

文章编号:1007-2780(2013)01-0110-05

红外预警实时图像处理系统设计与实现

李一芒^{1,2}, 何 昕^{1*}, 魏仲慧¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail:liyimangkjd@126.com;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以 Xilinx 公司的 Virtex 5 系列 FPGA 与 TI 公司 TMS320C6455 型高速 DSP 为核心处理器设计多核架构的应用于周扫式红外预警系统的实时图像处理平台。设计过程中,在 FPGA 内部引入多路扫描机制取代传统周扫式红外预警实时图像处理系统所采用的等待机制以改善系统的实时性;处理器间按 SRIO 协议实现高速通信,最终处理结果通过 PCI-e 传输模式发送至主控计算机。实验表明,所设计平台能够满足周扫式红外预警系统实时性要求且在反应时间、虚警率和漏警率方面优于传统实时图像处理平台。

关 键 词:多路扫描; 红外预警; 实时图像处理

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20132801.0110

Design and Implement of Real-time Image Processing System for IR Warning System Based on Multi-Passage

LI Yi-mang^{1,2}, He Xin^{1*}, WEI Zhong-hui¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail:liyimangkjd@126.com;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A platform of real-time image processing is applied to scanning infrared-warning system. The platform is consisted of FPGA in Virtex-5 series of Xilinx and the high-speed DSP TMS320C6455 of TI based multi-core architecture. In order to improve the real-time of the system, a multi-channel scanning mechanism is introduced to the FPGA inner to replace the waiting mechanism adopted in traditional scanning infrared-warning real-time image processing system. The SRIO protocol is applied among the processors to attain high-speed communication, and the processed data is transferred to the master computer by PCI-e mode. Experimental results show that hardware platform design of this system meets the real-time needs and is more developed than the traditional one on delay time, false-warning and miss-warning.

Key words: multi-channel scanning; infrared-warning; real-time image processing

1 引 言

红外预警系统因其良好的抗电子干扰、被动探测目标和全天时工作的能力已经广泛应用于现

代光电对抗等应用中^[1]。周扫式红外预警系统是一种典型的红外预警系统,主要由探测装置、伺服系统、图像处理系统和监视器等部分组成,其中图像处理系统担负着对图像相关信息的处理与提取

收稿日期: 2012-03-16; 修订日期: 2012-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60878052)

作者简介: 李一芒(1986—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事光电测量及数字图像处理方面的研究。

* 通信联系人, E-mail: hexin6627@sohu.com

并向显示终端发送警戒信号的重要任务^[2]。为了能发现敌方目标并即时发送告警信号,图像处理系统必须实时地完成指定处理任务,这就需要处理平台在处理机制、处理算法、数据传输等方面都能够满足实时性要求^[3-5]。

周扫式红外预警系统采用线阵红外探测器,根据不同规格型号,扫描一周一般需要几十秒到两分钟的时间,因此为了能够满足实时性要求,需定义“图像子帧”,即线阵探测器推扫若干列所成图像为一个“子帧”,然而目标可能跨越多幅子帧,虽然通过子帧大小和有效目标的设定可以减少跨越所产生的影响,但目标不可避免地存在被两幅子帧割裂的情况^[6]。传统的解决方法是在发现可疑目标后等待下一子帧到来后进行联合分析与处理。这种方法原理上可以解决目标跨越问题,但等待将产生一定的延时,随着预警应用对实时性要求的不断提升,等待机制已不再适用。

本文采用在 FPGA 内部进行多路处理的方法代替等待机制解决目标跨子帧问题,并采用 SRIO 取代 EMIF 作为处理器间的通信协议,以 PCI-e 取代传统 PCI 主从模式传输处理结果,应用经典的快速检测与识别算法对采集到的数字图像进行处理,实现红外预警实时图像处理系统的功能。

2 多路扫描机制

2.1 图像子帧

线阵红外探测器采集到得图像为“列图像”,不存在面阵红外探测器所捕获的“图像帧”,且“列图像”中包含的信息量存在无规律、不完整的特点,图像处理系统无法从“列图像”中提取有效信息或目标,因此需定义“图像子帧”的概念。所谓图像子帧,是指线阵红外探测器连续采集 n 列后组成的图像,若线阵红外探测器的线列像元数为 m ,则探测器扫描 n 列可采集一幅大小为 $n \times m$ 的图像,由于其视觉效果与大小为 $n \times m$ 的面阵红外探测器所采集的一帧图像相同,且其所成像仅是线阵红外探测器扫描一周所成像中的一部分,因此将其称之为图像子帧。

在设置图像子帧的宽度 n 时应遵循以下几个原则:

- (1) 满足图像处理系统实时性要求。
- (2) 节约系统资源。

(3) 能够尽量完整的包含一个或一组目标信息。

(4) 满足流水线设计要求。

(5) 便于快速处理算法实现。

当 n 越大时,对(3)(4)(5)的符合度越好,而当 n 越小时对(1)(2)的符合度越好。为使所选择的图像子帧能够满足各项原则,需联系目标特征与实际预警要求设置 n 的大小。对空预警系统所要探测的空中威胁主要分为飞机、导弹两大类,飞机目标距观测设备 3 km 时,目标大小一般不超过 100 个像元,导弹目标所成像元数更少。国内外在研或已经服役的红外预警设备的预警距离至少为 10~30 km,因此认为目标大于 10×10 个像元时为假目标或无效真目标,即因威胁距探测设备小于 3 km 而失去预警作用的目标。由于 n 不小于 10 时不会发生目标跨越 3 个或更多子帧的情况且 n 越大则数据缓存时延越大,所以设置 $n=10$ 。红外线阵探测器扫描 10 列所需时间约小于 0.5 ms,预警反应时间要求小于 7 ms,因此在图像流水线处理过程中,最多允许的图像子帧节拍数约为 14,即对于每一个图像子帧的数据处理必须在其接下来的 14 个图像子帧时间范围内完成。综上分析,设置 $n=10$ 在便于处理的情况下尽量减少了资源的耗费,能够满足实时性要求,尽量完整地保存了目标信息,保证了快速处理算法的实现并满足流水线设计要求,

2.2 等待机制

采用划分图像子帧的方法不可避免地存在目标跨越两幅子帧的可能。简单易行的解决办法之一是合并下一子帧后联合分析处理图像。该机制需多等待一个图像子帧的时间,因此称为“等待机制”。采用等待机制时需对如下 3 种情况进行处理:

(1) 在某子帧中发现可疑目标,通过连通性分析确认可疑目标完全处于该子帧中,如图 1 中标识为 1 的目标块,则对目标直接进行提取和识别操作。

(2) 在某子帧中发现可疑目标,通过连通性分析确认可疑目标跨越多子帧,则等待下一子帧联合分析处理,通过连通性分析目标完全处于合并后的图像中,如图 1 中标识为 2 的目标块,则对合并后的图像进行目标提取与识别操作。

(3) 在某子帧中发现可疑目标,通过连通性分

析确认可疑目标跨越多子帧,则等待下一子帧联合分析处理,通过连通性分析确认目标跨越 3 个或更多子帧,如图 1 中标识为 3 的目标块,则放弃对该可疑目标的处理。

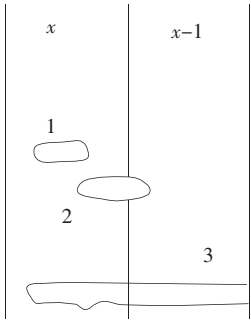


图 1 图像子帧与目标块
Fig. 1 Subimage and target field

随着预警系统实时性要求不断提高,等待机制会影响系统实时性,且等待机制对于某个完整目标只进行一次分析,容易产生漏警。因此提出多路扫描机制以减少等待机制中的时延。

2.3 多路扫描机制

多路扫描机制原理如图 2 所示,FPGA 接收到数字图像数据后将其分成 n 路,其中每新分配一路图像数据前,需向后延时一列周期,每路按照 n 列为一个子帧节拍进行对图像的处理,并且这种处理是连续的,过程中无任何等待。在多路扫描机制下,有效目标一定会第一时间在某个通道的某个子帧内完整出现,并会有多个通道陆续出现包含完整目标信息的图像子帧。

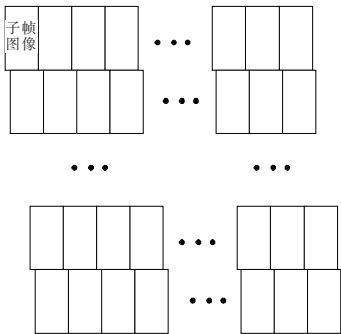


图 2 多路扫描机制示意图
Fig. 2 Multi-core module

每一路检测通道将对每个子帧的检测结果送至各自的识别器中进行识别,识别器能够对 4 类情况进行分析:能够识别出完整的目标;能够识别

出略少几个或几列像元的目标;不能够识别被割裂后缺少大量信息的目标;不能识别出孤立列或孤立点。这样,目标能在第一时间被识别出来且能被多次识别,增强了识别的鲁棒性。因 n 路通道每个都会给出相应的识别结果,因此需要决策器对最后结果进行分析,但若等待 n 路通道分别给一次结果再进行判断,其等待时间与等待机制时延相同,不能体现多路在实时性方面的优势,因此需引入决策器起对各路识别结果按一定策略进行判决。

进行判决时存在多路识别结果相同或不同两种情况,当识别结果不相同时可采取如下策略进行处理:

策略 1:后产生的结果替换先产生的结果,但每个结果都将输出到外部终端。

策略 2: k 路确认法,连续 k 路的检测与识别结果都相同时,再改变上一结果,这种方法的等待时间和 k 的取值有关系,需等待 k 列图像传输需要的时间,这里可以暂定 $k=3$ 。

3 系统设计

3.1 系统硬件设计

系统结构框图如图 3 所示,主要由 FPGA 芯片、DSP 芯片、FLASH 芯片和 SDRAM 芯片构成。

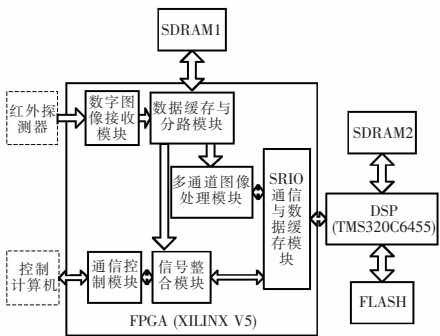


图 3 系统硬件框图
Fig. 3 Hardware structure of the system

在核心器件选择方面,FPGA 选用 Xilinx 公司的 XC5VLX110T 型芯片,最大可达 5 328 Mbit 的 block RAM 为缓存模块提供丰富的存储资源,64 个 DSP48E Slice 支持在 FPGA 内部开辟多个 DSP 核,680 个用户 I/O 使其具有丰富的可扩展性,其对 PCI-e 和 SRIO 通信协议的支持提高了处理器间,处理器与终端间的通信速度。DSP 芯

片采用了 TI 公司高性能定点 DSP 处理器 TMS320C6455。该 DSP 是支持 SRIO 协议的一款高速定点信号处理器,其内部有 8 个并行处理单元,体系结构采用超长指令字结构(VLIW),芯片工作主频可以达到 1.2 GHz,当片内 8 个单元并行运行时其最大处理能力可以达到 9 600 MIPS^[7-8]。

在通信协议方面,处理器间通过 SRIO 协议进行完成通信,处理器与控制计算机间按 PCI Express 协议进行交互,两种协议都采用了基于串化解串(Serdes)的高速串行总线技术。其中 SRIO 是 Serial Rapid I/O 的缩写,已于 2004 年被国际标准化组织(ISO)和国际电工协会(IEC)批准为 ISO/IECDIS 18372 标准,是一种高性能,低引脚数,基于报文交换的互连体系结构。SRIO 协议包含定义电气特性、链路控制和低级错误管理的物理层,定义路由与寻址机制的传输层,定义总体协议和包格式的逻辑层。根据 SRIO 协议,其单路传输速率理论最高可达 3.125 Gbit/s,而实际应用中一般不低于 2 Gbit/s。PCI Express 协议简称 PCI-e,是由英特尔公司特出的适合板卡与计算机间交互的高速通信协议,在 2.0 版本 16X 模式下最高可达到 80 Gbit/s 的传输速率,即使在通道数最少的 1X 模式下依然有 4 Gbit/s 的通信速率。

3.2 系统工作流程

系统工作流程如图 4 所示:在执行预警工作前,首先使用红外探测器推扫一周将背景图像存入 SDRAM1 中,在预警工作开始后,数字图像接收模块将接收到的图像送入数据缓存与分路模块,缓存与分路模块首先将数据复制为两份,其中一份送入信号整合模块以备原始图像显示,另一份按 2.3 节所述多路扫描机制原理将图像送入多通道图像处理模块。在图像处理模块内开辟 n 个 DSP 核,每路通道通过 FPGA 内部的并行运算和 DSP 核的运算对子帧图像进行预处理,目标提取和目标识别操作,采用 FPGA 内部 DSP 核作为处理过程的核心运算单元同使用多 DSP 架构相比能够缩小平台体积,减少功耗,提高资源利用率,同时避免了多 DSP 间因通信产生的协议与策略问题。为了便于验证第 2.3 中所提多路扫描机制的有效性和实时性,采用快速中值滤波法作为图像预处理算法以平滑噪声,采用全局阈值分割算

法提取目标,在连通性分析后采用几何特征判别法对目标进行识别。处理结果通过 SRIO 高速通信协议传至作为决策器的 DSP 芯片中。DSP 将最终处理结果回传至 FPGA 内部的信号整合模块中。信号整合模块将原始图像和处理结果合并后通过 PCI-e 协议传输到控制计算机中。

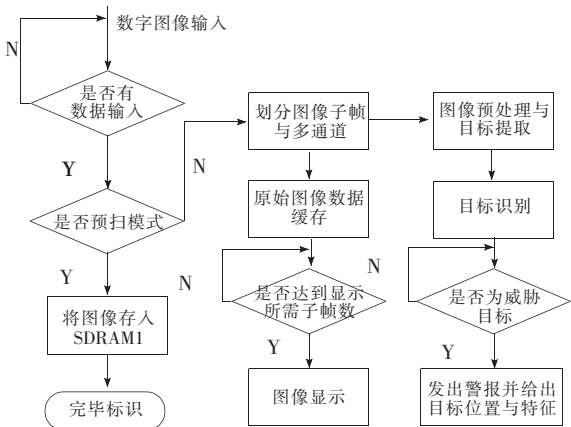


图 4 系统工作流程图

Fig. 4 Flow chart of system

4 实验验证

本实验首先搭建一套完整的红外预警系统,选用 XEVA-LIN 系列 XenICs 型短波红外线阵列相机配以支撑机构作为图像捕获系统如图 5 所示,定制 V3IMG 型信号处理平台作为实时图像处理系统如图 6 所示,使用配置为 Intel(R)Xeon(R) CPU 5110 @ 1.60 GHz 1.60 GHz,2.00 GB 内存并安装有 VC6.0 的 PC 机作为控制计算机。其次选取合适的实验场景,以某距民用机场约 10 km 的高楼天台作为实验场地,以民航飞机模拟空中威胁目标。

在控制计算机端使用 VC6.0 软件编写软件



图 5 图像采集装置

Fig. 5 Device for image grabbing

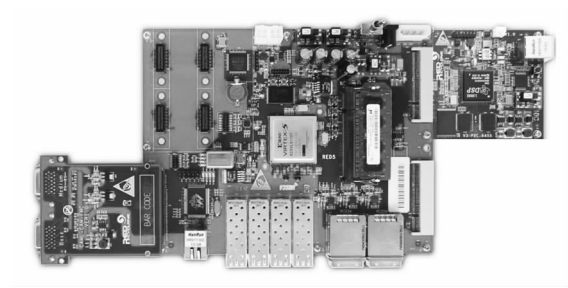


图 6 V3IMG 实时信号处理平台

Fig. 6 V3IMG real-time signal processing platform

用以显示原始图像,处理后图像,目标特征参数及警报信息。图 7 为预警系统发现某目标后的软件界面截图,为便于显示和观察,控制计算机将每等待 16 个子帧图像后合并显示,但告警状态与目标几何特征则按子帧频率进行实时更新,图中白色线条是因线阵探测器某像元问题产生的噪声,在连通性分析时,通过对高亮线条的排除可以避免噪声对目标的干扰。

在不改变图像处理算法的情况下,分别采用等待机制和多路扫描机制在实验场景内进行 10 h

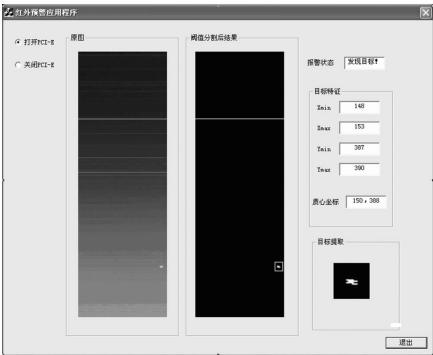


图 7 原始图像与处理结果

Fig. 7 Original image and results by processed

参 考 文 献:

[1] 郭志军,何昕,魏仲慧. 推动式实时图像目标识别处理系统的设计 [J]. 光电工程,2011,38(1): 15-22.
[2] 靳永亮,王延杰,刘艳滢,等. 红外弱小目标的分割预检测 [J]. 光学精密工程,2012,20(1):171-178.
[3] 陈伦海,黄君凯,杨帆. 基于 FPGA 的实时边缘检测系统 [J]. 液晶与显示, 2011,26(2) :200-204.
[4] 阎世梁. 基于 FPGA 和双 DSP 的实时图像处理器设计 [J]. 微计算机信息,2008,24(4) :207-208.
[5] 朱耘,红外警戒系统综述 [J]. 舰船科学技术,2001,(1):43-47.
[6] 赵庆岚,宋卫东,支建庄,等. 基于线阵 CCD 的弹丸图像处理 [J]. 军械工程学院学报,2004,16(5):22-25.
[7] 韩非,胡春海,李伟. TMS320C6000 系列 DSP 开发应用技巧 [M]. 北京:中国电力出版社,2008:1-10.
[8] 郭志军. 周扫式光电预警实时图像处理系统的研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院,2011:3-27.

表 1 两种处理机制结果比较

Table 1 Comparison result of the two ways

处理机制	等待	多路扫描
预警反应时间/ms	1.2	0.5
处理器资源消耗/%	23	76
虚警率	10%	5%
漏警率	7%	2%

实验,得到比较结果如表 1 所示。结果表明采用多路等待机制同等待机制相比能够获得更短的预警反应时间,在处理器资源消耗方面,虽然多路扫描的处理通道数是等待机制的 n 倍,但由于避免了合并子帧,连通性分析,目标确认与排除等因等待机制产生的操作,因此实际资源消耗小于等待机制下资源消耗的 n 倍。在虚警率和漏警率指标方面,由于多路机制下对同一区域内的场景多次处理,多次确认,因此比等待机制下的虚警率和漏警率低。

5 结 论

设计并实现了基于多路扫描机制的应用于周扫式红外预警系统的实时图像处理平台,通过对列图像时序方面的控制将数据以多路形式进行处理,取代传统周扫式红外预警系统中的等待机制。用合理的资源消耗换取了处理数据所用时间和等待时延的降低,并通过多次检测与识别降低了预警系统的虚警率和漏警率,所设计实时图像处理系统与支撑结构的位置与角度变化无关,因此可适用于动态条件(如车载,舰载),目前该处理平台已成功应用于某周扫式红外预警系统中。