

热红外高光谱成像仪光谱匹配盲元检测算法

张长兴¹, 刘成玉¹, 齐洪兴¹, 张东¹, 蔡能斌^{2*}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 上海市现场物证重点实验室, 上海 200083)

摘要: 受红外焦平面阵列生产工艺及材料本身特性影响, 红外焦平面阵列不可避免地存在盲元, 严重困扰红外数据的处理与应用。光栅分光推扫式热红外高光谱成像仪一般以红外焦平面阵列的其中的一维作为光谱维进行推扫式成像, 空间维只剩一维, 与一般的热像仪具有二维空间维的成像机制有很大区别。常规的实验室定标法和开窗处理的场景检测方法不能满足该成像方式的盲元检测需求。以热红外高光谱成像仪中的盲元检测为目标, 有针对性地提出了基于光谱匹配的盲元检测算法。该方法从光谱维角度出发, 以不同温度实验室黑体定标数据生成温升光谱数据, 在数据规则化处理的基础上, 自动提取有效像元目标的伪光谱曲线, 采用光谱角匹配的方式实现盲元的自动检测。以典型的热红外高光谱成像仪获取数据并开展盲元检测实验, 结果表明该方法充分利用了热红外高光谱成像仪的光谱维信息, 检测精度较高, 盲元补偿后的数据可满足热红外高光谱数据的行业应用。

关键词: 盲元检测; 光谱匹配; 热红外高光谱; 红外焦平面阵列

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0104002

Blind pixel detection algorithm using spectral matching for thermal infrared hyperspectral imager

Zhang Changxing¹, Liu Chengyu¹, Qi Hongxing¹, Zhang Dong¹, Cai Nengbin^{2*}

- (1. Key Laboratory of Spatial Active Opto-electronic Technique, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Crime Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

Abstract: Due to the influence of infrared focal plane arrays production technology and material characteristics, blind pixels are inevitable in infrared focal plane arrays, which seriously affects the processing and application of infrared data. The push-broom thermal infrared hyperspectral imager which using grating system generally takes one dimension of the infrared focal plane arrays as the spectral dimension and the other dimension as the spatial dimension, which is quite different from the imaging mechanism of the thermal imager with two spatial dimensions. Conventional laboratory calibration and scene detection methods based on moving window cannot meet the requirements of blind pixel detection on the thermal infrared hyperspectral imager. A new blind pixel detection algorithm based on spectral angle matching was proposed to detect the blind pixels in thermal infrared hyperspectral imager. Taken spectral dimension information into account, this method generated temperature rise spectrum data from

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 上海市现场物证重点实验室开放课题基金(2017XCWZK02, 2016XCWZK22)

作者简介: 张长兴(1988-), 男, 助理研究员, 主要从事成像光谱数据处理与应用方面的研究。Email: zhangchangxing@mail.sitp.ac.cn

通讯作者: 蔡能斌(1967-), 男, 高级工程师, 主要从事刑事特种照相技术方面的研究。Email: 13162056906@163.com

blackbody calibration data at different temperatures. Based on the basis of data regularization processing, the pseudo-spectral curve of effective pixels were extracted automatically, and the blind pixels were detected automatically by means of spectral angle matching. To validated the new blind pixel detection algorithm, a typical thermal infrared hyperspectral imager was used to collect image data and detect the blind pixels of the imager. The results indicates that this method makes full use of spectral information of the thermal infrared hyperspectral imager and has high detection accuracy. The data after blind pixels compensation can satisfy the application of thermal infrared hyperspectral data.

Key words: blind pixel detection; spectral matching; thermal infrared hyperspectral; infrared focal plane arrays

0 引言

热红外谱段作为地物光谱特征重要覆盖区域和遥感大气主要的透过窗口,能够获取地物的热辐射精细光谱信息,热红外高光谱成像系统兼具成像和精细光谱分析功能,可以广泛地用于地质填图、资源勘查、地表温度探测、城市热流分析、环境监测、地物分类等领域^[1]。但受到红外材料生长及器件制备工艺等影响,红外焦平面阵列在成像时普遍存在盲元问题,导致热红外高光谱图像存在坏线或剧烈条带噪声,严重影响图像质量和数据后续应用。

按照检测数据来源划分盲元检测主要包括两类方法:实验室定标法和基于场景的方法。定标法通过对黑体成像以获取单帧或序列均匀辐射图像,在此基础上根据盲元和有效像元在不同特征上的区别来判定盲元;基于场景的检测方法主要对成像过程中出现的盲元进行检测和补偿,两类方法的具体检测算法部分相同,多为基于统计和阈值的方法^[2-5]。除此之外,国内外学者还将一系列算法应用于盲元检测,Isoz W 等根据非均匀性校正多项式系数的异常实现盲元的提取^[6];Wang 等利用序列图像盲元存在相关性特点,该特性可用于盲元的识别^[7];黄曦等建立迭代修正的背景预测模型,根据盲元和有效像元的残差能量统计差异完成单帧图像盲元检测^[8];孙慧等基于固定图形噪声统计的特性异常,对死像元和过热像元分别进行了检测^[9];张瞳等基于多方向小波计算,运用 3σ 准则获取盲元分布^[10];张东阁等利用无监督学习的一类支持向量机和随机场景图像序列构造滚动更新的像元分类模型,实现红外焦平面阵

列盲元的在线检测^[11]。

众多的方法多为基于图像空间维度的检测,即针对单波段的面阵红外图像进行处理,而热红外高光谱成像仪作为目前高光谱成像研究的前沿载荷,采用推帚成像方式。该方式不同于常规红外面阵成像方式,每帧图像仅能获取穿轨方向的一行图像,随着飞行平台的运动进而获取沿轨方向的图像,单帧数据包含了空间维和光谱维的图像,与一般热像仪具有二维空间维的成像机制有很大区别,因此难以采用开窗处理的场景检测方式,而常规两点法等定标方式检测精度较差,对于闪元也难以检测,盲元的存在严重影响成像数据处理与应用。针对上述问题,文中基于光谱匹配理论提出了一种针对热红外高光谱成像仪盲元检测的算法,该方法从光谱维角度出发,以不同温度实验室黑体定标数据生成温升光谱数据,在数据规则化处理的基础上,自动提取有效像元目标的伪光谱曲线,采用光谱角匹配的方式实现盲元的自动检测。

1 定标法与场景法

红外焦平面阵列中盲元的特性包括两种,一种是无响应的死像元或过响应的过热像元,一种是包含极大噪声,波动较大的像元,这类像元无法通过非均匀性完成校正^[12]。除此之外,闪元也是较为常见的一类,文中将其统归为盲元。

1.1 定标法

实验室定标法通常采集在不同温度下获得的序列图像,然后利用差值或统计特征进行检测。

差值检测通常选取高温定标图像,记作 $V(T_{\text{High}})$

和 $V(T_{low})$, 将高低温图像相减的结果与预先设定好的阈值进行比对, 如果差的绝对值小于阈值则认为该像元为盲元, 否则认为该点为有效像元。

$$|V(T_{high}) - V(T_{low})| < \delta_{th} \quad (1)$$

式中: $V(T_{high})$ 为高温黑体图像; $V(T_{low})$ 为低温黑体图像; δ_{th} 为检测阈值, 该方法操作简便, 但是存在较大问题, 将在实验部分详细说明。

序列图像统计法需要统计计算序列图像每个温度下像元的响应率和像元噪声电压, 利用平均响应率和平均像元噪声电压进行比较, 判断生成盲元。

对于规模为 $I \times J$ 的探测器, i 行 j 列的像元响应率记作 $R(i, j)$, 平均响应率为焦平面内有效像元的均值, 记为 \bar{R} :

$$\bar{R} = \frac{1}{I \times J - (d+h)} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J R(i, j) \quad (2)$$

式中: d 为死像元的个数; h 为过热像元的个数。

像元噪声电压是像元输出信号电压涨落的均方根值, 记作 $V_N(i, j)$, 平均噪声电压是焦平面各有效像元噪声电压的平均值, 记作 \bar{V}_N , N 为序列图像的个数。

$$\bar{V}_N = \frac{1}{I \times J - (d+h)} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_N(i, j) \quad (3)$$

依据 GB/T 17444-1998, 死像元定义为像元响应率小于平均响应率 1/10 的像元, 过热像元为像元噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的像元, 因此将 $R(i, j) - \frac{1}{10} \bar{R} < 0$ 的像元判定为死像元, 将 $V_N(i, j) - 10 \bar{V}_N > 0$ 的像元判定为过热像元, 经过迭代判断没有新的盲元生成, 则完成检测, 该方法要求环境较为严格且需要迭代, 目前已形成国家标准。

1.2 场景法

目前基于场景的检测方法众多, 逐步趋向于将目前图像处理的方法应用于盲元检测并且算法复杂, 加权估计^[8]、小波检测^[10]、支持向量机^[11]等方法不断出现。虽然算法效果较好, 但是多应用于二维都是空间维的焦平面的检测, 需要开窗模板处理, 热红外高光谱成像仪的成像模式对盲元检测产生了一定局限。

2 光谱匹配的检测方法

为了开展热红外高光谱成像仪的性能精度评价, 设计了室内辐射定标采集和盲元检测装置, 如图 1

所示, 由黑体控制器、辐射黑体、热红外高光谱成像仪和计算机模块共同组成, 其中计算机模块包含数据采集单元和盲元检测单元。数据采集单元控制热红外高光谱成像进行数据采集, 实现数据记录, 并由不同温度高光谱数据生成温升光谱数据; 盲元检测单元对温升热红外高光谱数据实现自动光谱匹配盲元检测, 生成检测结果。

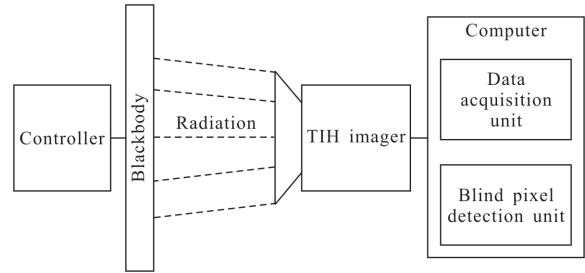


图 1 热红外高光谱成像仪盲元检测系统

Fig.1 Blind pixel detection system of the thermal infrared hyperspectral imager

热红外高光谱成像仪光谱匹配盲元检测算法, 详细算法流程如图 2 所示, 热红外高光谱成像仪使用的红外焦探测器规模为 $I \times J$, 空间维像元数目为 I 个, 光谱维为 J 个, 即成像后图像波段数为 J 个。

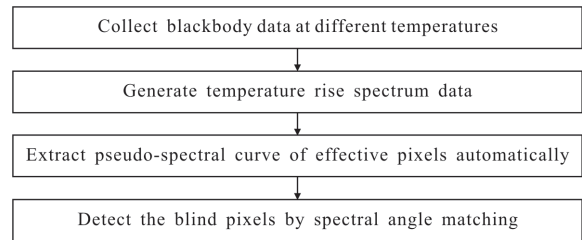


图 2 算法流程

Fig.2 Flow chart of the proposed algorithm

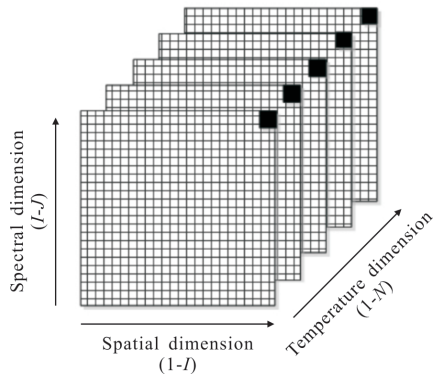
(1) 将成像光谱仪对准黑体并充满视场, 通过黑体控制器将黑体设置为预定的温度, 待温度稳定后, 数据采集单元控制成像光谱仪采集一组数据, 每组数据为 L 帧 ($L \geq 200$) 图像, 采集完毕后, 通过黑体控制器调节黑体温度, 温度变化为 ΔT , $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$, 待温度稳定后采集存储新的一组数据, 如此重复 N 次 ($N \geq 10$), 成像光谱仪获取 N 组不同的温度下的黑体辐射数据。

(2) 对采集获取的每组数据进行平均处理, 见公式(4):

$$D_{i,j} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L DN_{i,j,l} \quad (4)$$

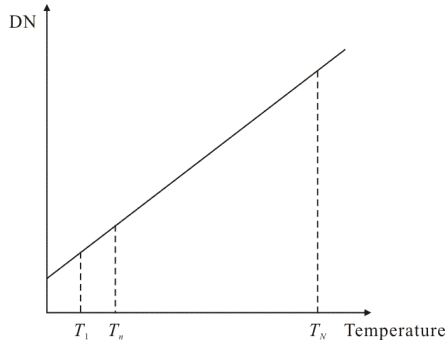
式中: $DN_{i,j,l}$ 为采集的原始像元值; $D_{i,j}$ 为平均处理后像元值, $1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J; L$ 为图像采集的帧数。

平均处理后生成了不同温度下 N 个大小为 $I \times J$ 的图像 $B(t)_{I \times J}, 1 \leq t \leq N$ 。利用数据采集单元将采集获取的 N 组数据按照温升进行波段叠加, 生成温升光谱数据, 图 3(a) 为温升光谱数据示意图, 数据的空间维大小为 I , 光谱维大小为 J , 温度维为 N , 提取图(a)黑点一个像元的伪光谱, 如图(b)所示, 横轴代表温度, 纵轴代表像元的 DN 值, 伪光谱记为 $Spl_{i,j}=(D_{i,j,1}, D_{i,j,2}, \dots, D_{i,j,t}, \dots, D_{i,j,n})$ 。



(a) 温升光谱数据

(a) Temperature rise spectrum data



(b) 温升伪光谱曲线

(b) A pseudo spectral curve

图 3 温升光谱数据示意图

Fig.3 Schematic diagram of temperature rise spectrum data

(3) 规则化处理, 提取每条伪光谱的最小值, 将伪光谱每个数值减去该最小值, 得到规则化处理后的伪光谱, 记为 $Spl_{i,j}=(ND_{i,j,1}, ND_{i,j,2}, \dots, ND_{i,j,t}, \dots, ND_{i,j,n})$, 其中, $ND_{i,j,t}=D_{i,j,t}-\min(D_{i,j,t})$ 。

(4) 有效像元光谱自适应提取, 采集有效像元的伪光谱, 将每行 I 个空间维的规则化伪光谱分温度

维进行排序, 获取 N 个中值数据, 组成参照光谱, 最终生成 J 组参照光谱, 记为 $RSpl_j=(r_{j,1}, r_{j,2}, \dots, r_{j,n})$ 。

(5) 光谱匹配, 计算参照光谱与每行规则化伪光谱的光谱角, 计算方法为:

$$\delta_{i,j} = \arccos \frac{\sum_{n=1}^N ND_{i,j,n} \times r_{j,n}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N ND_{i,j,n}^2} \times \sqrt{\sum_{n=1}^N r_{j,n}^2}} \quad (5)$$

(6) 由于每个光谱通道对应的谱段范围不同, 因此需要对光谱维以梯度拐点检测的方式提取阈值, 即将 $\delta_{i,j}$ 进行排序, 查找拐点阈值, 获得盲元检测阈值为 $\lambda_j(j=1, 2, \dots, J)$, 利用每个光谱通道的特征阈值进行阈值判断, 大于该值的判定为盲元, 并进行标记, 生成盲元检测结果, 完成盲元检测。

3 实验

3.1 热红外高光谱数据

针对我国研制的某型热红外高光谱样成像仪, 探测器大小为 320×256 , 为评价其辐射定标精度并保障后续数据飞行数据处理, 开展了实验的辐射定标工作。实验室内以标准黑体为辐射源, 利用置于准直仪焦面的黑体, 经准直仪产生的平行辐射照射热红外高光谱成像仪, 待黑体温度稳定时, 开始采集数据, 黑体温度从 $10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$, 共计 13 个温度, 平均处理后共计获取了 13 幅不同温度下的黑体图像, 每幅图像水平为空间维, 即扫描行的一行, 共计 320 个像元。每幅图像垂直为光谱维, 即不同波段, 对于推帚式成像光谱仪来说每个波段只有一个扫描行, 共计 256 个波段。每个扫描行为实际采集 200 行的平均值, 这样消除了时间维上的噪声, 最终生成的温升黑体高光谱数据如图 4 所示。



图 4 温升黑体高光谱数据

Fig.4 Temperature rise hyperspectral data of blackbody

3.2 实验结果及分析

从温升黑体高光谱数据，提取了有效像元和典型盲元的伪光谱曲线如图 5 所示，纵轴为规则化处理后的值，横轴为温度。通过分析可以看出 *a* 是典型有效像元的伪光谱曲线；*b*、*c*、*d* 为随温度升高降低并无规则变化盲元的伪光谱曲线；*e*、*f*、*g* 虽然也是随温度升高，并且动态响应与有效像元基本一致，但是线性度很差，经过实际飞行验证 *e*、*f*、*g* 也确是盲元，这类盲元通过高低温定标或者序列图像统计的方式很难检测出，高低温差值的阈值和有效像元基本相同，导致这类盲元的漏检；*h* 为存在突变的盲元伪光谱，如果通过序列图像统计的方式，这类盲元也极难检测出，*i*、*j* 黑体辐射响应成像抛物线形状，也是一类较为典型的盲元伪光谱曲线。

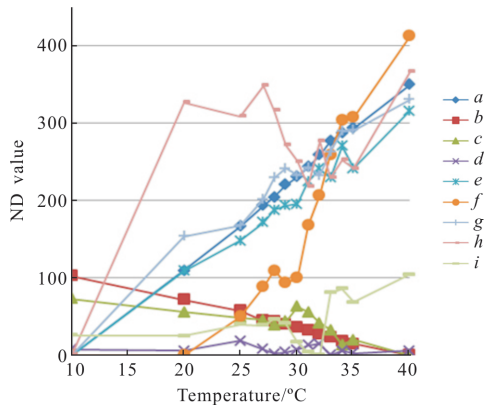
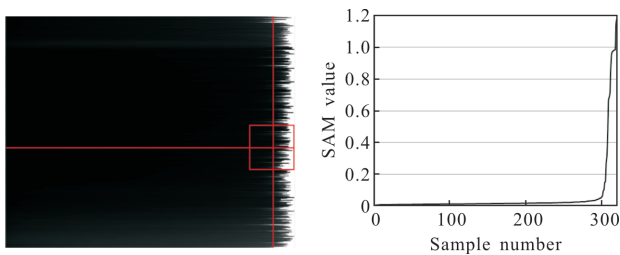


图 5 典型像元伪光谱曲线

Fig.5 Typical pseudo spectral curve

通过第 2 节的步骤(4)、(5)，完成典型有效像元伪光谱的自动提取与光谱角计算，生成了光谱角度运算结果，对运算结果进行排序，图 6(a)显示了排序



(a) 光谱角计算排序结果

(b) 第 146 通道光谱角计算值

(a) Spectral angle calculation sorting result

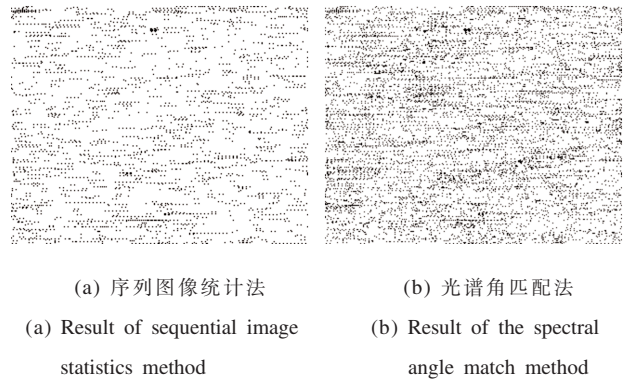
(b) Spectral angle value of 146th channel

图 6 光谱角计算结果

Fig.6 Results of spectral angle

的结果，每行代表 320 元光谱角值从小到大排序的结果，竖向共 256 个通道其中选取了第 146 通道 320 元计算结果绘出的横剖面如图 6(b)所示，通过导数计算生成 256 个通道的检测阈值，最终生成盲元检测结果，检出盲元数为 8 179 个，与探测器给出范围基本一致。

将光谱匹配法与序列图像统计法进行了对比，利用序列图像统计法检出的盲元数为 2 727 个，与光谱匹配法相同盲元为 100%，即光谱角方法检测出了序列图像统计法的所有结果，但是序列图像统计法的盲元数仅占 33.34%，由于序列图像统计法主要针对死像元和过热像元，对于存在包含极大噪声波动较大的像元和闪元，存在漏检，图 7 为两种方法最终的检测结果。



(a) 序列图像统计法

(b) 光谱角匹配法

(a) Result of sequential image statistics method

(b) Result of the spectral angle match method

图 7 两种方法的检测结果

Fig.7 Detection results of the two methods

将通过文中方法生成的盲元检测结果，输入预处理软件，对实验室定标数据进行了非均匀性校正和盲元补偿处理^[12-14]，对比图 4，处理结果如图 8 所示，对热红外高光谱非均匀性校正结果进行了相对辐射定标精度的评价，波段平均定标精度达到了 0.47 K，满足 0.5 K 的精度要求。

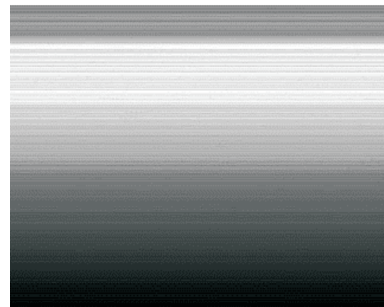


图 8 非均匀性校正和盲元补偿结果

Fig.8 Non-uniformity correction and blind pixel compensation result

将盲元检测结果应用于热红外高光谱飞行数据,在完成非均匀性校正和盲元补偿,经过几何校正后的热红外高光谱数据如图 9 所示,可以看出处理结果较好,无目视可见的坏线,图像均一,处理后的热红外高光谱数据可以满足后续的行业应用。

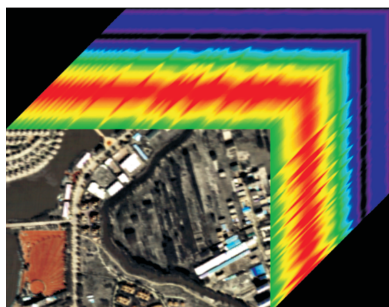


图 9 热红外高光谱数据立方体
Fig.9 Thermal infrared hyperspectral data cube

4 结 论

盲元的精确识别对热红外高光谱的数据应用至关重要,针对热红外高光谱采用光栅分光推帚式成像的特点,构建实验室定标的温升光谱图像,提出了一种利用光谱角匹配的盲元检测算法,该方法可以在热红外高光谱成像仪辐射定标的同时实现盲元的高精度检测。

但由于定标法的局限性,在实际飞行中,受到探测器、环境等影响,如果热红外高光谱成像仪在飞行过程产生了新的盲元,仅利用飞行前获取的盲元检测结果不可避免会影响数据的非均匀性校正等处理。考虑高光谱成像仪具有严格的定标要求,通常会配有有机上定标装置并在飞行前后开展必要的定标工作,因此可以在定标的同时实现盲元的多次检测和验证,保证热红外高光谱数据的处理和应用。

参 考 文 献 :

[1] Wang Jianyu, Li Chunlai, Ji Hongzhen, et al. Status and prospect of thermal infrared hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 51-59. (in Chinese)
王建宇,李春来,姬弘楨,等.热红外高光谱成像技术的研究现状与展望[J].*红外与毫米波学报*,2015,34(1):51-59.

[2] Zhou Huixin, Yin Shimin, Liu Shangqiang, et al. Algorithm of blind pixels anto-searching and compensation for IRFPA

[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 598-600. (in Chinese)
周慧鑫,殷世民,刘上乾,等.红外焦平面器件盲元检测及补偿算法[J].*光子学报*,2004,33(5):598-600.

[3] Zhou Huixin, Wei Yajiao, Qin Hanlin, et al. Blind-pixel iterative detection algorithm based on double threshold for uncooled IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 795-799. (in Chinese)
周慧鑫,魏亚姣,秦翰林,等.采用双阈值的非制冷 IRFPA 盲元迭代检测算法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 795-799.

[4] Zhang Honghui, Luo Haibo, Yu Xinrong, et al. Blind-pixel detection algorithm for IRFPA by applying pixel's characteristics histogram analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1807-1811. (in Chinese)
张红辉,罗海波,余新荣,等.采用特征直方图的红外焦平面阵列盲元检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1807-1811.

[5] Li Lingxiao, Feng Huajun, Zhao Jufeng, et al. Adaptive and fast blind pixel correction of IRFPA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 477-486. (in Chinese)
李凌霄,冯华君,赵巨峰,等.红外焦平面阵列的盲元自适应快速校正[J].*光学精密工程*,2017,25(4):477-486.

[6] Isoz W, Svensson T, Renhorn I. Nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [C]//*Infrared Technology and Applications XXXI*. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5783: 949-961.

[7] Wang B, Liu S, Li Q, et al. Blind-pixel correction algorithm for an infrared focal plane array based on moving-scene analysis[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(3): 036401.

[8] 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. (in Chinese)
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.

[9] Sun Hui, Sun Kai, Hou Qingyu. Blind-pixel detection based on the abnormality of statistic characteristic of fixed pattern noise [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2011, 16(2): 16-19. (in Chinese)
孙慧,孙凯,侯晴宇.基于固定图形噪声统计特性异常的盲元检测方法[J].*哈尔滨理工大学学报*,2011,16(2):16-19.

[10] Zhang Tong, Lin Chun, Chen Honglei, et al. A method of improving IRFPA imaging bad pixel detection accuracy based

- on multi-direction wavelet [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0204001. (in Chinese)
- 张瞳, 林春, 陈洪雷, 等. 基于多方向小波提升 IRFPA 盲元检测精度方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0204001.
- [11] Zhang Dongge, Fu Yutian. One class support vector machine used for blind pixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404001. (in Chinese)
- 张东阁, 傅雨田. 基于一类支持向量机的盲元检测方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 0404001.
- [12] Fischer A D, Downes T V, Leathers R. Median spectral-spatial bad pixel identification and replacement for hyperspectral SWIR sensors[C]//Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIII. International Society for Optics and Photonics, 2007, 6565: 65651E.
- [13] Perry D L, Dereniak E L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(8): 1854–1860.
- [14] Liang Chao, Ma Tianxiang. Design of infrared imaging nonuniformity correction system based on black body calibration [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 385–393. (in Chinese)
- 梁超, 马天翔. 基于黑体标定的红外图像非均匀性校正系统设计[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 385–393.