

白天观星红外星图噪声抑制算法

魏 伟^{1,2}, 刘恩海¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 单点噪声和条纹非均匀性噪声是白天观星红外星图中的两种典型噪声, 严重影响了星图识别的后续处理。针对两种噪声产生的原因和特点, 提出改进的单点噪声去噪算法, 即用局部窗口遍历扫描全图检测出单点噪声, 然后用全局均值进行补偿; 又提出列直方图偏移校正算法去除条纹非均匀性噪声, 即依据列偏移校正模型, 对每列直方图相对于全局直方图的峰值位置偏移进行校正。实验结果表明: 所提出的噪声抑制算法对红外星图去噪效果良好, 星点目标峰值信噪比可从 7.4 提高到 12.8, 并且算法计算简单, 可以在单帧时间内完成, 满足星图实时预处理的应用要求。

关键词: 单点噪声; 条纹非均匀性; 白天观星; 红外星图; 峰值信噪比; 星图预处理
中图分类号: V19 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)07-1923-05

Denoising algorithms to infrared star map of daytime star observation

Wei Wei^{1,2}, Liu Enhai¹

(1. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Single-point noise (SPN) and stripe non-uniformity (SNU) noise are two typical noises in infrared star map of daytime star observation, which seriously affect subsequent processing of star recognition. Considering the causes and characteristics of the two noises, an improved SPN denoising algorithm was proposed to denoise SPN. The full map was scanned by a local window to detect SPN, and the SPN was instead by global mean value. And a colum histogram offset correction (CHOC) algorithm was proposed to denoise SNU noise. According to the colum offset correction model, the offset of histogram peak position between colum histogram and global histogram was corrected. Experimental results indicate that the algorithms proposed could achieve good denoising effects with infrared star map, and the peak signal-to-noise ratio of star point target could be raised from 7.4 to 12.8, meanwhile, the algorithms could finish in one frame time with low computation complexity, so the algorithms meet the requirements of real-time star map preprocessing application.

Key words: single-point noise; stripe non-uniformity noise; daytime star observation; infrared star map; peak signal-to-noise ratio; star map preprocessing

0 引言

在目前比较成熟的天文导航应用中,对导航的测量源——恒星的观测主要是夜间在可见光波段进行的,为了把导航时段扩展到全天时,许多国家都在进行白天观星技术的研究,其中多谱段的探测研究越来越受到人们的关注。用红外波段进行白天观星是近几年开始的,国外已开展过多次实验并取得了一定的实验成果^[1]。国内的中国科学院光电技术研究所、长春光学精密机械与物理研究所和安徽光学精密机械研究所都开展过白天观星的相关研究。

白天观星红外星图同时具有红外图像和白天观测星图的特点。红外图像主要具有以下特点:没有立体感,对人眼分辨率低,空间相关性强、对比度低,清晰度低于可见光图像,含有热噪声、散粒噪声、 $1/f$ 噪声、光子电子涨落噪声等多种噪声,具有明显的非均匀性。白天观测星图是成像系统在白天条件下拍摄的星空图像,其主要特点是背景强、图像信噪比低。正是由于这些特点,在白天观星红外星图应用于后续处理之前,必须对其进行去噪、非均匀性校正等预处理^[2-3]。

杨清珍研究过星图中单点噪声(SPN)的消除^[4],但给出的SPN的判据不够严格,容易把星点边缘的像素误当作SPN去除掉。对于条纹非均匀性(SNU)噪声,任建乐等人提出了基于配准的红外焦平面阵列条纹非均匀性校正方法^[5],白俊奇等人提出了将迭代原理和黑体定标校正相结合的噪声滤波算法^[6],Y. Tendero等人提出了Midway infrared equalization algorithm(MIRE)^[7],这三种方法对SNU噪声都有较好的抑制效果,但基于配准的方法需要2幅以上的图像序列来完成算法,后两种算法计算量大,复杂度高。文中在分析红外星图噪声特点的基础上,重点对红外星图中的SPN和SNU噪声进行研究和处理,提出了对两种噪声有针对性的处理算法,改善了视觉效果和提高了星点目标峰值信噪比,且算法简单、可靠。

1 红外星图噪声分析

因为实验中获取白天星图图像使用的是红外探测器,所以星图中除了含有可见光成像器件成像过程中的散粒噪声和暗电流噪声外,另外还主要包含了红外探测器中常见的单点噪声(盲元)和条纹非均

匀性噪声两种噪声。这两种噪声导致白天观测星图的对比度和信噪比较夜晚观测星图都要低,甚至背景和噪声会将星点目标淹没。

1.1 单点噪声(SPN)

白天观星红外星图中的单点噪声来源于红外探测器的盲元。盲元是指红外焦平面探测器阵列(IRFPA)中的响应过高或过低的像素,包括死像素和过热像素。死像素指响应率小于平均响应率的 $1/10$ 的像素,过热像素是响应率大于平均响应率10倍的像素。盲元的数量及其分布对器件性能的影响很大,如果盲元过多,红外输出图像中将出现大量的亮点或暗点,严重影响图像的性能。因此在成像阶段对IRFPA中的盲元进行检测和补偿,对提高红外图像的质量具有重要意义^[4]。

红外成像白天观测星图中,星点为亮目标,盲元中的过热像元是一种严重的噪声,由于过热像元亮度高,有时会将星点目标淹没。同样是亮点,过热像元和星点的区别主要有两点,一是过热像元有很高的响应率,所以它的亮度远远高于星点的亮度;二是性能指标较好的红外探测器的过热像素较少,且分布较为分散,而星图成像中为了提高星点位置的定位精度,一般采用离焦技术,使星点目标所占的像点大小为 $3\text{ pixel}\times 3\text{ pixel}$ 至 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$,所以二者在一定邻域内的灰度分布有较大差异,即星点目标为连续分布而过热像素呈单个点的分散分布,文中称这种单点分布的过热像素为SPN。

1.2 条纹非均匀性(SNU)噪声

条纹非均匀性是凝视型红外焦平面阵列成像系统中一种特殊的固定图案噪声。凝视型红外焦平面阵列都是基于CMOS架构的,该架构含有多个放大器,但通常为了节省成本,探测器一列输出共用一个放大器,由此产生了列向的条纹非均匀性^[5]。

SNU严重影响了图像的观看和使用,必须有针对性地进行校正^[8-10]。根据SNU的表现特性,即同一列像素之间的灰度差异较小,而不同列之间灰度差异则比较明显,所以在校正SNU时,主要校正不同列之间的差异,对同一列像素可以进行相同的处理。文中建立了基于列偏移校正的模型。

$$y_{ij}=x_{ij}+o_j \quad (i=1,2,\dots,M;j=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 和 y_{ij} 分别为图像校正前、后 (i,j) 处像素的灰度值; o_j 为第 j 列的偏移系数; M 和 N 分别图像的

数和列数。基于这一模型,提出了基于列直方图偏移校正(CHOC)算法,这种算法对 SNU 有很好的校正效果,且算法简洁、容易实现。

2 红外星图噪声抑制算法

在红外星图预处理阶段,文中主要对 SPN 和 SNU 噪声的抑制算法进行研究。针对 SPN,设置全局阈值,采用局部窗口遍历扫描全图检测出 SPN,并用背景均值对 SPN 进行补偿。针对 SNU,采用提出的 CHOC 算法进行校正。

2.1 改进的 SPN 去噪算法

文中正是基于前文中分析的过热像素和星点的两点区别,以及改进参考文献[4]中方法的不足的基础上,提出了改进的 SPN 去噪算法。改进的 SPN 去噪算法是取一定的窗口(例如 3×3 pixel 大小),对星图图像从左至右、从上至下遍历扫描,以中心点像素为检测对象,以中心点像素邻域的上下左右四个像素为比较对象,设置一定的阈值 th,满足下面条件的被检测像素为 SPN:

$$\begin{cases} x_{ij} > th \text{ and } x_{i\pm 1j} < th \text{ and } x_{i,j\pm 1} < th (i \neq 1, M \text{ and } j \neq 1, N) \\ x_{ij} > th & (i=1, M \text{ or } j=1, N) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_{ij} ($i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$) 为图像 (i, j) 处像素的灰度值; M 和 N 分别图像的行程数和列数。公式(2)即为 SPN 检测判据,即被检测对象灰度高于阈值而四个比较对象灰度都小于阈值。当窗口大小为 3×3 pixel 大小时,位于图像边缘的首、末行和首、末列不在检测范围内,考虑到位于图像边缘的星点不利于后续的处理,所以首末行和首末列中灰度大于阈值的像素直接视为 SPN,则对整幅星图的 SPN 检测是完全的。

如图 1 所示的坐标值(116, 60)的像素即为 SPN,该图片来源于原始星图的局部放大。考虑到理想星图的背景是均匀的,所以对于检测出的 SPN,用整幅图像的均值来补偿。

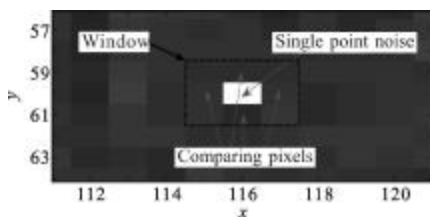


图 1 单点噪声示例

Fig.1 Example of SPN

2.2 列直方图偏移校正(CHOC)算法

对于一幅灰度级为 $[0, L-1]$ 的数字图像来说,它的直方图可以用离散函数 $h(r_k)=n_k$ 表示,其中 r_k 是第 k 级灰度, n_k 是图像中灰度级为 r_k 的像素个数。列直方图表示的是一列像素的灰度分布情况,对于星图图像,由于一列像素中星点目标所占的像素较少,其他绝大部分像素的灰度级都是背景灰度级,所以星图图像的列直方图分布呈单个峰的高斯分布,而直方图 n_k 达到峰值所对应的灰度级 r_{kp} 代表的正是背景灰度级。图 2 为一幅星图归一化后的某 5 列的列直方图和整幅图像的直方图。

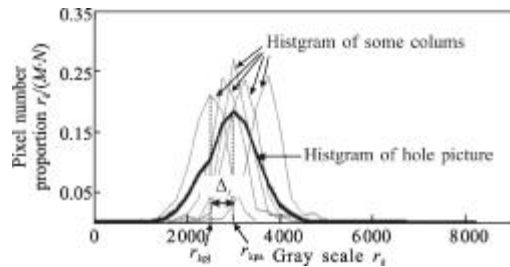


图 2 星图某 5 列的列直方图和整幅图像的直方图

Fig.2 Column histograms of 5 columns and histogram of hole star map

前文提出了基于列偏移校正的模型(公式(1)),要依据该模型对 SNU 进行校正,需要找出一个可以衡量不同列之间灰度差异的指标。由列直方图的特性可知,每列直方图 n_k 达到峰值所对应的灰度级 r_{kp} 可以作为这个衡量指标。设原始星图中 (i, j) 处像素的灰度值为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$), M 和 N 分别为图像的行程数和列数。由图 4 可知, SNU 即各列直方图峰值位置 r_{kpj} 相对整幅图像直方图峰值位置 r_{kpa} 的偏移 Δ_j 。CHOC 的方法即将各列直方图的峰值位置 r_{kpj} 校正到整幅图像直方图的峰值位置。CHOC 的步骤如下:

(1) 计算图像每列的列直方图 n_{kj}

$$n_{kj} = h_j(r_k) \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

(2) 求出列直方图 n_{kj} 峰值处对应的灰度级 r_{kpj}

$$r_{kpj} = h^{-1}[\max(n_{kj})] \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

(3) 计算整幅图像的直方图 $h(r_k)$, 并求出 n_k 为最大值时对应的灰度级 r_{kpa}

$$r_{kpa} = h^{-1}[\max(n_k)] \quad (5)$$

(4) 计算每列的列直方图偏移量

$$\Delta_j = r_{kpa} - r_{kpj} \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

(5) 列直方图偏移校正后图像灰度值为

$$y_{ij} = x_{ij} + \Delta_j \quad (i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

3 实验结果及分析

为验证文中提出算法的效果,将文中算法用于丽江外场实验获取的观测星图。图 3(a)、(b)分别为 2011 年 12 月 31 日上午观测到的编号为 15 384 和 43 310(SAO 星表)的两颗恒星的原始星图,图 4 为 SPN 去噪后的结果,图 5 为继续进行 CHOC 处理的结果。

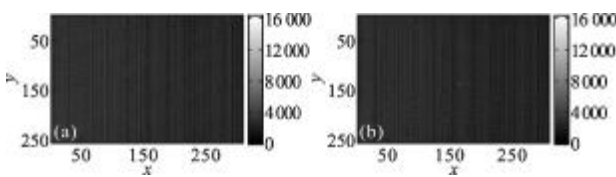


图 3 原始星图

Fig.3 Original star maps

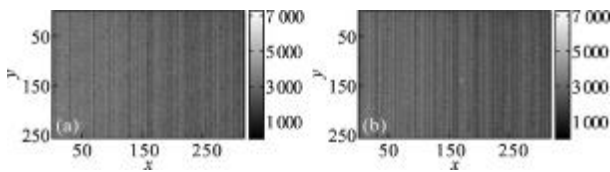


图 4 SPN 去噪后星图

Fig.4 Star maps processed by SPN denoising

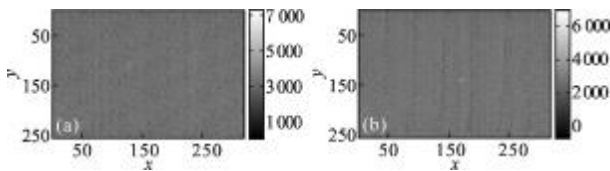


图 5 继续 CHOC 处理后星图

Fig.5 Star maps continually processed by CHOC

由实验图像结果可知,经过单点噪声去噪后,原始图像(图 3)的灰度级由 16 000 左右减小到了 7 000 左右,说明原始星图中占据最高灰度级的单点噪声已经被消除,被噪声淹没的星点目标占据了最高灰度级,得到一定程度的凸显,但效果并不明显,因为此时星图还含有严重 SNU 噪声(图 4)。经过 CHOC 处理后,图像 SNU 得到明显的校正,星图背景变得均匀了,星点目标得到进一步的凸显(图 5)。在 CHOC 处理前后,星图的最高灰度级(星点目标的亮度)保持在 7 000 左右,没有发生大的变化,说明 CHOC 在处理过程中星点目标的能量得到了很好的保留,而这一点对最终星点提取和质心定位都至关重要。

除了判断主观的视觉效果可以说明观测星图中的噪声得到了抑制,目标背景对比度得到了提高,文中还计算了各幅图像的星点目标峰值信噪比来评价处理的效果,统计结果见表 1。星点目标峰值信噪比计算公式为:

$$P_{\text{snr}} = \frac{S_{\text{max}} - \bar{X}}{\sigma} \quad (8)$$

式中: S_{max} 为星点目标像素灰度最大值; \bar{X} 为图像灰度平均值; σ 为图像灰度标准差。

表 1 算法处理效果评价

Tab.1 Effect evaluation of the algorithms

	Subjective visual effect	SNR of star-point target
Fig.3(a/b)	There are obvious SPN and SNU in star map; star-point is invisible	7.4/7.8
Fig.4(a/b)	SPN was denoised, but there is obvious SNU; star-point is blur	7.6/8.1
Fig.5(a/b)	SPN and SNU are all denoised; star-point is visible	12.8/12.1

由统计结果可知,SPN 去噪的主要目的是消除 SPN,使被 SPN 淹没的星点得以凸显,但是因为 SPN 像素在像素总数中所占比例较小,所以对 SPN 去噪前后 \bar{x} 和 δ 的影响较小,因此对图像星点目标峰值信噪比改善并不多。经过 CHOC 处理后星点目标峰值信噪比有明显提高,因为经过 CHOC 处理后,SNU 得到校正,图像背景变得均匀了,图像标准差 δ 减小,所以星点目标峰值信噪比有明显提高。

从算法的运算量和复杂度方面来分析,基于迭代和基于配准的条纹非均匀性校正算法因为分别涉及迭代和多帧配准而增加了复杂度,文中所提出的算法只涉及少量的加法和乘法,运算简单,处理速度快,在 Windows XP 环境下,在主频 2.5 GHz 的 PC 机上用 Matlab 处理一幅星图仅需 0.1 s,而一些复杂的非均匀性校正算法,仅收敛时间就需要几秒甚至更长。

4 结 论

文中针对红外星图中单点噪声和条纹非均匀性噪声的产生原因和特点进行了分析,提出了能有效抑制两种噪声的算法。通过对外场观测星图的处理,验证了文中提出的方法改善了视觉效果,提高了星点目标峰值信噪比,达到了较好的星图噪声抑制效

果。文中提出方法的主要优点是算法是在单帧图像内完成的,无需任何先验信息,并且算法的计算量小,有利于算法的硬件实现和在实时处理中的应用。

参考文献:

- [1] Xu Min, Wang Jianli, Chen Tao. Study on application of short wave infrared to detecting satellites in the daytime [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 277-280. (in Chinese)
续敏, 王建立, 陈涛. 短波红外用于白天卫星探测的研究 [J]. *光学技术*, 2008, 34(2): 277-280.
- [2] Zhang Jianqi, He Guojing, Liu Delian, et al. Impact of background clutter on IR imaging system performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 565-568. (in Chinese)
张建奇, 何国经, 刘德连, 等. 背景杂波对红外成像系统性能的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 565-568.
- [3] Zhang Wei, Meng Xianglong, Cong Mingyu, et al. Algorithm of space point target detection for IR scan iamges [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 35(5): 921-925. (in Chinese)
张伟, 孟祥龙, 从明煜, 等. 天基红外扫描图像点目标检测算法 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 35(5): 921-925.
- [4] Yang Qingzhen. Research and implementation of real time preprocessing method for stellar map [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
杨清珍. 星图实时预处理方法及实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [5] Ren Jianle, Chen Qian, Qian Weixian. Stripe nonuniformity correction based on registration for infrared-focal plane arrays [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2011, 30 (6): 499-502. (in Chinese)
任建乐, 陈钱, 钱惟贤. 基于配准的红外焦平面阵列条纹非均匀性校正 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(6): 499-502.
- [6] Bai Junqi, Chen Qian, Qian Weixian. Techniques of CDS noise filtering in staring infrared imaging system [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(7): 1062-1066. (in Chinese)
白俊奇, 陈钱, 钱惟贤. 红外凝视成像系统中的 CDS 噪声抑制技术 [J]. *中国图形图像学报*, 2010, 15(7): 1062-1066.
- [7] Tendero Y, Gilles J. ADMIRE: a locally adaptive single-image, non-uniformity correction and denoising algorithm: application to uncooled IR camera [C]//SPIE, 2012, 8353.
- [8] Zhang Tianxu, Shi Yan, Cao Guozhi. Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in IRFPA and the improvement of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, 24 (4): 255-260. (in Chinese)
张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(4): 255-260.
- [9] Sui Xiubao, Chen Qian, Gu Guohua. Algorithm for eliminating stripe noise infrared image [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2012, 31(2): 106-111.
- [10] Shi Yan, Zhang Tianxu, Li Hui, et al. New approach to nonuniformity correction of IRFPA with nonlinear response [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2004, 23 (4): 251-256. (in Chinese)
石岩, 张天序, 李辉, 等. 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(4): 251-256.