB at 17:24 UTC on January 30, 2013^[42]

人造灯光、火灾、闪电、气辉和重力波等要素的遥感。
4.2.1 人造灯光

相对于白天可见光图像,夜间微光图像的独特之处就在于人造灯光,夜间微光图像通过一个个孤立或者群聚的亮点,能够很好地表征人造灯光的分布及其强弱。与OLS类似,DNB微光通道能够在全球范围内对人造光源进行监测,从而识别出人类居住地。在月亮光照条件较差的夜晚,来自道路、城市、村镇等光源的辐射在周围黑暗背景的衬托下反而呈现出更明亮的像元点^[1,83]。由于其较高的空间分辨率和精确的辐射定标,DNB微光通道大幅提升了人造灯光监测的能力,图7是2017年5月16日17:39 UTC的DNB局部微光图像,可以观测到长三角地区明亮的城市灯光,在图像右下角甚至还能识别出东海大桥和杭州湾跨海大桥的细长亮线。由

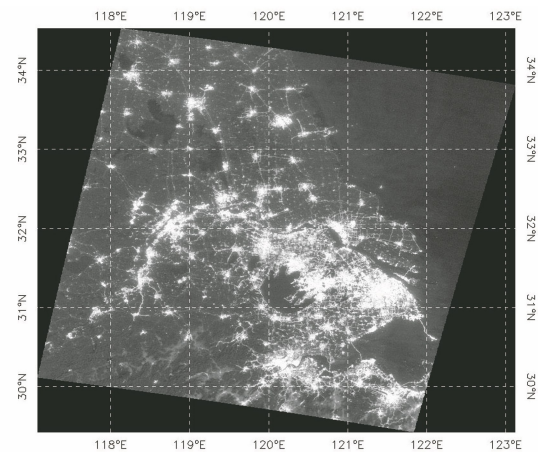


图7 2017年5月16日17:39 UTC的DNB局部微光图像^[42]
Fig. 7 Partial low-light image of DNB at 17:39 UTC on May 16, 2017^[42]

于城市灯光与经济的相关性,夜间城市灯光逐渐被用来衡量城市的发展状况^[12, 84-89],甚至能够根据供电切断导致的夜间灯光减少量来评估自然灾害造成的损失^[90-92]。随着相关需求的发展,目前越来越多的卫星开始搭载微光成像仪载荷^[33-34],其较高的空间分辨率使其具有较精细的人造灯光捕捉能力,微光成像仪在经济社会发展领域具有越来越广泛的应用前景。

4.2.2 火灾

当火灾发生时,目标区域除了具有较高的温度还会有明显的发光。利用静止或者极轨气象环境卫星进行火灾特别是无人区的森林火灾遥感监测具有重要的应用价值,已经被广泛用于灾难预警、空气质量监测、生态和碳循环监测及气候研究^[8, 93]。传统上对热源的监测仅仅是将长波(11.0 μm)和短波红外(1.6 μm 和3.9 μm)通道相结合进行定性分析,这种热红外监测技术并不能分辨出当时燃烧的阶段,也无法确定火线的状态。针对发光特点,白天的火光强度相对于太阳光并没有优势,但是到了夜间火光就会变得非常明显。DNB微光通道能够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发展程度^[94-95]。图8是2018年6月2日18:12 UTC的DNB局部微光图像,可以在图像中央看到内蒙古大兴安岭汗马国家级自然保护区内发生的森林火灾场景,甚至能够看到在火场的西北方向存在大范围的浓烟。

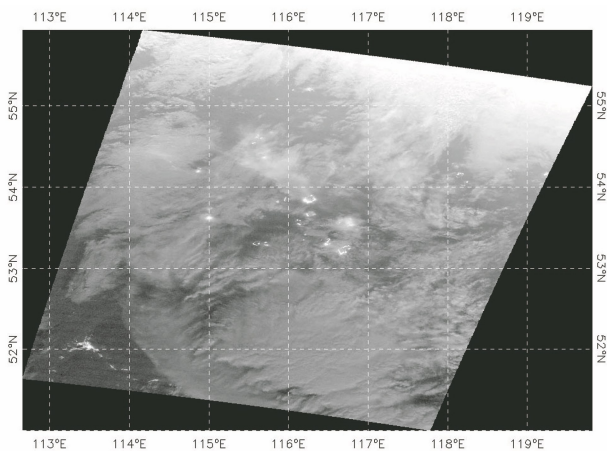


图8 2018年6月2日18:12 UTC的DNB局部微光图像^[42]
Fig. 8 Partial low-light image of DNB at 18:12 UTC on June 2, 2018^[42]

4.2.3 闪电

闪电是云与云之间、云与地之间或者云体内各部位之间的强烈放电现象,同时还会伴有强烈的发光现象。目前常规的闪电监测往往是通过地面闪电

监测站点以及卫星上搭载的专用闪电成像仪来实现。在OLS业务运行过程中,研究人员发现,在夜间闪电发生时,微光图像中往往会有明亮的水平线条出现^[9, 96]。与之类似,尽管DNB微光通道在规划之初并没有针对闪电监测进行专门的设计,但是如果恶劣天气下闪电发生的概率较高且有较长的持续时间^[97],DNB微光通道就可以对闪电在云顶产生的漫射光进行有效的监测。由于DNB微光通道利用16个相邻探测器同时进行扫描,因此观测到的闪电沿着扫描线通常表现为宽度为16 pixel的明亮条带^[98]。图9是2013年4月19日19:18 UTC的DNB局部微光图像,可以看出,在图像下方存在多个由闪电引起的明亮条带。根据闪电的微光图像特征,利用线性滤波器图像增强算法,DNB微光通道可以提供闪电像元的位置、强度等信息。

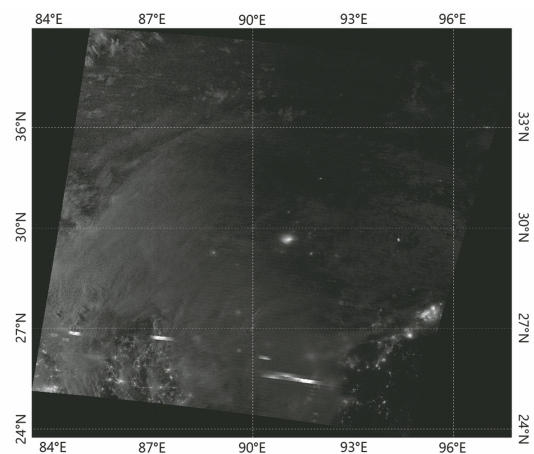


图9 2013年4月19日19:18 UTC的DNB局部微光图像^[42]
Fig. 9 Partial low-light image of DNB at 19:18 UTC on April 19, 2013^[42]

4.2.4 气辉和大气重力波

气辉,也被叫做夜辉,是高层大气中的一些成分,如原子氧、原子钠、分子氧、活跃的氢氧基等,受太阳辐射激发呈现出的微弱发光现象,通常采用地基的气辉探测仪来进行气辉的监测。随着微光成像仪的发展,研究人员发现,DNB夜间微光图像具有足够的灵敏度,可以检测到气辉发射或者反射的辐射。由于气辉的存在,即使在完全剔除了月光、星光和漫射太阳光的影响之后,地球夜晚的天空也不会呈现出绝对的黑暗,在微光图像中也能够识别出明显的气象云团^[99]。

大气重力波是一种大气密度结构的中小尺度扰动现象,重力和浮力效应产生恢复力。无论是区域天气还是全球气候变化,重力波在大气循环中均扮演着重要的角色^[100-103]。重力波产生后,在向高层

大气传播的过程中,会扰乱局部大气的温度和密度,进而调制周围的气辉辐射强度,从而在微光图像中呈现出明暗相间的波纹图像特征^[104-111]。因此,通过分析 DNB 图像中明暗相间的波纹特征,可以实现夜间大气重力波的遥感观测。图 10 是 2014 年 5 月 3 日 19:20 UTC 的 DNB 局部微光图像,可以看出,在青藏高原上空存在较大范围的大气重力波,这种由地形因素引起的重力波在该地区非常普遍。

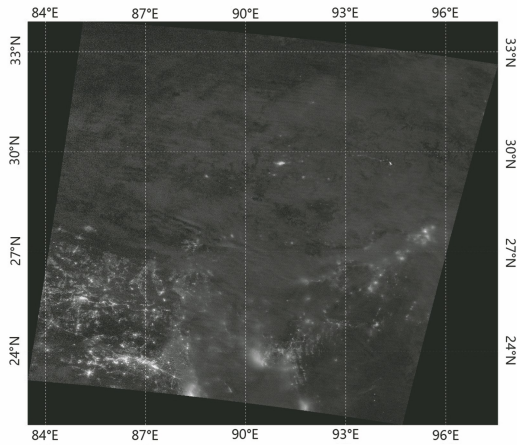


图 10 2014 年 5 月 3 日 19:20 UTC 的 DNB 局部微光图像^[42]

Fig. 10 Partial low-light image of DNB at 19:20 UTC on May 3, 2014^[42]

5 总结与展望

越来越多的对地观测卫星开始搭载微光成像仪,具备夜间微弱光照条件下的探测和成像能力。但是,从 DMSP/OLS 到 VIIRS/DNB 的发展历程来看,微光探测数据能否得到充分应用在很大程度上依赖于载荷探测资料是否得到了精确的辐射定标。提高微光成像仪的夜间辐射定标精度以达到与白天成像仪相近的精度是当前的研究热点,具有一定的挑战性。随着微光成像仪辐射定标精度的提高,对数据精度有较高要求的各类定量遥感应得到迅速发展。

在目前微光成像仪的辐射定标技术中,将深对流云作为替代目标的场地替代定标技术不会受到大气分子和气溶胶的干扰,若开发出更为准确的月亮辐照度模型,就有望取得更高的定标精度。灯光源主动定标方法摆脱了对月光辐射的依赖,借鉴了实验室定标所用的积分球方法,利用了出射辐射已知且各向均匀的积分球灯光源,因此影响辐射定标不确定度的因素相对较少。目前大气辐射传输模式已经能够精确地描述大气对平行光辐射传输的影响,但是对于点光源在大气中的辐射传输还缺少足够的

基础理论研究。

目前出现了一种基于对月成像的微光成像仪辐射定标方法,通过加强地面天文站点的对月观测,建立能够描述月亮辐射的准确模型,然后利用微光成像仪载荷实现直接对月成像,在不经过地球大气的情况下基于对月观测数据开展微光成像仪的辐射定标,有望取得较高的辐射定标精度。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Croft T A. Nighttime images of the earth from space[J]. *Scientific American*, 1978, 239(1): 86-98.
- [3] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(6): 727-734.
- [4] Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C, et al. A technique for using composite DMSP/OLS "city lights" satellite data to map urban area[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(3): 361-370.
- [5] Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, et al. Nighttime lights of the world: 1994-1995 [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 56(2): 81-99.
- [6] Small C, Nicholls R J. A global analysis of human settlement in coastal zones[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(3): 584-599.
- [7] Small C, Pozzi F, Elvidge C D. Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3/4): 277-291.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 Atmospheres*, 1986, 91(A3): 3225-3230.

- [11] Miller S D, Lee T F, Turk J F, et al. Shedding new light on nocturnal monitoring of the environment with the VIIRS day/night band[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5890: 58900W.
- [12] Li D R, Li X. An overview on data mining of nighttime light remote sensing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 591-601. 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. *测绘学报*, 2015, 44(6): 591-601.
- [13] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, et al. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights[J]. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013, 35: 62.
- [14] Mills S, Jacobson E, Jaron J, et al. Calibration of the VIIRS day/night band (DNB)[EB/OL]. [2021-01-22]. https://www.researchgate.net/publication/242595212_Calibration_of_the_VIIRS_daynight_band_DNB.
- [15] Ma S. Research on calibration and application of spaceborne low-level light imager [D]. Nanjing: Army Engineering University of PLA, 2016. 马烁. 星载微光云图成像仪定标及应用技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2016.
- [16] 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.
- [17] Xiong X X, Sun J Q, Esposito J A, et al. MODIS reflective solar bands calibration algorithm and on-orbit performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4891: 95-104.
- [18] Hu X H, Liu S T, Pan Z D, et al. Progress in spaceborne shimmer detector and data application [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 350-359. 胡晓华, 刘松涛, 潘振东, 等. 星载微光探测仪器的发展及其数据应用[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 350-359.
- [19] Miller S D, Straka W III, Mills S P, 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.
- [20] Cao C Y, de Luccia F J, Xiong X X, et al. Early on-orbit performance of the visible infrared imaging radiometer suite onboard the Suomi national polar-orbiting partnership (S-NPP) satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1142-1156.
- [21] Geis J, Florio C, Moyer D, et al. VIIRS day-night band gain and offset determination and performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8510: 851012.
- [22] Lee S, Chiang K, Xiong X X, et al. The S-NPP VIIRS day-night band on-orbit calibration/characterization and current state of SDR products [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12427-12446.
- [23] Lee T F, Nelson C S, Dills P, et al. Npoess: next-generation operational global earth observations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(6): 727-740.
- [24] Lei N, Wang Z P, Guenther B, et al. Modeling the detector radiometric response gains of the Suomi NPP VIIRS reflective solar bands [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8533: 853319.
- [25] Miller S D, Hawkins J D, Kent J, et al. NexSat: previewing NPOESS/VIIRS imagery capabilities [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(4): 433-446.
- [26] Schueler C F, Lee T F, Miller S D. VIIRS constant spatial-resolution advantages [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(16): 5761-5777.
- [27] Schueler C F, Miller S W, Puschell J J, et al. NPOESS VIIRS: design, performance estimates and applications [C] // *The Fourteenth International TOVS Study Conference*, May 25-31, 2005, Beijing, China. [S.l.:s.n.], 2005:389-397.
- [28] Hillger D, Seaman C, Liang C, et al. Suomi NPP VIIRS imagery evaluation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(11): 6440-6455.
- [29] Lee T E, Miller S D, Turk F J, et al. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(2): 191-200.
- [30] Hillger D, Kopp T, Lee T, et al. First-light imagery from Suomi NPP VIIRS [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(7): 1019-1029.
- [31] National Aeronautics and Space Administration. Joint polar satellite system (JPSS) VIIRS radiometric calibration algorithm theoretical basis document (ATBD) [EB/OL]. (2013-05-15) [2020-12-25]. <https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/technical-references/JPSS-ATBD-VIIRS-SDR-C.pdf>.
- [32] 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.
- [33] Xu W, Jin G, Wang J Q. Optical imaging technology of JL-1 lightweight high resolution multispectral remote sensing satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 1969-

1978.
徐伟, 金光, 王家骥. 吉林一号轻型高分辨率遥感卫星光学成像技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 1969-1978.
- [34] 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.
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.
- [35] Hu X Q, Liu J J, Sun L, et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 566-582.
- [36] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, et al. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China aerosol remote sensing network [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(D3): D03206.
- [37] Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, et al. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C meteorological satellite sensors using Qinghai lake, water surface radiometric calibration site [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(5): 328-333, 401.
胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标 [J]. 遥感学报, 2002, 6(5): 328-333, 401.
- [38] Guo J N, Min X J, Fu Q Y, et al. The in-flight absolute calibrations for CBERS-02 CCD and SPOT-4 HRVIR1 sensors at Dunhuang test site and the comparison based on their coefficients [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 624-629.
郭建宁, 闵祥军, 傅俏燕, 等. CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRVIR1 两个传感器的敦煌场地在轨绝对辐射定标及对比分析 [J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 624-629.
- [39] Shao X, Cao C Y, Uprety S. Vicarious calibration of S-NPP/VIIRS day-night band [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8866: 88661S.
- [40] Qiu S, Shao X, Cao C Y, et al. Feasibility demonstration for calibrating Suomi-national polar-orbiting partnership visible infrared imaging radiometer suite day/night band using dome C and greenland under moon light [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(1): 016024.
- [41] Hu S S, Ma S, Yan W, et al. Using two different targets for the calibration of S-NPP VIIRS day night band under lunar illumination [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10255: 102552O.
- [42] Hu S S. Radiometric calibration and application of viirs low-light channel data [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Wang J, Zhou M, Xu X G, et al. Development of a nighttime shortwave radiative transfer model for remote sensing of nocturnal aerosols and fires from VIIRS [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 241: 111727.
- [46] Min M, Zheng J Y, Zhang P, et al. A low-light radiative transfer model for satellite observations of moonlight and earth surface light at night [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 247: 106954.
- [47] Cao C Y, Bai Y. Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring [J]. Remote Sensing, 2014, 6(12): 11915-11935.
- [48] 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.
- [49] Hu S S, Ma S, Yan W, et al. Feasibility of a specialized ground light source for night-time low-light calibration [J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(8): 2543-2559.
- [50] Ryan R E, Pagnutti M, Burch K, et al. The terra Vega active light source: a first step in a new approach to perform nighttime absolute radiometric calibrations and early results calibrating the VIIRS DNB [J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 710.
- [51] Liu Y, Saitoh S I, Hirawake T. Detection of squid and pacific saury fishing vessels around Japan using VIIRS day/night band image [J]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2015, 39: 28.
- [52] Barreto A, Cuevas E, Damiri B, et al. A new method for nocturnal aerosol measurements with a lunar photometer prototype [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(3): 585-598.

- [53] Johnson R S, Zhang J, Hyer E J, et al. Preliminary investigations toward nighttime aerosol optical depth retrievals from the VIIRS day/night band [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(5): 1245-1255.
- [54] Lai C, Yue J, Xu J Y, et al. Suomi NPP VIIRS/DNB imagery of nightglow gravity waves from various sources over China [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(8): 1951-1961.
- [55] McHardy T M, Zhang J, Reid J S, et al. An improved method for retrieving nighttime aerosol optical thickness from the VIIRS day/night band [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4773-4783.
- [56] Wang J, Aegerter C, Xu X G, et al. Potential application of VIIRS day/night band for monitoring nighttime surface PM_{2.5} air quality from space [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 55-63.
- [57] Su C L, Su L, Chen L F, et al. Retrieval of aerosol optical depth using NPP VIIRS data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(6): 977-982.
苏城林, 苏林, 陈良富, 等. NPP VIIRS 数据反演气溶胶光学厚度 [J]. *遥感学报*, 2015, 19(6): 977-982.
- [58] Allen R C, Jr, Durkee P A, Wash C H. Snow/cloud discrimination with multispectral satellite measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(10): 994-1004.
- [59] Miller S D, Lee T F, Fennimore R L. Satellite-based imagery techniques for daytime cloud/snow delineation from MODIS [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(7): 987-997.
- [60] Zhang Y Z, Yan S, Lu Y. Snow cover monitoring using MODIS data in Liaoning province, northeastern China [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(3): 777-793.
- [61] Chokmani K, Bernier M, Royer A. A merging algorithm for regional snow mapping over eastern Canada from AVHRR and SSM/I data [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11): 5463-5487.
- [62] Tardif R, Rasmussen R M. Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City region [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(6): 1681-1703.
- [63] 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.
- [64] Miller S D, Schmidt C C, Schmit T J, et al. A case for natural colour imagery from geostationary satellites, and an approximation for the GOES-R ABI [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(13): 3999-4028.
- [65] Zhou X K, Yan W, Bai H, et al. Detection of heavy fogs and low clouds during nighttime using DMSP-OLS data [J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(6): 86-90.
周小珂, 严卫, 白衡, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的夜间低云大雾监测技术研究 [J]. *遥感信息*, 2012, 27(6): 86-90.
- [66] Hunt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1973, 99(420): 346-369.
- [67] Eyre J R, Brownscombe J L, Allan R J. Detection of fog at night using advanced high resolution radiometer (AVHRR) imagery [J]. *Meteorological Magazine*, 1984, 113(1346): 266-271.
- [68] Bendix J. A case study on the determination of fog optical depth and liquid water path using AVHRR data and relations to fog liquid water content and horizontal visibility [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(3): 515-530.
- [69] Ellrod G P. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery [J]. *Weather and Forecasting*, 1995, 10(3): 606-619.
- [70] Lee T F, Turk F J, Richardson K. Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9- μm data [J]. *Weather and Forecasting*, 1997, 12(3): 664-677.
- [71] Jiang J, Yan W, Ma S, et al. Three cases of a new multichannel threshold technique to detect fog/low stratus during nighttime using SNPP data [J]. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(6): 1763-1780.
- [72] Hu S S, Ma S, Yan W, et al. A new multichannel threshold algorithm based on radiative transfer characteristics for detecting fog/low stratus using night-time NPP/VIIRS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5919-5933.
- [73] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [74] Zhang Z B, Liu L S, Liu C Y, et al. Studies on the sea surface microlayer: II. the layer of sudden change of physical and chemical properties [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 264(1): 148-159.
- [75] Stanton T P, Ostrovsky L A. Observations of highly nonlinear internal solitons over the

- continental shelf[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2695-2698.
- [76] Fett R, Rabe K. Satellite observation of internal wave refraction in the South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 1977, 4(5): 189-191.
- [77] Li X F, Jackson C R, Pichel W G. Internal solitary wave refraction at Dongsha Atoll, South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12): 3128-3132.
- [78] Bai X L, Liu Z Y, Li X F, et al. Generation sites of internal solitary waves in the southern Taiwan Strait revealed by MODIS true-colour image observations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 4086-4098.
- [79] Liu B Q, Yang H, Ding X W, et al. Tracking the internal waves in the South China Sea with environmental satellite sun glint images[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(7): 609-618.
- [80] Liu B Q, Yang H, Zhao Z X, et al. Internal solitary wave propagation observed by tandem satellites[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 2077-2085.
- [81] Zhao Z X, Liu B Q, Li X F. Internal solitary waves in the China seas observed using satellite remote-sensing techniques: a review and perspectives [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 3926-3946.
- [82] Hu S S, Ma S, Yan W, et al. Measuring internal solitary wave parameters based on VIIRS/DNB data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(20): 7805-7816.
- [83] Li D R, Zhao X, Li X. Remote sensing of human beings: a perspective from nighttime light[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2016, 19(1): 69-79.
- [84] Shi K F, Huang C, Yu B L, et al. Evaluation of NPP-VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(4): 358-366.
- [85] Bennett M M, Smith L C. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 176-197.
- [86] Ma T, Zhou C H, Pei T, et al. Responses of Suomi-NPP VIIRS-derived nighttime lights to socioeconomic activity in China's cities[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(2): 165-174.
- [87] Mackin K J, Asanuma I, Yamaguchi T, et al. Island-building activities detected by DNB on South China sea[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 23-28, 2017, Fort Worth, TX. New York: IEEE Press, 2017: 2983-2986.
- [88] Shi K F, Yu B L, Hu Y J, et al. Modeling and mapping total freight traffic in China using NPP-VIIRS nighttime light composite data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2015, 52(3): 274-289.
- [89] Yu B L, Shi K F, Hu Y J, et al. Poverty evaluation using NPP-VIIRS nighttime light composite data at the county level in China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 1217-1229.
- [90] Cao C Y, Shao X, Uprety S. Detecting light outages after severe storms using the S-NPP/VIIRS day/night band radiances [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1582-1586.
- [91] Qiu S, Cao C Y, Zhang B, et al. Feasibility study of remote sensing using structured light for 3D damage assessments after natural disasters [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9263: 92632R.
- [92] Skoufias E, Strobl E, Tveit T. Natural disaster damage indices based on remotely sensed data: an application to Indonesia[M]. Washington, D. C. : World Bank, 2017.
- [93] Fuller D O, Fulk M. Comparison of NOAA-AVHRR and DMSP-OLS for operational fire monitoring in Kalimantan, Indonesia [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(1): 181-187.
- [94] Elvidge C, Zhizhin M, Hsu F C, et al. VIIRS nightfire: satellite pyrometry at night[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(9): 4423-4449.
- [95] Csiszar 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.
- [96] Orville R E. Global distribution of midnight lighting: September to November 1977[J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(2): 391-395.
- [97] Norinder H. Duration of lightning strokes and occurrence of multiple strokes[J]. *Tellus*, 1950, 2(1): 24-34.
- [98] Bankert R L, Solbrig J E, Lee T F, et al. Automated lightning flash detection in nighttime visible satellite data[J]. *Weather and Forecasting*, 2011, 26(3): 399-408.
- [99] Ingham M F. The light of the night sky and the interplanetary medium[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1971, 34(3): 875-912.

- [100] Alexander M J, Holton J R, Durran D R. The gravity wave response above deep convection in a squall line simulation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 52(12): 2212-2226.
- [101] Alexander M J, Barnet C. Using satellite observations to constrain parameterizations of gravity wave effects for global models[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(5): 1652-1665.
- [102] Alexander M J, Teitelbaum H. Observation and analysis of a large amplitude mountain wave event over the antarctic peninsula [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D21): D21103.
- [103] Yue J, Hoffmann L, Alexander M J. Simultaneous observations of convective gravity waves from a ground-based airglow imager and the AIRS satellite experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(8): 3178-3191.
- [104] Vadas S L, Yue J, She C Y, et al. A model study of the effects of winds on concentric rings of gravity waves from a convective plume near Fort Collins on 11 May 2004 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D6): D06103.
- [105] Yue J, Vadas S L, She C Y, et al. Concentric gravity waves in the mesosphere generated by deep convective plumes in the lower atmosphere near Fort Collins, Colorado [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D6): D06104.
- [106] Miller S D, Straka W C, Yue J, et al. Upper atmospheric gravity wave details revealed in nightglow satellite imagery [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(49): E6728-E6735.
- [107] Yue J, Miller S D, Hoffmann L, et al. Stratospheric and mesospheric concentric gravity waves over tropical cyclone Mahasen: joint AIRS and VIIRS satellite observations [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, 119: 83-90.
- [108] Azeem I, Yue J, Hoffmann L, et al. Multisensor profiling of a concentric gravity wave event propagating from the troposphere to the ionosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(19): 7874-7880.
- [109] Azeem I, Barlage M. Atmosphere-ionosphere coupling from convectively generated gravity waves [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(7): 1931-1941.
- [110] Xu K, Yao Z G, Han Z G, et al. Recent process in near-space gravity wave analysis based on satellite measurements [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(1): 66-74.
徐凯, 姚志刚, 韩志刚, 等. 临近空间重力波强扰动的卫星观测研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2017, 32(1): 66-74.
- [111] Hu S S, Ma S, Yan W, et al. Measuring gravity wave parameters from a nighttime satellite low-light image based on two-dimensional stockwell transform [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(1): 41-51.