

基于红外焦平面电路智能算法研究与测试验证^{*}陈相洪¹ 黄文刚¹ 黄晓宗¹ 陈彦冠² 史凡萍¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十四研究所 重庆 400060; 2. 中国电子科技集团公司第十一研究所 北京 100015)

摘要: 红外焦平面电路不仅能将热辐射转化为微弱的电信号,还带有读出电路,配合红外焦平面探测器实现像元级模拟数字转换、智能化图像处理和数字输出等功能,将获取的面阵信号经像元级方式处理后输出。提出了基于单片像元级 ADC 的背景减除、盲元补偿、非均匀校正、开窗、像素合并、空间滤波、直方图均衡、时间延迟积分多种智能图像算法,避免了在算法级进行的方式,降低了后续图像处理算法实现的难度,减少了图像处理算法消耗的资源。进一步提出了一种红外焦平面电路液氮成像系统。并通过对一款 640×512 阵列的智能型红外焦平面电路进行测试,验证了单片红外焦平面多功能图像算法,对红外焦平面电路进行了全参数性能评估,为红外焦平面的智能算法工程化应用提供了新技术途径。

关键词: 红外焦平面;智能图像算法;成像系统;性能评估

中图分类号: TN216; TN219 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.2;510.3;510.99

Research and test verification of intelligent algorithm based on infrared focal plane circuit

Chen Xianghong¹ Huang Wengang¹ Huang Xiaozong¹ Chen Yanguan² Shi Fanping¹

(1. The 24th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: The infrared focal plane circuit can not only convert the thermal radiation into weak electrical signals, but also has a readout circuit. It can cooperate with the infrared focal plane detector to achieve pixel level analog digital conversion, intelligent image processing, digital output and other functions. The acquired array signal is processed at the pixel level and then output. This paper proposes several intelligent image algorithms based on single pixel level ADC, such as background subtraction, blind pixel compensation, nonuniformity correction, windowing, pixel merging, spatial filtering, histogram equalization, and time delay integration, which avoid the way of performing at the algorithm level, reduce the difficulty of implementing subsequent image processing algorithms, and reduce the resources consumed by image processing algorithms. In this paper, a liquid nitrogen imaging system based on infrared focal plane array circuit is proposed. Through testing an intelligent infrared focal plane circuit with 640×512 array, the multifunctional image algorithm of a single infrared focal plane is verified, and the full parameter performance evaluation of the infrared focal plane circuit is conducted, providing a new technical approach for the engineering application of intelligent algorithm of infrared focal plane.

Keywords: infrared focal plane; intelligent image algorithm; imaging system; performance evaluation

0 引言

红外焦平面电路的快速发展促进了红外探测技术的应用与发展。目前红外探测技术已成为红外研究的热点,被广泛应用在红外热成像^[1],高精度测温技术^[2],热流密

度传感器^[3],热成像仪温控系统^[4]等军用和民用相关领域。这些红外探测技术的广泛且大范围的普及和应用,也对红外焦平面电路和红外探测技术需求越来越高,功能要求越来越复杂。

近年来,第3代红外成像探测器正向大规模、多谱段、

收稿日期:2022-09-20

^{*} 基金项目:模拟集成电路国家级重点实验室基金(6142802190101)项目资助

数字化方向发展,先进红外焦平面电路片内集成模拟数字转换器(analog to digital converter, ADC)实现高速数字信号输出^[5-6]。数字化技术是第3代红外焦平面技术的代表之一,通过实现焦平面电路片上数字化,较大地扩展了可探测的灵敏度极限,提高了系统的响应速度和系统的工作效能,具备更高的可靠性^[7]。传统红外焦平面电路在像元级图像算法上只对一个或者几个算法进行设计或优化,未能全面开展红外焦平面智能算法的研究,因此本文提出了基于单片像元级 ADC 的背景减除、盲元补偿、非均匀校正、开窗、像素合并、空间滤波、直方图均衡、时间延迟积分多种智能数字化图像算法。

同时,红外焦平面电路参数评价与对单元红外探测器的参数评价有着很大不同,除了要对每个探测器像元的性能进行评估外,还应应对红外焦平面阵列的智能算法进行参数评价,因此还需要开发出红外焦平面电路成像系统来验证红外焦平面电路的智能算法^[8]。国外有公司专门研究红外焦平面阵列性能测试系统。同时大部分红外焦平面的制造商也拥有自己的测试系统,来评估和测试红外焦平面阵列的性能^[9-11]。但都未提出能同时对拥有像元级 ADC 的多种数字功能的红外焦平面电路进行成像的测控平台。国内中国电科第41研究所、上海技术物理研究所、红外成像材料与器件重点实验室等已自主研制出探测器测试系统^[12-14]。但国内都是进行了系统级或无智能算法的单片电路进行测试系统的开发,并未开发对像元级智能型红外焦平面电路进行多种数字功能参数同时进行全面评估的测控系统,且未能提出单片 640×512 阵列红外焦平面电路同时满足多种数字功能的智能算法。

结合目前红外焦平面电路和探测器功能在设计方面还比较单一,且国内外对智能型红外焦平面电路数据的采集和性能的评估技术相对还比较落后^[15]。因此,本文提出像元级 ADC 红外焦平面电路智能算法,并设计一套红外焦平面电路和探测器性能测试与成像系统,对红外焦平面电路和探测器的智能算法进行全面测试与评估。

1 成像系统设计

红外焦平面电路成像系统是验证红外焦平面电路智能算法的核心平台。

1.1 硬件设计

拥有智能算法的红外焦平面电路相较于传统焦平面电路功能更多,设计更难,测试更复杂。传统的红外焦平面成像系统普适性较差,现今的红外焦平面电路测试系统大多数为定制化,且不能同时对红外焦平面成品电路和芯片探测器进行测试。本文设计出一款红外焦平面电路液氮成像测试系统,如图1所示。系统包括红外摄像头、探测器、杜瓦罐、待测电路(device under test, DUT)、现场可编程逻辑门阵列(fied program gate way, FPGA)主控板、Cameralink(图像转换协议)采集转换板、计算机(personal computer, PC)模块。

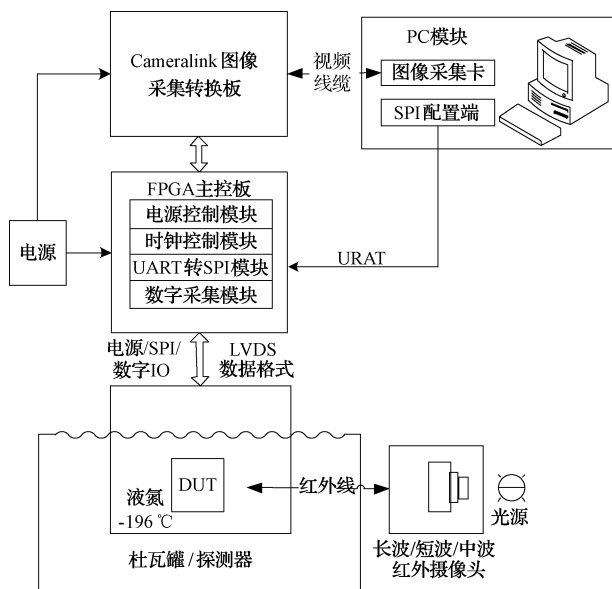


图1 红外焦平面电路液氮成像系统

成像系统整个测试工作流程如下:使用红外摄像头探测不同波长的红外信号,通过探测器将红外光模拟信号转换为数字信号,并进行像元级智能算法处理,然后将算法处理后的数字信号通过数字输入输出接口(IO口)将图像数据回传给FPGA主控板中的数字采集模块,FPGA主控板对数字信号进行帧行分发图像预处理,将预处理后的数据再次传递给Cameralink图像采集转换板,图像采集转换板进行Cameralink图像协议转换,将并行数据转换为串行数据,接着将转换好的数据传递给图像采集卡,图像采集卡通过上位机成像处理软件进行图像采集,然后通过图像处理界面进行成像。图像采集卡如图2所示。



图2 图像采集卡

成像系统需要选用高性能的图像采集卡进行图像采集和传输。系统选用了X64_Xcelera-CL_PX4(OR-X4C0-

XPD00)图像采集卡,采用了PCIE x4插槽,能够获取两个Cameralink相机的图像,同时能够获取区域内二进制和RGB数字图像,每个通道快速的图像获取速度达到了255 MB/s,图像数据转换到主板内存达到了1 024 MB/s。

其中Cameralink图像采集转换板结构框图如图3所示,选用了型号DS90CR288A作为接收器,能将4对低压差分信号(low voltage differential signaling, LVDS)的数据流X0~X3转换为28 bit的LVCMOS/LVTTL数据。锁相发送时钟通过第五LVDS链路与数据流并行发送。

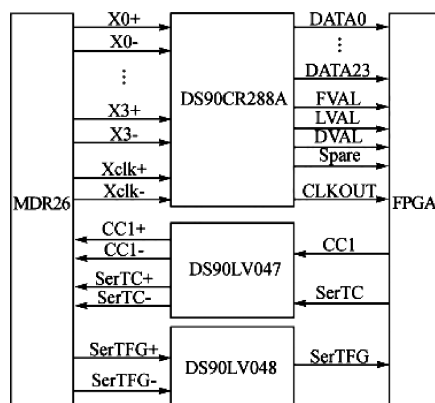


图3 Cameralink图像采集转换板结构框图

发送时钟的每个周期28 bit的输出数据被采样和发送。DS90CR288A在85 MHz的发送时钟频率下,以每LVDS数据信通595 Mbps的速率发送28 bit TTL数据。DS90CR288A用85 MHz时钟下,数据吞吐量达到了2.38 Gbit/s(297.5 Mbytes/s)。这里选用DS90LV047进行单端转差分,选用DS90LV048来进行差分转单端输出,使得图像采集卡和FPGA进行cameralink协议通信。

1.2 软件设计

针对硬件系统进行红外焦平面成像系统的软件设计^[16],首先需要对电路寄存器生成不同测试功能的串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)配置文件和FPGA配置文件。SPI配置端将生成的SPI配置文件通过通用异步接收/发送装置(universal asynchronous receiver/transmitter, UART)传输给FPGA主控板中的UART转SPI模块,UART转SPI模块将UART数据转换为SPI数据;FPGA配置端将生成的FPGA配置文件传输给FPGA主控板中的数字采集模块,数字采集模块生成LVDS数据格式的信号。最后将转换好的SPI数据和LVDS信号对DUT板中的电路或探测器中的芯片分别进行SPI配置和FPGA配置,从而启动红外焦平面电路的智能算法。成像系统软件框图如图4所示。

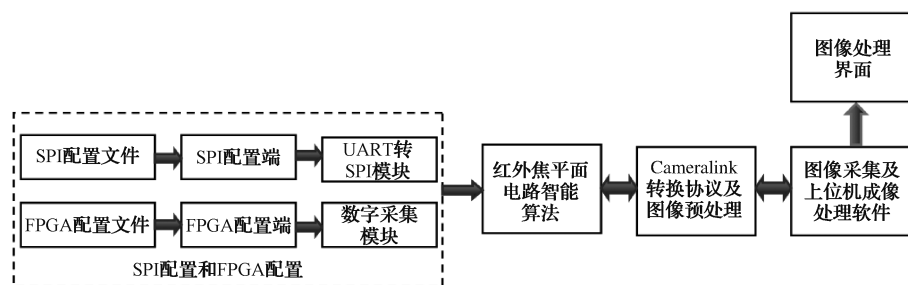


图4 成像系统软件框图

Cameralink是一种专门针对机器视觉应用领域的串行通信协议,Cameralink是使用LVDS进行传输,协议Cameralink标准是在ChannelLink(图像采集通信接口)标准的基础上又多加了6对差分信号线,其中4对用于并行传输相机控制信号,其他2对用于相机和图像采集卡之间的串行通信。Cameralink标准中,相机信号分为4种信号,分别为电源信号、视频数据信号、相机控制信号和串行通信信号。其中Cameralink转换框架如图5所示。

其中视频数据信号部分是Cameralink通信协议的核心。其协议主要包括5对差分信号,即X0~X0+,X1~X1+,X2~X2+,X3~X3+,Xclk~Xclk+;视频部分发送端将28 bit的数据信号和1个时钟信号,按7:1的比例将数据转换成5对差分信号,接收端使用芯片(如Cameralink转TTL/CMOS的芯片DS90CR288A)将5对差分信号转换成28 bit的数据信号和1个时钟信号。28 bit的数据信号包括4 bit视频控制信号和24 bit图像数

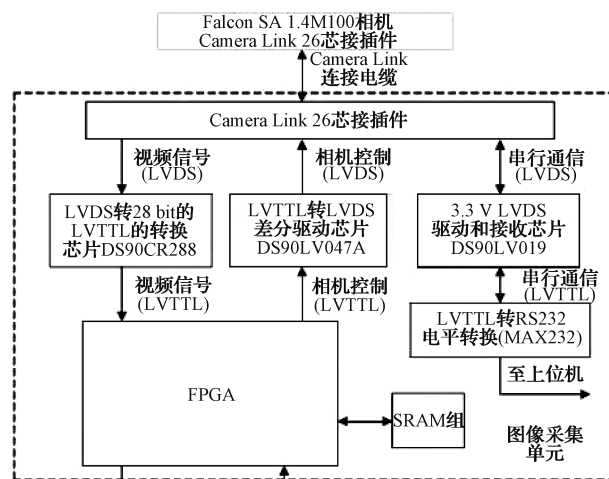


图5 Cameralink转换框架

据信号。Cameralink通信协议如图6所示。

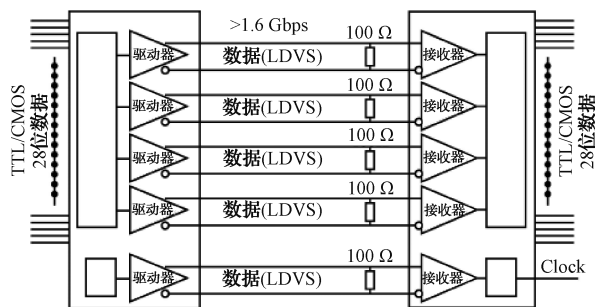


图6 Cameralink 通信协议

SPI 配置端是通过 PC 上的 VB(Visual Basic)软件平台进行人机交互界面开发,如图 7 所示。对 SPI 配置文件进行批量导入给 FPGA 主控板,FPGA 主控板再对电路内部的寄存器进行批量配置、回读、显示。框图 1 选择 FPGA 板子类型和型号;框图 2 显示导入的测试用例路径;框图 3 选择测试用例数据长度;框图 4 选择数据发送为“逐帧发送”或“打包发送”;框图 5 为导入的测试用例;框图 6 为 UART 回读回来的寄存器数据。

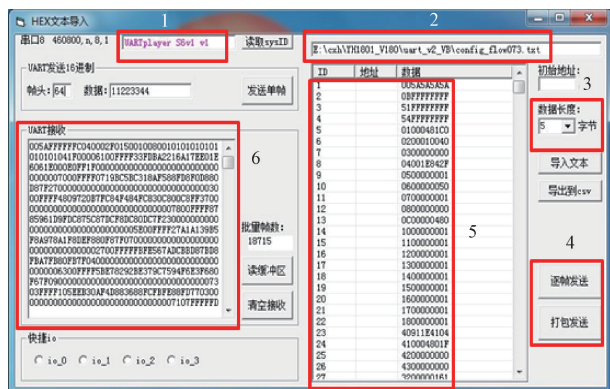


图7 SPI 配置界面

综上所述,搭建一个有效的成像系统是对红外焦平面电路进行性能参数准确评价的前提,同时需要提升红外焦平面电路的测试精度和范围,提升测试的效率。本文提出的红外焦平面电路液氮成像系统有以下优势,如表 1 所示。

表 1 成像系统优势

项目	特点	优势
LVDS 数据速率/Gbps	≥ 2.38	高速
处理数据位宽/bit	≥ 28	位宽
面阵测试能力	1 920×1 080	大阵列
工作温度范围/℃	-196~125	范围宽
测试方式	成品、芯片+探测器	多样化

1.3 测试流程

红外焦平面电路液氮成像系统的测试流程如图 8

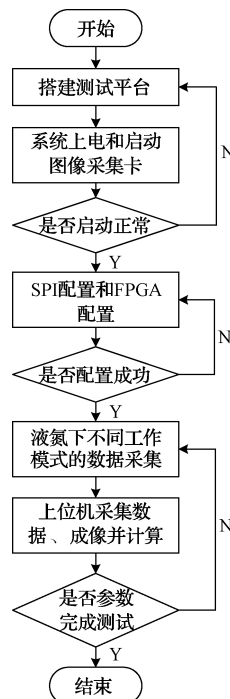


图8 测试流程

所示。

首先搭建探测器芯片和成品测试平台,将准备好的液氮倒入探测器中,对探测器芯片和成品进行充分制冷。完成测试平台搭建后,对系统进行上电,启动图像采集卡。根据电路不同功能,对红外焦平面电路进行 SPI 配置和 FPGA 配置。采集电路进行不同工作模式下的数据和参数并计算。测试完成后,记录好电路和探测器测试结果和对应数据,然后将测试平台进行断电,将 DUT 板夹具中的电路取出换一只新电路或换一个的探测器芯片,重复步骤,直到所有电路和探测器芯片完成全部测试。

红外焦平面电路液氮成像测试系统是基于红外焦平面阵列像元级 ADC 读出电路的评价方法进行设计^[17],根据中华人民共和国国家标准 GB/T 17444—2013《红外焦平面阵列参数测试技术》进行研究^[18]。

2 测试验证

基于 640×512 探测器阵列进行了红外焦平面读出芯片的智能算法进行测试验证。智能算法包括以下功能参数:非均匀性校正、盲元补偿、时间延迟积分(time delay integration, TDI)、直方图均衡、像素合并、背景减除、开窗功能、空间滤波。

2.1 非均匀性校正

红外焦平面阵列的非均匀性已成为制约红外系统成像质量的关键因素,因此提出一种非均匀性校正性能方法^[19]。虽然线性校正的优点是算法简单,但非均匀性校正过程中计算量小,适合于实时校正,因此选用最广泛的两步法来校正均匀性。红外焦平面阵列在均匀辐射背景

下任一像元的响应输出可以表示为:

$$X_{ij}(\phi) = R_{ij}\phi + \Omega_{ij} \quad (1)$$

式中: $X_{ij}(\phi)$ 为 (i, j) 像元的响应输出值; ϕ 为辐射通量; Ω_{ij} 为偏移量。对于每一个像元, R_{ij} 和 Ω_{ij} 的值在两个标定点内是固定的, 并且不随时间变化。非均匀校正示意图如图 9 所示, 图 9(a) 是具有不同增益和偏移量的两个像元的响应输出直线示意图, 可以看到响应输出直线的截距反映出偏移量的不均匀性, 直线的斜率反映出增益的不均匀性。非均匀性校正就是要使直线 A、B 重合于标准直线 S。将直线 A、B 作平移变换可得 3 条直线如图 9(b) 所示, 再将 A、B 直线以 S 直线为准做旋转变换得到一条直线如图 9(c) 所示, 这样就实现了直线 A、B 的校正。

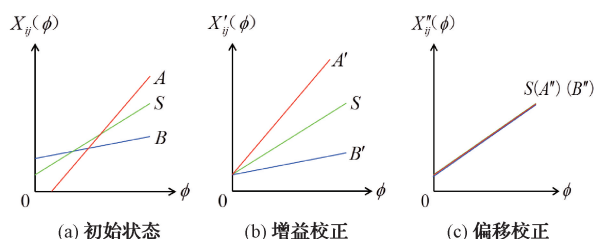


图 9 非均匀校正示意图

根据两点校正原理推导两点校正公式。式(1)给出了任一像元响应输出的数学模型, 校正目的为任一像元在任一辐射通量 ϕ 下的输出信号 $X_{ij}(\phi)$ 校正为整个焦平面阵列在辐射通量 ϕ 下的标准像元的响应输出信号 $X_n(\phi)$, 用灵敏度最高像元为标准像元。令:

$$Y_{ij}(\phi) = X_n(\phi) \quad (2)$$

为此在光路中插入一均匀辐射的黑体, 根据式(1)可得到各像元在低温 T_L 和高温 T_H 下响应输出:

$$X_{ij}(\phi_1) = R_{ij}\phi_1 + \Omega_{ij} \quad (3)$$

$$X_{ij}(\phi_2) = R_{ij}\phi_2 + \Omega_{ij} \quad (4)$$

式中: ϕ_1 、 ϕ_2 分别为各个像元在低温 T_L 和高温 T_H 下的辐射通量。对式(1)、(3)、(4)进行归一化处理得:

$$X_n(\phi) = R_n\phi + \Omega_n \quad (5)$$

令:

$$X_n(\phi_1) = \text{mean}(X_{ij}(\phi_1)) \quad (6)$$

$$X_n(\phi_2) = \text{mean}(X_{ij}(\phi_2)) \quad (7)$$

可解得:

$$X_n(\phi) = K_{ij}X_{ij}(\phi) + B_{ij} \quad (8)$$

其中:

$$K_{ij} = \frac{X_n(\phi_2) - X_n(\phi_1)}{X_{ij}(\phi_2) - X_{ij}(\phi_1)} \quad (9)$$

$$B_{ij} = \frac{X_{ij}(\phi_2)X_n(\phi_1) - X_{ij}(\phi_1)X_n(\phi_2)}{X_{ij}(\phi_2) - X_{ij}(\phi_1)} \quad (10)$$

式(8)即为非均匀校正后的结果, 其中 K_{ij} 、 B_{ij} 分别为两点校正中的校正增益和校正偏移量。从式(10)可以看出, 两点校正法只需要通过两幅不同辐射量的标定图像即可进行校正, 非均匀校正流程如图 10 所示, 非均匀校正

算法校正系数在片外求取, 并提供增益校正系数表和偏移校正系数表, 校正算法在像元级实现。

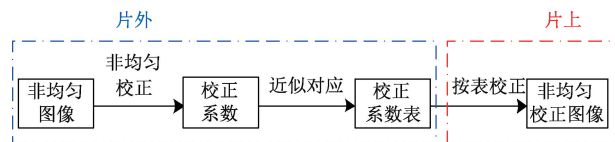


图 10 非均匀校正流程

通过上位机 SPI 配置来启动非均匀校正功能, 设置工作在 NOM 模式, 频率 $f=100$ MHz, 帧频 $f_{ps}=50$ Hz, 积分时间 $T_s=5$ ms, 测试结果如图 11 所示。非均匀校正测试实例, 图 11(a) 为输入非均匀校正前图像, 图 11(b) 为启动非均匀校正后图像, 校正后图像更加清晰准确。



图 11 非均匀校正

2.2 盲元补偿

红外探测器在生产制造过程中由于制造工艺、材料等因素的影响, 使得红外焦平面部分阵列单元失去探测能力, 通常称这种阵列单元为盲元。盲元示意图如图 12 所示, 盲元分为过热像元与死像元: 过热像元是指像元噪声电压大于 10 倍平均噪声电压的像元, 在输出图像上表现为亮点; 死像元是指像元响应率小于 1/10 平均响应率的像元, 在输出图像上表现为暗点。为改善红外焦平面电路成像质量, 需要通过盲元校正算法来处理盲元, 使其输出正常图像。



图 12 盲元示意图

根据成像特性, 相邻像元成像相关性很大, 在灰度级上具有连续性, 因此盲元补偿可以采用邻域代替法, 将图像中经过盲元检测算法判定后的盲元 (i, j) 及 3×3 邻域

像元,通过其4-邻域像元中的正常像元灰度复制给盲元来进行补偿。盲元补偿示意图如图13所示。

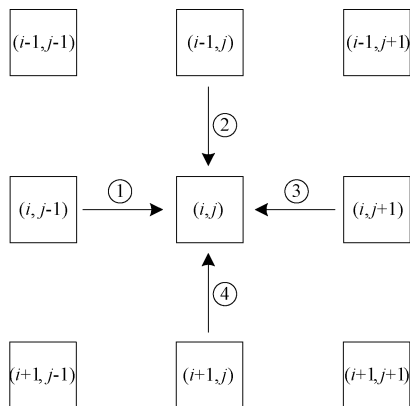


图13 盲元补偿示意图

盲元补偿用其4-邻域像元代替,定义替换顺序为(上、右、下、左),按替换顺序搜寻盲元4-邻域像元,若为正常像元,则用该正常像元替换盲元,若该像元为盲元或已经用于替换其他盲元,则继续搜寻直至4-邻域结束。盲元补偿算法在像元级实现,盲元检测算法在片外实现并提供盲元位置表,同非均匀校正一样,因此盲元校正流程如图14所示。

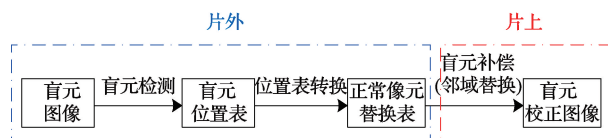
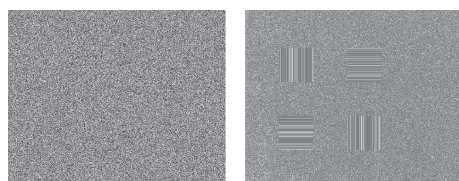


图14 盲元校正流程

把特定区域像元标记为盲元,盲元替换方向相同,然后通过采得的图像判断该区域像元是否被邻元替换。通过上位机SPI配置来启动盲元补偿功能,设置工作在自测试模式,频率 $f=100\text{ MHz}$,帧频 $f_{ps}=50\text{ Hz}$,积分时间 $T_s=5\text{ ms}$,溢出方式为饱和溢出,阵列静态随机存取存储器(static random-access memory, SRAM)写入特定盲元补偿数据。图15(a)所示为盲元补偿前的图像,有很多死像元和过热像元,补偿用例设置如下:补偿区域为矩形窗口,顶点坐标 (x_0, y_0) 分别为 $(110, 110)$ 、 $(110, 306)$ 、 $(406, 110)$ 、 $(406, 406)$;补偿方向分别为下、右、左、上4个



(a) 盲元补偿前图像 (b) 盲元补偿后图像

图15 盲元补偿

方向,补偿大小为 $(x_1, y_1)=(100, 100)$,补偿值为5,其他非补偿区域盲元补偿值为0。图15(b)所示为盲元补偿后的图像,补偿后的区域可见条纹状图案,根据替换方向设定,条纹方向为水平或竖直。

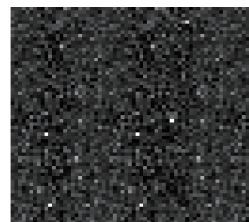
2.3 时间延迟积分

TDI即在数字域实现时间延迟积分。通过对同一目标多次曝光,延时积分来提高像元接受的目标能量,改善图像非均匀性。

TDI在像元级实现,主要通过正交传输与置位计数器初值实现。采集图像时,像素阵列向扫描相反方向整体正交传输,将移位后的数据作为计数器初值,再次采集图像→正交传输→置位初值,如此循环。TDI模式下,全屏积分完成后,自顶向下正交传输一行数据;即数据端口输出一行为一帧的图像数据,其他行未输出的图像依次下移一行,然后开始下一次积分,然后重复下移一行并输出一行。将每帧输出的行依次组合成图像显示,为动态移动图像。

测试用自偏置电压作为积分源,输出图像预期为前640行组成的图像为由黑渐亮的竖条纹,其后的所有图像为等亮度的竖条纹。竖条纹是由于延迟积分在同一列上所有像元上平均积分,每行这一列输出值都是本列640个像元的均值。

通过上位机SPI配置来启动时间延迟积分功能,设置工作在TDI模式,频率 $f=100\text{ MHz}$,帧频 $f_{ps}=50\text{ Hz}$,积分时间 $T_s=0.01\text{ ms}$,测试结果如图16所示。图16(a)为TDI输出前图像,图16(b)为TDI开始输出图像,图16(c)为TDI稳定输出图像,从上往下进行时间延迟积分,从而使得满屏产生第1行图像像素的竖状条纹。TDI中的640级累计积分和按行移位输出功能正常。



(a) TDI输出前图像



(b) TDI开始输出图像



(c) TDI稳定输出图像

图16 时间延迟积分

2.4 直方图均衡

直方图均衡是为了提高灰度图像的对比度,即提高图

像整体的反差程度,使得图像的某些细节更便于观察,从而改善图像的视觉效果。

直方图均衡便是为了找到一种映射关系,使得原来不均匀的直方图按照该映射关系转换后得到均匀的直方图。直方图均衡灰度级映射示意图如图 17 所示。

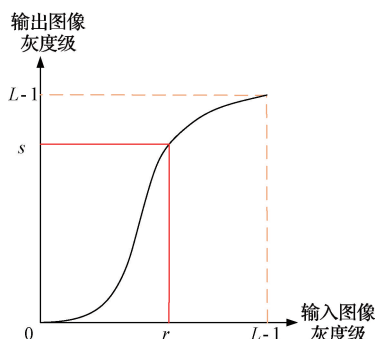


图 17 直方图均衡灰度级映射示意图

假设原灰度图像的概率密度为 $p_r(r)$, 直方图均衡后的图像概率密度为 $p_s(s)$, 其中 $s = T(r)$, 根据概率论可得到:

$$p_s(s) = p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right| \quad (11)$$

可用原图像的累积概率密度来表征图像灰度级的转换:

$$s = T(r) = (L-1) \int_0^r p_r(w) dw \quad (12)$$

以此变得到转换后的灰度级 $s = T(r)$, 便可进行直方图均衡化处理。直方图均衡化主要便在于实现灰度级的变换, 直方图均衡化流程如图 18 所示。

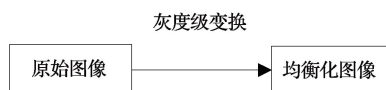


图 18 直方图均衡化流程

设置工作在 NOM 模式, 频率 $f = 100$ MHz, 帧频 $f_{ps} = 50$ Hz, 积分时间 $T_s = 0.001$ ms, 将原始图像灌入像元阵列 SRAM 域, 当图像直接输出结果时, 图像分布在 16 bit 深度, 但写入直方图均衡映射表后, 在低 1/4 地址空间平均分布在 8 bit 映射值, 高 3/4 地址填充全 FF, 预期输出结果为原图的 8 bit 深度压缩图像。图 19(c) 为原始图像的直方图, 图 19(d) 为均衡化后图像的直方图, 可以看出原始图像灰度比较集中, 使得在视觉效果上区别不明显, 直方图均衡化图像灰度均匀分布在整个灰度级, 提高了图像对比度, 便于观察轮廓。

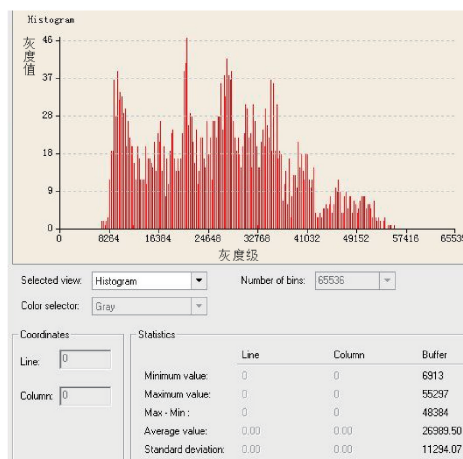
2.5 像素合并

像素合并是以牺牲图像分辨率为代价提高图像的灵敏度, 通常将 2×2 区域的像素合并为 1 个超大像素, 相当于增加了单像素的采光能力, 增强了弱光条件下的拍摄效

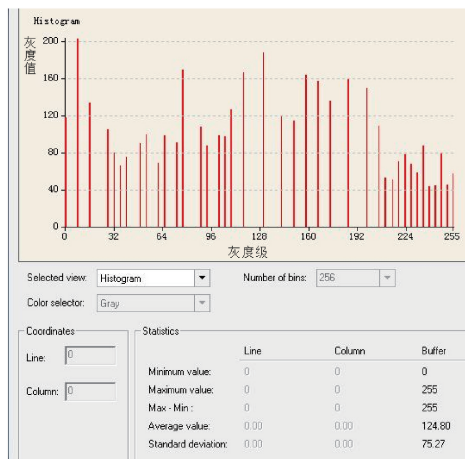


(a) 原始图像

(b) 均衡化后图像



(c) 原始图像的直方图



(d) 均衡化后图像的直方图

图 19 直方图均衡

果。按式(13)进行像素合并。

$$I_{merge}(i, j) = I_{in}(2i-1, 2j-1) + I_{in}(2i, 2j-1) + I_{in}(2i-1, 2j) + I_{in}(2i, 2j) \quad (13)$$

式中: I_{in} 为相邻两行和两列像素。像素合并是在像元级实现, 通过对像素阵列的逻辑控制实现像素合并功能。当像素合并使能, 先缓存 2 行图像数据进行行相加, 再传至列单元进行 2 列相加实现 2×2 像素合并。像素合并流程如图 20 所示。

像元合并实现方式通过将一帧图像中相邻的 4 个像素值直接相加, 可以获得一帧亮度更高的图像。开启像素合并功能后图像均值为开启像素合并功能前图像均值的

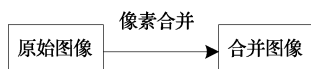
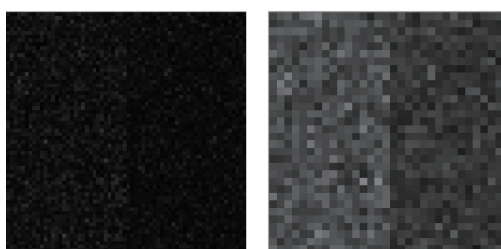


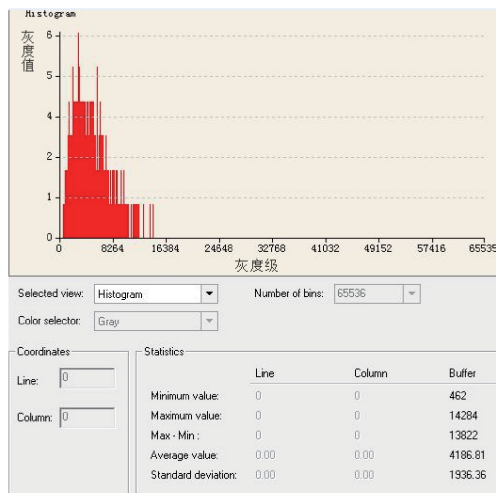
图20 像素合并流程

4倍,合并后图像行列值各浓缩为合并前图像行列值的2倍。通过上位机SPI配置来启动像素合并功能,设置工作在NOM模式,频率 $f=100\text{ MHz}$,帧频 $f_{ps}=50\text{ Hz}$,积分时间 $T_s=0.5\text{ ms}$ 。结果如图21所示,图21(a)为18 bit原始像素合并前图像,图21(c)为像素合并前图像的直方

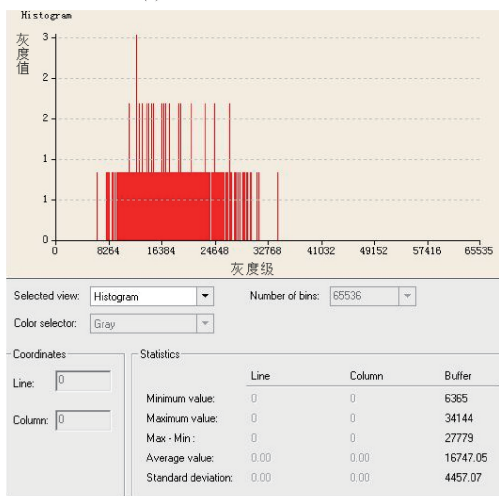


(a) 像素合并前图像

(b) 像素合并后图像



(c) 像素合并前图像的直方图



(d) 像素合并后图像的直方图

图21 像素合并

图,均值为4186.81。图21(b)为20 bit像素合并后图像,图21(d)为像素合并后图像的直方图,均值为16747.05,约为合并前均值4倍,说明像素合并功能正常。

2.6 开窗功能

图像开窗是为了在原始图像中随机取出部分感兴趣的区域产生窗口,根据窗口位置及大小对原始图像进行开窗,并返回开窗图像。图像开窗在像元级通过SPI配置来实现,主要通过像素阵列的读逻辑控制实现开窗功能。当开窗有效并给定图像窗口后,其转换为对应行列的有效信号,指定相应行列的数据输出,从而实现开窗功能。图像开窗流程如图22所示。

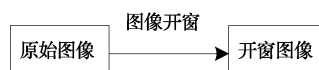
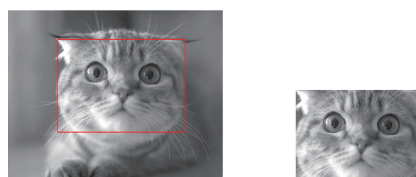


图22 图像开窗流程

通过上位机SPI配置启动开窗功能,设置工作在NOM模式,频率 $f=100\text{ MHz}$,帧频 $f_{ps}=50\text{ Hz}$,积分时间 $T_s=0.001\text{ ms}$,开窗起点 86×148 ,开窗大小 271×381 ,测试结果如图23所示。图23(a)为开窗前图像,红线区域为窗口,图23(b)为开窗后图像,按既定窗口得到开窗图像。开窗后图像显示红线区域。



(a) 开窗前图像

(b) 开窗后图像

图23 开窗功能

2.7 背景减除

背景减除主要是用来抑制背景噪声,探测器成像时不仅包含目标所产生光电流,还包括自身暗电流等一系列噪声,探测器输出的即为实际成像,如果能获取噪声成像,便可用实际成像减去噪声成像得到目标图像,通常在不透光环境下对黑体成像得到噪声图像。探测器成像示意图如图24所示。

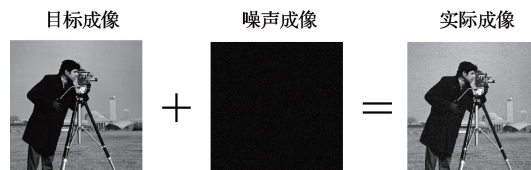


图24 探测器成像示意图

通过上位机SPI配置来启动背景减除功能,设置工作在自测试(SFT)模式,频率 $f=100\text{ MHz}$,帧频 $f_{ps}=$

50 Hz, 积分时间 $T_s = 0.01$ ms, 偏压基准 $V_d = 0.8$ V, 测试结果如图 25 所示。在黑体图像上加入悬空噪声背景, 通过实际图像减去悬空噪声背景图像获取清晰的目标图像。图 25(a) 为 18 bit ADC 悬空噪声图像, 图 25(b) 为 18 bit ADC 悬空开启背景减除后的噪声图像, 可以看出开启背景减除功能噪声被滤掉了。图 25(c) 为背景减除示例演示, 可以看出开启背景减除后目标图像更清晰。

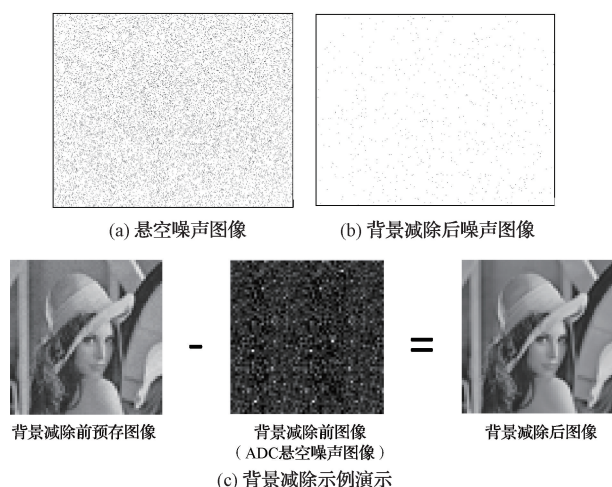


图 25 背景减除

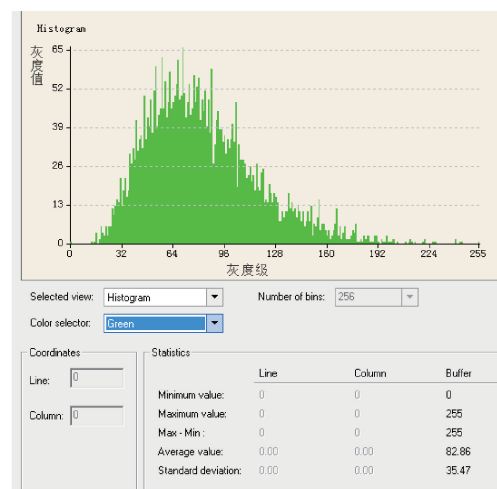
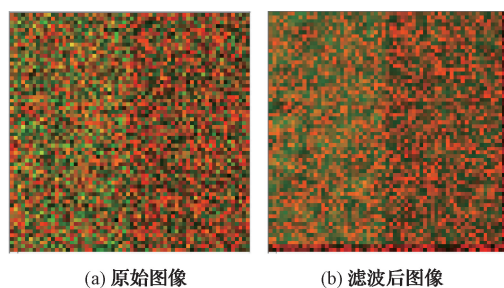
2.8 空间滤波

空间滤波通常可分为线性空间滤波与非线性空间滤波两类。常见的线性空间滤波有均值滤波、图像锐化等, 常见的非线性空间滤波有均值滤波等。

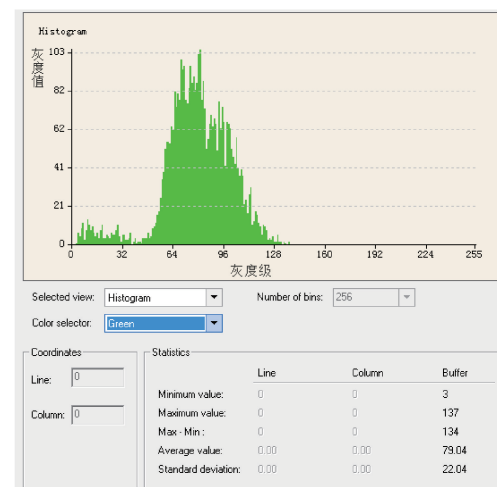
线性空间滤波是在图像空间借助模板进行邻域操作完成的。 S_0 为当前进行滤波的像素, $S_1 \sim S_8$ 是其 3×3 邻域像素, $K_0 \sim K_8$ 为对应邻域大小的模板, 空间滤波即用模板 K 依次对图像像素及其邻域进行卷积运算实现滤波。线性空间滤波首先对目标进行 $|K_0|$ 倍时间积分, 根据 K_0 正负调节计数器正负开始曝光计数, 计数结束后将图像整体右移一个像素, 并以此图像为各个像素计数器初值, 进行第 2 次曝光, 根据 K_1 正负及大小调节计数器正负及曝光时长开始计数, 实现 $R = K_0 \times S_0 + K_1 \times S_1$, 如此循环经历曝光 9 次, 正交传输 8 次实现 $R = K_0 \times S_0 + K_1 \times S_1 + L + K_8 \times S_8$, 即实现线性空间滤波。

通过上位机 SPI 配置来启动空间滤波功能, 设置工作在 SFT 模式, 频率 $f = 100$ MHz, 帧频 $f_{ps} = 50$ Hz, 积分时间 $T_s = 9$ ms, 偏压基准 $V_d = 0.8$ V, 开启 RGB 图像采集模式, 测试结果如图 26 所示。像元级模拟线性空间滤波实现的过程。图 26(a) 为 18 bit 原始图像, 图 26(c) 为 18 bit 原始图像的直方图, 可以看出, 图像标准差的值为 34.47。图 26(b) 为经空间滤波后的图

像, 图 26(d) 为空间滤波后图像的直方图, 可以看出, 图像标准差的值为 22.04。可以看出图像空间噪声由 35.47×255 减小到 22.04×255 , 空间滤波功能通过前后试验对比正常。



(c) 原始图像的直方图



(d) 滤波后图像的直方图

图 26 空间滤波

综上所述, 本文提出的红外焦平面电路测试系统参数指标, 如表 2 所示。结果表明系统能够很好满足红外焦平面电路智能算法的测试需求, 完成对红外焦平面电路图像功能测试, 满足典型值。

表2 红外焦平面电路测试系统参数指标

参数	典型值	测试值
像元规格	640×512	640×512
像素 ADC 分辨率/bit	18	18
帧频/Hz	≥50	50
总功耗/mW	≤500	205
最大电荷处理能力/Ge-频率/MHz	≥3	3.7
图像接口速率/MHz	≥100	100
工作温度范围/K	≥4×100	4×100
非均匀校正	60~120	80±3(液氮)
盲元补偿	正常	正常
时间延迟积分	正常	正常
直方图均衡	正常	正常
像素合并	正常	正常
开窗功能	正常	正常
背景减除	正常	正常
空间滤波	正常	正常

3 结 论

本文搭建了红外焦平面电路成像与性能评估系统,并通过对一款 640×512 阵列的红外焦平面电路进行测试,验证了单片红外焦平面电路基于单片像元级 ADC 的背景减除、盲元补偿、非均匀性校正、开窗、像素合并、空间滤波、图像均衡变换、时间延迟积分多种图像算法。单片像元级 ADC 图像算法实现的方式避开了进行算法级图像处理,降低了后续图像处理算法实现的难度,减少了图像处理算法消耗的资源。相信对红外焦平面电路像元级智能算法实现领域中,这些极具实用性的研究工作,将会推动更大阵列红外焦平面成像技术和像元级智能红外图像算法的进一步发展。

参 考 文 献

- [1] 张志强,王萍,于旭东,等.高精度红外热成像测温技术研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):10-18.
- [2] 梁凯,易映萍,唐春晖,等.基于FPGA的红外热成像温度检测算法研究[J].电子测量技术,2017,40(10):238-242.
- [3] 姜韬,孔德仁,郭雨岩.基于红外探测的新型热流密度传感器设计[J].国外电子测量技术,2017,36(11):38-42.
- [4] 张蓬勃,陈旭海,李玉榕,等.基于红外热成像的PCR温控系统[J].电子测量与仪器学报,2012,26(6):541-547.

- [5] 白丕绩,姚立斌.第三代红外焦平面探测器读出电路[J].红外技术,2015,37(2):89-96.
- [6] 王利平,孙韶媛,王庆宝,等.红外焦平面探测器的读出电路[J].光学技术,2000,26(2):123-125.
- [7] 于艳.红外焦平面像素级数字化技术最新进展[J].激光与红外,2018,48(8):952-957.
- [8] 杜亚妮.红外探测器性能评估系统设计[D].西安:西安电子科技大学,2018.
- [9] ZHOU T, ZHAO J, HE Y, et al. A readout integrated circuit (ROIC) employing self-adaptive background current compensation technique for infrared focal plane array (IRFPA) [J]. Infrared Physics and Technology, 2018, 90: 122-132.
- [10] SMITH E P G, PHAM L T, VENZOR G M, et al. HgCdTe focal plane arrays for dual-color mid-and long-wavelength infrared detection [J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(6): 509-516.
- [11] MA W, WEN Y, YU X, et al. Performance enhancement of uncooled infrared focal plane array by integrating metamaterial absorber [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(11): 111108.
- [12] 费丰.红外焦平面阵列相对光谱响应测试系统[J].计测技术,2002,22(6):26-30.
- [13] 甄红楼,熊大元,周旭昌,等.红外-近红外波长变换器件 p-Q W IP-LED 研究[J].中国科学,2006,36(3):327-336.
- [14] 邵秀梅,李淘,李雪,等.平面型大光敏元 InGaAs 线列探测器及其应用[J].光学与光电技术,2014,12(1):75-79.
- [15] 王江辉.红外焦平面阵列测试数据采集与评价技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
- [16] 刘铭.基于 Visual C++ 的红外焦平面测试系统软件的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2016.
- [17] 孟如男.红外焦平面阵列像元级参数测试方法研究[D].北京:中国科学院大学,2015.
- [18] 红外焦平面阵列参数测试技术[S]. GB/T 17444—2013.
- [19] 闫勇刚,王耿,彭志勇,等.红外焦平面阵列非均匀性校正性能联合评价[J].电子测量与仪器学报,2022,36(7):170-176.

作 者 简 介

陈相洪,硕士研究生,工程师,主要研究方向为混合信号集成电路测试技术和红外焦平面电路探测技术。
E-mail:chenxianghong1214@163.com