

HgCdTe 短波红外焦平面探测器校正技术

陈建军^{1,2}, 崔继承^{1*}, 刘嘉楠^{1,2}, 刘建利^{1,2}, 姚雪峰¹, 杨晋¹, 孙慈¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家光栅制造与应用工程技术研究中心, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学大珩学院, 北京 100049

摘要 在短波红外成像光谱技术的应用背景下,对 HgCdTe 短波红外焦平面探测器的校正技术进行研究,包括坏像元校正和非均匀性校正,并提出先进行坏像元校正后进行非均匀性校正的探测器校正原则;在标准辐射源下,对正常像元的输出值进行正态分布拟合,并通过 3σ 准则设定正常像元输出值阈值的方法,确定探测器中坏像元的数量与位置,然后根据短波红外成像光谱技术的应用要求,对坏像元进行光谱二邻域均值替换;坏像元校正完成后,再采用运算量小、实时性强的两点法对探测器进行非均匀性校正。综合校正结果表明:探测器坏像元得到有效剔除,坏像元输出值得到良好校正,且非均匀性校正效果明显,图像细节更加丰富。

关键词 探测器; 校正技术; HgCdTe; 红外焦平面探测器; 坏像元校正; 非均匀性校正

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0204001

Correction Technology of HgCdTe Short-Wave Infrared Focal Plane Arrays

Chen Jianjun^{1,2}, Cui Jicheng^{1*}, Liu Jianan^{1,2}, Liu Jianli^{1,2},
Yao Xuefeng¹, Yang Jin¹, Sun Ci¹

¹National Engineering Research Centre for Diffraction Gratings Manufacturing and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Under the background of the short-wave infrared imaging spectroscopy application, we study a set of corrections of HgCdTe short-wave infrared focal plane arrays, including defective pixel correction and non-uniformity correction, and propose the correction principle of non-uniformity correction after defective pixel correction. Under standard radiation sources, the normal distribution of normal pixel output values is fitted, and the threshold of normal pixel output is set by the 3σ criterion to determine the number and the location of defective pixels in the detector. Then according to application requirements of short-wave infrared imaging spectroscopy, the spectral two-neighborhood mean replacement is applied to the defective pixels. After the defective pixel correction is completed, the non-uniformity correction of the detector is carried out by the two-point method with small calculation amount and strong real-time performance. The comprehensive correction results show that the defective pixels of the detector are effectively eliminated, the output values of defective pixels are well corrected, the effect of non-uniformity correction is obvious, and the image details are more abundant.

Key words detector; correction technology; HgCdTe; infrared focal plane array; defective pixel correction; non-uniformity correction

OCIS codes 040.3060; 040.6808; 040.1240

1 引 言

HgCdTe 对短波红外波段的感应具有量子效率

高、热激发暗电流小等优点,是重要的短波红外探测器材料^[1-5]。HgCdTe 短波红外焦平面探测器是各种短波红外相机和光谱成像仪器的核心器件,在资

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-09-12; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ12035102)、国家 973 计划(2014CB049500)

* E-mail: jicheng_cui@163.com

源探测、环境监测、大气测量等民用领域具有广泛应用,并且在短波红外探测、目标捕获与跟踪等军事领域具有重要应用^[6-8]。但是,技术水平与制作工艺的限制使得 HgCdTe 短波红外焦平面探测器仍普遍存在坏像元^[9]与感应非均匀性^[10-11]的问题,并且坏像元的数量会随着探测器使用时间的延长而增加,因此对 HgCdTe 短波红外焦平面探测器进行校正和优化是十分必要的。

在短波红外成像光谱技术的应用中,如果不校正探测器中的坏像元,就可能会影响光谱特征的提取,甚至获得错误的光谱信息;探测器感应的非均匀性会降低系统的成像质量,导致细节信息丢失,也会影响光谱的准确性。因此,针对成像光谱的应用背景,HgCdTe 短波红外焦平面探测器在投入使用之前需要进行相应的坏像元校正和感应非均匀性校正。

目前,国内外学者针对红外焦平面探测器的坏像元校正和非均匀性校正分别进行了大量研究^[12-15],但是还未见对两者同时进行研究的报道。在实际工程应用中,HgCdTe 短波红外焦平面探测器的坏像元校正和非均匀性校正存在先后顺序的问题,一般需要先进行坏像元校正,然后再进行非均匀性校正,特别是对于坏像元水平较高或已长时间使用的探测器。本文在短波红外成像光谱技术的应用背景下,对 HgCdTe 短波红外焦平面探测器依次进行坏像元校正和非均匀性校正,并对校正结果进行分析,进一步与先进行非均匀性校正后进行坏像元校正的校正结果进行对比,并通过分析 2 个校正过程原理,得到了两者存在先后顺序的原因,从而提出先进行坏像元校正后进行非均匀性校正的校正原则。

2 坏像元校正的基本原理及校正结果

无论是在制造过程中,还是在使用过程中,HgCdTe 短波红外焦平面探测器都会不可避免地存在坏像元问题。从 HgCdTe 材料的生长,到工艺制备,再到后期探测器芯片的封装,乃至在使用过程中,都可能会出现坏像元。坏像元一旦产生便是硬件缺陷,无法从根本上修复,只能通过软件处理算法对其错误的输出值进行校正。探测器的坏像元分为亮点、暗点和色点 3 种。亮点代表像元可以感光,但是只有恒定的输出值;暗点代表像元不能感光,输出值为 0;色点代表可以感光,并且输出值随输入的变化而变化,但它的变化相较于正常像元有明显差异,

具体表现为响应值太大或太小,即明显亮于或暗于正常像元。

坏像元校正的过程主要分为 2 个步骤:1)坏像元数量与位置的确定,即坏像元检测;2)坏像元输出值的校正,即通过算法计算坏像元处应有的输出值,然后对坏像元的输出值进行替换。对于线阵或小规格的面阵探测器,可以采用人工识别的方式进行坏像元检测,但对于较大规格的探测器,则需要借助算法进行自动检测。

使用标准辐射源对探测器进行均匀、稳定的热辐射,采集探测器所获得的图像,理想情况下,此时探测器所有像元的输出值都是相同的,而坏像元的存在和像元感应的非均匀性使得所有像元的输出值不相同,但正常像元的输出值分布在一个很小的区间内。

图 1 所示为 320 pixel×256 pixel 规格的 HgCdTe 短波红外焦平面探测器在辐射源温度为 T_{high} 时所获得的图像。由图 1 可知,大部分像元的输出值都集中在同一平面,同时也有许多输出值过大或者过小的异常点,即坏像元。将图 1 中的图像转化为输出值分布直方图,如图 2 所示。由图 2 可知,绝大部分像元的输出值分布在 10^4 附近,且呈正态分布的趋势。由此本课题组认为,当辐射源温度为 T_{high} 时,正常像元的输出值应在 10^4 附近,而输出值远离 10^4 的像元为坏像元。例如,有少数像元的输出值分布在 1.3×10^4 附近,这部分像元即为坏像元,而且是坏像元中的亮点。

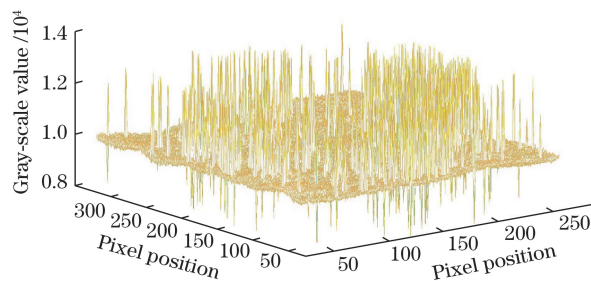


图 1 辐射源温度为 T_{high} 时探测器图像示意图

Fig. 1 Schematic of detector image with radiation temperature of T_{high}

将呈正态分布趋势的部分像元的输出值 h 进行正态分布拟合,得到其正态分布函数为

$$f(h) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(h - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中: μ 为输出值分布的数学期望, $\mu = 10031.7$; σ 为灰度值分布的标准差, $\sigma = 141.8$ 。根据 3σ 准则,取 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 为置信区间,即认为输出值在该

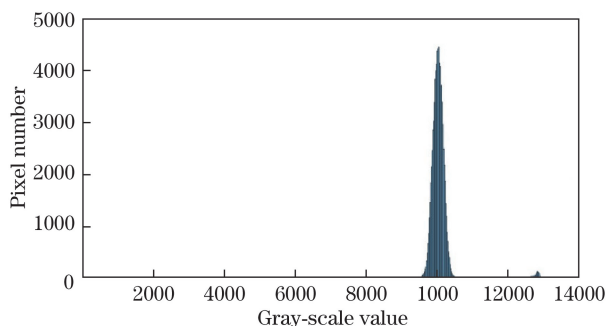


图2 辐射源温度为 T_{high} 时探测器图像输出值分布直方图
Fig. 2 Histogram of output value of detector image with radiation temperature of T_{high}

区间内的像元为正常像元,而输出值不在该区间内的像元为坏像元。由此可知,当辐射源温度为 T_{high} 时,HgCdTe 短波红外焦平面探测器像元的输出值应在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 区间内。通过编程对图 1 中的结果进行检测,记录所有灰度值不在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 区间的像元的坐标位置,得到坏像元的坐标集合 A 。为了避免遗漏坏像元,将标准辐射源的温度调为 T_{low} ,并采集探测器获得的图像,通过相同的方法,确定此时坏像元的坐标集合 B 。如果一个像元在任意温度下不能正常工作,则应将其归为坏像元,因此将集合 A 与集合 B 取并集,有 $M = A \cup B$, M 即为该探测器中所有坏像元坐标的集合。

坏像元检测完成后,即确定了坏像元的数量和位置,然后需要确定坏像元输出值的校正方法。常用的校正方法一般为邻域替换,即用坏像元相邻的正常像元的输出值代替坏像元的输出值,该校正方法是基于假设探测器采集的图像中相邻像元的输出值不发生突变。进一步地,还有二邻域均值替换、四邻域均值替换,甚至八邻域均值替换,即采用坏像元周围 2 个、4 个,甚至 8 个正常像元的输出值的均值来替换坏像元的输出值。本研究中 HgCdTe 短波红外焦平面探测器的规格为 $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,在成像光谱仪中应用时,以 320 个像元的一维作为空间维,以 256 个像元的一维作为光谱维。由于坏像元校正是在成像光谱仪的应用背景下进行的,因此结合成像光谱仪的成像特点,选择使用光谱二邻域均值替换的方法,对坏像元处的输出值进行替换。即对于坏像元 $H(x, y)$,有

$$H(x, y) = \frac{H(x, y - 1) + H(x, y + 1)}{2} \quad (2)$$

对于坏像元的光谱二邻域仍是坏像元的情况,即遇到连续的坏像元,则进一步取邻域坏像元的下一邻域,直至取到正常像元为止。当然,连续的坏像元会

降低探测器获取信息的准确度,但这是探测器的硬件问题,无法避免,光谱二邻域均值替换的方法只能对坏像元处的输出值进行相对合理的估测和校正。

至此完成了整个坏像元校正的过程。为了检验该方法的校正效果,将标准辐射源的温度调为测试温度 T_1 ,并采集探测器获得的图像,然后使用图像处理程序将坏像元坐标集合 M 中所有位置的输出值替换为其光谱二邻域的均值。图 3 所示为图像进行坏像元校正前后的对比。由图 3 可知,所有坏像元均已被校正,说明前述的坏像元检测方法没有遗漏坏像元,而且在校正后的图像中,所有像元的输出值均分布在同一平面附近,也说明所采用的坏像元输出值替换方法较为合理。

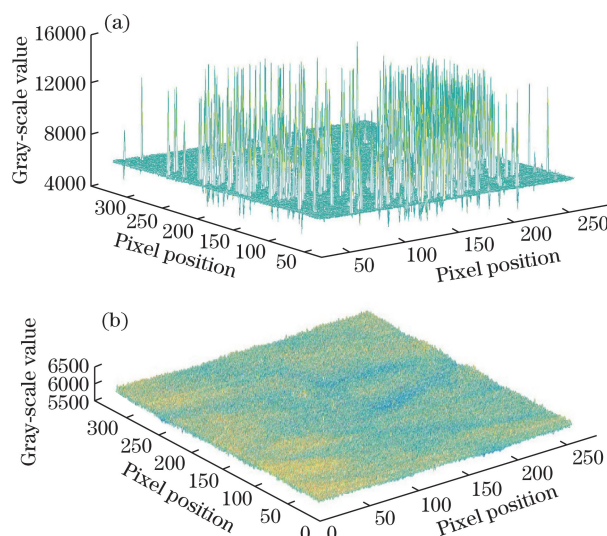


图3 辐射源温度为 T_1 时,坏像元校正前后的探测器图像。
(a)校正前;(b)校正后

Fig. 3 Detector images before and after defective pixel correction with radiation temperature of T_1 .
(a) Before correction; (b) after correction

3 非均匀性校正的基本原理及校正结果

HgCdTe 短波红外焦平面探测器响应的非均匀性十分复杂,到目前为止都无法建立准确的数学模型加以描述,仍然停留在使用经验公式的阶段。探测器响应的非均匀性一般包括:探测器固有的非均匀性(主要由探测器的材料质量和制造工艺决定)、探测器芯片与读出电路耦合的非均匀性、探测器工作环境引入的非均匀性,以及红外光学系统引入的非均匀性等。

非均匀性校正是 HgCdTe 短波红外焦平面探测器投入使用之前的一个重要的校正过程,经过非均匀性校正可以显著提高红外探测的探测精度。红

外焦平面探测器的非均匀性校正模型分为线性模型和非线性模型,线性模型的校正方法主要有单点校正、两点校正和多点校正;非线性模型的校正方法有基于插值算法和多项式拟合的校正方法、基于场景的校正方法和连续时间校正方法等。为了减小校正过程的计算量,实现在线实时校正,本课题组采用两点校正法对 HgCdTe 短波红外焦平面探测器进行非均匀性校正。

两点校正是一种基于参考辐射源的非均匀性校正方法,该方法假设探测器像元的输出响应与红外辐射强度呈线性关系,而且探测器的响应具有时间稳定性。假设像元输出响应 $V_{i,j}(\phi)$ 与红外辐射强度 ϕ 的线性关系为

$$V_{i,j}(\phi) = k_{i,j}\phi + b_{i,j}, \quad (3)$$

式中: $k_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 分别为像元 (i, j) 的增益系数和偏置系数。采用两点校正法需要首先确定探测器在辐射源温度为高温 T_{high} 和低温 T_{low} 时所有像元响应的平均值,假设分别为 V_{high} 和 V_{low} , 那么有

$$\begin{cases} V_{\text{high}} = \frac{\sum V_{i,j}(\phi_{\text{high}})}{N} \\ V_{\text{low}} = \frac{\sum V_{i,j}(\phi_{\text{low}})}{N} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: N 为探测器像元总数。两点校正的核心是通过探测器的所有像元附加增益校正系数 $K_{i,j}$ 和偏置校正系数 $B_{i,j}$, 使所有像元在高温 T_{high} 和低温 T_{low} 时的响应分别归一化为 V_{high} 和 V_{low} , 因此有

$$\begin{cases} V_{\text{high}} = K_{i,j}V_{i,j}(\phi_{\text{high}}) + B_{i,j} \\ V_{\text{low}} = K_{i,j}V_{i,j}(\phi_{\text{low}}) + B_{i,j} \end{cases}. \quad (5)$$

联立(5)式,得到

$$\begin{cases} K_{i,j} = \frac{V_{\text{high}} - V_{\text{low}}}{V_{i,j}(\phi_{\text{high}}) - V_{i,j}(\phi_{\text{low}})} \\ B_{i,j} = \frac{V_{\text{low}}V_{i,j}(\phi_{\text{high}}) - V_{\text{high}}V_{i,j}(\phi_{\text{low}})}{V_{i,j}(\phi_{\text{high}}) - V_{i,j}(\phi_{\text{low}})} \end{cases}. \quad (6)$$

获得每个像元的增益校正系数 $K_{i,j}$ 与偏置校正系数 $B_{i,j}$ 后,便可以利用公式

$$V'_{i,j}(\phi) = K_{i,j}V_{i,j}(\phi) + B_{i,j}, \quad (7)$$

在探测器工作过程中实时地对像元的响应进行非均匀性校正。为了检验上述非均匀性校正的效果,将标准辐射源的温度调为测试温度 T_t , 并采集探测器图像,先对其进行坏像元校正,坏像元校正后的图像如图 4(a)所示。由图 4(a)可以明显地看出像元响应的非均匀性,各像元的响应值虽然比较接近,但整个图像起伏不定,高低不平。然后使用前述方法对

图 4(a)进行非均匀性校正,校正后的图像如图 4(b)所示。由图 4(b)可以看出,整个图像的起伏被抹平,所有像元的响应十分均匀,即非均匀性校正效果良好。

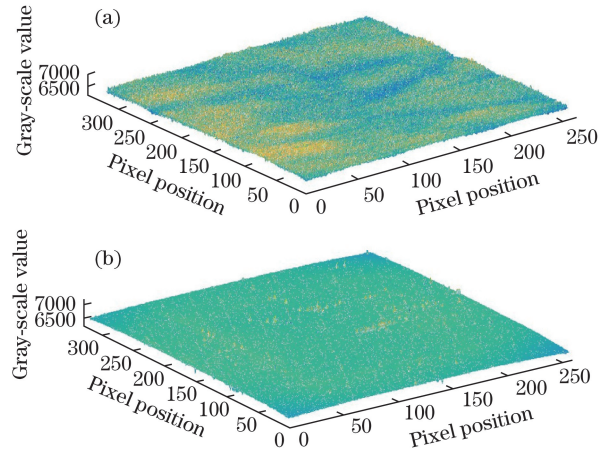


图 4 辐射源温度为 T_t 时,非均匀性校正前后的探测器图像。

(a) 校正前;(b) 校正后

Fig. 4 Detector images before and after non-uniformity correction with radiation temperature of T_t .

(a) Before correction; (b) after correction

4 坏像元校正与非均匀性校正的先后顺序

HgCdTe 短波红外焦平面探测器的坏像元校正和非均匀性校正都是探测器在投入使用之前必要的校正过程,通过坏像元校正将坏像元的错误输出值校正为合理的输出值,通过非均匀性校正来校正像元的响应曲线,使它们对同样强度的红外辐射具有趋于统一的响应值。

通过分析坏像元校正与两点法非均匀性校正的原理后发现:本研究中的坏像元校正基于对像元输出值的判断来识别并校正异常像元的过程,坏像元的校正利用坏像元响应区别于正常像元响应的固有特性进行的,因此校正过程相对独立;而基于两点法的非均匀性校正需要借助高温 T_{high} 和低温 T_{low} 时所采集图像的像元响应的平均值进行归一化处理,也就是非均匀性校正的过程与所有像元的响应都直接相关,这其中也包括坏像元,而坏像元的错误响应会直接影响所有像元响应的平均值,从而影响非均匀性校正的结果,而且坏像元处的响应值过大或过小也会导致坏像元处的增益校正系数 $K_{i,j}$ 和偏置校正系数 $B_{i,j}$ 出现异常,这些因素必然导致非均匀性校正的效果不佳。

由上述分析可知,为避免坏像元对非均匀性校正效果的影响,需要先进行坏像元校正,再进行非均匀性校正,特别是针对连续坏像元以及坏像元水平较高的探测器,必须先进行坏像元校正,否则坏像元的存在会对非均匀性校正的结果产生较严重的影响。对上述分析进行实验验证:使用 HgCdTe 短波红外焦平面探测器分别在标准辐射源高温 T_{high} 和低温 T_{low} 时采集图像,将采集的图像作为两点校正的参考数据,并分别在坏像元校正前和坏像元校正后进行非均匀性校正,获得 2 组增益校正系数 $K_{i,j}$ 、 $K'_{i,j}$ 以及 2 组偏置校正系数 $B_{i,j}$ 、 $B'_{i,j}$,然后将标准辐射源的温度调为测试温度 T_t ,并采集探测器图像,然后分别以先进行坏像元校正再进行非均匀性校正和先进行非均匀性校正再进行坏像元校正的顺序对探测器图像进行校正,校正结果分别如图 5(a) 和 5(b) 所示。由图 5 可知,先进行坏像元校正再进行非均匀性校正的校正结果明显优于先进行非均匀性校正再进行坏像元校正的结果。因此,本课题组提出对红外探测器进行校正的原则是:先进行坏像元校正再进行非均匀性校正。

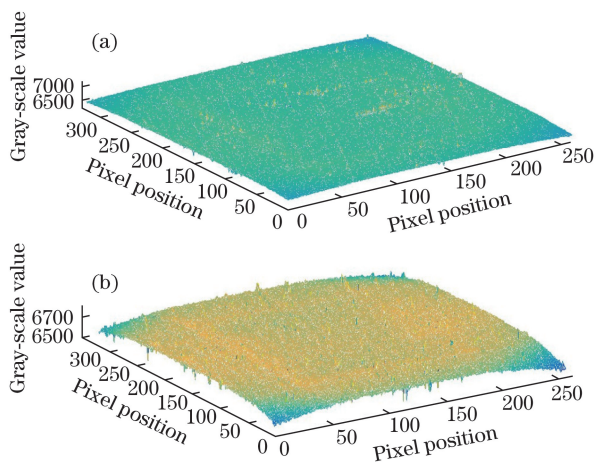


图 5 探测器图像在不同校正顺序时的校正结果。(a) 先进行坏像元校正再进行非均匀性校正;(b) 先进行非均匀性校正再进行坏像元校正

Fig. 5 Correction results of detector images with different correction sequences. (a) Non-uniformity correction after defective pixel correction; (b) defective pixel correction after non-uniformity correction

5 综合校正的外景实验结果

HgCdTe 短波红外焦平面探测器经坏像元校正和非均匀性校正后,确定了所有坏像元的坐标位置,并得到了所有像元的增益校正系数 $K_{i,j}$ 和偏置校正系数 $B_{i,j}$ 。由于本课题组所采用的校正方法计算

量小,且实时性好,因此可以将这些数据存储到探测器的处理器中,在探测器工作过程中进行实时校正。为了综合检验探测器校正的效果,本课题组进行了外景实验,图 6 所示为外景实验获得的图像,其中图 6(a) 所示为原始图像,图 6(b) 所示为校正后的图像。由图 6 可以直观地看出:坏像元校正效果良好,原始图像中零星的坏点被完全校正,并完美地融入到了正常像元中;在局部放大图中可以明显地看出原始图像中存在隐约的条纹,这就是像元感应非均匀性现象;校正后,条纹现象消失,图像更加清晰。

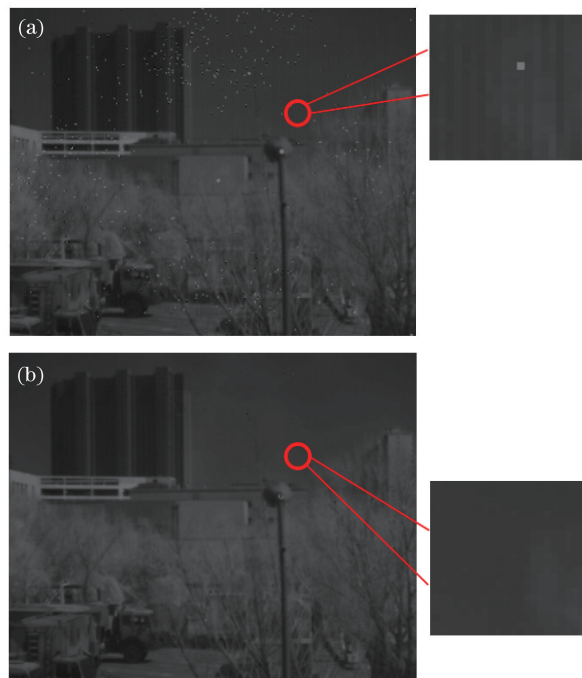


图 6 校正前后的外景图像。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig. 6 Scene images before and after correction.

(a) Before correction; (b) after correction

6 结 论

在短波红外成像光谱技术的应用背景下,对 HgCdTe 短波红外焦平面探测器进行坏像元校正和非均匀性校正,通过对校正原理进行分析,确定并验证了 2 种校正的先后顺序。在坏像元校正中,对正常像元输出值进行正态分布拟合,并根据 3σ 准则,取 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 为置信区间来确定正常像元的输出值范围,以此来确定坏像元的数量及位置。在非均匀性校正中,采用两点法进行校正,运算量小,可应用于实时校正系统中。最后通过外景实验验证了本课题组提出的坏像元校正加非均匀性校正的校正技术对红外探测器的校正效果。本课题组对 HgCdTe 短波红外焦平面探测器采用的校正技术具

有运算量小、可实时性强和校正效果良好等优点,并且提出的先进行坏像元校正再进行非均匀性校正的校正原则也可以为同类探测器的校正提供借鉴和参考。

参 考 文 献

- [1] Bubulac L O, Tennant W E, Pasko J G, *et al.* High performance SWIR HgCdTe detector arrays[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1997, 26(6): 649-655.
- [2] Zhang T, Lin C, Chen H L, *et al.* Influence of metal frame structure on modulation transfer function of HgCdTe infrared focal plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0504001.
张瞳, 林春, 陈洪雷, 等. 金属框结构对碲镉汞红外焦平面调制传递函数的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0504001.
- [3] Chorier P, Tribolet P M. High-performance HgCdTe SWIR detectors for hyperspectral instruments[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4540: 328-342.
- [4] Yoon H W, Dopkiss M C, Eppeldauer G P. Performance comparisons of InGaAs, extended InGaAs, and short-wave HgCdTe detectors between 1 μm and 2.5 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6297: 629703.
- [5] Cheng X A, Lu Q S, Ma L Q, *et al.* Experimental study of HgCdTe (PV) detector irradiated by CW 1.319 μm laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 622-626.
程湘爱, 陆启生, 马丽萍, 等. 1.319 μm 连续波激光辐照 PV 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, 23(5): 622-626.
- [6] Wu T X, Li G H, Yang Z H, *et al.* Shortwave infrared imaging spectroscopy for analysis of ancient paintings[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71(5): 977-987.
- [7] Xu S W, Zhang Y L, Wang D P, *et al.* Precision measurement and results analysis of noise equivalent temperature difference of cooled HgCdTe infrared push-broom system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111202.
徐世伟, 张悦玲, 王大鹏, 等. 制冷型 HgCdTe 红外推扫系统噪声等效温差精测与结果分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111202.
- [8] Cui J C, Tang Y G, Han P P, *et al.* Development of diagnostic imaging spectrometer for tumor on-line operation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3043-3049.
崔继承, 唐玉国, 撒芑芑, 等. 用于肿瘤手术在线诊断的成像光谱仪的研制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 3043-3049.
- [9] Ghosh S, Marshall I, Freitas A. Autonomously detecting the defective pixels in an imaging sensor array using a robust statistical technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6808: 680813.
- [10] Hardie R C, Baxley F, Brys B, *et al.* Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14918-14933.
- [11] Leng H B, Xie Q S, Liu W, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IRFPA based on Bayesian estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0910001.
冷寒冰, 谢庆胜, 刘伟, 等. 基于贝叶斯估计的 IRFPA 自适应非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0910001.
- [12] Ghosh S, Froebrich D, Freitas A. Robust autonomous detection of the defective pixels in detectors using a probabilistic technique[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6904-6924.
- [13] Mao J X, Wang Y F. Statistical analysis of defective pixels for IRFPA detector using MATLAB[J]. *Infrared*, 2009, 30(3): 43-45.
毛京湘, 王忆锋. 用 MATLAB 实现红外焦平面探测器盲元的统计分析[J]. *红外*, 2009, 30(3): 43-45.
- [14] Leng H B, Tang X Y, Peng D X. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integral time adjust[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4): 246-250.
冷寒冰, 汤心溢, 彭鼎祥. 基于积分时间调整的红外焦平面阵列非均匀校正算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(4): 246-250.
- [15] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint: analog and digital implementations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 3061: 895-906.