

文章编号 1004-924X(2012)07-1587-08

## 气象卫星闪电识别系统的设计与实现

周 严<sup>1</sup>, 田 茂<sup>1</sup>, 张青林<sup>1\*</sup>, 陈 曦<sup>2</sup>, 熊淑云<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072; 2. 武汉大学微电子研究院, 湖北武汉 430072)

**摘要:**设计了一种能够完成帧-帧背景去除算法的闪电识别系统,用于实时识别闪电事件并编码。该系统将闪电成像仪拍摄到的高速图像数据分成8个区域,用8个相同的子系统分别完成各个区域的闪电探测;在每个子系统中利用7片静态随机存储器(SRAM)以流水读写的方式完成7帧背景评估,并利用该方法实现7帧数据的帧-帧背景去除算法。实验结果显示,该系统可以完成2.88 Gbps高速数据流的接收,背景信号评估和去除,并且可实时识别闪电事件。这些结果表明该系统能够完成气象卫星闪电识别的任务。

**关键词:**闪电探测;闪电识别;闪电事件;背景存储;静态随机存储器

**中图分类号:**TP391; P414.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1587

## Design and implementation of lightning identification system on meteorological satellite

ZHOU Yan<sup>1</sup>, TIAN Mao<sup>1</sup>, ZHANG Qing-lin<sup>1\*</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>, XIONG Shu-yun<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Institute of Microelectronics and Information Technology,

Wuhan University, Wuhan 430072, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhang\_qinglin83@yahoo.com.cn

**Abstract:** A lightning identification system that can realize frame-frame background removal algorithm is designed to accomplish the lightning identification and coding in real-time on a meteorological satellite. This system divides the high-speed image captured by a lightning imaging sensor into eight regions, and the lightning detection of each region is completed by an identical subsystem respectively. Each subsystem uses seven Static Random Access Memories(SRAMs) to read and write data in the pipelined architecture to implement the background evaluation and realize frame-frame background removal algorithm. Experimental results show that this system can receive high-speed data flow up to 2.88 Gbps, realize background signal evaluation and removal, and identify lightning events in real-time. These results show this system is able to identify the lightning on meteorology satellites.

**Key words:** lightning detection; lightning identification; lightning event; background storage; Static Random Access Memories(SRAM)

收稿日期:2012-01-17;修订日期:2012-03-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61072135)

## 1 引言

闪电作为一种重要的自然现象,是云与云之间、云与地之间或者云体内各部位之间的强烈放电现象,是唯一代表大气对流强度的因子,同时也是利用空间探测对流的重要手段。因此,了解闪电特性,高精度定位、分析闪电现象对防火,抗灾和国民经济都有重要意义<sup>[1-2]</sup>。美国从 20 世纪 60 年代就开始开展多种类型卫星探测闪电的研究工作并于 1995 年发射了低轨道卫星闪电成像仪——光学瞬闪探测仪(Optical Transient Detector, OTD),这是全球第一个发射上天的卫星光学探测仪。1997 年,美国又发射了其改进型闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor, LIS),该闪电成像仪至今仍在工作。OTD 和 LIS 的实践证明了利用光学成像技术实现闪电观测的可行性。但是这两颗卫星都是低轨道卫星,无法对某一特定区域进行全天候的观测。静止轨道的气象卫星可以对某一特定地区进行全天候的观测,被认为是对闪电观测的最有效手段<sup>[3-6]</sup>,而目前全球还没有一颗静止轨道的气象卫星用于观测闪电信号,美国虽然在 20 世纪 80 年代就提出利用静止轨道卫星探测闪电,但根据计划,该卫星在 2014 年左右才能发射。

我国即将发射的风云四号气象卫星就是一颗静止轨道的气象卫星,其搭载的闪电成像仪可以从静止轨道高度对中国大陆及其周边区域的闪电进行全天候连续不断的观测<sup>[7]</sup>。该闪电成像仪主要利用光谱滤波、空间滤波、时间滤波和帧-帧背景去除 4 种方法来实现闪电信号的增强与探测<sup>[8]</sup>。

本文设计了一种能够完成帧-帧背景去除算法的闪电识别系统,该系统能够实现 2.88 Gbps 焦面数据的实时接收与处理,主要完成高速数据流的接收,背景信号评估、背景信号去除、阈值选择、闪电信号判断、闪电强度排序和闪电事件编码等工作。最后从每幅图像中提取多个闪电事件的信息并编码输出到卫星的数传分系统。

## 2 闪电识别的算法

闪电识别系统最重要的任务就是从高速的背

景信号中检测出闪电事件,需要对闪电成像仪视场中焦面成像电路所拍摄的每个像元都进行处理,输出闪电事件的位置、强度、背景评估值和阈值等信息。其工作基本原理如图 1 所示。

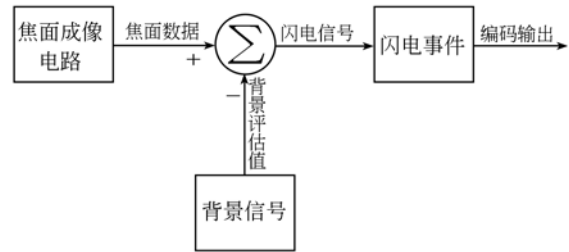


图 1 闪电识别系统的工作原理

Fig. 1 Principle of lightning recognition system

其中背景信号是前  $n$  帧 ( $n=7$ ) 背景的加权平均。在平均中,最新帧的权重大于其前面的帧,背景信号评估器(背景信号的加权平均)、背景信号去除器和闪电信号识别器相结合,执行时域低通滤波器的功能。焦平面信号离开焦面后送进缓冲器,然后,该信号乘上一个增益因子( $B$ )并加上像像素的前  $n$  帧的背景的  $(1-B)$  倍,从而得到最新的背景评估值。得到的背景评估值和对应的焦平面输出信号被送到背景信号去除器、事件选择器和闪电信号识别器,最终判断出闪电信号。其计算公式为<sup>[8-9]</sup>:

$$y_1 = b(0)x(0) + b(1)x(1) + b(2)x(2) + b(3)x(3) + b(4)x(4) + b(5)x(5) + b(6)x(6) + bx(\text{input}), \quad (1)$$

$$y_{\text{coeff}} = b(0) + b(1) + b(2) + b(3) + b(4) + b(5) + b, \quad (2)$$

$$y_b = y_1 / y_{\text{coeff}}, \quad (3)$$

$$y = x(\text{input}) - y_b, \quad (4)$$

其中  $b=B$ ,  $b(0)=1-B$ ,  $b(1)=(1-B)^2$ ,  $b(2)=(1-B)^3$ ,  $b(3)=(1-B)^4$ ,  $b(4)=(1-B)^5$ ,  $b(5)=(1-B)^6$ ,  $b(6)=(1-B)^7$ 。  $x(0)$  是最新一帧的背景值;  $x(1)$  是之前第 1 帧的背景值;  $x(2)$  是之前第 2 帧的背景值;  $x(3)$  是之前第 3 帧的背景值;  $x(4)$  是之前第 4 帧的背景值;  $x(5)$  是之前第 5 帧的背景值;  $x(6)$  是之前第 6 帧的背景值;  $x(\text{input})$  是从焦平面输出的背景和信号。

$y_b$  是归一后的背景。  $y_1$  是归一前的背景。  $y$  是减除背景后的输出。

最终将识别出来的  $y$  按照强度由强到弱进行排序,并且记录下每个  $y$  的位置、背景评估值和阈值,将其编码输出。

### 3 闪电识别系统的硬件设计与实现

要实现气象卫星的闪电识别的功能,除了需要了解其算法外,还必须设计出能够完成该任务的硬件系统。

#### 3.1 总体方案实现

闪电识别系统的硬件框图如图 2 所示。

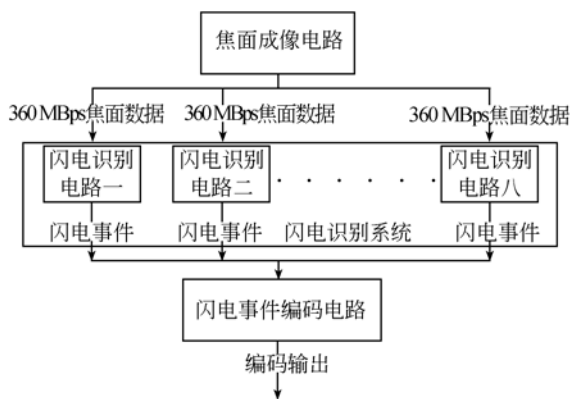


图 2 闪电识别的系统框图

Fig. 2 System diagram of lightning detection

该硬件系统的主要难点在于:(1)需要实时接收处理 2.88 Gbps 的数据;(2)7 帧背景数据的存储。为了解决第一个问题,这里将闪电识别系统分成 8 个部分,用 8 块闪电识别电路来实现 2.88 Gbps 的数据接收与处理,每块电路只需要接收处理 360 Mbps 的数据。下面将重点讨论第二个问题,怎么用尽量少的 SRAM 实现背景数据的存储。

#### 3.2 背景存储

闪电识别电路从焦面接收到数据时钟为 30 MHz,数据位宽为 12 bit,每帧的图像分辨率为  $512 \times 512$ ,帧周期为 2 ms。由于一帧图像分成 8 块闪电识别电路来接收,所以每块闪电识别电路接收的数据量为  $256 \times 128$ 。

##### 3.2.1 7 帧背景存储方法一

由于完成闪电事件的识别需要 7 帧背景数据,所以最简单的就是用 7 片 SRAM 来存储 7 帧图像数据,其工作流程图如图 3 所示。

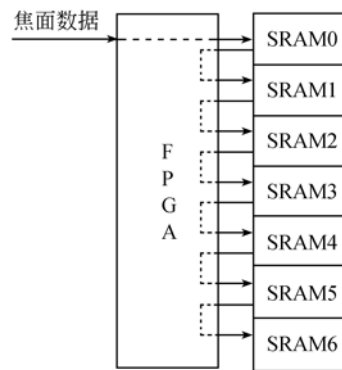


图 3 7 帧背景数据存储方法一

Fig. 3 The first storing method for 7 frame background data

该方法工作原理是每次最新接收到一帧图像数据写到 SRAM0 中存储,同时需要将 SRAM1 ~SRAM6 的数据同步读出完成背景评估,还需要将 SRAM0 中的原始数据读出再写入 SRAM1;将 SRAM1 中的原始数据读出再写入 SRAM2;将 SRAM2 中的原始数据读出再写入 SRAM3;将 SRAM3 中的原始数据读出再写入 SRAM4;将 SRAM4 中的原始数据读出再写入 SRAM5;将 SRAM5 中的原始数据读出再写入 SRAM6;SRAM6 的数据用完后就可以丢掉了。

以上所有的操作需要在一个 2 ms 的帧周期内完成。根据计算每帧数据的传输时间为:

$$\frac{256 \times 128}{30 \times 16^6} = 1.09 \times 10^{-3} \text{s} = 1.09 \text{ ms}, \quad (5)$$

则在 1.09 ms 的时间内,既要每片 SRAM 以 30 MHz 的时钟读出数据,又要对每片 SRAM 以 30 MHz 的时钟写入数据,显然 SRAM 不可能这样工作,所以可以否定这种方案。

##### 3.2.2 7 帧背景存储方法二

以上 7 片 SRAM 的方案无法完成背景的存储,所以在 2005 年国防科技大学的陈伟提出了 14 片 SRAM 存储的方案<sup>[8]</sup>,其工作流程图如图 4 所示。

其工作原理为在一个 2 ms 帧周期内,FPGA 将接收的焦面数据写入 SRAM0,同时 FPGA 将 SRAM0' ~ SRAM6' 的数据读出完成背景评估和闪电事件识别,然后将 SRAM0' 的数据写入 SRAM1;SRAM1' 的数据写入 SRAM2;SRAM2' 的数据写入 SRAM3;SRAM3' 的数据写入

SRAM4;ARAM4'的数据写入 SRAM5;SRAM5' 的数据写入 SRAM6,如图 4 所示。

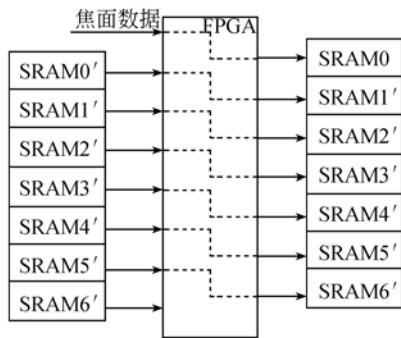


图 4 数据存储方法二:帧周期一

Fig. 4 The second storing method of 7 frame background data:one cycle

在另一个 2 ms 帧周期内,FPGA 将接收的焦面数据写入 SRAM0',同时 FPGA 将 SRAM0~SRAM6 的数据读出完成背景评估和闪电事件识别,然后将 SRAM0 的数据写入 SRAM1';SRAM1 的数据写入 SRAM2';SRAM2 的数据写入 SRAM3';SRAM3 的数据写入 SRAM4';SRAM4 的数据写入 SRAM5';SRAM5 的数据写入 SRAM6'。如图 5 所示。

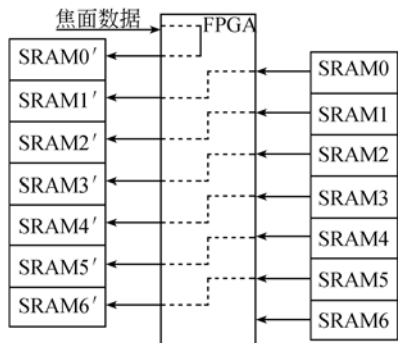


图 5 7 帧背景数据存储方法二:帧周期二

Fig. 5 The second storing method of 7 frame background data storage:the other cycle

依次循环上面的两个帧周期的操作,则可以实现 7 帧背景数据存储的功能。

### 3.2.3 7 帧背景存储方法三

采用 14 片 SRAM 虽然可以完成 7 帧背景的存储,但是使用了较多的 SRAM,导致闪电识别电路布线复杂,可靠性降低,本文提出了一种新的 7 片 SRAM 的背景存储方法。其原理如图 6、

图 7 所示。

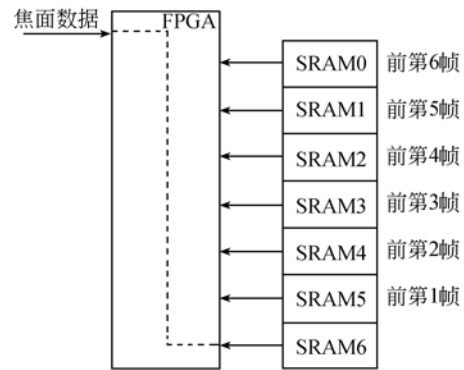


图 6 7 帧背景存储方法三:帧周期一

Fig. 6 The third storing method of 7 frame background data:one cycle

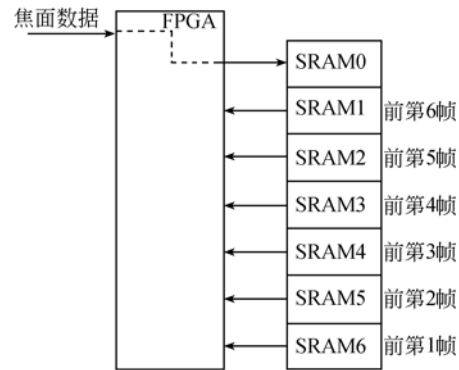


图 7 7 帧背景数据存储方法三:帧周期二

Fig. 7 The third storing method of 7 frame background data:another cycle

其工作原理是采用 7 片 SRAM,FPGA 将接收的当前帧数据依次写入 SRAM0~SRAM6 中的 1 片,同时读取另外 6 片的数据,FPGA 利用当前帧数据和读出的 6 帧数据实现闪电事件识别。当将当前帧数据写入 SRAM6 时,SRAM5 里是前第 1 帧的背景值;SRAM4 里是前第 2 帧的背景值;SRAM3 里是前第 3 帧的背景值;SRAM2 里是前第 4 帧的背景值;SRAM1 里是前第 5 帧的背景值;SRAM0 里是前第 6 帧的背景值。依次类推,当将当前帧数据写入 SRAM0 时,SRAM6 里是前第 1 帧的背景值;SRAM5 里是前第 4 帧的背景值;SRAM4 里是前第 3 帧的背景值;SRAM3 里是前第 4 帧的背景值;SRAM2 里是前第 5 帧的背景值;SRAM1 里是前第 6 帧的背景值。每次写入 1 片 SRAM,从其它 6 片 SRAM 读出数据权重关系如表 1 所示。

表 1 每次读出 SRAM 数据在背景评估中的权重表

Tab.1 Weight of each SRAM data read out in background evaluation

当前帧	SRAM0	SRAM1	SRAM2	SRAM3	SRAM4	SRAM5	SRAM6
SRAM0	X(0)	X(6)	X(5)	X(4)	X(3)	X(2)	X(1)
SRAM1	X(1)	X(0)	X(6)	X(5)	X(4)	X(3)	X(2)
SRAM2	X(2)	X(1)	X(0)	X(6)	X(5)	X(4)	X(3)
SRAM3	X(3)	X(2)	X(1)	X(0)	X(6)	X(5)	X(4)
SRAM4	X(4)	X(3)	X(2)	X(1)	X(0)	X(6)	X(5)
SRAM5	X(5)	X(4)	X(3)	X(2)	X(1)	X(0)	X(6)
SRAM6	X(6)	X(5)	X(4)	X(3)	X(2)	X(1)	X(0)

该方法和前两种方法的本质区别是,前两种方法每次将当前帧数据写入同 1 片 SRAM,每次每片 SRAM 里读出的背景数据为固定权重。该方法每次将数据依次写入不同的 SRAM,每次每片 SRAM 读出的背景数据权重在变。实现了利用 7 片 SRAM 将一路输入图像数据扩展为依次输入的 7 路图像数据,完成了 7 帧数据的帧-帧背景去除算法。

### 3.3 闪电识别电路

提出了新的背景存储方法,就必须设计出能够完成该背景存储方法的闪电识别电路。该电路主要由供电滤波电路, LVDS 接口焦面数据接收电路、422 接口的遥控遥测命令电路、FPGA 电路和 7 片 SRAM 电路组成。其硬件结构框图如图 8 所示。

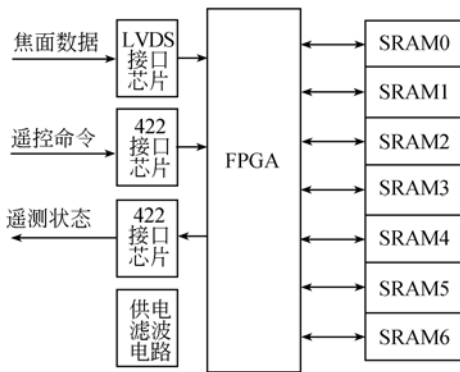


图 8 闪电识别电路硬件结构图

Fig.8 Hardware system schematic of lightning recognition circuit

FPGA 通过接收经过 LVDS 接口芯片转换的焦面数据,将数据依次写入 SRAM,并读取另外的 6 片 SRAM 数据。同时 FPGA 通过 422 接口芯片接收管理与控制电路的遥控命令,执行相

应的操作并将该电路的遥测状态通过 422 接口芯片返回。FPGA 内部程序实现框图如图 9 所示。

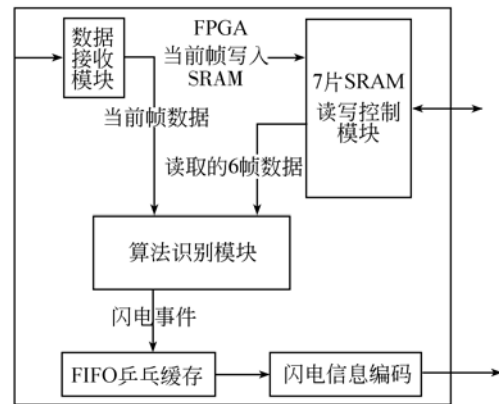


图 9 FPGA 内部主要逻辑功能模块

Fig.9 Main logic modules in FPGA

FPGA 将接收到的当前帧数据同时送入算法识别模块和 SRAM 读写控制模块,SRAM 读写控制模块将该帧数据写入 1 片 SRAM 的同时,读取另外的 6 片 SRAM,将 6 片 SRAM 的数据按照权重送入算法识别模块,算法识别模块利用这 7 帧数据完成背景评估和闪电事件的识别,输出闪电事件。送出的闪电时间经过 FIFO 的乒乓缓存,送入闪电信息编码模块,该模块将每一个闪电事件的位置、强度、背景评估值和阈值编码输出。

## 4 实验结果与分析

设计完成该闪电识别系统的硬件和软件后,需要对该系统进行测试,看它是否能够完成闪电识别的任务。根据测试需要配置了相关测试设备,测试原理框图如图 10 所示。

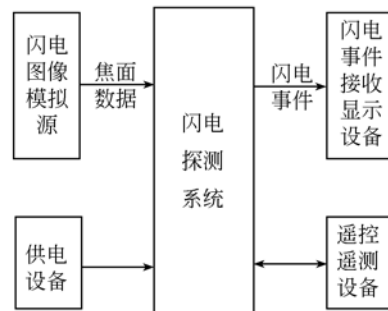


图 10 系统测试原理框图

Fig.10 Principle diagram of system testing

其中闪电图像模拟源用来模拟焦面成像电路拍摄的闪电图像,按照规定的帧格式输出;接收显示设备用来接收编码后的闪电事件,并将接收到的数据存储并显示出来<sup>[10-11]</sup>;供电设备用来给该闪电识别系统供电;遥控遥测设备用来给闪电识别系统发送控制命令和接收其返回的状态信息。

配置了相关设备后,就需要生成模拟的闪电图像,以初步验证该系统的功能和性能。首先利用一个最简单的棋盘格图像,每一个亮点就代表一个闪电事件。采用了 7 帧图像数据,其中 6 帧数据为全 0,1 帧数据为棋盘格数据,如图 11 所示,其每个亮点代表一个闪电事件。将这 7 帧图像数据循环发送到闪电识别系统,就可以识别出闪电事件,在闪电事件接收显示设备上显示出结果如图 12 所示。

在图 12 的左上角和右上角没有闪电事件,是因为受到该卫星数传带宽限制,每帧图像只能传输一定数量的闪电事件,所以在每幅图像的每个区域设置了输出闪电事件的最大数量,当识别的闪电事件大于该数量时,将闪电事件按照闪电强度排序,输出闪电强度大的闪电事件。



图 11 棋盘格数据闪电模拟图像

Fig. 11 Checkerboard lightning simulation images

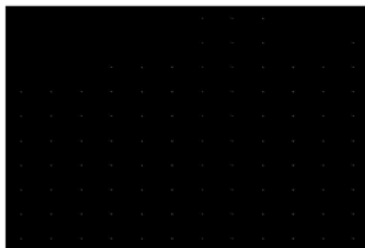


图 12 棋盘格数据闪电识别结果

Fig. 12 Detection results of checkerboard lightning simulation images

图像的上半部分为我国北方地区及北方地区周边国家,该地区闪电发生较少,所以设置的输出

闪电事件的最大数量较少,该图像中该区域的闪电事件大于设置最大数量,所以闪电识别结果中左上角和右上角缺少部分闪电事件。

我国虽然还没有发射过观测闪电信号的卫星,但是美国的 LIS 卫星图像数据有部分是公开的,可以利用该卫星拍摄的真实图像数据来做闪电识别。其拍摄的闪电信号图片如图 13 所示,通过闪电识别设备识别的闪电事件结果如图 14 所示。

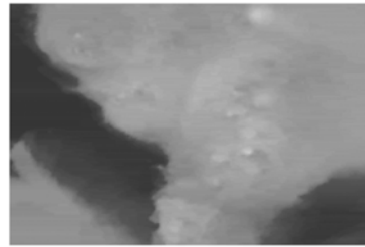


图 13 白天闪电实景图像

Fig. 13 Lightning real images in the daytime

通过实验结果可以看出,该闪电识别系统可以完成该帧-帧背景去除算法,识别出闪电事件。用 7 片 SRAM 完成了别人 14 片 SRAM 的工作。



图 14 白天闪电实景识别结果

Fig. 14 Detection results of lightning real images in the daytime

## 5 结 论

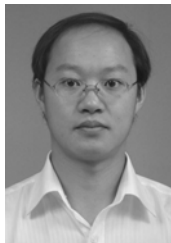
在帧-帧背景去除算法的基础上,设计了一种能够实现闪电探测任务的闪电识别系统。该系统应用多块闪电识别电路来处理一帧高速的图像数据。提出了利用 7 片 SRAM 实现 7 帧背景存储的方法,将一路输入图像数据扩展为依次输入的 7 路数据。完成了该设计硬件制作和软件编写,在相应的测试设备配合下,完成了 2.88 Gbps 高速数据流的接收,背景信号评估和提取,并且实时识别了闪电事件。分别利用自己制作的模拟闪电

图像和美国 LIS 卫星拍摄的实际图像,验证了该系统的可行性。

### 参考文献:

- [1] 韩心志. 静止卫星闪电测绘仪设计特点研究[J]. 红外, 2011, 32(3): 4-9.  
HAN X ZH. Discussion on design features of lightning mapper for geostationary satellite[J]. *I Infra-red*, 2011, 32(3): 4-9. (in Chinese)
- [2] 陈奇. 闪电信号模拟及闪电仪数据处理方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
CHEN D. *Research on lightning simulation and data processing of lightning sensor*[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [3] CHRISTIAN H J, BLAKESLEC R J, GOODMAN S T. The detection of lightning from geostationary orbit [J]. *J Geo Res*, 1989, 94 (D11): 13329-13337.
- [4] CHRISTIAN H J, BLAKESLEC R J, BOCCIPPIO D J, *et al.*. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector [J]. *J Geo Res*, 2003, 108 (D1): 4005.
- [5] CHRISTIAN H J, BLAKESLEC R J, GOODMAN S T. *Lightning Imaging Sensor (LIS) for Earth Observing System*[M]. NASA, 1992:1-36.
- [6] DOUGLAS M M, HUGH J C, RICHARD J B, *et al.*. Performance assessment of the optical transient detector and lightning sensor[J]. *J Geo Res*, 2007, 112(d09210).
- [7] 黄副祥, 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. (in Chinese)
- [8] 陈伟. 闪电成像仪实时事件处理器(RTEP)的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.  
CHEN W. *Design of lightning mapper sensor real-time event processor*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [9] 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 SH L. Design of RTEP with FPGA [J] *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(3): 31-37. (in Chinese)
- [10] 王明富, 杨世洪, 吴钦章. 大面阵 CCD 图像实时显示系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2053-2059.  
WANG M F, YANG S H, WU Q ZH. Design of large-array CCD real-time display system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2053-2059. (in Chinese)
- [11] 郑耿峰, 张柯, 韩双丽, 等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 624-629.  
ZHENG G F, ZHANG K, HAN S L, *et al.*. Design of test system for motion images of space TDICCD cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 624-629. (in Chinese)

### 作者简介:



周 严(1986—),男,湖北随州人,博士研究生,2008 年获得武汉大学学士学位,主要从事卫星高速数据处理、传输方面的研究。E-mail: zhouyanwhu@163.com



田 茂(1957—),男,湖北孝感人,教授,博士生导师,1982 年、1989 年于武汉大学分别获得学士、博士学位,主要从事移动通信、探地雷达方面的研究。E-mail: mtn@whu.edu.cn



张青林(1983—)男,湖北襄樊人,博士后,2005年,2010年于武汉大学分别获得学士、博士学位,主要从事高速图像处理方面的研究。E-mail:zhang\_qinglin83@yahoo.com.cn



陈 曦(1980—),男,湖北宜昌人,副教授,博士,2007年于武汉大学获得博士学位,主要从事人工智能、信号处理、现代电路设计等方面的研究。E-mail:robertcx@whu.edu.cn



熊淑云(1989—),女,湖北咸宁人,硕士研究生,2011年于武汉工程大学获学士学位,主要从事图像处理,信号传输方面的研究。E-mail:shuyunxiong@126.com

#### ● 下期预告

## 大尺寸衍射光学元件扫描离子束刻蚀技术

邱克强,周小为,刘 颖\*,徐向东,刘正坤,盛 斌,洪义麟,付绍军  
(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥 230029)

包括多层介质膜光栅和光束采样光栅在内的大尺寸衍射光学元件是高功率激光系统的关键器件,离子束刻蚀是研制大尺寸衍射光学元件过程中进行图形转移的关键技术。为了满足国内强激光系统对大尺寸衍射光学元件的迫切需求,在自行研制的 KZ-400 离子束刻蚀装置上,发展了组合石墨束阑结构和多位置分步刻蚀策略,以提高离子束刻蚀深度的均匀性,目前在 450 mm 尺寸内的刻蚀深度均匀性最高可达 $\pm 1\%$ 。本文建立了针对多层介质膜光栅的衍射强度一维空间分布在线检测系统,以及用于透射衍射光学元件离子束刻蚀深度的等厚干涉在线检测系统,实现对大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀终点的定量、科学控制,提高了元件离子束刻蚀工艺的成功率。利用上述技术,成功研制出一系列尺寸的多层介质膜光栅和光束采样光栅等大尺寸衍射光学元件。总结了近年来大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀技术的主要研究进展。