

ASIC 技术在长线列 TDI 红外探测器中的应用

韩冰^{1,2}, 陈忻^{1,2}, 饶鹏^{1,2}, 林长青^{1,2}, 孙胜利^{1,2}, 李璐芳^{1,2}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 针对长线列红外时间延迟积分(TDI, Time Delay Intergration)探测系统面临通道多、噪声大、体积大、质量重、功耗大等问题, 提出了利用专用集成电路 (ASIC, Application Specific Integrated Circuit)方法解决长线列红外 TDI 探测读出电路中面临的问题。通过实现由一款全定制 ASIC 芯片(8 路红外信号调理芯片)和红外 TDI 探测器构建的红外探测扫描成像系统验证 ASIC 芯片可以解决长线列红外 TDI 探测系统中所面临的上述问题, 整个系统噪声为 1.42 mV, 功耗为 0.72 W。实现了读出电路的高集成化, 减少设计复杂度和工作量, 为微型化、小型化航天遥感卫星研发提供技术支持和实践基础。

关键词: ASIC; 长线列 TDI 探测器; 扫描成像系统

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1733-06

Applications of ASIC in the long array column of infrared TDI detector

Han Bing^{1,2}, Chen Xin^{1,2}, Rao Peng^{1,2}, Lin Changqing^{1,2}, Sun Shengli^{1,2}, Li Lufang^{1,2}

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: There always exist some challenges in long array column infrared Time Delay Integration(TDI) detecting system, such as large number of channels, high noise and power dissipation. To solve those problems mentioned above, a new solution was proposed to improve the performance of infrared TDI detecting system with Application Specific Integrated Circuit (ASIC) chip (eight-channel signal conditioning chip). Meanwhile, it helped to light the weight and reduce the system volume. In the system, the noise and dissipation both reduced to half than before. The average noise of system was 1.42 mV with power of 0.73 W. More higher integration was achieved by Readout Integrated Circuit (ROIC), design complexity and workload were reduced. It provides technical support and practical foundation for micro miniaturization aerospace remote sensing satellite development.

Key words: ASIC; long array column TDI; scanning imaging system

收稿日期: 2014-10-07; 修订日期: 2014-11-17

作者简介: 韩冰(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电子学系统和信号处理研究。Email: hanbing_message@sina.com

通讯作者: 饶鹏(1977-), 男, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为空间遥感。Email: raopeng@mail.sitp.ac.cn

0 引言

近年来,随着微电子技术的迅猛发展,大规模、超大规模集成电路,以其高超的性能、低廉的价格和优越的稳定性、可靠性在电子技术领域应用越来越广泛,特别是发展迅速的专用集成电路(ASIC, Application Specific Integrated Circuit),包括现场可编程门阵列(FPGA)和可编程逻辑器件(EPLD)等,使大部分分立器件和通用集成电路组被一块或几块的 ASIC 芯片所替代,可以极大地压缩电路板和整机的体积,减少所需元件的种类和数量,是实现系统集成化、小型化和提高可靠性的有效途径。用 ASIC 替代通用集成电路构建现代电子系统,可以克服调试工作量大、体积和质量大等诸多问题^[1-2]。

红外 TDI 探测系统正朝着大型化和微型化这两个相反的方向发展,因此一个功能强大体积小、小型化红外探测系统中将电子系统集成成为片上系统是唯一的技術选择^[3]。因此,在红外探测系统中采用 ASIC 势在必行。长线列红外 TDI 探测系统面临通道多、信号调理复杂、电路噪声要求高、可靠度高等问题,传统分立器件电路设计导致面积大、噪声大、功耗大、性能低等不足。因此在红外探测系统设计中采用 ASIC 及相关设计技术,可以明显地消减红外探测系统的质量、体积、功耗,提高系统的整体性能,降低研制费用^[4]。文中采用全定制 ASIC 芯片(8 路红外信号调理芯片)和 512×8 的红外 TDI 探测器设计一套高集成红外 TDI 探测系统,验证 ASIC 技术在长线列红外 TDI 探测器系统中应用的可能。

1 长线列红外 TDI 探测系统介绍

传统长线列红外 TDI 探测系统结构如图 1 所示,包括模拟信号采集电路、减偏置电路、放大电路、ADC 电路、电源管理、信息处理单元、上位机接收电路^[5-6]。由于红外 TDI 探测系统的不断发展,通道数量不断增多,传统设计方法导致设计面积变大、信号噪声变大、功耗变大、性能严重降低,同时带来开发难度大、调试周期长、可靠性降低等问题。

针对传统长线列红外 TDI 探测系统面临的瓶颈,文中利用 ASIC 技术设计并实现红外探测系统,

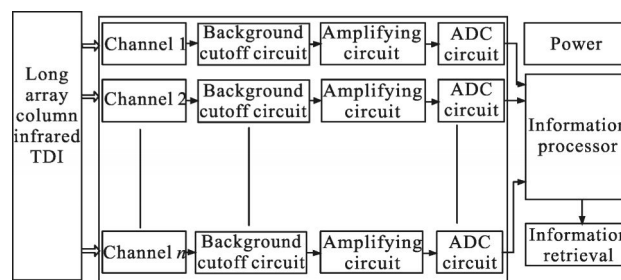


图 1 传统红外 TDI 探测系统

Fig.1 Traditional infrared TDI detecting system

采用全定制 ASIC 芯片(8 路红外信号调理芯片)设计红外 TDI 探测系统,其系统结构如图 2 所示。传统红外 TDI 探测系统中的多通道采集、减背景、放大电路、ADC 利用 ASIC 技术集成,使设计结构简单、降低复杂度、减少面积、降低噪声。

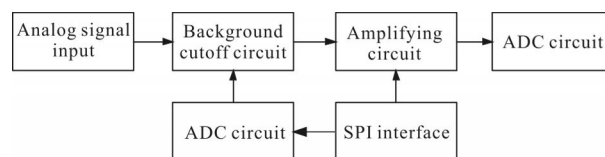


图 2 ASIC 的红外 TDI 探测系统

Fig.2 Infrared TDI detecting system with ASIC

1.1 8 路红外信号调理芯片

为提高红外扫描相机前端红外信号调理电路的集成度和可靠度,降低电子学对整机功耗、尺寸、重量的需求,降低接口的复杂度,利用全定制 ASIC 技术设计一款 8 路红外信号调理芯片,该芯片同时具备对 8 个通道的模拟信号进行相关双采样、信号相减、减背景、放大处理功能,放大倍数可调,每个通道的最大采样速率 3 MP/s,采样位数 12 Bit,共模抑制比达到 80 dB,能满足高性能红外信号采集的需求。通过 SPI 接口对芯片的工作状态进行设置,8 个通道独立可调增益,并可回读工作参数。当红外信号输入 ASIC 芯片时,首先进入到对应通道的采样保持电路中,然后在减法电路中减去 DAC 模块输出的背景信号幅值,背景信号为动态输入,可由数字处理模块对信号的背景进行实时估计,通过 SPI 接口进行配置。去除背景的信号进入放大电路,对应到每个通道的不同输入信号,该芯片的功能框图如图 3 所示。

ASIC 芯片的 8 个通道中每个通道中包含了一个采样保持电路、一个 12 位 DAC、一个 PGA。当其

中 PGA 增益为 32 档可调,电平和背景可通过 D/A 调节,A/D 最高转换速率 24 MSPS,其功能结构如图 4 所示。

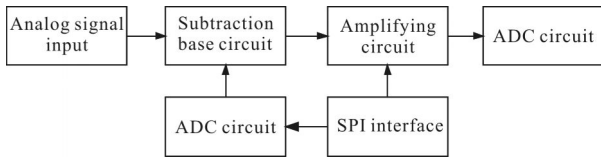


图 3 8 路红外信号调理芯片功能框图

Fig.3 Function of eight-channel signal conditioning chip

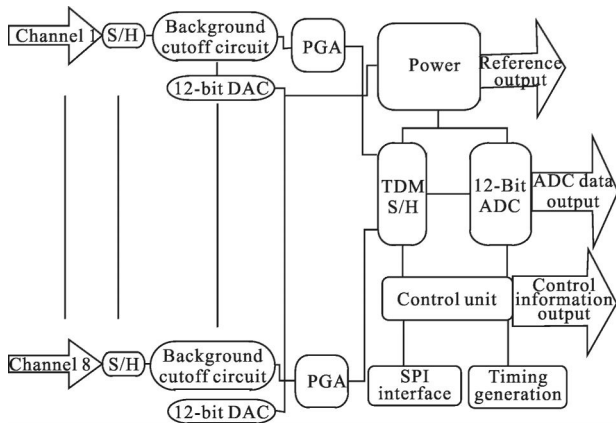


图 4 8 路红外信号调理芯片功能结构

Fig.4 Implementation scheme of eight-channel signal conditioning chip

1.2 长线性红外 TDI 探测器结构

红外 TDI 探测器在航天星载中广泛应用,TDI 技术是一种延迟积分技术^[7],可以在不改变积分时间和红外相机相对孔径下提高系统信噪比,提高目标的探测能力。航天星载视场覆盖越来越广^[8],导致红外 TDI 探测器线列不断增长,长线性、超长线性红外 TDI 探测器需求增大^[9]。文中采用中国科学院技术物理研究所生产的红外 TDI 探测器,以 HgTeCd 外延薄膜材料研制中波/短波红外敏感元阵列芯片、Si CMOS 技术研制双波段 TDI 读出电路^[10]、多芯片钢柱倒焊互联技术研制 512×8 中波/短波双波段探测器子模块;以 n 个子模块交叉拼接方式研制双波段长线性焦平面探测器;以 512×8 子模块交叉拼接构成超长线性焦平面探测器,其结构如图 5 所示。

探测器的具体参数如表 1 所示,该探测器响应波长为 3~5 μm,最终信号输出有效电压范围 ≥2 V,读出电路噪声 RMS 值为 0.38 mV,动态范围约为 74 dB,最大工作频率 8 MHz。

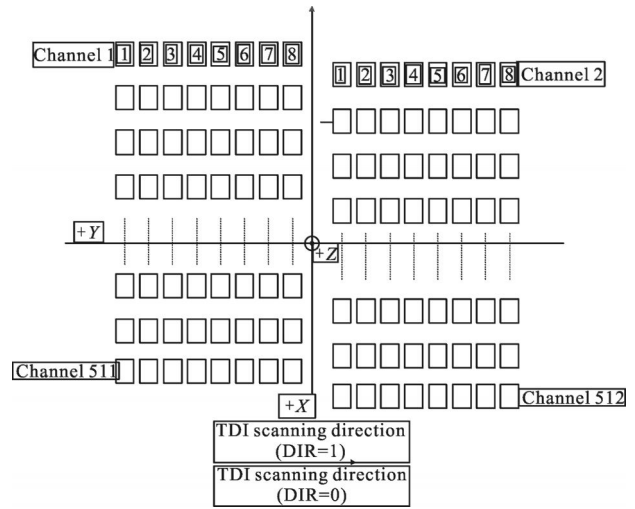


图 5 512×8 红外 TDI 探测器光敏元排列结构图

Fig.5 PV array topology of 512×8 infrared TDI detector

表 1 512×8 红外 TDI 探测器性能参数

Tab.1 Characteristic of 512×8 infrared TDI detector

TDI detector features	HgCdTe
Detector spectral response/μm	3-5
Format	512×8
Pixel pitch/μm×μm	24×33
Pixel space/μm×μm	28×56
Max frequency rate/MHz	8
Dynamic range/dB	74

2 基于 ASIC 的红外 TDI 系统设计

红外 TDI 探测器数据采集系统主要完成 TDI 中波红外探测器的偏置电压提供,驱动信号产生,探测器输出数据的调理、采集、处理及传输。整个系统由 ASIC 技术实现 8 路红外信号调理芯片、FPGA 核心处理芯片及其外围电路组成。根据功能的不同,可分为模拟信号处理与数字信号处理两部分,整个系统结构框图 6 如下。

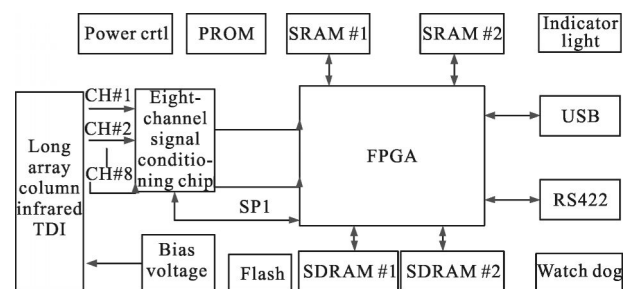


图 6 基于 ASIC 的红外 TDI 探测器采集系统

Fig.6 Implementation scheme of infrared TDI system with ASIC

模拟信号处理电路主要提供 TDI 探测器工作所需的偏置电压,同时完成对探测器输出的两路信号的放大,减背景,采样数字化等工作。数字部分主要完成探测器驱动信号的产生,控制数字化后的红外信号的采集、预处理、数据传输以及对应外围电路的驱动工作。处理完毕的图像数据,通过 USB 接口传输至上位机进行进一步处理和分析。

2.1 偏置及信号调理电路设计

512×8TDI 探测器共需要提供 5 种直流工作电压。其中有 3 种需要电压可调的探测器偏置电压和两种固定的探测器供电电压,探测器所需电压如表 2 所示。由于 TDI 探测器对供电电源和偏置电压的噪声和稳定性要求较高,偏置电压对于光敏二极管

的工作状态起决定性作用,直接影响探测器的响应电流和动态范围,因此应该尽可能地提高其稳定性,即减小其温度漂移、时间漂移等影响因素。因此在设计中,选择采用精密参考源为探测器的偏置电压供电,并通过精密电位器与高精度运放对电压进行调节,其设计原理图如图 7 所示。

表 2 512×8 红外 TDI 探测器偏压参数

Tab.2 Power supply of 512×8 infrard TDI detector

Name	Features	Value/V	Typical value	Noise
V_g	Bias voltage	1-1.5	1.3	$\leq 100 \mu\text{V}$
V_{ref}	Ref voltage	3.9-4.1	4	$\leq 100 \mu\text{V}$
V_b	Bias voltage	0.1-0.5	0.3	$\leq 100 \mu\text{V}$
V_{dt}	Digital power	5	5	$\leq 10 \text{mV}$
V_{dth}	Analog power	5	5	$\leq 1 \text{mV}$

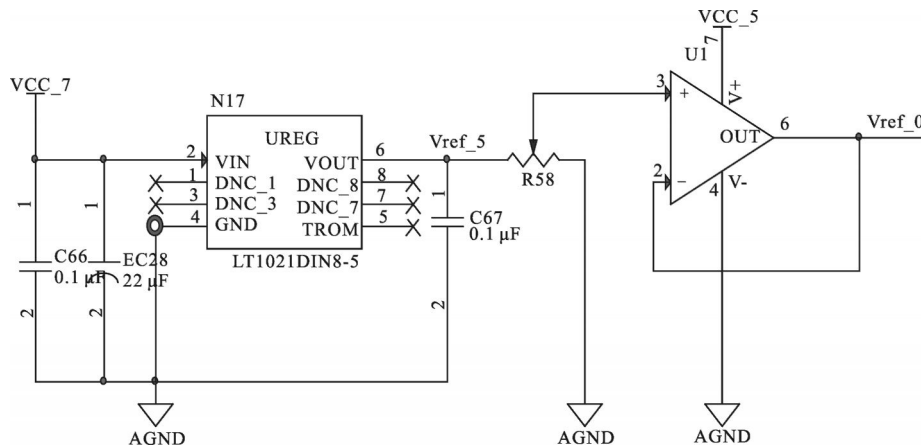


图 7 偏置电压电路图

Fig.7 Electric circuit of bias voltage

512×8 红外 TDI 探测器输出信号范围为 0.5~2.0 V, 动态范围为 74 dB。整个模拟信号的调理电路选用高集成度红外前端读出 ASIC 芯片(8 路红外信号调理芯片)。由于探测器输出分为奇偶两路,因此单片 ASIC 芯片可以同时完成对 4 个该类型探测器的采样处理。电路向红外探测器发出扫描信号时,被读入的 8 个通道的红外信号输入到各个采样保持电路中,与此同时系统外部的 8 路数字背景信号都输入到对应的 DAC 中,半个扫描周期后红外信号与 DAC 信号相减,输出到后续的 PGA 电路中。经过 PGA 放大之后经过分时复用采样保持电路之后,输出到分时复用的 ADC 中,最后形成 12Bit 数字信号输出。

2.2 FPGA 信号处理软件设计

FPGA 实现系统信号管理和控制,主要功能包

括:TDI 探测器驱动模块、ASIC 前端读出芯片驱动模块、盲元剔除、品字形校正模块、非均匀校正模块、USB 数据通信模块、UART 指令通信模块和 SDRAM 通信驱动模块,其 FPGA 设计功能框图如图 8 所示。

系统工作流程如下:上位机通过 UART 发送积分时间和帧周期等相关参数给探测器驱动模块使探测器正常工作,ASIC 前端数字采集芯片接收探测器数据和背景数据相减并发送到 FPGA,完成盲元判断、品字形校正、非均匀校正,最后通过 USB 端口传输给上位机,其中 SRAM、SDRAM 和 FLASH 配合各功能实现临时数据存储。探测器驱动时序如图 9 所示,cp 探测器工作时钟、start 为起始帧使能、D_C 电荷转移控制信号、frame 积分时间、dir 电荷转移方向和两路数据输出。8 路红外信号调理芯片时序如图 10 所

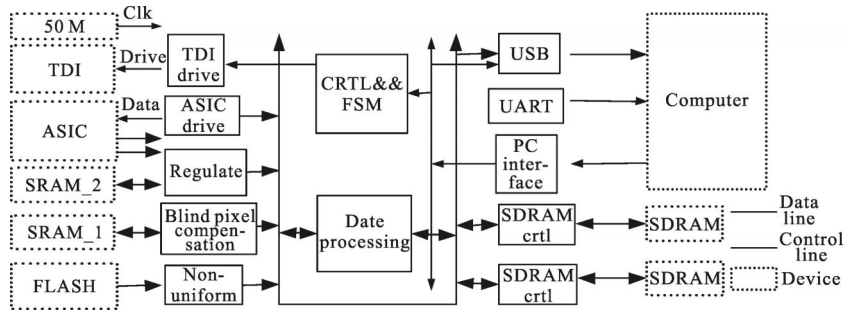


图8 系统FPGA功能框图

Fig.8 Implementation scheme of FPGA

示,CLK为ASIC工作时钟;IR_SCAN为ASIC电路发给探测器的扫描时钟;IN1~IN8为8通道的扫描红外信号;DA_INT为ASIC发给的DAC数据输入终端信号;DA_IN[11:0]为系统给ASIC的12位并行数据;FPGA给出DA_WR信号并配合输入信号

DA_IN将背景信号送入ASIC;AD_INT为ASIC向系统输出的ADC数据输出中断申请信号;AD_WR为ADC数据输出控制信号;D[11:0]为ASIC输出数据。

3 系统成像及结果

3.1 系统成像实验

文中搭建成像系统如图11所示,包括光学镜头(参数见表3)、一维转台、TDI探测器和电子学读出电路。根据光学系统和转台参数确定TDI探测器工作参数如表4所示。实验方法如下:水平放置于光学平台上,制冷方式采用液氮制冷,上位机通过UART配置TDI探测器工作参数,并控制转台匀速摆扫,图像数据通过USB接口传输到上位机并进行显示。

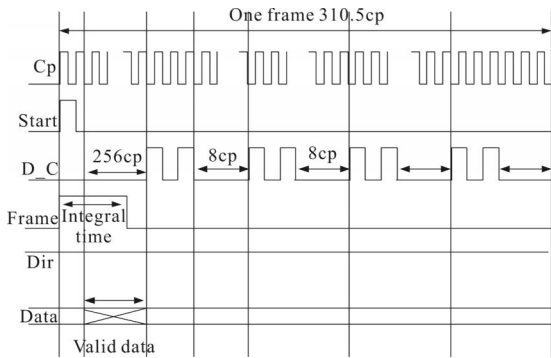


图9 红外TDI探测器驱动时序

Fig.9 Timing diagram for 512x8 ROIC key signals

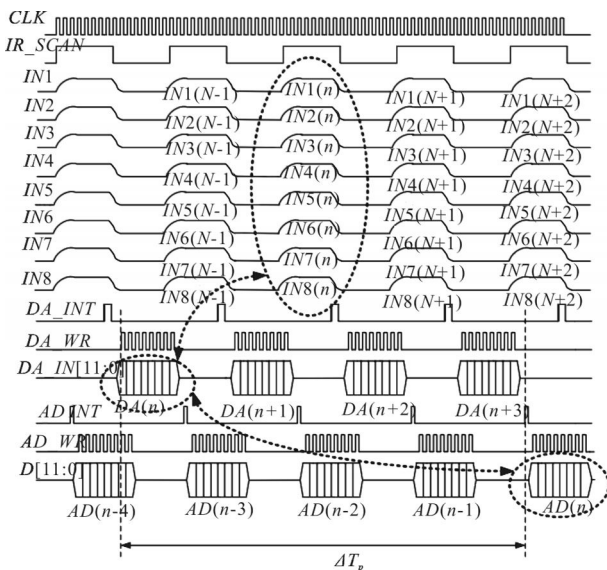


图10 8路红外信号调理芯片时序

Fig.10 Timing diagram for ASIC key signals

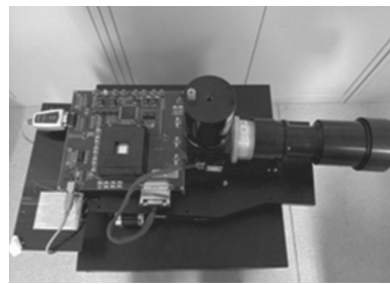


图11 实验成像系统

Fig.11 Experimental system

表3 实验用的光学系统参数

Tab.3 Optical parameters of experiment

Optical parameter	Value
Optical aperture/mm	25
Spectral response/ μm	2-5
Focal length/mm	50
F	2

表 4 512×8 TDI 探测器工作参数

Tab.4 Operating parameters of 512×8 infrared TDI detector

Items	Value
Clock/kHz	500
Integral time/ μ s	400
IFOV/($^{\circ}$)	0.032 1
Scanning speed/($^{\circ}$ /s)	20
Frame period/ μ s	1 605

3.2 实验结果

利用 AWG 产生测试信号对采集系统的电子学性能进行测试。两个通道的 RMS 噪声水平,分别为 1.43 与 1.31 个 LSB,对 12Bit 采集系统而言,1 个 LSB 约为 1 mV,因此两个通道的 RMS 噪声水平为 1.43 mV 和 1.31 mV。因此整个采集系统的动态范围可达到 70 dB,满足应用需求。基于 ASIC 的红外探测器成像系统功耗为 1.45 W(双通道),1 块 ASIC 芯片实现多通道采集,可以同时连接 4 个探测器 8 个通道,降低了复杂度和体积,与传统红外 TDI 系统性能比较如表 5 所示。利用该系统进行成像实验,工作正常,图像清晰,如图 13 所示。

表 5 两种系统性能比较

Tab.5 Comparison of different system

	ASIC	Traditional
Area	3 cm×3 cm	15 cm×15 cm
Noise	1.42 mV	2.49 mV
Power dissipation	0.72 W	1.23 W
Development period	Short	Long
Complexity	Low	High

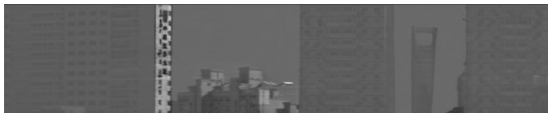


图 13 成像效果

Fig.13 Infrared image

4 结论

文中结合 ASIC 芯片实现了对红外 TDI 探测器

成像验证,证明 ASIC 技术在红外 TDI 探测器领域有很好的应用价值。ASIC 芯片可以解决红外 TDI 探测系统通道多、噪声大、体积大、质量大、功耗大等不足。ASIC 芯片系统和传统分立器件系统相比减少了硬件的复杂度和设计成本,把工作量转移到软件设计中,使得设计更灵活方便。

参考文献:

- [1] Du Wenzhi, Tan Weichi. Research on realization of ASIC in Chinese spacecraft[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2002, 22(5): 31–37.
- [2] Jian Xianzhong, Pei Yuntian, Sun Shengli, et al. AMCT1024 IRFPA scanning and imaging system[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(5): 17–19.
- [3] Markus Loose, Edward Cheng, James Lohr, et al. Control electronics for large mosaics of SIDE CAR ASIC driven detectors[C]//SPIE, 2012, 8453: 84531Q.
- [4] Dirk Meier, Hans Kristian Otnes Berge, Amir Hasanbegovic, et al. Development of an ASIC for the readout and control of near-infrared large array detectors[C]//SPIE, 2014, 9154: 915421.
- [5] Sizov F F, Derkach Y P, Korinets S V, et al. 576×6 ROIC for MCT LWIR arrays[C]//SPIE, 2005, 5726: 140–145.
- [6] Jin Weiqi, Wang Chunyong, Zhang Nan. Study on sub-pixel processing algorithm for scanning FPA thermal maging system [J]. *Infrared Millim Waves*, 2005, 24 (4): 261–264. (in Chinese)
- [7] Pan Shengda. Study on the information processing technology of infrared TDI scanning camera [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, 2013.
- [8] Wu Zheng, Lu Jianming, Bai Piji, et al. Comparison and analysis of LW MCT IR FPA in Russian and major western developed countries [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(5): 291–296.
- [9] Lepage G. CMOS long linear array for space application[C]// SPIE IS&T Electronic Imaging, 2006, 6068: 299–302.
- [10] Dong Meifeng, Chen Xing, Qiu Guangyin, et al. The characteristic analysis and optimization design for HgCdTe TDI infrared detector array[C]//SPIE, 2011, 8193: 1–9.