

基于场景的红外焦平面阵列非均匀性评价方法

谢蓄芬^{1,2} 张 伟¹ 智喜洋¹ 赵 明¹ 汪洪源¹

(¹ 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080; ² 黑龙江科技学院测控系, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要 针对红外遥感图像非均匀性的定量评价问题,研究了基于场景的红外焦平面阵列响应非均匀性的定量评价方法。利用真实红外遥感图像序列量值分布的特点,针对小序列图像提出了基于序列排序和小波变换的标准图像构建算法;结合非均匀性评价指标,提出了利用构建标准图像的响应非均匀性对红外图像的非均匀性进行定量估计;分别利用黑体定标实验和统计方法对标准图像构建算法进行了验证,同时进行了不同校正算法的剩余非均匀性评价实验。结果表明,128 frame 序列构建得到的标准图像的非均匀性分别比同温黑体图像小 0.92%,比统计标准图像大 0.59%。该方法可用于定量估计红外遥感图像的非均匀性。

关键词 遥感;红外焦平面阵列;非均匀校正;小波变换;评价

中图分类号 TN215 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0604001

Scene-Based Assessment Method for Nonuniformity of Infrared Focal Plane Array

Xie Xufen^{1,2} Zhang Wei¹ Zhi Xiyang¹ Zhao Ming¹ Wang Hongyuan¹

¹ *Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China*

² *Department of Measuring and Control Technology and Instruments, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China*

Abstract Aiming at quantitative assessment of nonuniformity of infrared focal plane array (IRFPA), a scene-based assessment method is researched. First of all, distribution characteristics of remote sensing image sequence are analyzed by real remote data, an assessment method by constructing standard image based on sequence sorting and wavelet transform is proposed for small image sequence. Then, combined past assessment method for nonuniformity, response nonuniformity of constructed standard image is proposed. Finally the algorithm of construction standard image is verified by blackbody radiometric calibration method (BRCM) and statistical method separately. And this assessment method for nonuniformity is used in image sequence using different scene-based nonuniformity correction. The experimental results show that for the standard images constructed by two groups of image sequences of 128 frame, the nonuniformity calculated by new method is 0.92% less than that of BRCM, and 0.59% more than that of statistical method, respectively. This assessment method can assess the nonuniformity of infrared remote sensing image.

Key words remote sensing; infrared focal plane array; nonuniformity correction; wavelet transform; assessment

OCIS codes 040.1240; 100.2550; 100.7410; 280.47881

1 引 言

红外焦平面阵列 (IRFPA) 响应的非均匀性是影响辐射定标精度及红外遥感图像定量化的重要因素^[1~3], 有效地度量遥感图像的非均匀性, 有助于提

升红外遥感图像的定量评价精度, 进而更有效地应用在遥感图像上。IRFPA 响应的非均匀校正包括基于场景和标准源两类方法^[4]。基于场景的非均匀校正方法, 由于不需要增加硬件开支, 不影响拍摄过

收稿日期: 2011-11-15; 收到修改稿日期: 2012-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61007008)资助课题。

作者简介: 谢蓄芬(1980—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事红外相机辐射定标方面的研究。

E-mail: xiexufen@126.com

导师简介: 张 伟(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光学工程与应用技术等方面的研究。

E-mail: wzhang@hit.edu.cn

程而成为研究的热点,逐渐形成了基于统计和配准两类校正算法。在基于统计的非均匀校正方面,提出了恒定统计量、维纳滤波和卡尔曼滤波等方法;在基于配准的非均匀校正方面,提出了代数算法(ASBA)、准辐射校正算法(RASBA)和通用型代数算法(GASBA)^[5~7]。目前最有效的 IRFPA 响应非均匀性的评价方法是利用黑体标准图像序列计算各种非均匀性指标,主要包括响应非均匀性^[8]、三维噪声中的 σ_{vh} , σ_h 和 σ_v 分量^[9,10]、简化功率谱等^[11],这一类评价方法必须借助黑体标准源。基于场景的非均匀校正方法依赖场景信息进行非均匀校正,成像过程中可能没有拍摄黑体标准图像,所以其非均匀性难以定量评价。为了评价基于场景的非均匀校正图像的剩余非均匀性,文献[12]提出了利用校正图像的粗糙度进行评价,在真实图像未知的情况下粗糙度可以一定程度地评价 IRFPA 非均匀性校正算法的处理效果,但粗糙度评价中包含了场景信息,这使得不同场景图像的剩余非均匀性难以进行比较。文献[13]提出了利用峰值信噪比、文献[14]提出了平均绝对误差对 IRFPA 非均匀校正效果进行评价,这两个指标可以用于真实图像已知的仿真中,评价校正图像与原图接近的程度。因此上述三种评价方法均是基于图像质量的评价方法,不能实现剩余非均匀性的定量评价。

为了评价基于场景的 IRFPA 非均匀校正图像的剩余非均匀性,本文提出了基于场景的 IRFPA 非均匀性定量评价方法。方法通过对红外图像各像

素序列灰度值排序对图像序列进行重构,结合场景特性利用小波变换去除重构图像中的场景产生的非均匀因素,实现标准图像的构建。同时进一步提出应用该标准图像的响应非均匀性对红外遥感图像序列的非均匀性进行评价。该评价方法同样适用于定标法点校正图像的剩余非均匀性评价。

2 基于场景的标准图像构建

2.1 红外遥感图像序列分布特性

大序列红外遥感图像通常满足恒定统计假设,即在假定统计的时间内所有探测元的输入辐射照度范围相同,并服从均匀分布^[15]。根据恒定统计假设,大序列遥感图像在序列方向取的平均图像即为某一温度下的黑体标准图像,可以利用该标准图像的各种非均匀性指标衡量这一组图像序列的非均匀性。但小序列遥感图像一般难以满足这个统计规律,在统计的时间内每个象元所接收的辐射照度范围会存在差异。

对一组红外遥感图像序列(135 frame、分辨率 240 pixel \times 320 pixel、量化位数 14 位)进行图像序列量值的分布统计如图 1 所示。图中 P 表示第(m , n)像素序列量值在该图对应量值区间内出现的概率, m , n 表示像素的位置。5 个子图分别对应序列量值范围的 5 个等分递增区间。可以看出对于 135 frame 图像序列,各像素在量值区间内出现的概率存在一定差异,特别左面子图差异较大,明显不符合恒定统计假设。中间子图表现的较为均匀,即中间

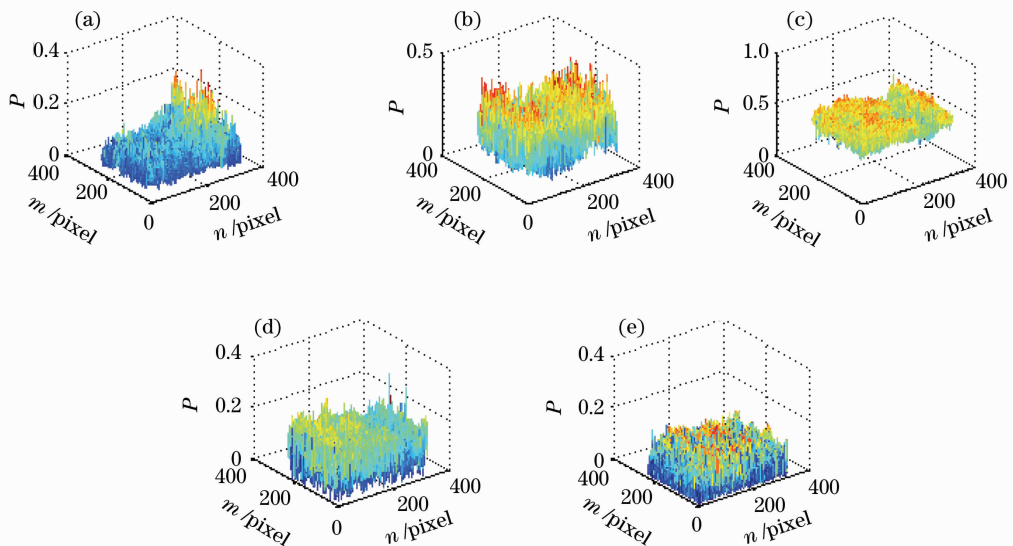


图 1 像素序列量值分布

Fig. 1 Distribution of all pixel sequence values

部分量值的出现概率相差不大；像元探测的辐射在这一范围内出现概率较大且差异不大，虽然仍然存在由于接收场景辐射出现概率不同造成的差异，但经过处理，该部分数据可以构造出标准图像。

2.2 基于小波变换的标准图像构造算法

标准图像是相机对各种均匀、稳定的标准源所成的图像，对红外相机而言，对应的标准辐射源通常为各种温度的黑体。由于场景图像中不可避免地含有场景辐射的非均匀信息，所以应用场景图像构建的标准图像必须去除由于场景的不均匀造成的标准图像中带有非均匀性。根据上文分析的小序列遥感图像量值分布的特点，提出图2所示标准图像的构造算法。首先对小序列遥感图像各像素灰度量值进行排序重新构造一组图像序列，将该序列的中值图像作为粗标准图像，其次对原图像序列取一定范围的辐射增量图像，对该辐射增量图像进行自适应小波去噪，得到重构图像序列中场景产生的不均匀图形；最后在粗标准图像中去除场景产生的不均匀图形，进一步构造标准图像。

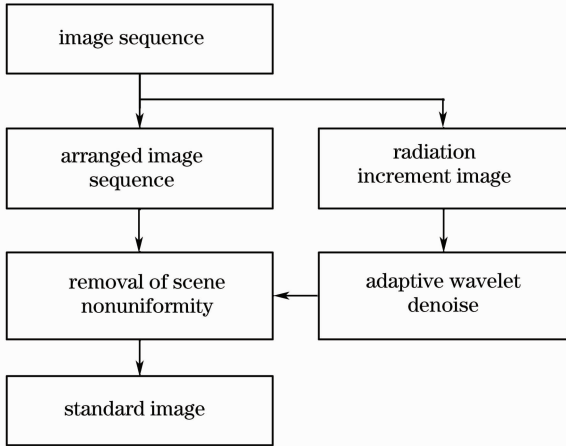


图2 标准图像构造方法

Fig. 2 Construction method of standard image

2.2.1 粗标准图像构造

设有 L 帧序列图像，图像序列可表示为

$$\mathbf{S}(m, n) : \{s(m, n, k) \mid 1 \leq k \leq L\}. \quad (1)$$

将原图像序列中各像素序列排序后重构一组图像序列，可表示为

$$\mathbf{S}_a(m, n) : \text{Sort}[s(m, n)] = \{s_a(m, n, l) \mid 1 \leq l \leq L\}. \quad (2)$$

根据红外图像序列恒定统计假设，经过排序重构的图像序列中包含一定数量场景较为均匀的图像。重构图像序列的中值序列图像即为初步构造的标准图像，可表示为

$$s_p(m, n) = s_a(m, n, L/2). \quad (3)$$

(1)~(3)式中 \mathbf{S} 为原图像序列中各图像集合， s 为原序列图像， k 为原图像序列帧数； \mathbf{S}_a 为排序后的图像序列中各图像集合， s_a 为排序后重构序列图像， s_p 为构造的粗标准图像， Sort 为对序列进行排序操作， l 为排序图像序列的帧数， L 为图像序列总的帧数。

2.2.2 场景固定图形的求取

由于小序列图像难以满足恒定统计假设，所以应用上文方法由小序列图像构造的粗标准图像中，含有不同像元接收场景辐射差异造成的非均匀性。将构建的粗标准图像中含有的不同像元场景辐射差异产生的图形定义为场景固定图形，在粗标准图像中尽量去除场景固定图形以便得到精度更高的标准图像。小序列图像中不同像元接收的辐射范围可能存在较大差异，但灰度序列量值的中间部分的辐射差异会大大减小。根据恒定统计假设，中间部分的辐射增量图像可以一定程度的表达不同像元接收场景辐射的差异，中间部分的辐射增量图像的构造方法为

$$s_m(m, n) = s_a\left(m, n, \frac{3}{4}L\right) - s_a\left(m, n, \frac{1}{4}L\right). \quad (4)$$

由于探测器的非均匀性主要表现在偏置信息中^[16]，所以该增量图像中含有的非均匀性主要是由不同像元接收场景辐射的差异产生的。但由于探测元增益的不均匀、场景的随机性及电子学噪声等因素的影响，该增量图像中会带有这些因素造成的高频信息。这些高频信息不能代表各探测元所接收场景辐射的差异，应予以去除，否则会造成构造标准图像非均匀性的增大。小波变换可以滤除辐射增量图像中的高频随机因素，对于遥感图像可以利用小波域贝叶斯的自适应去噪法去除这些随机的高频信息，其非线性阈值函数如(5)式所示^[17,18]。为了不影响构造标准图像的基础量值，所求得场景固定图形，应减去其均值：

$$\theta_{s,m} = \begin{cases} \text{sgn}(\xi_{s,m}) \left(\frac{|\xi_{s,m}| + \sqrt{\xi_{s,m}^2 - 8\sigma_s^2}}{2} \right), & \xi_{s,m} \geq 2\sqrt{2}\sigma_s \\ 0, & \xi_{s,m} \leq 2\sqrt{2}\sigma_s \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\xi_{s,m}$ 为小波系数, σ_s 为小波系数噪声标准差。

3 评价指标的建立

对红外相机探测器阵列的响应非均匀性进行定量评价的指标主要包括响应非均匀性、三维噪声的 σ_{vh} , σ_h 和 σ_v 分量、简化功率谱, 其中简化功率谱也依托于三维噪声分量。三维噪声的测量需要大量的黑体图像, 对于有限的序列帧数和拍摄次数(短时间内), 基于场景的标准图构建方法难以获得大量黑体图像; 而且对于一次拍摄所得的黑体图像较为接近, 同时由于探测器的不稳定, 非均匀校正系数会发生漂移, 长时间的多次拍摄所构建的标准图像不能用于计算三维噪声。所以基于三维噪声的评价指标难以应用于基于场景构建的标准图像中。响应非均匀性则可以评价对应黑体图像的非均匀程度, 虽然不同温度黑体测量的相机响应非均匀性会略有不同, 但由于构建标准图像的温度大约为场景温度的平均值, 同时在一次成像中场景辐射温度范围内该指标不会发生太大的变化。响应非均匀性的定义为^[8]

$$R_{NU} = 1/V_{average} \times \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (V_{mn} - V_{average})^2}, \quad (6)$$

式中 $V_{average} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N V_{mn}$ 代表焦平面阵列上有效像元的输出信号的平均值; V_{mn} 为焦平面阵列上第 m 行, 第 n 列所对应像元的输出信号; M 和 N 分别为焦平面阵列的行数和列数; d 为焦平面阵列中的死像元数; h 为焦平面阵列中的过热象元数。

4 实 验

标准图像的构建是红外图像非均匀性评价的关

键因素, 为了对基于场景的标准图像构建算法进行验证, 分别进行了黑体定标及拍摄实验和多帧统计实验, 从不同的角度验证了标准图像构建算法的有效性。同时为了进一步对基于场景的非均匀性评定方法进行说明, 对应用不同方法校正的同一组图像源进行了非均匀性评定实验, 给出了不同方法校正图像的剩余非均匀性。

4.1 标准图像构造算法的验证

4.1.1 黑体标准图像验证

应用黑体标准源对相机进行两点定标, 然后进行相机拍摄实验, 定标中低温黑体温度 273 K, 高温黑体温度 313 K。通过线性插值可以进一步计算出不同温度下的黑体图像的标准差。实验得到一组未经校正的红外遥感图像序列(128 frame、分辨率 240 pixel × 320 pixel、量化位数 14 位), 该图像序列可进行标准图像构造。构造标准图像和黑体图像的灰度值如图 3 所示。可见构造标准图像与黑体图像量值分布基本一致, 但由于黑体温度与构造标准图像的场景温度存在差异, 构造标准图像的灰度值总体上小于黑体图像。场景固定图形和各序列图像的标准差如图 4, 5 所示。图 5 中 original sequence 表示原图像序列, arranged sequence 表示排序重构的图像序列, refined sequence 表示排序图像减去场景固定图形后的图像序列。可见去掉场景固定图形的图像序列的标准差明显小于排序重构图像序列。

各标准图像的标准差和响应非均匀性如表 1 所示。其中 H 对应高温黑体图像, L 对应低温黑体图像, S 对应同温度黑体图像, C 对应构建标准黑体图像, STD 为对应图像的标准差。可见构建标准图像的响应非均匀性较该温度下黑体图像的非均匀性小 0.92%。

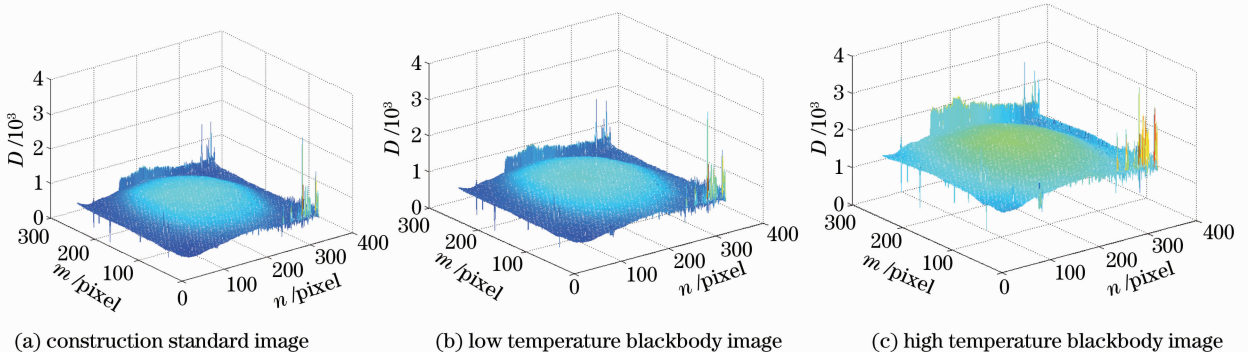


图 3 构造标准图像与黑体图像的比较

Fig. 3 Comparison of construction standard image and blackbody images

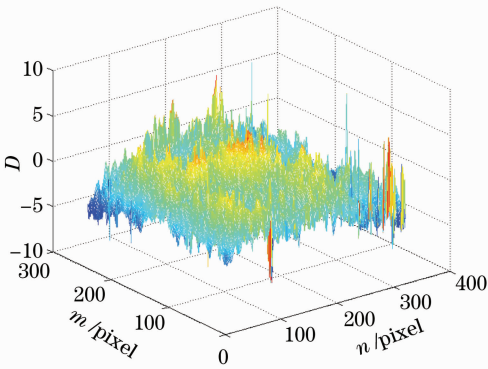


图 4 场景固定图形

Fig. 4 Fixed pattern of scene

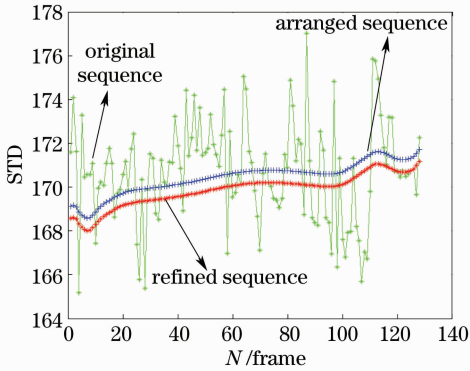


图 5 各序列图像的标准差

Fig. 5 Standard deviations of all image sequences

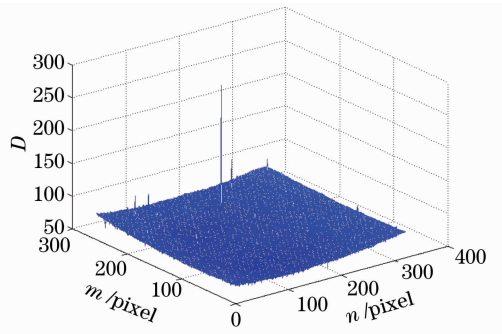
表 1 标准图像的比较

Table 1 Comparison between standard images

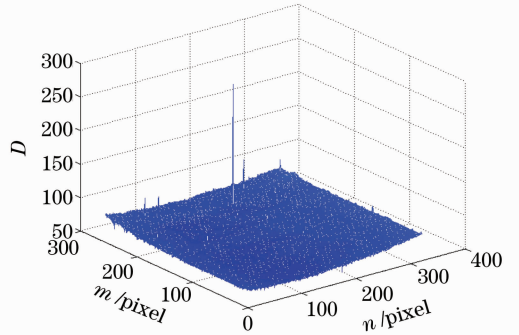
| Standard images | H | L | S | C |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| STD | 190.6 | 181.1 | 178.9 | 170.1 |
| $R_{NU}/\%$ | 9.81 | 15.93 | 18.80 | 17.88 |

4.1.2 多帧统计实验验证

根据红外遥感图像恒定统计假设,对于大序列的遥感图像,图像序列灰度值在序列(时间)方向取平均值,即可得到某温度下的黑体标准图像,将该图像称为统计标准图像。为了进一步验证红外遥感图像序列的标准图像构建方法,对红外相机进行挂飞拍摄实验,拍摄开始时间为凌晨 1 点,时间约 0.5 h,地点为常州地区。实验得到一组大序列遥感图像(1703 frame、分辨率 256 pixel×320 pixel、量化位数 8 位),该序列图像可以对标准图像的构造方法进行验证。应用上文方法取 1703 frame 图像序列的前 128 frame 图像构造标准图像和原图像序列的统计标准图像的比较如图 6 所示。构造过程中场景的固定图形如图 7 所示,构造过程各序列的标准差如图 8 所示。通过计算构造标准图像的标准差为



(a) statistical standard image



(b) construction standard image

图 6 构造标准图像和统计标准图像的比较

Fig. 6 Comparison of construction standard and statistical standard images

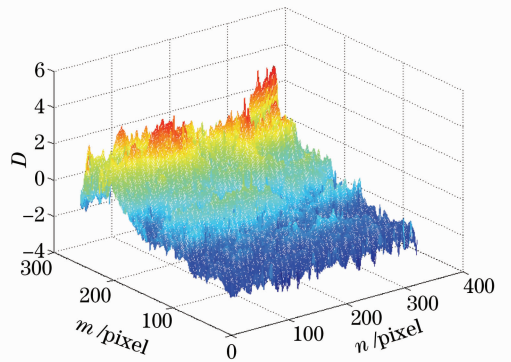


图 7 场景固定图形

Fig. 7 Fixed pattern of scene

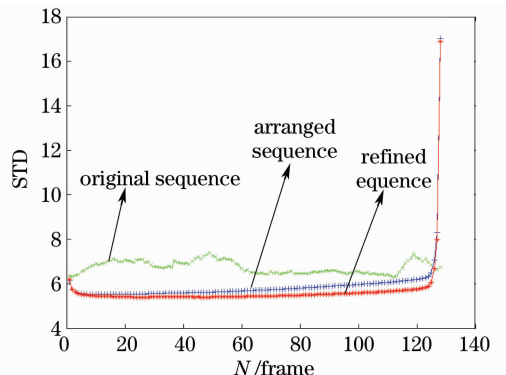


图 8 各序列图像的标准差

Fig. 8 Standard deviations of all image sequences

5.43,非均匀性为 7.16%;1703 frame 大序列统计标准图像的标准差为 5.00,非均匀性为 6.57%。小图像序列构建的标准图像比统计标准图像的非均匀性大 0.59%。

4.2 剩余非均匀性评价实验

应用上文提出的非均匀性评定方法,对使用不同的基于场景方法校正的同一组图像序列的非均匀性进行评定,校正图像的剩余非均匀性的评定结果如表 2 所示。可见在本次处理中 4 种基于场景非均匀校正算法的剩余非均匀性存在差异,其中维纳滤波法的剩余非均匀性最大。

表 2 不同校正算法的非均匀性比较

Table 2 Comparison of nonuniformity between different correction algorithms

| Number / frame | CS / % | LMS-based / % | Wiener filter / % | Kalman filter / % |
|----------------|--------|---------------|-------------------|-------------------|
| 64 | 1.85 | 1.71 | 5.45 | 1.77 |
| 96 | 1.52 | 1.50 | 3.27 | 1.54 |
| 128 | 1.33 | 1.42 | 2.56 | 1.45 |

5 结 论

本文利用红外遥感图像序列的特点,提出了基于场景的红外图像序列非均匀性定量评价方法。方法通过对红外遥感图像的灰度序列进行排序和小波去噪构建标准图像,进而应用该标准图像的响应非均匀性对遥感图像序列的剩余非均匀性进行评价。通过实验验证,构建标准图像的响应非均匀性与黑体图像相差 0.92%,与大序列统计结果相差 0.59%。该评价方法可以用于红外遥感图像序列的非均匀性的定量度量;也可应用于不同非均匀校正方法的效果评价;同时对于空间红外相机的在轨辐射定标及星上黑体的均匀性校验也具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Ren Huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei *et al.*. Study of radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3476~3481
任焕焕,阮萍,何建伟等. TDI-CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3476~3481
- 2 Song Zongxi, Zhao Baochang, Gao Wei *et al.*. Focal plane design of chang'e-1 satellite CCD stereo-camera and laboratory radiation calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3508~3515

- 宋宗玺,赵葆常,高伟等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机焦平面设计与辐射定标[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3508~3515
- 3 Gao Jing, Ji Zhongying, Cui Yan *et al.*. Outfield calibration analysis of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1321~1326
高静,计忠瑛,崔燕等. 空间调制干涉光谱成像仪的室外定标技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1321~1326
- 4 Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0611005
洪闻青,杨南生,王晓东等. 红外焦平面联合非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0611005
- 5 S. N. Torres, J. E. Pezoa, M. M. Hayat. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(29): 5872~5882
- 6 J. E. Pezoa, M. M. Hayat, S. N. Torres. Multimodel kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors[J]. *Opt. Soc. Am.*, 2006, **23**(6): 1282~1292
- 7 R. C. Hardie, M. M. Hayat, E. Armstrong. Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(8): 1241~1251
- 8 Country Engineering Supervision Bureau GB T174444-1998. The Technique Norms for Measurement and Test of Characteristic of Infrared Focal Plane Arrays [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998
国家技术监督局 GB/T174444-1998. 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,1998
- 9 Eddie Jacobs, Jae Cha. Assessment of 3-D noise methodology for thermal sensor simulation[C]. *SPIE*, 2001, **4372**: 154~162
- 10 James A. Dawson, Eric J. Borg. Proposed standard for IRFPA nonuniformity measurements[C]. *SPIE*, 1994, **2224**: 62~72
- 11 Patrick O'Shea, Stephen Souk. Practical Issues with 3D-noise measurements and application to modern infrared sensors[C]. *SPIE*, 2005, **5784**: 262~272
- 12 M. M. Hayat, S. N. Torres. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal plane arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(8): 772~781
- 13 Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm based on infrared focal plane array readout architecture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 128~134
刘永进,朱红,赵亦工. 基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 128~134
- 14 S. N. Torres, M. M. Hayat. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays[J]. *Opt. Soc. Am.*, 2003, **20**(3): 470~481
- 15 M. M. Hayat. Model-based real-time nonuniformity correction in focal plane array detectors[C]. *SPIE*, 1998, **3377**: 122~133
- 16 Majeed M. Hayat, Bradley M. Ratliff. Generalized algebraic algorithm for scene-based non-uniformity correction[C]. *SPIE*, 2004, **5556**: 122~137
- 17 F. Abramovich, T. Sapatinas, B. Silverman. Wavelet thresholding via a Bayesian approach[J]. *J. American Statistics Association*, 1997, **92**(12): 1413~1421
- 18 Zhang Wei, Zhao Ming, Wang Zhile. Adaptive wavelet-based deconvolution method for remote sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(24): 4785~4793

栏目编辑:何卓铭