

文章编号: 1672-8785(2016)04-0001-06

基于 FPGA 的高灵敏红外相机实时 数据处理系统的设计

张慕威^{1,2} 董 峰^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为满足红外相机的高灵敏度、实时性、小型化和集成化要求, 采用 384×288 长波红外焦平面探测器的四通道输出模式, 以 Altera 的 cyclone3 系列芯片作为主控制器, 并利用 1 块 4 M 大小的 SRAM 和一块 4 M 大小的 flash 为辅助, 设计了一套基于 FPGA 的图像数据处理系统。该系统通过指令控制能对图像背景进行采集与消除、细分采样叠加和数字 TDI 处理等。该系统由 Verilog 语言实现, 可移植性强, 并具备推扫和凝视两种成像模式。实验结果表明, 该系统能够代替上位机对图像进行实时处理, 得到高灵敏度的清晰图像。

关键词: 红外; 高灵敏度; 实时处理; 细分采样; 数字 TDI; FPGA

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.04.001

Design of Real-time Data Processing System for High Sensitivity Infrared Camera Based on FPGA

ZHANG Mu-wei^{1,2}, DONG Feng^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the requirements of high sensitivity, real time, miniaturization and integration of an infrared camera, an image data processing system based on FPGA is designed. The system uses the four-channel output mode of a 384×288 long-wave infrared focal plane array detector, takes a chip in Altera cyclones family as the main controller and uses a 4 M bit SRAM and a 4 M bit flash as the auxiliaries. It can implement the collection and elimination of image background, oversample-superposition and digital TDI etc through instruction. The system achieved by Verilog language has strong transplantation, and it has staring imaging mode and push-boom imaging mode. The experimental results show that the system can implement real-time processing of images instead of PC and obtain clear images with high sensitivity.

Key words: infrared; high sensitivity; real-time processing; oversample-superposition; digital TDI; FPGA

0 引言

如今, 红外遥感成像技术在军用和民用领域

都具有不可替代的作用, 例如用于夜间侦查、自然灾害监测、导航和气候预测等^[1]。为了达到对微小温差目标辨别的目的, 获得更多温度细

收稿日期: 2016-03-22

作者简介: 张慕威 (1990-), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要研究方向为红外系统设计与图像处理。

E-mail: zhang_mu-wei@163.com

节,人们对红外成像系统的探测灵敏度有了更高的要求。噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 是衡量系统灵敏度的重要指标^[2]。目前,主流的红外探测器的 NETD 大约为 20 mK。除了提高红外探测器本身的性能和减小硬件电路的噪声外^[3-4],特殊的图像处理方法也是提高探测灵敏度的重要手段,在单个像元驻留时间内细分采样叠加^[5]和在不同行像元推扫过同一目标信号的时间延迟积分 (Time Delay And Integration, TDI)^[6]等技术的出现,为图像处理提供了很好的方法。

实时的数据处理已经成为当今红外系统的发展趋势,尤其在军事、航天和实时救援等领域^[7]。目前,基于计算机软件处理红外图像的理论而后处理技术已经非常成熟,但其不利于系统的实时化。随着高速数据采集器件和数字信号处理器 (Digital Signal Processors, DSP)、现场可编程逻辑器件 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 的出现和发展,在一片主处理器上同时完成红外图像的采集和实时处理成为了可能。相比于图像采集的后处理,嵌入式的实时图像采集处理系统不但能够对目标进行实时监控观察,缩小设备体积,还能减小数据上传的压力,其意义重大。

1 红外图像实时处理系统简介

实验采用 384×288 制冷型面阵长波红外探

测器。该探测器利用斯特林制冷器制冷,工作范围为 77 K~80 K,探测波长为 $7.7\pm 0.2\mu\text{m}\sim 9.5\pm 0.3\mu\text{m}$ 。可通过改变电路硬件配置选择单通道图像输出模式或四通道图像输出模式,通过 FPGA 时序可配置成自触发模式和脉冲触发模式。同时,探测器具有不同大小的窗口模式,分别为 384×8、384×16、384×32、384×64 和 384×288,大窗口可用于凝视成像,小窗口可用于推扫式数字 TDI 成像,以满足系统的设计要求。探测器像元大小为 $25\times 25\mu\text{m}$,杜瓦 F 数为 1.5。室温下,250 μs 积分时间的像元的平均 NETD 小于 20 mK,通过本系统的图像处理后,NETD 能达到优于 5 mK 的结果。

系统采用探测器四通道图像输出模式,利用 4 片 16 位高速串行 A/D 芯片 AD7626 以提高图像采集速度和减小设备体积。选择探测器像素输出频率为 4 MHz,采用 Altera 的 cyclone3 系列芯片的 EP3C55U484C6 作为主控制器,该器件内部有 4 个锁相环、55856 个逻辑单元 (LE)、328 个可用 I/O 和 296160bit 的存储器资源,利用一块外挂的 SRAM 和一块 FLASH 就足以满足系统设计的资源要求。数据处理系统采用并行流水线结构,主时钟频率选择 80 MHz,可通过 FPGA 内部锁相环倍频得到,其结构框架如图 1 所示。整个系统由 RS422 总线下发指令控制,其中包括

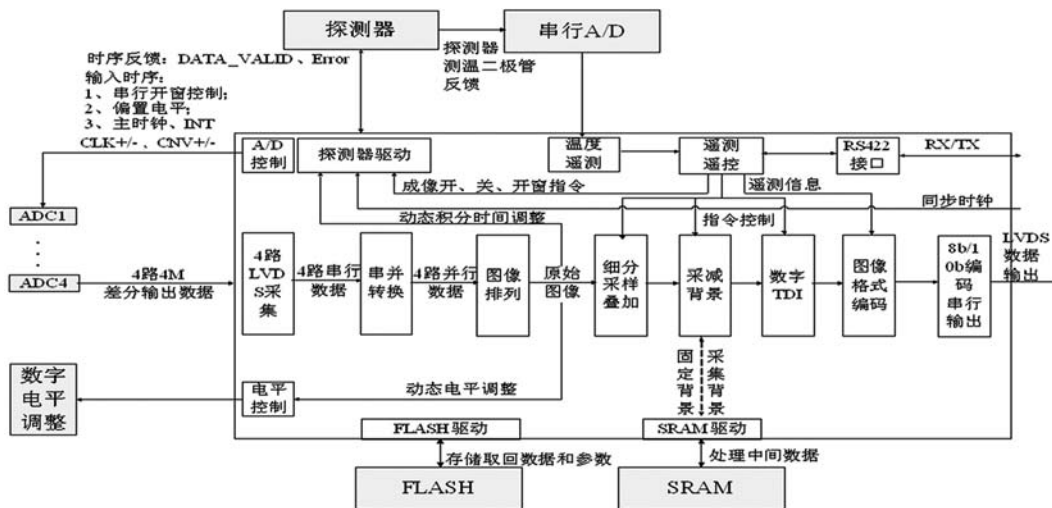


图 1 FPGA 内部系统框图

模拟信号的电平调整和探测器的温度遥测遥控、A/D 数据的采集和串并转换、图像排列、细分采样叠加、采背景、减背景、数字 TDI、图像数据的编码上传和显示, 所有模块都由探测器给出的帧有效信号 DATA_VALID 实施同步操作。

2 图像处理各模块的实现

2.1 串并转换和图像排列

探测器输出信号经电平调整和差分放大后, 由四个串行 A/D 同时采集。FPGA 采用 A/D

的回波时钟模式, 通过 4 个 A/D 相同的时序控制对探测器四路输出进行采集。串行数据经过串并转换后被送入寄存器, 由下一个 A/D 采样时间排列好, 然后被依次送入细分采样模块。图 2 为由 Signal Tap 监测的该模块 FPGA 内部时序图, 其中 dataavail 为探测器输出的高电平像元有效信号, adclk[0]~adclk[3] 为 A/D 的回波时钟, adcldata_test[0]~adcldata_test[3] 为 A/D 的有效数据, acc_in_reg 和 acc_wr 为排列好并依次送入下一模块的图像数据与写信号。

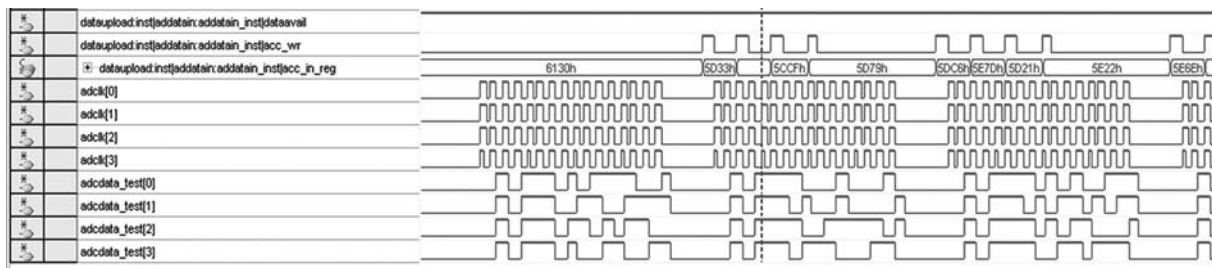


图 2 图像四路采集排序逻辑分析仪监测结果

2.2 细分采样模块

CMOS 红外焦平面器件一般具有电荷存储容量小的特点, 在背景辐射较大的情况下易饱和, 所以积分时间相对较短。为提高系统灵敏度, 可在单个像元的驻留时间内进行多次成像叠加。图像的信噪比与叠加的次数 $M^{1/2}$ 成正比。设图像噪声为高斯噪声, 均值为 N , 信号均值为 S , 那么叠加后信噪比 SNR 如式 (1) 所示, 图像的 NETD 则与信噪比成反比。系统可根据不同的推扫速度设置不同的叠加次数, 使 NETD 最小化。模块流程如图 3 所示, 在各帧图像到来时, 应判断指令寄存器中的窗口大小和累加次数 N 是否发生变化。当状态改变时, 需对模块的各个参数进行 Reset 并将其置成对应状态。叠加的中间数据需开辟缓冲 Acc_buf 来存储, 其数据宽度可根据累加最大次数而定, 这里选择 20 位, 最多进行 16 次累加。将需累加的第一帧图像直接送入缓冲中, 第 2 到 M-1 帧与缓冲中对应的数据叠加再次存入缓冲, 第 M 帧图像与缓冲中数据叠加后除以累加次数 M 送入背景模块。

可以看出, 原数据量是进入背景模块数据量的 M 倍。

$$SNR = \frac{\sum_{i=1}^M S_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^M N_i^2}} = \frac{MS}{\sqrt{MN^2}} = \sqrt{M} \frac{S}{N} \quad (1)$$

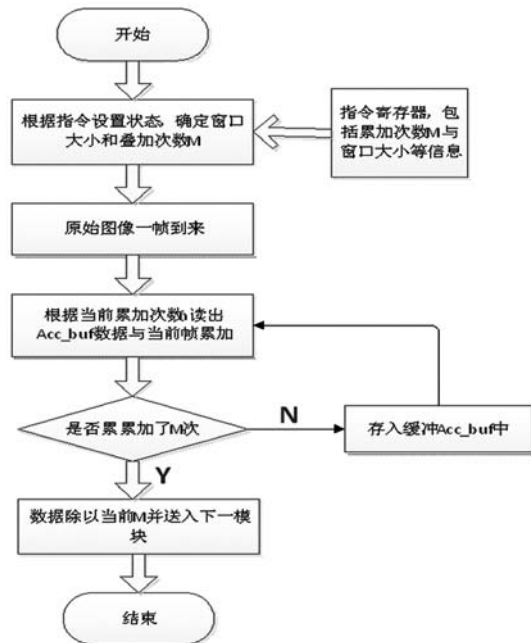


图 3 细分采样叠加流程图

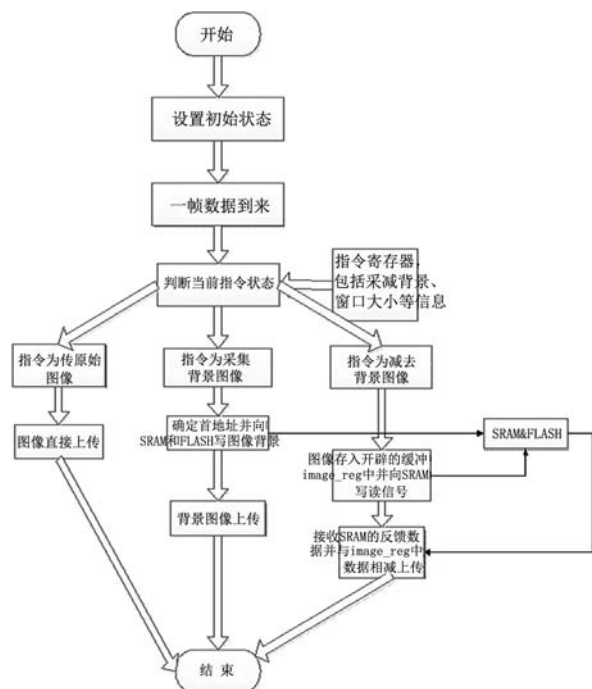


图4 背景模块流程图

2.3 背景模块

探测器采集到的图像不但含有目标信息,同时还掺杂了诸如系统内部自身热辐射信号和探测器焦平面固定图案信号等,这些可称为系统的背景噪声,它们严重影响了成像的质量和动态范围。假设背景噪声在一定温度和场景下不变,可利用拍摄到的图像减去遮盖探测器采集的图像背景来消除背景噪声。设探测器背景为 S_n , 目标信号为 S_d , 那么减去背景的图像 S_o 为

$$S_o = S_d - S_n \quad (2)$$

模块流程如图4所示,设置初始状态时需把原来存储在flash里的背景与参数写入SRAM和FPGA以备,并选择为上传原始图像模式,各帧图像到来前通过判断指令寄存器状态来确定当前需要进行的操作。SRAM和flash的读写状态控制在各帧有效信号DATA.VALID给出时和图像数据到来前的空闲时间设置。由于向SRAM给出读出控制信号需一定延迟,得到数据反馈的时间大约为探测器几个像元信号的采集时间,这时要开辟一个小缓冲image_reg来储存到来的图像数据,待SRAM给出反馈数据后再与其相减。由于目标温度可能比背景温度低,会导

致减去背景后的数据翻转,因此在减去背景前需要把当前数据统一加上固定的数,经过实验后取16'd12000比较合适。本模块可对系统背景噪声进行现场的采集存储和消除,对实验环境和温度变化巨大、需要实时采集背景噪声的场景能起到比较理想的消噪作用。

2.4 数字 TDI 模块

在系统的推扫模式中,TDI是提高图像灵敏度的有效方法,它和细分采样叠加法有异曲同工之妙,都属于通过增加样本容量来降低噪声的方法。细分采样叠加是当前像元驻留在目标时间上的重复采样叠加,而TDI则是在多行像元推扫过同一目标时各像元信号的叠加。设TDI的阶数为M,图像的NETD与 $M^{1/2}$ 成反比。目前,红外成像系统可采用模拟TDI和数字TDI这两种方式,模拟TDI是探测器在成像时对内部电荷的转移累加,而数字TDI则是对信号进行采集和数字量化后再以数字形式进行叠加^[8],其适用范围更广。系统数字TDI模块框图如图5所示。

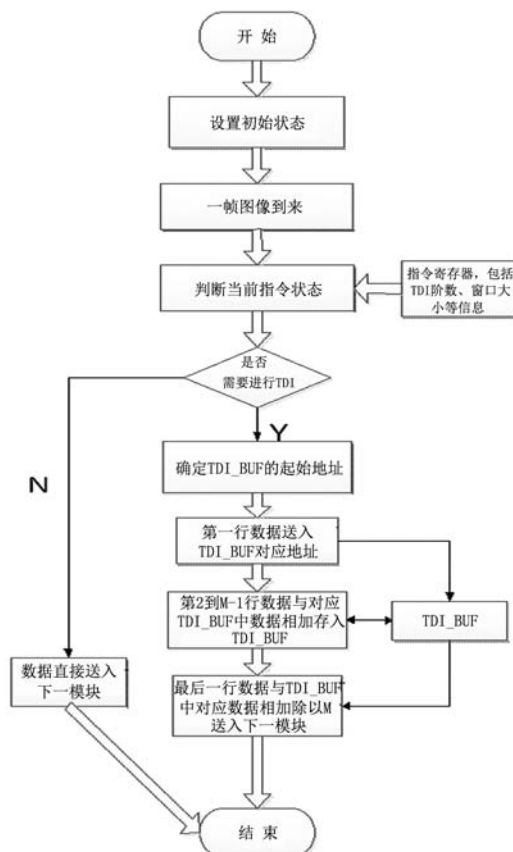


图5 数字 TDI 模块流程图

其中 TDI 具有固定的推扫方向, 本系统拟定的方向是从图像最后一行向第一行方向推扫。图像写入缓冲 TDI_BUF 前首先要计算第一个像元对应的入口地址, 如图 6 所示。对于 384×32 阶的 TDI, 循环的第一帧图像的起始地址为 0, 循环的第二帧图像的起始地址为 384×31 , 循环的第三帧图像起始地址为 384×30 , 依次类推。

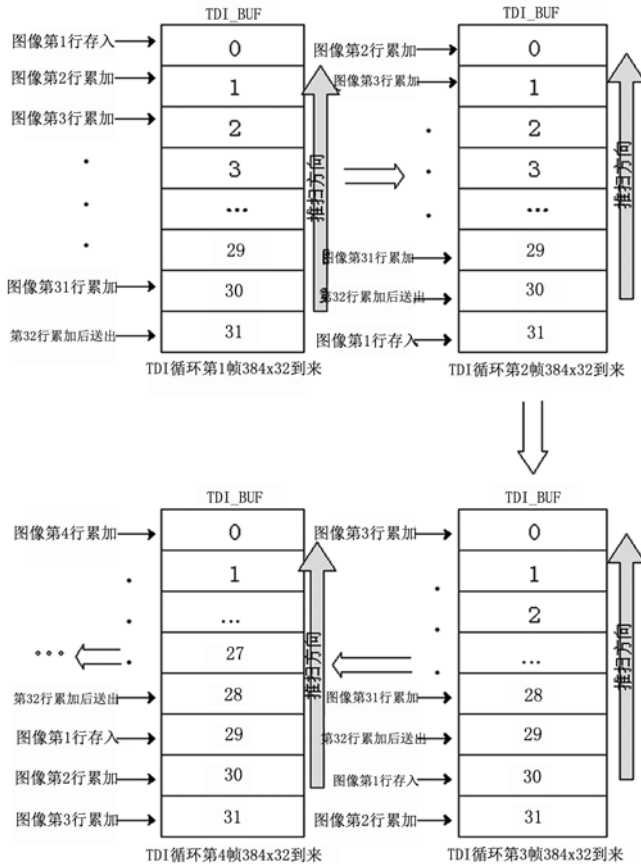


图 6 TDI 图像各行对应作用 TDI_BUF 位置的示意图

2.5 图像格式编码与上传

上传图像需要记录图像信息以便显示, 包括图像大小、各帧计数、叠加次数、环境温度和 TDI 阶数等信息。由于缺少外挂 SRAM 资源, 不能进行乒乓操作, 模块选择利用 FIFO 可同时读写的特点打包上传。

3 系统测试结果

红外系统的 NETD 可用噪声所占码值对应的温度大小来表示。设 S_1 是系统对温度为 T_1 的黑体的平均响应, S_2 是系统对温度为 T_2 的黑体

的平均响应, 而 N 为系统在 T_1 和 T_2 之间的平均 RMS 噪声, 那么系统的 NETD 可表示为

$$NETD = (T_1 - T_2) \frac{N}{S_1 - S_2} \quad (3)$$

系统采用单对 LVDS 数据线传输数据, 图像数据通过 8B10B 编码后, 经时钟数据恢复 (Clock Data Recover CDR)^[9] 上传到显示系统以进行显示, 其中线上时钟频率为 180 MHz, 探测器 384×288 凝视模式下的图像产生帧频为 140 帧/s, 384×32 模式下为 1000 帧/s, 经过细分采样叠加和数字 TDI 处理后传出帧频会相应地下降以减小传输压力。利用 25°C 和 30°C 黑体对系统性能进行测试, 设置积分时间为 $250\ \mu\text{s}$, 测试时黑体需充满探测器的整个视场。图 7 为不做任何处理系统的 NETD 曲线图, 图 8 为细分采样 4 帧叠加后的 NETD 曲线图, 图 9 为 2 帧叠加后 8 阶 TDI 的 NETD 曲线图。可以看出, 图像经 TDI 和细分采样叠加后, NETD 有了明显的改善, 且与 $M^{1/2}$ 成反比。

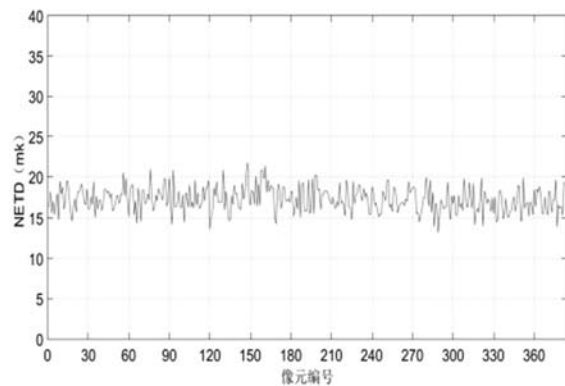


图 7 原始图像的 NETD

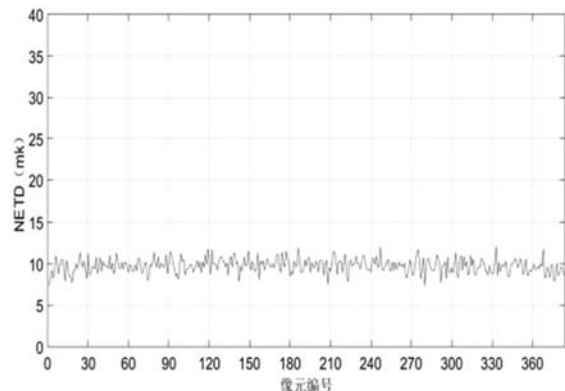


图 8 4 帧叠加图像的 NETD

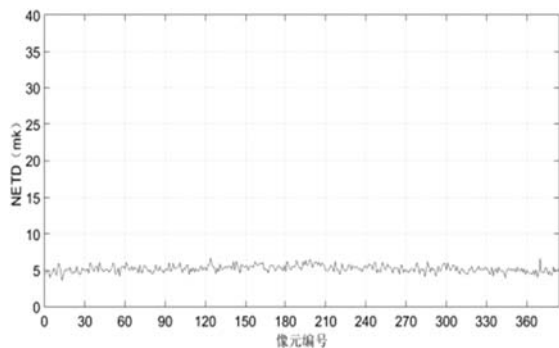


图 9 2 帧叠加后 8 阶 TDI 图像的 NETD

对系统进行成像实验,如图 10 所示。设置积分时间为 $250\ \mu\text{s}$, 开窗 384×16 时做 16 阶 TDI, 一帧图像产生时间的计算式为

$$T_{\text{total}} = T_{\text{intr}} + T_{\text{gap}} + T_{\text{image}} \quad (4)$$

计算结果大约为 $634\ \mu\text{s}$ 。式中, T_{intr} 为积分时间, 取值 $250\ \mu\text{s}$; T_{gap} 为 DATA_VALID 有效到像元输出的间隔时间, 取值 $250\ \text{ns}$; T_{image} 为读出像元的时间, $0.25\ \mu\text{s} \times 384 \times 16 / 4 = 384\ \mu\text{s}$ 。相机单个像元的视场角 ϕ 为 $0.83\ \text{mrad}$, 设转台速度为 Ω , 其中 ϕ 、 T_{total} 、 Ω 和细分采样累加次数 M 的关系为

$$M = \frac{\phi}{\Omega T_{\text{total}}} \quad (5)$$

取 Ω 为 $4.69^\circ/\text{s}$, M 为 16, 成像效果图如图 11 所示。积分时间为 $250\ \mu\text{s}$ 情况下, 利用 384×288 凝视成像模式拍摄到的图片如图 12 所示。图 13 为某次航拍实验中利用本系统获得的 TDI 图像。可以看出, 本系统通过 FPGA 对图像进行采集和处理, 可以得到高灵敏度的清晰图像。



图 10 相机成像实验示意图



图 11 16 帧叠加 16 阶 TDI 的外景图像

图 12 384×288 相机凝视模式的成像图片

图 13 航拍 32 阶 TDI 的图像

4 结论

针对长波红外探测系统, 给出了一套细分采样叠加结合数字 TDI 的 FPGA 内部图像采集处理系统, 不但满足了系统的实时性和小型化要求, 而且有效地提高了系统的探测灵敏度。对于其他类型的探测器, 只需替换前端的串并转换和图像排列模块, 并设置好参数, 便可以利用本系统的数据处理模块。整个系统的可移植性强, 对其他图像处理系统的设计具有借鉴意义。

(下转第 32 页)