

光学学报

全球总闪电的天基光学实时探测技术综述

鲍书龙^{1*}, 李欢^{2**}, 孙凡³, 陆风⁴, 张志清⁵, 陈晓杰⁶, 唐绍凡¹, 梁华², 赵艳华²¹北京空间机电研究所环境资源与气象探测领域办, 北京 100094;²北京空间机电研究所红外相机研究室, 北京 100094;³北京空间机电研究所科技处, 北京 100094;⁴中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;⁵中国气象局风云气象卫星工程管理办公室, 北京 100081;⁶上海航天技术研究院气象环境卫星总体部, 上海 201100

摘要 强对流天气是发生最频繁、影响最广泛的气象灾害,造成了巨大经济损失,严重威胁人民和社会安全,更是航空航天和信息通信等技术领域的重大威胁。闪电作为全球性强对流天气的典型要素,对强对流具有重要指示作用,因此闪电探测和强对流预警预报成为天基遥感的重要任务之一。系统地总结了闪电危害,闪电探测体系的发展历程和现状,天基闪电光学探测的技术难点、实现途径和发展现状;同时详细阐述了我国 FY-4A 闪电成像仪技术实现途径及在轨应用成果。FY-4A 闪电成像仪利用时间滤波、空间滤波、超窄带光谱滤波、星上时空域多维融合点目标检测等多维技术实现了天基闪电光学探测载荷的研制与在轨应用,国内气象部门和众多科研院所利用 FY-4A 闪电成像仪的闪电探测结果实现了强对流灾害的精确预警预报,产生了重大经济效益与社会效益。最后,针对目前闪电探测体系存在的问题,分析了我国未来天基闪电探测系统的发展趋势,为我国后续闪电探测发展提供了参考。

关键词 强对流灾害; 天基闪电光学探测; 时空多维融合; 预警预报; 闪电探测综述

中图分类号 V19

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231414

1 引言

气象灾害^[1-4]是发生最为频繁、影响最为广泛的自然灾害,其中,闪电放电具有瞬间高温、大电流、高电压和强电磁辐射等特征,常造成人员伤亡、建筑毁坏、电子设备损坏,干扰或破坏通信、影响电力系统正常运行、引发火灾等,严重威胁到公众和社会安全,更是航空、航天等高新技术领域的重大威胁,被称为“电子时代的一大公害”。据统计^[1-5],1990年至2022年的近30年时间内,气象灾害及其衍生的次生灾害引起了86%的全球重大自然灾害,造成的死亡人数占灾害死亡人数的59%,经济损失占比84%。我国地处亚洲季风活跃地区,是世界上受气象灾害影响最严重的国家之一,我国71%左右的自然灾害是气象灾害,其中,雷电灾害等强对流灾害是联合国公布的10种最严重的自然灾害之一。我国近10年的气象灾害死亡人数约为2000人/年,造成的经济损失约为2000亿元/年。

全球平均每天有大约800万次雷电^[1,3-8](也称闪电,包括地闪、云内闪、云间闪)发生,其中约1/3是地闪。地闪放电通道的瞬时温度高达30000℃左右,峰

值电流达几十甚至上百千A,具有巨大的破坏能力,对人民生命和财产造成了严重危害。例如:1989年8月12日,青岛黄岛油库发生特大雷击火灾爆炸事故,造成19人死亡,100多人受伤,直接经济损失达3540万元;2002年7月28日大兴安岭发生的雷击森林火灾历时20多天,火灾面积达20000 km²,损失惨重;2007年5月23日重庆开县发生雷击,造成7名小学生死亡,44人受伤。

随着电子技术的迅猛发展,雷电危害范围和程度显著增加^[1,3-6],对大规模、超大规模集成电路等高新技术领域的危害程度更大,造成的损失越来越大,例如:2011年7月23日雷电造成信号控制系统出现故障,引起动车D3115与D301追尾,造成40人死亡,172人受伤,直接经济损失2亿元,成为社会影响极大的特大铁路交通事故。

因此,雷电探测和强对流天气预警预报成为航天遥感的重要任务之一^[9]。利用全方位的闪电观测数据研究闪电活动在强对流天气中的相关影响与作用,分析它对大气环境和气候的影响,进而建立起有效的闪电活动及强对流天气等气象灾害的预警预报系统具有

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-10-07; 录用日期: 2023-10-27; 网络首发日期: 2023-11-07

基金项目: 风云四号科研试验卫星工程

通信作者: *59604575@qq.com; **cclhuan@126.com

重要的经济和安全意义。

黄富祥^[10]代表国家卫星气象中心介绍了卫星闪电探测的发展进程和现状,提出了我国首次研制的星载 FY-4 卫星闪电成像仪的使命和技术指标状态。通过与美国在轨的极地轨道闪电成像仪 LIS、研制中的静止轨道闪电成像仪 GLM 的对比分析,总结出:我国 FY-4 卫星闪电成像仪技术指标达到了当今世界卫星闪电探测的最高水平,但仍面临着闪电探测机理、技术现状和工艺等诸多方面的巨大挑战,应引起我国科研人员的关注和重视。

Chan^[11]、董瑶海^[12]、张志清^[13]、张如意^[14]、陆风^[15]等详细综述了我国新一代静止气象卫星风云四号 (FY-4A) 的应用及其发展历程、卫星平台和有效载荷与构型、分系统组成、主要任务、主要功能、性能指标和技术特点,并将其与欧美第三代气象卫星进行了对标。他们详细阐述了 FY-4A 卫星各主要观测要素的测量和数据获取原理以及高精度、量化的星上处理算法和控制可在轨维护(编程改变)、星务自主管理等方案及其实现途径,并列出了 FY-4A 卫星可提供的云检测等 34 种数据产品,给出了 FY-4A 卫星的图像、数据的特性与物理意义说明,明确了图像、数据的应用方法,同时在部分领域给出了应用范例。

朱珺^[16]、何兴伟^[17]、张春华^[18]等详述了美国、欧洲气象卫星应用组织 (EUMETSAT)、日本、俄罗斯、印度和韩国的静止气象卫星发展历史及其载荷发展与配置情况,总结了不同时期各国静止气象卫星的发展特点,为我国后续静止气象卫星的规划和研制提供了重要参考。此外,他们分别阐述了美国新一代静止气象卫星 GEOS-R、欧洲第三代静止轨道气象卫星 MTG、日本和韩国的第三代静止气象卫星以及中国新一代静止轨道气象卫星 FY-4A 实验卫星的发展现状、水平现状和发展趋势,通过对比分析,总结得出我国 FY-4A 气象卫星处于世界先进水平。

上述论述集中在卫星平台的配置与效能以及闪电探测载荷方案设计与性能评价等方面,尚未有天基闪电探测方面系统性的论述。本文系统地梳理了国内外闪电探测途径和发展现状,重点围绕闪电与强对流灾害天气探测的意义、闪电探测方法、天基光学探测技术、载荷研制关键技术与发展现状、天基闪电光学探测发展趋势等进行全面详细的论述。

2 闪电探测体系及发展现状

闪电活动的观测手段^[19]主要有地基电场磁场雷电探测^[20-21]和天基光学探测^[9-10,12-18,22]两种形式。由于地基闪电探测系统作用范围小、站点布置少、站点不连续、山区与海洋阻隔等原因,地基闪电探测网无法有效进行全球范围尤其是海洋和山区等地方的闪电探测。天基闪电探测是有效的闪电探测手段,与地基闪电探测相比,天基闪电探测覆盖范围大,不受地面条件制

约。天基闪电探测分为低轨道和高轨道(静止轨道等)闪电探测。受低轨道限制,单颗或者少量低轨道闪电探测载荷无法实现同一地点的不间断连续探测。静止轨道等高轨道闪电探测载荷^[12-16]具有 24 h 不间断、覆盖范围大、无死角、实时性好等优点,是全球范围实时、不间断探测闪电的最有效手段。因此,发展与研究天基尤其是静止轨道闪电探测成为世界上各国在闪电探测方面的主要课题之一,静止轨道闪电探测是目前各国竞相发展的闪电探测方式。

地面闪电监测网、低轨和高轨天基闪电探测载荷等闪电探测手段相互补充,可实现不间断、高精度的闪电实时探测,服务于我国和全球强对流灾害预警预报和气候研究,大幅度降低人民生命、财产、经济、环境损失。

2.1 地基闪电探测系统及发展现状

20 世纪 70 年代, Krider 等^[23]通过捕获地闪回击发出的宽带电磁辐射信号,实现了地闪回击的位置定位。由于闪电放电的电磁频谱主要在 1~300 MHz 波段之间,许多国家和地区的研究者相继开发出基于甚低频 (VLF)、低频 (LF) 及甚高频 (VHF) 波段的地基闪电探测定位系统。在 VLF/LF 波段,主要利用磁定向法、到达时差法以及磁向时间差联合法对闪电进行定位,具有代表性的探测系统如表 1 所示,包括全球闪电定位网 (WWLLN)^[24]、美国国家闪电探测网 (NLDN)^[25-26]、全球闪电探测网 360 系统 (GLD360)^[27] 以及我国的新一代雷电监测定位系统 (ADTD)^[28]。

WWLLN 是美国华盛顿大学利用 VLF 电磁波可以在地球和电离层构成的波导中远距离传播的原理,由 70 多个子站组成的超长基线全球闪电探测系统。它的探测频率带宽低 (3~30 kHz)、基线较长,能够对地闪和强云闪进行探测。由于电磁波能量在长距离传播过程中发生耗散,因此它的探测率很低 (约 10%),且定位误差超过 10 km。但该定位网覆盖全球,在分析大范围、长时间的闪电活动规律以及海洋强对流闪电特征时,其提供的资料有着重要的参考价值。

NLDN 是美国境内 100 多个地面子站组成的闪电探测系统,由 Vaisala 运营,它通过接收闪电放电过程中产生的 LF 波段信号,利用磁定向法和到达时差法相结合的定位技术获取闪电信息。经过多次设备和算法升级后,该探测网能够同时对地闪和云闪进行探测,定位误差约为 150~200 m,对云闪的探测率为 30%~60%,对地闪的探测率为 95%。

GLD360 是 NLDN 的商业化版本,它在原先的基础上将探测子站的数量增加到几百个,扩大到了全球范围。在算法上,它使用了一种新型的闪电信号识别算法,将捕获的闪电脉冲波形与数据库中的波形进行交叉级联以提取出有效闪电信号并判断出信号类型。对于不同的时间和传播条件,有与之对应的不同波形匹配库。该算法有效改善了网格边缘处闪电的探测

表 1 国际上具有代表性的 VLF/LF 波段地基闪电探测系统

Table 1 Internationally representative ground lightning detection systems in VLF/LF band

VLF/LF lightning detection system	Probability of detection / %	Detection range	Type of the detect lightning	Positioning error / m
WWLLN	10	Global	Strong intracloud lightning, cloud-to-ground lightning	>10000
NLDN	30-60 (intracloud lightning); 95 (cloud-to-ground lightning)	Area	Intracloud lightning, cloud-to-ground lightning	150-200
GLD 360	80 (the Northern Hemisphere); 10-80 (the Southern Hemisphere)	Global	Intracloud lightning, cloud-to-ground lightning	1500-2500
ADTD	95	Area	Cloud-to-ground lightning	300

率,使得系统对全闪(包括地闪、云内闪、云间闪等)的探测率得以提高。北半球大部分地区探测率大于 80%,南半球的探测率介于 10%~80% 之间,但在南纬 42° 以南的纬度地区效率较低,中值定位误差约为 1500~2500 m。云闪和地闪的分类准确度也得到了进一步优化,达到了 85%。

国内的地基闪电探测网主要是由中国科学院空间科学与应用研究中心研制的 ADTD,目前由中国气象局运营,在国内已经有超过 300 个测站,覆盖了除青藏高原及新疆维吾尔自治区南疆地区外的大部分地区。由于只能接收到闪电放电过程中的 VLF/LF 波段信号,该系统只能探测地闪,无法探测云闪,地闪探测率约为 95%,定位误差为 300 m。

然而,VLF/LF 波段闪电探测系统均为二维闪电探测系统,系统只提取出脉冲大信号或者某一时段内信号的峰值点用于闪电定位,故只能定位出离散强辐射源位置,无法描述出闪电通道的发展路径。由于 VHF 波段的辐射信号在闪电放电的整个过程中都能被探测到^[29],相比于 VLF/LF 波段,VHF 波段能够探测到更多的脉冲辐射源,因此,基于 VHF 波段可以大致描绘出闪电通道的三维发展路径。继 Oetzel 等^[29]开发了 VHF 波段的闪电定位技术后,经过设备和算法的优化,目前已有许多成熟的 VHF 闪电探测系统,其中具有代表性的系统如表 2 所示,包括闪电监测和测距系统(LDAR)^[30-31]、闪电成像阵列(LMA)^[32-33]以及全球总闪探测网(ENTLN)^[34]。

表 2 国际上具有代表性的 VHF 波段地基闪电探测系统

Table 2 Internationally representative ground lightning detection systems in VHF band

VHF lightning detection system	Probability of detection / %	Detection range	Type of the detect lightning	Positioning error / m
LDAR	> 90 (in the detection network)	Area	Intracloud lightning, cloud-to-ground lightning	Horizontal: 1000 (in the detection network)
LMA	Multiple applications for research on refined lightning channels without considering probability of detection	Area	Intracloud lightning, cloud-to-ground lightning	Horizontal: 6-12; vertical: 20-30
ENTLN	50 (intracloud lightning), 95 (cloud-to-ground lightning)	Area	Intracloud lightning, cloud-to-ground lightning	Horizontal: 10-500

2.2 天基闪电探测系统及发展现状

目前地基闪电探测技术已经较为成熟,但存在以下问题:1)地基闪电探测系统的探测率和定位误差受制于探测频段、基线长度、测站数量等因素,高探测率、高定位精确度和大探测范围难以兼得;2)受地形影响,传感器无法架设到海洋和地形陡峭地区,无法实现海洋及边远山区的闪电探测。

为了克服上述情况下闪电探测的局限性,星载天基闪电探测技术迅速发展。低轨道星载闪电成像仪的优势是观测范围较大,且不受地面地形限制,但在中、小尺度对流系统的研究中也存在观测时间不完整、不连

续的缺点。静止轨道闪电探测具有 24 h 连续、大覆盖范围、无死角、高实时性等优点,近年来,地球静止轨道闪电成像仪的研发成为了国际上闪电天基探测研究的主要方向,是全球优先发展的闪电探测手段。

2.2.1 国外天基闪电探测系统发展现状

在闪电光学特性、探测方法与探测载荷研究方面,美国一直处于世界领先地位,欧洲和日本也开展了不同程度的研究。欧洲国家的研究领域主要集中在无线电波和声波等方面,通过地面和空基雷达对闪电进行探测与研究。

50 年代起,美国率先开始了从高空/太空中观测

闪电的闪电光学特性研究^[35-37]。20 世纪 80 年代, Wolfe 等^[38]就提出了利用空间光学成像仪采集闪电信号,即通过闪电放电过程中传输到云顶的光辐射信号来获取闪电的时间和位置信息。Thomson 等^[39]也利用 Monte Carlo 方法模拟了闪电瞬态光源发射波长为 $0.45\ \mu\text{m}$ 和 $0.87\ \mu\text{m}$ 的光子在不同形状云体和云中不同位置的传输差异,分析了云中水成物粒子

对光辐射能量的散射效应。美国航空航天局 (NASA) 利用高空 U-2 飞机对闪电的光学和电子学特性进行了观察 (图 1), Christian 等^[35-36]通过在 U-2 飞机上搭载光学脉冲探测器,探测到闪电光辐射能量在波长为 $777.4\ \text{nm}$ 处的中性氧原子近红外吸收谱线最强 (图 2), 确定了后续星载闪电探测载荷的探测谱段。

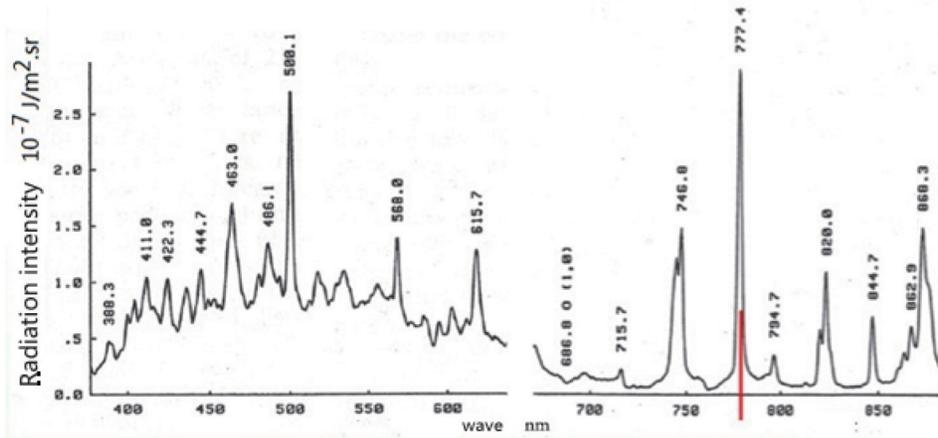


图 1 NASA 利用 U-2 飞机探测的闪电光谱^[35]

Fig. 1 Lightning spectrum detected by NASA U-2 aircraft^[35]

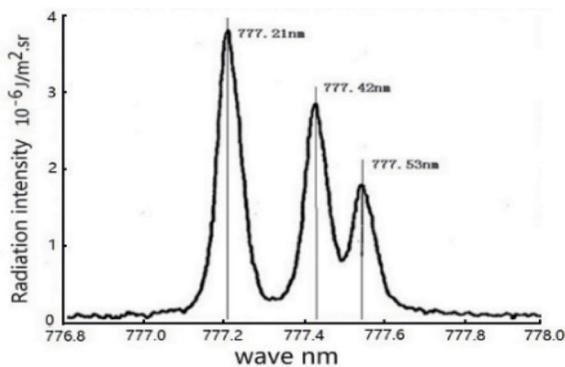


图 2 闪电的氧原子的三条特征谱线细节^[35-36]

Fig. 2 Details of three characteristic spectral lines of lightning's oxygen atom^[35-36]

U-2 和航天飞机等闪电探测方法与探测参数研究、参数优选研究和其他研究结果表明,完全可以研制一种空间光学闪电探测仪器在卫星轨道上对闪电进行观察。基于这些研究结果,1994 年美国的 GeoEye 公司发射了低轨道 MicroLab-1 遥感地球成像卫星,其搭载的光学瞬态探测器 (OTD) 是世界上第一台星载闪电探测器^[40]。该设备利用 128×128 像元的电荷耦合器件 (CCD), 可对 $1300\ \text{km} \times 1300\ \text{km}$ 区域内的云闪和地闪过程进行观测,其主要任务是探测全球范围内的闪电活动规律,尤其是陆地闪电与海洋闪电之间的差异。经过大量星地资料对比和实验室标定,OTD 的探测率约为 25%,在星下点 (地球球心与卫星的连线在地球表面上的交点) 的空间分辨率为 $10\ \text{km}$,时间分辨

率为 $2\ \text{ms}$,水平定位误差为 $20 \sim 40\ \text{km}$ 。

继 OTD 退役后,1997 年该公司发射了热带降雨测量任务卫星 (TRMM), TRMM 搭载的闪电成像传感器 (LIS)^[41-43] 接替 OTD 继续进行探测任务 (图 3)。LIS 在星下点的空间分辨率被提高到了 $5.5\ \text{km}$,探测率被提高到了 70%~95%,主要对热带和亚热带地区 ($38^\circ\text{S} \sim 38^\circ\text{N}$) 的闪电活动进行观测。除了 LIS 以外, TRMM 还搭载了多频段可见光和红外辐射计、降水雷达等其他探测仪器,与 LIS 闪电资料进行联合观测,能够进一步对强对流系统中闪电的产生机理进行联合研究。

美国 2003 年在静止轨道气象卫星 GOES-O 上规划了闪电测图仪 (LMS)^[44], LMS 是美国第一代静止轨道闪电探测载荷,原计划于 2003 年发射,但由于技术和规划等原因, LMS 被调整为 GOES-R 卫星的新一代静止轨道闪电成像仪 (GLM)^[45-47], 如图 4 所示。GLM 采用的是与 OTD/LIS 相同的光学采样技术,但 GLM 采用了全新定制的 CCD 和全新的数字实时事件处理器,其视场覆盖地球全圆盘,星下点空间分辨率为 $8\ \text{km}$ (地球边缘分辨率为 $10 \sim 20\ \text{km}$), 帧时为 $2\ \text{ms}$, 闪电探测率为 70%~90%, 已于 2016 年 11 月发射,目前在轨正常应用。

为了提高闪电探测性能和定位精度, GLM 定制了全新的传感器 CCD^[48-49], 如图 5 所示。其像元尺寸采用分区方式设置,星下点位置 (位于赤道上,中心视场) 对应像元为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$, 延伸到地球边缘时像元尺寸逐步减小到 $20\ \mu\text{m} \times 24\ \mu\text{m}$, 保证了中心视场和边缘

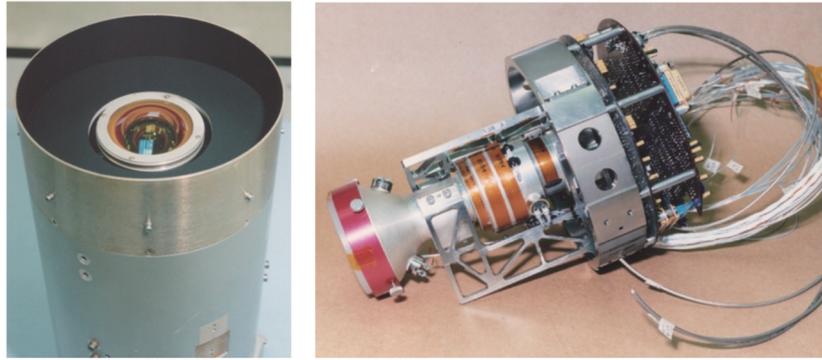
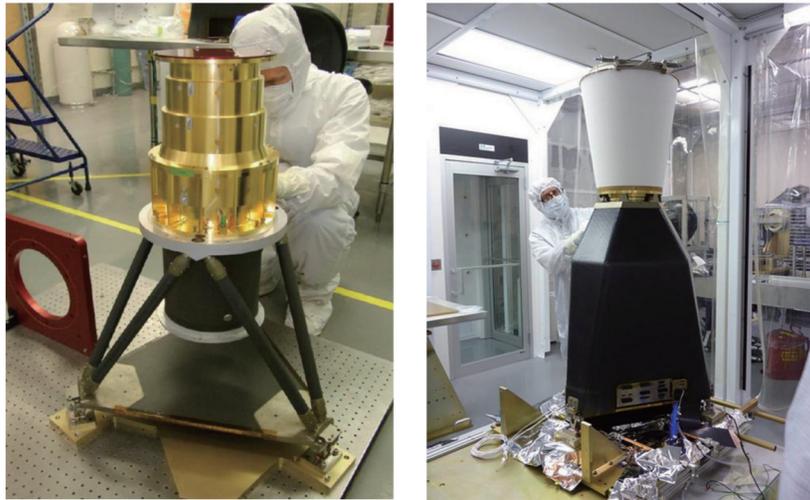
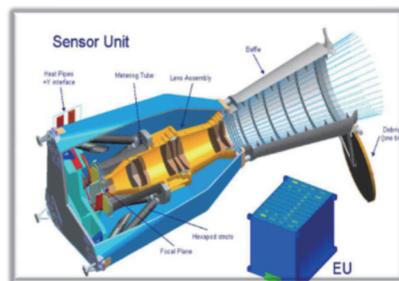
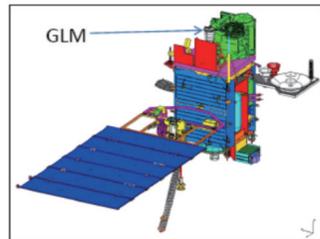


图 3 美国的极轨闪电成像仪 TRMM-LIS^[41-43]

Fig. 3 Polar orbital lightning imager TRMM-LIS of the United States^[41-43]



GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM)



GLM Characteristics

- Staring CCD imager (1372x1300 pixels)
 - Single band 777.4 nm
 - 2 ms frame rate
 - 7.7 Mbps downlink data rate
 - Mass: 114 kg- SU (66 kg), EU (48 kg)
 - Avg. Operational Power: 290 W
 - Volume w/ baffle (cm³): 81x66x150
- Near uniform spatial resolution/ coverage up to 52 deg lat
 - 8 km nadir to 14 km at edge
 - 70-90% flash detection
- L1 and L2+ products produced at Wallops for GOES-R Re-Broadcast (GRB)
- < 20 sec product total latency

4

图 4 美国 GOES-R 和 GOES-S 卫星上的 GLM^[45-47]

Fig. 4 GLM on the GOES-R and GOES-S satellite of the United States^[45-47]

视场在地球曲率这一不利因素影响下仍能保持比较一致的地面分辨率。

欧洲同期开展研制的闪电探测载荷为第三代静止轨道地球观测卫星 (MTG) 搭载的 LI (lightning imager)^[50-51], 如图 6 所示。LI 是欧洲的第一颗天基静

止轨道闪电探测载荷, 已于 2022 年 12 月发射, 目前在轨测试。LI 参考了美国 LIS、LMS 方案和研制经验, 其星下点空间分辨率为 4 km, 帧时为 1 ms, 覆盖地球全圆盘, 45° 纬度内闪电探测率 $\geq 90\%$, 全覆盖范围内平均闪电探测率 $\geq 70\%$ 。

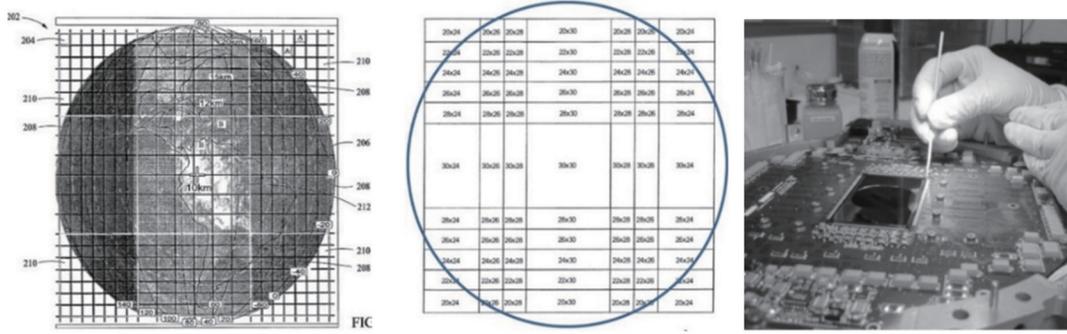


图 5 美国 GOES-R 卫星上的 GLM 的传感器 CCD^[48-49]

Fig. 5 CCD sensor of the GLM on the GOES-R satellite of the United States^[48-49]

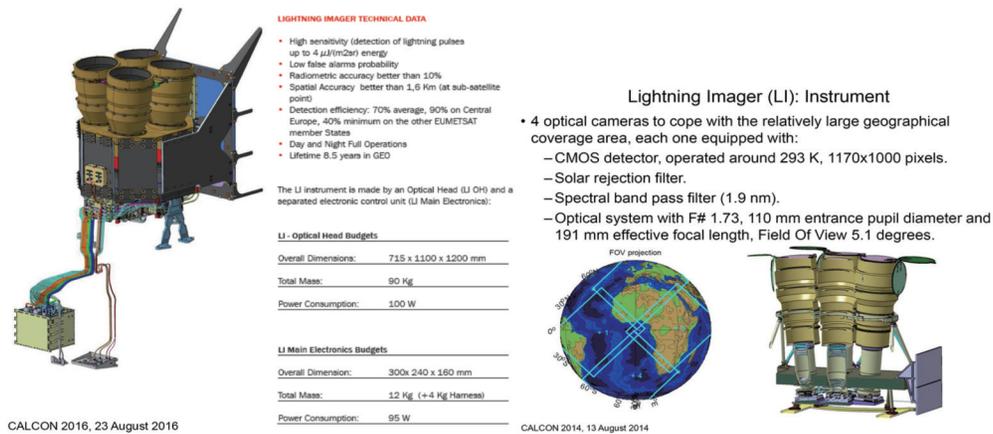


图 6 欧洲的静止轨道闪电成像仪 MTG-LI^[50-51]

Fig. 6 Geostationary lightning imager MTG-LI of Europe^[50-51]

2.2.2 国内天基闪电探测系统及发展现状

我国的闪电(地闪、云内闪、云间闪)探测研究多为电场、磁场等方面,闪电和背景的光学特性相关数据缺乏。在风云四号气象卫星 FY-4A 闪电成像仪^[9-10]研究之前,我国闪电光学探测技术研究较少。尤其在 2000 年之前,国内对闪电产生机理、云中光学辐射传输特性与云顶观察闪电的基础技术参数缺乏深入的研究。

在闪电光谱研究方面,胡丽琴^[52]、穆亚利^[53]、鲍书龙^[54]、陈圣波^[55]、惠雯^[56]等开展了相关研究。在国家民用航天 FY-4 气象卫星支持下,北京空间机电研究所、上海卫星工程研究所和国家卫星气象中心从 2002 年开始共同开展了闪电光谱研究(主要开展的是地闪、云内闪、云间闪的光学特性研究),已经进行了大量的实验室人工模拟闪电放电,自然界真实闪电的光谱特性、时间特性等特性探测、分析等研究工作。并与卫星总体单位上海卫星工程研究所等在上海防雷中心、上海交通大学雷电实验室、阳江、北京、上海等地共进行了 200 多次实验,获取了人工模拟闪电和自然界真实闪电的光谱数据。通过实验数据对比分析与统计,确定了闪电光学探测谱段及其影响,为静止轨道闪电光学探测载荷设计提供了基础数据与技术支撑。

鲍书龙等^[57]在研究了闪电特性、云顶观测闪电、闪电与强对流天气的强相关关系后,根据闪电信号和背景信号之间时间、空间、光学、变化等时空和光谱的特性差异,提出静止轨道闪电探测载荷的总体方案和星上目标实时检测方案,详细设计了静止轨道闪电探测方案及其技术实现途径。

在对流层雷暴闪电与上层大气间的大空间尺度的瞬态发光事件(TLEs)研究方面,杨静等^[58]自 2007 年起利用中国科学院大气物理研究所自主研制的光学、电磁等探测设备在山东地区开展了相关观测实验,并于同年首次获取了国内“红色精灵”观测事实。但由于 TLEs 发生在雷暴云上方,地基观测易受气象条件(如云层、霾、雨雪等)、大气能见度、背景光污染、大气对光辐射的传输衰减、地理位置和环境阻隔等诸多因素的限制,因此覆盖区域有限,获取观测资料十分困难,目前我国仍处于观测数据积累阶段。

天基 TLEs 探测载荷主要有中国台湾 Formosat-2 satellite (原名中华卫星二号,2004 年 5 月 21 日发射升空)搭载的有效载荷高空大气闪电影像仪 ISUAL (imager of sprites and upper atmospheric lightnings)^[59]。在全闪(云地闪、云内闪、云间闪等)探测方面,主要有风云四号卫星搭载的 FY-4A 闪电成像仪^[60-62](2016 年

12月11日发射入轨,目前在轨超期服役)、FY-4-03星闪电成像仪(在研,计划2025年发射)。

中国台湾 Formosat-2 satellite 的有效载荷高空大气闪电影像仪 ISUAL 由三台载荷组成^[59],如图 7 所示,分别是图像仪(imager)、光谱光度仪(SP)和阵列光度仪(AP)。其任务是当卫星运行到黑夜地区

(eclipse)时,对高层大气上的闪电现象进行科学观测,记录各种高空短暂发光现象,并提供高时间分辨率的光谱光度以及具有空间分辨率的双波段光度资料。基于测量数据可以建立高空短暂发光现象的全球分布统计数据库,以进行太空物理研究(如高空短暂发光现象、大气辉光与极光等)。

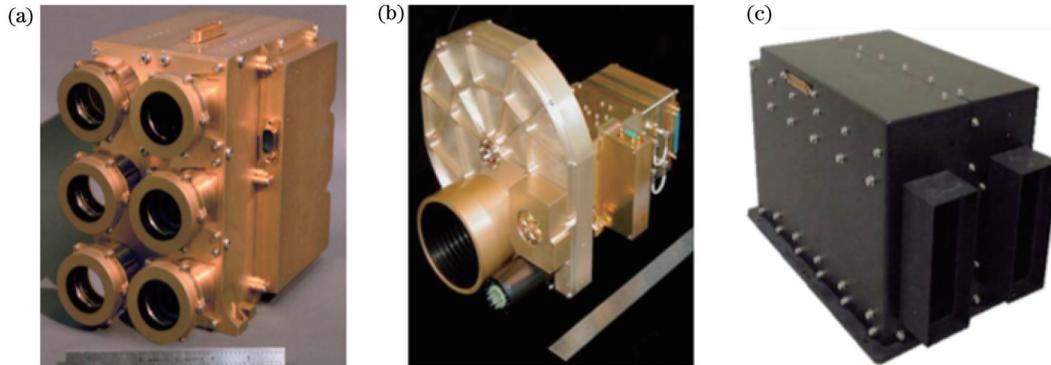


图 7 Formosat-2 satellite 搭载的 ISUAL^[59]。(a)SP;(b)图像仪;(c) AP
Fig. 7 ISUAL on the Formosat-2 satellite^[59]. (a) SP; (b) imager; (c) AP

FY-4A 闪电成像仪^[56-57]是我国首次开展的空间对地闪电光学探测技术的研究及载荷研制。北京空间机电研究所闪电探测载荷研制团队经过 2002 年至 2006 年预先研究、2007 年至 2009 年深化研究、2010 年至 2016 年型号研制等三个阶段 15 年的持续努力攻关

(图 8),攻克了云顶观测闪电与背景及其融合光学特性数据研究、载荷及其标定系统和验证系统研制等一系列基础科学、技术和工程难题,研制了具有自主知识产权的静止轨道 FY-4A 闪电成像仪及其性能标定系统和探测性能验证系统。



图 8 FY-4A 闪电成像仪研究与研制过程
Fig. 8 Research and development process of FY-4A lightning mapping imager

FY-4A 闪电成像仪是我国第一个研制的天基闪电探测载荷,同时也是亚太地区首台、全球第二台天基闪电光学探测载荷。除视场覆盖范围外,FY-4A 闪电成像仪与 GOES-R 卫星上搭载的 GLM 同处世界先进水平,具体性能如表 3 所示。

3 天基闪电光学探测的难点及影响因素分析

在太空看闪电和在地面看闪电差别巨大,如图 9 所示,地面看到的闪电是连续的线状高亮目标,而在太空中看到的闪电则是叠加在复杂背景(云层、陆地、雪面、冰面、水面等强反差、大动态的复杂背景)上的多个

位置、强度与空间尺寸随机的离散点状目标。由于云层、雪面、冰面和绿色植物对入射阳光的强反射^[54-55],闪电亮度相当于云层等复杂亮背景的 0.1%~1000.0%。同时,由于大范围 24 h 观测以及观测范围内云层、陆地、雪面、冰面、水面、绿色植被等反射率的巨大差异,闪电光学探测背景呈现为强反差、大动态特性。

闪电产生于强对流云系,地物及云层等背景复杂、缓变、强度大,闪电多发生在有云区域的复杂背景上,同时闪电产生位置和能量强度随机,持续时间极短且强度变化大,这些特性使得天基闪电探测显著区别于传统的成像载荷与点目标预警载荷。天基闪电探测载

表 3 FY-4A 闪电成像仪性能对照表
Table 3 Comparison of the performance of FY-4A lightning mapping imager

Camera parameter	OTD	LIS (TRMM)	GLM (GOES-R, 2016-11)	LI (MTG, 2022-12)	FY-4A lightning mapping imager (FY-4, 2016-12)	FY-4-03 lightning mapping imager (FY-4, expect 2025)
Orbit /km	710	350	42164	35800	35800	35800
Ground sampling distance	10 km@ nadir	3.9-5.4 km	8 km@nadir, 14 km@edge field of view (FOV)	4.5 km@nadir, 10 km@latitude 45°	7.8 km@nadir	4 km@nadir
FOV / (°)	80×80	80×80	16×16	7.2×7.2×4.0	5.0×7.5	16.0×12.5
Coverage /km	1300×1300	580×580	visible Earth disk	visible Earth disk	3200×4800	visible Earth disk
Detection spectral band /nm	777.4	777.4	777.4	777.4	777.4	777.4
Bandwidth /nm	1.0	1.0	1.0	1.9	1.0	2.0
Frame time /ms	2	2	2	1	2	2
Probability of detection	≥25%	≥90%	≥90% (night), ≥70% (day)	90% for latitude 45°, 70% as average over FOV, 40% over EUMETSAT member states (goal)	70%-90%	≥70% (day), ≥90% (night)
False alarm rate /%	—	≤10	≤5	≤10	≤10	≤10
Positioning accuracy	—	One pixel	One pixel	One pixel	One pixel	One pixel

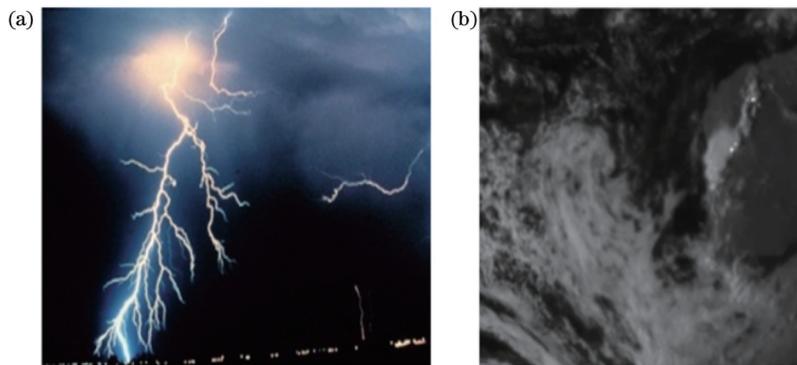


图 9 地面与太空中观测到的闪电的差异。(a) 地面看到的闪电;(b) 太空中看到的闪电

Fig. 9 Difference between ground observation and space observation of lightning. (a) Lightning observed on ground; (b) lightning observed on space

荷是在太空轨道上实时完成瞬态闪电与背景的成像和闪电事件的高性能实时检测,与国内已往研制的其他遥感载荷具有显著差异,具体表现为:

1) 闪电的空间特性[尺度小(多数为 3~10 km)、随机]、时间特性[瞬态(持续时间平均 300~700 μs)、随机]、辐射特性[动态范围大(几十至几千 μJ·m⁻²·sr)、随机]和传输特性(闪电激发的原子光谱通过云层传输到云顶);

2) 背景的空间特性(尺度大)、时间特性(缓慢变化)、辐射特性(动态范围大, 0.1~

396.0 W·m⁻²·sr·μm)和传输特性(反射、散射阳光形成的背景);

3) 闪电、背景的相关特性和载荷相结合而衍生出来的特性。

上述差异使得闪电探测载荷具有显著的独特性,其研制难度极高,具体如下:

1) 与传统成像类遥感载荷相比,闪电探测载荷在体制上差异大,闪电探测载荷是瞬态点目标探测。

2) 与预警、空目监视载荷相比,闪电探测载荷探测目标的特性差异大,闪电是随机、瞬态的点源目标,并

且强度变化大(闪电强弱比 > 1000:1), 显著区别于导弹、飞机空间目标的时间与空间连续特性。

3) 静止轨道存在每天 -80 °C ~ +100 °C 的温度交变, 易导致卫星结构和载荷结构发生周期性形变, 进而影响探测载荷视轴, 造成其周期性偏移。同时午夜阳光直照、日落后日出等掠入射情况时阳光杂光直接淹没或者严重影响其他视场的成像像质。因此杂散光抑制、大温差下镜头像质保证、光轴热变形稳定性保障都是静止轨道闪电光学探测载荷研制的重点与难点。

4) 静止轨道闪电光学探测载荷必须 24 h 不间断探

测闪电, 需要满足白天、夜间、晨昏线三种状态三种极端情况下的高质量成像与闪电探测, 包括白天云地复杂高亮背景上叠加的瞬态微弱闪电信号探测(闪电在白天是叠加在云地复杂高亮背景上的微弱信号)、夜间暗背景环境下的瞬态微弱闪电信号探测(闪电在夜间是暗背景上的微弱信号)以及晨昏高动态反差情况下瞬态微弱闪电信号探测(晨昏线时, 两边亮暗对比 > 10⁷:1)。因此静止轨道闪电探测载荷使用的是传统光学载荷响应区间的两端(受光电探测器的原理影响, 其暗端与亮端响应线性较差), 如图 10 所示, 且需要非常高的动态范围和极高的灵敏度(优于 0.01 W·m⁻²·sr)。

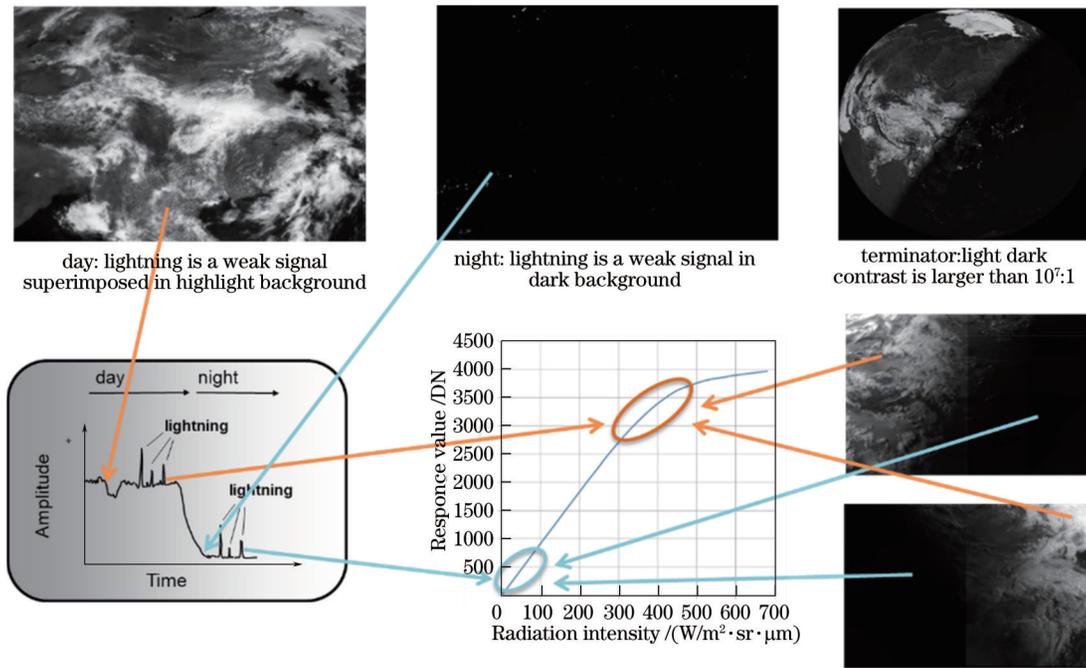


图 10 闪电探测载荷使用的探测器响应区间

Fig. 10 Response range of the sensor used for the lightning detector

5) 全圆盘闪电探测载荷的光学视场为 $\Phi 16^\circ$, 探测器规模为 1300 × 1280 像元至 2560 × 2048 像元, 成像速率为 500 frame/s, 量化位数为 12 bit, 数据率高达 31.46 Gbit/s。受卫星星上缓存容量和卫星数传速率的限制, 探测载荷无法实现星上存储以及将数据实时传输至地面, 必须在星上实时检测闪电事件, 并下传闪电事件, 因此载荷需要具有极高的并行处理能力。

由于天基闪电光学探测载荷显著区别于其他遥感载荷、探测载荷, 其特殊参数定义也与其他遥感载荷有显著差异^[63-64]。天基闪电光学探测载荷参数定义具体如下:

- 1) 探测率(PD), 发生在载荷视场范围内、指定强度范围内的总闪电被探测到的概率;
- 2) 虚警率(FAR), 在指定时间内被探测到的瞬态事件但不被确认为闪电事件的概率;
- 3) 闪电信噪比($R_{SNR,s}$), 给定的闪电脉冲信号与总噪声的比值;

4) 设定阈值信噪比($R_{SNR,T}$), 满足 PD、FAR 指标时设定的最小信噪比。

天基闪电光学探测时, 闪电脉冲穿透云层后在云顶形成闪电光学图像, 与地物及云层反射的阳光背景相耦合, 最终在天基探测载荷上形成融合图像。故闪电探测载荷的闪电脉冲经光电转换后产生的电子数与背景产生的电子数具有显著差异。闪电脉冲产生的电子数 N_s 和地物与云层等背景产生的电子数 N_B 分别表示为

$$N_s = \frac{\pi \cdot A_s}{4 \cdot F_\#^2} \cdot k \cdot Q \cdot \rho \cdot \frac{E_s}{E_{PHOT}} \cdot v \cdot \zeta, \quad (1)$$

$$N_B = \frac{\pi \cdot A_B}{4 \cdot F_\#^2} \cdot k \cdot Q \cdot I_B \cdot T_i \cdot \frac{\Delta \lambda \cdot A_{IB}}{E_{PHOT}}, \quad (2)$$

式中: A_s 为闪电脉冲的面积; k 为光学系统的透过率(含超窄带滤光片); Q 为探测器量子效率与填充因子乘积; ρ 为闪电脉冲光谱的大气传输透过率; E_s 为闪电脉冲的能量; E_{PHOT} 为 777.4 nm 波长处的光子(photon)

能量, 对应为 $2.56 \times 10^{-19} \text{ photon}^{-1}$; v 为闪电脉冲的几何分裂因子; ζ 为闪电脉冲的时间分裂因子; $F_{\#}$ 为光学系统 F 数; A_B 为像元分辨率对应的背景面积; $\Delta\lambda$ 为带宽; I_B 为像元对应地物和云层等反射的阳光辐亮度; A_{IB} 为云背景漫反射系数; T_L 为曝光时间。

由于闪电探测载荷体制和目标特性的显著差异, 闪电探测载荷信噪比指的是闪电脉冲转化而来的信号电子数与总噪声的比值, 而由云层、陆地、海洋等反射阳光产生的背景则作为噪声源出现在闪电光学探测载荷信噪比中, 这是与传统意义光学遥感成像系统的信噪比的最显著区别。因此, 天基闪电探测的闪电信号为去除背景后的目标信号电子数, 即

$$N_s = N_{s+B} - N_B, \quad (3)$$

式中, N_{s+B} 为闪电探测载荷的响应输出对应电子数, 包含闪电脉冲信号和背景信号对应的电子数; N_B 为云层、陆地、海洋等反射阳光而产生的背景信号对应的电子数。

闪电探测载荷信噪比 $R_{SNR,s}$ 定义为

$$R_{SNR,s} = \frac{N_s}{n}, \quad (4)$$

式中, n 为总噪声对应的电子数, 包括闪电脉冲的散弹噪声, 陆地、云层、水面等反射阳光形成背景的散弹噪声, 载荷的探测器暗噪声及电路噪声等对应的电子数。总噪声 n 表示为

$$n = \sqrt{n_{(N_s)}^2 + n_{(N_B)}^2 + n_R^2}, \quad (5)$$

式中: $n_{(N_s)}$ 为闪电脉冲的散弹噪声电子数, $n_{(N_s)} = \sqrt{N_s}$; $n_{(N_B)}$ 为背景的散弹噪声电子数, $n_{(N_B)} = \sqrt{N_B}$; n_R 为探测器暗噪声及电路噪声等对应的电子数。

闪电探测载荷的 PD 和 FAR 分别表示为

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{R_{SNR,s} - R_{SNR,T}}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (6)$$

$$F_{FAR} = \frac{\exp(-R_{SNR,T}^2/2)}{2\sqrt{3} T_L}, \quad (7)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \quad (8)$$

式中: $\operatorname{erf}(x)$ 表示误差函数或概率积分; T_L 为闪电脉冲持续时间。

从式(1)、(2)、(4)、(5)可得, 影响闪电探测 $R_{SNR,s}$ 的主要因素是闪电脉冲与背景的特性、光学系统性能(透过率 k 、带宽 $\Delta\lambda$ 、 F 数 $F_{\#}$)、探测器[CCD 或者互补金属氧化物半导体(CMOS)]性能、源与背景辐射的分裂因子及其噪声因子等。

分析式(6)和式(7), 可获得以下结论:

1) 闪电探测载荷除了与 $R_{SNR,s}$ 有关外, 还与设定阈值 $R_{SNR,T}$ 有关, 这是闪电探测载荷区别于其他遥感载荷的突出特点。

2) 设定的 $R_{SNR,T}$ 越高, FAR 越低, 同时 PD 也越低

(在相同的 $R_{SNR,s}$ 下)。在 FAR 和 PD 之间进行折中, 选取一个平衡点以保证在 PD 足够高的情况下能够实现探测结果实时下传(在限定的下传速率情况下, 如 FY-4A 闪电成像仪的下传速率为 21 Mbit/s), 同时地面数据处理与闪电产品生产系统也能够实时完成虚警事件滤除与回归处理(延时 1 s、不间断持续处理), 这是闪电探测载荷最重要的参数选择。

3) P_d 和 F_{FAR} 完全是特性化的参数, 除取决于设定阈值 $R_{SNR,T}$ 外, 还取决于背景和闪电脉冲信号的强度对比情况和变化情况, 这两个参数直接影响闪电的 PD 和 FAR。

4) 天基闪电探测载荷的闪电探测性能验证(PD 和 FAR 的验证)也是特性化的, 必须结合现有技术基础, 在实验室建设一套能够真实模拟云顶闪电光谱、辐射强度、持续时间、脉冲波形等光学特性及其放电点分布规律的目标模拟设备。设备需要同时模拟云层、陆地、水面等反射阳光的背景, 并将闪电与背景有机融合起来, 在闪电探测载荷发射前完成闪电探测载荷的闪电探测性能验证, 为载荷在轨提供技术支撑。天基闪电光学探测载荷的闪电探测性能需要载荷在轨经过一定时间的多方比对统计、验证后综合评价。

4 天基闪电探测技术及 FY-4A 闪电成像仪应用成果

由于在太空看闪电和在地面看闪电的差别巨大, 静止轨道闪电探测载荷在静止轨道上实时完成瞬态闪电与背景的成像和闪电的高性能检测时, 云层、地物等背景复杂、缓变、强度大, 闪电的强度、尺寸、数量、产生位置和持续时间等随机、瞬变, 因此, 天基闪电探测载荷与传统成像、空目监视与导弹预警等载荷具有巨大的差异。闪电的空间特性、时间特性、辐射特性和传输特性, 背景的上述相关特性以及闪电、背景的相关特性和载荷相结合而派生出来的特性, 都使得闪电探测载荷具有显著的独特性, 面临着巨大的技术挑战和极大的研制难度。

4.1 天基闪电光学探测关键指标研究

通常, 云层范围比较大, 闪电相对于云层来说相当于点状目标, 设置载荷空间分辨率时, 应令闪电能量在单个像元内占比最大, 尽可能降低云层强背景对闪电的影响。据统计, 单个放电脉冲的空间尺度为 5~10 km, 同时为避免单个放电脉冲分裂在多个像元上, 选取载荷像元分辨率为 7.8 km, 即可实现大部分单个放电脉冲与载荷空间分辨率的匹配。单个放电脉冲能量大部分集中在一个像元上, 降低了云层强背景淹没闪电信号的概率, 如图 11 所示。

闪电放电过程是瞬态的, 大部分闪电脉冲放电时间为 0.3~0.7 ms, 典型值为 0.54 ms。其光学辐射也是瞬态的。而云层等强背景是持续存在的, 变化比较缓慢。载荷曝光时间越长, 云层等强背景信号越大, 轻

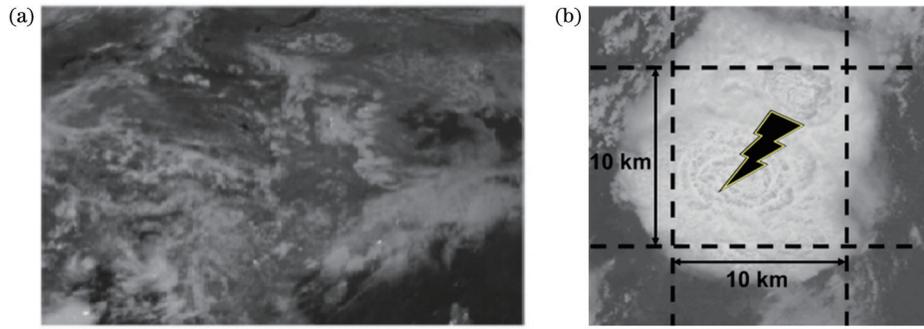


图 11 FY-4A 闪电成像仪空间分辨率选择。(a)太空中看到的闪电与背景;(b)闪电成像仪的闪电探测分辨率

Fig. 11 Spatial resolution selection of FY-4A lightning mapping imager. (a) Lightning and background observed on space; (b) lightning detection resolution of lightning mapping imager

则淹没闪电信号,重则造成载荷成像饱和,因此,曝光时间长短决定了闪电信号的可探测性。此外,由于闪电光学辐射是瞬态的、离散的,曝光时间和频次设置应尽可能不漏闪电,不使一个闪电脉冲分布在多帧上,因此,设置帧频为 500 frame/s,曝光时间为 1.8 ms,即可探测 99.5% 以上的闪电脉冲,如图 12 所示。

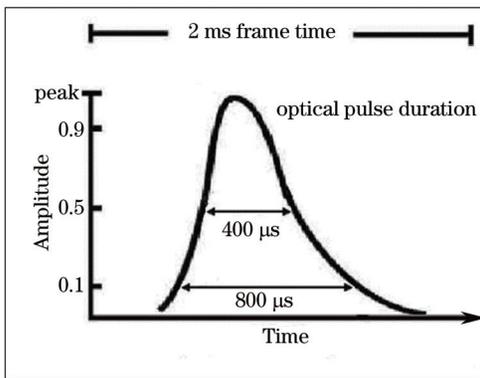


图 12 闪电脉冲持续时间与闪电探测帧周期选择

Fig. 12 Lightning pulse duration and the lightning detection frame period selection

北京空间机电研究所等单位从 2002 年开始对闪电光谱开展进一步研究^[54],进行了大量的实验室模拟闪电、自然闪电的光谱探测实验,获取了大量的实验数据。通过对闪电光谱数据、时间特性数据的统计与详细的对比分析确定:闪电的离散原子谱线中能量最强的是 O(I) 和 N(I) 的原子光谱,其中 O(I) 在 777.4 nm 波长处的光谱最强,约占总能量的 15% (图 13)。云顶探测时,闪电信号在 777.4 nm 波长处与该谱段内的地物、水面与云层的反射阳光形成的背景在强度上具有可比性,因此,该波段适合作为天基闪电光学探测的探测谱段。

因此,闪电探测选用的是 O(I) 三重谱线,即 777.21、777.42、777.53 nm,宽度不到 0.4 nm。通过分析式(1)和式(2)可得,闪电脉冲谱线只要在成像通带的峰值内,带宽对成像响应应无影响,而背景的成像响应则与带宽成正比。因此,超窄带滤光片是抑制云

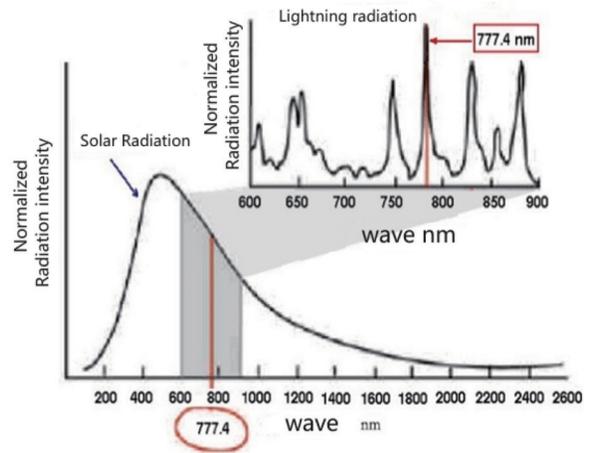


图 13 闪电与阳光背景光谱的对比^[54]

Fig. 13 Comparison between lightning and sunlight background spectra^[54]

层、地物和水面等反射阳光的背景的最重要光学元件,光谱滤波是提高闪电脉冲强度与背景强度对比的 4 种重要措施之一。

分析式(2)、(6)、(7)可得,超窄带滤光片的光谱特性直接影响闪电探测载荷的 $R_{SNR,s}$,进而直接影响闪电探测载荷最重要的两个性能参数——PD 和 FAR。从方案优化考虑,应选择更窄的带宽 $\Delta\lambda$,较窄的带宽可更好地抑制背景,实现更高的 $R_{SNR,s}$,从而提高载荷的闪电探测能力。但由于超窄带滤光片的制造工艺的限制,制造较窄带宽(比如 0.8 nm,甚至 0.5 nm)的大口径($>\Phi 140$ mm)超窄带滤光片难度极大,目前只有美国可以研制这种超窄带滤光片,但其透过率最大只能达到 0.3~0.5。降低光学系统透过率 k 也会使闪电脉冲 $R_{SNR,s}$ 大幅降低。因此,选择 1.0~2.0 nm 的带宽是综合考虑超窄带滤光片工艺可实现性、透过率、闪电脉冲信噪比等指标后确定的。

同时,超窄带滤光片的带宽和中心波长角度漂移是相匹配的^[65],较窄的带宽显然对角度漂移有更严格的要求。超窄带滤光片的中心波长随着入射角增大而往短波方向非线性漂移,角度越大,漂移越大,如图 14 所示。

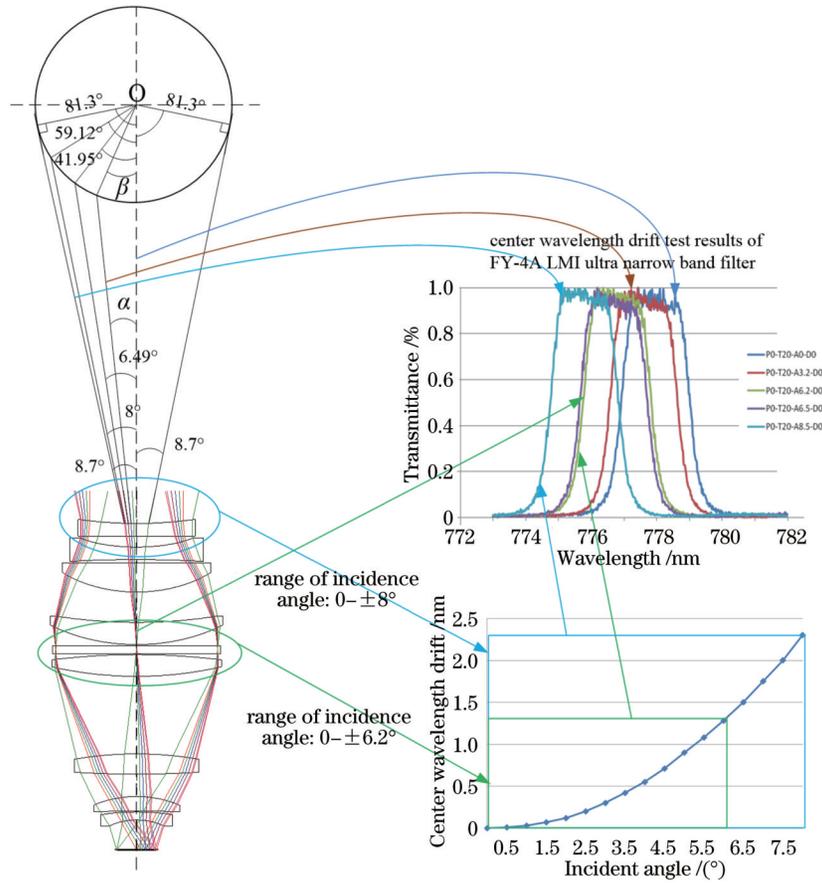


图 14 超窄带滤光片中心波长和入射角漂移的关系

Fig. 14 Relationship between center wavelength and incident angle drift of ultra narrow band filter

超窄带滤光片中心波长漂移前后只要保证 O(I) 三重谱线都在通带峰值范围内,则不会对闪电探测载荷的闪电探测性能产生不利影响。由于存在角度漂移问题,带宽选择时需要保证漂移前后 O(I) 三重谱线在 777.4 nm 波长处都具有峰值透过率,因此,带宽为 1~2 nm 时,可以保证 $\Phi 16^\circ$ 范围内的 O(I) 三重谱线在 777.4 nm 波长处都在通带峰值范围内,如图 15 所示。

4.2 天基复杂背景下瞬态多点源微弱目标实时探测技术

云层、陆地、海洋和绿色植被等强阳光反射背景的空间范围大、空间连续、形态和强度变化缓慢;闪电信号的空间尺度小、呈点源形态、发生位置和强度大小呈随机变化、持续时间瞬态变化,与传统意义上的噪声分布和变化规律类似,上述特性使得闪电信号的探测异常困难,如图 16 所示。因此,为了实现天基闪电光学高性能实时探测,必须结合背景、闪电、噪声等光谱特性、时空特性等差异和变化规律,利用时间滤波、空间滤波、超窄带光谱滤波、星上时空域多维融合点目标检测等多种极值化处理技术^[57,66-68]。

高透过率超大口径超窄带滤光片(有效通光口径 $> \Phi 140$ mm、带宽 < 2.0 nm、透过率 $> 80\%$)是抑制强阳光反射背景信号、令闪电强度与强阳光反射背景

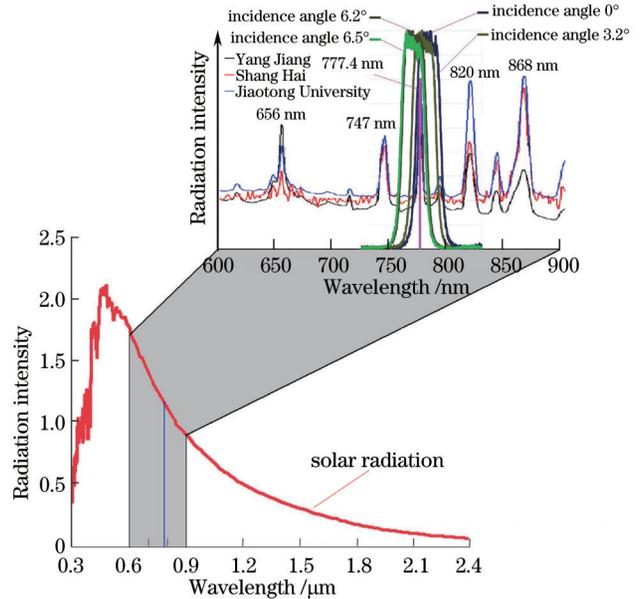


图 15 超窄带滤光片的中心波长及带宽测试曲线

Fig. 15 Test curves of center wavelength and bandwidth of ultra narrow band filter

具有可比性的关键,同时小 F 数光学系统 ($f'/D=f'/1.0$, 其中, D 为光学系统有效通光口径, f' 为光学系统焦距)则是实现光谱滤波后微弱信号高灵敏度响应的

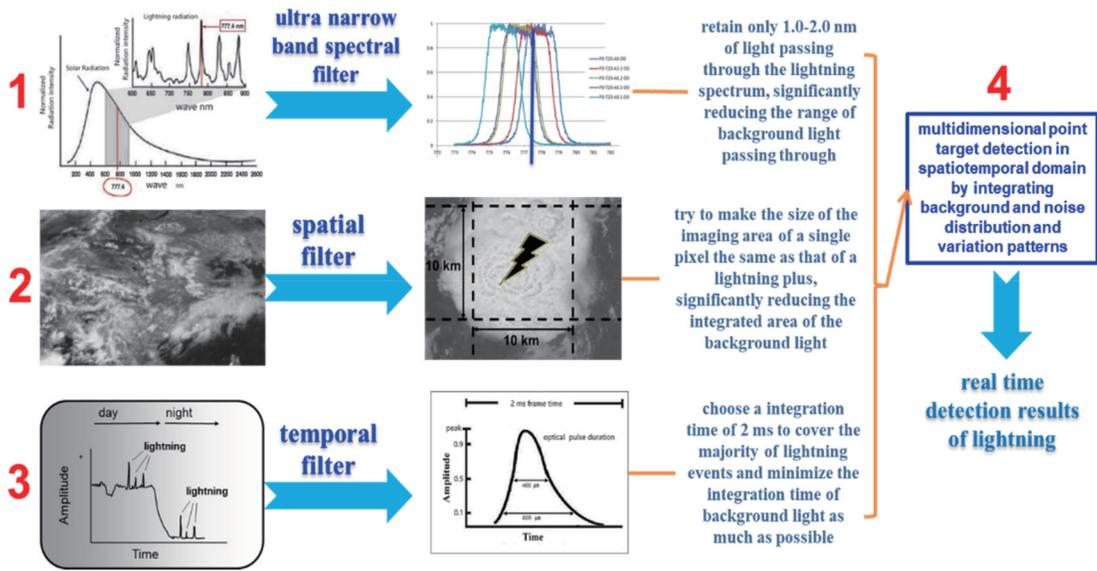


图 16 天基复杂背景下多瞬态点源微弱目标实时探测总体技术

Fig. 16 Overall technology for real-time detection of weak targets from multiple transient point sources in a complex background on space

有效措施。两者综合应用可实现微弱闪电的有效增强,为大反差强阳光背景下微弱点源闪电有效检测提供高质量的图像输入^[68]。

4.3 FY-4A 闪电成像仪在轨应用成果

我国 FY-4A 闪电探测仪(图 17)于 2016 年 12 月 11 日发射,实现了在云层、陆地、海洋等复杂强背景和昼夜、晨昏等复杂光照条件下(动态 $>4000:1$)微弱闪电(闪电持续时间为 0.3~0.7 ms、信背比 ≤ 0.01)24 h、500 frame/s 的高速实时探测。FY-4A 闪电成像仪是亚太第一台、全球第一批(两台)静止轨道闪电探测载荷。

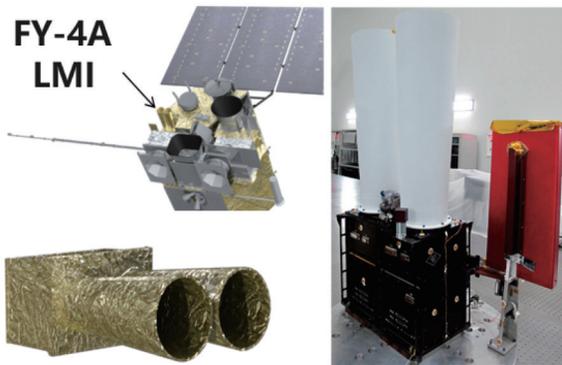


图 17 FY-4A 闪电成像仪实物与其在卫星上的安装图

Fig. 17 FY-4A lightning mapping imager and its installation on satellite

FY-4A 闪电成像仪在轨可靠运行以来(2016-12-11—至今),实现了亚太地区覆盖范围内的闪电事件实时探测。通过对探测到闪电事件的分析与研究,人们利用闪电实时探测结果实现了强对流天气过程的完整监测和跟踪。与地基闪电探测网相比,FY-4A 闪电成

像仪能够实现亚太地区覆盖区域内全部闪电(云地闪、云内闪、云间闪)的 24 h 不间断同时探测,弥补了地基雷电探测网的探测闪电类型(地基网无法探测云内闪、云间闪)和覆盖范围(地基网无法覆盖山区、海洋)的不足。如图 18 所示,FY-4A 闪电成像仪服务于我国及全球气象业务,开创了亚太地区天基光学实时闪电探测的先河,被广泛应用于亚太地区的雷电和强对流灾害及其次生灾害的实时预警预报,同时为我国和全球的雷电机理、气候变化、大气循环等科学研究提供了重要实测数据,产生了重大的社会、经济等应用效益,应用前景广阔^[68-87]。

国家卫星气象中心、国家气象中心、国家气象中心强天气预报中心、国家气候中心、中国气象科学研究院、南京信息工程大学、云南大学、国家电网雷电监测预警中心、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、北京市气象局、上海市气象局等研究所、高校及工业应用部门广泛开展了 FY-4A 闪电成像仪探测数据的分析、研究及应用,在雷电(闪电)、强对流灾害、台风等研究、预警预报、数值预报同化等方面取得了显著应用成果。

福建省气象局福建省灾害天气重点实验室林小红等^[69]、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室张文娟^[70]、安徽省气象台魏凌翔等^[71]、南京信息工程大学应急管理学院的张志伟等^[72]、江西省气象台支树林等^[73]利用 FY-4A 闪电成像仪的闪电探测数据对成像仪的强对流天气(台风、台前飑线、强降水等)监测与预警能力进行了分析研究。研究结果揭示了闪电活动与对流演变的关系,有助于天基闪电资料在中小尺度强对流监测和预警中的应用:1)揭示了台风对流分布三圈结构与闪电活动相关特征的关系。高层云闪更能揭示台风眼区的对流特性,在台风增强前的 1~3 h 内闪

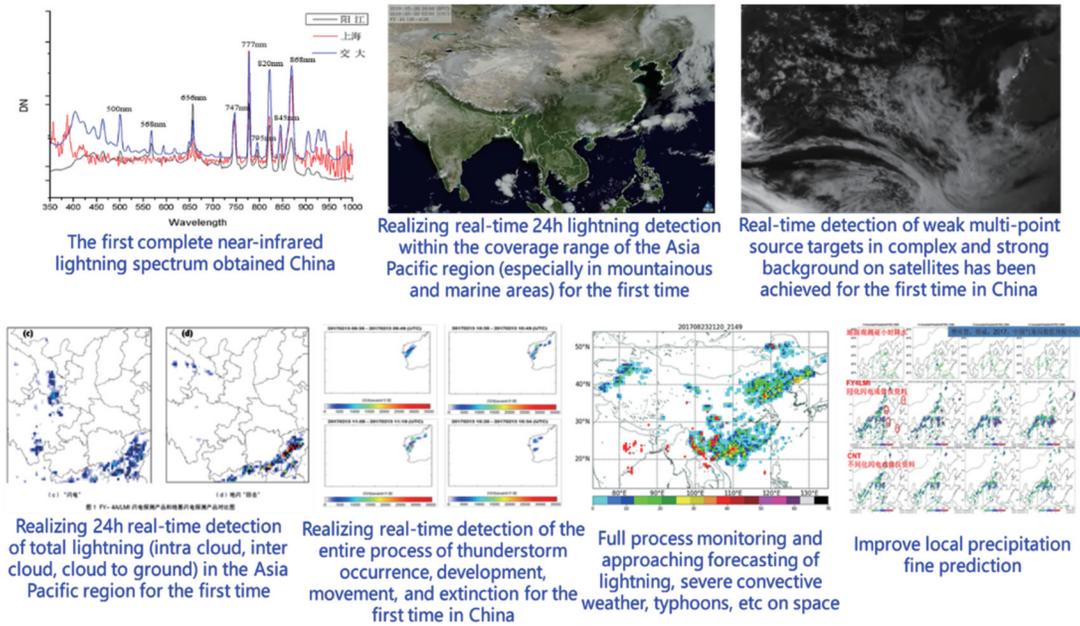


图 18 FY-4A 闪电成像仪部分应用成果^[68]

Fig. 18 Some application results of FY-4A lightning mapping imager^[68]

电高发且闪电位置出现在台风前沿,内核闪电提前 Ri (理查逊数)发生 3~4 h,具有有效的预警作用。2) 闪电成像仪闪电频次的时空变化与台前爬线的演变过程相一致,闪电成像仪闪电爆发对台前爬线强度增强具有提早约 1 h 的指示作用。3) 雷暴大雨大风基本上都发生在闪电成像仪闪电密集区的前沿且在移动方向前方,可有效监测与预警登陆台风的强对流和强降水过程。

国家气象中心/中国气象局数值预报中心徐国强等^[74]、中国气象科学研究院黄守友等^[75]研究了 FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响,通过在 GRAPES 云分析系统中加入 FY-4A 闪电成像仪的闪电探测资料,分析研究了天基闪电探测资料对模式计算的雷达反射率、云微物理变量和降水预报等影响,并利用 2019 年 8 月 4 日至 5 日山西省中北部太行山区区域强对流降水过程进行了实验验证。结果表明:加入天基闪电探测资料后,计算得到的雷达回波更接近实测雷达回波,可有效提高初始时刻云水、云冰和雪等计算总量并有效调整云微物理要素,使得闪电区域的云微物理要素含量显著增加,从而有效提高 24 h 内的降水预报准确率,消除或减弱数值模式 spin-up 现象,进一步提高短临降水预报准确率。

中国气象科学研究院赵焯等^[76]以四川省冕宁暴雨为例将 FY-4A 闪电成像仪与地基 ADTD 闪电资料引入数值预报模式进行了多组数值实验,结果表明:1) ADTD 闪电资料范围广、分散, FY-4A 闪电成像仪闪电资料数量密集、分布集中;2) 进入模式后,两种闪电资料转化形成的代理雷达回波具有很好的一致性;3) 引入两种闪电资料都对降水预报具有正效果,对于云

微物理要素都具有调整作用(在不同区域的效果不同),两种闪电资料分布不完全一致,具有一定互补性。

国家卫星气象中心曹冬杰等^[77]、任素玲等^[78],山东省威海市气象局张萍萍等^[79],山东省气象防灾减灾重点实验室刘向科等^[80]研究了 FY-4A 闪电成像仪、ADTD 闪电资料对强天气的监测预警能力,结果表明:1) 星地探测结果一致性较好,闪电成像仪观测的闪电位于对流云前方,与降水区域吻合度较高;2) 在对流迅速发展初期,闪电成像仪观测的闪电超前于 ADTD 观测的闪电,锋面降水阶段中超前时间更长,约 1~2 h;3) 暖区降水和锋面降水阶段,闪电成像仪观测的闪电位于对流云团移动方向前方时,该区域 1 h 内积云有发展趋势,对对流系统发展演变有较好的提前指示意义,在预报业务中可利用闪电成像仪的位置来辅助制作强对流落区预报。

中国气象局公共气象服务中心张国平等^[81]基于地基闪电探测资料、FY-4A 闪电成像仪闪电探测资料初步建立了全国闪电临近预报服务产品加工系统,并将该系统引入公共气象服务中心业务平台中实时运行。该系统可以输出未来 2 h 内间隔 30 min、分辨率 10 km 的闪电发生频次预报。全国闪电外推预报检验结果表明,30 min 闪电预报命中率为 72%,空报率为 28%。该系统已于 2018 年 6 月上线运行,正式为专业用户提供精细化的融合地面闪电定位和风云四号闪电观测的全国闪电临近预报服务。

综上, FY-4A 闪电成像仪在多方面均取得了显著应用成果,包括:成像仪闪电探测数据与雷达图、云图等其他观测数据耦合应用;天基闪电探测、地基闪电探测等闪电探测结果联合应用于雷电产生机理、雷电成

灾与减灾、强对流成灾与减灾;利用闪电探测结果研究我国雷电分布、雷电规律与气候变化,台风与雷电和降水,台风发展,移动路径与闪电关系等。FY-4A 闪电成像仪为我国的强对流天气研究、预报、预警提供了重要数据^[69-87],产生了巨大经济效益与社会效益。

5 天基光学实时探测的发展方向和展望

根据我国及全球的空间光学闪电实时探测现状及技术发展趋势,后续天基光学闪电探测的技术发展主要体现在以下几个方面:1)静止轨道天基闪电实时智能探测与应用;2)低轨天基立体闪电实时探测与应用;3)天基高空/空间闪电实时探测与应用。

5.1 静止轨道天基闪电实时智能探测与应用

风云四号气象卫星的系统规划和风云四号闪电成像仪的发展规划在闪电探测、闪电数据处理、闪电产品生成、闪电数据分发、闪电预警预报等方面环节较多,星地探测方案设置开环,时效性越来越无法满足未来高效、智能、实时应用,尤其是不能实时有效地响应局地突发强对流灾害的重点高强实时探测与应用需求。

因此,后续天基闪电光学探测应逐步向闪电实时智能探测与应用系统方向发展,这样才能更好地服务于我国及全球的极端气象灾害性天气、台风等极端气象灾害的预警预报以及气象气候研究。具体技术路线可分为:

1)根据成像响应情况,研究逐像元多级动态设置探测器及闭环数据处理系统,实现不同区域成像参数在轨动态设置,满足响应灵敏度与成像动态最优设置需求,有效提高全圆盘广域范围内的闪电成像能力;

2)根据背景区域、背景分布规律、背景与闪电特征及其变化规律等智能学习与实时优化背景评估,实现晨昏交替、山海冰陆等多场景下多变背景的精确评估与去除;

3)在轨实时学习所在区域的闪电规律和探测结果,根据闪电发生发展、灾害发生区域及其危害程度实时智能地设置探测阈值,满足与灾害危害程度相关联的闪电重点探测需求;

4)在轨智能统计和学习虚假事件规律,在轨实时滤除虚假事件部分,同时降低探测阈值,均衡探测灵敏度、闪电事件数目和下传速率之间的关系,有效提高闪电探测的效能;

5)在轨实时进行闪电组(group)、闪电(flash)的聚类处理,按需进行闪电产品生成,并实时发送闪电预警预报信息,有效提高闪电产品应用时效性。

5.2 低轨天基立体闪电实时探测与应用

我国现有静止轨道天基闪电实时探测系统能够实时不间断地监视观测区域闪电发生情况,进行短时、实时预警预报,但还存在以下不足:

1)FY-4A 闪电成像仪的空间分辨率为 8 km,精细

化监测能力偏弱;

2)FY-4A 闪电成像仪以单相机面阵凝视方式实现闪电探测,无法获取三维闪电信息,此外,受轨道及视角的影响,闪电的地理位置偏差无法被消除,这限制了闪电的预警预报应用,急需精准的立体闪电观测;

3)闪电是瞬态点源目标,时间上没有持续性,立体探测需要从不同角度同时对同一闪电进行成像和探测,从而获得同一闪电的多个角度信息。

因此,采用双星搭载相同闪电探测仪的方式可以实现同一闪电的不同角度信息获取,如图 19 所示。单星采用面阵视频相机,以 500 frame/s 的速率进行连续闪电探测,得到闪电的位置、强度、背景强度等瞬时特性,再双向立体反演获得闪电的高度信息,实现即时天气预报。

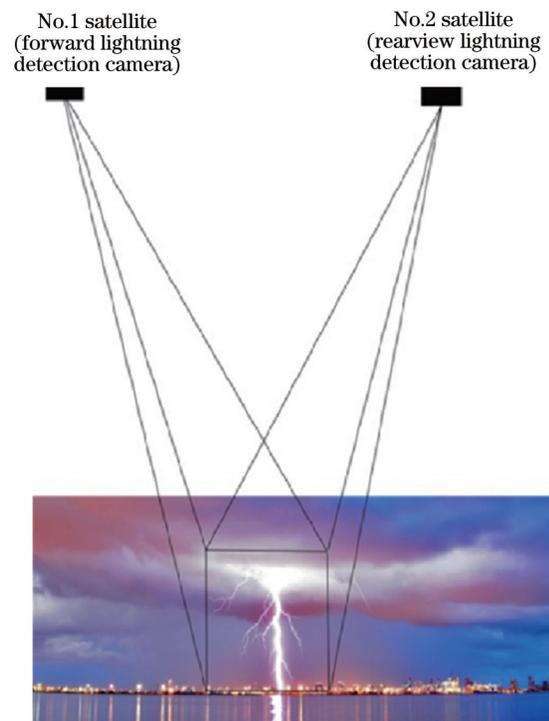


图 19 天基低轨立体光学闪电探测原理图

Fig. 19 Schematic diagram of polar lightning optical stereo detection on space

5.3 天基高空/空间闪电实时探测与应用

中高层大气放电和气辉现象与所在大气区域的大气组成成分、密度、温度等气象条件密切相关。中高层大气稀薄,大气介质电击穿的电场强度比较小,因此较强闪电放电的电磁场可击穿中高层大气介质,产生 TLEs,如“红色精灵”、“蓝色精灵”、“淘气精灵”、光晕或喷流等现象(图 20)。这种放电现象影响的区域很广,其空间尺度通常可达数十 km,基本上是一个雷暴体的水平尺度。空间闪电与近地空间粒子含量、粒子类型直接相关,空间闪电受低层闪电影响较大,空间闪电发生后改变空间粒子类型、粒子含量及分布。当飞机、火箭、导弹、飞船等航空航天飞行器飞越雷暴区

或者飞行在空间雷暴区附近时,极易受到低层闪电及空间闪电的电磁辐射影响,造成严重安全问题。

我国对地基中高层大气闪电的探测与研究较少,且绝大部分研究应用地基探测系统,尚未建设有效的临近空间闪电及其效应的研究系统。但由于云层、雾霾、沙尘等天气原因影响,探测系统对电离层雷暴现象的观测效率较低。中国台湾 Formosat-2 satellite 搭载的 ISUAL 被用来探测 TLEs,以更好地研究闪电活动与 TLEs 的关系。

我国尚未建立有效的中高层大气闪电 (TLEs) 探测系统,尤其是天基探测系统尚未规划,因此亟须研究中高层大气的闪电与大气组成成分、密度、温度的关系,研究其对导弹、航天器、通信、探测载荷等安全影响,以实现近地临近空间等中高层大气闪电 (TLEs) 的实时预警预报,服务于我国进出大气层和天基航天器的安全保障。

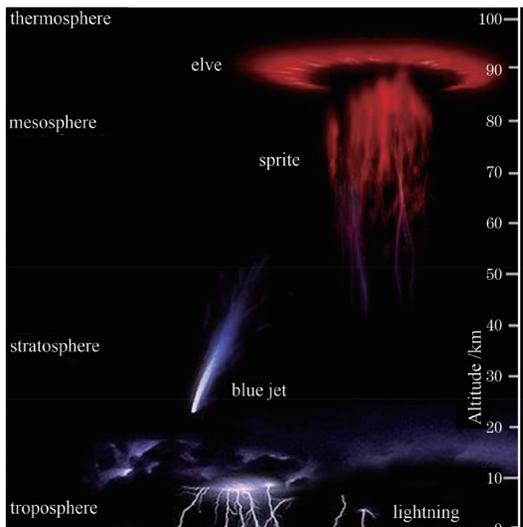


图 20 低空、高空及空间闪电类型

Fig. 20 Lightning types in low altitude, high altitude and near space

空间闪电实时探测结果可实时反演出空间环境及其变化情况、空间粒子含量与分布的变化过程。因此,亟须发展天基空间闪电实时探测系统,用于实现空间环境即时、实时预警预报。

6 结束语

强对流灾害给我国和全球造成了严重生命安全危害和巨大经济损失,严重威胁航空、航天、信息、通信等安全。闪电的实时不间断探测对强对流灾害来说具有重要的预警预报作用,因此全球有能力的国家都建立了地基电磁雷电探测系统或天基光学闪电探测系统,两种系统相互补充,在闪电和强对流灾害的预警预报中发挥了重要作用,有效降低了人民财产损失,保障了人民生命安全。

在天基闪电光学探测上,美国起步最早,通过低轨

OTD、LIS 的发展,最终实现了静轨 GOES-16 GLM 的研制(2016 年 11 月发射)。欧洲和我国同期开展静轨闪电探测载荷研制(我国 FY-4A 闪电成像仪,2016 年 12 月发射;欧洲 MTG LI,2022 年 12 月发射)。目前上述三台静轨闪电探测载荷均在轨服役。

由于闪电是叠加在陆地、云层和水面强阳光反射背景上的微弱点状随机目标,天基闪电光学探测面临着极大的技术难度。FY-4A 闪电成像仪是在结合背景、闪电及其噪声等光谱、时空等特性差异及其变化规律基础上,利用时间滤波、空间滤波、超窄带光谱滤波、星上时空域多维融合点目标检测等多维技术完成研制与在轨应用的天基闪电光学探测载荷。国内气象部门和众多科研院所利用 FY-4A 闪电成像仪的闪电探测结果开展了雷电机理、台风监测与预报、强对流预报、闪电资料同化等研究与应用,实现了雷电和强对流灾害及其次生灾害的精确预警预报,产生了巨大的社会效益。

我国已实现在静止轨道对低层闪电的探测与业务应用,但在低层闪电的高精度定位、精细化智能化探测与实时应用等方面与国外还存在较大差距,同时我国尚未建立有效的中高层大气闪电 (TLEs) 探测系统,尤其是天基探测系统尚未规划。因此,在低层闪电探测方面,后续应逐步向立体高精度探测、智能探测、因需自主规划与应用闭环等方向发展;在中高层闪电 (TLEs) 探测方面,后续应开展探测方法与探测载荷研究,以实现实时探测与预警预报。

参 考 文 献

- [1] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2005—2021)[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
China Meteorological Administration. Yearbook of meteorological disasters in China (2005 - 2021) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.
- [2] 杨军. 气象卫星及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
Yang J. Meteorological satellites and their applications[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [3] 庄国泰, 高培勇. 应对气候变化报告(2022)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.
Zhuang G T, Gao P Y. Annual report on actions to address climate change (2022) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2022.
- [4] 谢伏瞻, 庄国泰. 应对气候变化报告(2021)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
Xie F Z, Zhuang G T. Annual report on actions to address climate change (2021) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2021.
- [5] 郑国光. 气象灾害如何防[EB/OL]. (2013-03-02)[2023-03-05]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202110/t20211030_4063281.html.
Zheng G G. How to prevent meteorological disasters [EB/OL]. (2013-03-02) [2023-03-05]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202110/t20211030_4063281.html.
- [6] 鄒秀书, 张其林, 袁铁, 等. 雷电物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Qie X S, Zhang Q L, Yuan T, et al. Lightning physics[M].

- Beijing: Science Press, 2013.
- [7] 陈思蓉, 朱伟军, 周兵. 中国雷暴气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 703-710.
Chen S R, Zhu W J, Zhou B. Climate characteristic and variation tendency of thunderstorm in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(5): 703-710.
- [8] 郟秀书, 周筠珺, 袁铁. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 743-750, 885.
Qie X S, Zhou Y J, Yuan T. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 743-750, 885.
- [9] 五院 508 所. 《风云四号》闪电成像仪[C]//《风云四号》气象卫星使用要求第二次专家研讨会, 2000, 167-170.
The 508th Research Institute of China Academy of Space Technology. Geostationary lightning mapper of FY-4 satellite [C]// Second Expert Seminar on Operational Requirements for FengYun-4 Meteorological Satellite, 2000, 167-170.
- [10] 黄富祥. FY-4 卫星闪电成像仪的使命和挑战[J]. 气象科技, 2007, 35(z1): 35-42.
Huang F X. Geostationary lightning mapper of FY-4 satellite: the mission and challenge[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(z1): 35-42.
- [11] Chan Y W, So C K. The applications of Feng Yun 4A satellite products for weather monitoring over the Asian regions[EB/OL]. [2023-05-04]. <https://ams.confex.com/ams/2019Annual/webprogram/Paper350397.html>.
- [12] 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天, 2016, 33(2): 1-8.
Dong Y H. FY-4 meteorological satellite and its application prospect[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(2): 1-8.
- [13] 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al. Application and development of FY-4 meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 8-19.
- [14] 张如意, 李卿, 董瑶海, 等. 静止轨道气象卫星观测系统发展设想[J]. 上海航天, 2012, 29(5): 7-13.
Zhang R Y, Li Q, Dong Y H, et al. Development plan of geostationary meteorological satellite observation system[J]. Aerospace Shanghai, 2012, 29(5): 7-13.
- [15] 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(2): 1-12.
Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 1-12.
- [16] 朱珺. 国内外静止气象卫星的发展综述[J]. 中国科技成果, 2018, 19(8): 6-9.
Zhu J. Overview of the development of geostationary meteorological satellites at home and abroad[J]. China Science and Technology Achievements, 2018, 19(8): 6-9.
- [17] 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 世界各国静止气象卫星发展综述[J]. 气象科技进展, 2020, 10(1): 22-29, 41.
He X W, Feng X H, Han Q, et al. Advances of the geostationary meteorological satellite in the world: a review[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(1): 22-29, 41.
- [18] 张春华, 李松, 刘洪伟, 等. 美国 GOES 系列卫星的发展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 124-131.
Zhang C H, Li S, Liu H W, et al. Development of GOES series satellites in the United States[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 124-131.
- [19] 张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 611-620.
Zhang Y J, Meng Q, Ma M, et al. Development of lightning detection technique with application of lightning data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(5): 611-620.
- [20] 王宇, 郟秀书, 王东方, 等. 北京闪电综合探测网(BLNET): 网
络构成与初步定位结果[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 571-582.
Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. Beijing lightning NETWORK(BLNET): configuration and preliminary results of lightning location[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(3): 571-582.
- [21] 刘超. 多增益雷电脉冲信号传感器的研制与应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
Liu C. Development and application of multi-gain lightning electromagnetic pulse signal sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [22] Finke U. Characterising the lightning source for the MTG lightning imager mission[EB/OL]. [2023-05-04]. <https://www.researchgate.net/publication/253829411>.
- [23] Krider E P, Noggle R C, Uman M A. A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(3): 301-306.
- [24] Dowden R L, Holzworth R H, Rodger C J, et al. World-wide lightning location using VLF propagation in the Earth-ionosphere waveguide[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2008, 50(5): 40-60.
- [25] Cummins K L, Krider E P, Malone M D. The US National Lightning Detection Network/sup TM/and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4): 465-480.
- [26] Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. national lightning detection network[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [27] Demetriades N W S, Murphy M J, Cramer J A. Validation of Vaisala's global lightning dataset (GLD360) over the continental United States[C]//Preprints, 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ, Amer. Meteor. Soc. D. 2010, 16.
- [28] 李家启, 申双和, 夏佰成, 等. 基于 ADTD 系统的闪电频次分布特征分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(5): 710-716.
Li J Q, Shen S H, Xia B C, et al. Analysis of lightning frequency distribution characteristics based on ADTD system[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(5): 710-716.
- [29] Oetzel G N, Pierce E T. VHF technique for locating lightning [J]. Radio Science, 1969, 4(3): 199-202.
- [30] Poehler H A, Lennon C L. Lightning detection and ranging system LDAR system description and performance objectives: NASA-TM-74105[R]. New York: NASA Technical Reports Server, 1979.
- [31] Boccippio D J, Heckman S, Goodman S J. A diagnostic analysis of the Kennedy Space Center LDAR network: 1. Data characteristics[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D5): 4769-4786.
- [32] Rison W, Thomas R J, Krehbiel P R, et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: initial observations in central New Mexico[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3573-3576.
- [33] Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Accuracy of the lightning mapping array[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D14): D14207.
- [34] Liu C L, Heckman S. Using total lightning data in severe storm prediction: global case study analysis from North America, Brazil and Australia[C]//2011 International Symposium on Lightning Protection, October 3-7, 2011, Fortaleza, Brazil. New York: IEEE Press, 2011: 20-24.
- [35] Christian H J, Frost R L, Gillaspay P H, et al. Observations of optical lighting emissions from above thunderstorms using U-2 aircraft[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1983, 64(2): 120-123.
- [36] Christian H J, Goodman S J. Optical observations of lightning from a high-altitude airplane[J]. Journal of Atmospheric and

- Oceanic Technology, 1987, 4(4): 701-711.
- [37] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J. The detection of lightning from geostationary orbit[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D11): 13329-13337.
- [38] Wolfe W L, Nagler M. Conceptual design of a spaceborne lightning sensor[J]. Proceedings of SPIE, 1980, 0246: 22-33.
- [39] Thomson L W, Krider E P. The effects of clouds on the light produced by lightning[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1982, 39(9): 2051-2065.
- [40] Boccippio D J, Koshak W, Blakeslee R, et al. The optical transient detector (OTD): instrument characteristics and cross-sensor validation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(4): 441-458.
- [41] Mach D M, Christian H J, Blakeslee R J, et al. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D9): D09210.
- [42] Boldi R, Williams E, Matlin A, et al. The design and evaluation of the lightning imaging sensor data applications display (LIS-DAD) [J]. Revista Argentina De Microbiologia, 1998, 43(43): 68.
- [43] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. The lightning imaging sensor[EB/OL]. [2023-05-06]. https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/overview_lis_instrument.html.
- [44] Norwood V. Lightning mapper sensor study: NASA-CR-170908 [R]. New York: NASA Technical Reports Server, 1983.
- [45] Goodman S J, Blakeslee R J, Koshak W J, et al. The GOES-R geostationary lightning mapper (GLM) [J]. Atmospheric Research, 2013, 125/126: 34-49.
- [46] Rudlosky S D, Goodman S J, Koshak W J, et al. Characterizing the GOES-R (GOES-16) geostationary lightning mapper (GLM) on-orbit performance[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 23-28, 2017, Fort Worth, TX, USA. New York: IEEE Press, 2017: 279-282.
- [47] Goddard Space Flight Center Greenbelt. GOES-R series data book: CDRL PM-14[M]. New York: National Aeronautics and Space Administration, 2018.
- [48] Christian H, Aamodt E K. Device for detecting an image of a nonplanar surface: US8063968[P]. 2011-11-22.
- [49] Bredthauer R, Boggs K, Bredthauer G, et al. A novel CCD for application in high-frame rate geostationary space-based imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8453: 84531N.
- [50] Lorenzini S, Bardazzi R, Di Giampietro M, et al. Optical design of the lightning imager for MTG[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10564: 1056406.
- [51] Durand Y, Hallibert P, Wilson M, et al. The flexible combined imager onboard MTG: from design to calibration[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9639: 963903.
- [52] 胡丽琴, 黄富祥. 基于蒙特卡罗方法的卫星光学波段闪电辐射观测模拟[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1101001.
- Hu L Q, Huang F X. Monte Carlo radiative transfer modeling of optical lightning signals observed by satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1101001.
- [53] 穆亚利, 袁萍, 王雪娟, 等. 利用近红外波段光谱研究闪电回击通道温度的演化特性[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0630001.
- Mu Y L, Yuan P, Wang X J, et al. Study on evolution of lightning return stroke channel temperature by near-infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0630001.
- [54] 鲍书龙, 陈强, 张志清, 等. 静止轨道闪电光学探测的光谱选择及影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(3): 57-64.
- Bao S L, Chen Q, Zhang Z Q, et al. Spectral band selection and influence analysis for lightning optical detection for the geostationary meteorological satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(3): 57-64.
- [55] 陈圣波, 杨莹, 崔腾飞. 静止卫星闪电探测中云影响研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 797-803.
- Chen S B, Yang Y, Cui T F. Study of the cloud effect on lightning detection by geostationary satellite[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 797-803.
- [56] 惠雯, 黄富祥, 朱杰, 等. 卫星闪电成像仪光学成像探测技术[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 361-369.
- Hui W, Huang F X, Zhu J, et al. Technology of optical detection of lightning from space[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10s): 361-369.
- [57] 鲍书龙, 唐绍凡, 李云飞, 等. 静止轨道瞬态点源多目标闪电信号实时探测技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2390-2395.
- Bao S L, Tang S F, Li Y F, et al. Real-time detection technology of instantaneous point-source multi-target lightning signal on the geostationary orbit[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2390-2395.
- [58] 杨静, 郗秀书, 张广庶, 等. 发生于山东沿海雷暴云上方的红色精灵[J]. 科学通报, 2008, 53(4): 482-488.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. Red Sprite occurred above thunderstorm clouds along the Shandong Coast[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(4): 482-488.
- [59] Frey H U, Mende S B, Harris S E, et al. The imager for sprites and upper atmospheric lightning (ISUAL) [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, 121(8): 8134-8145.
- [60] 杨艳. 我国首台地球静止轨道闪电成像仪成功在轨运行 全身“黑科技”充满“抓闪电”超能力[J]. 国际太空, 2017, 4: 21-23.
- Yang Y. China's first geostationary orbit lightning imager successfully runs in orbit. The whole body "black technology" is full of "catching lightning" super power[J]. Space International, 2017, 4: 21-23.
- [61] 杨艳. 中国首台地球静止轨道闪电成像仪成功在轨[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(1): 2.
- Yang Y. China's first geostationary orbit lightning imager was successfully in orbit[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(1): 2.
- [62] 我国新一代静止轨道气象卫星风云四号首批图像与数据发布[EB/OL]. [2023-05-06]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-02/28/content_5171740.htm#1.
- Release of the first batch of images and data of Chinese new generation geostationary meteorological satellite FengYun-4 satellite[EB/OL]. [2023-05-06]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-02/28/content_5171740.htm#1.
- [63] 黄富祥, 郭俊柏, 冯小虎. 闪电成像仪虚警率和探测率模拟计算[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3116-3120.
- Huang F X, Guo J B, Feng X H. Simulating calculation of lightning detection efficiency and false alarm rate for lightning imagery on geo-satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3116-3120.
- [64] 高慧婷, 鲍书龙, 梁华, 等. 风云四号卫星闪电成像仪虚警滤除方法[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0911001.
- Gao H T, Bao S L, Liang H, et al. Filtering algorithm for nonlightning events using the FY-4 lightning mapping imager[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0911001.
- [65] 王少伟, 王利, 吴永刚, 等. 闪电探测用超窄带通滤光片的研制[J]. 光学仪器, 2004, 26(2): 118-122.
- Wang S W, Wang L, Wu Y G, et al. Study on ultra-narrow band pass filter used for lightning detection[J]. Optical Instruments, 2004, 26(2): 118-122.
- [66] 陈伟, 鲍书龙. FY-4 闪电成像仪实时事件处理器(RTEP)的 FPGA 设计研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(3): 31-37.
- Chen W, Bao S L. Design of RTEP with FPGA[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(3): 31-37.
- [67] 周严. 星载闪电成像仪信息处理系统的设计与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- Zhou Y. Design and implementation of information processing system for spaceborne lightning imager[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [68] 梁华, 鲍书龙, 陈强, 等. FY-4 卫星闪电成像仪设计与实现

- [J]. 上海航天, 2017, 34(4): 43-51.
- Liang H, Bao S L, Chen Q, et al. Design and implementation of FY-4 geostationary lightning imager[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 43-51.
- [69] 林小红, 张文娟, 范能柱, 等. FY-4A LMI 观测的利奇马(2019)台前飑线闪电活动及其与对流演变的关系[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 873-886.
- Lin X H, Zhang W J, Fan N Z, et al. Lightning activity in the pre-TC squall line of typhoon lekima(2019)observed by FY-4A LMI and its relationship with convective evolution[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 873-886.
- [70] 张文娟. FY-4A 闪电成像仪对我国登陆台风的监测和资料应用[EB/OL]. [2023-05-06]. <http://www.cms1924.org/UpFile/20230414165524202.pdf>.
- Zhang W J. Monitoring and data application of FY-4A lightning mapping imager for typhoons landing in China[EB/OL]. [2023-05-06]. <http://www.cms1924.org/UpFile/20230414165524202.pdf>.
- [71] 魏凌霄, 邱学兴, 童金, 等. 超强台风“利奇马”(1909)的闪电活动特征[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 123-129.
- Wei L X, Qiu X X, Tong J, et al. Characteristics of lightning activities during typhoon “Lekima” (1909) [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(1): 123-129.
- [72] 张志伟, 郭凤霞, 初雨, 等. 超强台风“山竹”(1822)的闪电活动特征[J]. 大气科学, 2023, 47(2): 399-416.
- Zhang Z W, Guo F X, Chu Y, et al. Characteristics of lightning activity in super typhoon Mangkhut (1822)[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(2): 399-416.
- [73] 支树林, 包慧濛, 李婕. FY-4A 卫星闪电资料在台风飑线天气监测中的应用能力分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 1178-1190.
- Zhi S L, Bao H M, Li J. Application ability analyses of FY-4A satellite flashes data in typhoon squall line weather surveillance [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2019, 41(6): 1178-1190.
- [74] 徐国强, 黄守友, 赵晨阳. FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究[J]. 气象, 2020, 46(9): 1165-1177.
- Xu G Q, Huang S Y, Zhao C Y. Influence of FY-4A lightning data on numerical forecast of convective weather[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(9): 1165-1177.
- [75] 黄守友, 徐国强. FY4A 的 LMIE 闪电数据对云信息初始化的影响及数值实验[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 378-392.
- Huang S Y, Xu G Q. Influence of LMIE lightning data of FY4A on cloud information initialization and numerical experiment[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2): 378-392.
- [76] 赵焯, 徐国强, 黄守友, 等. FY-4A 卫星闪电资料与 ADTD 闪电资料在四川省冕宁暴雨中的对比分析及数值模拟[J]. 大气科学, 2023, 47(3): 769-785.
- Zhao C, Xu G Q, Huang S Y, et al. Comparative analysis and numerical simulation of lightning detection data from FY-4A satellite and ADTD for rainstorm in Mianning, Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(3): 769-785.
- [77] 曹冬杰, 陆风, 张晓虎, 等. 风云四号卫星闪电探测产品在强对流天气监测中的应用[J]. 卫星应用, 2018, 11: 18-23.
- Cao D J, Lu F, Zhang X H, et al. Application of Fengyun-4 satellite lightning detection products in severe convective weather monitoring[J]. Satellite Application, 2018, 11: 18-23.
- [78] 任素玲, 赵玮, 曹冬杰, 等. FY-4A 白天对流风暴和闪电产品在华北强雷暴天气分析中的应用[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(1): 33-46.
- Ren S L, Zhao W, Cao D J, et al. Application of FY-4A daytime convective storm and lightning products in analyzing severe thunderstorm weather in North China[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(1): 33-46.
- [79] 张萍萍, 刘文婷, 章翠红, 等. 一次强降水过程中 FY-4A 闪电成像仪观测特征分析[J]. 气象, 2021, 47(11): 1391-1401.
- Zhang P P, Liu W T, Zhang C H, et al. Observation characteristics of FY-4A lightning mapping imager during a severe rainfall[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(11): 1391-1401.
- [80] 刘向科, 康宁, 张琴, 等. 星地探测闪电在一次中尺度对流系统中的活动特征分析[J]. 气象科技, 2023, 51(1): 14-21.
- Liu X K, Kang N, Zhang Q, et al. Analysis on the activity characteristics of satellite-to-earth lightning in a mesoscale convection system[J]. Meteorological Science and Technology, 2023, 51(1): 14-21.
- [81] 张国平, 王曙东, 姚叶青, 等. 融合地基和卫星观测的闪电外推预报服务产品加工系统[C]//第 35 届中国气象学会年会. 北京: 中国气象学会, 2018: 573.
- Zhang G P, Wang S D, Yao Y Q, et al. A lightning extrapolation prediction service product processing system integrating ground-based and satellite observations[C]//The 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2018: 573.
- [82] 宋琳, 张国平, 王曙东, 等. FY-4A 闪电成像仪在干旱区应用评估及与多源数据对比[J]. 干旱气象, 2023, 41(1): 25-33.
- Song L, Zhang G P, Wang S D, et al. Application evaluation of FY-4A lightning imager in arid area and comparison with multi-source data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(1): 25-33.
- [83] 文刚, 周仿荣, 方明, 等. 基于风云四号闪电成像仪的高原闪电探测分析[J]. 云南电力技术, 2021, 49(1): 7-9.
- Wen G, Zhou F R, Fang M, et al. Analysis of plateau lightning detection based on Fengyun-4 lightning imager[J]. Yunnan Electric Power, 2021, 49(1): 7-9.
- [84] 张森, 邱红, 覃丹宇, 等. 卫星在热带气旋快速增强观测中的应用进展[J]. 气象与减灾研究, 2021, 44(2): 81-86.
- Zhang M, Qiu H, Qin D Y, et al. Review on the research progress of satellite observations of rapidly intensifying tropical cyclones[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2021, 44(2): 81-86.
- [85] 邹耀仁, 王赞, 王淑一, 等. 黄渤海地区 FY-4A 闪电成像仪(LMI)探测效果评估[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 662-669.
- Zou Y R, Wang Y, Wang S Y, et al. Evaluation of detection effect of FY-4A lightning imager (LMI) in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(4): 662-669.
- [86] 惠雯, 黄富祥, 郭强. 卫星与地基闪电探测资料在闪电活动研究中的综合应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 218-229.
- Hui W, Huang F X, Guo Q. Combined application of lightning detection data from satellite and ground-based observations[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 218-229.
- [87] 钱勇, 施俊杰, 王廷慧, 等. 星地多源闪电资料在新疆地区的应用分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(3): 122-128.
- Qian Y, Shi J J, Wang Y H, et al. Application of the satellite-based lightning imaging sensor and the ground-based lightning location system in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(3): 122-128.

Review of Real-Time Space-Based Optical Detection Technology for Global Total Lightning

Bao Shulong^{1*}, Li Huan^{2**}, Sun Fan³, Lu Feng⁴, Zhang Zhiqing⁵, Chen Xiaojie⁶,
Tang Shaofan¹, Liang Hua², Zhao Yanhua²

¹*Environmental Resources and Meteorological Observation Field Office, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;*

²*Infrared Camera Research Department, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;*

³*Technology Management Department, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;*

⁴*National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;*

⁵*FengYun Meteorological Satellite Engineering Management, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;*

⁶*Meteorological Environment Satellite General Department, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201100, China*

Abstract

Significance Severe convective disasters are the most frequent and widely affected meteorological disasters, causing huge economic losses and posing a serious threat to people and social security. They are also a major threat to new technological fields such as aerospace and information communication. Lightning, as a typical element of global severe convective weather, plays an important role in indicating and warning strong convection. Therefore, lightning detection and warning of severe convective disasters have become one of the important tasks of space remote sensing.

Lightning detection systems mainly include ground-based and space-based detection systems. The ground-based lightning detection system mainly detects and locates broadband electromagnetic radiation signals emitted by lightning strikes, with detection spectral bands mainly including very low frequency (VLF), low frequency (LF), and very high frequency (VHF) bands. The ground-based lightning detection system has developed early and matured in technology, forming a relatively complete business system that plays an important role in lightning warning and forecasting. However, due to the discontinuous station layout of the ground-based lightning detection system and the barrier in mountainous areas, it is unable to effectively carry out uninterrupted lightning detection globally, especially in marine and mountainous areas. In order to overcome the limitations of ground-based lightning detection, space-based lightning detection technology has rapidly developed. The space-based lightning detection system has advantages such as large coverage range and is not limited by ground conditions. Among them, geostationary orbit lightning detection has unique advantages such as 24-hour uninterrupted and high real-time performance, and has become the main direction of international research on space-based lightning detection. It is a priority for the development of space-based lightning detection methods. The ground-based lightning detection system, low orbit and high orbit space-based lightning detection systems, and other lightning detection methods complement each other, achieving 24-hour uninterrupted, high-precision, and real-time detection of lightning, jointly serving strong convective disaster warning and prediction and climate research.

Progress In the research of space-based lightning optical detection, the United States was the earliest to conduct research, with a leading position in depth and breadth. Through the development of low orbit space-based lightning detection cameras optical transient detector (OTD) and lightning imaging sensor (LIS), the United States ultimately achieved the development of a geostationary orbit lightning detection camera GOES-16 GLM (geostationary lightning mapper), which was launched in November 2016. At the same time, Europe and China directly conducted research and development on geostationary orbit lightning detection cameras. China launched FY-4A LMI (lightning mapping imager) in December 2016, and Europe launched MTG LI (lightning imager) in December 2022. Currently, all three geostationary orbit lightning detection cameras are in orbit.

Due to the fact that lightning usually occurs in strong convective cloud systems, the background formed by reflected sunlight on land, oceans, and clouds has complex, gradual changes, and high-intensity characteristics. Lightning often occurs in areas with clouds, and its intensity and location are random, with short duration and significant differences in intensity. These characteristics make space-based lightning detection cameras significantly different from traditional imaging cameras and point target warning cameras. It has extremely development difficulty (Fig. 9 and 10).

FY-4A LMI is a geostationary orbit FY-4A LMI with independent intellectual property rights, developed by

combining the spectral characteristics of background, lightning and its noise (Fig. 13), spatiotemporal characteristics (Fig. 11 and 12), and their variation patterns. It adopts multiple core technologies such as time filtering, spatial filtering, ultra narrowband spectral filtering (Fig. 15), and multi-dimensional fusion point target detection in spacetime and space (Fig. 16). It was launched in December 2016 and applied in orbit meteorological applications. Domestic meteorological departments, numerous research institutes, and universities have utilized the lightning detection results of FY-4A LMI to conduct research and applications on lightning generation and development mechanisms, typhoon monitoring and forecasting, severe convective disaster forecasting, and lightning data assimilation. Accurate prediction and early warning of lightning, severe convective disasters, and their secondary disasters have been achieved (Fig. 18), resulting in huge social and economic benefits and broad application prospects.

Conclusions and Prospect China has already achieved the detection and meteorological application of lightning below the troposphere in geostationary orbit, but there is still a significant gap in high-precision positioning, refined detection, intelligent detection, and real-time application of lightning below the troposphere. At the same time, China has not yet established an effective atmospheric lightning in the stratosphere, mesosphere and thermosphere (TLEs, transient luminous events) detection system, especially a space-based detection system that has not been planned. Therefore, in the field of lightning below the troposphere detection, we should gradually develop towards three-dimensional high-precision detection, intelligent detection, on-demand independent planning and application closed-loop. In the detection of lightning in the stratosphere, mesosphere and thermosphere (TLEs), research on detection methods and cameras should be carried out in the future to achieve real-time detection and early warning, serving the safety guarantee of China's entry and exiting into the atmosphere and space-based spacecraft.

Key words severe convective disasters; space-based lightning optical detection; multi-dimensional fusion in spatio-temporal domains; early warning and forecasting; review of lightning detection