

红外线阵探测器盲元定位与补偿

徐世伟, 魏东, 王大鹏, 刘万成

(光电信息控制与安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 为减少红外线阵探测器的条纹噪声与非均匀性噪声受环境温度和探测器工作时间的影 响, 提出了一种处理盲元的综合算法。首先依据探测器最终数据输出出来检测盲元通道; 然后依据通道位置 与数量调整偏移量值, 并根据探测器的阵列结构特点, 对 480×6 个像元完成精确的盲元定位; 最后完 成对含有盲元通道的非均匀校正。以 FPGA 处理模块为核心, 完成了红外探测器实时采集与处理。图 像校正效果良好, 具有良好的实时性和可移植性。

关键词: 光伏阵列; 盲元检测; 像元舍取; 非均匀变换

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3621-06

Blind pixel detection and compensation for infrared linear detector

Xu Shiwei, Wei Dong, Wang Dapeng, Liu Wancheng

(Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: An integrated algorithm dealing with blind pixel was proposed to reduce the stripe noise and non-uniformity noise of the infrared linear detector which affected by ambient temperature and its operation time. First, the bad pixel channel was detected based on the final output data of the detector, and then the offset value was adjusted based on the position and number of the bad pixel channel, and an accurate bad pixel positioning to 480×6 pixel was finished according to the structure characteristics of the detector array. Non-uniformity correction of the bad pixel channel was completed in the end. In this paper, FPGA processing module was taken as the core of the whole algorithm to complete the real-time acquisition and processing of infrared images. The test results show that the qualities of correction images are all very well, and the algorithm proposed in this paper has a good real-time performance and portability.

Key words: PV array; blind pixel detection; pixel rounding off; non-uniform transformation

收稿日期: 2014-03-07; 修订日期: 2014-04-06

基金项目: 国防预研项目; 国家 973 计划

作者简介: 徐世伟(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事高速实时红外图像处理方面的研究。Email: xsw19@126.com

0 引言

红外探测器受制造材料、工艺因素的限制,存在不可避免的非均匀性,同时在使用过程中,盲元的数量也会因为外部因素或器件本身寿命问题而逐渐增多。虽然非均匀校正上能够对线性不是很好的盲元产生一定补偿效果,但在极端不均匀的情况下,部分探测器元甚至失去探测能力,成为死元^[1-3],非均匀校正对器件固有级盲元(或死像元)不能完全校正过来,对于盲元(或死像元)一般通过临域替换方法做简单替换。盲元的数量和分布对红外图像的信噪比和图像质量产生很大的影响,如果盲元过多或者分布过于集中,则在凝视型面阵红外图像上将出现大量的或者过于集中的白点(黑点),对线扫型探测器成像形成亮(暗)条纹,这严重影响红外图像的视觉效果,如果不对这一类问题加以解决,红外探测器的应用将会受到很大的限制。

文中所用探测系统采用 FPGA 作为核心功能单元,实现 480×6 线列探测器控制、AD 芯片数字控制、输出信号的串并转换、奇偶行对齐、盲元定位与处理、非均匀校正和数字图像增强(DDE)等,最终完成图像的 PAL 制显示。文中主要根据 480×6 线阵探测器光伏阵列本身特点,实现对盲元精确定位与舍取,消除了线扫红外图像盲元所产生的亮(暗)条纹,改善了器件随使用时间增长与环境温度改变使盲元的数量与位置相应改变的特性,从而提高线阵焦平面探测器的性能,为探测器的实际应用带来好处。

1 线列探测器盲元的量化标准与实际测量

1.1 探测器阵列布局与盲元检测量化标准

文中选用 SOFRADIR 480×6 中波线阵探测器,其探测器光伏(PV)阵列拓扑布局见图 1。光伏阵列由 480 线(或通道)组成,每条线由 6 个像素通过积分电路延迟积分(TDI)产生。在布局上将 480 通道的奇通道、偶通道各分为一组,每组阵列包含 240 条线。由此可见线列探测器由于布局结构所限,探测器读出一列数据与真实图像的空间位置并非一一对应,需要先进行奇偶行对齐。为保证实时性,文中针对此问题,在 FPGA 内集成奇偶行对齐模块,配合片内 RAM,在扫描成像过程中根据扫描方向、扫描速

度、光学视场、奇偶通道间距等条件,对其中一通道做固定时间延迟,完成探测器的实时奇偶行对齐。

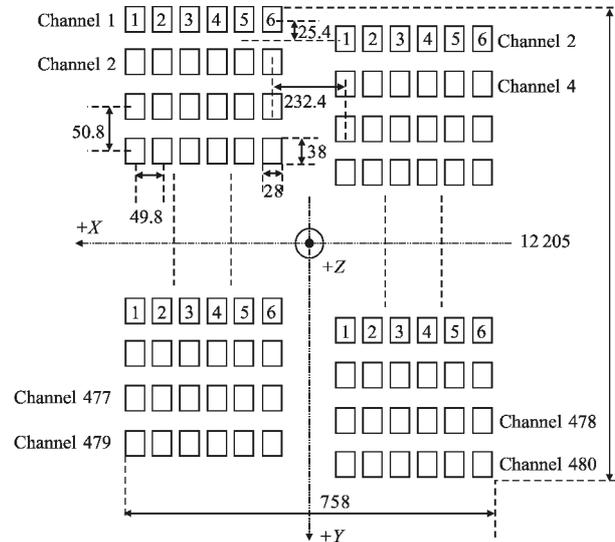


图 1 光伏阵列拓扑布局/杜瓦面前视图

Fig.1 PV array topology/front view of dewar side

国家标准是从器件对黑体辐射响应程度作为盲元的量化标准,包括盲元与死像元。为与出厂报告对比,采用 SOFRADR 公司对盲元的检测标准。探测器的出厂检测报告中,规定了基于实验室测量盲元的量化指标,在符合下面两种情况之一均视为盲元。

(1) 测量 20℃黑体均匀辐照下 480 列合成输出信号电压,并计算 480 路的平均电压(公式(2)),偏差量不小于 30%的符合公式(1)输出的像素点即为盲元。

$$\left| \frac{R(i) - \bar{R}}{\bar{R}} \right|_{t=20^{\circ}\text{C}} \times 100\% \geq 300\% \quad (1)$$

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^{480} R(i)/480 \quad (2)$$

式中:像元响应率 $R(i)$ 是在特定温度 t 下黑体辐射功率产生的输出信号电压;平均响应率 \bar{R} 表示红外线列各个有效响应率的平均值,由于无效像元比例较少,因此可以设定 480 像素点均为有效像素,其计算方法见公式(2)。

(2) 分别测量 20℃和 35℃黑体均匀辐照下 480 列合成输出信号电压,计算同一列两温度辐射下电压差值 R_d ,并对 480 个 R_d 序列依据公式(2),统计其均值。并按公式(3)量化准则完成对各像素盲元检测。

$$\left| \frac{R_d(i) - \bar{R}_d}{\bar{R}_d} \right| \times 100\% \geq 30\% \quad (3)$$

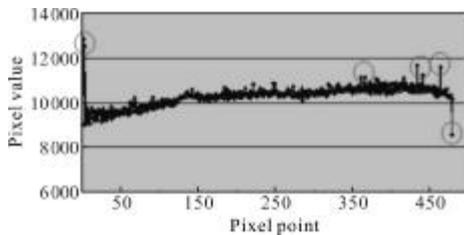
$$R_d(i) = R_d(i)_{t=35^\circ\text{C}} - R(i)_{t=20^\circ\text{C}} \quad (4)$$

SOFRADR 公司依据上述两种量化标准,其线阵探测器检测报告给出了 6 路合成输出的 480 个像素的 DC level、Responsivity Measurement 3 份测试报告显示盲元通道均为 0。同时测试报告也给出 480×6 单点盲元位置分布,数据显示共有 97 个盲元,占像元总数的 3.37%。说明虽然存在这些盲元,但盲元对整个像素通道响应的影响在合理范围内。而盲元位置与数量是会随着使用时间增长发生相应变化,这种变化只有通过实验手段加以验证。

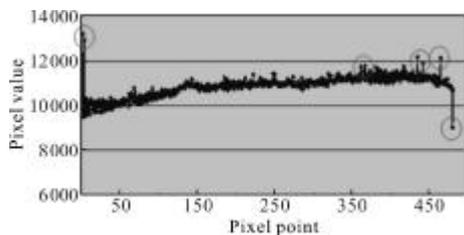
1.2 盲元检测实验验证

依据 SOFRADIR 公司盲元检测量化标准与探测器温度相应曲线,需先找到响应曲线线性比较好的那一段的温度范围。

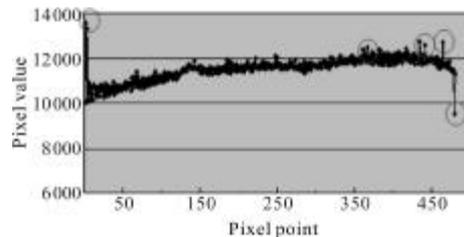
测试在此范围内多个温度条件下的 6 路合成输出(这里以探测器采样输出的数字信号代替电压信号)。实验设置黑体温度为 30℃、40℃、50℃、60℃ 4 种温度下的合成输出的数字信号。如图 2 所示,采样灰度值是通过 64 列图像多次采样计算出的平均值。



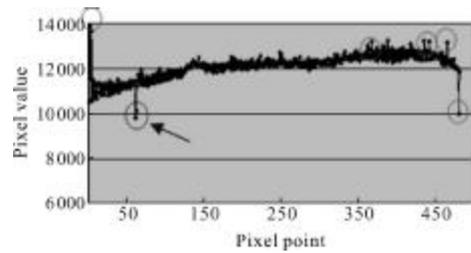
(a) 30℃下 480 点的黑体辐照值
(a) 480 points blackbody radiation values under 30℃



(b) 40℃下 480 点的黑体辐照值
(b) 480 points blackbody radiation values under 40℃

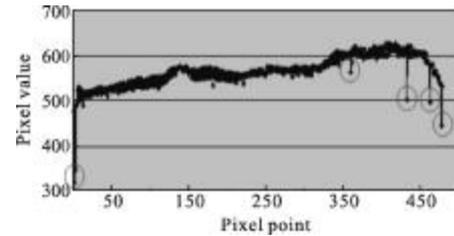


(c) 50℃下 480 点的黑体辐照值
(c) 480 points blackbody radiation values under 50℃



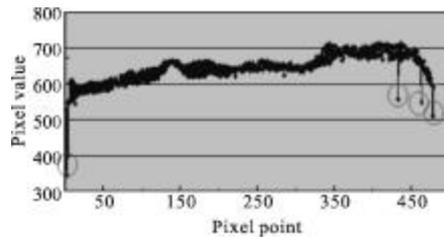
(d) 60℃下 480 点的黑体辐照值

(d) 480 points blackbody radiation values under 60℃



(e) 30、40℃下 480 点的黑体辐照差值

(e) 480 points blackbody radiation difference values between 30℃ to 40℃



(f) 40、50℃下 480 点的黑体辐照差值

(f) 480 points blackbody radiation difference values between 40℃ to 50℃

图 2 不同温度黑体辐照下的响应值与两温度点下的响应差值

Fig.2 Response value and difference value of two temperature points under different blackbody radiation temperatures

图 2 显示了在 30℃、40℃、50℃黑体辐照下 480 个像素点的灰度值,其中存在共同的有明显偏离平均线的奇异点,即为可能存在的盲元位置。当温度升高到 60℃时,在图(d)中明显多出了不同于前 3 幅图中的盲元点(图中箭头所示位置),同时偏差较小的奇异点也明显增多。产生这种现象的原因可以从探测器成像机理分析,探测器每一像元都有自己的温度响应曲线即(“S”曲线),通过测试可知 30℃、40℃、50℃是属于响应曲线的线性区,而 60℃使输出灰度值已进去非线性区范围,所以应将 60℃排除数据统计温度范围。对于多数像元通道“S”曲线大致相同,而对于盲元通道的“S”曲线线性范围会变大或缩小,所以通过设置不同温度可以将盲元通道找出来。图(e)、

(f)显示出了在两个不同温度下测量差值所得数据分布,其盲元通道位置与数量与前几幅图大致相同。通

过实际计算依据不同的偏移量条件设定统计出不同温度下盲元点见表 1 所示。

表 1 不同条件下盲元通道检测结果

Tab.1 Blind-channel detection results under different conditions

Deviation value	Blackbody temperature/°C	Position of blind channel	Quantity of blind pixel	Total number of blind pixel	Blind ratio
10%	30/40/50	1/2/3/4/5/7/9/11/17/ 21/25/29/434/464/479	15	17	3.54%
	60	1/2/3/4/5/7/9/11/17/ 21/25/29/61/62/479	15		
	30	2/4	2		
20%	40	2	1	2	0.41%
	50/60	0	0		
30%	30/40/50/60	0	0	0	0

从表 1 中可以得出:在 10%偏差量条件下,盲元通道的位置与数量与辐射温度有关,当偏差量变为 20%时,盲元通道的数量急剧减少到 1~2 个,在 30%条件下不存在盲元通道,这与探测器出厂检测报告相吻合。但从图 3 的原始图像中可以清楚地看到盲元对图像质量的影响很大。因此对盲元通道检测的量化标准设置上,参考国内对红外探测器盲元检测国家标准^[4-5],将偏差量设定为 10%。

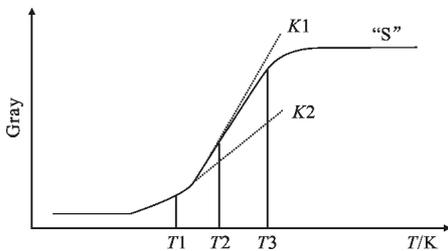


图 3 探测器的温度响应曲线
Fig.3 Curve of detector temperature response

由于各种原因,探测器单个像元不可避免地存在坏点。出厂检测报告给出了精确的盲元分布表,但随着使用过程不可避免地会产生新的盲元。当其中

一通道的 6 个像元出现一个或多个坏点后,其输出值与相邻像素产生较大偏差。当表 1 中有 5 个盲元连在一起时,那么根据一维线性外推盲元检测法^[6]将无法得到较好的检测效果。将多个 480 列数据均值作为偏差量的基准,算法简单可操作性强,同时检测结果与实际图像显示效果相吻合。

2 线列探测器对盲元的解决方案

2.1 探测器盲元检测

SOFRADIR 480×6 中波线阵探测器提供了 Bypass mode 测试模式,允许用户通过串行输入 SERDAT 控制线,设置 DIR、BYPAS1、BYPAS2 完成对通道 1-6 像元舍取(图 4)。测试在 20℃、30℃、40℃、50℃ 4 组不同温度下,对 480×6 中的 1~6 个通道分别进行盲元检测的数据统计。根据公式 (1)、(3) 设置偏差量为 10%,统计 6 通道的所有盲元。根据统计出的盲元表在正常工作模式(TDI)下,在探测器初始化过程中删除盲元,保留好的像元,并对有盲元通道做校正处理。

	CHT	GAIH3	GAIH2	GAIH1	DIR	BYPASS2	BYPASS1	SELECT	PGM	12-bit pixel data word selection/deselection											8-bit pixel address word (pair of rows)								
Bit	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	Control word									Data word											Address word								

图 4 串行输入:定义 29 bit 控制寄存器
Fig.4 SERDAT: 29 bit control registers definition

算法流程与偏差量选择:

(1) 设置探测器工作状态为 Bypass 模式。

(2) 设置黑体温度 20 ℃, 设置 DIR、BYPAS1、BYPAS2 选择通道 D1, 采样 64 列 480 数据, 测量其平均值。依次选择 D2-D6 通道重复上述过程, 得到 480×6 数据。

(3) 依次设置黑体温度 30 ℃、40 ℃、50 ℃, 重复步骤(2), 共得到 4 组 480×6 数据。

对四组数据依据公式(1)、公式(3)设置偏差量为 10%, 统计盲元数量并标记位置。在各温度条件下只要出现一次即为盲元, 建立 480×6 盲元数据表。

厂家在进行盲元测试时选择的偏差阈值为 30%, 测试报告给出盲元共有 97 个, 文中选用的偏差阈值为 10% 的实际测量结果只有 59 个, 与探测器出厂

检测报告相比盲元数量减少了 18 个, 其中 80% 以上盲元与测试报告位置吻合。当偏差量设为 8% 时, 盲元数量急剧增加到 237。表 2 中设置偏差量为 10% 的条件下, 6 路合成输出的 480 通道只有 17 路盲元, 其中每一路 D1-D6 像元中经检测至少有一盲元点。

理论偏差阈值为 10% 时, 盲元数应大于厂家测出的盲元数而不应该减少。产生这种现象的原因是为了可以使数据统计与盲元检测能在 FPGA 中自动完成, 文中采用的统计数据是基于 A/D 变换之后的 14 bit 灰度值, 而不是直接测量各像元的电压值, 所以模数转换存在误差。同时 A/D 采样电压的动态范围与探测器像元本身直接输出电压范围存在一定差距, 所以导致测试结果存在较大偏差。但这种偏差不会影响检测算法的应用。

表 2 17 路合成输出盲元通道的盲元分布

Tab.2 Blind cell channel distribution by 17-way combiner

Lines	D1	D2	D3	D4	D5	D6	17	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	0	0	21	1	1	1	1	0	0
2	1	1	1	1	0	0	25	1	1	1	1	1	0
3	1	1	1	1	0	0	29	1	0	1	1	1	1
4	1	1	1	1	0	0	61	1	1	1	1	1	0
5	1	1	1	1	0	0	62	1	1	1	1	0	1
7	1	1	1	1	1	0	434	1	1	0	1	1	1
9	1	1	1	1	1	0	464	0	1	1	1	1	0
11	1	1	1	1	1	0	479	1	1	1	1	1	0

2.2 盲元删除与盲元通道合成数据校正处理

将检测的 59 个盲元形成类似表 2 的盲元检测表, 设置探测器工作状态为 TDI 模式, 通过探测器初始化过程, 设置数据寄存器 DATA WORD 与地址寄存器 ADDRESS WORD 对已确定的盲元进行删除 (deselection) 处理。在某一通道上至少一个像素被删除时, 为了弥补缺少像素对合成数据的影响, 将自动地在合成数据上乘以合理系数。为弥补有无坏点通道数据的非均匀性, 针对有盲元通道完成两点校正^[7-10]。

30 ℃到 50 ℃下探测器响应与温度近似线性变化, 非均匀校正的目的是将所有盲元通道合成数据经乘系数、加系数线性变化, 使其在 30 ℃和 50 ℃下

与没有坏点通道均值偏差为 0。则有:

$$f_i(R_i) = a_i R_i + b_i \tag{5}$$

式中: R_i 为某一温度下第 i 通道的实测灰度值; $f_i(R_i)$ 为校正后灰度值; a_i 、 b_i 分别对应这一通道的乘系数与加系数。假设在均匀黑体辐照下, 变换后 i 盲元通道在 30 ℃和 50 ℃下方程组(6)成立:

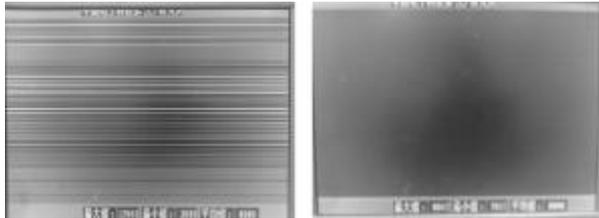
$$\begin{cases} a_i R_{i30^\circ\text{C 实测值}} + b_i = \bar{R}_{30^\circ\text{C 平均值}} \\ a_i R_{i50^\circ\text{C 实测值}} + b_i = \bar{R}_{50^\circ\text{C 平均值}} \end{cases} \tag{6}$$

$$\bar{R}_{\text{平均值}} = \sum R(i) / (480 - j) \tag{7}$$

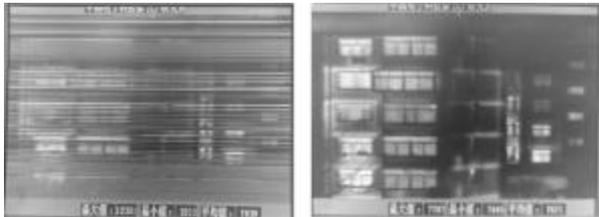
式中: $\bar{R}_{\text{平均值}}$ 为除盲元外所有通道像素均值; j 为盲元个数。求解方程组得:

$$\begin{cases} a_i = (\bar{R}_{30^\circ\text{C 平均值}} - \bar{R}_{50^\circ\text{C 平均值}}) / (R_{i30^\circ\text{C 实测值}} - R_{i50^\circ\text{C 实测值}}) \\ b_i = (\bar{R}_{50^\circ\text{C 平均值}} \cdot R_{i30^\circ\text{C 实测值}} - \bar{R}_{30^\circ\text{C 平均值}} \cdot R_{i50^\circ\text{C 实测值}}) / (R_{i30^\circ\text{C 实测值}} - R_{i50^\circ\text{C 实测值}}) \end{cases} \tag{8}$$

将每一盲元通道求得系数建立系数查找表,对输出的每一盲元通道做校正处理。处理后的数据送入下级非均匀校正模块,对 480 列做全序列校正与增强处理。经盲元删除与盲元通道校正处理后的图像如图 5(c)、(d)所示。



(a) 均匀背景下处理前红外图像 (b) 均匀背景下处理后红外图像
(a) Uniform background infrared images before processing (b) Uniform background infrared images after processing



(c) 复杂背景下处理前红外图像 (d) 复杂背景下处理后红外图像
(c) Complex background infrared images before processing (d) Complex background infrared images after processing

图 5 文中算法处理前、后的红外图像

Fig.5 Before and after processing results of IR images using algorithm proposed in this paper

3 结 论

利用QUARTUS 软件建立 FPGA 工程文件,选择 EP2S601020 为 FPGA 核心器件,观察编译结果,显示整个软件程序共占用 FPGA 26%的逻辑单元和 13%的存储空间。图 5 是盲元处理前、后 560×480 图像(未经非均匀校正),处理效果明显。

通过检验盲元通道与盲元位置的处理方法,删除盲元后,同时对盲元通道做非均匀性校正的方法。有效避免了探测器的非均匀性随温度和时间的漂移,得到了高质量的红外图像。与不经过此方法的盲元处理,只通过单一非均匀校正或邻域替换的方法相比,经过文中算法处理后,探测器经历较长工作一段时间后,其图像能保持较好的均匀性。

参考文献:

[1] Shi Changcheng, Zhang Tianxu, Liu Huina, et al. Combinational

algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane array [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(1): 23-26. (in Chinese)

施长城,张天序,刘慧娜,等.一种红外焦平面非均匀性组合校正算法[J].*红外与毫米波学报*,2010,29(1):23-26,52.

[2] Zhang Ke, Zhao Guifang, Cui Ruiqing, et al. Method of improving bad pixel detection precision of IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 453-456. (in Chinese)

张科,赵桂芳,崔瑞青,等.一种提高红外焦平面阵列盲元检测精度的方法[J].*红外与激光工程*,2007,36(4):453-456.

[3] Li Huaqiong, Chen Qian, Gao Wenkun. Dynamic detection and compensation algorithm of defective pixels for IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (2): 192-196. (in Chinese)

李怀琼,陈钱,高文昆.红外焦平面阵列失效元动态检测与校正算[J].*红外与激光工程*,2006,35(2):192-196.

[4] Bai Junqi, Jiang Yiliang, Zhao Chunguang, et al. Blind-pixel detection algorithm for infrared focal plane array detector[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(4): 233-235. (in Chinese)

白俊奇,蒋怡亮,赵春光,等.红外焦平面阵列探测器盲元检测算法研究[J].*红外技术*,2011,33(4):233-235.

[5] Country Engineering Supervision Bureau. The technique norms for measurement and test of characteristic of China (GB/T17444-1998)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998. (in Chinese)

国家技术监督局.红外焦平面阵列特性参量测试技术规范(GB/T17444-1998)[M].北京:中国标准出版社,1998.

[6] Wang Gaofeng, Zhao Yiqiang, Yang Dong. Data acquisition of 1024-pixel long linear infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 1990-1994. (in Chinese)

王高峰,赵毅强,杨栋.1024元长线列红外探测器的数据采集技术[J].*红外与激光工程*,2012,41(8):1990-1994.

[7] Tara Martin, Robert Brubaker, Peter Dixon, et al. 640×512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging[C]//SPIE, 2005, 5783: 12-20.

[8] Huang S, Grady M O', Groppe J V, et al. A customizable commercial miniaturized 320×256 indium gallium arsenide shortwave infrared camera[C]//SPIE, 2004, 5563: 118-129.

[9] Dieickx B, Meynants G. Missing pixels correction algorithm for imager sensors[C]//SPIE, 1998, 3410: 200-203.

[10] Ratlif B M, Hayat M M, Tyo J S. Radiometrically accurate scene-based nonuniformity correction for array sensors [J]. *JOSA A*, 2003, 20(10): 1890-1899.