

## 星载微光探测仪器的发展及其数据应用

胡晓华<sup>1\*</sup>, 刘松涛<sup>1</sup>, 潘振东<sup>1</sup>, 石立坚<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军61741部队, 北京100094;

2. 国家卫星海洋应用中心, 北京100081)

**摘要:**星载微光探测仪器可以在低照度条件下获取可见光至近红外谱段的云图及地面特征资料,是监测夜间和晨昏时段低云大雾的最有效手段。本文介绍了星载微光探测原理;综述了国内外星载微光探测仪器的发展历程,对其卫星系统、仪器技术指标、成像关键技术、数据特点等做了详细论述;最后总结了星载微光探测技术在低云大雾监测、城市灯光和火情监测、烟雾和尘埃监测等方面的应用,它可为我国气象卫星发展相近载荷起到借鉴作用,并完善和丰富我国现有的气象业务观测体系。

**关键词:**微光探测仪器;数据应用;星载

**中图分类号:**TP73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20150803.0350

## Progress in spaceborne shimmer detector and data application

HU Xiao-hua<sup>1\*</sup>, LIU Song-tao<sup>1</sup>, PAN Zhen-dong<sup>1</sup>, SHI Li-jian<sup>2</sup>

(1. No. 61741 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Beijing100094, China;

2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing100094, China)

\* Corresponding author, E-mail: x. h. hu@163. com

**Abstract:** Spaceborne shimmer detector can get satellite cloud image from visible to near-infrared wave band and the earth's surface character data in low-light condition, and it is the most effective instrument for detecting the low clouds and heavy fog during nighttime and twilight. This paper introduces the principle of spaceborne shimmer detection. Then, it reviews the recent development of spaceborne shimmer detector in home and abroad, and describes its satellite system, instruments' technical target, key imaging technology and data character. Finally, it discusses some applications of spaceborne shimmer technology in city light and wildfire detection, cloud and fog detection, dust and smoke detection and so on. Spaceborne shimmer technology can provide a platform for Chinese meteorologic satellite development, and could increase and broaden the method of weather observation.

**Key words:** shimmer imaging detector; data application; spaceborne

## 1 引言

发生于夜间和晨昏时段等低照度条件下的低云大雾天气,严重影响航空、航海、公路运输安全<sup>[1]</sup>。此外,低云大雾对发生于夜间和晨昏时段的军事行动也有重要影响,敌我双方都十分关注该时段气象条件。因此,识别云雾的发生、消散时间和扩展范围等,对预防交通事故、维护人民生命财产安全、保障军事行动等具有重要意义<sup>[2]</sup>。然而可见光成像设备需要一定的光照条件,在夜间和晨昏时段等低照度条件下因没有足够的反照能量而无法成像。红外探测器利用云和地表热辐射亮温成像,在低照度条件下不易区分温度接近的地表和低云大雾。高灵敏度的微光探测器,可在低照度条件下获取可见光至近红外谱段的云图和地面特征资料,是监测夜间和晨昏时段低云大雾的最有效手段<sup>[3]</sup>。

目前世界上有两个有效载荷可用于微光云图探测,分别是搭载于美国国防气象卫星(DMSP)Block上的业务线扫描系统(OLS)<sup>[4]</sup>和搭载于美国“国家极轨业务环境卫星系统准备项目”(NPP)上的可见光红外成像仪/辐射计组(VIIRS)<sup>[5]</sup>。我国只研制了可在1/4月光甚至星光照度条件下成像的微光相机工程样机<sup>[3]</sup>。本文介绍了星载微光探测原理;对星载微光探测仪器的卫星系统、仪器技术指标、成像关键技术、数据特点等做了详细论述;分析了星载微光探测技术在低云大雾监测、城市灯光和火情监测、烟雾和尘埃监测等方面的应用。

## 2 星载微光探测原理

月光、星光和大气辉光等微弱的“可见”光统称微光<sup>[4]</sup>。微光云图成像技术指夜间和晨昏等低照度条件下获取可见光图像的相关技术。星载微光探测器基本上都是对探测目标物反射的月亮/星光辐射进行探测的。

月亮本身并不是有效的发光体,它主要是反射太阳光的辐射。经月亮反射来照射地表和云层的太阳辐射的总量取决于月相和月亮在天空中的

高度。月亮的辐射并不是简单的与照明部分成线性关系的函数,这主要是因为月表的凹凸不平而产生的阴影的存在,而这种阴影在满月照射下可以被最大限度地削弱,满月下的辐射强度大约是1/4或者3/4月相时的9倍。相较于地球来说,月亮并不是太阳辐射能量的有效反射体,它的反射率与地球比起来大约是0.07:0.39<sup>[5]</sup>。

由于存在着许多影响月地之间辐射的因素,因而真正详细地去阐述这个过程是十分复杂的。夏天,满月的高度角很低,这使得满月在天空中总是处在与太阳相反的方向,冬天,北纬45°地区正午的太阳大约在南水平线向上22°的地方,但是午夜月亮的高度角却平均在南面水平线向上约68°。因此可以得出结论,月亮辐射在太阳辐射最弱的冬季可达到最强。在冬天,冰雪覆盖地表的不均匀和阴影的存在会使白天可见光成像受到影响,而这些问题在晚上将会很容易得到解决,因此夜间成像也比较清晰。太阳在赤道附近的纬度间的震荡是以年为周期,相类似地,月亮的这种纬度间的震荡是月周期。因此在一个时期月亮的高度变化要比太阳明显的多。这意味着,在较短的一段时期,夜间的辐射即使是在地表特征不发生变化的情况下也会有明显的变化,同时,阴影的位置和其他地形因素也会发生变化。在南北极的夜晚,月亮会24h都处在水平线上方,这就是极夜现象,对这些地区夜间成像的研究就显得很有意义<sup>[6]</sup>。

星载微光探测技术是研究在低光照条件下景物信息的转换、增强和应用于空间观察的光机电一体化技术,其成像效果与探测仪器的信号转换、场景的照明条件及景物的反射率分布等因素有关。微光探测对成像仪器提出了更高的技术要求,如在可见光、近红外通道有很高的探测灵敏度和动态范围( $10^5$ 数量级以上);探测通道波段不能取得太窄等。

## 3 星载微光探测仪器的研究进展

美国从20世纪60年代开始发展国防气象卫星,其搭载的OLS逐步完善,实现了微光云图探测的业务化应用,其夜间微光通道可获取1/4月

光照射和晨昏条件下可见光图像,一定程度上弥补了传统夜间可见光通道无法探测的缺点。美军气象保障人员利用 OLS 云图识别云类、云型和晴空区,确定对军事行动有严重影响的天气系统的位置、范围和强度,确定高空急流、槽脊位置、可能的积冰区和晴空湍流区。这些信息,对保障美陆、海、空军的作战行动、电光武器和导弹等高技术武器的使用都是十分重要的。此外,OLS 还可以对夜间城市灯光和明火等实施探测<sup>[7]</sup>。

在 OLS 的基础上发展了 VIIRS,其微光通道 DNB(Day/Night Band) 的辐射动态范围很大,可以达到  $10^7$  量级。DNB 与 OLS 相比有以下改进:(1)减少了像元饱和情况的发生;(2)具有更小的瞬时视场,减少了空间图像的模糊程度;(3)与其它通道共用一套光学和扫描装置,可精确获知各波段像元的相对定位;(4)增加辐射订正功能,以得到更高的辐射分辨率;(5)提高空间分辨率,消除交叉像素的尺寸变化。DNB 采用了与其他波段相同精度的辐射校正方法,因此可与其它通道融合使用,这是相比 OLS 最大的优势。OLS 和 VIIRS 具体指标对比见表 1。

表 1 OLS 和 VIIRS 指标对比  
Tab.1 Comparison of OLS and VIIRS technical targets

仪器名	OLS	VIIRS
卫星名	DMSP	NPOESS
轨道高度/km	833	824
运行周期/min	102	102
降交点时间	06:00am,10:30am	13:30 pm
幅宽/km	3 000	3 040
工作波段/ $\mu\text{m}$	0.4~1.1(可见光)	22 个波段
	0.4~0.95(微光)	其中微光
	10.0~13.4(红外)	0.5~0.9
空间分辨率/m	2700(粗)	740(M)
	550(精)	370(I)
微光动态范围	$1 \times 10^{-9} \sim$	$4 \times 10^{-9} \sim$
$\text{W}/\text{cm}^2 \text{sr} \cdot \mu\text{m}$	$7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-2}$
量化等级	6 bit(可见光、微光)	14 bit(高增益)
	8 bit(红外)	13 bit(中、低增益)

注:“M”表示中等分辨率(Moderate resolution)级,“I”表示成像分辨率(Imaging resolution)级。

我国目前在轨运行的气象卫星只能获取白天可见光云图和昼夜红外云图,没有微光云图成像仪。中科院上海技术物理研究所和航科集团 508 所都完成了微光相机的预研工作,并研制了工程样机,可在 1/4 月光甚至星光照度条件下成像<sup>[3]</sup>。

### 3.1 OLS

OLS 是 DMSP 上最重要和最基本的一台遥感仪器。DMSP 卫星采用 06:00am 轨道和 10:30am 轨道的双星运行体制,每 6 小时可提供一次全球云图,整个卫星系统一天能提供全球黎明、白天、黄昏和夜晚 4 个时段的观测数据。OLS 可以获取夜间 1/4 月光和白天可见光云图,以及昼夜红外云图,用于全天候测量云层或陆地的反射和发射特性,是美军全球气象中心云分析系统的主要信息源,也是美国国防部主要的气象信息源。其主要特点是探测通道的宽波段、高动态范围、微光通道以及采用摆镜正弦扫描方式等。DMSP 和 OLS 的外形如图 1 所示。

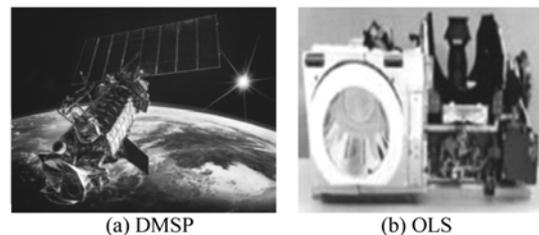


图 1 DMSP 及 OLS 外形图

Fig.1 Layout of DMSP and OLS

#### 3.1.1 仪器主要技术特点

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。扫描镜采用摆镜正弦扫描成像工作模式,每条扫描线 1 465 个像元,可以保证扫描线上的地面分辨率基本一致。光学系统采用 Cassegrain(卡塞格伦天线)结构,有效口径为 203 mm,焦距为 1 220 mm,扫描角为  $\pm 56.25^\circ$ 。其主要技术特点如下:

(1)采用光学倍增管提高微光探测灵敏度。

OLS 有两个通道:可见光、近红外通道( $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ )和热红外通道( $10.0 \sim 13.4 \mu\text{m}$ )。OLS 在可见光波段有 2 套探测器:光学望远镜和光学倍增管(PMT),光学倍增管灵敏度高,可以在微

弱的月光下工作。白天使用光学望远镜,入瞳单位波长辐亮度为  $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ W/cm}^2 \text{ sr} \cdot \mu\text{m}$ ,星下点分辨率有 0.55 和 2.7 km 两档;夜间使用 PMT,入瞳单位波长辐亮度允许低至  $10^{-5} \sim 10^{-9} \text{ W/cm}^2 \text{ sr} \cdot \mu\text{m}$ ,星下点分辨率 2.7 km<sup>[7]</sup>。

OLS 夜间微光探测通道采用的 Pn 结光电倍增二极管,可有效减少噪声,并保证相应电流与辐照功率的严格线性关系,工作温度为  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。光电倍增管技术保证其微光探测通道对地球低照度目标的高灵敏度探测,可以在夜晚部分月光环境下探测云层、覆盖、烟尘、海冰和陆地地表环境等。

由于带宽的限制,OLS 的两个通道不能同时都达到 0.55 km 的分辨率,由卫星测控人员根据季节因素和地理位置决定哪个通道采用高分辨率。一般来说,红外通道在夜晚分辨率高,白天分辨率低,而可见光通道相反<sup>[8]</sup>。

(2) 采用动态增益方法满足大动态范围。

为了适应较大的光照范围差异,OLS 使用了自动增益调节,增强了接收到的夜间微光信号,这样就可以探测较低的光线辐射,如夜间火场、熔岩流和气体耀斑等。这些措施有效扩大了仪器在夜间成像的能力。

OLS 的增益会随着背景照度的变化进行自动调整。月球运转周期以及月球高度不同引起背景照度的变化,最小的放大倍数出现在满月时,这时的图像类似于白天可见光波段的图像。随着月光照度减小,放大倍数逐渐增大,在月亮周期中月光最暗的晚上,增益系数达到最大值 60 dB。然而,在夜间,上述的空间分辨率往往是很难达到的,这个问题形成的主要原因就是由于 OLS 扫描的瞬时视场要比传感器实际的扫描视场大,造成了像元的交迭,降低了分辨率,使得图像细节丧失。为了解决这个问题,采用了大量方法使得 OLS 传感器瞬时视场随着扫描角度的变化而发生变化。为了能在夜间低照度情况下成像,要求 OLS 传感器有很大的动态范围,它的最高值出现在测量的白天地表或云表的太阳光反射时,稍小的动态范围允许传感器在夜间满月情况下测量,而动态范围的最小值则可以使得传感器能在部分月亮照射或是月亮的高度角比较低的情况正常成像。为了满

足动态范围的这种大跨度,对 OLS 采用了动态增益的方法将观测数据进行归一化<sup>[5]</sup>。

### 3.1.2 数据存储格式及使用

从卫星传输下来的资料由国家地球物理资料中心(NGDC)存档。OLS 上的数据存储共有 3 种形式:(1)热红外探测器全天候采集的高分辨率数据;(2)白天采集的可见光高分辨率数据。其分辨率理论上可以达到 0.55 km,但是因为卫星过地面站的时间限制(一般为 10 min),不能将所有的高分辨率数据同时下传,只能通过平滑处理,分辨率降低到 2.77 km;(3)夜间平滑处理的热红外和可见光探测数据。在晚间可以通过高灵敏度的 PMT 得到平滑模式下的可见光数据。

OLS 夜间微光波段是应用中开发较少的一个载荷。原因是:(1)实时 OLS 数据限于美国国防部应用,对外开放较少;(2)OLS 成像灰度级较少,可见光和微光通道图像可被分成 64 灰度级(量化等级为 6 bit),红外通道图像则可分为 256 灰度级(量化等级为 8 bit),而与之相比作为标准辐射计的 NOAA 的 AVHRR,其科学观测数据可以分成 1 024 灰度级(量化等级为 10 bit);(3)OLS 缺少在轨精度校准,而且辐射测量分辨率较为粗略,这就限制了其在定量环境分析上的应用;(4)不同波段数据的分辨率不同,使得判读产品较为复杂。在实际使用中,将微光通道和红外通道的数据融合起来效果会好一些。

## 3.2 VIIRS

VIIRS 继承了 OLS 在夜晚微光探测的能力。VIIRS 搭载于 JPSS 的试验星 NPP 上,是目前最先进的星载探测系统。除 OLS 外,VIIRS 还继承、发展和集成了 NOAA 系列卫星上的先进甚高分辨率辐射计(NOAA/AVHRR)以及地球观测系统的中分辨成像光谱仪(EOS/MODIS)<sup>[9]</sup>。

美国政府于 1994 年 5 月批准实施国家极轨业务环境卫星系统计划(NPOESS),它计划将商务部的极轨业务环境卫星(POES)和 DMSP 整合,负责向军民双方提供气象信息。后来受经费、管理等影响,NPOESS 计划于 2010 年 2 月取消,转变成由美国国防部负责的国防气象卫星系统(DWSS),以及由美国 NOAA 和 NASA 共同负责

的联合极轨卫星系统(JPSS)。JPSS的试验星Suomi NPP卫星于2011年10月28日成功发射,采用降轨方式运行,一天绕地运行约14圈,可以观察地球表面两次,卫星的重复周期(重新回到原来位置)为16天,数据由NOAA的国家数据中心(National Data Centers)发布,其格式采用HDF5。Suomi NPP卫星设计寿命为7年,其后的JPSS-1预计于2017年发射。

VIIRS传感器继承了OLS的微光夜视功能并做了进一步地优化改进<sup>[10]</sup>。VIIRS由SeaWiFS前光学仪和全反射修正的MODIS/THEMIS后光学仪结合组成。短波段通道用一个太阳光散射体来定标;热红外通道用一个黑体辐射源和外太空观测定标。VIIRS空间分辨率较高,且随着远离星下点位置有控制的减小;制造和运行成本较低;通道数量较多。VIIRS集成了当代最先进的观测研究体系用来发展未来的遥感探测。图2是NPP及VIIRS的外形图。

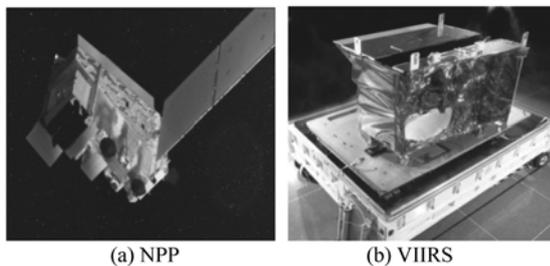


图2 NPP及VIIRS外形图  
Fig.2 Layout of NPP and VIIRS

### 3.2.1 VIIRS 仪器特征

VIIRS共有22个通道:9个可见/近红外通道(0.4~0.9 μm),1个白天/黑夜通道(DNB, 0.7 μm),8个短波/中波红外通道(1~4 μm),4个长波红外通道(8~12 μm)。VIIRS有3个焦平面阵列(FPA):9个可见光/近红外通道和微光波段DNB共用1个FPA;8个短波和中波红外通道使用1个FPA;4个长波红外通道使用1个FPA。后两个FPA通过辐冷控制工作温度保持在80K。VIIRS的空间分辨率可分为“M”级和“I”级两种,M级为740 m左右,I级为370 m左右。7个通道采用了多增益技术,这样可以根据所拍摄地物辐射亮度的不同来自动选择增益。具体通

道指标见表2。

表2 可见光红外成像辐射仪的通道设置

Tab.2 Bands' setting of VIIRS			
波段/ 增益	中心波 长/μm	星下点分辨率 沿轨×跨轨/km	主要用途
M1/双	0.412	0.742×0.259	海洋水色、气溶胶
M2/双	0.445	0.742×0.259	海洋水色、气溶胶
M3/双	0.488	0.742×0.259	海洋水色、气溶胶
M4/双	0.555	0.742×0.259	海洋水色、气溶胶
I1/单	0.640	0.371×0.387	成像、植被指数
M5/双	0.672	0.742×0.259	海洋水色、气溶胶
M6/单	0.746	0.742×0.776	大气校正
I2/单	0.865	0.371×0.387	植被指数
M7/双	0.865	0.742×0.259	海洋水色、气溶胶
DNB/多	0.700	0.742×0.742	成像
M8/单	1.24	0.742×0.776	云粒子大小
M9/单	1.38	0.742×0.776	卷云、云覆盖
M10/单	1.61	0.742×0.776	雪量
I3/单	1.61	0.371×0.387	雪图
M11/单	2.25	0.742×0.776	云
M12/单	3.70	0.742×0.776	海面温度
I4/单	3.74	0.371×0.387	成像、云
M13/双	4.05	0.742×0.259	海面温度、火灾
M14/单	8.55	0.742×0.776	云顶性质
M15/单	10.76	0.742×0.776	海面温度
I5/单	11.45	0.371×0.387	云成像
M16/单	12.01	0.742×0.776	海面温度

VIIRS在可见光波段探测上进行较大的改进,可以在更宽的光照等级上进行探测或成像,更精细地探测大气、海洋、陆地表面等全球环境,形成海洋表面温度、海洋水色分布、海冰海浪、大气温度湿度、覆雪植被等产品示例。

### 3.2.2 VIIRS 微光探测波段 DNB

VIIRS继承了OLS在夜晚微光探测的能力,在其22个探测波段中包含一个微光波段(DNB)。DNB采用250阶TDI CCD探测器扫描阵列,可以探测1/4月光的目标,星下点分辨率742 m,其中心波长为0.7 μm,整个通道范围为0.5~0.9 μm,采用了多增益技术。

VIIRS的DNB日夜型成像仪采用摆扫形式成像,其探测器采用多片器件的焦面集成实现了超大动态范围的探测性能:使用不同灵敏度和不

同级数的3片TDICCD分别用于夜间和晨昏成像,将整个测量动态范围分成3段(最灵敏段、中等灵敏段、最不灵敏段)。白天成像使用的灵敏度最低的CCD,器件上加有1片35倍的中性滤光片。4片不同的CCD都集成在同一片器件上。其主要技术特点如下:

(1)采用采样合并、像元累积的方法使空间分辨率提高且分辨率较均匀。

CCD的敏感区由多个探测像元组成,CCD使用采样合并的方式将沿轨和跨轨各个探测像元的信号累积起来,使得在MODIS中发现的积分拖影现象有所缓解,空间分辨率得到了提高。CCD采集地面辐射场景时可调整瞬时视场角(IFOV),将IFOV设置为仪器扫描角的函数,在星下点的时候IFOV稍大,到了扫描边缘处IFOV则变小,这样使VIIRS对地的有效探测分辨率在整个飞行轨迹都达到742 m,输出图像的锐度保持一致。因此,与OLS的光滑模式相比,DNB分辨率(每单位区域的像素)的提高在近天底处为14倍(VIIRS为0.74 km,OLS为2.8 km),边缘处为53倍(OLS为5.4 km)。分辨率为常数是以离天底时信噪比减低为代价的。但是即使在边缘处,信噪比性能也超过了指标要求。这一改进使得刈幅边缘区域数据的观测精度有较大提高、数据可用性得到了巨大的提升。

(2)可选择动态增益技术使卫星在不同光照条件下都能得到优质图像。

DNB在轨道的阴影期和光照期都可以探测地物和大气可见光辐射。在一个轨道周期内辐射能量动态范围很大,为了满足较高辐射分辨率的要求,DNB将探测辐射能量的变化区分为7个量级,同时以3种模式(低辐射场景模式、中辐射场景模式和高辐射场景模式)进行探测。它采用动态调整增益的方法,即高增益(对应于低辐射场景)、中增益(对应于中辐射场景)和低增益(对应于高辐射场景),增益比达到119 000:447:1;同时每个增益模式将所包含的辐射能量又细分为500:1。这样细致的划分能够涵盖宽探测辐射场景能量范围。高增益情况下的量化等级为14 bit,中增益和低增益为13 bit。DNB信息处理器将

3种模式所测得的数据进行高精度的数字化处理,确保产品辐射的高分辨率,然后再对3个数据进行选择,具体就是在随后的逻辑电子调制过程中,DNB逐像素地进行选择,对每一个像素选择3种增益模式中感光效果最好的值,同时也是像元在这个增益模式没有达到饱和的情况。这种探测方式要求每个象素点保持整个DNB通道的动态范围,才能使亮目标相对于黑暗背景的情况不会发生象素饱和。按照这种均一对比度理想化的设置数据,可以使整个场景图像看起来像在均匀的光照条件下所成,在不同的光照条件下都能得到优质的图像。

(3)与其它通道共用光学和扫描装置,并采用相同精度的订正方法。

DNB可以看作是一个和VIIRS的其他波段共用光学设备和扫描装置的聚焦平面阵列,相对于单个的DNB传感器而言,这样的集成设计可降低系统的复杂性、重量、成本和体积,同时可以精确地获知各波段象元的相对定位,它们地理定位间的距离即使在扫描的边缘也不会超过30 m。DNB采用了与VIIRS其他波段相同精度的订正方法,可以定量地辐射测量并可以与VIIRS的其它光谱波段比较,这样就保证了其在轨长寿命定量应用,且其数据可与其它通道融合使用。

总体来说,DNB使高亮度辐射信号和低动态范围、低SNR信号都得到了准确的复现;在整个扫描范围内都保持了0.74 km的分辨率,给夜间探测带来更大的改善;空间分辨率的提高以及像素的增加还使图像的成像质量(特别是在图像的边缘)得到提高;可选择动态增益使卫星在不同的光照条件下都能得到优质的图像,提高了图像质量和定量应用的准确性;灵敏度的提高使得DNB可以在光照条件很差的情况下探测云、气溶胶等。

## 4 微光数据应用进展

星载的微光探测器基本上都是对探测目标物反射的月亮辐射进行探测的。在夜间,所有反射的地球场景特征都会被收集。在图3(a)中,云、

雾、地表、雪盖、烟/灰等都是很容易通过月光反射被识别的;光源(例如火、亮光、城市灯光、废气燃烧器、渔船、火山流)也会被观测到。但是,当1/4月光或更低光照条件时,需要照明才能看到的一些现象将变得很难探测到,当没有月光时将会一起消失(图3(b)所示)<sup>[5]</sup>。微光探测器精细量化的高增益信号会提高对陆地和大气发光源的探测能力,包括微弱的城市灯光和极光。

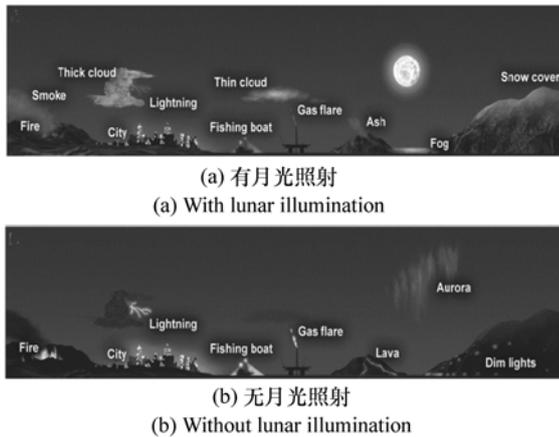


图3 夜间可见光探测能力

Fig. 3 Detection capabilities for visible light during nighttime

以前,OLS数据由于其本身数据的局限性多用于定性化判断(见3.1.2)。随着VIIRS数据的开发,微光探测数据开始在定量化应用方面显示出相当的潜力<sup>[6]</sup>。

#### (1) 城市灯光和火情监测

当微光仪器用于夜间探测时,只有部分月光或满月情况下才有足够的光照条件探测到反射特性,而在无月的夜晚,可以得到一副反映城市灯光的图像。自从DMSP OLS数据解密后,研究就主要集中在地球表面的人类活动灯光的描绘,尤其是城市。城市通常能够透过云层被观测到,尽管有时无法完全显示。尽管在没有月光的情况下探测微弱光亮的的能力最大(增益较大),但大多数的城市灯光是在有月光照耀的情况下观测到的。壮观的全球城市灯光合成图是OLS传感器的标志性产品<sup>[12]</sup>。VIIRS DNB不是专门设计用来提高灯光源图像的。然而,因为具有更小的星下点轨迹尺寸、更高的信噪比和更高的辐射分辨率,因此

可以探测到更多的光源。

OLS可能会在已知火源的情况下,基于灯光的辨别和显示,通过排除其它光源的方法识别出夜间火情<sup>[13]</sup>。但是OLS并没有广泛地用于火情监测和算法分类的研究或业务化。火情监测更多地依赖于经过定标的NOAA AVHRR,MODIS以及GOES图像的多光谱数据,尤其是3.7~3.9  $\mu\text{m}$ (短波红外)之间的通道,这个通道对极端炎热很敏感,因此可探测火情<sup>[14]</sup>。VIIRS将在短波红外和改善的夜间可见光通道上,具有更多优势,将二者联合起来能够验证火灾的存在,并估计其范围和强度。

#### (2) 尘埃和烟雾探测

OLS探测扬沙和浮尘的原理与探测云类似,但有两个必要条件,足够的月亮光照条件以及较厚的扬沙、浮尘厚度。但即使这两个条件均满足,探测结果可能仍然不太准确,这是因为地表和靠近地表空气中的沙尘在白天可见光条件下不能很好地被分辨,在夜晚情况更为严重<sup>[15]</sup>。OLS夜间图像在足够月光条件下具有描绘强沙尘暴事实的能力,但因为反射率较弱和辐射分辨率较粗等原因,大量细节无法分辨。DNB因为具有16384个灰度阶(OLS有64阶)和高空间分辨率,而且通道较多,只要有足够的月亮照射,就能够在夜间探测扬沙和浮尘。

#### (3) 低云和大雾监测

卫星红外通道监测夜间低云大雾的主要问题在于云的温度与和周围陆地或海面比较接近,因此不易区分。夜间探测云的传统方法是利用11.0和4.0  $\mu\text{m}$ 红外通道亮温差检测低云大雾<sup>[16]</sup>。但是如果低云由大水滴组成,或者高空存在薄卷云,或者地面温度低于凝结点<sup>[17]</sup>,那么红外探测可能会无法识别出夜间低云。利用微光和红外合成图像,可以有效地识别低云大雾。采用VIIRS的算法,利用DNB和红外波段的能力,将会更好地在夜间描述云。

#### (4) 雪和冰的监测

大多数可见光传感器只能在白天监测冰、雪<sup>[18]</sup>,限制了冬季夜晚的观测,而这个季节在许多地区正是需要准确知道积雪覆盖情况的时间,

这个问题在冬季两极地区的夜晚更加突出。红外和被动微波遥感器也可以观测到雪盖,但红外传感器因为经常无法区分雪和周围环境而探测不到雪盖;被动微波遥感因为分辨率太粗而不能很好地描绘出雪的边界,其使用受到限制。微光图像可弥补这一不足,VIIRS 在轨后,DNB 与长波红外和短波红外通道的融合产品,可进一步改善冰雪监测现状,提高夜间雪被的预报产品质量。

#### (5) 闪电和极光监测

闪电是大气中的强放电现象,与雷击相伴,一般在雷暴天气时出现,产生在强烈的积雨云中。卫星图像上,低红外亮温经常用于识别雷暴,大范围的风暴可以在红外图像上通过冷的亮温特征(白色)识别出来,但是仅仅通过红外图像从层云中区分活跃的对流降水很困难<sup>[18]</sup>。因为卷云砧温度相近,因此雷暴的准确位置不容易辨别。从闪电观测资料可以给出关于雷暴的更准确的信息,但是只有建立了广泛地面观测网络的地方才能得到闪电观测资料。在微光图像中可以分辨出对流线的亮条纹,条纹线通常不描述闪电本身,而是在闪电周围地区的雷暴顶的闪烁。微光图像可以验证世界范围内活动的雷暴,尤其是遥远地区和雷电探测网之外的雷暴。此外,微光探测器的工作波段覆盖了氧原子(557.7 和 630 nm)和氮分子(600 ~ 700 nm)的波谱范围,因此可用来探

测极地地区极光的出现。

#### (6) 夜间多种光源的探测和侦查

微光成像仪器在夜间具有的特殊探测功能,可使微光成像具有一定的侦查能力,可以发现钻井平台、船只、油气燃烧的位置、港口灯光、燃料补给线和公路等,这些具有重要的战略意义<sup>[19]</sup>。

#### (7) 其他应用

微光数据探测到的夜间灯光可派生出其他一些产品,如估算城镇人口、人口密度、耗电量、国内生产总值等,大量研究人员开展了诸如城市空间信息提取扩展研究、城市空间特征灯光指数构建研究、人口密度及热岛效应研究、经济发展状况研究、电力能源消耗量研究以及城市化对生态环境影响研究等<sup>[20]</sup>。

## 5 结束语

本文介绍了星载微光探测原理,详细总结了星载微光探测仪器的卫星系统、仪器技术指标、成像关键技术、数据特点等,在此基础上分析了星载微光探测技术在低云大雾监测、城市灯光和火情监测、烟雾和尘埃监测等方面的应用。随着微光探测技术的不断成熟和改进,星载微光探测仪器将极大地促进低照度条件下的气象保障能力,提高各类尺度和时效气象预报的准确率。

## 参考文献:

- [1] 蒋璐璐,魏鸣. FY-3A 卫星资料在雾监测中的应用研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(4):489-495.  
JIANG L L, WEI M. Application of fog monitoring with FY-3A data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(4):489-495. (in Chinese)
- [2] 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.  
ZHOU X K, YAN W, BAI H. Detection of heavy fogs and low clouds during nighttime using DMSP-OLS data[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(6):86-90. (in Chinese)
- [3] 胡晓华,周晓中,刘松涛,等. 星载微光立体成像技术及实现[J]. 中国光学,2013,6(30):701-709.  
HU X H, ZHOU X ZH, LIU S T. Spaceborne shimmer tridimensional imaging technology and its implementation[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(30):701-709. (in Chinese)
- [4] 陈晋,卓莉,史培军. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究[J]. 遥感学报,2003,7(3):168-175.  
CHEN J, ZHUO L, SHI P J. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data[J]. *J. Remote Sensing*, 2003, 7(3):168-175. (in Chinese)
- [5] LEE T F, MILLER S D, TURK F J, et al. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2006, 87(2):191-199.

- [6] 李萍. 微光云图的辐射仿真与应用研究[D]. 南京:中国人民解放军理工大学,2008.  
LI P. The study about the radiation simulation and application of the satellite cloud images in low-light condition[D]. Nanjing:The PLA university,2008. (in Chinese)
- [7] 周小珂. 低照度微光云图成像仪设计与应用技术研究[D]. 南京:中国人民解放军理工大学,2012.  
ZHOU X K. Research on the design and application technology of the satellite-based low illuminance and low-light cloud imaging instrument[D]. Nanjing:The PLA university,2012. (in Chinese)
- [8] BANKERT R L,SOLBRIG J E,LEE T F. Automated lighting flash detection in nighttime visible satellite data[J]. *Weather and Forecasting*,2011,26(3):399-408.
- [9] 夏浪,毛克彪,孙知文,等. Suomi NPP VIIRS 数据介绍及其在云检测上的应用分析[J]. *地球科学前沿*,2013,3:271-276.  
XIA L,MAO K B,SUN ZH W,*et al.*. Introduction of Suomi NPP VIIRS and its application on cloud detection[J]. *Advances in Geosciences*,2013,3:271-276. (in Chinese)
- [10] 赵增亮,孙泽中,韩志刚,等. NPOESS/VIIRS 及其云图产品的应用[J]. *气象科技*,2008,36(3):341-344.  
ZHAO Z L,SUN Z ZH,HAN ZH G,*et al.* Instruction to NPOESS/VIIRS and application of its cloud imagery products [J]. *Meteorological Science and Technology*,2008,36(3):341-344. (in Chinese)
- [11] ELVIDGE C D,BAUGH K E,KIHN E A,*et al.*. Mapping of city lights using DMSP operational linescan system data [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*,1997,63:727-734.
- [12] ELVIDGE C D,BAUGH K E,HOBSON V R,*et al.*. *Remote Sensing Change Detection: Environmental monitoring Methods and Applications*[M]. Ann Arbor:Ann Arbor Press,1998:123-135.
- [13] ELVIDGE C D,PACK D W,PRINS E,*et al.*. *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*[M]. Ann Arbor: Ann Arbor Press,1998:103-121.
- [14] SEAMAN C J,MILLER S D. VIIRS captures aurora motions[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,2013,94(10):1491-1493.
- [15] 李昊,李萍,白衡. OLS/VIIRS 微光成像原理和应用[C]. 2009 第五届苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会. 扬州:2009.  
LI H,LI P,BAI H. OLS/VIIRS low-light-level imaging principle and applications[C]. Proceeding of the 5<sup>th</sup> Atmospheric Detection,Environment Remote Sensing and Electronics Symposium in Jiangsu and Anhui Province, Yangzhou, China, 2009,5:7-11.
- [16] LEE T F,TURK F J,RICHARDSON K. Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9  $\mu\text{m}$  data[J]. *Wea. Forecasting*, 1997,12:664-677.
- [17] THOMAS E L,STEVEN D M,JOSEPH TURK F,*et al.*. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor[J]. *Bulletin of the American Science*,2006,87:191-199.
- [18] 王宇庆,王索建. 红外与可见光融合图像的质量评价[J]. *中国光学*,2014,7(3):396-401.  
WANG Y Q,WANG S J. Quality assessment method of IR and visible fusion image[J]. *Chinese Optics*,2014,7(3):396 - 401. (in Chinese)
- [19] 王鹤饶,郑新奇,袁涛,等. DMSP/OLS 数据应用研究综述[J]. *地理科学进展*,2012,31(1):11-19.  
WANG H R,ZHENG X Q,YUAN T,*et al.*. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Progress in Geography*,2012,31(1):11-19. (in Chinese)
- [20] 陈晋,卓莉,史培军,等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究[J]. *遥感学报*,2003,7(3):168-175.  
CHEN J,ZHUO L,SHI P J,*et al.*. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data[J]. *J. Remote Sensing*,2003,7(3):168-175. (in Chinese)

## 作者简介:



胡晓华(1981—),女,山西忻州人,博士,工程师,2001年、2004年、2007年于解放军理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微光有效载荷在气象海洋方面的研究。E-mail: x. h. hu@163. com



潘振东(1980—),男,山东费县人,学士,助理工程师,2010年于解放军理工大学获得学士学位,主要从事信号检测、图像处理方面的研究。E-mail: panzhendong@163. com



刘松涛(1980—),男,江苏南京人,硕士,工程师,2002年、2005年于解放军理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事气象海洋卫星资料应用方面的研究。E-mail: liusongtao@cn@yahoo. com. cn



石立坚(1981—),男,山东泰安人,博士,副研究员,2008年于中国海洋大学获得博士学位,主要从事卫星海洋遥感方面的研究。E-mail: shilijian@gmail. com

## 《发光学报》

—EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126. com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www. fgxb. org