

文章编号: 1672-8785(2020)08-0021-08

线列红外探测器盲元检测技术研究

王晓龙 龚志宏 李冬冰 张兴胜

(中国电子科技集团第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 由材料、工艺等因素引起的盲元是衡量红外探测器光电性能的重要指标之一。以某线列扫描型碲镉汞红外探测器为研究对象, 采用多种盲元检测方法分析了该探测器的盲元类型, 并将分析结果作为精准确定盲元数量及位置的依据。通过对发现的盲元进行替换, 得到了质量较好的图像。

关键词: 红外探测器; 碲镉汞; 盲元

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.08.004

Research on Bad Pixel Detection Technology of Line Array Infrared Detector

WANG Xiao-long, GONG Zhi-hong, LI Dong-bing, ZHANG Xing-sheng

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: The bad pixel is one of the important indexes to measure the photoelectric performance of infrared detectors which is caused by material, technology and some other factors. In this paper, a line-scanning HgCdTe infrared detector is taken as the research object, and the bad pixel types of the detector are analyzed by various bad pixel detection methods. The analysis results are taken as the basis for accurately determining the number and location of bad pixels. By replacing the bad pixels, the images with good quality are obtained.

Key words: infrared detector; HgCdTe; bad pixel

0 引言

目前, 红外成像设备的发展已日益成熟, 人们对其成像效果也提出了更高的标准。但是由于受到制造工艺和材料等因素的影响, 线列扫描型红外焦平面探测器组件不可避免地存在坏元多、均匀性差等问题^[1-2]。碲镉汞是一种通过离子键结合而形成的三元半导体复合材料。碲和镉、碲和汞之间均通过离子键连接, 故它们之间的相互作用力小。汞由于比较不稳定

而容易从碲镉汞材料中逃逸, 导致材料不均匀、产生缺陷以及带来器件性能差异。这是碲镉汞材料长久以来一直存在的问题, 在长波应用时尤其突出。由于材料和制造工艺的原因, 红外探测器往往存在盲元。干法刻蚀和电极沉积工艺是引入盲元的最主要因素^[3]。

线列红外探测器是通过扫描实现成像的, 其中每一个像元都会影响成像质量。若不对红外图像进行处理, 则会在图像上显示暗条纹或

收稿日期: 2020-07-01

作者简介: 王晓龙(1996-), 男, 北京人, 学士, 主要从事红外探测器的性能评价与测试工作。

E-mail: 570184919@qq.com

者亮条纹,进而影响后续的图像分析和处理工作。盲元检测主要用于确定盲元的数量和位置,并解决漏检和过检的问题。

1 盲元的定义

盲元是红外焦平面探测器中响应过高或过低的探测单元^[4],即无法准确成像的像元。盲元主要分为噪声盲元和响应率差异盲元两大类。碲镉汞材料常用于航天线列红外探测器中。碲镉汞红外探测器具有量子效率高、暗电流低以及后截止波长可通过 Hg-Te 组分来调节的优点。波长越长,碲镉汞的禁带宽度越窄,晶体结构中的 Hg-Te 键就会越弱。此时汞原子非常容易逃逸,导致制备出的碲镉汞探测器受材料表面影响严重,甚至在很大程度上也决定了探测器的光电性能^[5]。尤其在线列长波红外探测器中,经常存在相邻元之间响应率有差异的像元,其输出会表现为凹凸。但这种像元有时不会被判别成盲元,而在扫描成像时又会出现明暗条纹。死像元相对于其他像元而言响应较低,而噪声像元是指自身的响应在时域空间内波动较大的像元。在进行扫描成像时,死像元会表现为黑条纹,噪声像元会表现为白条纹(见图 1)。

1.1 线列组件的时域盲元(闪元)

时域盲元是指探测器受到恒定背景照射时输出信号电压随时间变化而突变的像元。这种

像元需要大量的采集帧数才能识别出来。将每个像元的输出电平与时间作一条曲线。当该曲线上有突变值时,这个像元就是时域盲元或闪元。

将采集到的数据做成一个面阵。其中,列为像元个数,行为采集帧数。该面阵可以被当作扫描后的灰度图像。如果存在闪元,图像中的某一行就会出现明暗条纹(见图 2 中的红框区域)。

1.2 线列组件的空间盲元

将线列组件的空间盲元定义为相邻元之间响应差异较大的像元。在根据国标剔除响应率盲元后,还会有一些像元的输出比相邻像元高或者低。此时在电平图上表现为凹凸。它们虽然不是盲元,但成像后的灰度值也会有明显差异。

图 3 所示为一个探测器所有像元的模拟输出电平。因为有冷屏,中间像元的响应会比两边大一些。从图 3 中可以看出,电平整体上比较一致,但也存在几个凸起。

2 测试系统及探测器

2.1 测试系统

焦平面参数测试系统由双面源黑体、驱动电路和计算机等组成(见图 4)。具体的测试条件如下:

- (1)面源黑体的发射率大于 0.95;

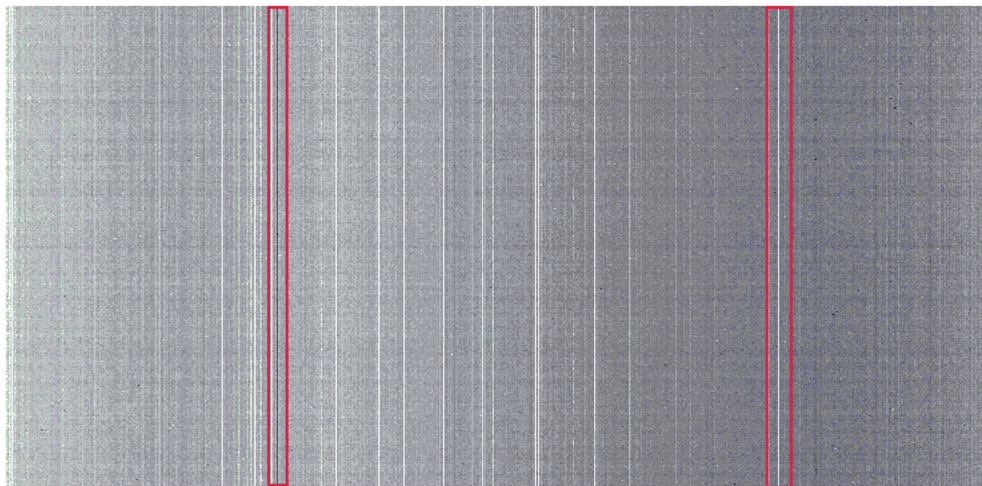


图 1 线列红外探测器的扫描图像



图 2 存在闪元时的线列红外探测器扫描图像

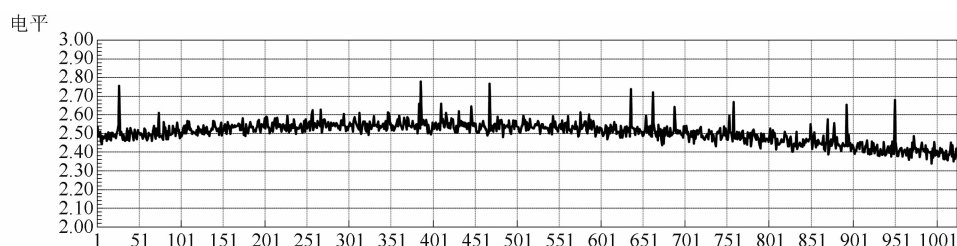


图 3 探测器的输出电平图

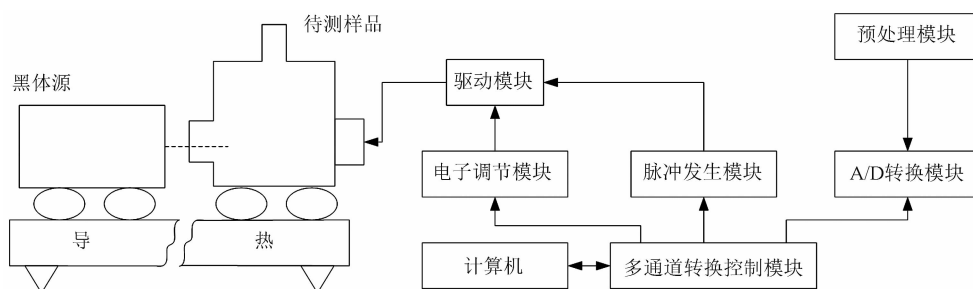


图 4 焦平面参数测试系统

(2) 黑体源的温度稳定性小于 $\pm 1\text{ K}$, 输出不加调制;

(3) 黑体辐射面与二代红外焦平面探测器窗口的距离小于 2 cm , 以保证面源均匀辐照并充满探测器视场;

(4) 二代红外焦平面探测器的输出信号电压经放大后不得超过 A/D 采集卡的采集范围;

(5) 检测设备需在检定有效期内。

2.2 测试所用的红外探测器

测试中使用的探测器为国产 2 谱段时间延迟积分 (Time Delay and Integration, TDI) 型红外焦平面探测器。该探测器可以同时互联两个

谱段的红外探测器。图 5 是像元排布图。其中, B1 为中波红外部分, B2 为长波红外部分。

单通道电路主要由像素单元电路、双向扫描电路、2 级 TDI 电路和列选输出级等部分组成 (见图 6)。在时序的控制下, 读出探测器产生的信号, 并将其传递给差分输出转换模块进行处理。

2.2.1 TDI 线列结构

TDI 线列结构由两个相同的 1024×6 线列结构组成。 1024×6 线列读出电路的单通道电路主要包括以下模块:

(1) 输入级。考虑到应用波段为中长波波

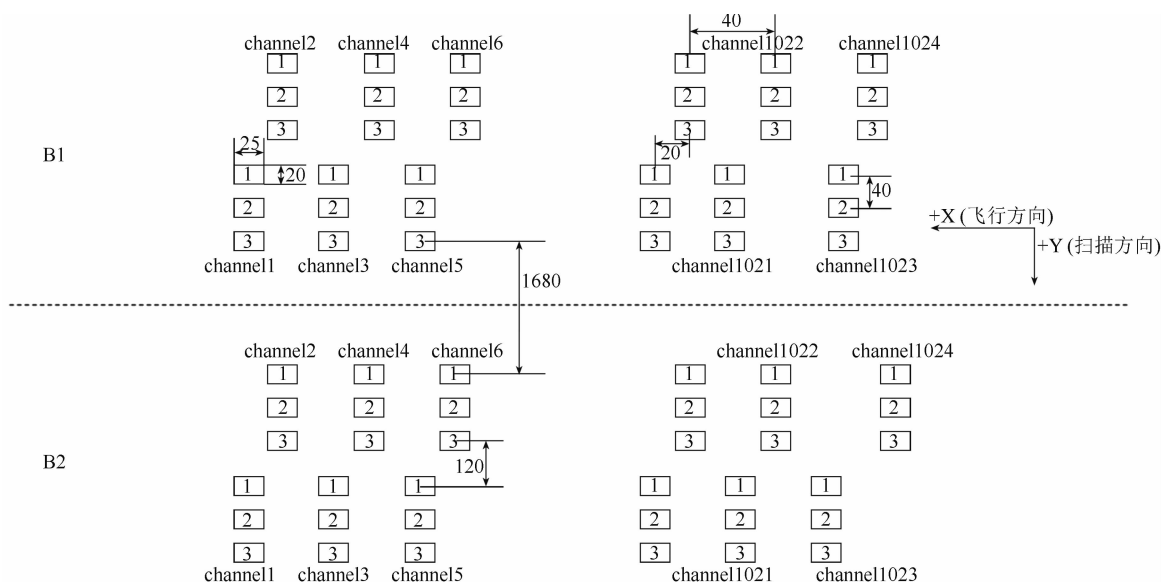


图 5 像元排布图

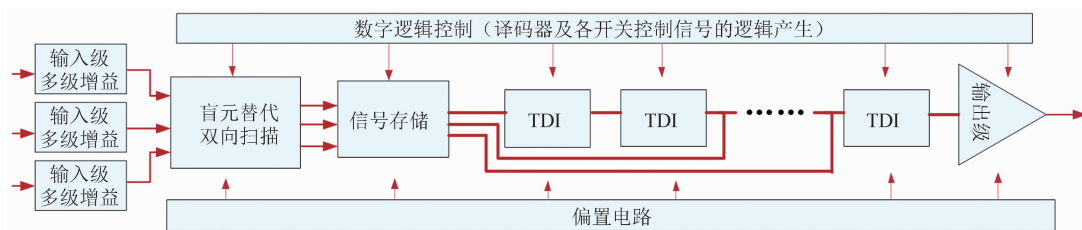


图 6 TDI 单通道电路框图

段，输入级采用 DI 结构。

(2)盲元替代与双向扫描。该功能由串行接口来控制。在实现替代功能时，将内部产生偏压 V_{PD} 作为被替代像元的静态电平。同时，为了补偿缺失像元的输入，TDI 通道增益自动变为原来的 $6/5$ 。

(3)采样级。线列电路采用 IWR 模式，所以需要信号进行采集存储后再读出。积分和读出过程相互独立，可实现边积分边读出。

(4)TDI 级。每个像元都采用 2 级 TDI 结构，单通道中共有 11 级 TDI。通过采用累加平均的设计方法来保证 6 元信号平均后不变而噪声平均后变小，从而提高信噪比。

(5)输出级。输出列选放大器和输出缓冲放大器共同构成了通道输出级。在时钟的控制下，单通道输出时将 1024 元逐个输出，而双通道输出时奇偶列按顺序分别从通道 1 与通道 2 输出。

2.2.2 读出电路的模拟部分

读出电路的模拟部分包括光伏二极管的输入级、6 个像元构成的 TDI 通道以及 1024 个像元对应的多路选择器。输出共有两个 1024 通道。每个线列探测器都具有增益可变和盲元替代功能。

2.2.3 数字电路

数字电路主要由时序生成模块和串行数据模块构成。其中，时序生成模块用于产生线列工作和信号传递的相关时序，而串行数据模块则负责生成数据字和控制字，从而实现积分电容可调、双向扫描以及盲元替代等附加功能。生成的时序信号与 1024×6 线阵连接，用于控制 TDI 信号的传递。

此款电路使用固定电平来将盲元替换掉，使得该像元产生的信号为 0，导致整体信号变小。因此，在盲元替代时设计了增益调整功能，用来维持信号水平以防其变小。SERDAT

	6-bit pixel data word Selection/de-selection									10-bit pixel address word (row selection)																		
	CNT	GAIN3	GAIN2	GAIN1	DIR	BYPAS2	BYPAS1	SELECT	PGM																			
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			
	CONTROL WORD									DATA WORD						ADDRESS WORD												

图 7 SERDAT 控制寄存器的定义

控制寄存器的具体定义如图 7 所示。它共 25 位并分为三组：控制位、数据位和地址位。后 18 位用于控制盲元替代。

3 盲元检测研究

3.1 国标盲元介绍

在 GB/T 17444-2013 中, 死像元的判据是其响应率小于平均响应率的 1/2, 噪声像元的判据是其噪声电压大于平均噪声电压的 2 倍^[6]。

响应率的计算公式如下:

$$R(i, j) = \frac{V_s(i, j)}{P} \quad (1)$$

$$P = \frac{\sigma(T^4 - T_0^4)}{4(L/D)^2 + n} \quad (2)$$

式中, $V_s(i, j)$ 为像元输出信号(单位为 mV); P 为在黑体温度 T 和 T_0 辐照条件下入射到像元的辐照功率差; σ 为斯特藩常数, $\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_0 和 T 为黑体温度(单位为 K); D 为冷屏圆孔径(单位为 cm); A_D 为像元面积(单位为 cm^2); L 为冷屏面到焦平面之间的垂直距离。当 L/D 大于 1 时, n 为 1; 当 L/D 小于等于 1 时, n 为 0。

为了提高探测器的成像质量, 需要提前对盲元进行替代处理, 然后再进行非均匀性校正, 从而提高像元的响应一致性。这样可以全面反映探测器的盲元数量及位置。

3.2 线列组件的时域盲元筛选方法(长时间闪线判别法)

通过对常规的线列组件进行多行采集来将其转换为面阵。将 1000 行线列合并成一个 1024×1000 的面阵, 然后对其采集 500 帧。这

相当于进行了 500000 行数据采集。将行周期设定为 $500 \mu\text{s}$, 则整个时域周期为 250 s。通过下面的算法来分析 250 s 内的时域盲元。

对于每个子帧 j , 直流信号输出的平均值为

$$U(i, j) = \frac{1}{1000} \sum_{k=1}^{1000} U(i, k, j) \quad (3)$$

噪声为

$$N(i, j) = \frac{1}{1000} \sqrt{\sum_{k=1}^{1000} [U(i, k, j) - U(i, j)]^2} \quad (4)$$

每个像元的噪声 $N(i)$ 为子帧 $N(i, j)$ 的平均噪声:

$$N(i) = \frac{1}{500} \sum_{j=1}^{500} N(i, j) \quad (5)$$

式中, i 为像元序号(1~1024); k 为面阵序号(1~1000); j 为子帧序号(1~500)。

计算出每个像元 500 帧输出信号的最大值 $U_{max}(i)$ 和最小值 $U_{min}(i)$, 然后分别用式(6)、式(7)和式(8)来定义正常像元、时域软盲元和时域硬盲元。

$$\frac{U_{max}(i) - U_{min}(i)}{N(i)} \leq 1.5 \quad (6)$$

$$1.5 < \frac{U_{max}(i) - U_{min}(i)}{N(i)} < 3 \quad (7)$$

$$\frac{U_{max}(i) - U_{min}(i)}{N(i)} > 3 \quad (8)$$

3.3 线列组件的空间盲元筛选方法(相邻元偏差法)

相邻元偏差法具体如下: 首先采集探测器的输出电平 $V_{(i)}$, 并通过式(9)和式(10)进行视场角校正以减小冷屏造成的非均匀性。然后得

到校正后的输出电平 $V_{c(i)}$ ，再以式(11)作为判据，利用相邻元差值与均值的比值来筛选盲元。

$$\cos\theta = H/\sqrt{(H^2 + D^2)} \quad (9)$$

$$V_{c(i)} = V_{(i)} / (\cos\theta)^4 \quad (10)$$

$$\frac{|V_{c(i)} - V_{c(i+1)}|}{(V_{c(i)} + V_{c(i+1)})/2} \geq 5\% \quad (11)$$

式中， θ 为视场角， H 为冷屏到芯片中心的垂直距离， D 为像元到芯片中心的水平距离， $V_{(i)}$ 为像元响应电平， $V_{c(i)}$ 为经过视场角校正后的像元电平， $V_{c(i+1)}$ 为校正后的相邻元电平。

4 测试结果及分析

4.1 盲元位置

图 8(a)和图 8(b)分别为中波和长波波段的输出响应图。可以看出，同一个探测器在两个波段的盲元率有明显的差距。中波波段的盲元率明显低于长波波段，表明碲镉汞的禁带宽

度越窄，盲元数越多。长波波段的凸起像元较多，但都没被判定成盲元。这在实际使用中会影响成像质量。表 1 和表 2 分别列出了中波和长波波段的盲元采集结果。

两个波段的测试结果反映出了两种判据的适用性。用颜色标记出的为相同的盲元。在中波波段，用国标盲元检测方法(100 行)、长时间闪线判别法(500000 行)和相邻元偏差法判别的盲元位置基本重合，说明在目前的工艺状态下中波器件有较好的长时间稳定性，相邻元之间的一致性也比较好(不均匀性主要是由冷屏效应导致的)，器件本身的非均匀性比较一致。

在长波波段，由于闪线及凹凸输出像元增多，长时间闪线判别法和相邻元偏差法得到的盲元要明显多于国标检测方法，且这两种方法得到的盲元也有很多差异，说明长波器件在时域和空域的稳定性和一致性都远远不如中波器件。因

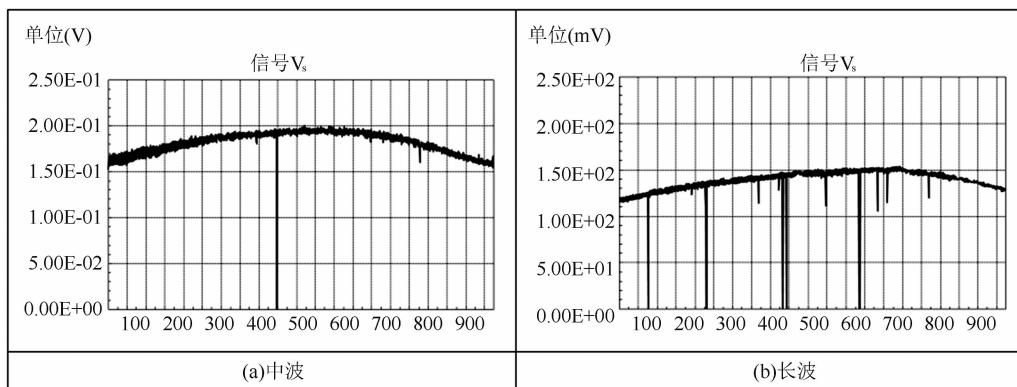


图 8 中长波波段的输出响应图

表 1 中波波段的盲元位置

中波	国标 盲元	6 级	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6
		433		232	59	7	224	347
		265	433	262	230	254	771	
			564	265		265		
中波	空域 盲元	6 级	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6
		433	341	232	59	7	224	347
			433	262	230	254	771	420
			564			635		
中波	时域 盲元	6 级	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6
		265		265		265		

表 2 长波波段的盲元位置

		7 级	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6
长波	国标 盲元	124	9	328	124	529	401	699
		177	382	469	177		613	726
		208	668		208		803	
		328			363			
		726			428			
					440			
					814			
		7 级	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6
		208	241	284	124	144	37	699
		224	345	287	177	268	224	726
长波	空域 盲元	345	382	302	208	392	255	
		401	668	328	302	529	257	
		726	1023	385	814	814	401	
		814		597	816		613	
		816					803	
		1023					958	
		7 级	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6
长波	时域 盲元	324	23	221	324	652	26	
		652			562			

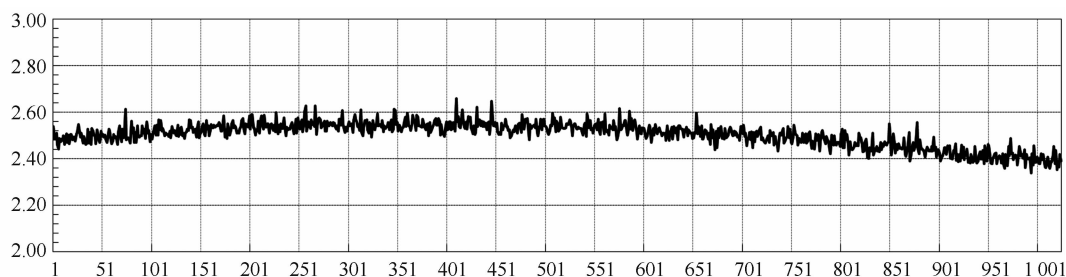


图 9 替代空域和时域盲元后的电平图

此, 在长波波段应该将两种判据相结合来筛选盲元。

4.2 盲元替代

找出盲元位置后, 在外部编写 SERDAT 时序并将其发送给读出电路, 从而完成盲元替代。时序编程举例如下: 设定 100 档存储电容 (TDI 为 $-Y$ 方向), 对奇数通道 5 中的第二个像元进行替代。具体步骤如下:

(1) 盲元替代时控制位固定, 只编写地址位和数据位。控制语句为 110010001。

(2) 将数据位中的第二位设为 0, 即数据

位为 101111。

(3) 第一个像元的地址位为 0000000000, 所以通道 5 转成二进制后的地址位为 00000000100。

(4) 最终完整的 SERDAT 存储器编码为 11001000110111100000000100。

如图 9 所示, 盲元替代后, 已经不存在图 8 中响应率有差异的像元了。相邻元之间的输出差异变小, 响应率非均匀性也同时变低。

图 10(a) 为长波探测器替代国标盲元后的灰度图; 图 10(b) 为时域和空域盲元均被替代

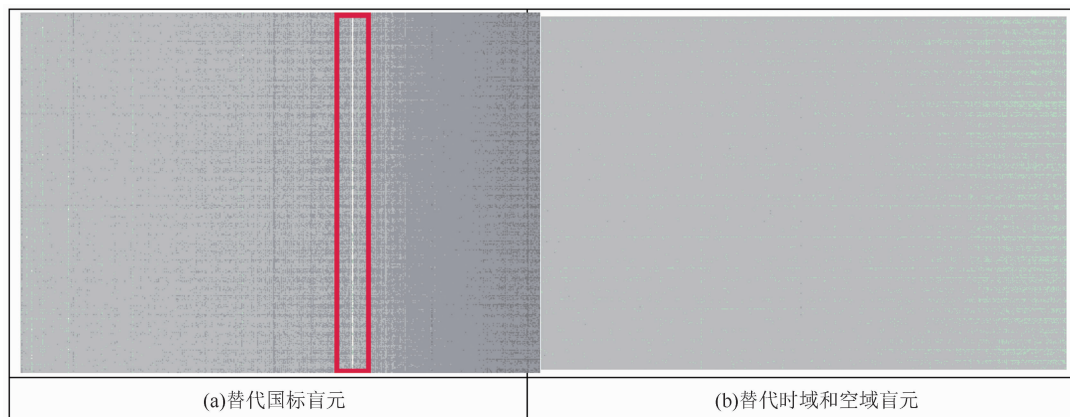


图 10 替代空域和时域盲元后的灰度图

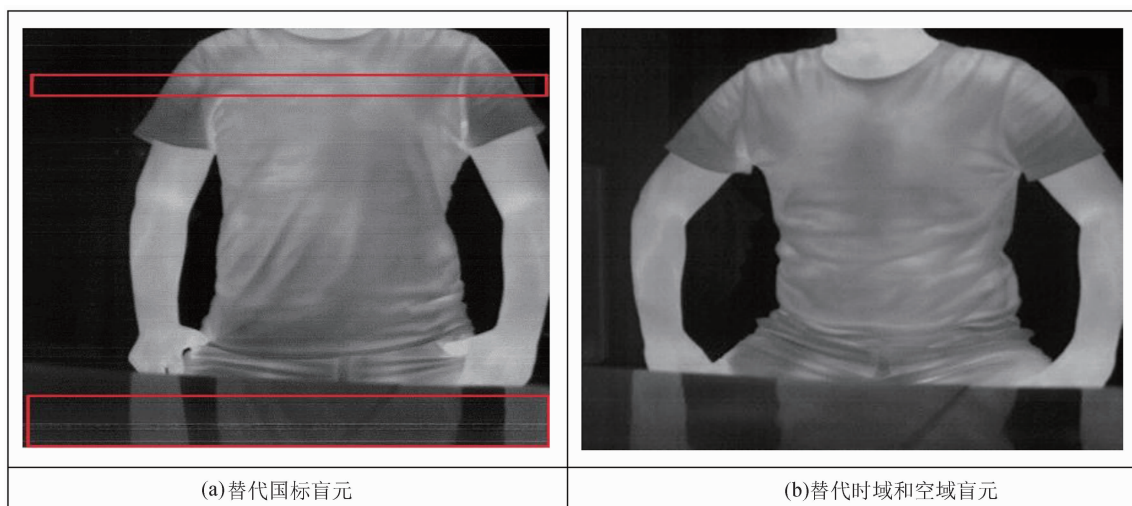


图 11 替代空域和时域盲元后的成像图

后的灰度图。通过比较发现，替代时域和空域盲元后输出的一致性明显提高。

图 11(a)和图 11(b)分别是替代国标盲元和替代时域及空域盲元后的图像。由于线列红外探测器是通过扫描成像的，一个盲元的存在就会导致图像失真。从图 11(a)中可以明显地看到比较弱的明暗条纹。这种条纹非常影响成像质量。

5 总结

盲元是影响红外探测器成像质量的一个重要因素。为了更准确地反映目标的状态，在成像前就应该精准地筛选出盲元并确定其位置。长时间工作的红外探测器经过两点校正并维持一段时间后，非均匀性就会变大，此时需要重新进行校正。这是由闪元和响应率差异盲元导

致的。由于禁带宽度及制造工艺的原因，长波探测器中的闪元和响应率差异盲元较多，因此这种现象更为明显。

本文针对上述现象提出了闪元和响应率差异盲元测试方法。经过测试，筛选出了国标盲元、闪元及响应率差异盲元。将三种盲元数据相结合并进行盲元替代后的成像效果明显优于只替代国标盲元时的结果。因此，将这些盲元筛选出来并进行替代是十分必要的，也为接下来的非均匀性校正研究提供了基础。

参考文献

- [1] 郭亮, 李冬冰, 杨微, 等. 线列 TDI 型红外探测器组件坏元替代方法 [J]. 激光与红外, 2015, 45(7): 809-813.

(下转第 35 页)