

576 × 6 长波红外探测器成像系统设计

安永泉^{1,2}, 禹 健³

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083; 2. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
3. 中北大学电子与计算机科学与技术学院, 山西 太原 030051)

摘 要:设计了一个应用于线阵扫描型长波红外焦平面阵列的实时成像系统。系统中的适配电路为探测器提供工作环境,并对图像信号进行缓冲和电平变换。模拟视频信号的采集使用了高精度流水线 ADC。数字信号处理电路实现了非均匀性校正,图像数据排序,坏像元补偿,直方图均衡和视频信号输出控制。结果表明该设计方法合理可行。

关键词:红外焦平面阵列;热成像;高速 ADC;视频信号处理

中图分类号:TP274

文献标识码:B

Infrared Imaging System Design for 576 × 6 Linear Detector

AN Yong-quan^{1,2}, YU Jian³

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;
2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. School of Electronics and Computer Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The implementation of a high resolution infrared imaging system is introduced. An adapter is designed to provide a working environment needed by the detector and perform the functions of signal level shifting. The analog image signal is converted to digital data by high precision pipeline ADC. The digital system provides such features as two-point nonuniformity correction, image data re-ordering, bad-pixel compensation, histogram equalization, and digital scan conversion for video signal output. The design methodology and the performance are presented.

Key words: infrared focal plane array; thermal imaging; high speed ADC; video processing

1 引 言

大视场、高分辨率的长波红外影像系统在军事侦察、导航与制导以及工业和医疗等多方面有着广泛的需求^[1]。线阵扫描型前视红外焦平面器件是实现高性能,低成本红外影像系统较有前途的器件^[2]。HgCdTe 光电二极管(MCT PVD)长波红外焦平面阵列(IRFPA)是应用与 8 ~ 14 μm 大气窗口红外成像探测的最重要的器件之一^[3]。MCT PVD IRFPA 是由采用不同的工艺分别制造的读出电路与探测阵列,通过钢柱互联或环孔互联等工艺形成的混合体^[4]。576 × 6 线阵扫描型长波红外焦平面阵列是实现高分辨红外影像的关键器件。该器件采用 8 通道模拟信号输出,信号动态范围不小于 77 dB,最

高输出速率 5 MHz^[5]。

本文介绍了一个采用 576 × 6 线阵扫描探测器的红外成像系统。采用 FPGA 实现了从图像数据采集到视频信号输出的显示成像数据链中所有时序控制及运算处理功能。系统输出图像为 576 × 768 像素,速度为 50f/s,时延不超过 2f,完全满足实时目标跟踪要求。

本文首先简要地介绍了系统总体结构和系统运行的主要流程。接下来详细讨论了模拟电路设计技术,ADC 选用和实时图像信号处理设计技术。

作者简介:安永泉(1976 -),女,讲师,博士研究生,研究方向为光电探测。

收稿日期:2008-08-25

2 系统总体结构

采集系统总体结构如图1所示。系统由适配电路、8通道高速流水线ADC、数字信号处理电路(FPGA及SRAM)和视频编码电路四部分。

适配电路的作用主要是为探测器提供一个应有的工作环境和接收探测器输出的模拟图像信号,进行相应的电平变换后输出至后续的ADC采样电路。探测器要正常工作,需要为其提供模拟部分和数字部分工作所需的电源,多个直流偏置信号和时序及状态指令控制信号。时序及状态指令控制信号由FPGA生成,适配电路完成逻辑电平的转换,以满足探测器的需求。

IRFPA输出的8路模拟信号经电平变换后由8片16比特高速流水线型ADC转换为数字信号送入由FPGA片内RAM构成的FIFO中。经由FIFO的缓冲,后续的逻辑处理电路与探测器与ADC的控制时序相对独立。

多路选择器(MUX)依次从8路FIFO中取出数据,送往非均匀性校正电路(NUC)。NUC处理后的数据写入FPGA片外的异步静态RAM中。按照特定的顺序从FPGA片外RAM中将数据读出完成1帧图像数据的排序,并将数据写入下一级缓冲RAM中。

坏像元补偿处理过程为首先将FPGA片外RAM中的图像数据每次将1列576个数据读出,然后使用坏像元相邻像元数据计算得到,最后将补偿结果写入FPGA片外RAM中。

直方图均衡处理单元读出经补偿后的图像数据完成直方图统计,及生成灰度映射表。在输出视频数据流的同时完成灰度映射。外部视频编码电路接收经直方图均衡处理的数据并生成视频信号输出。

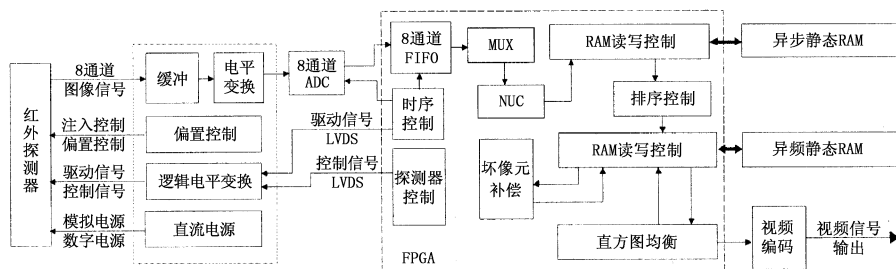


图1 系统总体结构框图

3 适配电路设计

适配电路包括模拟图像信号缓冲和电平变换模块,偏置控制模块,逻辑电平变换模块和直流电源模块。其中图像信号缓冲和电平变换模块和偏置控制

中的注入控制电路有其特殊性。在此仅对此两部分详细介绍。

3.1 模拟图像信号处理电路设计

MCT长波红外探测器工作在77K的液氮温区。降低探测器功耗是系统设计的一个关键任务。探测器输出信号是在主时钟驱动下,内部多路转换器轮流选择各行经过TDI处理得到的信号,再经由输出放大送给探测器外电路。尽量提高读出电路输出放大器的负载阻抗将有利于降低探测器的功耗。因此,使用同相放大器来为探测器提供一个高阻抗的负载。同时,同相缓冲放大器放置应尽量靠近探测器输出端,以减小布线中的寄生电容。

高速ADC输入信号接口都采用差分形式。因此,图像信号适配电路需要一级单端信号转差分信号的电平变换电路。图像信号适配电路如图2所示。图中U2为全差分运算放大器。

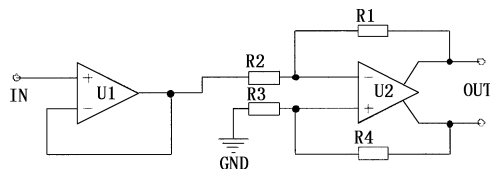


图2 图像信号适配电路原理图

3.2 注入控制电路设计

探测器正常工作,需要为其提供多个直流电压偏置信号。其中最关键的是注入控制信号。图3给出了探测器中读出电路的输入级电路原理图。此电路成为直接注入^[6]电路。其中 R_0 为注入控制点。通过改变施加在 R_0 端的电压将可以调节红外敏感二极管的偏置电压。

普遍认为HgCdTe光电二极管输出电流中的 $1/f$ 噪声与暗电流成比例^[7-8]。Y. K. Su及F. F. Sizov

等人的研究结论表明,长波红外(LWIR)HgCdTe光电二极管的最佳偏置区域非常小^[9-10]。因此,偏置电压在不同的辐射场景,及整个电荷收集过程中要保持不变,从而提高探测器响应的线性度。

注入控制信号电压等于光电二极管的反向偏置电压加注入控制管的阈值电压。光电二极管的最佳反向偏置电压大约为0.05V。光电二极管的暗电流在纳安量级。注入控制管工作在亚阈值区域,阈值电压大约

为 0.5V。因此,注入控制电压设计为 0.4V 到 2V 可调。

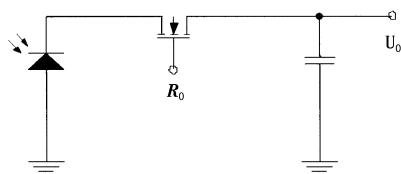


图3 直接注入输入级原理图

注入控制电路由基准电源,分压电路和输出放大器组成,如图4所示。其设计的关键是尽可能地提高偏置电压的稳定度。影响电压稳定度的因素主要有器件的低频噪声,温度漂移,时间漂移等。基准电源选用了 ADR440B。其输出电压为 2.048V, 0.1Hz到 10Hz 范围内低频噪声峰值小于 $1\mu\text{V}$, 1000h 的长期稳定性为 50ppm。由 2.048V 分压得到 0.5V 的电压信号中,在忽略分压电路引入的噪声下,噪声电压的峰值小于 $0.25\mu\text{V}$ 。

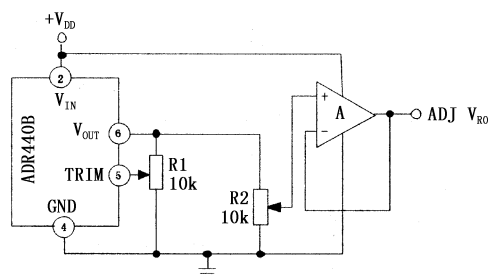


图4 注入控制信号发生电路原理图

4 模数转换设计

576×6 探测器是具有 6 级时间延迟积分(TDI)功能的扫描成像探测器。设计成像分辨率为 576×768 个像元,帧频 50Hz。该探测器支持双向 TDI 扫描。奇数帧和偶数帧图像分别在扫描的正程和逆程得到。每帧扫描 1000 行,中部 768 行为图像区域。该探测器读出电路为 CMOS 工艺,使用 8 个模拟通道输出图像信号。图像信号的动态范围不小于 77dB。图像信号的有效电压范围 0.5V 到 3.3V。各像元的信号在主时钟上升沿开始输出,持续一个主时钟周期。主时钟频率最高为 5MHz。

模数转换电路的基本技术指标为:

- 1) 输入模拟通道为 8 通道;
- 2) 采样速率不小于 5MHz;
- 3) 输出信号信噪比不小于 80dB;

本系统中选用的 ADC 型号为 LTC2202。输出数据位数为 16bit,最大采样率为 10Msps, SNR 为 81.6dB。LTC2202 为 5 级流水线结构的高速 ADC。

一个采样值的转换结果要经过 7 个时钟周期的延迟。时序关系如图 5 所示。

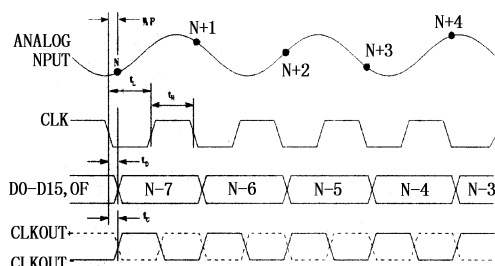


图5 LTC2202 时序图

FPGA 对 ADC 输出数据的采集使用了 ADC 输出时钟信号 CLKOUT。经由 FPGA 片内 RAM 构成的 FIFO 缓冲后,后续处理电路的时序与 ADC 驱动信号之间相对独立。

5 实时信号处理及显示

5.1 非均匀性校正(NUC)

NUC 处理使用两点校正法,凭借 FPGA 中的硬件乘法器完成运算。两点校正公式为: $V_i' = G_i V_i + O_i$ 。其中, V_i 为第 i 列探测器单元的实际输出值, V_i' 为校正后的值, G_i 为增益校正系数, O_i 为偏移量校正系数。两点校正所需的校正系数 G_i 和 O_i ,使用 18bit 表示。由于是线阵传感器,校正系数只有 576 组数据,可存储在 FPGA 片内 RAM 中,上电时从配置器件中读入。非均匀性校正输入数据为 16bit,输出数据为 14bit。运算过程由 FPGA 内部的硬件乘法器完成。

5.2 排 序

576×6 探测器中,将 PVD 阵列分为 8 组排列,每组 72 行,并使用 8 个模拟输出端输出信号。空间上分为上下两部分,各 4 组。4 组之间垂直位置逐路相差一个逻辑单元,水平位置逐路间隔为 22,30 和 22 个逻辑像元。由于光机扫描,使得处在相同水平位置上目标信号最多会相差 74 个扫描周期。为了得到正确的图像数据,需要对所采集到的数据进行重新排列组合。

设计中采用了两片 16Mbit,数据位宽度为 16bit 的异步 SRAM。两片 RAM 的地址信号,数据信号和控制信号完全独立。系统工作过程中,两片 SRAM 采用乒乓操作。即在正程扫描期间,采集数据写入第一片 SRAM 中。同时,第二片 SRAM 中存储的逆程图像信号被读出送往下一级图像缓存。而在逆程扫描期间,采集数据写入第二片 SRAM 中。同时,第一片 SRAM 中存储的正程图像信号被读出送往

下一级图像缓存。在本设计中,SRAM 的写入和读取操作在时间上完全分离。这一特性有利于设计出高速的读写访问控制逻辑。

排序的过程分为存储与读出两个步骤完成。存储过程中将探测器扫描得到的 8 通道 576 行,1000 列的数据写入 1000×1000 个存储单元的 SRAM 的对应位置中。读出过程中,以不同的行起始地址,连续将一行的 768 的数据读出。每读一行改变一次行起始地址,每四行一个循环,直至将 576 行数据全部读出则输出的数据为正常排序的图像数据。

5.3 坏像元补偿(DEC)

焦平面阵列中总会存在一定数量的坏像元^[11]。坏像元的表现为响应增益过低,暗电流过高和过高的输出噪声^[12]等多种形式。

坏像元的存在不但会在图像上产生一些固定的条纹,而且会影响直方图统计的结果,从而会进一步影响图像的显示效果。

坏像元补偿可以使用坏像元两侧的有效像元数据通过插值算法来实现。而一个更简单的方法可以直接使用相邻有效像元的值来代替当前坏像元的值。本设计中采用了后者。

5.4 实时直方图均衡

直方图均衡是实现由采集的 14bit 到显示 8bit 灰度数据的映射。一次直方图均衡处理可分为三个阶段。首先统计图像数据,得到直方图;然后根据直方图,结合均衡算法生成灰度映射表;第三阶段完成图像数据由 14bit 到 8bit 的映射操作,并将数据送给后续处理电路。

直方图均衡处理与排序操作并行完成。在采集到的数据送到排序存储器的同时也送给直方图统计单元。

生成灰度映射表遵循公式:

$$g(f) = (M-1) \sum_{k=0}^f p(x_k)$$

其中, f 是输入数据的灰度; M 是映射后可使用的灰度级。对于 8bit 显示, $M=256$, $p(x_k)$ 为第 k 个灰度值出现的概率。

灰度映射表为 FPGA 片内 RAM,其地址代表输入灰度值,对应存储数据为映射后的灰度值。灰度映射的过程为:从外部存储器取数据,送到映射 RAM 地址端,等待应有的延迟时间后从映射 RAM 数据端取数据送往后续处理单元。直方图均衡处理后的数据将送往视频编码电路。因此,直方图均衡

处理中的灰度映射操作在输出视频数据流的同时完成。

6 实验结果

系统中的所有时序控制功能和信号处理功能都由 FPGA 完成。考虑到系统功能实现中需要较大的容量的 FPGA 片内 RAM,设计中选用了 Xilinx 公司的 Virtex 4 系列的 FPGA,型号为 XC4VSX25。该器件拥有 23040 个逻辑单元和 2304Kb 的片内 RAM。所用控制和处理功能使用 VHDL 语言开发。

NUC 处理过程与采集过程并行完成,直方图均衡处理中的灰度映射操作与输出视频数据流的并行完成,都不增加帧延迟。产生延迟的操作主要是排序、DEC 及生成灰度直方图操作。而对每一帧数据这三项操作都需要将外部 RAM 中的图像数据读出。系统中 RAM 读取操作的频率为 75MHz,三项操作的总延迟时间为 17.7ms。

IRFPA 驱动主时钟为 4MHz。帧频为 50Hz。图 6 中给出了成像效果图。为了能了解探测器性能,成像中屏蔽了坏像元补偿功能。因此图中出现的明显的竖条纹是由于有较多的坏像元的存在。



图6 视频成像截图

7 结束语

FPGA 强大的电路级数据处理能力为实时成像系统中的图像处理功能实现提供的坚实的支持。本文针对扫描型红外探测器,给出了一个基于 FPGA 的实时红外成像系统的设计。同时,模拟系统的动态特性及噪声性能的设计也是决定系统性能的关键。根据应用需求对这一方面进行了详细的讨论。实践结果表明,这一设计在时序控制精度和处理实时性方面都得到了很好的保证。

参考文献:

- [1] Wada H, Nagashima M, Hayashi K, et al. 512×512 element GeSi/Si heterojunction infrared FPA [J]. Proc. SPIE, 1999, 3698, 584-595.

- [2] Chatard, J P. Sofradir MCT IRFPA new developments[J]. Proc. SPIE, 1995, 2552: 767 – 777.
- [3] Baker I M, Crimes G J, Parsons J E, et al. CdHgTe-CMOS hybrid focal plane arrays-a flexible solution for advanced infrared systems[J]. Proc. SPIE, 1994, 2269: 636 – 647.
- [4] Scribner D A. Infrared focal plane array technology[J]. Proc. IEEE, 1991, 79(1): 66 – 85.
- [5] Sizov F F, Derkach Y P, Korinets S V, et al. 576×6 ROIC for MCT LWIR Arrays[J]. Proc. SPIE, 2005, 5726: 140 – 145.
- [6] Felix P, Moulin M, Munier B, et al. CCD readout of infrared hybrid focal-plane arrays[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27: 175 – 188.
- [7] Tobin S P, Iwasa S, Tredwell T. 1/f noise in (HgCdTe) photodiodes[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27(Jan): 43 – 48.
- [8] Chung H K, Rosenberg M A, Zimmerman P H. Origin of 1/f noise observed in HgCdTe variable area photodiode arrays[J]. J. Vac. Sci. Techn., 1985, A3 (Jan): 189 – 191.
- [9] Su Y K, Juang Fuh-Shyang, Chang Shing-Ming, et al. 1/f noise and specific detectivity of HgCdTe photodiodes passivated with ZnS – CdS films[J]. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 1999, 35(5): 751 – 756.
- [10] Sizov F F, Golenkov A G, Zabudsky V V, et al. Noise measurements of HgCdTe LWIR arrays with CCD readouts[J]. Proc. SPIE, Materials for Infrared Detectors II, 2002, 4795: 136 – 146.
- [11] Lopez J M, J Alda. Bad pixel identification by means of principal components analysis[J]. Opt. Eng., 2002, 41: 2152 – 2157.
- [12] Kobayashi M, Wada H, Okamura T, et al. 480×8 hybrid HgCdTe infrared focal plane arrays for high-definition television format[J]. Opt. Eng., 2002, 41(8): 1876 – 1885.

(上接第 161 页)

小,根据测温仪的测温精度可以认为热像仪测量碳纤维布表面的温度满足要求,即设置的波段发射率是准确的,验证该方法测定波段发射率是可靠的。接触式测温仪在测温中存在无法克服的缺点,当被测物体温度高于环境温度较多时,测温结果比物体实际温度偏低,具体偏低多少与物体表面特性有关。所以在验证试验中,加热布的温度只是比环境温度高十几度,没有高很多。

表 2 两种方法测量温度比较

热像仪测量温度/℃	测温仪测量温度/℃	差值/℃
22.2	22.0	0.2
27.5	27.1	0.4
30.0	29.5	0.5
35.5	35.0	0.5

4 结 论

首先从理论上介绍了该方法的可行性,然后通过试验实际测量物体的发射率,最后比较了热像仪的测量值与接触式测温仪的测量值验证了该方法测量的发射率是准确的。该方法的优点是排除了环境复杂性的影响,只要环境中没有强镜面反射体的影响,无论室内室外该方法均可使用;装置简单,可行性强。缺点是能从理论上分析影响发射率测量的因素,但是很难精确计算出发射率误差的大小。

参考文献:

- [1] 孙晓刚,李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101 – 104.
- [2] 王文革. 红外光谱发射率测试方法的研究[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(2): 36 – 39.
- [3] 王海燕, 吴坚业, 朱圆荣. 红外发射材料光谱发射率的测量法[J]. 红外技术, 2003, 25(6): 61 – 63.
- [4] 李艳红, 陈宏书, 郑建龙, 等. 红外发射材料光谱发射率的测量法[J]. 红外技术, 2008, 30(2): 114 – 117.
- [5] 罗晓春, 孙继银. 物体表面发射率的测量方法[J]. 自动测量与控制, 2007, 26(8): 72 – 74.
- [6] 侯成刚, 张广明, 赵明涛, 等. 用红外热成像技术精确测定物体发射率[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(3): 195 – 198.
- [7] Robert P Madding. Emissivity measurement and temperature correction accuracy[J]. Part of the SPIE Conference on Thermosense XXI, Oriando, Florida, April, SPIE, 1999, 3700: 393 – 401.
- [8] 曹义, 程海峰, 郑文伟, 等. 基于红外热像仪的涂层波段发射率测量[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 316 – 319.
- [9] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1336 – 1341.
- [10] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 213.
- [11] 杨立, 寇蔚, 刘慧开, 等. 热像仪测量物体表面辐射率及误差分析[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 43 – 45.