

空间雷电探测实时采集定位系统

郭 瑞^{1,2} 刘学斌¹ 汶德胜¹ 程海波¹ 李 涛^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 星载雷电探测定位系统是利用光学探测器探测闪电事件的地理位置和光脉冲波形, 系统采用 CPLD+DSP 的数字图像处理方案, 利用了 CPLD 复杂逻辑可编程特性将系统的部分或全部功能集成在一片 CPLD 上, 减小了系统硬件复杂程度, 节省了印制版空间. 利用 DSP 高速数字信号处理特性完成实时处理图像数据的功能. 系统用 CPLD 完成图像信号的采集、编码和存储控制, 缩小了星载设备体积, 简化了电路结构; 用 DSP 完成大量图像数据处理工作, 提高了系统工作的实时性.

关键词 图像采集; 雷电探测; CPLD; DSP; 实时处理

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A

0 引言

天基雷电探测系统是在地球静止轨道上利用光学探测器探测闪电事件的地理位置和光脉冲波形, 有助于全球气候变化的研究. 目前国外类似的系统有 The Imaging Sensor (LIS), The Optical Transient Detector (OTD), The Lighting Mapper Sensor(LMS)等, 但随着现代技术的高速发展, 人类对空间背景事件的探测, 闪电、雷电等自然现象的监测评估, 要求的准确度越来越高, 实时性越来越强. 因此本文提出研究星载雷电探测背景下的 CPLD+DSP 方案, 有助于提高雷电探测系统的实时性和高速处理能力.

CPLD(Complex Programmable Logic Device)

是一种复杂可编程逻辑器件^[1], 可以代替几十甚至上百块通用 IC 芯片, 将系统的部分或全部功能集成在一片 CPLD 上, 具有设计方便灵活、便于修改的特点, 有利于缩短研制周期, 减小系统硬件复杂程度, 节省印制版空间. DSP(Digit Signal Processor)芯片是一种可编程数字信号处理器, 适用于实时快速数字信号处理场合.

1 系统组成及基本原理

本系统设计的主体思路是在面积有限的嵌入式系统电路板上完成实时数据采集、处理, 以及对大量资料存储的工作. 如图 1, 空间瞬态光信号实时采集定位系统主要为三部分: 预处理模块, 信号处理模块和 DSP 定位快速处理模块.

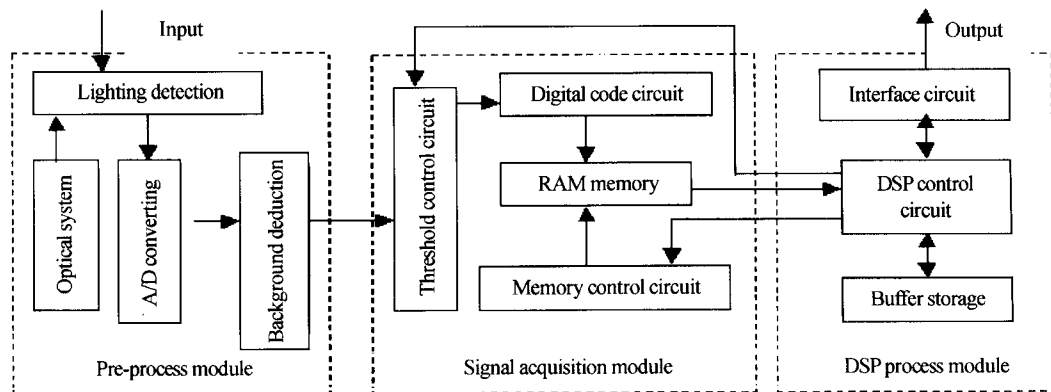


图 1 系统组成原理
Fig. 1 Principle of the system

预处理模块负责空间雷电信号的探测、光学成像以及光电转换、背景扣除等功能; 信号采集存储模块负责门限设定、资料编码及存储控制功能; DSP

定位处理模块控制图像采集模块的工作, 完成图像定位的功能; 并与 PC 机或其它系统传输资料.

器件选择可以根据系统性能指标要求(如表 1)来选择^[2]. 当闪电发生有效载荷响应时间为 2s 到 10s 时, 需要定位系统能够及时快速做出反应, 故应

考虑高速器件;而且由于 CCD 探测器选择的是 1024×1024 面阵 CCD, 数据处理和存储量大, 故需考虑处理和存储容量大的器件;另外, 星载项目要求载荷体积小重量轻, 所以在选择器件时要重点考虑集成度高的器件. 综合考虑各种因素, 选用 Altera 公司的 MAX7000 系列 CPLD 芯片(复杂可编程逻辑器件)EPM7128SLC84 来完成门限控制、数据编码等功能;而大容量存储器选择美国 IDT 公司的高速 $16k \times 16\text{bit}$ 的双口静态 RAM——IDT7026.

表 1 系统性能指标

参量	运行特点
瞬时视场	$\leq 15 \text{ km}$ (星下点)
探测波长范围	$400\text{nm} \sim 1100 \text{ nm}$
面阵像元数	1024×1024
探测效率	$> 90\%$
响应时间	$2 \sim 10\text{s}$
功耗	约 11.7 W
仪器重量	约 9.10 kg

2 预处理模块

2.1 光电探测

在空间环境中对闪电信号影响最大的是太阳光, 目标信号常被淹没在强大的噪音中, 因此需要了解闪电信号的性能以便找到探测方法. 由于闪电信号是一个上升速度快、波长短的脉冲^[3], 而且闪电脉冲能量在很短的时间内达到最高, 如图 2. 所以可以针对空间瞬态光信号特点以光能量上升速率、达到最高点的时间(T_{\max})以及最高点能量值(E_{\max})为空间探测中探测瞬态光信号的判据, 采用面阵 CCD 作为定位系统的探测器.

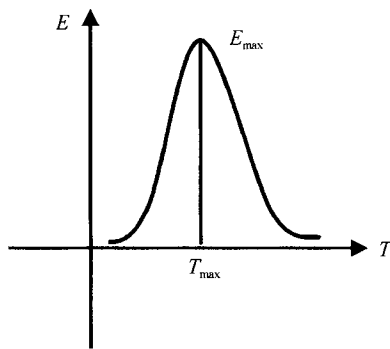


图 2 闪电脉冲能量时间关系

Fig. 2 The relation of energy and time of lightning

2.2 光学系统

对于地球静止轨道上的星载光学系统而言, 光学系统是一个将物缩小率极大的系统, 即使是地面上一个直径 2.0 km 的光源在 CCD 靶面成像光点也只占 $1/3$ 个像元, 因此需要特殊设计的光学系统来辨认目标光源. 本系统采用略有变型的双高斯结

构, 将光阑尽量靠近物方, 使本光学系统成为一个像方准远心系统, 有利于选取离焦像面, 使各视场的弥散元均匀分布, 满足系统要求. 为了改善系统信噪比 SNR, 提高复杂背景下瞬态光信号的探测能力, 在系统前端加入窄带滤光片.

2.3 A/D 转换

CCD 探测器是以一定频率输出模拟图像信号, 需经过 A/D 转换变为数字图像信号以供 CPLD 电路和 DSP 电路处理使用.

2.4 背景扣除

由于闪电信号经光学系统成像后, CCD 探测器的每个像元上检测到的信号是目标信号和太阳光信号的叠加, 而且随着区间和时间的不同叠加的太阳光信号不同. 因此, 为了克服太阳光等背景信号对定位细分准确度的影响引入背景扣除电路^[5,6].

3 信号采集模块

3.1 门限控制电路

经背景扣除的每帧图像信号的有用信息只有几个到几十个. 为了剔除大量无用资料, 需要用门限控制电路将图像数据灰度值与 DSP 电路送来的阈值进行比较;若目标像点的灰度值超过阈值, 才有可能是有用信号, 则产生触发信号驱动数据编码电路工作, 将这些有用资料及其在一帧图像中的行列位置编码记录并存储在共享数据存储单元中;否则数据编码电路不会工作.

3.2 存储控制电路

本系统有效数据从左边管脚存入, DSP 从右边的管脚读出. 为了避免存取出错需要产生双口 RAM 的片选和使能信号, 以确定存取的顺序. 存储控制电路的作用就是用 DSP 的地址信号和读写信号共同译码产生片选信号/CE_L、/CE_R 和使能信号/OE_L、/OE_R 来控制双口 RAM 读写工作.

3.3 数据编码电路

该电路是整个系统的重要部分. 人们对空间光电探测的最终目的是要确定事件发生的空间位置或相对地面的位置, 因此本系统根据所用 CCD 的行频及时钟频率编码记录每个像元资料在一帧图像中的行列位置. 门限控制电路和资料编码电路由可编程逻辑器件来实现相应功能.

3.3.1 编码实现原理

如果使用时钟周期(PCLK)为 50 ns , 行周期(LDV)为 $63.6 \mu\text{s}$, 帧周期(FDV)为 66.78 ms 的 CCD 对图像进行扫描: 一个时钟周期记录一个图像点, 理论上可记录 1024×1024 个像素点, 根据具体情况记录实际有效像素点数为 1008×1018 个点;行

周期结束可记录 1008 个点, 以此作为图像的行坐标; 帧周期结束一次图像扫描结束, 可记录 1018 行.

时钟周期、行周期、帧周期之间的对应关系见图 3.

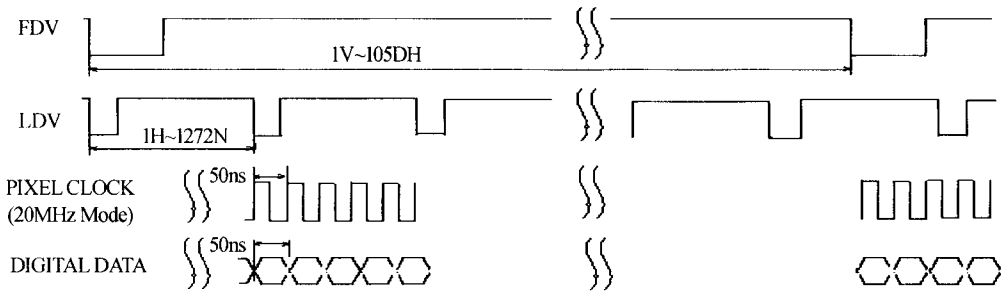


图 3 时钟周期、行周期、帧周期对应关系
Fig. 3 The relations of pixel clock period, line data period and frame data period

- 1N=49.91 ns 当时钟周期为 50 ns
- 1H=1272N 表示行周期
- 1V=1050H 表示帧周期

如图 3, 对 PCLK 计数来记录行坐标, 对 LDV 计数来记录列坐标, 同时在每一帧结束时根据 FDV 的翻转加帧标志位以标志一帧的结束.

3.3.2 CPLD 内部结构

本文采用美国 ALTERA 公司的 MAX7000 系列 CPLD 芯片 EPM7128SLC84, 最高工作频率可达到 175MHz, 可用门 2500, 68 个 I/O 口, 128 个逻辑宏单元, 实现光信号的采集、预处理及其它计数单元.

在光信号采集定位系统中门限控制电路、存储控制电路、数据编码电路都是在 CPLD 中完成的. 使用这种可编程逻辑器件可以先用软件仿真, 同时可以根据设计实验中出现的软件更改, 不需改动硬件电路, 然后将调试好的程序下载到芯片中. 图 4 是 CPLD 内部工作结构图, 本系统中 CPLD 处理的图像信号是由 CCD 送来的, 因此为了保证系统的同步性, 防止亚稳态出现, 用 CCD 的工作频率 20 MHz 作为 CPLD 的工作频率^[6].

DSP 送来阈值信号 (THRESHOLD); 行计数和列计数跟系统采集图像信号同步进行, 因此保证了每个像素点和其坐标一一对应; 以每一帧翻转为依据作帧结束标志 (00 或者 11), 加到输出图像信号的低两位; 图像信号和阈值在比较单元中进行比较, 只有当图像信号的灰度值大于阈值时, 比较单元会产生触发信号, 使地址计数单元开始计数并将地址信号送给 DSP, 这样做保证了 DSP 从内存中取到的数都是有资料.

4 DSP 处理模块

DSP (Digit Signal Processor) 芯片是一种可编程数字信号处理器, 应用于实时快速完成各种数字信号处理的场合, 本文采用美国 TI 公司的 TMS320C3X 系列浮点 DSP 芯片 TMS320C32 作为整个系统的处理器, C32 的地址总线共有 24 位, 可以寻址 16M 的地址空间, 有 32 位数据总线. 本系统选择的工作频率为 50 MHz, 用于完成 CPLD 采集系统的控制和数字元信号处理的功能. DSP 电路是该模块的核心部分, 在系统中主要负责两方面工作: 给信号采集模块送阈值和控制从双口 RAM 中读数据的时序; 计算每帧图像的重心坐标, 完成图像定位.

5 系统验证

实际雷电现象探测包括云对地 (Cloud-to-Ground Lightning), 云与云 (Inter-Cloud Lightning), 云层内部 (Intra-Cloud Lightning) 等各种背景下的探测. 但作为在实验室中的初步验证, 首先需要证明系统采集定位的准确性. 由于复杂雷电现象模拟比较困难, 在实验中将单一缓慢变化的光源安装在坐标板上, 并以坐标板左上角作为坐标限的原点, 光源中心位置为 (100, 76). 对于简单图像其中心和重心可以看作是一点, 因此本实验以图像重心的灰度加权值作为光源的中心位置^[7].

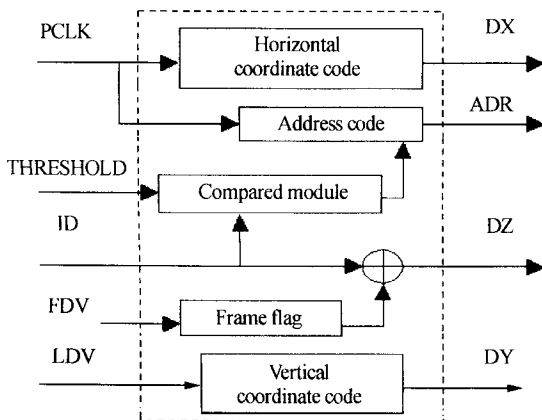


图 4 CPLD 内部工作结构
Fig. 4 Internal working structure of CPLD

系统上电后由 CCD 送来时钟信号 (PCLK)、帧频 (FDV)、行频 (LDV) 信号和图像信号 (ID), 由

图 5(a)显示的是经过门限值滤波后的目标图像,可以看到轮廓清晰,黑白对比明显.在这次试验中所计算得到的目标图像的重心坐标为(101.09, 76.31).由于光线是动态变化的,随着时间不同,采集卡每次采到的图像数据会有不同,其重心坐标随之有轻微的变化,但在短时间内几次对目标图像进行采集得到的数据和重心位置基本不变,验证了系统采集定位工作的准确性.例如图示的目标图像几次采集的结果重心位置都在(100,76)左右变化.

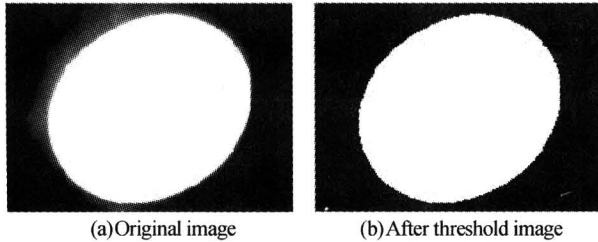


图 5 系统输出图像与原图的比较

Fig. 5 Compared between original image and output image

6 结论

CPLD+DSP 方案的星载雷电探测系统设备重量约有 9.10 公斤,功耗约 11.7 W 满足星载设备对重量功耗的要求,而且存储器容量大和实时处理能力强的特点,使系统性价比达到较高的状态.

参考文献

1 黄正瑾,徐坚,章小丽,等. CPLD 系统设计技术入门与应用. 北京:电子工业出版社,2002

Huang Z J, Xu J, Zhang X L, *et al.* CPLD System Design and Applications. Beijing: Electricity & Industry Press, 2002. 282~323

2 Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, Mach D A, *et al.* The Lightning Imaging Sensor, Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, June 7-11, 1999, pp. 746~749

3 王惠均译. 地球静止轨道闪电探测. 气象科技, 2001, **29** (1):42~48

Wang H J. *Science and Technology of Weather*, 2001, **29** (1):42~48

4 袁慧晶,王涌天. 一种抗干扰的弱小目标检测方法. 光子学报, 2004, **33**(5):609~612

Yuan H J, Wang Y T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33** (5):609~612

5 达选福,张伯珩,边川平. 高速 CCD 图像数据存储技术. 光子学报, 2003, **32**(11):1393~1395

Da X F, Zhang B H, Bian C P. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1393~1395

6 谷林,胡晓东,罗长洲,等. 基于 CPLD 的线阵 CCD 光积分时间的自适应调节. 光子学报, 2002, **31**(12):1533~1537

Gu L, Hu X D, Luo C Z, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12):1533~1537

7 章毓晋. 图像处理和分析. 北京:清华大学出版社,1999. 231~232

Zhang Y J. *Image process and analysis*. Beijing: Qinghua University Press, 1999. 231~232

A Detection and Orientation System of Lighting Signal from Space Thunderbolt

Guo Rui^{1,2}, Liu Xuebin¹, Wen Desheng¹, Cheng Haibo¹, Li Tao^{1,2}

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039

Received date:2005-03-10

Abstract The Lighting Detection and Orientation System is a lighting image sensor to detect the distribution and variability of total lighting. A digital image processor scheme with CPLD+DSP is used in the system, because CPLD is used as a complex programmable logic device and DSP is used as the abbreviation of digit signal processor. Image signal collection, decoder and memory are controlled by CPLD, which can reduce the area of circuit board and make the structure of circuit board easier; and large member of image data in real-time can be managed with DSP because of its high speed digital processor characteristic.

Keywords Image acquisition; Lighting detection; Complex programmable logic device; Digital signal processor; Real-time processor



Guo Rui born in 1976. Being a graduate of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences and majoring in Communication and Information System, she has been doing research jobs in digital image processing.