

1024 元长线列红外探测器的数据采集技术

王高峰¹, 赵毅强¹, 杨 栋²

(1. 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘 要: 介绍了一种 FPGA 实现 1 024 元长线列红外探测器的数据实时采集处理技术。提出了一种 FPGA 实现探测器奇偶行对齐的实现方法, 改进了二维线性外推盲元检测补偿算法, 在对角线方向上进行盲元检测与补偿, 解决了多盲元连通时检测效率低的问题; 采用定点乘法器和加法器完成了探测器的均匀性校正。实验结果表明: 该数据采集处理技术能够提高数据传输处理效率, 具有良好的实时性和可移植性。

关键词: 数据采集; 长线列; 实时性; 盲元检测补偿

中图分类号: TP274.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)08-1990-05

Data acquisition of 1 024-pixel long linear infrared detectors

Wang Gaofeng¹, Zhao Yiqiang¹, Yang Dong²

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Jinhang Research Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

Abstract: A real-time data acquisition and processing technique of long linear infrared detectors which was realized on FPGA was introduced. A method of rearrangement of parity line detectors was illustrated with FPGA. By illustrating traditional 2D linear extrapolation blind pixel detection and restoration algorithm, an improved one, which well fitted the case when several blind pixels bordered each other and reduced the detection and restoration efficiency, was proposed. Non-uniformity correction (NUC) of detectors was implemented inside FPGA by referring to the proposed data processing organization. The experiment results show that the mentioned data acquisition and processing techniques can raise data transmission efficiency to a great degree. Meanwhile, it possesses the characteristic of well real-time and can be widely applied in related area.

Key words: data acquisition; long linear; real-time; blind pixel detection and restoration

收稿日期: 2011-12-05; 修订日期: 2012-01-03

作者简介: 王高峰(1986-), 男, 硕士生, 主要从事集成电路设计和红外系统方面的研究。Email: wanggaofeng@tju.edu.cn

导师简介: 赵毅强(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事集成电路设计和红外系统方面研究。Email: q_zhao@tju.edu.cn

0 引言

红外探测器正越来越广泛地应用于航空航天和工农业生产中,由于应用系统的需求和成品率的影响,长行列红外探测器仍然有着强烈的技术需求^[1-3]。一般情况下,大于 1024 元的行列探测器均采用精密无缝拼接技术,即将 256 或 512 为单元的行列器件,经横向位置的无缝拼接形成完整的长行列探测器^[1]。现已较为成熟的常规行列如 256×1 和 288×4,它们的输出阵列分别为 256×1 和 288×1,1024 元长行列的输出阵列为并行的 4 个 256×1,与上述传统行列相比,不仅待采集通道的数目增加了 3 倍多,而且数据的吞吐量、采集速度和缓存空间深度与上述常规行列相比也增加了 3~4 倍,所以,为了实现 1024 元长行列探测器数据的实时采集和处理,需要综合考虑 FPGA 的资源利用和数据处理的速度、数据处理总量、数据传输速度等之间的关系,同时,在数据实时采集和实时处理的实现思路,需要研究新算法或改进旧算法,从而采用更为精简的数据处理架构,实现数据处理的硬件消耗更少、处理速度更快、实现效果更优。

文中采用 FPGA 作为核心功能单元,实现 1024 元长行列探测器读出电路芯片工作时序、红外图像数据实时采集,以及利用 SRAM 实现探测器奇偶行对齐、盲元检测补偿和均匀性校正,具有很高的实时性。使用 USB 作为通信接口,将数据传输到上位机。上位机实现读出电路的参数设置以及红外图像显示,采用 VC++6.0 设计的具有可视化操作界面的应用软件,提高了采集控制的可操作性。

1 数据采集软硬件架构和原理

1.1 整体软硬件架构

数据采集的软硬件包括红外探测器组件、数据采集模块和上位机,如图 1 所示。

红外线行列探测组件共包含 1024 元的红外探测器,由 4 个 256×1 常规行列探测器按照“品”字形排列组成,其中探测器处于读出电路芯片中部,通过双侧引线键合的方式与读出电路芯片两侧边缘的引脚相连接,经立体封装构成。

数据采集模块包括 FPGA 芯片及其配置芯片、

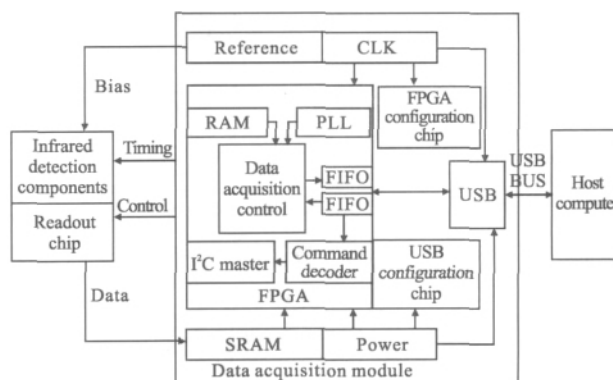


图 1 数据采集软硬件结构图

Fig.1 Software and hardware organization for data acquisition

SRAM、Flash EPROM、USB 接口芯片及其配置芯片、电源、晶振和其他外围电路。其中,FPGA 芯片选用了 Altera 公司的 EP2C35F672C8,其内部有 33 216 个逻辑单元,483 840 bit 存储单元,能够满足系统开发中对逻辑单元规模和 RAM 大小的要求;USB 芯片采用 Cypress 公司的 CY7C68013,它作为上位机和 FPGA 通信的中介,使用不同端点分别传输控制信号和批量数据信号。

上位机采用 VC++6.0 设计了具有可视化操作界面的应用软件,主要实现采集控制和图像显示。

1.2 数据采集工作原理

红外探测器将红外辐射转化成电流信号,读出电路芯片对电流信号进行积分、相关双采样、可编程放大,再由内置的 ADC 进行模数转换,通过芯片数字控制,最后串行输出 ADC 量化的数字信号;数据采集模块提供芯片工作时钟,控制芯片工作状态,同时采集芯片输出,进行图像的奇偶行对齐、盲元检测与补偿以及均匀性校正,缓存入 FPGA 内部生成的 FIFO,并实时检测 USB 芯片内部 FIFO 的满空状态,并在其不满时,读出 FPGA 内嵌 FIFO 数据写入 USB 芯片内嵌 FIFO,供上位机通过 USB 总线进行数据读取。

上位机读取图像数据,进行图像显示。在系统初始化时,上位机可以通过 USB 总线发送命令到主控制器,由主控制器按照协议译码上位机命令,从而进行转台控制设置或者芯片工作状态设置。同时上位机采用多线程,将下传指令解析与上传数据完全分离,将二者同步进行,大大缩短了因下传指令引起的数据中断时间,很好地满足了实时性要求。实际中,主控制器利用内嵌的 I²C 主机模块与芯片从机模块

进行通信,分地址完成芯片工作参数的设置或读取。

2 数据实时采集优化的 FPGA 实现

2.1 探测器奇偶行对齐

线列探测器由于规格所限,探测器读出的一列数据与真实图像的空间位置并非一一对应,需要进行奇偶行对齐^[4]。一般实现思路是在上位机接收完一幅完整图像数据后,缓存入数据库,再进行位置对齐,但是这样的实现方式无法实时成像,文中针对此问题,在 FPGA 集成奇偶行对齐模块,配合一片大容量高速 SRAM,完成探测器的实时奇偶行对齐。

1 024 线列是由 4 个 256 线列芯片按“品”字形排列构成,每个 256 芯片对应有奇偶两个数据通路同步输出;在 256 芯片内,256 元探测器分奇偶两列,也按“品”字形排列,如图 2 所示,FPGA 同步采集 4 个芯片共 8 路输出,预先将 SRAM 按地址分成 8 块相同大小的存储空间,然后将采集的 8 路输出分别存入相应地址的存储空间。之后按照真实线列的数据顺序,依次读取存入 FPGA 内部生成的 RAM 中,实现奇偶行对齐。

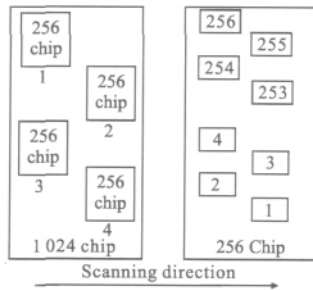


图 2 256 元芯片间和芯片内探测器排列

Fig 2 Detector array inside and among 256 chips

2.2 探测器盲元检测与校正

红外探测器受材料和工艺等因素的限制,存在不同程度的盲元^[5]。盲元按照来源分类可分为器件固有级和信号通道级。器件固有级的盲元指在器件制造过程中产生的物理损坏而造成各敏感元相应曲线不一致或无效敏感元;信号通道级盲元指成像系统中电荷读出及电子成像过程中由于通道障碍或环境变化而形成的盲元^[6]。

对固有级的盲元,在实际操作中,可以建立一种测试模式,预检测固有盲元,并对其进行补偿,常用的方法有双参考源相应差值法,局部阈值法等,但对

于信号通道级盲元,考虑到其极大的随机性,无法预先定位,需要现场实时检测,文中改进了二维线性外推盲元检测算法,并在 FPGA 上实现了上述两种类型盲元的实时检测和补偿。

二维线性外推盲元检测算法的原理^[7]如图 3 所示。

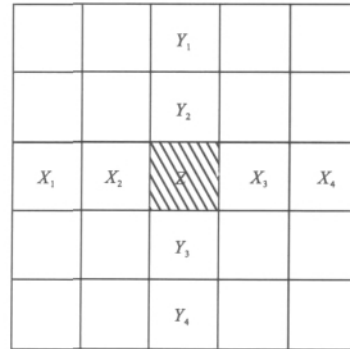


图 3 线性外推算子像素分布表

Fig.3 Pixels mapped figure of 2D linear extrapolation algorithm

(1) 分别进行二维图像在 x 方向和 y 方向的一维线性外推算子计算,计算公式如下:

$$Z_{XMAX} = \max(2X_2 - X_1, 2X_3 - X_4, X_2, X_3)$$

$$Z_{XMIN} = \min(2X_2 - X_1, 2X_3 - X_4, X_2, X_3)$$

$$Z_{YMAX} = \max(2Y_2 - Y_1, 2Y_3 - Y_4, Y_2, Y_3)$$

$$Z_{YMIN} = \min(2Y_2 - Y_1, 2Y_3 - Y_4, Y_2, Y_3) \quad (1)$$

(2) 根据一维线性外推算子计算其在二维图像的算子值:

$$Z_{MAX} = \max(Z_{XMAX}, Z_{YMAX})$$

$$Z_{MIN} = \min(Z_{XMIN}, Z_{YMIN}) \quad (2)$$

(3) 判断

若实际获得的 Z 点灰度值满足 $\frac{(Z - Z_{MAX})}{Z} > 10\%$,

则判定该像素为过热失效元;

若实际获得的 Z 点灰度值满足 $\frac{(Z_{MIN} - Z)}{Z} > 10\%$,

则判定该限速为死像元。

针对线列推扫式成像,图像每一列的水平方向上都是由同一个探测元扫描得到的,所以水平方向不需要进行判断,只进行垂直方向的判断。但是如果两个或者两个以上盲元连在一起,则上述算法无法得到较好的检测效果,对此,对原算法做了改进。如图 4 所示,将连在一起的多盲元看作相互独立的,首先按照对角线位置从经过奇偶行对齐后存储图像数据的 RAM 中读取待验证元相邻元的灰度值,进行寄

存,再按照公式(1)和(2)进行大小比较,最后按定义判断是否为盲元。如果是则首先依据公式(4)进行一次补偿计算,再按照公式(3)进行二次补偿,最后将灰度补偿值填充到盲元位置;如果不是,则继续进行下一元的检测。进行二次补偿可以有效解决一次补偿后的盲元灰度与相邻非盲元差别较大,提高图像质量。

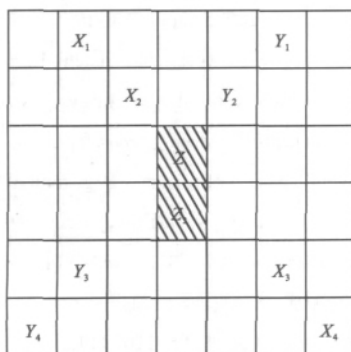


图 4 改进型对角线外推算子像素分布表

Fig.4 Pixels mapped figure of improved 2D diagonal extrapolation algorithm

一维垂直方向补偿对应图 3 和公式(3),对角线补偿对应图 4 和公式(4),公式中,Z 为灰度值, \bar{Z} 为补偿灰度值,K 为补偿精度,由用户通过使用界面进行设置。

$$\bar{Z} = \frac{1}{2} [K(Y_1+Y_4)+(1-K)(Y_2+Y_3)] \quad (3)$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{4} [K(Y_1+Y_4+X_1+X_4)+(1-K)(Y_2+Y_3+X_2+X_3)] \quad (4)$$

2.3 均匀性校正

由于受材料和工艺水平等因素的影响, 行列探测器各探测单元响应的非均匀性较大, 并且各探测单元响应特性曲线随着工作温度的变化都有差异^[8], 降低了图像质量, 需要对探测器进行非均匀性校正。考虑到系统实时性, 采用两点定标法进行均匀性校正。在测试模式下根据选择的定标基准温度, 预先用面源黑体根据两点定标算法获得各线元的校正系数, 存入 Flash EPROM, 在 FPGA 中采用定点乘法器和定点加法器完成图像非均匀性校正, 图 5 为校正的结构框图。

1024 行列探测器非均匀校正系数有 2048 个, 为 1024 个乘系数和 1024 个加系数。系统上电后, FPGA 从 Flash 中读取系数, 将其存储到内部的存储

空间内, 再从 FPGA RAM 中读取经过奇偶行对齐和盲元检测补偿后的图像数据, 经过乘、加运算后得出校正结果, 存入 FPGA 的缓存 FIFO 中, 通过 USB 上传到上位机进行图像显示, 如图 5 所示。

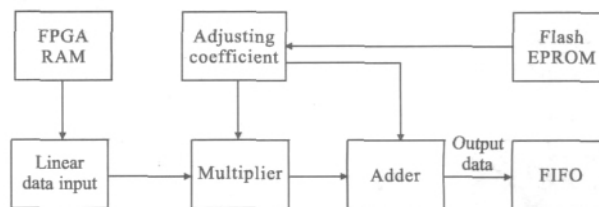


图 5 均匀性校正结构框图

Fig.5 Organization of nonuniformity correction

3 实验结果与结论

利用 QUARTUS II 软件建立 FPGA 工程文件, 经实际调试测试, 确保程序功能时序都正确后, 观察编译结果, 显示数据采集处理程序总共占用了 FPGA 4% 逻辑单元和 14% 的存储空间。

一个 1024 行列数据采集用时 600 μs, 奇偶行对齐用时 20.48 μs, 盲元检测校正用时 210.945 μs, 均匀性校正用时 92.16 μs, 共计 923.585 μs。理论计算得到的最高成像帧频为 1.08 kHz。调整两帧图像数据的采集间隔进行实验验证, 结果表明, 该软硬件架构可以实现的最高成像帧频是 1.02 kHz。

在室温条件下, 利用可见光探测器进行图像采集实验, 图 6(a)、(b)分别为均匀性处理前后对照图。

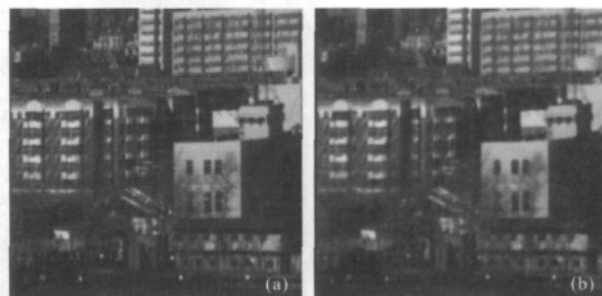


图 6 均匀性校正结果对比

Fig.6 Image before and after nonuniformity correction

在室温条件下, 分别使用 1.7 μm 波长 InGaAs 1024 行列探测器和 2.2 μm 波长 InGaAs 1024 行列探测器进行了数据采集优化实验。图 7 为两种谱段只经过奇偶行对齐的红外图像(图 7(a)、(c))与经过

奇偶行对齐、盲元检测补偿和均匀性校正的红外图像的结果对照图(图 7(b)、(d)),每幅图像大小均为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 。

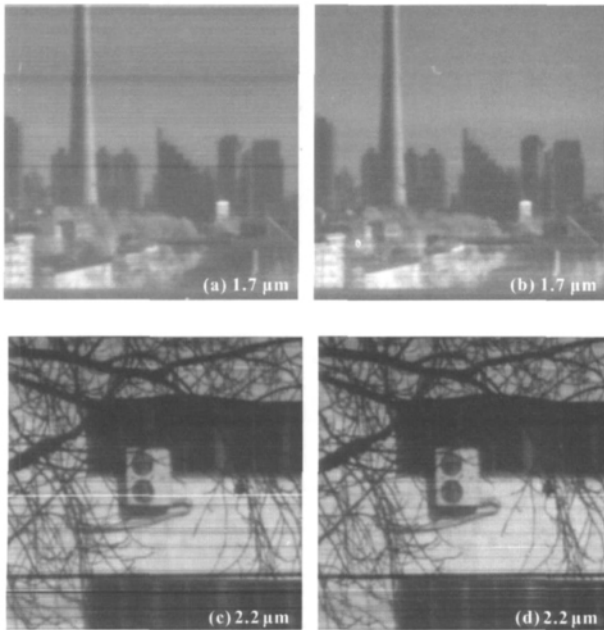


图 7 经图像优化的两谱段 1 024 元红外图像

Fig.7 Optimized 1 024 linear array infrared image of $1.7\ \mu\text{m}$ and $2.2\ \mu\text{m}$

文中所述的实时 1 024 线列数据采集处理技术,可以实时高效的采集红外图像数据并进行相关处理。在数据采集、图像处理及显示的过程中,实现了实时可靠的数据传输,得到了高质量的红外图像。以上介绍的采集技术可以应用于图 2 所示所有 1 024 线列系统,并且可以推广到 2 048 线列、4 096 线列乃至更长线列系统。目前,实验室已经开展了 2 048 线列相关工作的研究。

参考文献:

- [1] Sanjay Krishna. The infrared retina [J]. *Applied Physics*, 2009, 42: 1-6.
- [2] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 18-25. (in Chinese)
龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 18-25.
- [3] Hiroshi Sugiyama, Jun Koshoubu, Seiichi Kashiwabara, et al. Time-resolved step-scan infrared imaging system utilizing a linear array detector[J]. *Appl Spectrosc*, 2008, 62(1): 7-23.
- [4] Gao Yinghui, Shen Zhenkang. Registration and stitching algorithm for aviation swaying image set [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 170-174. (in Chinese)
高颖慧, 沈振康. 航空摇摆图像组的配准拼接算法 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 170-174.
- [5] Shi Yanli, Cao Wanru, Zhou Yan, et al. GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors array with $2\ \mu\text{m}$ pixel distance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 968-971. (in Chinese)
史衍丽, 曹婉如, 周艳, 等. $2\ \mu\text{m}$ 像元间距 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面探测器 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 968-971.
- [6] Hou Liwei, Xie Wei, Chen Fansheng, et al. Image restoration of infrared focal plane array[C]//IASP, 2010: 296-299.
- [7] McClelland J R, Hughes S, Modat M, et al. Inter-fraction variations in respiratory motion models [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2011, 56(1): 251-272.
- [8] Goyal P. Studying the performance parameters on real infrared image/data and evaluation by application of the NUC algorithm[C]//Control and Robotics, 2010: 65-70.