

闪电探测技术

黄苗青* 孙胜利

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

1 闪电探测的意义

云中的颗粒在积聚增大及相互作用的过程中, 部分颗粒通过碰撞而带电。通常, 较小的颗粒带正电, 较大的颗粒带负电。在大气的上升作用及地球引力的作用下, 云的上端积聚正电荷, 而云的下端积聚负电荷。电荷的分离在云与大地之间及云内部形成了巨大的电能, 有时高达几百万瓦。

电荷不断积累, 直至电场使空气发生电离, 在地面与云的下部或云层的不同部分之间产生放电。放电过程中, 释放出巨大的能量, 有时高达 10^{12} 瓦。当大气放电使大气温度达到 $20,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 周围受到压缩的空气产生强大的冲击波, 经过延迟, 成为沿着闪电通道的声波, 即雷。

每一次地面放电是由一个或多个间断性部分放电组成。一次总的闪电放电, 持续时间约为 $1/3$ 秒, 称为闪电。每一次部分放电持续时间量级为几十毫秒, 称为一次闪击。每一次闪击之前只是一个明亮的预放电, 即所谓的先导过程。该过程在云层与地之间为后随的返回闪击产生一个带负电荷的电离通道, 第一个先导称为梯级先导, 因为它以 50 米为一级向下移动并在每一级之间停顿一下。从云底近 3 公里高度到达地面要花约 20 毫秒。

当梯级先导已接近距地面 5 至 50 米之间时, 一条带正电荷的电流从地球某些

点向上与之回合, 然后开始返回闪击, 它沿先导建立的电离化的闪道向上移动。同时释放出大量能量, 发出闪光和雷。

闪电作为一种全球性的天气现象, 可以被用来作为全球天气变化的测量依据。闪电往往与雷雨天气相联系, 会引起大的地区性降雨。因此雷电可以增强我们对于地区性暴雨的认识。闪电每年会造成很大的损失, 每年由于雷击而造成的人员伤亡全球有上千人, 并造成数以亿计财产的损失。很多森林火灾、建筑物失火以及高压输电线的损坏都直接与雷击有关。据史料记载, 故宫的几次失火都是雷击造成的。1986 年大兴安岭的森林火灾部分也是由雷击造成的。

闪电作为强对流天气的标志性象征之一, 经常与随之的降水(雨、雪、雹)有密切关系。国内外通过对闪电与雷暴的长期监测, 得出了不少有益的结果。中科院兰州高原大气物理所利用 1997 年夏季在平凉雷电与暴雨实验站设置的 3 站闪电定位系统所取得的地闪资料与雷达、降水及探空等资料进行了对比分析, 发现地闪与对流天气中的降水有较好的相关性, 这种相关性用来对一般性对流天气中降水进行估测是可行的。

在航天器发射的时候, 避免闪电是一件及其重要的事情。据档案记载, 闪电对

* 98 级硕士研究生

NASA 曾造成极大的危害, 一次比较典型的是 1969 年发射阿波罗 12 时, 闪电击中了航天器的重要电子设施。1987 年 3 月 26 日, 载有一颗通讯卫星的 Atlas Centaur 67 受到闪电的影响。由于害怕受到闪电的袭击, 很多时候使许多工作停下来, 这造成了 NASA 为航天器发射而作准备时在时间和金钱上的浪费。

卫星为在大范围内监测闪电现象提供了一个理想平台。通过对大范围、长时间内闪电资料的全面掌握和分析, 我们可以摸索出闪电与降水的关系、在时间上和空间上的分布规律以及与大气运动的联系。了解闪电, 做好预报和预防工作, 从而尽量减少闪电对人民财产及科研工作带来的损失, 提高与自然灾害对抗的能力。

2 闪电特征

在二十世纪初, 人类就开始对闪电现象进行系统的观测和研究。

从已有的气象资料分析, 每时每刻, 全球大约有超过 2000 个雷暴在活动, 每秒产生 100 个闪电。

就分布的地区而言, 低纬度地区一年四季都有, 中纬度地区以 6、7、8 月份为多。海上的雷暴闪电一般发生在夜间。对于我国, 大致趋势是南方多于北方, 内陆多于沿海, 山地多于平原, 两广、青藏高原发生雷电的概率较大。

人们对闪电个体的参数也做了细致的研究。

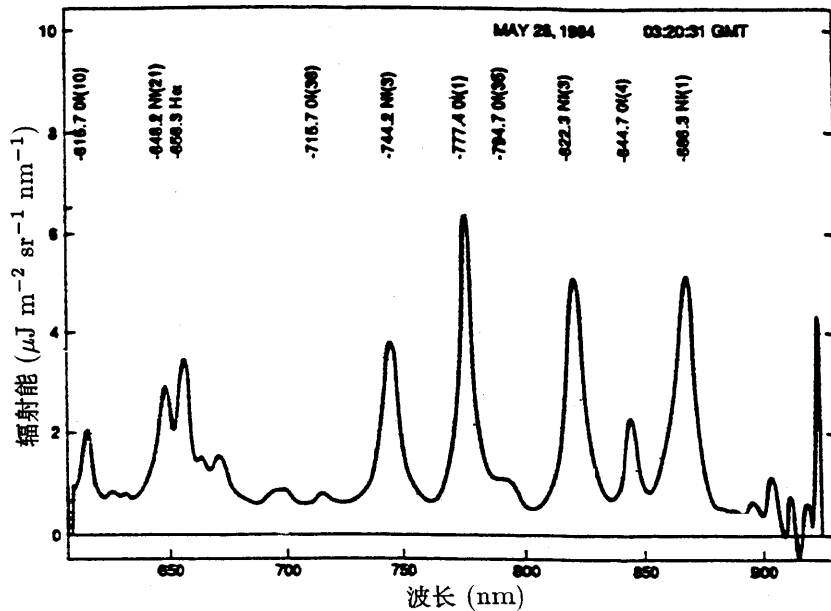


图 1 闪电在近红外端的辐射能量图

每一次放电是由一个或多个间断性部分放电组成。一次总的闪电放电, 持续时间约为 1/3 秒, 称为闪电。

一次闪电过程由一系列的闪击组成, 一般是四个, 每一个闪击持续的时间并不

相同, 一般有 30 微妙。同时将发射出大量的电磁波, 波长范围跨度可从无线电波到 X 射线。由美国 U-2 飞机探空实验所得的数据表明, 闪电在可见光及近红外光谱范围内辐射能量最为集中。其中在近红外端

的 777.4 nm 处辐射最强, 带宽仅为 1 nm, 辐射能量约为 $6.5 \mu\text{Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。在 868.3 nm 处的辐射能量约为 $4.7 \mu\text{Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。该数据常作为判定一个“事件”是否为闪电的阈值。图 1 为闪电在近红外端的辐射能量图。

对于地球上空的静止卫星的光学系统而言, 同一秒内闪电的放电过程在焦平面上将产生多次脉冲。脉冲的上升时间一般为 150 微妙。在高空观测时, 由于云层的多向散射, 脉冲上升时间将增加 150 微妙。

从 79 次闪电所产生的 1300 次脉冲获得的资料中, 脉冲平均上升时间及脉宽分别为 240 微妙和 370 微妙。

从 U-2 飞机获得的资料中分析, 一次闪击所照亮的云层上端一般为 10 公里。最强烈的闪击所影响的范围超过 60 公里。

3 闪电探测基本原理

闪电探测仪的主要框架如图 2 所示:

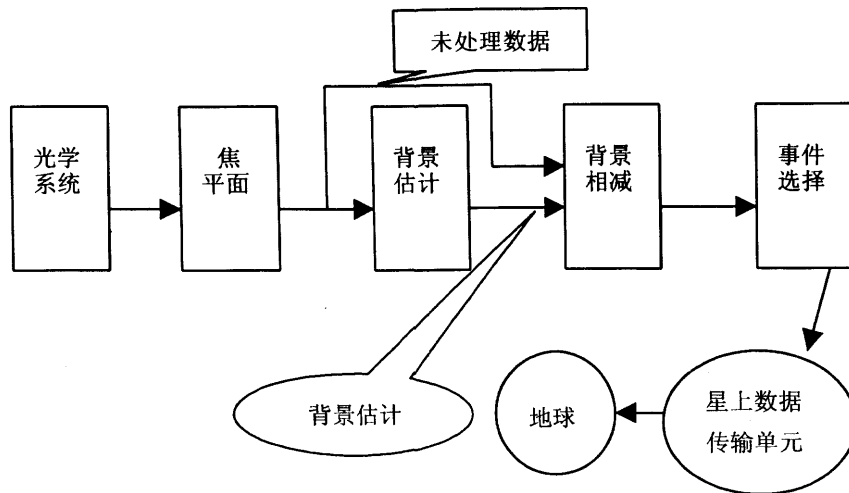


图 2

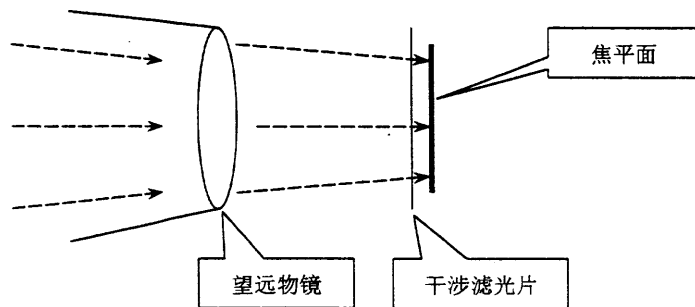


图 3

系统主要由五部分组成:

- 光学系统

光学系统, 包括探测器前面的窄带干

涉滤光片, 把探测区域内相应波段范围内的闪电成象。

探测区域内的光信号经望远物镜汇

聚,通过窄带干涉滤光片滤波,在焦平面上成象。

•焦平面组件

焦平面组件,采用 512×512 的低噪声、高可靠性的空间用可见光 CCD 器件,

完成信息的光电转换;

•高速 A/D 转换及接口电路

面阵 CCD 焦平面及高速 A/D 转换器件的构成如图 4 所示。

在光敏区对光进行积分的同时,水平

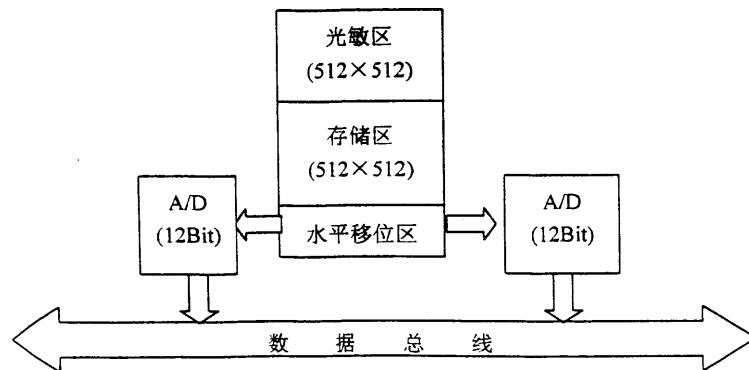


图 4

移位区的移位寄存器将存储区的信号一行行地移出,经 A/D 转换送入数据总线。光敏区积分完毕,经帧转移将光敏区的电荷整帧移入存储区,光敏区开始下一帧的光积分。

水平移位寄存器分两路将电荷移入 A/D,以提高输出速度。

•实时信号处理系统

实时信号处理系统,形成背景,主要是完成云层的估计及闪电信号提取等任务;在白天,由于云层上端反射太阳光,所形成的背景强度与闪电信号之比,往往超过 100:1(在一帧中背景在 CCD 像素上积累的光子往往超过 900,000,而闪电信号积累的光子一般不超过 6000 个)。所以最大的难题就是如何将闪电信号从背景信号中剥离出来。这方面,可以从闪电信号的瞬时性与背景信号的相对不变的特点加以解决。

实时信号处理系统的主要任务就是形成背景,并将闪电信号从背景中剥离出来。

•系统电源及温度控制模块

由于系统要工作在静止卫星的三轴稳定平台上,且工作波段很窄,要求较高的温度稳定控制。温度控制将要求系统提供很大的功率。

4 闪电探测技术发展

对于闪电, Benjamin Franklin 于 18 世纪中叶首次进行了系统的研究,但直到 19 世纪,用相机拍摄下闪电的图象、分光光谱技术成熟之后,对闪电的研究工作才有很大的进展。经过一段时间的平稳发展,到了 60 年代对于闪电的研究又开始活跃起来。这有两方面的原因,一方面是闪电给航天器的发射带来极大的危害,另外一方面近年固体器件和焦平面技术得到了极大的发展给闪电研究带来了新的发展机会。气象应用希望通过对雷电的研究得出雷电与降雨的关系,尽可能地预报雷电出现的时间。

我国的气象工作者在八十年代初曾利

用超外差收音机的原理进行雷电探测。在闪电与对流性天气系统中降水关系的分析中,我国科研工作者也作了一定工作,取得了一些成果。

目前国际上较先进的方法是利用高空飞机、航天飞船、火箭等先进工具进行探测。著名的美国 U-2 飞机上安放了快门开放式相机。这种相机对准可能发生雷电的区域,并把快门打开。在黑暗的夜空中,没有光使胶片曝光。闪电发生,则胶片曝光了。美国从航天飞机上进行光学成像,获得了许多的视频图象,观察到了有趣的闪电现象。

表 1 LIS 主要参数

项目/仪器	LIS
观测方向	星下点
视场	80° × 80°
地面成像范围	600 km × 600 km
焦面象元数	128 × 128
光学系统口径 (mm)	未知
焦距 (mm)	未知
动态范围	100 : 1
数传码率 (kbps)	8
空间分辨率 (km)	5-10
帧时 (ms)	2
波段 (nm)	777.4
带宽 (nm)	10
虚警率	< 10%
重量 (kg)	20
功耗 (W)	25

1997 年发射的 TRMM 是一颗天基的热带降水测量卫星。它在位于 350 公里高度的圆形轨道上,与赤道的倾角为 35 度。比较低的轨道高度可以获得较高的空间分辨率。TRMM 是以日本 NASDA 与美国 NASA 国际合作的成果。它上面有一台降雨雷达,一台微波辐射计,一台地球辐射收

支仪,还有一个闪电成像敏感器 (LIS)。闪电敏感器的任务是统计全球的闪电发生频率,闪电与降雨的关系及其他大气参数。

LIS 的主要指标如表 1。

LMS (Lightning mapping Sensor) 是美国计划放置于静止卫星上的凝视型闪电成像仪,它包括高质量的空间光学系统、高可靠性的可见光面阵 CCD、实时信号处理器三部分。LMS 计划安装在 2003 年发射的 GOES-O 上。表 2 是 LMS 的主要指标:

表 2 LMS 的主要指标

项目	仪器	LMS
观测方向		星下点
视场		8° × 5°
地面成像范围		5031 km × 3132 km
焦面象元数		700 × 560
光学系统口径 (mm)		110
焦距 (mm)		132
数传码率 (kbps)		80
空间分辨率 (km)		8
帧时 (ms)		2
中心波长 (nm)		777.4
带宽 (nm)		1
测量	定位	1 个像元
精度	强度	10%
信噪比		> 6
探测效率		> 90%
虚警率		< 5%
重量 (kg)		35
功耗 (W)		100

另外,美国的 OSO 2、OSO 5 卫星和 DMSP 卫星上都进行过闪电的探测,积累了大量数据。表 3 是在卫星上进行闪电探测试验的仪器情况汇总。

表 3 在卫星上进行闪电探测试验的仪器情况汇总

卫星	探测器	轨道 (Km)	周期	探测灵敏度 (W)	轨迹
OSO	曝光光度计		没有月光的晚上	$\sim 10^8$	
VELA V	光电二极管	1.1×10^5	白天和晚上	$10^{11} \sim 10^{13}$	宽视场
D MSP	扫描辐射计	830	局部区域的晚上		100 km
D MSP-SSL	12 元光电二极管阵列	830	局部区域的晚上	$10^8 \sim 10^{10}$	750 km \times 750 km
D MSP-PBE-2,3	1 英寸二极管阵列		黎明和傍晚时候		
ISS	4 个窄波段接受器		白天和晚上	未知	可变的
航天飞机 -NOSL	光电池加胶片	150			
LMS(计划中)	CCD 阵列	35800	连续观测	$10^8 \sim 10^{11}$	10 km

参考文献

- [1] Hans Volland 著, 大气电动力学, 气象出版社, 1992 年 4 月。
- [2] 王庆有、孙学珠主编, CCD 应用技术, 天津大学出版社, 1993 年 3 月。
- [3] 陈洪滨、吕达仁, 从空间探测闪电的综述, 气象学报。
- [4] Sparrow, J.G., et al., Nature, 232, 540, 1971.
- [5] Goodman, S. J. et al., J. Appl. Meteorol., 27, 1369 - 1381, 1988a.
- [6] Goodman, S. J. et al., Geophys. Res. Lett., 15, 1185 - 1188, 1988b.
- [7] Grosh, T., Lightning and precipitation - The life history of isolated thunderstorms, paper presented at the Conference on Cloud Physics and Atmospheric Electricity, Am. Meteorol. Soc. Issaquah, Wash., 1978
- [8] Orille, R. E., et al., J. Atmos. Sci., 41, 3180-3187, 1984.
- [9] Christian, H. J. et al., J. Geophys. Res. 94, 13329 - 13337, 1989.

· 简 讯 ·

制作在 VCSEL 外延结构内的增强型光电探测器

德国 Ulm 大学等单位的研究人员在一种普通外延层结构中制备了一种与单模垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 邻接的共振腔增强型 (RCE) 光电探测器。该结构是用固体源分子束外延方法生长的。内腔的厚度为 $\lambda/2$, 里面有 3 个 8 nm 厚的镓砷 (GaAs) 量子阱。

这种外延结构内有 15.5 对镜面, 研究人员通过将其中的 8 对镜面刻蚀掉, 制备成了一种共振腔增强型探测器。当施加 -1.5 V 反向偏压时,

该探测器的峰值量子效率为 73%, 最大值一半处的光谱满宽度约为 1.7 nm。未加偏压时, 该器件的峰值量子效率为 69%, 最大值一半处的光谱满宽度为 1.8 nm。对于一种 4.5 顶部镜面对共振腔增强型器件, 当刻蚀掉 11 个镜面时, 施加反向偏压的器件和未加偏压的器件产生的峰值量子效率分别为 26% 和 36%。这种 4.5 顶部镜面器件的最大值一半处的光谱满宽度约为 6.5 nm。当有效器件直径从 90 μm 减少到 20 μm 时, 研究人员还观测到 3 dB 探测器带宽在 2.8 GHz 以下一直在增加。

□ 高国龙