光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241125001

一体化红外成像系统中的红外图像处理SoC设计

邓　军*，黄晓宗，陈　霜，张　浪，付驿如，陶　毅，
陈相洪，陶家园，李健壮，黄文刚
（中国电子科技集团公司第二十四研究所，重庆 400060）

摘　要： 随着红外成像技术在夜间监控、工业检测等领域的广泛应用，对红外成像系统提出了一体化应用需求。文章设计了一款面向红外成像系统一体化应用的红外图像处理系统级芯片（SoC），该芯片集成了CPU、红外图像处理协处理器及专用外设控制接口等，可单片实现红外探测器控制、红外图像采集、自适应非均匀校正、自适应盲元识别补偿、图像增强等实时图像处理，从而简化了红外成像系统中的红外探测信号处理系统结构，降低了其功耗和成本，为红外成像系统一体化设计的实现奠定技术基础。芯片采用40 nm CMOS工艺实现，尺寸为4 000 μm×6 800 μm。测试结果表明，经过该芯片处理后，图像非均匀性和盲元率可分别降低到0.14%和0.19%，红外图像处理效果满足预期要求。

关键词： 红外图像；红外图像处理；系统级芯片
中图分类号： TN492　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0464－06

Design of A SoC Chip for Infrared Image Processing in Integrated Infrared Imaging System

DENG Jun, HUANG Xiaozong, CHEN Shuang, ZHANG Lang, FU Yiru, TAO Yi,
CHEN Xianghong, TAO Jiayuan, LI Jianzhuang, HUANG Wengang
(**The 24th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: With the widespread application of infrared imaging technology in fields such as night vision surveillance and industrial inspection, there is increasing demand for integrated infrared imaging systems. This paper presents the design of an infrared image-processing System-on-Chip tailored for integrated infrared imaging applications. The chip integrates a CPU, an Image Signal Processing co-processor, and dedicated peripheral control interfaces, enabling the monolithic implementation of real-time functions, including infrared detector control, image acquisition, adaptive non-uniformity correction, adaptive blind pixel recognition and compensation, and image enhancement. This integration significantly simplifies the architecture of the infrared detection signal processing system, reduces power consumption and cost, and provides a technical foundation for realizing integrated infrared imaging systems. Fabricated using a 40-nm CMOS process, the chip occupies an area of 4 000 μm × 6 800 μm. Experimental results demonstrate that the chip achieved a post-processing non-uniformity of 0.14% and blind pixel rate of 0.19%, meeting the expected requirements for infrared image processing performance.

Key words: infrared image; image signal processing; System-on-Chip

收稿日期：2024－11－25.
***通信作者：**邓　军

0　引言

红外成像技术作为一种重要的非接触式测量方法，在医疗诊断、夜间监控及工业检测等领域发挥着重要作用。随着该技术的不断进步和应用需求的日益增长，红外成像系统的一体化设计成为当前研究的热点[1]。一体化设计旨在通过高度集成化的硬件架构，实现红外成像系统的小型化和轻量化，以满足现代应用对便携性和实时性的需求。

红外图像处理的集成化设计是实现红外成像系统一体化的关键要件之一。目前红外成像系统往往采用多个分立元件（DSP或FPGA等处理器）进行图像预处理，如天津津航技术物理研究所的谢轲基于FPGA设计的非制冷型热像仪[2]，北京工业大学的胡国琦采用DSP设计的非制冷型红外成像系统[3]等。这种分立器件设计方案不仅增加了系统的复杂性和制造成本，还限制了系统的集成度和性能提升。随着CMOS技术的进步和超大规模集成电路设计水平的提高，在单芯片上实现红外图像校正、噪声抑制和图像增强等处理功能已成为可能[4]。

本文设计了一种支持红外成像系统一体化的红外图像处理系统级芯片（SoC）。通过将红外探测器监测/控制、红外图像采集、红外图像处理ISP及数据传输等功能集成在一个单芯片上，实现了红外成像系统中的图像处理高度集成化设计，从而简化了红外成像系统中的红外探测信号处理系统结构，降低了其功耗和成本，为红外成像系统一体化设计的实现奠定了技术基础。

1　红外探测信号处理系统

红外成像系统中的红外探测信号处理系统主要由红外探测器系统和红外信号处理系统组成，如图1所示，其中的红外信号处理系统主要包括红外模拟信号调理模块、数字信号处理模块以及电源管理模块[5-6]。

红外探测目标的热辐射特征经由光学组件聚焦在红外探测器焦面上，红外探测器在红外信号处理系统控制下输出原始的红外模拟信号；红外信号处理系统中的红外模拟信号调理模块对红外探测器输出的原始模拟信号进行信号调理处理，模拟信号调理模块主要功能是对探测器输出的模拟调理信号进行低失真增强放大，并将转换后的信号进行模数转换，变成可供数字信号处理器主控芯片可处理的高速数字信号。由于制冷型焦平面红外探测器经低温冷却后，响应时间缩短，灵敏度提高，响应波长范围扩展，同时受限背景噪声降低，模拟信号调理模块需要同步对红外探测器的工作温度进行实时监测，只有当探测器达到合适低温后才进行图像信号的采样工作。数字信号处理模块的主要功能是控制红外探测器工作状态并同步接收前级信号调理模块输出的原始数字图像数据，对原始数字图像数据进行自适应非均匀校正、缺陷元识别与补偿、图像均衡等图像预处理及输出，并根据模拟信号调理模块中的信号采集单元反馈的温度数据同步标定红外探测器的工作环境。电源管理模块则负责对系统内各模块供电以及对探测器进行偏置驱动等。

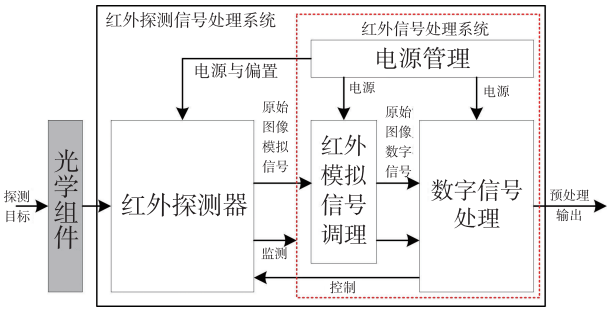


图1　红外探测信号处理系统

2　红外图像处理SoC系统架构设计

为简化红外成像系统红外探测信号处理系统结构并满足红外成像系统一体化的应用需求，设计了一种集成红外探测器监测、探测器偏压驱动控制、探测器时序控制、红外模拟信号调理控制与红外图像数字信号采集、传输和图像处理等模块的SoC。该芯片的系统架构如图2所示，以AMBA为总线，ARM Cortex-M0为CPU内核，片内集成红外图像预处理ISP协处理器、DMA、SRAM、PLL、LDO、SPI Flash控制器、通用外设接口和专用外设接口[7]。通用外设接口包括了UART、SPI、GPIO、TIMERs/WDT等，专用外设接口包括了红外探测控制器、温度监测控制器、可编程低噪声偏压控制器、可编程ADC接口控制器等。

该架构基于CPU、AMBA总线建立内部的控制及调度通路，同时将图像信号处理及传输通路与总线通路相独立，从而保证信号自适应接收、图像处理及图像传输的实时性，提高运算效率。在高速AHB总线上，集成通用CPU、DMA、SRAM、SPI

Flash控制器，形成以CPU为核心的可编程控制系统。ISP协处理器也集成至该总线，并集成DDR3控制器接口，从而可扩展红外图像数据存储空间[8]。CPU可直接寻址访问各个功能模块的参数及配置红外图像处理通道。在APB总线上，集成了红外探测控制器、温度监测控制器、可编程低噪声偏压控制器、SPI、UART、TIMERs/WDT、GPIO等。其中，红外探测控制器是为红外探测器提供时序以控制探测器实现正常工作，该外设接口可由CPU配置其时序产生的相关参数；温度监测控制器可实现对红外探测器制冷状态的监测，并将监测结果反馈给CPU；可编程低噪声偏压控制器为探测器提供低噪声偏置电压，通过CPU实现对偏置电源电压的控制操作；通用外设接口用于收发通信及功能扩展等[9-10]。

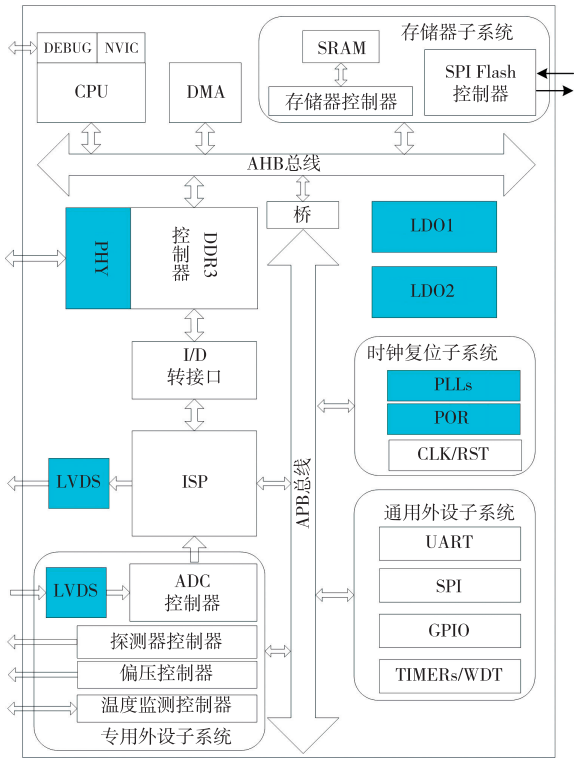


图2 红外图像预处理SoC系统框图

3 ISP协处理器设计

红外图像预处理ISP协处理器设计首先需要考虑算法、处理性能及映射的逻辑资源之间的关系。这种关系体现在ISP的带宽设计上，通常情况下需按原始像元数据吞吐量的10倍来估算ISP内部执行红外图像预处理需要的带宽[4-5]。本设计以处理256×256像素阵列、帧频200 fps、位宽16 bits的红外探测器输出像元数据为例，ISP内部执行红外图像预处理需要的带宽为200 Mbits/s，外部存储器需要的带宽大约为1.95 Gbits/s。因此，在满足ISP处理性能的前提下，合适的ISP算法、合理的存储器资源匹配及其访问接口设计就尤为重要。

相较于可见光成像，红外探测器由于制造材料、制造工艺一致性等原因，其输出的原始图像质量存在分辨率差、对比度低、非均匀性、盲元等问题。为了提高红外图像质量，在红外图像预处理中进行非均匀校正、盲元补偿和图像增强是非常必要的。针对小型化、高密度集成应用场景，将红外图像预处理算法进行优化，综合考虑算法性能及所占用资源，以达到在算法通用化的同时，实现资源的最优配置及自适应地预处理。

为平衡算法性能、自适应预处理及资源消耗，采用六点非均匀校正法[11]，通过SoC的通用外设通信接口写入六点校正系数数据，再通过片内CPU存入存储器。在对图像数据执行非均匀校正时，实时接收图像数据的同时，从存储器中读取六点校正数据进行非均匀校正处理。每个像素需要六点16 bits的GAIN和OFFSET校正系数，共需192 bits，按256×256像素阵列计算，非均匀校正的存储空间为12 Mbits。如果考虑积分时间的可配置化设计，所需要的存储空间将更多。在盲元处理中采用基于时空统计特征的缺陷像元自适应动态识别与补偿算法[12]，在自适应动态识别缺陷元过程中，需要连续存储多帧图像的缺陷元识别判断结果，每个像元以8 bits位宽记录识别结果，按256×256像素点计算，则缺陷元识别需要的存储空间为0.5 Mbits。

由此可见，ISP实现本设计的非均匀性校正及缺陷元识别补偿算法需要的存储空间较大，而如果采用SRAM将消耗较大的芯片面积和功耗。为此，通过在ISP内集成DDR3控制器接口的方式外挂DDR3存储颗粒[8]来解决存储资源配置问题。在图像增强算法处理中，每个像元处理都需要实时访问存储器，其访问频率和非均匀校正及缺陷元识别补偿处理难以匹配，在综合评估访问频率、处理数据量及工艺提供的SRAM资源情况下，图像增强处理选择SRAM作为配套的存储资源[13]。

此外，ISP还集成了像元数据采集传输、图像拉伸、伪彩转换及Camera-Link接口输出等处理，所有接口及ISP各功能模块都可以通过CPU进行灵活配置，从而灵活选择ISP预处理流程，满足不同红外

探测器应用需求。图 3 为所设计的 ISP 预处理结构处理流程，包含了 ADC 控制、图像数据采样及数据整合、非均匀校正、行数据缓存、缺陷元识别、缺陷元补偿、图像均衡、图像拉伸、伪彩转换及输出等。

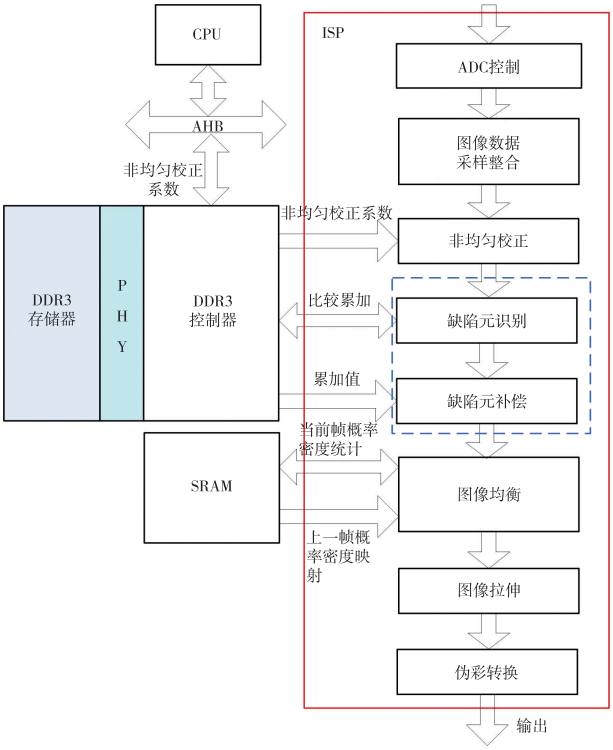


图 3　ISP 处理流程示意图

4　基于 UVM 验证方法学的验证平台

在 SoC 设计中，验证阶段通常在项目研发时间分配上占比超过 2/3，已成为芯片研发成功的关键要素。本文所设计的红外图像预处理 SoC 包含了一个通用 MCU 该有的要件，还集成了专用外设接口及 ISP 协处理器等。因此，本设计基于 UVM 验证方法学，依据 Down-Top 设计流程，采用了子单元验证（UT）、集成测试（IT）和系统级测试（ST）三个层级的验证方案。UT 验证对象是红外探测控制器、可编程 ADC 接口控制器等专用外设接口及非均匀性校正、缺陷元识别补偿等 ISP 各算法子模块，IT 验证对象是 ISP 协处理器（包含 DDR3 控制器等），ST 验证对象是全芯片。采用 SystemVerilog 语言＋UVM 验证方法学的架构搭建了红外图像处理 SoC 的 ST 验证平台[14-15]，该平台结构如图 4 所示。

在验证平台顶层（Testbench）里面例化了待测器件（DUT）、所有测试用例（TC）、接口（Interface）、VIP/BFM 组件、外置的行为模型及输出监测等。其中，DUT 为待验证单元；TC 为 UVM 验证方法的用例及仿真激励；Interface 为接口定义；BFM 为总线模型，用于替代 CPU 对总线外设进行访问；VIP 为虚拟的外设 IP，用于模拟外设读写行为；Monitor 是用来判断 DUT 的行为是否与预期相符合。当执行仿真验证时，各 TC 约束接口向 DUT 发送配置及激励信号；对验证结果的评估，可通过观测波形文件实时监控仿真是否正确，也可以通过对比仿真输出结果与理论计算值来判断功能是否正确。

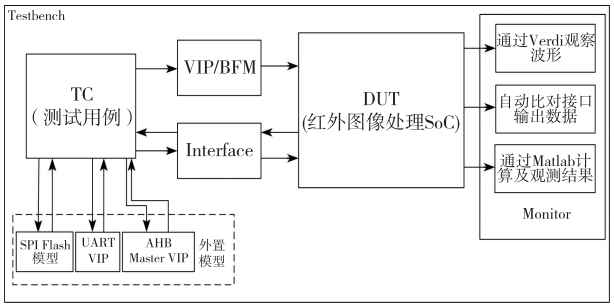


图 4　验证平台结构示意图

5　测试结果

该芯片采用 40 nm CMOS 工艺设计及流片，尺寸为 4 000 μm×6 800 μm，芯片显微照片如图 5 所示。

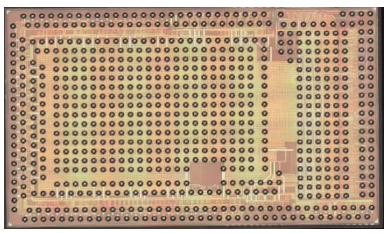


图 5　芯片显微照片

为验证芯片（DUT）实时处理功能，采用 FPGA 来模拟探测器，FPGA 接收 DUT 发出的探测器控制时序，验证通过后再按 ADC 接口时序输出 256×256 像素阵列的红外图像数据（帧率为 200 fps、位宽为 16 bits），DUT 处理后的图像数据经过 Cameralink 接口输出，然后由 Cameralink 采集卡传输到上位机。该芯片测试系统如图 6 所示。

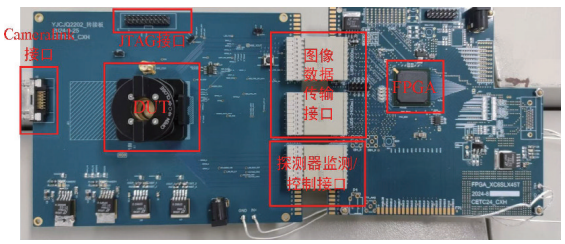


图 6　测试验证系统

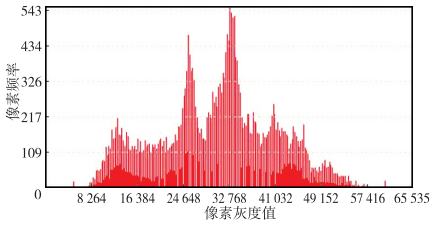
图7展示了原始图像及ISP各级处理结果。原始图7(a)为一帧添加了盲元(盲元率为3.30%)和非均匀性(非均匀性为9.46%)的图像。通过对非均匀校正处理后的图像(图7(b))及数据进行评估分析,经过非均匀校正算法处理后,非均匀性降低至0.14%,图像整体灰度分布趋于均匀,消除了明暗区域间的突兀过渡。原始图像中盲元表现为随机分布的亮点或暗点(如图7(a))。通过对盲元识别补偿的图像数据进行评估分析,其盲元率降至0.19%,盲元被精准识别并补偿为相邻像素的加权平均值,补偿后的图7(c)中盲元几乎不可见,细节连贯性显著提升。图7(e)和(f)为图像均衡处理前后的直方图,经过均衡处理后的像素灰度值分布显著扩展至全动态范围,峰值分布趋于平坦化,这表明均衡算法通过重新映射灰度级,增强了图像的整体对比度。根据图7(a)~(f)展示内容,可见原始图像经过ISP处理后,达到了预期的处理效果。



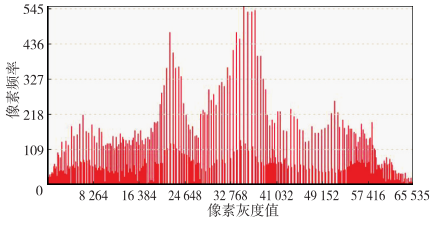
(a) 原始图像 (b) 非均匀校正后



(c) 盲元补偿后 (d) 伪彩转换



(e) 图像均衡前直方图



(f) 图像均衡后直方图

图7 ISP处理结果

6 总结

本文设计了一款面向红外成像系统一体化应用的红外图像处理SoC芯片,采用40 nm CMOS工艺设计实现,尺寸为4 000 μm×6 800 μm。测试结果表明,该芯片能够单片实现红外图像的非均匀校正、盲元识别补偿、图像增强等实时图像处理功能,从而简化了红外成像系统中的红外探测信号处理系统结构,降低了其功耗和成本,为红外成像系统一体化设计的实现奠定了技术基础。测试结果表明该芯片红外图像处理效果满足预期要求。

参考文献:

[1] 王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.
Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 489-492.

[2] 谢 轲. 小型化非制冷热像仪设计与实现[J]. 电子器件, 2019, 42(2): 520-524.
Xie Ke. Design and implementation of miniaturized uncooled infrared imaging system [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(2): 520-524.

[3] 胡国琦. 基于C6657 DSP的非制冷长波红外成像及处理系统硬件设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
Hu Guoqi. The hardware design of uncooled LWIR imaging and processing system based on C6657 DSP [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.

[4] 王 瑞, 洪 普, 宫文峰, 等. 一种小型化的低功耗短波红外成像组件设计[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(2): 140-148.
Wang Rui, Hong Pu, Gong Wenfeng, et al. A low-power, miniaturized short-wave infrared imaging circuit design [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2024, 22(2): 140-148.

[5] 田 永. 基于非制冷型探测器的红外成像系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
Tian Yong. Design of infrared imaging system based on uncooled detector[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.

[6] 汪晓洁, 张廷玉. 640×512中波红外成像系统实时信号处理关键技术[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 42-47.
Wang Xiaojie, Zhang Tingyu. Key techniques of real time signal processing for 640×512 MWIR imaging system [J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 42-47.

[7] 谭 盾. 基于ARM Cortex-M0核的MCU设计及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Tan Dun. MCU design and application based on ARM Cortex-M0 core[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[8] 马其琪, 鲍爱达. 基于DDR3 SDRAM的高速大容量数据缓

存设计[J]. 计算机测量与控制，2015，23(9)：3112-3113，3118.
Ma Qiqi，Bao Aida. High speed and large capacity data buffer design based on DDR3 SDRAM[J]. Computer Measurement & Control，2015，23(9)：3112-3113，3118.

[9] 汪　健，张　磊，曾　鑫，等. 红外探测器集成图像信号处理芯片设计[J]. 红外技术，2021，43(11)：1044-1048.
Wang Jian，Zhang Lei，Zeng Xin，et al. Design of integrated image signal processing chip for infrared detector[J]. Infrared Technology，2021，43(11)：1044-1048.

[10] 郭广浩，吴南健，刘力源. 低功耗非制冷红外图像处理专用SoC芯片[J]. 红外与毫米波学报，2023，42(1)：122-131.
Guo Guanghao，Wu Nanjian，Liu Liyuan. Low power application specific SoC chip for uncooled infrared image processing[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves，2023，42(1)：122-131.

[11] 张思凡. 红外焦平面阵列非均匀性校正技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2022.
Zhang Sifan. Research on the technology of non-uniformity correction for infrared focal plane arrays[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2022.

[12] 黄　曦，张建奇，刘德连. 红外图像盲元自适应检测及补偿算法[J]. 红外与激光工程，2011，40(2)：370-376.
Huang Xi，Zhang Jianqi，Liu Delian. Algorithm of blind pixels adaptive detection and compensation for infrared image[J]. Infrared and Laser Engineering，2011，40(2)：370-376.

[13] 史公鹏. 红外图像增强算法研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.
Shi Gongpeng. Research on infrared image enhancement algorithms[D]. Xi'an：Xidian University，2019.

[14] 张　强. UVM实战[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

[15] 崔嗣培. 基于UVM平台的SoC验证技术研究[D]. 北京：中国科学院大学，2022.
Cui Sipei. Research on SoC verification technology based on UVM platform[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2022.

作者简介：

邓　军(1983—)，男，重庆市人，博士，高级工程师，研究方向为红外读出电路与红外图像处理ASIC设计。