

文章编号 1004-924X(2016)增-0361-09

卫星闪电成像仪光学成像探测技术

惠雯^{1,2}, 黄富祥^{1*}, 朱杰^{1,3}

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;

3. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要: 卫星闪电成像仪利用光学成像技术进行闪电高效率探测, 静止卫星闪电成像仪通过对闪电的连续、不间断观测, 实现对强对流天气系统的实时监测和预警预报, 被认为是最有效的闪电探测手段。本文首先介绍了卫星闪电成像仪的光学成像探测技术特点和我国风云四号卫星闪电成像仪的基本特征, 然后利用地基闪电观测数据对美国低轨道卫星闪电成像仪 TRMM/LIS 的闪电成像产品进行了检验和验证, 表明卫星和地基闪电观测数据具有较强的相关性。研究结果证明了卫星光学成像闪电探测技术的可行性和可靠性, 风云四号卫星闪电成像仪只要解决好仪器覆盖能力、RTEP 星上资料处理等关键技术, 必将在我国闪电探测和强对流天气监测等应用领域发挥重要作用。

关键词: 闪电探测; 闪电成像仪; 静止卫星; 强对流

中图分类号: P412 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20162413.0361

Technology of optical detection of lightning from space

HUI Wen^{1,2}, HUANG Fu-xiang^{1*}, ZHU Jie^{1,3}

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China;

3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

* Corresponding author, E-mail: huangfx@cma.gov.cn

Abstract: The lightning imager detects the lightning signals from space by taking advantage of the optical imaging technology. The geostationary lightning imager can realize real-time monitoring and early warning for severe convection weather by detecting lightning signals continuously, which is considered to be the most effective lightning detection method. First, the theory of satellite-based lightning detection and the technical characteristics of Chinese FY-4 Lightning Mapping Imager (LMI) have been analyzed. It is further proposed that the effectiveness of satellite-based lightning detection can be verified through "satellite-ground" contrast experiment. The lightning imaging products from TRMM Lightning Imaging Sensor (LIS) are compared to the lightning stroke data from the ground-based lightning detection network. Contrast results show that both types of data have relatively strong correlation. It concludes that the technology of optical detection of lightning from space is feasible and re-

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-06-17.

基金项目: 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题资助项目 (No. PAEKL-2016-C5)

liable. In future, the key technologies of FY-4 LMI will to be further improved, and LMI will be applied to weather forecasting, convection event monitoring, and typhoon tracking.

Key words: lightning detection; lightning imaging; geostationary satellite; severe convection

1 引言

闪电是一种大气放电现象,密集的闪电往往伴随暴雨、冰雹、狂风等灾害性天气发生,因此,闪电被称为强对流天气系统的示踪器。据不完全统计,我国每年由于闪电造成的经济损失可达数十亿元^[1]。闪电探测不仅在强对流天气监测、雷暴科学研究等方面具有重要意义,还与全球气候变化紧密相关^[2-3]。地基闪电探测技术发展已有几十年历史^[4-5],但受下垫面条件、闪电探测类型和效率等因素限制,很难将其扩展到更大区域,获得更高精度。卫星闪电探测的研究起始于 1960 年代,美国先后研制了曝光光度计、光电二极管、扫描辐射计等多种探测仪器,但闪电探测能力都较低。直到 1980 年代,NASA 利用 U-2 高空飞机成功进行闪电辐射光谱观测试验^[6],获得了闪电特征光谱,形成利用光学成像进行卫星闪电探测的技术路线。1995 年和 1997 年,美国先后成功研制了光学瞬态探测仪(Optical Transient Detector, OTD)^[7]和闪电成像传感器(Lightning Imaging Sensor, LIS)^[8],分别在低轨道卫星 Microlab-1 和 TRMM 上实现对闪电的光学成像探测。OTD 和 LIS 具有较高的工作效率,然而,受观测平台制约,对任一地点的注视时间有限,LIS 在每个观测点的平均注视时间仅为约 91 s^[8],这意味着只有在卫星扫描经过的位置正在发生闪电时才能被探测到,因此,低轨道卫星闪电成像仪很难在实时、连续、大范围的闪电监测方面发挥作用。

基于 OTD 和 LIS 的星载经验,人们认识到只有地球静止轨道卫星闪电成像仪才能够对覆盖区域内的总闪电(包括云闪、云间闪和云-地闪)进行日夜不间断观测^[9],从而实现**对强对流系统的实时监测、追踪和预警**,被认为是卫星闪电探测技术发展的主要方向^[10]。截至目前,全球还没有静止卫星闪电成像仪发射上天,即将发射的主要有美国的 GLM (Geostationary Lightning Mapper)^[11]、中国的 LMI (Lightning Mapping Im-

ager)^[12],以及欧盟的 LI (Lightning Imager)^[13],其中 GLM 与 LMI 将分别搭载于 GOES-R 卫星与 FY-4A 卫星,于 2016 年底最先发射。FY-4 LMI 作为全球首批发射的静止卫星闪电成像仪之一,也是我国第一次研制的卫星闪电成像仪,在技术实现上克服了巨大困难,可达到与 GLM 和 LI 相似的性能。

本文首先对卫星闪电成像仪光学成像探测原理,以及我国自主研制的新一代静止卫星闪电成像仪 FY-4A LMI 的基本特征进行分析和梳理,其次,提出利用星地闪电探测数据对比的方法,通过地基闪电观测资料,对卫星闪电观测结果进行检验和验证,以期**为静止卫星闪电成像仪的探测效率和精度评估提供有益参考**。

2 基于光学成像的卫星闪电探测

2.1 闪电特征光谱

雷雨云作为光厚介质,对可见光波段吸收很小,虽然多次散射会模糊光源几何形状、延迟和延长脉冲时间,改变云顶光信号的时空特征,但也意味着雷雨云不会对光辐射造成阻碍。从高空观测闪电信号时,观测到的是云顶发出的漫反射光,光辐射能与地面探测结果是一致的^[14]。最强辐射区域在可见光波段,能量峰值达 $10^9 \text{ W}^{[9]}$,这些光辐射的主要来源是闪电通道附近温度骤增引起的大气成分分解、激励和重组。

由于闪电发生时加热过程强烈,光辐射除在较短波长处具有一些连续谱外,主要以离散的原子谱线为主。根据 U-2 高空飞机观测试验^[14],闪电云顶光谱最强光辐射特征在接近红外波段的中性氧原子 777.4 nm 谱线上,如图 1 所示,其包含了总能量的 5~10%,因此,用一个中心在闪电光谱强放射线的窄带干涉滤光片来实现光谱滤波,使闪电信号相对背景信号达到最大。此外,U-2 飞机观测试验还给出^[14],约有 90% 的闪电辐射强度峰值都达到或超过 $4.7 \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,这一结果成为了闪电探测阈值的设置依据。

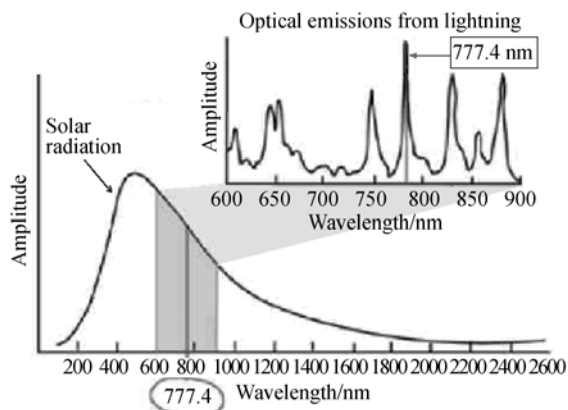
图 1 闪电辐射光谱及与太阳光谱的比较^[15]

Fig. 1 The radiation spectrum from lightning and in comparison with the solar spectrum^[15]

2.2 卫星闪电探测原理

卫星闪电成像仪实现闪电探测的最大困难是从强背景中提取相对较弱的闪电信号,为实现这一目标,需综合利用光谱滤波、空间滤波、时间滤波和背景减光等多种技术^[8]。

1) 光谱滤波

根据对图 1 的分析,777.4 nm 的中性氧(O)和 868.3 nm 的中性氮(N)均为强特征谱线,虽然 777.4 nm 谱线具有更高强度的背景辐射,但由于其在闪电信号中的辐射强度比 868.3 nm 谱线要强,经过权衡,闪电成像仪选择 777.4 nm 作为滤光片的中心波长。另外,在 777.4 nm 谱线附近还有近似强度的两条谱线,分别在 777.2 nm 和 777.5 nm 处,利用超窄带滤光片可实现三条谱线的分离,获得最大信噪比^[14,16],但考虑过窄的滤光片通带不仅难以获取,而且还易造成中心波长漂移和带宽变化等,影响滤光片的探测性能,因此,闪电成像仪所用的滤光片通带带宽为 1 nm。

2) 空间滤波

闪电成像仪采用 CCD 面阵探测器,通过空间滤波优化闪电信号强度^[9]。焦平面阵每一探测像元的瞬时视场角与闪电云顶照明区域面积相匹配,才能形成最佳空间分辨率,以及更高探测效率。典型雷暴单体对应的云顶照明区域直径约为 8~10 km^[9],闪电成像仪通常采用 8 km 左右分辨率,过高分辨率会影响探测效率。同时,CCD 面阵大小决定闪电成像仪的覆盖范围,若采用较大 CCD 面阵,特别是在静止轨道观测闪电时,需要对闪电定位偏差进行校正。

3) 时间滤波

闪电信号由一系列上升时间快、持续周期短的脉冲组成,脉冲持续时间大多在 400~800 μs 量级^[17],如图 2 所示。闪电成像仪通过时间滤波加强闪电信号^[17],根据图 2,1 ms 积分时间最为合适,可最大程度减少闪电脉冲分裂,且灵敏度也可达到最大,但受目前技术所限,在实际仪器设计中采用了折中方案,每帧积分时间 2 ms,帧率 500 frame/s,经 OTD 和 LIS 证实,这一设置并未对仪器性能造成很大影响。

4) 背景减光

经过以上三个步骤的滤波处理,可实现待测信号最大化,然而,CCD 面阵输出的原始探测数据中,背景信号强度仍然是闪电信号强度的 150 倍以上^[8],一方面,是由于光谱滤波、空间滤波和时间滤波均不能完全将闪电信号与背景信号分离,另一方面,仪器设计参数与闪电特性尽可能吻合的同时,一些因素也会影响对背景的抑制^[18]。于是,从 CCD 面阵输出的数据量往往非常庞大,传输速率可以达到 2.5×10^8 采样/s,遥测系统很难快速处理如此大量的数据,只有去除背景噪声,才能实现有效且高效的闪电信号提取。闪电成像仪利用星上实时事件处理器(Real Time Event Processor, RTEP),通过一定的背景估计方法,从 CCD 输出的原始数据中滤除背景信号,这一过程可使数据传输速率缩减 100 万倍,大大提高数据处理的精度和效率。RTEP 星上处理过程是卫星探测闪电至关重要的一步,直接关系到仪器研制的成败。

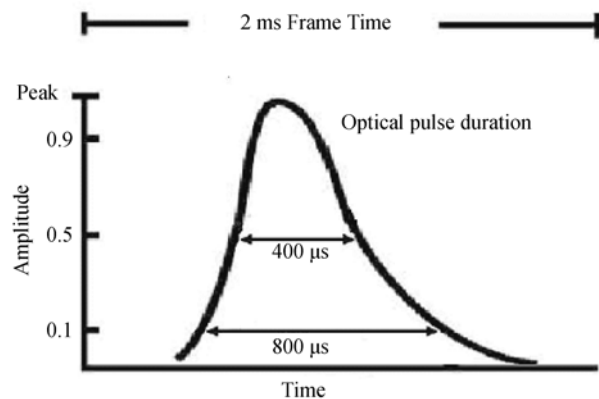
图 2 闪电脉冲持续时间^[15]

Fig. 2 Duration of the lightning pulse^[15]

2.3 实时事件处理器

RTEP 的工作过程主要包括背景估计、背景减光、阈值设置和闪电信号提取,如图 3 所示。首先,利用相邻若干帧数据进行背景估计;其次,将实时帧数据与背景估计值相减,将缓慢变化的背景从 CCD 输出的原始数据中滤除;然后,结合预先设定的阈值,判断并提取闪电信号^[19]。

其中,估计各帧的背景信号,是通过对时间域上相邻若干帧在相同位置的像素进行平均来实现

的,为确保背景估计的准确性,通常会设置一个增益系数,如当前帧的增益系数为 B ,则前面各帧的背景估计值需要乘以系数 $(1-B)$ 。增益系数既不能太高,也不能太低,如果过高,会使很多背景噪声无法被滤除,如果过低,那么当背景发生变化时,很难对背景计算结果做出快速调整。另外,闪电探测阈值的设置也需要根据背景强度进行自适应调节^[20]。

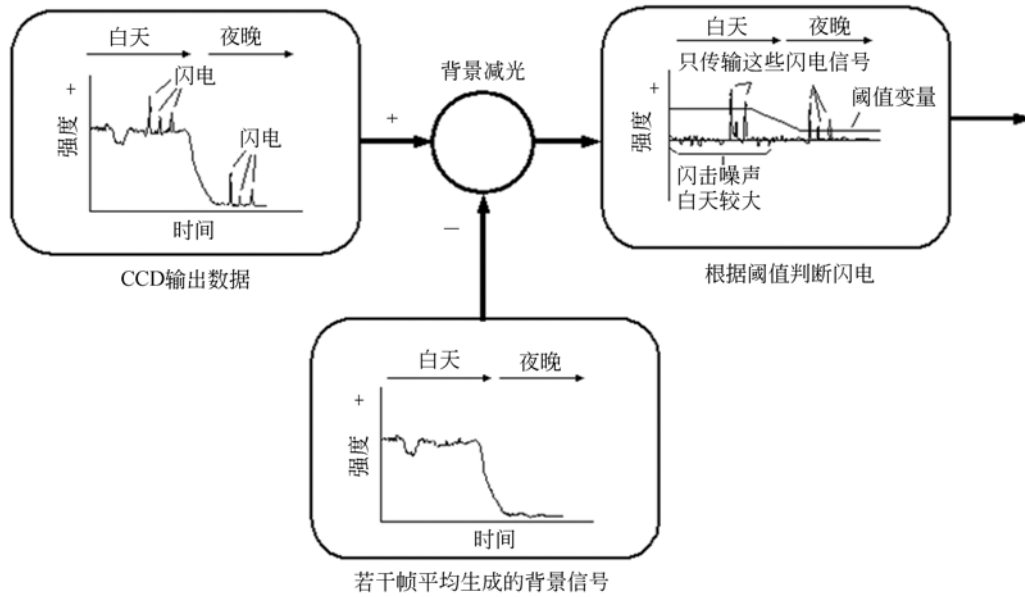


图 3 RTEP 星上资料处理示意图

Fig. 3 The principal of the RTEP

3 风云四号卫星闪电成像仪的技术特点

FY-4A LMI 在延续光学成像探测原理的基础上,可实现对中国陆地和海洋及邻近区域总闪的连续观测。图 4 给出闪电成像仪结构示意图,主要由光学系统、CCD 面阵、RTEP、格式编排器和电子控制、温度控制、图像转发器、电源等部分组成。

3.1 覆盖区域

LMI 采用 400×600 小面阵探测器,为尽可能覆盖我国区域范围,LMI 在星上采取向北倾斜的安装方式,可以观测我国陆地大部及邻近海洋,随卫星定点位置的不同,覆盖区域略有差别,当卫

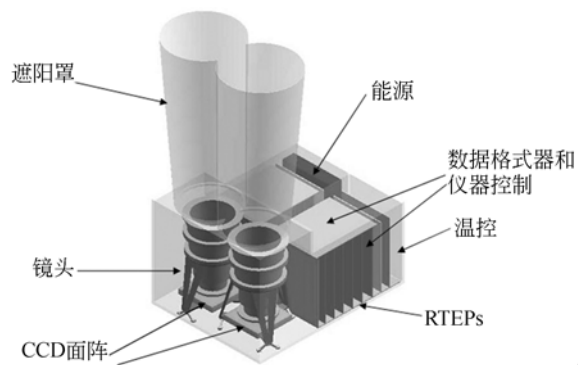


图 4 闪电成像仪结构示意图

Fig. 4 The structure of the lightning imager

星定位于 105°E 时,覆盖范围比较理想。同时,在每年秋分至春分期间,卫星需南北掉头,有效观测区域将指向南半球,只能观测澳大利亚西部和中

西部及邻近海洋,对仪器应用有一定影响,但考虑到卫星掉头时期我国雷电活动较少,而此时正是南半球春、夏季节的雷电高发期,因此对雷电观测仍可发挥作用。

另外,探测器倾斜会引起像元大小变形,对分辨率造成影响,通过对内外方位元素的有效控制,保证了仪器测量精度。在后续风云四号业务星闪电成像仪的研究中,仪器覆盖能力将是一个重要的改进方向。

3.2 RTEP 地面监视技术

RTEP 在轨工作状态关系到仪器整机的有效运行。为实时监测和评估 RTEP 星上处理的功能和性能,在 LMI 在轨运行过程中,会将部分原始像元数据下传地面,在地面复现 RTEP 星上算法,通过对一段时间内地面 RTEP 处理后的区域闪电成像数据进行检验,确认 RTEP 星上算法的有效性。当需要调整算法时,也可通过同样方法进行算法验证。

另外,考虑到仪器在轨期间,由于空间环境对探测器辐射响应的影响,可能导致辐射响应衰减,以致影响闪电信号提取,在 LMI 地面处理阶段,利用 2 ms 帧对强对流探测数据随时间的变化特征进行分析,实现对探测器衰减的监测。

4 卫星闪电探测技术的地基检验和验证

在静止卫星闪电成像仪发射之前,利用现有低轨道卫星闪电成像仪获取的大量观测资料来检验卫星闪电探测结果,人们已做过很多理论验证工作^[9,11,13,21],本文中,提出一种基于卫星与地基观测对比闪电活动特征的验证方法。

4.1 使用的数据和方法

所用卫星闪电探测资料来自美国全球水文资源中心(Global Hydrology Resource Center, GH-RC)提供的 LIS 科学数据,星下点空间分辨率为 3~6 km,每日在 38°N~38°S 之间可获取约 16 个轨道观测数据,提取闪电 flash 数据集,由首末 Event 发生时间、持续时间、辐射范围中心位置、辐射亮度、覆盖范围等约 20 个参数组成。地基闪电资料来源于我国国家雷电监测网,该系统 2008 年正式运行,基本覆盖我国陆地区域,各站点采用由中国科学院空间科学与应用研究中心研制的

ADTD 闪电定位系统,可实时记录云地闪回击数据,单站辐射半径约 300 km,回击分辨率小于 2 ms,每条数据包包含发生时间、位置、极性、强度等要素。

研究区域选取我国西南地区(22~32°N, 99~109°E),该地区地形复杂,属闪电多发区。LIS 与地基观测资料均可覆盖西南地区,地基观测网在该地区设有约 60 个探测站点(含部分电力系统站点)。研究时间选取 2008 年至 2013 年。根据 LIS 经过西南地区的时间和轨迹,查找地基观测网所探测到的与 LIS 在时间和空间上同步的闪电数据,对 LIS 与地基观测闪电的时空分布趋势进行对比,分析二者的相关性。其中,闪电密度定义为每年每平方公里发生的闪电数量,用于描述闪电的空间活动规律。

4.2 卫星和地基闪电探测数据对比结果分析

4.2.1 LIS 探测闪电的时间分布特征

根据 2008~2013 年每年逐月的 Flash 个数,计算各年 Flash 发生次数的月际变化特征,如图 5 所示。图中呈现的 6 年间的 Flash 次数月际变化是比较相似的,对每年数据与其他 5 年的均值进行相关性分析,得到相关系数分别为 0.86、0.91、0.89、0.85、0.86、0.93,说明各年数据间的相关性良好。对 6 年数据进行平均(图 5 中的黑色虚线),可以看出,Flash 在一年中的分布表现为单峰值特征,高发期开始于 4 月,延续至 8 月,这段时间的平均 Flash 数量占全年数量的 82.55%,其

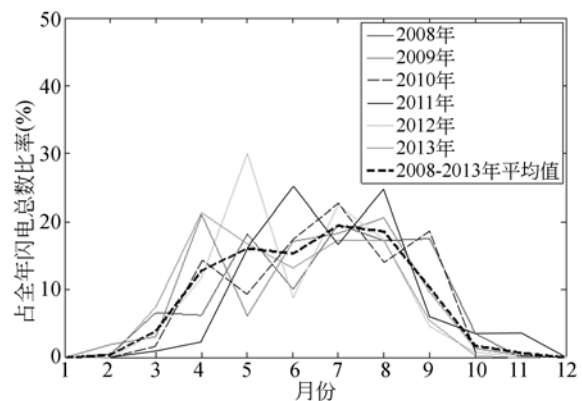


图 5 2008-2013 年 LIS 探测西南地区 Flash 发生次数的月际变化

Fig. 5 The inter-monthly variation of the number of LIS flashes in southwest China from 2008 to 2013

中,最大值一般出现于 7~8 月,只有 2012 和 2013 年比较例外,4~5 月间就达到了峰值;9 月开始,Flash 数量迅速减少,从 10 月至次年 2 月,平均 Flash 数量仅为全年的 3.10%,3 月才逐渐有所增加。

进一步地,图 6 给出在每年的闪电高发期与低发期,每日各时段 Flash 发生次数的变化,图中是 2008~2013 年的平均数据。在每年闪电高发月份,Flash 日变化呈单峰分布特征,从中午 12 时起,出现快速上升趋势,到下午 17 时,开始进入峰值时段,夜间 22 时达到一天中的最大值,此时的闪电数量约为最小值的 24 倍,直至凌晨过后,逐渐减少,上午 7~12 时属于闪电发生的低谷期;而在每年闪电低发月份,同样是一天中的大多数闪电集中在下午到夜间时段,但在夜间峰值出现前后,分别在下午时段和凌晨时段会各出现一个次峰。

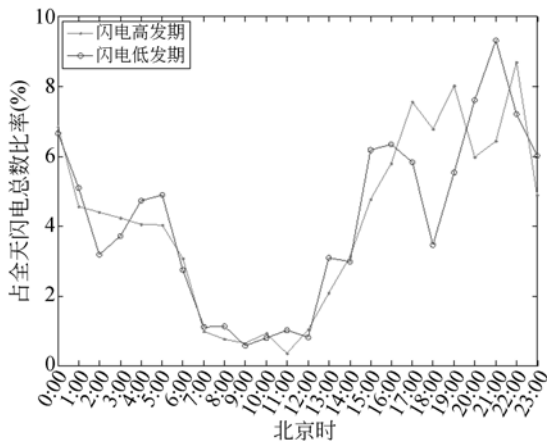


图 6 2008-2013 年 LIS 探测西南地区 Flash 发生次数的日变化

Fig. 6 The daily variation of the number of LIS flashes in southwest China from 2008 to 2013

4.2.2 LIS 探测闪电的空间分布特征

LIS 观测西南地区闪电 Flash 在 2008~2013 年发生次数的空间分布如图 7 所示。平均 Flash 密度为 $6.49 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;Flash 发生最活跃的区域位于四川省中部和云南省东南部与越南的交界地区,此处的 Flash 密度最高值达 $24.78 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;四川省东部和南部、广西西北部,以及贵州省西部次之,这一带的 Flash 密度最高为 $11.14 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;云南省和四川省西部则属于 Flash 活动较少区域,这里大部分地区的 Flash

密度最高只有 $2.96 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

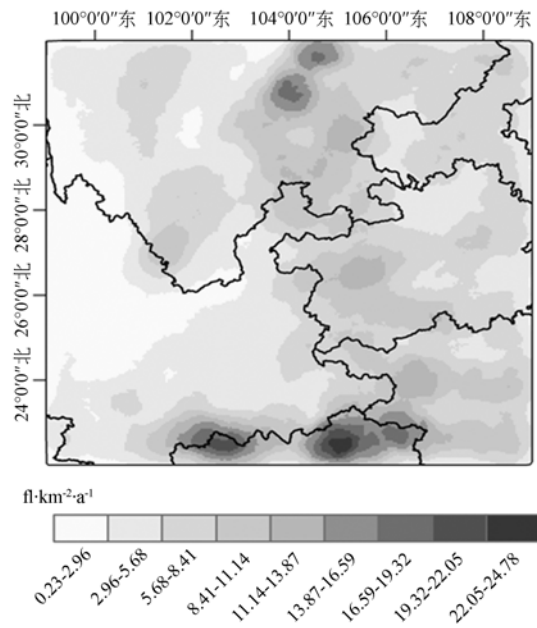


图 7 2008-2013 年 LIS 探测西南地区 Flash 密度分布
Fig. 7 The spatial distribution of LIS flashes in southwest China from 2008 to 2013

4.2.3 地基探测闪电的时间分布特征

图 8 是地基观测网接收的在 2008~2013 年西南地区与 LIS 同步的地闪发生次数的月际变化,与 LIS Flash 的月际变化特征相似的是,各年地闪逐月变化趋势相近,且与 LIS Flash 相比,地闪在各年的月际分布的一致性更高,各年地闪与

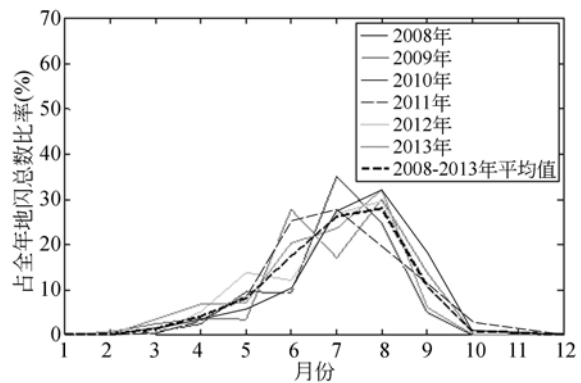


图 8 2008-2013 年地基闪电监测网记录西南地区与 LIS 同步的地闪发生次数的月际变化

Fig. 8 The inter-monthly variation of the number of ground-based lightning strikes synchronized with LIS in southwest China from 2008 to 2013

其他 5 年均值的相关系数均大于 0.90,2013 年甚至达到 0.98。观察 6 年地闪数据的月际分布平均值(图 8 中的黑色虚线),单峰特征十分明显,高发期集中于 6~8 月,平均闪电数量占全年总量的 71.66%,最大值出现在 7~8 月;9 月开始,地闪数量迅速减少,10 月~次年 3 月的地闪仅为全年的 3.11%,4 月才开始逐渐增加。

图 9 给出 2008~2013 年每年地闪高发期与低发期的日变化平均值,相比于 LIS Flash 的日变化特征,地闪在高发月份与低发月份的日变化趋势是非常相似的,且一天中的峰值同样是出现在下午至午夜时段,一般在下午 17 时前后和夜间 23 时至次日 0 时会各出现一个峰值,而上午则是一天中极少发生地闪的时段,这与 LIS Flash 的日变化特征是比较吻合的。

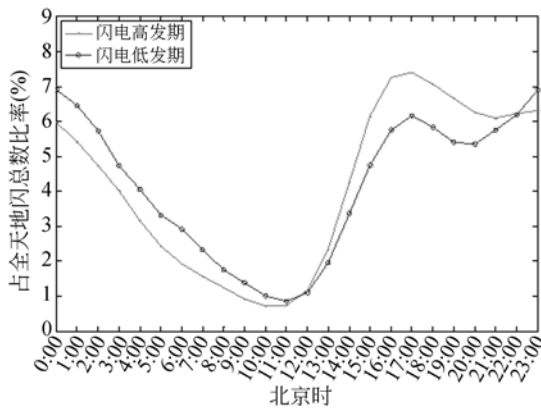


图 9 2008-2013 年地基闪电监测网记录西南地区与 LIS 同步的地闪发生次数的日变化

Fig. 9 The daily variation of the number of ground-based lightning strikes synchronized with LIS in southwest China from 2008 to 2013

4.2.4 地基探测闪电的空间分布特征

地基观测网获取的 2008~2013 年西南地区与 LIS 同步的地闪发生次数的空间分布如图 10 所示,经统计,平均地闪密度为 7.75×10^3 个 $\cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与 LIS Flash 分布略有不同的是,地闪大多集中于四川省东南部,以及贵州省西北部与四川省的交界区域,平均每年地闪数量约占到西南地区全年地闪总量的 37.69%;与 LIS Flash 分布较为相似的特征是,西南地区西部的地闪极其稀少,平均每年发生的地闪最多只占全年地闪总量的 2.51%,有些地区甚至全年都没有地闪发生。

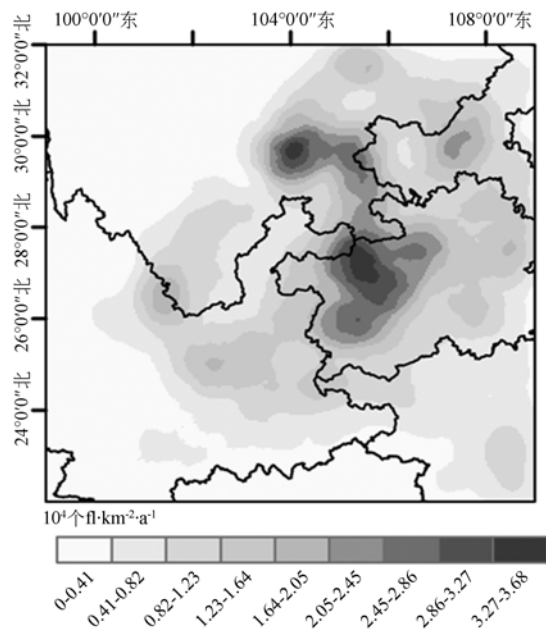


图 10 2008-2013 年地基闪电监测网记录西南地区与 LIS 同步的地闪密度分布

Fig. 10 The spatial distribution of the ground-based lightning strikes synchronized with LIS in southwest China from 2008 to 2013

4.2.5 LIS 与地基探测闪电活动特征的相关性

将 LIS 与地基闪电观测网监测我国西南地区闪电活动的时空变化趋势进行对比,如表 1 所示,其中月际变化为各年的平均值,日变化为 6 年间每日各时段的平均值,密度分布相关性是利用欧式距离度量二者的密度分布直方图。可以看出,LIS 与地基观测的闪电月际变化、日变化,以及空间分布结果存在较好的相关性,且在 0.05 水平上显著,特别是日变化特征,相关系数达到 0.92,这说明,通过星地观测对比可以验证卫星闪电探测结果。星地观测闪电分布存在一定差异主要与以下几方面有关:

1) 低轨道卫星闪电成像仪的观测区域受轨道高度、倾角,以及视场等因素制约,而地基观测范围则由观测站点位置及站点辐射半径等决定;低轨道卫星闪电成像仪受卫星平台制约,在任一地点驻留时间有限,只有在卫星经过的位置正好有闪电发生,才有可能探测到,而地基闪电观测网可实时记录覆盖区域内的闪电。因此,在根据 LIS 运行轨迹选取相同时间和位置的地基同步观测数据时,需要对时空匹配阈值进行设置,而该阈值的大小会对数据对比结果有一定影响。

2) 卫星闪电成像仪通过光学成像提取闪电信号,可探测覆盖区域内的总闪电,而地基闪电监测网利用闪电辐射的电磁波形特征实现闪电定位,对云间闪电的探测能力较弱,主要记录地闪信息。星地对比实验考虑到两种探测方式所获取闪电种类不完全一致,给出的是二者观测闪电活动时空分布趋势的对比,但由于 LIS 可探测更多种类的闪电,因此对比结果会存在差异。

3) 卫星光学成像探测闪电的方法在白天易受高亮度背景噪声干扰,虽经过星上 RTEP 的去噪处理,探测精度仍可能受阈值设置等因素影响,而地基闪电定位精度同样也会受多种条件限制,如站点位置、探测半径等,使得星地对比结果存在误差。

表 1 2008~2013 年星地同步观测西南地区闪电活动特征对比

Tab. 1 Comparison of satellite-based and ground-based lightning observations in southwest China from 2008 to 2013

	相关系数	显著性水平
月际变化	0.88	1.68×10^{-4}
日变化	0.92	2.07×10^{-10}
密度分布	0.66	0.04

5 结 论

本文对卫星闪电探测技术原理,以及我国新

一代静止卫星闪电成像仪 FY-4A LMI 的仪器特点进行了分析和梳理;提出基于卫星与地基观测对比闪电活动特征的方法,检验卫星探测闪电的精度和可靠性,并利用现有低轨道卫星闪电成像仪 LIS 资料,以及我国国家雷电监测网的地基观测资料,通过对西南地区 2008~2013 年闪电时空分布特征的分析,对该方法进行了实验。得到如下主要结论:

1) LIS 十多年的星载实践,证明基于光学成像的卫星闪电探测技术是在闪电观测中发挥有效作用的。静止卫星闪电成像仪延续了低轨道卫星闪电成像仪的设计原理,在时空覆盖能力上将具有更大优势,是卫星闪电探测的发展方向。

2) 卫星与地基探测闪电的对比分析结果表明,二者的探测结果之间是有较强相关性的,存在一定差异也是合理可靠的。具体而言,卫星和地基观测闪电的月际变化、日变化,以及空间分布的相关系数均在 0.6 以上,其中日变化特征最为相似,相关系数达到 0.92。该结果说明,星地观测对比验证方法可以为卫星闪电探测的精度评估提供依据。

FY-4 LMI 的设计和研制是我国对静止卫星闪电探测技术的一次重要尝试,LMI 发射升空后,将从根本上改变我国闪电探测技术的发展现状,未来通过对仪器覆盖能力、RTEP 星上算法、探测精度评估等关键技术的改进和完善,将使我国闪电探测技术保持在国际先进水平。

参考文献:

[1] 王道洪, 郝秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
WANG H D, QIE X S, GUO C M. *Lightning and artificial lead mine* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000. (in Chinese)

[2] 马明, 林锦冰, 傅云飞. 一次强对流活动中雷电与降水廓线特征研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 797-805.
MA M, LIN J B, FU Y F. A study of lightning and precipitation profiles of a severe convective activity [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 797-805. (in Chinese)

[3] Mattos E V, Machado L A T. Cloud-to-ground lightning and Mesoscale Convective Systems [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99(3): 377-390.

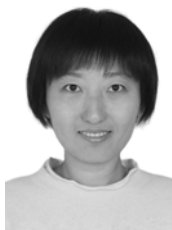
[4] 张广庶, 王彦辉, 郝秀书, 等. 基于时差法三维定位系统对闪电放电过程的观测研究[J]. 中国科学: D 辑, 2010, 40(4): 523-534.
ZHANG G S, WANG Y H, QIE X S, et al.. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53: 591-602. (in Chinese)

[5] THOMPSON K B, BATEMAN M G, CAREY L D. A comparison of two ground-based lightning detection networks against the satellite-based Lightning Imaging Sensor (LIS) [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(10): 2191-2205.

[6] CHRISTAN H J, FROST R L, GILLASPY P H, et al.. Observations of optical lightning emissions from above thunderstorms using U-2 aircraft [J].

- Bulletin of the American Meteorological Society*, 1983, 64(2): 120-123.
- [7] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, BOCCIPPIO D J, *et al.*. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2003, 108 (D1): ACL 4.1-ACL 4.15.
- [8] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, GOODMAN S J, *et al.*. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the lightning imaging sensor (LIS) [R]. *Technical Report*, 2000.
- [9] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, GOODMAN S J. The detection of lightning from geostationary orbit [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1989, 94 (D11): 13329-13337.
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 周严, 田茂, 张青林, 等. 气象卫星闪电识别系统的设计与实现[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1587-1594.
ZHOU Y, TIAN M, ZHANG Q L, *et al.*. Design and implementation of lightning identification system on meteorological satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1587-1594. (in Chinese)
- [13] GRANDELL J, FINKE U, GIGLI S, *et al.*. The EUMETSAT Meteosat Third Generation Lightning Imager (MTG-LI): Applications and product processing [C]. *Proceedings of the 9th EMS Annual Meeting, Toulouse, France*, 2009, 1: 551.
- [14] GOODMAN S J, CHRISTIAN H J, RUST W D. A comparison of the optical pulse characteristics of intracloud and cloud-to-ground lightning as observed above clouds [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(12): 1369-1381.
- [15] Goddard Space Flight Center. Geostationary Lightning Mapper (GLM) performance and operational requirements document [R]. NASA-GSFC Technical Report 417-R-GLMPORD-0057, 2005.
- [16] 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.
- [17] BOCCIPPIO D J, DRISCOLL K, HALL J, *et al.*. LIS/OTD Software Guide [R]. *Technical Report*, 1998.
- [18] 韩心志. 静止卫星闪电探测仪设计特点研讨[J]. *红外*, 2011, 32(3): 4-9.
HAN X Z. Discussion on design features of lightning mapper for geostationary satellite [J]. *Infrared (Monthly)*, 2011, 32(3): 4-9. (in Chinese)
- [19] KALLURI S, GURKA J, RACE R. Improved observations of Earth and space weather from GOES-R [C]. *Proceedings of the SPIE Optical Engineering and Applications, San Diego, CA, United States*, 2009: 74560M-74560M.
- [20] 曹冬杰. 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 94-98.
CAO D J. The development of product algorithm of the Fengyun-4 geostationary lightning mapping imager [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(1): 94-98. (in Chinese)
- [21] 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*, 2007, 112 (D09210).

作者简介:



惠 雯(1982—),女,北京人,博士,工程师,2012年于北京科技大学获得博士学位,主要从事卫星探测闪电和卫星数据处理等方面的研究。E-mail: huw@cmia.gov.cn



黄富祥(1967—),男,湖北蕲春人,博士后,研究员,2000年于中国科学院获得博士学位,2002年从中国科学院大气物理研究所博士后出站,主要从事卫星探测闪电和卫星遥感大气臭氧等方面的研究。E-mail: huangfx@cmia.gov.cn