

非制冷红外成像数字组件的关键设计

姜滨

(华中光电技术研究所,湖北武汉 430073)

摘要:近几年随着热成像技术的快速发展,实用化、低成本、高可靠的非制冷焦平面阵列红外探测器应用研发已成为热成像领域最令人关注的焦点之一,并有大量应用产品问世。本文以法国 SOFRADIR 公司 8~12 μm 非制冷焦平面探测器 IDML073-XX-V3 为原型,采用 DSP、FPGA、探测器的数字驱动和控制等大量新技术实现了红外实时成像。论述了非制冷焦平面探测器技术指标、控制信号以及成像总体技术和实现方法,并重点说明了 DSP 和 FPGA 数字信号处理电路的功能和设计方法,以及探测器数字温控原理。该组件结构紧凑、成像清晰、性能稳定,并能满足工业级的使用要求。

关键词:非制冷焦平面阵; 非均匀校正; DSP; FPGA

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)05-0573-04

Key design of uncooled infrared imaging digital module

JIANG Bin

(Huazhong Institute of Electro-optics,Wuhan 430073,China)

Abstract: Recently, with the development of thermal imaging technologies, the research and application of low-cost, high performance uncooled focal-plane-array infrared detectors have been attracted much attention in the field of thermal imaging. Based on the model of an 8~12 μm uncooled focal-plane-array infrared detector IDML073-XX-V3 made by SOFRADIR, a French company, an infrared real-time imaging is performed, in which several key technologies have been used, such as DSP, FPGA, digital control and servo for detectors. The specification, control signals, imaging technology and implementing technique of the uncooled focal-plane-array infrared detectors are discussed, and the function and design means of DSP-FPGA digital signal processing circuit and the principle of digital temperature control detector are expounded. This module has compacted structure, image definition and performance stable, and can meet the requirement of industrial level.

Key words: Uncooled focal plane array; Non-uniformity correction; Digital signal processing; Field programmable gate array

收稿日期:2005-01-17; 修订日期:2005-04-14

作者简介:姜滨(1967-),湖北武汉人,高级工程师,研究方向为计算机控制和信号处理。

0 引言

红外热像仪最早主要应用于军事领域,多为制冷型热像仪,由于附加的制冷系统使其成本高昂、体积庞大,阻碍了该热像仪在其他领域的拓展。随着半导体技术、红外光学和计算机技术等相关技术的发展,20世纪90年代非制冷红外焦平面(UFPA)技术的突破和实用化,实现了由光机扫描成像向电信号处理成像的革命性转变^[1]。这种技术的迅速发展使长期依赖于低温(如77 K或更低温度)工作的红外热成像系统摆脱了昂贵而复杂的制冷装置,实现了小型简单的便携式热成像应用,而且廉价、可靠、性能适中,其良好的市场前景引起了国内众多专业研究机构、大学,甚至一些民营企业的高度重视。

本系统以法国 SOFRADIR 公司 8~12 μm 非制冷焦平面探测器 IDML073-XX-V3 为核心,开发和研制了具有自主知识产权的成像机芯组件系统采用了最新的 DSP 器件、高密度 FPGA 器件、非制冷红外探测器的数字驱动和控制技术、低噪高效的开关电源技术、高速高密度电路设计技术等大量关键技术,并掌握了非制冷焦平面探测器的一些关键性能、技术指标和处理方法。

1 SOFRADIR 公司 UFPA 性能指标^[2,3]

法国 SOFRADIR 公司型号为 IDML073-XX-V3 的非制冷红外焦平面探测器主要包括一个 320×240 个非晶硅材料的二维像元组成的微测辐射热计焦平面、读出电路 ROIC、热电稳定器。像注入因子大于 80%,平均热响应常数大于 4 mV/K (@300 K);典型 NETD 小于 120 mK;热电阻系数(TCR)为 2.5 %/K;该器件使用 CMOS 工艺,响应 8~12 μm 的红外波段。具有体积小、质量轻、可靠性高、功耗低的特点。为了使气体传导的热损耗最小,探测器采用真空封装。推荐的探测器内部温度应控制在 30 $^{\circ}\text{C}$,控制的稳定度必须优于 10 mK,只有这样才能保证探测器输出信号的质量。探测器主要输入输出信号如下:

(1) 驱动信号

驱动探测器工作的主要输入信号包括主时钟信

号(MC)、积分脉冲(INT)和复位脉冲(RESET)。

(2) 偏置电压

要保证探测器能正常工作,必须提供 5 路主要的偏置电压(三路固定电压、两路可调电压)。通过改变其中的 FID 和 VEBASAGE 可以调节探测器探测的目标温度范围,以适应不同的应用环境。

(3) 输出信号

探测器产生的输出信号包括: SORTIE 模拟信号、DATAVAILD、LIGNE1 时序信号。

2 系统总体设计^[4]

目前非制冷红外热像仪成像电路组成结构主要有三种方式:单片机+FPGA、数字信号处理器(DSP)+FPGA 和定制 ASIC 芯片。从提高成像组件的稳定性、可靠性、温度适应性出发,兼顾系统的柔性(为今后功能扩展或不断出现的新算法的应用留有余地),DSP+FPGA 作为系统架构的方案更具优势。采用这种设计结构,可充分利用 DSP 的高速处理能力,对非均匀校正算法不断改进和提高,同时 DSP 较高的外设集成度在小型化上也是一种设计优势。系统总体设计如图 1 所示。

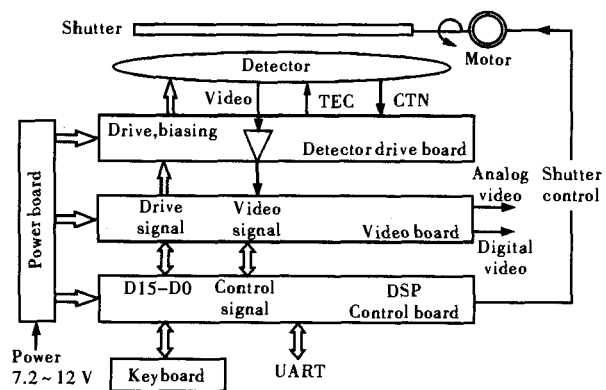


图 1 成像组件总体框图

Fig.1. Module principle diagram

虽然 TI 公司低功耗 C54×系列 DSP 运算速度较快,但根据计算即使 DSP 满频工作(160 MHz,指令周期 6.25 ns)也来不及对一帧原始图像进行实时校正。对于 PAL 制式标准视频,一场图像消隐时间为 20 ms - 240×0.064 ms=4.64 ms,而按系统最快的速度处理一帧原始图像(一次乘、加运算),计算时间包括:

(1) 运算时间至少 6 个指令周期, 累计 $320 \times 240 \times 6.25 \times 6 = 2.88 \times 10^6$ ns

(2) 数据读时间包括存储器读时间至少 10 ns 和一个读指令周期, 累计 $320 \times 240 \times (10 + 6.25 \text{ ns}) = 1.248 \times 10^6$ ns

(3) 数据写时间累计 $320 \times 240 \times (10 + 6.25 \text{ ns}) = 1.248 \times 10^6$ ns

(4) 以上三项时间合计为 5.376 ms, 显然在场消隐期间不够实时处理一帧图像。

另外一种方法是按点实时处理。假设探测器主时钟为 5 MHz, 那么每个像元就有 200 ns 间隔的处理时间。这个时间内足够 DSP 通过 A/D 转换逐点采样并完成一次乘、加运算, 但一帧图像数据为 75 K, 校正系数为 $75 \text{ K} \times 2$, 显然不可能全部保存在片内, 如果考虑到为进行一次乘、加运算的数据准备(包括读写外部存储器和数据格式转换)的时间开销, 200 ns 的时间就不能绝对保证完成一次实时处理。如果希望 DSP 满频工作, 而且外部总线也超过 100 MHz, 就必须在电路设计时按照高频电路的设计原则进行, 这无疑将增加设计难度、成本、风险以及研发周期。

所以经过综合考虑, DSP 处理器在整个系统中只用于完成非实时任务, 如非均匀校正系数计算、键盘管理、快门控制、数据存储等。以 FPGA 为核心的视频处理板则完成数据采集、实时非均匀校正、图像后端实时处理、视频合成等工作。DSP 控制板和视频处理板之间通过 FPGA 片内 FIFO 交换数据。

3 DSP 控制板设计^[5-7]

在比较硬件资源、速度、功耗后, 从 TI 公司 TMS 30VC54X 系列十几种型号中选择了一款高速、低功耗的 16 位定点 DSP 芯片 TMS30VC5416-160 (工作温度 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +100 \text{ }^\circ\text{C}$, 主频 160 MHz) 作为主控制器。

DSP+CPLD+Flash ROM 的配置是 DSP 应用系统设计的首选, 该板原理框图如图 2 所示。除了一般的数字逻辑设计外, 还必须解决非均匀校正、程序在线固化等关键问题。

目前, 红外图像非均匀校正方法有很多, 包括单点校正、两点校正、多点校正、高通滤波器法、自适应校正、神经网络法等, 但真正实用的方法还是单点校

正和两点校正, 其最大优势为实时性强和校正参数少, 节省硬件资源, 并且校正效果能满足大部分应用场合的需要^[8,9]。DSP 控制板的主要计算功能是完成单点校正和两点校正计算, 两点校正用于计算每个像元的增益, 并保存到 Flash Rom 中, 每次系统上电后, 增益数据将传送到视频板的系数存储器。单点校正用于实时计算像元偏置, 并将计算结果传送到视频板。两点校正增益计算在产品出厂前完成, 该功能一般不提供给最终用户使用。单点校正可由用户根据场景和图像噪声的情况随时使用。

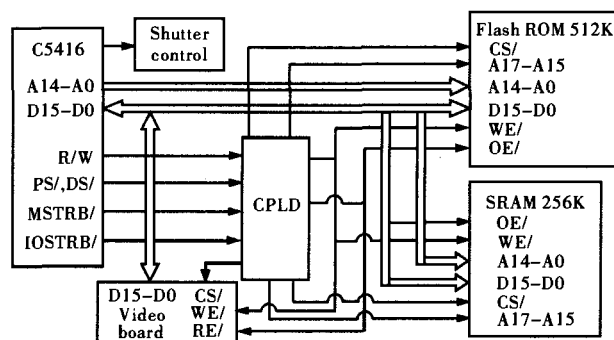


图 2 DSP 控制板原理框图

Fig.2 DSP board principle diagram

DSP 程序在线固化的基本方法是: 编写一段烧写程序, 通过仿真器将其和目标代码分两次加载到目标板上, 然后运行烧写程序将目标代码以 DSP 要求的格式写入 FLASH ROM 的特定区域。需要注意的是烧写程序和目标代码在物理空间上不能重叠。烧写程序的主要功能是完成并行加载参数块的写入和从 DSP 数据区读取目标代码并写入。

为充分利用 256 K 的 SRAM 数据空间, 将它分成 8 页, 32 K/页, 由 I/O 空间产生 SRAM 的高位地址 A17-A15, 实现对 256 K 的 SRAM 空间全部寻址。对于 512 K 的 Flash Rom 也进行了类似分页处理。

4 FPGA 视频板设计

以 FPGA 为控制核心的视频处理板, 主要完成原始图像的实时处理(即非均匀校正、图像后处理)和标准视频合成输出, 控制帧存储器、校正系数存储器、ADC、DAC 等外设, 原理框图如图 3 所示。FPGA 需产生的控制时序信号主要分为: 探测器正常工作所需的

驱动时序信号;系数存储器和帧存储器的各种控制信号;ADC 数据采集的控制信号;视频合成及 DAC 的控制信号。

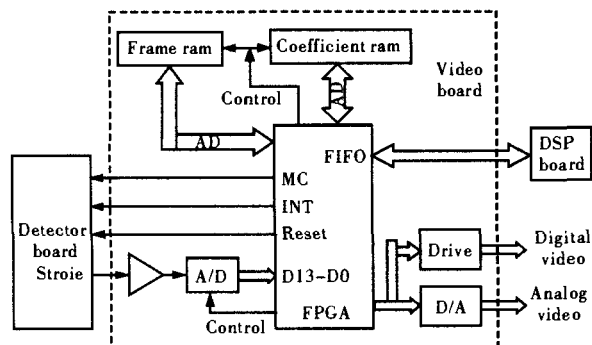


图 3 视频处理板原理框图

Fig.3 Video board principle diagram

所有的时序信号和各种控制信号都以一个外部 25 MHz 的时钟源为基础,通过在 FPGA 内部进行适当的倍频或分频产生。其中探测器的驱动时序信号包括主时钟、积分信号和复位信号,三者之间的逻辑和相位关系以及频率的稳定性和信号的上升下降沿时间必须严格满足探测器技术参数的要求,否则影响探测器输出原始模拟信号的质量,进而增加后端信号处理的难度。探测器主时钟频率为 5 MHz,积分信号的周期为 70 μ s,信号脉宽根据探测器探测目标及背景温度的高低来调节。系数存储器和帧存储器的控制信号包括片选、读写控制信号等,这几路信号与主时钟同频但相位关系由数据采集控制部分的时序状态机来调节。ADC 转换器件采用的是流水线结构,第一个有效数据的输出有一个时间上的滞后,数据采集必须在转换时钟的第 4 拍开始。视频合成的控制信号包括复合同步信号和场消隐,按照 PAL 制式电视信号的国家标准来产生像素时钟、行同步、行消隐、行均衡、场同步及开槽脉冲等时序信号,然后再合成复合同步去控制全电视信号的合成。DAC 的控制信号是一个与像素时钟同频的转换时钟,频率为 6.25 MHz。上述所有时序信号必须在同源时钟的基础上保持严格的同步关系。

5 探测器数字温控设计^[10]

保证两点校正后成像质量的前提是保持微测辐

射计基底温度的高度稳定性,其波动必须控制在 0.01 K 以内。探测器内置一个小型低功耗的热电稳定器(又称热电制冷器)和一个金属铂温度传感器,用于控制和测量探测器焦平面温度。

要求探测器的内部微测辐射计基底温度的高度稳定性主要原因是微测辐射计本身的非均匀性和微测辐射计探元电阻对温度的非线性响应。探元可能变化的物理特性包括:电阻、支撑结构的热导、电阻温度系数(TCR)、热容量和辐射率等。在探测器读处理期间探元产生自热现象,并逐渐加热到一个恒定温度附近。对于一个使用固定偏置的读过程,探元的电阻、热容量和 TCR 的变化将使自热温度发生偏差,并且焦平面上每个探元的偏差会不一致。同时,探元在读处理完成后,该点偏置便不存在,而探元支撑脚的热导和热辐射效应将使该探元在帧读期间温度下降。所以探元不断交替的升温降温过程将引起其最终工作温度的变化。探测器内部 UFPA 典型工作温度为 30 ± 0.01 $^{\circ}$ C。如果以 30 $^{\circ}$ C 为温度控制参考点,当温度增加 0.01 $^{\circ}$ C 时,经过推算此时 CTN 的阻值近似为 3.8778 k Ω ,在流过 CTN 的电流为 100 μ A 时,CTN 输出电压的变化为 0.13 mV,那么使用参考电压为 2.5 V 的 16 位的 ADC 可以保证采样精度。所以系统选用了内置 16 位 Sigma-Delta 型 ADC 和 DAC 的单片机,配合低噪声精密运放,采用经典 PID 控制算法,控制精度达到 0.1 mV,实现了高精度闭环数字温控,并取得了很好的控制效果。

6 结束语

该型红外成像组件体积小、结构紧凑,热像显示清晰、稳定,成像效果如图 4 所示。在环境温度变化不



图 4 红外图像

Fig.4 Infrared image

(下转第 586 页)

参考文献:

- [1] WEN De-yi. The NMD system of USA and analysis of operation style of the NMD system[J]. 863 Advanced Defence Technology Communication (温德义. 美国国家导弹防御系统及其作战方式分析. 863 先进防御技术通讯), 2001, (1): 7-8.
- [2] Itakura Y, Tsutsumi S, Pfaltz J L, et al. Statistical properties of the background noise for the atmosphere windows in the intermediate infrared region[J]. Infrared Physics, 1974, 14(1): 17-23.
- [3] YANG Hua. Study on infrared stealth of the ballistic missile in midcourse[D]. Hefei: Electronic Engineering Institute (杨华. 弹道导弹中段红外隐身研究. 合肥: 电子工程学院), 2002.
- [4] LIU Jing-sheng. Infrared Physics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press (刘景生. 红外物理. 北京: 兵器工业出版社), 1985.
- [5] WANG Mo-ran. MATLAB and Scientific Calculations [M]. Beijing: Electronic Industry Press (王沫然. MATLAB 与科学计算. 北京: 电子工业出版社), 2002.
- [6] WANG Hui-pin, XU Hui, SUN Zhong-kang. Theoretical calculation of IR radiation characteristics of ballistic target out of atmosphere[J]. Systems Engineering and Electronics (王慧频, 徐辉, 孙仲康. 大气层外弹道式目标的红外辐射特性的理论计算方法. 系统工程与电子技术), 1998, 20(3): 1-6.
- [7] Mathews J H; CHEN Yu, ZHOU Lu, QIAN Fang, et al. Numerical Method [M]. Beijing: Electronic Industry Press (Mathews J H; 陈渝, 周璐, 钱方, 等. 数值方法. 北京: 电子工业出版社), 2002.
- [8] YANG Wei, ZHANG Jian-qi, LIU Jin-song. Theoretical calculations of infrared radiation of the projectile in flight [J]. Infrared and Laser Engineering (杨威, 张建奇, 刘劲松. 飞行弹丸红外辐射特性的理论计算. 红外与激光工程), 2005, 34(1): 42-45.

(上接第 576 页)

大的情况下, 工作 2~3 h 不用进行单点校正; 高温 (55 ℃)、低温 (-30 ℃) 情况下全部电路板工作正常, 能保证系统稳定成像。

参考文献:

- [1] SUN Zhi-jun. Infrared focal-plane technology in twenty years[J]. Sensor World (孙志君. 红外焦平面阵列技术的未来二十年. 传感器世界), 2002, 8(11): 1-8.
- [2] SOFRADIR CO. LTD. 320×240 LWIR Uncooled Microbolometer Detector Technical Specification[Z]. France: SOFRADIR CO. LTD Data sheet, 2000.
- [3] Mottin E, Bain A. Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μm pixel pitch achievement [A]. Infrared Technology and Applications XXVIII, SPIE[C]. 2002, 4820.
- [4] DAI Ming-zhen, ZHOU Jian-jiang. TMS320C54x DSP Framework, Principle and Applications [M]. Beijing: Aviation Spaceflight Publishing House (戴明桢, 周建江. TMS320C54x DSP 结构、原理和应用. 北京: 航空航天大学出版社), 2001. 30-200.
- [5] WANG Yong, ZHAO Bao-Jun. Design of full-digital thermal imager PEU based on DSP and FPGA [J]. Laser and Infrared (王勇, 赵保军. 基于 DSP 和 FPGA 的热像仪电子处理单元全数字化设计. 激光与红外), 2002, 32(2): 100-103.
- [6] LI Wu-sen, CHI Ze-ying, CHEN Wen-jian. An initial designing of real-time video image processor with TMS320C6X [J]. Infrared Technology (李武森, 迟泽英, 陈文建. TMS320C6X 为核心的实时视频图像处理器的初步设计. 红外技术), 2001, 23(3): 13-15.
- [7] ZHANG Xiong-wei, CAO Tie-yong. The Principle and Application of DSP [M]. Beijing: Electron Publishing House (张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用. 北京: 电子工业出版社), 2000. 93-135.
- [8] HU Xiao-mei. Study on IRFPA nonuniformity and its correction [J]. Infrared and Laser Engineering (胡晓梅. 红外焦平面探测器的非均匀性与校准方法研究. 红外与激光工程), 1999, 28(3): 9-12.
- [9] WU Jun-hui, WANG Tao. Nonuniformity correction and emulator of infrared imaging [J]. Infrared Technology (吴军辉, 王涛. 红外图像的非均匀性及仿真. 红外技术), 2003, 25(5): 26-29.
- [10] Parrish W J, Woolawa J T. Improvements in uncooled systems using bias equalization [EB/OL]. Indigo Systems Corporation. <http://www.indigo.com>, 1999-08.