

在卫星上进行闪电探测

高 松*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 本文介绍了闪电探测的相关内容, 分析了闪电探测中的大数据量处理问题, 提出了一些闪电探测中实时信号处理的方法。

关键词 闪电探测 大数据量 实时信号处理

1 为什么要进行闪电探测

闪电作为一种天气现象, 可以用来作为研究天气变化和天气预测的依据, 而且闪电还会造成很大的损失, 全球每年都有几千人因为闪电而伤亡, 还有各种火灾: 森林火灾、建筑物火灾等。另外闪电对于航空飞行、火箭和导弹发射等的影响也是非常大的。正是因为闪电对于人类的的生活和工作有着种种的影响, 所以才需要对闪电发生的频率、其随纬度和季节的变化以及日变化、超级闪电的发生进行观测。

2 闪电的成因和特性

云中的颗粒因为相互碰撞, 而使部分颗粒带电。通常小的颗粒带正电, 大的颗粒带负电, 在大气的上升作用和地球引力的作用下, 云层的上端带正电, 下断带负电。电荷的分离在云和大地以及云层内部形成了巨大的电能。随着电荷不断积累, 直至电场使空气发生电离, 在地面与云层的下部或者云层之间的不同部分产生了放电。按照发生闪电的位置, 可以分为云地闪电、云内闪电和云间闪电。

一次闪电过程是由一系列的闪光造成的, 一般是四个, 每一个闪光持续的时间并不一样。在闪电的一次闪击过程中, 会产生多次脉冲。脉冲的上升时间一般为 $150\mu\text{s}$, 但是由于云层对闪电辐射的影

响主要是散射, 多次散射模糊了闪电发生的空间位置以及延迟、延长了闪电的辐射脉冲。由于散射的存在, 闪电辐射脉冲的上升时间增加了 $215\mu\text{s}$ 。通过统计得出, 脉冲平均上升时间和宽度分别是 $240\mu\text{s}$ 和 $370\mu\text{s}$ 。

闪电的辐射能量虽然横跨无线电波和 X 射线, 但不是均匀分布的, 而是由几个辐射峰值组成, 在可见光及近红外光谱范围内辐射能量最为集中。其中在中性氧 (777.4nm) 和中性氮 (868.3nm) 波长处的辐射最强, 在波长为 777.4nm 处的辐射能量约为 $6.5\mu\text{Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 在波长为 868.3nm 处的辐射能量约为 $4.7\mu\text{Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。各自包括了整个辐射光谱的 $5\% \sim 10\%$ 的能量。

3 闪电探测的要求

一次闪击经过云层的辐射以后, 持续的时间大概是 $400\mu\text{s}$ 左右, 而云层的变化一般在几秒的数量级, 对于积分型的敏感器件, 积分时间就是两次读出像元之间的时间, 积分时间如果与闪电脉冲的持续时间接近, 这样得出的信号, 信噪比就比较高, 但是如果积分时间太短, 一个闪电辐射脉冲就会被分割存储在几个连续的帧内。所以选择 1ms 的积分时间是比较合适的, 但是 NASA 在设计的时候考虑其它的一些因素, 把积分时间设成了 2ms 。从应用情况来看, 这对于探测效率没有很大的影响。

* 2001 级硕士研究生

虽然闪电发生时发出刺眼的光亮,但是闪电脉冲的辐射强度相对于它的背景环境(云层上端反射的太阳光)的强度来说是很弱的,尤其是在白天的时候。因为闪电信号的频谱是不连续的,由许多辐射峰值组成,而背景信号(太阳光)是相对连续的,所以可以在焦平面前加一个干涉滤光片,让闪电信号的辐射峰值透过。即使这样,在焦平面上累计的背景信号和闪电信号之比仍然可能超过 150:1。但是因为相对于背景的变化速度,闪电信号的变化速度是非常快的,在这种情况下,可以采用帧帧背景相减的算法,把缓慢变化的背景信号从焦平面读出的数据中减掉,提取出闪电信号。

根据统计资料,全球每年发生闪电 2.05×10^9 次,平均每秒钟 65 次左右。因此要想对闪电的发生有全面的掌握,进而进行各种深入的研究,以便得出规律,加以利用,就必须对闪电现象进行大范围、长时间的观测,这就要求闪电探测必须具有连续性。

4 国内外研究现状

对于闪电的研究已经有很多年了,但是对于闪电的探测,是自从 20 世纪 60 年代开始,由于固体器件和焦平面技术的发展才进入了一个崭新的阶段。

目前国际上比较先进的方法是利用在高空的飞行工具,在离地很高的地方,凝视地球来探测闪

电的发生。而这种方法最适合用在卫星上了,表 1 是在卫星上进行闪电探测试验的仪器情况汇总。

以上是已经发射的卫星搭载的闪电探测装置,这些装置要么探测的器件比较落后,不能实现很高的探测效率,要么由于卫星飞行高度不够,难以实现大范围的观测要求。不过 NASA 计划在 2003 年发射的 GOES-O 上搭载 LMS(Lighting Mapper Sensor), LMS 是凝视型闪电成像仪,它包括高质量的空间光学系统、高可靠性的面阵 CCD 和实时信号处理器三部分,能够实现大范围、连续性、高探测率的观测要求。表 2 给出了 LMS 的主要技术指标。

5 闪电探测的实现框架

系统的主要部分介绍如下:

- 光学系统: 一个透镜组将采集进来的光在焦平面上成像,还需要一个窄带干涉滤光片用来进行滤光,提高信噪比。

- 焦平面: 一个高速 CCD, 将通过光学系统进入的光信号转换成电信号,实现信息的光电转换。

- 实时信号处理部分: 在要求的时间内,完成背景的相减、是否出现闪电的判断、新的背景帧的生成。

表 1

卫星	敏感器件	探测时间	敏感功率范围 (W)	备注
OSO	光度计	无月亮的晚上	$\sim 10^8$	
VELA V	光电二极管	全天	$10^{11} \sim 10^{13}$	
DMSP	扫描辐射计	子夜		分辨率: 100km
DMSP-SSL	线阵光电二极管	子夜	$10^8 \sim 10^{10}$	成像范围: 750×750 km
DMSP-PBE-2,3	光电二极管	黎明和黄昏	$4 \times (10^9 \sim 10^{13})$	成像范围: 直径 1360km
ISS	窄带接受器	全天		
Shuttle-NOSL	光电池和胶片	飞船飞行期间		
Microlab-1 (OTD)	面阵光电二极管 (128 × 128)	连续	$10^8 \sim 10^{11}$	成像范围: 1300×1300 km
TRMM (LIS)	面阵 CCD	连续	$10^8 \sim 10^{11}$	成像范围: 580×580 km 分辨率: 3.9 ~ 4.5km

• 闪电发生帧的处理：生成固定格式的数据包，加入闪电发生的时间、地点以及强度等数据。

表 2

指标	LMS
观测方向	星下点
视场	$8^{\circ} \times 5^{\circ}$
地面成像范围	5031km \times 3132km
焦面像元数	700 \times 560
数据传输率 (kpbs)	80
空间分辨率 (km)	8
帧时 (ms)	2
中心波长 (nm)	777.4
带宽 (nm)	1
信噪比	> 6
探测效率	> 90%
虚警率	< 5%
重量 (kg)	34
功耗 (W)	100

6 闪电探测中的数据量分析

根据上面得出的闪电探测的要求，闪电探测要实现很好的效果就必须进行连续的观测，而且至少要达到 2ms 观测一帧的频率。下面来计算在这样的要求下产生的数据量：对于一个列阵尺寸为 512×512 ，动态范围为 68dB(10bit) 的面阵 CCD 来说，如果以每 2ms 一帧的速度进行输出，每秒钟的数据量为： $512 \times 512 \times 10 \times 500\text{bit} = 1310720000\text{bit} = 1.22\text{Gbit}$ 。因为闪电探测采

用的帧帧相减的算法，所以还有相同的数据量从背景存储装置中输出，实时信号处理部分必须要完成探测帧与背景帧的比较和判断，判断为闪电发生的帧要输出，还要生成新的背景帧。闪电探测要求连续性，不能将数据缓存下来慢慢处理。这样就要求实时信号处理部分将上面所叙述的任务在一秒钟内处理完毕。因此在一秒钟内处理的数据量是非常大的。

CCD 在列阵尺寸为 512×512 的情况下有 16 个输出端口，用来并行输出数据。为了降低对实时信号处理部分的要求，减少需要处理的数据量，可以对每个输出端口采用独立的处理电路。这样每个端口每秒输出的数据量为： $1250/16 = 78.125\text{Mbit}$ ，这也就是每个实时信号处理单元需要在一秒钟内处理的数据量。

经过上面的分析可以得出：闪电探测中最重要的问题就是如何实现高速、大数据量的传输和处理。

7 大数据量传输和处理的一些问题

根据上面的分析，即使是使用 16 个独立的处理电路来进行信号处理，每秒钟需要处理的数据量也要达到 78.125 Mbit。这样的数据量对系统不论是在传输过程还是处理过程都提出了很高的要求。

7.1 传输中的问题

数据的传输不外乎两种方式，并行和串行。

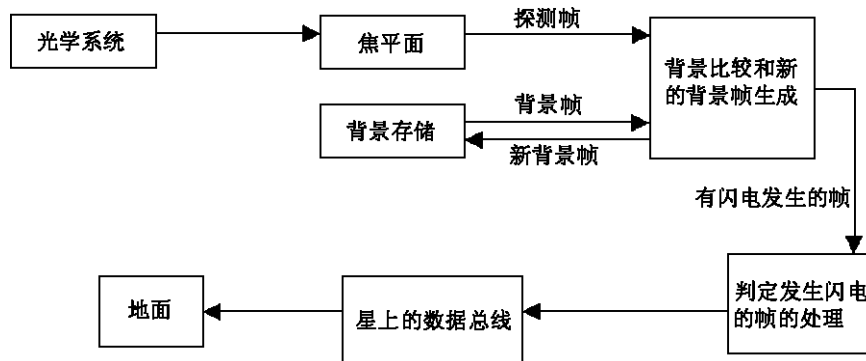


图 1 闪电探测器的主要框架

在串行传输情况下,数据传送速度慢一些,控制程序较复杂,但其外围电路简单、体积因此也比较小。

在并行传输情况下,数据传送速度快,程序实现较简单,但其外围电路复杂,占用的输入输出较多,因而增加了硬件的体积。

在数据量比较大,传输距离也很近的情况下,一般都采用并行传输的方式。但是并行传输在速度很快的时候,会产生相互的串扰,对传输的信号产生影响,甚至破坏传输的信号。差分传输可以很好地解决串扰的问题,实现高速的传输,信号之间又不会相互影响。

7.2 处理中的问题

实时信号处理系统必须具有处理大数据量的能力,以保证系统的实时性;其次对系统的体积、功耗、稳定性等也有较严格的要求。实时信号处理算法中经常用到对图像的求和、求差运算,二维梯度运算,图像分割及区域特征提取等不同层次、不同种类的处理。其中有的运算本身结构比较简单,但是数据量大,计算速度要求高;有些处理对速度并没有特殊的要求,但计算方式和控制结构比较复杂,难以用纯硬件实现。因此,实时信号处理系统是运算速度快、运算种类多的综合性信息处理系统。

根据信号处理系统在构成、处理能力以及计算问题和硬件结构映射方法的不同,可以将现代信号处理系统分为三大类:

- 指令集结构 (ISA) 系统。在由各种微处理器、DSP 处理器或专用指令集处理器等组成的信号处理系统中,都需要通过系统中的处理器所提供的指令系统(或微代码)来描述各种算法,并在指令部件的控制下完成对各种可计算问题的求解。

- 硬连线结构系统。主要是指由专用集成电路 (ASIC) 构成的系统,其基本特征是功能固定、通常用于完成特定的算法,这种系统适合于实现功能固定和数据结构明确的计算问题。不足

之处主要在于:设计周期长,成本高,且没有可编程性和可扩展性差。

- 可重构系统。基本特征是系统中有一个或多个可重构器件(如 FPGA),可重构处理器之间或可重构处理器与 ISA 结构处理器之间通过互连结构构成一个完整的计算系统。

7.3 三种信号处理方法在实现闪电探测中的可行性

- 1) 实时信号处理单元选择以 DSP 芯片为核心处理部分。虽然现在 DSP 芯片的处理速度已经很快,但是那是在一种非常绝对和理想的情况下,实际上由于数据读入、输出、中断信号的产生和等待,导致了 DSP 在执行指令的时候,会随机的加入一些等待,不能实现理想上的速度。而且, DSP 主要是用来实现一些相对复杂的算法和控制的时候能够体现出优越性,在相对底层的处理中,算法很简单,但是数据量很大,并不具有很大的优势。另外, DSP 芯片的对外管脚一般都很少,难以实现并行的数据输入和输出,所以要是通过这种方法实现的话,必须要对整个流程进行优化,根据具体的要求,编制出合理的程序,充分发挥 DSP 芯片的处理能力。

- 2) 实时信号处理单元采用模数混合电路实现,即:信号的处理部分采用纯粹的模拟电路实现,因为模拟电路的处理速度是非常快的,所以可以达到很高的速度。但是由于背景存储只能采用数字的方式,这样必然要涉及到多次的数模和模数转换,就会产生不必要的误差。而且各种运算都是由模拟电路完成,就对时序的控制提出了很高的要求。另外,数字电路产生的噪声对模拟电路的影响也是必须要考虑的问题。

- 3) 实时信号处理单元选择以 FPGA 芯片为核心处理部分, FPGA 是现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array) 的简称,它具有集成度高,运算时间短,占用面积小,开发周期短等优点,而且它也是依靠芯片内部的门电路的相互作用来实现逻辑功能的,因此和模拟电路有相似的地方,但是同时又克服了模拟电路的许多不足之处,是一种很理想的解决方案。

通过以上的分析,可以得出:在实时信号处理系统中,低层的信号预处理算法处理的数据量大,对处理速度的要求高,但运算结构相对比较简单,适于用 FPGA 进行硬件实现,这样能同时兼顾速度及灵活性。高层处理算法的特点是所处理的数据量较低层算法少,但算法的控制结构复杂,适于用运算速度高、寻址方式灵活、通信机制强大的 DSP 芯片来实现。因此,采用 DSP 加 ASIC 结构的信号处理系统就具有很大的优越性。

参考文献

[1] Christian. LMS Mission And Science Requirements, NASA.

[2] Christian, Blakeslee, Goodman and Mach. ALGORITHM THRORETICAL BASIS DOCUMENT(ATBD) FOR THE LIGHTING IMAGING SENSOR(LIS), NASA.

[3] Christian, Blakeslee, Boccippio, Koshak, Goodman and Mach. SCIENCE DATA VALIDATION PLAN FOR THE LIGHTING IMAING SENSOR(LIS), NASA.

[4] Ralph M. Shima and Terrence S. Lomheim. Performance Characterization of a High-Speed Analog Video Processing Signal Chain for Use in Visible and Infrared Focal Plane Applications, SPIE Vol. 3061.

[5] Christian, Blakeslee and Goodman, J. Geophys. The Detection of Lightning From Geostationary Orbit, res. 94,13329-13337, 1989.

[6] 来晓岚, 赵佳明, 卢焕章. DSP + FPGA 实时信号处理系统, 电子技术应用.

国外专利介绍

可探测许多个红外波段的热红外列阵传感器

美国专利 US6495829

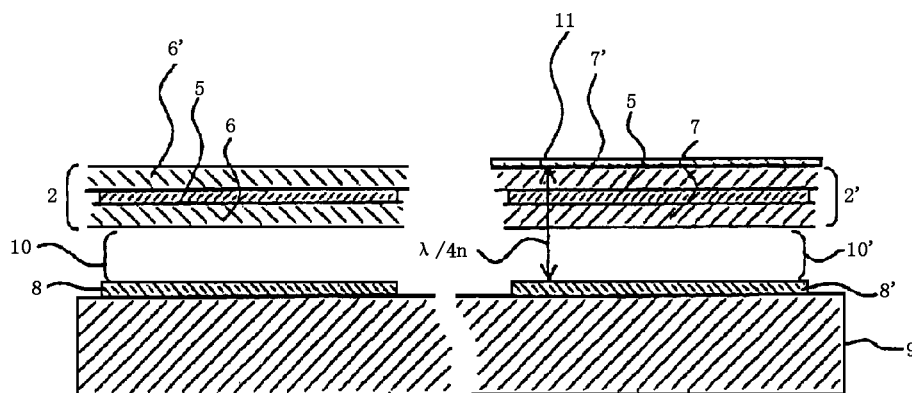
(2002 年 12 月 17 日公布)

非致冷型热红外列阵传感器难以通过单个器件来

探测许多个红外波段;碲镉汞双波段红外列阵传感器难以探测三个以上的红外波段,而且需要冷却才能工作。

本发明提供一种新颖的非致冷型热红外列阵传感器,它有一个包括许多个不同类型的红外传感器、能够探测许多个不同红外波段的列阵。该列阵中的每个传感器均有一块膜片,它是通过一个隔热腔与衬底分开的。每一种传感器中的膜片和隔热腔的高度都是不同的。

本专利文献共 27 页,其中有 15 张插图。



高 编译