

从空间探测闪电的综述*

陈洪滨 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 中层大气与全球环境探测开放室, 北京, 100029)

摘 要

从空间探测闪电 30 多年的历史看, 一些卫星闪电遥感仪器已提供了许多极有价值的资料, 例如, 闪电全球范围内发生的频率, 其随纬度和季节的变化以及日变化, 超级闪电的发生等等。这些资料在雷电灾害预警预防、强对流天气监测、某些军事目标的识别等业务和科研工作中得到了应用。本文是关于空间探测闪电的一个综述, 主要介绍过去 35 a 一些星载闪电光学探测器, 并给出由这些仪器观测资料分析所得到的一些重要结果。最后, 对发展中国星载闪电探测器提出几点建议。

关键词: 闪电, 卫星, 观测, 光学探测器。

1 引 言

在古代, 雷电是人类十分敬畏的自然现象之一。中外古代神话传说中, 雷电或在神坛上占有一席之地或是神手中的武器。自从 18 世纪下半叶富兰克林(B. Franklin)首次用风筝对闪电进行了科学而又系统的研究之后, 雷电的神秘面纱被揭去了, 闪电只不过是大气中一种强烈放电现象^[1~3]。

但是, 在科学技术如此高度发达的今天, 雷电仍然给人类造成了许多灾难和损失^[2]。像 1989 年青岛黄岛油库重大火灾和 1977 年 7 月 13 日美国纽约市的停电事故, 都是由雷击造成的。雷电对于航空飞行、火箭和导弹发射等活动极具威胁。更为严重的是, 每年都有成千上万的人因雷击伤亡。美国有较精确的统计, 平均每年有 100 多人死于雷击, 250 多人受伤, 与龙卷和飓风共同造成的伤亡人数相近。在中国, 平均每年死于雷击的约有上千人, 受伤人数则更多^①。

绝大多数雷电是大气中强对流(云)活动的产物, 因此单个雷暴云及雷暴复合体的雷电频数和次数与对流强度以及暴雨量都有一定的正相关, 这方面国内外已有一些研究^[4]。在可见或红外云图上往往很难判定雷暴处于发展、成熟和消散的哪一阶段, 配合以闪电测量则有助于解决这一问题。

低层大气中雷电放电产生的电磁能(脉冲)可以一直传输进入电离层和磁层, 是这些

* 初稿时间: 1999 年 4 月 5 日; 修改稿时间: 1999 年 10 月 27 日。

资助课题: 中国科学院大气物理研究所知识创新工程重大项目(8-2103)。

① 全国尚无可靠的统计数字。

层区中电磁噪声的重要源。雷暴云的电荷分离可以视作大气电流的发电机。闪电产生 NO、HO 和 HCN 等成分,它们在对流层化学或平流层化学反应中都有一定作用。雷电在日地关系(主要是太阳-对流层)中可能起一定的作用。因此,全球闪电图像及其时空变化的连续监测,对于强对流天气的预警预报及雷电灾害的防护等业务性工作,对于磁层、电离层、全球电场、大气化学及雷暴物理等科学研究,都有极大的价值^[5,6]。

在大陆上已建立了一些相当密集的雷电监测站网。这些站网虽然能较准确地对其附近发生的雷电进行定位和计数,甚至可测量闪电光谱和无线电信号,但由于其布点的局限性,它们很难给出全球范围的闪电分布图像。而从空间观测,可以覆盖很大的地球面积。如果采用地球静止与极轨卫星多星联合的观测方式,则可连续实时地监测全球几乎所有的闪电活动。

在地面可观测的雷电信号有闪光、天电电磁脉冲、闪电电流及由冲击波产生的声波(即雷声)。地面雷电定位通常是利用天电信号(即由闪电造成的无线电频段的电磁波信号)。而在空间观测闪电,则主要利用的是其闪光信号。

20 世纪 60 年代早期上天的 OSO 2(轨道太阳实验室)卫星上的紫外光谱仪,几乎是意外地观测到了地球上的闪电。从此,科学家们研制了专用的光学传感器探测闪电。

文中首先介绍了 35 a 来卫星上使用的一些有代表性的闪电光学探测器,然后综述从这些探测器观测资料的分析中所得到的重要结果。

2 空间闪电(光学)探测器

2.1 OSO 光度计(photometer)^[7,8]

OSO(Orbiting Solar Observatory)系列卫星上携带的光度计可以探测闪电。它们是宽波段光度计(0.35~0.5 μm 或 0.6~0.8 μm),最小光探测阈值是 3×10^5 光子/cm²,对应闪光功率约为 10⁸ W。其望远镜视场为 10°,空间分辨率 1°;它们仅在新月午夜时观测到闪光。

2.2 硅光电管探测器(又称当量计)^[9,10]

搭载于 Vela 系列预警卫星上。卫星轨道高度 1.1×10^5 km,因此几乎覆盖了半个地球。Vela 卫星上的当量计(bhangmeter)主要目的是为了监测大气层中的核爆炸事件,仅被快速变化的闪光信号所触发并记录。其触发阈值定在 10¹¹~10¹³ W,比一般的闪电光功率高 2 个数量级。因此,只能观测到一些超级闪电(superbolts)。仪器的地面视场约为 $10^\circ \times 10^\circ$;测量光谱范围 0.4~1.1 μm。

2.3 扫描辐射计(Scanning Radiometer)

搭载于早期的美国国防气象卫星 DMSP 上,轨道高度 830 km,地面分辨率为 100 km,探测灵敏度在闪电功率范围,只能观测当地午夜时的闪电活动。后来的 DMSP 卫星上装有光学线扫描系统(OLS: Optical Linescan System)以探测闪光。

2.4 硅光电管阵列探测器(Photodiode Array)^[10]

搭载于 DMSP 系列卫星上,是第一种专用于闪电探测的仪器,所以其探测灵敏度比 Vela 卫星上的同类仪器高得多,探测闪光功率范围 10⁸~10¹⁰ W;地面分辨率相同,约为 750 km × 750 km。仅观测当地午夜的闪电。要强调的是,该仪器总重不到 1 kg,功耗仅

0.5 W。

类似的单硅光管探测器搭载在 DMSP-5D 卫星上, 探测黎明和黄昏时发生的闪电。

同类但更先进、更大阵列的闪电探测器搭载在一艘空间飞船上(1978年3月)。

2.5 全天光学闪电监测器(Night/Day Optical Survey of Lightning)^[11]

这是一种放在航天飞机上的全天候闪电光学监测仪器。主要组件是一台带衍射光栅的 16 mm 摄影机、示警装置、光敏元件和磁带记录仪。白天时由宇航员对闪电摄像, 晚上使用衍射光栅获取闪电的光谱信息。从而反演闪电通道的温度、压力、组分、电子浓度、离子百分比等信息。

2.6 闪电图像仪(LMS: Lightning Mapper Sensor)^[11]

将由地球静止气象卫星 GOES 携带, 因此能对某一地区进行连续观测。LMS 的视场是 10.5°; 主要由两个 600 像元 × 400 像元的 CCD 阵组成。地面像元分辨率很高, 为 10 km。LMS 的窄带滤光片中心波长位于闪电一个强光辐射线上, 即 777.4 nm。LMS 的积分时间为 2 ms。

LMS 采用了空间、光谱和时间滤波以及框—框(frame-to-frame)背景消除技术, 有效地去除强但却是缓变的背景光(如太阳反射光), 因此夜晚和白天都能观测。LMS 的动态范围基本覆盖了闪电光辐射功率, 对云间和云地闪的探测效率预期大于 90%。

地球静止轨道上的闪电图像仪将提供大范围实时的闪电活动信息, 可用于雷暴发展的评估和预警。

2.7 闪光探测器(OTD: Optical Transient Detector)*

闪光探测器 OTD 由微实验室卫星携带, 于 1995 年 4 月发射升空, 它是世界上第一台白天黑夜都能进行闪电探测和定位且有高探测率的空基仪器。OTD 在 740 km 的高度上, 覆盖地面 1300 km × 1300 km。该仪器从设计, 到环境试验、定标和发射只化了 9 个月的时间。

由美国马歇尔空间飞行中心(MSFC)设计的 OTD, 是地球观测系统(EOS)上的一个探测仪器。该仪器的技术革新之处在于它有: 一个窄带、非常稳定的氧化金属滤光片、一高速长焦望远镜系统、一个每秒处理 500 幅像的高速焦平面和一个每秒处理一千万像素的实时处理器。

2.8 闪电成像探测器(LIS: Lightning Imaging Sensor)*

闪电成像探测器是 1997 年底发射上天的 TRMM(热带降雨测量任务)卫星上测量闪电活动的仪器, 其技术性能指标与上述的 LMS 几乎完全相同。由于 TRMM 轨道较低(仅 350 km), LIS 的地面分辨可达 5 km, 而地面覆盖区域是 600 km × 600 km。其重量是 21 kg, 功耗为 70 W。

LIS 不仅记录闪电事件和定位, 而且有绝对定标, 可以测量其光辐射能量。LIS 能探测较弱的闪电, 达到 90% 的探测效率。

2.9 其它

在宇宙飞船、空间站和航天飞机上的宇宙员, 用肉眼观测到了地球处于黑夜部分处的

* <http://www.ghec.msfc.nasa.gov/lisotd.html>

闪电^[10]。他们感觉, 闪光使得云忽明忽暗, 好像有人在向他们打信号灯; 闪电照耀云的内部似乎云中有许多忽闪忽灭的灯泡。

测量闪电的无线电(天电)信号的仪器也多次上天试验^[12]。这类仪器的优点是可以定位。但其测量的闪电天电信号很弱(部分由于电离层的吸收), 而且人工干扰源不少, 所以资料的分析比较困难。

3 空间闪电探测的一些重要结果

3.1 闪电的海陆分布差异

20 世纪 60 年代上天的 OSO 系列卫星上的光度计观测结果清晰地表明^[7,8], 晚上在其观测范围内, 陆上闪电次数比海上的多一个数量级(10 倍多)。也就是说, 一年之中在晚上雷暴大多发生在陆地上。OSO 光度计观测资料还显示, 北大西洋比其他大洋上有更多的雷暴; 大陆沙漠地区的闪电稀少。

Orville 和 Henderson^[13]从 DMSP 卫星闪电光学扫描仪 1 a(1977 年 9 月~1978 年 8 月)的资料, 计算了每个月陆海闪电数比率, 结果是 9 月份最低(2.2), 7 月最高(4.2), 全年平均为 3.1。如果考虑海洋陆地面积比, 这些比率还得乘上 1 个因子(2.4)。

图 1 显示的是闪光探测器 OTD1 在其视场内 1 a(1995 年 5 月—1996 年 4 月)的观测结果。由图 1 可见: 闪电频发区集中在几个大陆上, 大洋上的闪电相对要少; 太平洋上闪电活动主要出现在副热带地区, 而大西洋上有 3 个闪电活跃带。

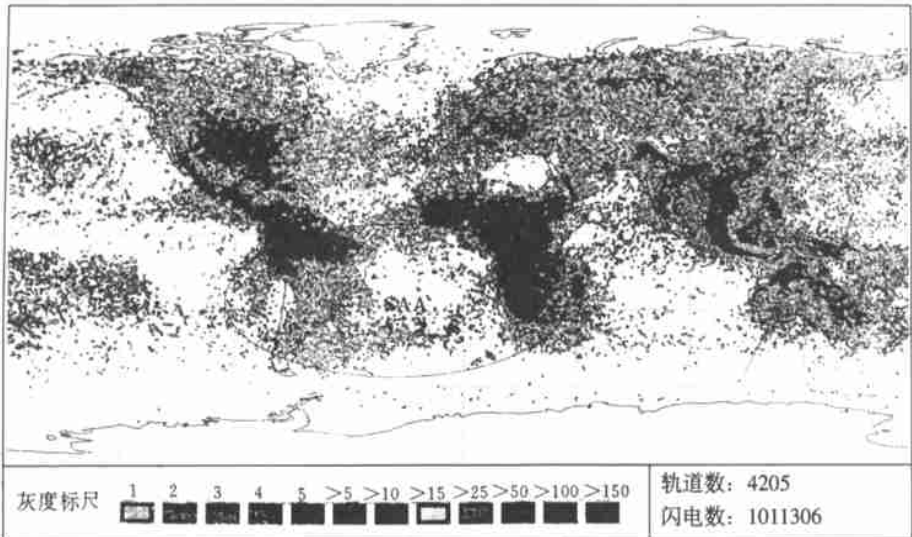


图 1 闪光探测器 OTD 在其视场内 1 a(1995 年 5 月~1996 年 4 月)的观测结果

3.2 闪电数的月和季节变化^[13]

根据 DMSP 卫星在午夜的观测资料, 就全球范围来说, 1 a 中 9 月和 2 月闪电数较少, 而 4 月和 7 月较多, 而 4 月的闪电数最多。

对于某一地区, 自然是当地冬季极少, 夏季闪电出现多。从全球来看, 春夏之交和夏季

(4~7月) 闪电多, 而秋冬之交和冬季闪电少。

3.3 闪电的日变化^[12, 14]

卫星全球观测证实, 白天的闪电活动多于夜晚。在白天直到黄昏, 大部分雷暴活动发生在大陆上; 在晚上, 有一些闪电比较均匀地出现在海洋上。

正象预料的那样, 日变化的峰值出现在正午过后一点时刻, 但不同季节极值出现时刻稍有差别, 夏季的峰值稍提前一点时间。

3.4 地理分布^[12~14]

闪电发生的地理分布与海陆分布(参见图 1)和季节变化是紧密联系的。从冬到夏, 闪电多发地从南半球移至北半球, 从夏到冬则相反。全年平均, 北半球闪电数明显多于南半球, 这是因为北半球的陆地面积大, 地形起伏也大。

秋季(9~11月), 闪电活动在南北半球近似差不多; 冬季, 闪电自然主要出现在南半球, 但也有少部分出现北半球热带海洋上; 3~5月, 闪电活动区逐渐从南半球陆地移向北半球陆地上。3月份, 北美和中国比较早地开始有雷暴活动; 6~8月, 闪电自然主要出现在北半球大陆上; 南半球洋面上有少数的闪电。

3.5 闪电光辐射能量(强度)

虽然时空分布不均匀的地基和飞机观测, 也给出当时当地闪电光辐射能量(强度)的估计^[15~18], 但全球尺度上综合研究观测的最好平台是卫星。

对 DMSP 卫星测得的 1 万个闪电的分析表明^[19], 闪电的峰值功率在 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^{10}$ W 之间, 中值约为 1×10^9 W。不到 2% 数目的闪电峰值功率大于 1×10^{10} W。

3.6 超级闪电(superbolts)

超级闪电首先为 Vela 卫星观测所揭示^[9, 20], 其峰值功率在 $10^{11} \sim 10^{13}$ W 之间, 光脉冲持续时间约 1 ms。大约 1000 个闪电中约有 3 个其光功率超过 10^{11} W, 1 千万中有 5 个超过 3×10^{12} W。这些超级闪电的光辐射功率与大气层中小当量核爆炸闪光的光辐射功率基本相当。超级闪电分布于全球, 但大多数发生在近日本海洋的北太平洋上。与一般的闪电不同, 它们是云中正电荷对地放电, 即正极性的云-地闪。

3.7 平流层闪电

雷暴云顶向平流层(有的可达 90 km 高度)的放电闪光现象, 已被高空和航天飞机上的手持摄像机以及卫星上的(微光)相机拍摄到。‘平流层闪电’引起了中高层大气和空间物理学家的极大兴趣, 但因其发光面积大很分散、比较弱, 观测到的次数不多, 所以我们对其特征和作用的了解还不够, 还需要更多的观测和研究。

3.8 地外行星上的闪电^[10]

前苏联和美国的一些地外行星宇宙飞船上搭载了一些光偏振仪、电场探测器、电磁仪以及光学探测器。这些仪器的观测揭示或进一步证实了, 至少在金星、木星和土星上发生着闪电活动。从已有观测资料推断, 金星上每年每平方公里发生不到 30 个闪电, 木星上约为 40 个。木星上闪电亮度强于地球上的。土星的闪电, 可能是发生在围绕土星的 B-环里, 而不是在土星大气中。1998 年 10 月, 伽里略号飞船接近木星, 获得了其上的闪电图像。从

图像上看,木星上闪电强度比地球上的普通闪电至少高 2 个量级。

4 结 语

全球和区域性的雷电时空分布实时监测资料,对于许多实际应用和科学研究,如雷电灾害防护、强对流天气监测和预报及大气电场研究等,都是极有价值的。

监测全球雷电分布的最佳平台是空间平台。已上天的闪电光学探测器的发展特征可以概括成如下几点:(1)从附属探测到专用;(2)从硅光电管(阵)到 CCD 阵列;(3)从仅仅是午夜探测到全天候;(4)从极高轨道到高中低极轨与地球静止轨道相结合;(5)从宽谱探测到多谱段结合;(6)从极低空间分辨率(700 km)到高分辨率(10 km);(7)从低探测率效率($< 5\%$)到高探测效率(约 90%)。

这些空间闪电探测器,其探测结果不仅证明了它们的能力,而且为我们提供了有关闪电的许多新认识。例如,进一步证实了全球每秒有 100 个左右的闪电,大陆上的闪电多于海上的,闪电活动有一定的季节变化,还有一些超级闪电,等等。

中国目前在光、机、电方面都有了相当的基础和力量。通过有关单位的协作,充分借鉴国外已有的空间闪电探测经验,相信能够在二三年内研制出功耗低、重量轻的宽谱或窄谱闪光成像仪。所以,我们建议:在 3~5 a 后发射的极轨和地球静止气象卫星或其他卫星上要考虑加载闪电探测器。第一步先搭载重量轻($< 2.0 \text{ kg}$)、功耗低($< 5.0 \text{ W}$)、低分辨率、低灵敏度的光学探测器;同时研制全天候的 CCD 闪光探测器。

致谢:本文写作过程中,与张恩山研究员、张宏谦研究员和张仲山教授进行了有益的讨论;孙海冰博士帮助从网上查找最新的资料;陈英女士帮助打印初稿。作者向他们表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 朱炳海等编. 气象学辞典. 上海:上海辞书出版社, 1981, 1240pp
- 2 虞昊等编著. 现代防震技术基础. 北京:清华大学出版社, 1995, 235pp
- 3 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚编著. 高等大气物理学(上册). 北京:气象出版社, 1991, 658pp
- 4 Bringi V N, Knupp K, Detwiler A, et al. Evolution of a Florida thunderstorm during the Convection and Precipitation/Electrification Experiment: the case of 9 August 1991. *Mon Weath Rev.* 1997, 125(9): 2131~2160
- 5 Volland H. *Handbook of Atmospherics. Volume II.* CRC Press, Inc. Florida, 1982, 308pp
- 6 Davis M H, Brook M, Christian H J, et al. Some Scientific Objectives of a satellite-borne lightning Mapper. *Bull Amer Meteor Soc.* 1983, 64: 114~119
- 7 Vorpahl J A, Sparrow J G, Ney E P. Satellite observations of lightning. *Science*, 1970, 169: 860~862
- 8 Sparrow J G, Ney E P. Lightning observations by Satellite. *Nature*, 1971, 232: 540~541
- 9 Turman B N. Detection of lightning superbolts. *J Geophys Res.* 1977, 82: 2566~2568
- 10 Powell J W. Lightning research from space. *Spaceflight*, 1983, 25: 280~283
- 11 Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J. The detection of lightning from geostationary orbit. *J Geophys Res.* 1989, 94(D11): 13329~13337
- 12 Kotaki M, Katoh C. The global distribution of thunderstorm activity observed by the Ionosphere Sounding Satellite (ISS-b). *J Atmos Terr Phys.* 1983, 45: 833~847.
- 13 Orville R E, Henderson R W. Global distribution of midnight lightning: September 1977 to August 1978. *Mon Weath Rev.* 1986, 114: 2640~2653
- 14 Turman B N, Egdar B C. Global lightning distributions at dawn and dusk. *J Geophys Res.* 1982, 87(C2): 1191~1206

- 15 Christian H J, Goodman S J. Optical observation of lightning from a high-altitude airplane. *J Atmos Ocean Tech*, 1987, 4: 701 ~ 711
- 16 Orville R E, Henderson R W. Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880 nm. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 3180 ~ 3187
- 17 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 Appl Meteor*, 1988, 27: 1369 ~ 1381
- 18 Christian H J, Frost R L, Gillaspay P H, et al. Observation of optical lightning emissions from above thunderstorms using U-2 aircraft. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1983, 64: 120 ~ 123
- 19 Turman B N. Lightning detection from space. *American Scientist*, 1979, May-June: 321 ~ 329
- 20 Turman B N. Analysis of lightning data from the DMSP satellite. *J Geophys Res*, 1978, 83(C10): 5019 ~ 5024

OBSERVATIONS OF LIGHTNING FROM SPCAE: A REVIEW

Chen Hongbin Lu Daren

(*LA GEO, Institute of Atmospheric Physics, CA S, Beijing 100029*)

Abstract

Observations of lightning from space have been made for more than 30 years. Spaceborne lightning sensors already provide us a lot of valuable data, from which some important information has been extracted, for example, on the global distribution of thunderstorm activity, diurnal, monthly and seasonal variations of lightning, the global flash rates, the land-ocean flash rates, superbolt events, and so on. The satellite data of lightning have many applications in lightning disaster warning and protection, thunderstorm surveillance, nuclear explosion detection, and other operational and scientific work. This paper will review the lightning monitoring from space. It presents first the satellite-borne instruments for lightning detection and mapping with focus on the lightning optical sensors. Then, some important results obtained from the observation data analysis are summarized.

Key words: Lightning, Satellite, Observation, Optical sensor.