

# 用于焦平面测试系统的高效高精度 数据采集方法与实现

黄大骏, 王永纲, 张丽君, 朱文松, 卢潇鸣  
(中国科学技术大学 近代物理系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:**通过分析焦平面测试中各种性能参数对数据要求的特点,提出了一种区别于传统的高效数据采集方法,并采用ADI最新发布的16位高性能ADC,设计了基于该方法的高效高精度采集系统.通过内嵌的“RMS硬件算法”和外部SRAM的特殊组合,在兼容传统测试系统的同时,大大提高了系统的测试效率.经碲镉汞(HgCdTe)型 $640 \times 512$  ( $15 \mu\text{m}$ )的红外焦平面(IRFPA)联调实验验证,采集系统本底噪声低至 $75 \mu\text{Vrms}$ 以下,对基本参数的计算在2s左右即可完成,充分满足高精度高分辨IRFPA对测试系统的苛刻要求,具有很好的应用前景.

**关键词:**红外焦平面;数据采集;测试系统;高效;低噪声;RMS硬件算法;AD7626  
**中图分类号:**TN216 **文献标识码:**A

## High-efficiency high-accuracy data acquisition method and realization for IRFPA test system

HUANG Da-Jun, WANG Yong-Gang, ZHANG Li-Jun, ZHU Wen-Song, LU Xiao-Ming  
(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The data requirements of all parameters on the performance test of infrared focal plane arrays (IRFPA) was analyzed, and then presented an efficient data acquisition method different from the traditional one. As a result of ADI latest high-performance 16-bit ADC and this new method, a high-efficiency high-accuracy data acquisition system was introduced. By the embedded *RMS Hardware Algorithm* and the particular combination of external SRAMs, this scheme is not only compatible with conventional test system, but also improves the efficiency of the test system greatly at the same time. Through experiments on HgCdTe  $640 \times 512$  ( $15 \mu\text{m}$ ) IRFPA, the noise floor of the acquisition system is down to  $75 \mu\text{Vrms}$  and the calculation of various parameters can be completed in about 2 seconds. The data acquisition system is proved to be able to meet the demanding requirements for full IRFPA test and will have a great application prospect relatively to the traditional one.

**Key words:** infrared focal plane array (IRFPA); data acquisition; test system; high efficiency; low noise; RMS hardware algorithm; AD7626

**PACS:** 07.57.Ty

### 引言

大面阵、低噪声、制冷型红外焦平面探测器由于具有更高的分辨能力和更快的响应速度,在军事等领域的应用不断增加<sup>[1]</sup>.作为检验探测器性能的测试系统必须具有更高的数据处理能力和更低的本底噪声.目前红外探测器的分辨率高达 $1280 \times 1024$ ,读出噪声仅 $150 \mu\text{V}$ <sup>[2]</sup>.基于传统采集方法的红外测试系统中,大量原始像素数据交由软件统计计算,不仅数据传输量大,而且软件计算的开销也大;另外,

通用红外测试系统的分辨率一般为14位,输入参考噪声较高<sup>[3]</sup>,也达不到测试低噪声探测器的要求.

提高焦平面探测器的测试效率有两种途径,一种是提高数据传输的总线带宽,并利用乒乓传输,实现不丢帧的连续传输;在这方面,文献[4]采用了PCI-E总线实现了大量图像数据的高速突发传输,降低数据传输时间从而提高测试效率.另一种是改进采集方法,实现实时数据压缩传输,降低大量数据对传输带宽的要求,从而提高测试效率.文中选用第

二种途径,并提出了一种基于 FPGA 硬件压缩算法的红外图像数据采集方法.该方法在兼容传统采集方法的同时,利用“RMS 硬件算法”,实现了实时的数据压缩,一方面大幅缩减了传输的数据量,另一方面降低了后续软件的计算复杂度,使得测试系统的测试效率大幅提高.

为了降低测试系统噪声,利用 ADI 公司最新发布的高精度 ADC,设计了基于“RMS 硬件算法”的低噪声采集系统及数据分析软件.通过和传统方法对比,验证了该方法的可行性、正确性和高效性,完全能够满足通用红外测试系统实时、高效和低噪的要求.

## 1 原理与分析

红外焦平面的性能参数主要包括:像元 RMS 噪声  $V_N(i,j)$ 、像元响应率  $R(i,j)$ 、像元探测率  $D^*(i,j)$ 、噪声等效温差 NETD、噪声等效功率 NEP、有效像元率  $N_{ef}$ 、响应率不均匀性  $U_R$ 、相对光谱响应  $S_f(\lambda)$  等<sup>[5]</sup>.其中,相对光谱响应的测试,一般需要借助单色仪和标准探测器协同完成;其他参数的测试,基本可以归结为两种辐照条件(黑体温度分别为  $T_1$  和  $T_2$ )下响应电压的测试.测试方法不尽相同,但对原始数据的处理都是基于统计原理.具体来说,测试系统先采集连续  $F$  帧数据( $F \geq 100$ ),得到一定辐照下每帧的信号电压矩阵  $U_{DS}(i,j,T,f)$ ,然后对  $F$  帧数据进行平均,得到该辐照条件下第  $i$  行第  $j$  列像元平均信号电压

$$\bar{U}_{DS}(i,j,T) = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F U_{DS}(i,j,T,f) \quad (1)$$

最后,基于像元平均信号电压和一些已知参数计算各个性能参数.以其中最为基础的两个参数像元 RMS 噪声  $V_N(i,j)$  和像元响应率  $R(i,j)$  为例,它们的计算公式分别为

$$V_N(i,j) = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{1}{F-1} \sum_{f=1}^F [\bar{U}_{DS}(i,j,T_1) - U_{DS}(i,j,T_1,f)]^2} \quad (2)$$

$$R(i,j) = \frac{1}{K} \cdot \frac{\bar{U}_{DS}(i,j,T_2) - \bar{U}_{DS}(i,j,T_1)}{P_2 - P_1} \quad (3)$$

其中, $K$  是测试系统增益, $P_1$  和  $P_2$  是两种辐照条件下像元所受到的辐照功率,等式左边均省略了黑体温度.

传统的采集方法是将所有  $F$  帧的原始数据全部传输至电脑,由软件计算式(1),继而计算其他参数.这种方法虽然简单,但是数据传输量大,软件计

算冗繁.不仅对测试系统的带宽要求较高,而且测试效率也较低.

绝大部分参数的计算仅仅依赖于  $F$  帧的统计平均值——像元平均信号电压  $\bar{U}_{DS}(i,j,T)$ ,只有在噪声的计算公式中出现了采集的原始数据——各帧下的信号电压  $U_{DS}(i,j,T_1,f)$  时,噪声的计算公式又可以写成:

$$\begin{aligned} V_N(i,j) &= \frac{1}{K} \sqrt{\frac{1}{F-1} \left[ \sum_{f=1}^F U_{DS}^2(i,j,T_1,f) - F \cdot \bar{U}_{DS}^2(i,j,T_1) \right]} \\ &= \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\sum_{f=1}^F U_{DS}^2(i,j,T_1,f)}{F-1} - \frac{F}{F-1} \cdot \left[ \frac{\sum_{f=1}^F U_{DS}(i,j,T_1,f)}{F} \right]^2} \\ &= \frac{1}{K} \sqrt{\frac{A(i,j)}{F-1} - \frac{F}{F-1} \cdot \left[ \frac{B(i,j)}{F} \right]^2} \quad (4) \end{aligned}$$

其中,另  $A(i,j)$ 、 $B(i,j)$  分别表示第  $i$  行第  $j$  列像元信号电压的  $F$  帧“统计平方和”与“统计和”.这样,可以将原始数据转换成对应像元上的统计值,所有参数的计算都可以依赖这两个统计值得出.例如像元响应率可以写成

$$R(i,j) = \frac{1}{K} \cdot \frac{B(i,j,T_2) - B(i,j,T_1)}{F \cdot (P_2 - P_1)} \quad (5)$$

现在的 FPGA 非常适合高速乘加与流水操作,可以依靠采集前端的硬件电路完成对图像数据的实时统计操作.于是,提出并设计了一种基于 RMS 压缩算法的数据采集方法,其基本思想就是利用硬件电路完成对图像中每个像元上信号电压的统计平方和  $A(i,j)$  与统计和  $B(i,j)$  的计算,然后交由软件进行较为简单的处理,即可得到各个参数.最终,传输的数据将大幅压缩,软件的计算量也会大幅降低.

## 2 方法与设计

基于这种算法思想,并结合目前最新的高性能模数转换器,设计了一种高效高精度的红外图像采集方案,使得在验证高效性的同时,也能为测试系统提供最为精确的测试结果.该采集方案的硬件框图见图 1.其中,AD7626 为一款 16 位全差分型 ADC,最大采样率达到 10 MSPS,具有 8 V<sub>PP</sub> 差分输入范围和 LVDS 数字串行接口,动态范围高达 91.5 dB,静态噪声小于 0.6LSB( ~75 μV),主要面向高精度红外相机和测试系统应用<sup>[6]</sup>.存储器方面,选用了 Cypress 公司 1M × 16 位高速 SRAM——CY7C1061AV33-10,最小存取周期为 10 ns.并具有 USB2.0 和 VXI 双总线结构,以满足不同的系统需

求. 外部时钟和模拟信号均为全差分输入, 避免由整套测试系统地环路带来的额外的屏蔽线上的噪声<sup>[7]</sup>. 电路板使用6层板设计, 模拟和数字部分独立电源供电, 并分离地平面, 最大限度地降低数字部分对模拟电路的干扰.

传统的采集方法是将每帧图像依次传输至 PC, 这种传输可称之为“帧传输”, 通常采用乒乓传输技术. 文中讨论的这种图像传输方法, 是一种基于统计的传输, 由于其源于 RMS 的计算方法, 又称之为“RMS 传输”. 在“帧传输”模式下, 软件可以直观的实时的显示红外探测器输出的动态图像; 而在“RMS 传输”模式下, 则可以获取统计数据, 快速得到各项测试结果. 为了比较两种方法在同一总线带宽下的性能, 在设计中兼容了两种传输模式, 下文给出一种 SRAM 与 FPGA 之间特殊的总线连接方法并论述相应的 RMS 硬件算法及其时序.

## 2.1 存储器总线架构

该方法的基本思想是对模数转换后的 16 位数据按照像素对应的行列位置进行实时的统计, 当  $F$  帧采集完成, 就能得到每个像素点上的统计平方和  $A(i, j)$  和统计和  $B(i, j)$ . 为了最大限度减少软件计算量和硬件复杂度, 在逻辑上可以划分两个存储区, 一个存“平方和  $A(i, j)$ ”, 大小为  $1\text{ M} \times 40\text{ bit}$ , 另一个存“和  $B(i, j)$ ”, 大小为  $1\text{ M} \times 24\text{ bit}$ . 也就是说为了防止累加溢出, 在每个存储区基本位宽的基础上各扩展了 8 bit 位宽, 这样, 即使按照最坏情况考虑, 用于统计的样本数  $F$  最大也可达到 256 帧, 满足一般的红外测试规范中对统计样本数的规定<sup>[5]</sup>. 另外, 由于第三代大面阵红外探测器一般都是多通道读出, 而每通道实际图像大小一般都不会太大, 所以, 设计存储深度均为 1 M, 用于支持的每通道图像大小为  $1024\text{ pix} \times 1024\text{ pix}$ , 足以满足测试要求.

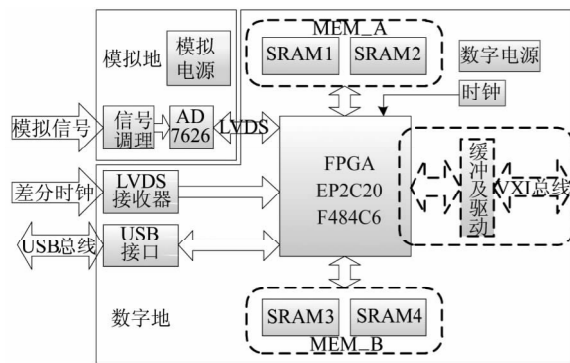


图1 红外焦平面数据采集系统硬件框图

Fig.1 Hardware diagram of the IRFPA data acquisition system

表1 RMS 模式存储空间片选表

Table 1 Table of memory chip select in RMS mode

统计量	CE1#	CE2#	CE3#	CE4#	BLE4#	BHE4#	数据总线
平方和	0	1	0	0	1	0	IO[39..0]
和	1	0	1	0	0	1	IO[23..0]

图2 给出了由4片 CY7C1061AV33 构成的存储器总线架构. 在“帧传输”模式下, SRAM1 和 SRAM2 组成 MEM A, SRAM3 和 SRAM4 组成 MEM B, MEM A 和 MEM B 具有相互独立的地址、数据总线, 用于组成乒乓读写空间, 实现乒乓帧传输, 最大限度利用总线带宽, 每帧最高可支持的像素大小为  $2048 \times 1024$ ; 在“RMS 传输”模式下, SRAM4 的高 8 位、SRAM3 和 SRAM1 构成  $1\text{ M} \times 40\text{ bit}$  存储空间, 用于存储“平方和  $A(i, j)$ ”, SRAM4 的低 8 位和 SRAM2 构成  $1\text{ M} \times 24\text{ bit}$  存储空间, 用于存储“和  $B(i, j)$ ”. 通过片选和高低位选择来控制依次写入或读取的统计量类型, 详见表 1.

## 2.2 RMS 硬件压缩算法

RMS 硬件压缩算法的基本思想, 就是对采集到的像素数据按照对应位置在上述两个存储区上依次实现统计和与平方和的累加过程. 具体的算法流程用 Verilog 语言实现, 设计中需要注意统计开始时内存的清空, 以及统计结束后 SRAM 内存总线从“RMS 统计模块”到“数据传输模块”的切换.

图3 给出了 RMS 硬件算法数据通道上的 RTL 电路图, 图4 给出了相应的时序图. 图中用  $n$  表示像素序号,  $f$  表示统计帧的序号. 所有下标为  $f-1$  的数据均是从内存中读出的上次的累加结果, 而下标为  $f$  的数据则是累加后的新数据, 需要重新写入内存对应位置. 整个算法是一个交叉流水线结构, 可以大致分为三个步骤:

(1) 读  $B$ , 读  $A$ , 代表信号为  $Rd\ B$ 、 $Rd\ A$ , 读出

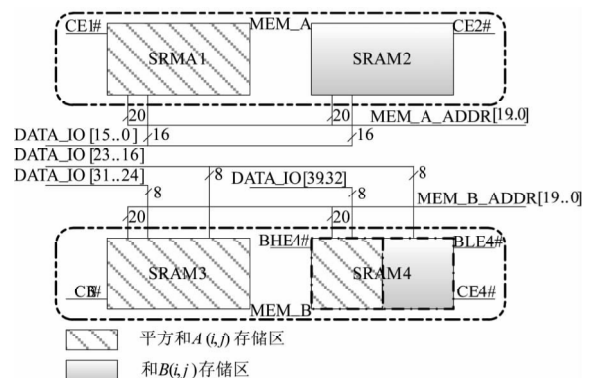


图2 RMS 硬件算法存储器架构

Fig.2 The memory architecture for RMS hardware algorithm

数据  $B(n)_{f-1}$  和  $A(n)_{f-1}$ ;

(2) 累加  $B$ , 累加  $A$ . 如图 3 中两个加法器所示, 累加后得到新的和  $B(n)_f$  与平方和  $A(n)_f$ ;

(3) 写  $B$ , 写  $A$ . 代表信号  $Wr_B$ 、 $Wr_A$ , 写入数据  $B(n)_f$  和  $A(n)_f$ .

在完成第一步的同时对 16bit 像素数据  $Pix\_data$  进行锁存和平方操作, 其中用到 ALTERA 提供的 LPM\_MULT 乘法器模块, 其内部使用两级流水线, 以提高工作时钟频率.

从时序图中可以看出, 完成一次统计和与统计平方和的累加过程只需要消耗 5 个时钟周期, 内存的数据总线上会有一个时钟周期的空余. 这是因为为了保证 FPGA 的 IO 时序, 需要添加 IO Register, 这样, 所有从 SRAM 读出的数据需要锁存一次才能参与运算, 如图 4 中箭头所示. 由于 AD7625 最高采样率 10MSPS, 且外界提供采样时钟和内部  $clk$  的相位关系是随机的, 所以  $clk$  的工作频率必须在 50 M 以上, 并留有一定余量. 实测对于 10 MHz 外部采样时钟, 该算法的主时钟在 55 MHz 下即可稳定工作. 而最高频率受限于外部 SRAM 的读写周期(10 ns).

### 2.3 软件

数据采集和分析软件是基于 VC++6.0 编写的, 可实现两种传输模式的切换、图像处理 and 显示、采集设置和触发、参数统计计算以及数据的保存等. 采用多线程技术和模块化编程, 具有运行速度快, 可

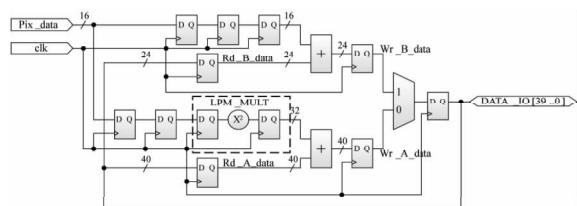


图 3 RMS 硬件算法 RTL 图  
Fig.3 RTL diagram of the RMS hardware algorithm

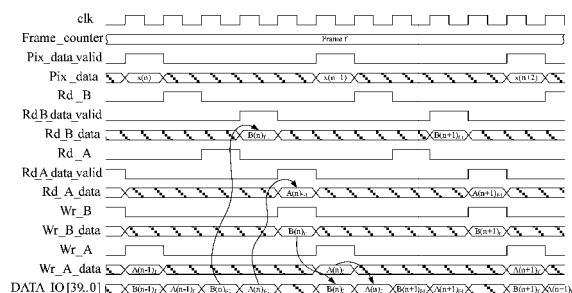


图 4 RMS 硬件算法时序图  
Fig.4 Timing waveform of the RMS hardware algorithm

维护性好等特点. 和一般的采集方法获取的数据不同, 在 RMS 传输模式下, 软件获取的平方和数据有 40 位, 超出了 32 位 PC 可以表示的整数, 编程中可以分成低 32 位和高 8 位分别转换成浮点数再相加得到由浮点形式表示的电压平方和, 再参与计算.

### 3 测试与评价

该采集系统由于使用了高性能 16 位 ADC, 其本底噪声非常低. 使用高精度可调偏压基准<sup>[8]</sup> 对该采集系统进行了静态噪声测试, 其中采集系统模拟带宽为 15 MHz. 如图 5 所示, 在整个输入范围内 (-4 V - +4 V), 其本底噪声都在 75  $\mu$ Vrms 以下, 达到 AD7626 的静态指标. 图中所示放大图为输入电压正好处于模数变换的跳变点附近, 实测噪声为 70.13  $\mu$ Vrms, 已经是噪声最差情况. 另外, 测试时分别使用了帧传输模式和 RMS 传输模式, 两种传输方法给出的平均电压和噪声指标完全一致, 证明了新方法的正确性.

图 6 给出了不同图像大小, 两种采集方法的测试时间对比图, 其中总的测试时间由采集传输时间和软件计算时间组成. 由于在 10MSPS 采样率下, 数据率为 20 MByte/s, 接近 USB2.0 的传输速率, 但是由于受到软件编程和操作系统的调度等影响因素, 传输过程中会出现丢帧情况, 从而必须等待采集下一帧数据, 所以“帧传输”模式下传输速度将明显受限. 尤其在多通道应用时, 数据率将成倍增加, 这种现象更为明显. 而使用 RMS 传输方法, 数据在采集完成后一次传输完毕, 不论是单通道还是多通道, 不仅传输的数据量相对较小, 而且不存在等待帧头的过程, 传输速度在大面阵时有明显优势. 所以, RMS 传输方法更加有利于多通道采集系统的集成.

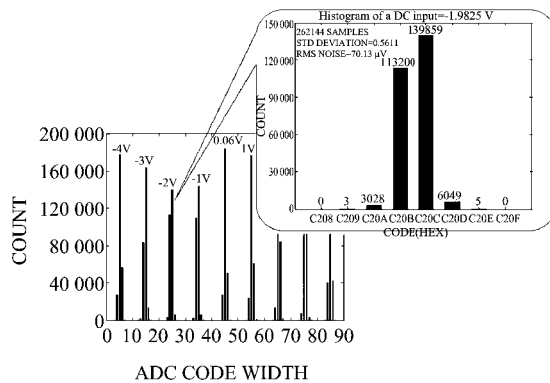


图 5 采集系统噪声统计直方图(多种输入电平)  
Fig.5 Noise histogram of acquisition system (multiple input level)

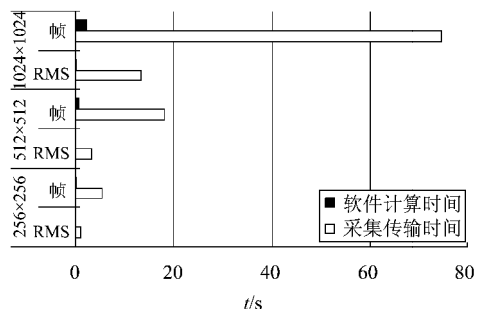


图6 10 MSPS 采样率下两种方法的测试时间比较图  
Fig.6 Comparison chart of the test time of two methods at sampling rate of 10 MSPS

如果配合大容量动态内存,采用全部采集完成后传输的办法,比较而言,在相同的总线带宽下,由于数据量的大小不同,RMS 传输仍然具有一定优势.另外从图中可以看出,由于当今计算机技术的不断发展,软件计算的时间消耗已经不是主要矛盾,但是由于“RMS 传输”在原理上具有硬件压缩的特点,对软件的依赖和所受的影响更小,直接降低了系统对数据传输带宽的要求,为提高系统效率提供了一条更为根本的途径.

结合文献[8]、[9]中介绍的偏压板和时钟板的基本原理,图7显示了一套基于该采集方案的实验用测试系统,并配合 HgCdTe 型  $640 \times 512 (15 \mu\text{m})$  的 IRFPA 进行了实验测试,其中左下角为软件的图形界面.当使用 RMS 传输模式,测试效率明显提高,对 RMS 噪声等基本参数的计算,仅需要 2 秒即可完成,而使用帧传输模式,则要 10 秒以上.另外,实验表明,关闭探测器电源后的测试系统本底噪声仍小于  $75 \mu\text{Vrms}$ .

表2给出了在相同的测试条件下,分别使用 HGH 系统和本系统(利用 RMS 模式)测得的上述探测器主要性能指标的比较结果.测试表明各项指标

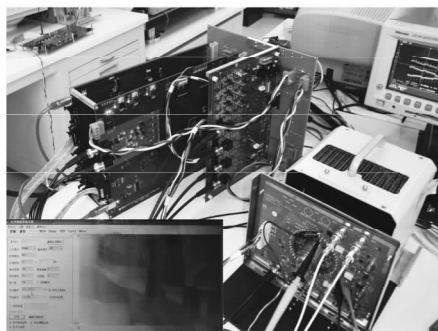


图7 IRFPA 测试系统联调实验与软件界面  
Fig.7 Experiment of IRFPA test system and software interface

基本一致,新方法准确可靠.而且由于采用了高性能的 ADC,噪声和 NETD 值的测量更为准确,更适合作为低噪声探测器的测试系统.

表2 本系统和 HGH 系统的 IRFPA 测试结果比较  
Table 2 The IRFPA test results vs. HGH system

GPOL=800 mV	响应率/ $\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$	探测率/ $\text{cmHz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	NETD/ mK	噪声/ mV	盲元/ 个
HGH 系统	$3.61\text{E}+08$	$1.26\text{E}+10$	16.70	0.562	2933
本系统	$3.55\text{E}+08$	$1.30\text{E}+10$	13.20	0.539	3214

## 4 结论

提出了一种新颖的用于红外焦平面测试的数据采集方法,并配合高精度 ADC 实现了基于该方法的单通道采集系统.根据测试结果的对比分析,该方法相对传统方法对总线带宽的依赖较小,数据传输更为高效,简化了软件计算,可以最低的成本扩展成多通道,更加有利于提高测试速度.同时,系统的本底噪声较低,测试精度较高.因此,随着焦平面技术的不断提高,该采集方法可以作为高效高精度测试系统重要组成部分,具有较好的应用前景.

目前,软件的实时显示帧率只有 10 fps 左右,虽然能够满足测试系统实时监测探测器输出状态的需求,但是为了能让图像刷新更为流畅,考虑在软件的多线程编程中将绘图从数据获取线程中分离出来,从而在绘图的同时获取下一帧数据,提高总线利用率,最终提高图像的实时显示帧率.

## REFERENCES

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9): 1101-1144.
- [2] Sofradir Corp. Datasheet of JUPITER-MW 1028  $\times$  1024 HgCdTe compact infrared focal plane assemblies[OnLine]. [2009]. <http://www.sofradir.com>.
- [3] Campos T. Test bench for infrared detectors[C]. *In Conference of Infrared components and their applications*, Beijing, Proc. SPIE, 2005, 5640: 183-192.
- [4] Liu Z J, Jiang Y D, Zhu H B, et al. A novel test bench for UFPA[C]. *Photonics and Optoelectronic (SOP)*, 2010, Chengdu. pp. 1-3.
- [5] National Standardization Technical Committee. GB/T 17444-1998. *The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays*[S]. Beijing: China Standard Press. (中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 17444-1998. 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范. 北京: 中国标准出版社, 1998-07-18).
- [6] Analog Device Inc. Datasheet of AD7626 [OnLine]. [2009]. <http://www.analog.com>.

(下转 371 页)