

文章编号:1001-5078(2024)09-01433-07

· 红外技术及应用 ·

短波红外星图的噪声抑制算法

魏其海^{1,2}, 柳博哈^{1,2}, 李勇¹, 崔维鑫¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了满足星传感器在近地空间全天时观测的需求, 基于短波红外探测器的星传感器得到了广泛的应用。然而, 短波红外星图中存在着条纹非均匀性噪声和缺陷像素等噪点, 这些噪声的存在会降低星图的质量。为了抑制上述噪声的影响, 本文针对短波红外星图提出了一种噪声抑制算法。首先, 通过两点法对每列像素做初步的非均匀性校正, 降低同列像素间的非均匀度。然后, 通过改进的列向 Top-hat 算法去除条纹非均匀性噪声的影响。最后, 通过中心点扩散连通域算法提取星点。实验结果表明, 在两等星内, 本文算法能够很好地去掉噪声影响, 星点的提取误差能够保持在 0.3 像素即 2" 内, 并且算法针对单帧图像, 便于实现, 能够满足实时处理的要求。

关键词: 短波红外探测器; 噪声抑制算法; 全天时观星; 缺陷像素; 条纹非均匀性

中图分类号: TP73; TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.014

Noise suppression algorithms for short-wave infrared star image

WEI Qi-hai^{1,2}, LIU Bo-han^{1,2}, LI Yong¹, CUI Wei-xin¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the demand for all-day observation in near-Earth space by star sensors, star sensors based on short-wave infrared (SWIR) detectors have been widely used. However, noise such as stripe non-uniformity and defective pixels are present in SWIR images, which degrade the quality of the images. To suppress the influence of the above noise, a noise suppression algorithm for SWIR star image is proposed in this paper. Firstly, the two-point method is used to make a preliminary non-uniformity correction to reduce the non-uniformity between pixels in the same column. Then, the influence of the stripe non-uniformity noise is removed by an improved column-Top-hat algorithm. Finally, the star point is extracted by the connected domain algorithm based on center point diffusion. The experimental results show that the proposed algorithm can suppress the influence of noise well within two magnitudes, and the extraction error of the star points can be kept within 0.3 pixels, i. e., 2". Meanwhile, the algorithm is designed for a single-frame images, which is easy to implement and can satisfy the requirements of real-time processing.

Keywords: short-wave infrared detectors; noise suppression algorithm; all-day star observation; defective pixels; stripe non-uniformity

基金项目: 国防重点项目资助。

作者简介: 魏其海 (1999 -), 男, 硕士研究生, 主要从事红外星传感器技术的研究。E-mail: wqh1125399650@163.com

通讯作者: 崔维鑫 (1964 -), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间飞行器及其天文自主导航光学姿态敏感技术、红外光电技术与系统技术的研究。E-mail: wxui@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2024-01-02

1 引言

星敏感器是一种以恒星为参考源的姿态测量设备,在目前比较成熟的天文导航中,多应用于大气外的在轨卫星上^[1]。然而,在大气层内的近地空间,白天的大气散射会使工作在可见光光谱范围的星敏感器失效^[2-3]。随着星敏感器探测器的发展,人们发现在可见光波段外,随着波长的增加天空的背景辐射会显著减小^[4]。为了克服可见光探测器白天工作效果差的问题,研究工作在 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围的 SWIR 探测器已经成为一个重要方向。目前,In-GaAs 探测器凭借其优异性能成为 SWIR 探测器的首选,也是本文工作基于的红外星敏探测器。

然而,受限于探测器成像阵列的固有特点,SWIR 图像中会存在缺陷像素噪点和条纹非均匀性噪声,会严重降低 SWIR 探测器的性能^[5]。因此,需要对 SWIR 星图进行相应的去噪处理。目前常用的非均匀性校正(Nonuniformity Correction, NUC)算法大致可以分为两类^[6-7]:一类是基于参考辐射源的定标校正算法,包括两点校正算法、多点校正算法和挡板校正法^[8]等;一类是基于场景的自适应校正算法,包括时域高通滤波算法^[9]、神经网络法^[10]、帧间配准算法^[11]等。前者计算简单,易于实现,但是参数不随场景改变,鲁棒性较差。后者可以根据场景自适应改变参数,但是容易受场景影响产生鬼影等问题。噪点的检测方法可大致分为两类,一类是基于热辐射机制的方法,以探测器对均匀黑体的响应作为检测缺陷像素的标准^[12];另一类是基于统计的方法,通过图像特征对噪点进行检测和去除,如平均滤波方法^[13]等。

在文献[14]中,Wei 等人针对噪点提出了一种改进的(Single-Point Noise, SPN)去噪算法,改进的算法可以用于识别单个噪点但是无法识别缺陷像素簇,同时阈值选择的问题会导致星点中心点被误判为噪点。针对条纹非均匀性噪声提出了列直方图偏移校正算法,其本质是按列减去一个固定值,降低了整幅图的非均匀度但是每列的非均匀度没有改变。在文献[15]中,Sun 等人将数学形态法中的开操作算法用于星图中的背景提取,但是无法很好的消除 SWIR 星图中条纹非均匀性噪声的影响,会存在条纹噪声残留,同时并没有对提取的暗星和噪点进行区分。

考虑到上述方法的优缺点,本文结合红外星图的噪声特点,提出了一种针对 SWIR 图像的噪声抑制算法。通过将改进的 Top-hat 算法和两点法列校正相结合来降低条纹噪声的影响,并通过提出的中心点扩散连通域算法对星点和噪点进行分割,最终能够提高星点的识别准确度和定位精度,且算法在单帧内实现,能保证实时性的需求。

2 红外星图的噪声特点

条纹非均匀性噪声是存在于 SWIR 探测器中一种非常典型的噪声,这是由于随着集成电路的迅速发展,SWIR 探测器的读出电路从早期的 CCD 模式读出发展为 CMOS 模式读出,基于 CMOS 模式的读出电路每列的探测元共用一个放大器,这种方式能够降低成本和提高集成度^[16]。但是,因为不同放大器之间存在一定的参数差异,会导致不同列像素之间有一定的差异性,在图像中表现出条纹的灰度分布^[4]。同时,SWIR 探测器中还存在缺陷像素造成的噪点。这两种噪声的存在会降低图像的信噪比,影响星点的提取和定位精度。

由条纹非均匀噪声和噪点影响的实验室条件下的 SWIR 星图图像如图 1 所示。

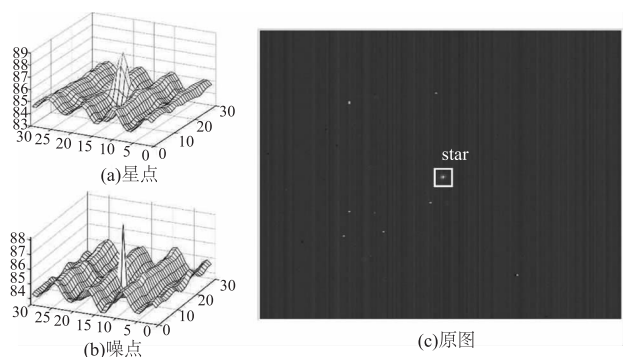


图 1 受条纹非均匀噪声和噪点影响的 SWIR 星图

Fig. 1 SWIR star image affected by stripe non-uniformity and point noise

由图可以看出,SWIR 星图中存在着明显的条纹状噪声,同时 SWIR 星图中的噪点主要来源于红外焦平面阵列上的缺陷像元,一般包括过热像元或死像元等。死像元表现为暗点,与星点有较大的区分度,检测与剔除过程不会影响到星点。但过热像元与星点都表现为亮点,容易被误判为星点或将星点误判为过热像元剔除掉。但是,过热像元与星点在星图上的分布特点也存在差异,二者在一定邻域内的灰度分布有较大区别,如图 2 所示。

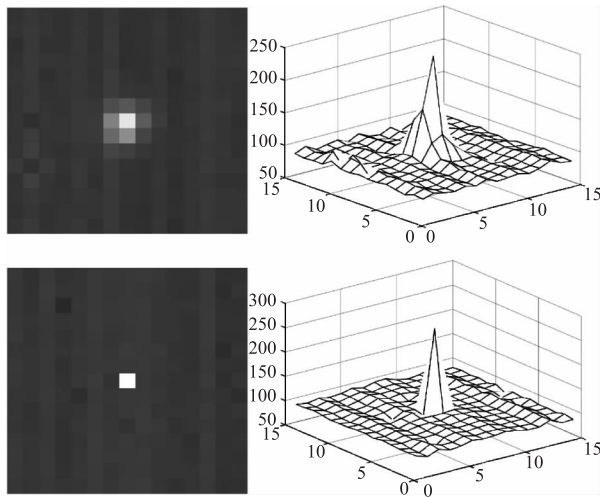


图2 星点与过热像元
Fig.2 Star point and hot pixel

由图可知,星点目标呈现的是类高斯分布,星点中心与周围背景的过度为较连续分布,而过热像素与背景间存在较大的梯度变化,根据这个特点,可以作为判别依据,在算法处理过程中进行区分。

3 本文方法

3.1 预处理校正

在使用改进的 Top-hat 算法进行条纹噪声处理前,需要对列像素进行非均匀性预校正,目的是降低同列像素的非均匀度,减少后续可能的背景处理残留。因两点定标法计算量小,工程应用较广,故采用两点法来进行预校正。

两点校正算法理论认为,在一定温度范围内,红外探测器第 (i,j) 个像元的校正输出信号 $Y(i,j)$ 与实际响应强度 $X(i,j)$ 之间满足如下线性关系:

$$Y(i,j) = K(i,j) \times X(i,j) + B(i,j) \quad (1)$$

响应率因子矩阵 K 和截距因子矩阵 B 的求解过程如下:

①针对某个均匀温度黑体,使用 SWIR 探测器分别采集其低温下的输出图像 X_L 和高温下输出图像 X_H ;

②针对图像 X_L 和 X_H ,求解每列像元的输出平均值 $\bar{Y}_{L,j}$ 和 $\bar{Y}_{H,j}$ 作为列像素的校正目标值: $\bar{Y}_{L,j} = \frac{1}{N} \sum_j X_L(i,j), \bar{Y}_{H,j} = \frac{1}{N} \sum_j X_H(i,j)$

③将图像实际响应值 X_L, X_H 和校正目标值 $\bar{Y}_{L,j}$ 和 $\bar{Y}_{H,j}$ 代入校正函数中,分别可得下式:

$$\bar{Y}_{L,j} = K(i,j) \times X_L(i,j) + B(i,j) \quad (2)$$

$$\bar{Y}_{H,j} = K(i,j) \times X_H(i,j) + B(i,j) \quad (3)$$

④由式(2) ~ 式(3)可得

$$K(i,j) = \frac{\bar{Y}_{H,j} - \bar{Y}_{L,j}}{X_H(i,j) - X_L(i,j)} \quad (4)$$

$$B(i,j) = \bar{Y}_{H,j} - \frac{\bar{Y}_{H,j} - \bar{Y}_{L,j}}{X_H(i,j) - X_L(i,j)} \times X_H(i,j) \quad (5)$$

得到响应率因子矩阵 K 和截距因子矩阵 B 后,对以后 SWIR 探测器得到的每帧图像 X ,根据公式(1)进行 $Y_{out}(i,j) = K(i,j) \times X(i,j) + B(i,j)$ 运算补偿,并将 $Y_{out}(i,j)$ 作为输出图像。

对 InGaAs 探测器在实验室条件下得到的含有条纹非均匀性噪声的 SWIR 图像,使用两点法按列校正后,截取的 30×30 像素的校正前后列标准差比较结果如图 3 所示。

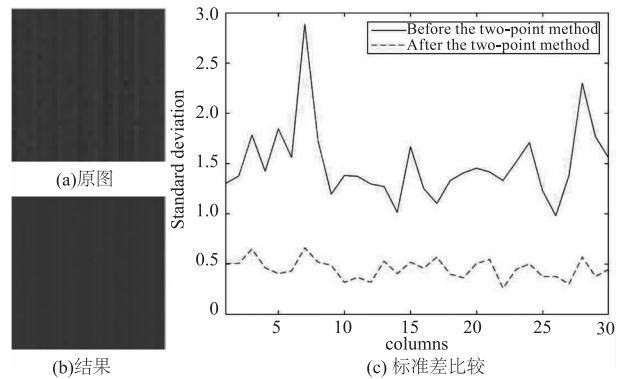


图3 两点法预校正前后列像素的标准差变化

Fig.3 Change in standard deviation of column pixels before and after pre-correction by the two-point method

由图 3(a)、(b),通过对每列像素进行两点法校正后,视觉上每列像素内的非均匀度得到了降低,计算每列像素的标准差,通过图 3(c)可以看出,非均匀度确实得到了相当程度的初步降低。但是列间依旧还存在一定的非均匀性误差,需要通过后续改进的 Top-hat 算可以消除条纹非均匀性等背景噪声的影响。

3.2 改进的列向 Top-hat 算法

红外弱小目标检测是近年来红外领域的关键技术和研究难点之一。红外星图中,星点就是一种典型的小目标,Top-hat 作为数学形态学中的一种典型的小目标提取算法,文献[15]就将其应用于星点提取中。

Top-hat 需要用到形态学的知识,令 A 代表原始

图像, (x,y) 是像元的坐标, B 是进行操作的结构元素 (Structuring Element, SE), 腐蚀操作的表达式如下式所示:

$$A \ominus B = \{\min(x,y) \mid (B)_{xy} \subseteq A\} \quad (6)$$

相应的, 膨胀操作是腐蚀操作的逆操作, 其表达式如下式所示:

$$A \oplus B = \{\max(x,y) \mid (B)_{xy} \subseteq A\} \quad (7)$$

开操作就是通过先腐蚀、再膨胀操作的结合来实现的, 原始图像 A 经过开操作后可以得到背景图 C , 可通过下式来表示:

$$C = (A \ominus B) \oplus B \quad (8)$$

Top-hat 就是通过原始图像 A 减去背景图 C 得到提取结果。其中, 当结构元素 B 的半径大于星点半径时, 开操作才能正确的提取出星点的背景信息, 否则容易丢失星点边缘信息, 一般, SWIR 探测器设计时, 星点能量大部分都会弥散在 3×3 的像素范围内, 所以一般选取结构元素时, 都会采用大于等于

5×5 的大小。

传统的 Top-hat 算法使用的是如图 4(a) 所示的结构元素, 针对星点这种特殊的小目标提取, 相关学者又提出了新型算法 NWTH (New Top-hat), 这种算法是利用星点的边缘信息来构造结构元素, 结果如图 4(b) 所示。而在 SWIR 星图中, 由于条纹非均匀噪声的存在, NWTH 方法会受到列间像素的影响, 会保留峰值列像素的背景信息。针对这种问题, 本文算法在此基础上进行改进, 结合条纹噪声的特点, 提出如图 4(c) 所示的列向结构元素, 相关处理结果如图 5 所示。

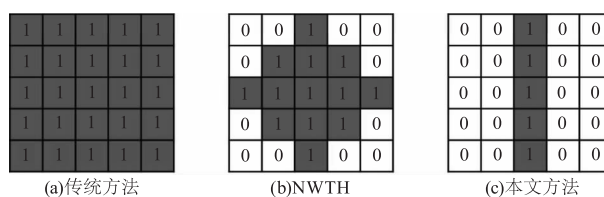


图 4 结构元素

Fig. 4 Structuring element

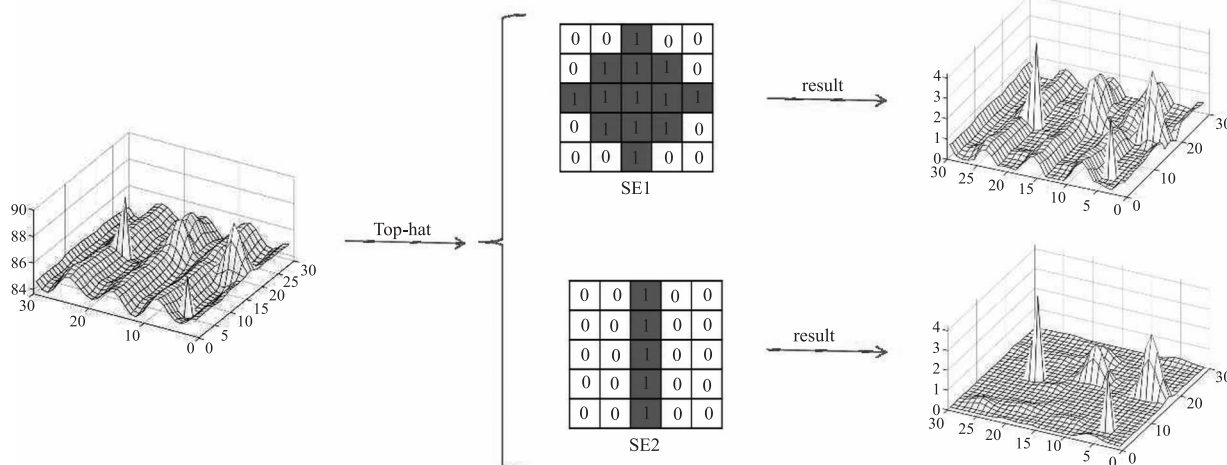


图 5 SWIR 星图在不同结构元素的 Top-hat 算法下的处理结果

Fig. 5 SWIR star image processing results under Top-hat algorithm with different structuring elements

Top-hat 算法的本质就是通过保留图片中的高频分量进行目标提取, 而列条纹之间的变化也是高频分量, 所以处理不当会保留部分亮纹。本文提出的算法可以很好地避免这个问题, 从图 5 中的结果可以看出, 本文算法在保留星点和过热像素的基础上, 不会残留条纹噪声的影响。

3.3 中心点扩散连通域算法

经过上述算法, 除了星点以外, 过热的像素点或像素簇也得到了保留, 本文提出一种中心点扩散连通域分割算法, 用来区分星点与缺陷像素。此算法的具体实现流程如下:

①对于原图 A 和背景 C , 通过下式(9)可以得

到一个初步标记矩阵 TAG :

$$TAG = \begin{cases} 1, & \text{if } (A - C)_{x,y} > Thx1 \\ 0, & \text{if } (A - C)_{x,y} \leq Thx1 \end{cases} \quad (9)$$

目的是标记出星点或噪点可能的位置, 结果如图 6(b) 所示, 提取出的轮廓并不完全。

②对于标记矩阵 TAG , 只保留同属一个连通域 D_i 中值最大的像素点 $p_i = \max(p_{x,y} \in D_i)$, 假定此像素点就是星点中心像素, 最后得到新的标记矩阵 $TAG1$, 如图 6(c) 所示。

③以 $TAG1$ 中的点 p_i 为中心进行连通域扩散, 对于 p_i 周围大于阈值 $Thx2$ 的点认为是属于星点的一部分。实验室条件下测试发现对于本文使用的

InGaAs 探测器,像素值大于中心点 $T \cdot 0.25$ 的星点占据了星点总能量的 90%。所以,阈值选择为 $Thx2 = T_{pi} \cdot 0.25$,其中 T_{pi} 为中心点 p_i 的,结果如下图 6(d) 所示。

④对于每个新连通域 D_i ,可以根据连通域中像素点的个数和分布来区分星点和噪点,一般像素点数量少于 4 个或者分布不成星点状的连通域,就认为其为噪点或噪声簇。

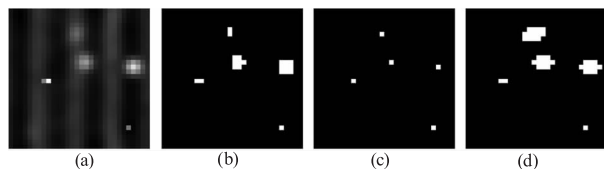


图 6 中心点扩散连通域算法过程
Fig. 6 The process of connected domain algorithm based on center point diffusion

通过上述过程,最终可以避免噪点或噪点簇的影响,正确提取出星点。

4 实验结果及分析

为了验证文中提出算法对星点提取的效果,本文对实验室和外场获得的 SWIR 星图进行测试,并对算法的结果进行比较。

图 7(a) 为在实验室条件下获得的包含条纹非均匀性噪声和噪点的 SWIR 原始星图,图 7(b) 为 Wei 的算法进行噪点的检测结果,图 7(c) 为本文提出算法的检测结果。从图 7(b) 中可以看出 Wei 的算法可以很好的提取出单个的噪点,但是对于位置连续的噪点簇无法完整提取或直接漏提取,有时阈值选择不佳也会导致星点中心被误判为噪点。从图 7(c) 中可以看出,本文提出的算法无论对噪点或者噪点簇,都能够正确地提取出。

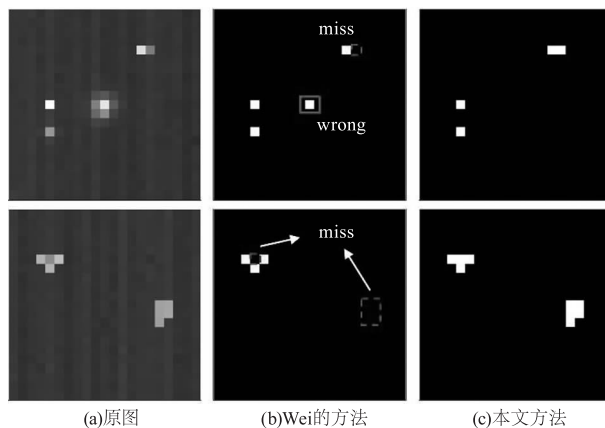


图 7 实验室条件下噪点提取结果
Fig. 7 Noise extraction results under laboratory conditions

为了进一步验证算法的效果,将文中算法用于在丽江天文台外场实验获得的观测星图。图 8 ~ 图 11 为 2023 年 11 月 23 日观测到的红外星表 2MASS 中各星等 SWIR 星图经不同方法处理后的结果图。

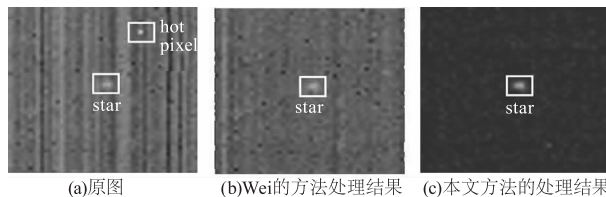


图 8 0.958 星等(星号 4440)
Fig. 8 0.958 magnitude(number 4440)

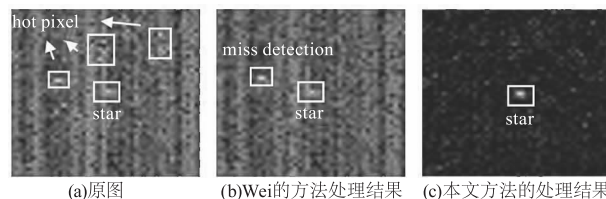


图 9 1.127 星等(星号 4709)
Fig. 9 1.127 magnitude(number 4709)

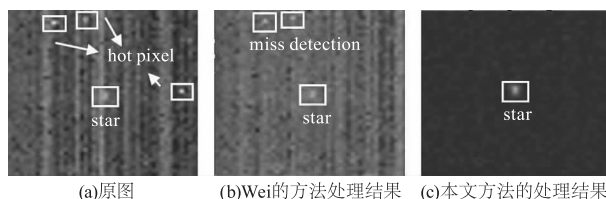


图 10 1.391 星等(星号 5354)
Fig. 10 1.391 magnitude(number 5354)

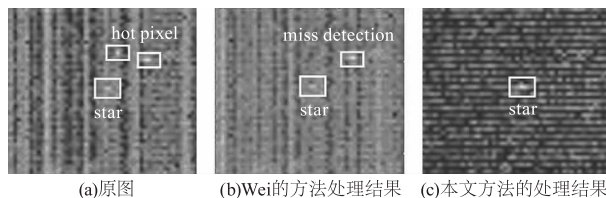


图 11 2.095 星等(星号 2418)
Fig. 11 2.095 magnitude(number 2418)

图 8(a) ~ 11(a) 为外场观星中对 4 个不同星等星点下截取的 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$ 的 SWIR 实际星图,随着星等的增加,星点越暗,相应地信噪比也越低,与背景的分度也越小,提取难度也越大。图 8(b) ~ 11(b) 为经过 Wei 的算法处理后的星图,条纹背景噪声处理后还有部分的残留,从图 3(c) 也可以看出这是因为同处一列的像素之间的灰度值也有较大的标准差即同列像素间灰度也有一定波动,同列像素加减同一个校正值无法降低每列像素的非均匀度。同时存在噪点漏提取,这是因为 Wei 的方法无法处理噪点簇,这点在图 7 中也有体现。图 8(c) ~

11(c)为本文提出方法的处理结果,可以看出本文的方法可以在低于 2 星等的 SWIR 星图中准确地去除条纹噪声和噪点(簇)的影响,提取出星点。

为了进一步更直观地比较算法在实际星图中的效果,通过计算星点中心位置的提取误差来对算法进行比较,其中部分结果如图 12 所示。

本文采用质心方法来计算星点的中心,令通过上面算法得到的星点目标为 $F(x,y)$,星点总数为 S ,按照灰度值的平方加权:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F^2(x,y)x}{S} \\ \bar{y} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F^2(x,y)y}{S} \end{cases} \quad (10)$$

假设星点坐标的实际坐标为 (x_c, y_c) ,计算得到的星点坐标如式(10)所示为 (\bar{x}, \bar{y}) ,则定义星点提取误差如下式:

$$e = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2} \quad (11)$$

图 12 中展示的是不同算法对不同星点的提取误差比较,其中数字代表的是星号,括号中是对应的星等,可以看出本文提出算法的星点定位精度要优于 Wei 的算法。当星等较低即星点亮度较高时,本文算法的定位精度较好,而当星等较高时,受限于探测器性能,星点的信噪比较低,提取精度变差,但本文算法仍有相对较好的表现,在两等星内提取误差可以保持在 0.3 个像素内。

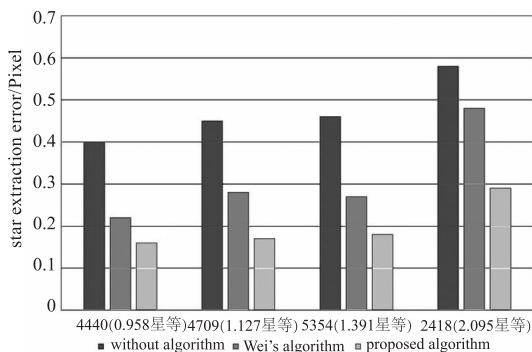


图 12 不同算法的星点提取误差

Fig. 12 Star point extraction error of different algorithms

5 总结

针对 SWIR 星图中的条纹非均匀性噪声和缺陷像素噪点,本文分析了其产生的原因和特点,结合前人方法中的优缺点,提出了对应的噪声抑制

算法。传统 Top-hat 和 NPTH 算法无法很好的处理条纹噪声,会存在亮条纹残留,本文通过将两点法列预处理和改进的列向 Top-hat 算法相结合能够很好去除条纹噪声的影响。同时,针对星点和噪点(簇),提出了一种中心点扩散连通域算法来分割星点和噪点(簇),能够很好的解决文献[14]中无法提取噪点簇的问题。通过对实验室模拟星图和外场实际拍摄星图的对比验证,本文提出的算法能有效地处理 SWIR 星图中的条纹和噪点噪声,在两等星内星点的提取误差小于 0.3 个像素,因为本文使用的 InGaAS 探测器参数为 1024×1280 像素, $2^\circ \times 2^\circ$ 的视场,所以实际误差在 2" 左右内。同时本算法针对单帧图像,计算量小,实时性好,便于硬件移植和实现。

参考文献:

- [1] Zhang Hui, Zhou Xiangdong, Wang Xinmei, et al. Survey of technology status and development of all-time star sensors in near-earth space[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 41(8): 19-31. (in Chinese)
张辉,周向东,汪新梅,等. 近地空间全天时星敏感器技术现状及发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 19-31.
- [2] Truesdale N, Skeen M, Diller J, et al. Day star: modeling the daytime performance of a star tracker for high altitude balloons[C]//IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2013, 1-12.
- [3] Dietz, Kurt L., et al. Daytime aspect camera for balloon altitudes[J]. Optical Engineering, 2002, 41(10): 2641-2651.
- [4] Wang Wenjie, et al. Noise suppression algorithm of short-wave infrared star image for daytime star sensor[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 85: 382-394.
- [5] Parra F, Meza P, Torres S N, et al. Modeling and compensating non-uniformity in push-broom NIR hyperspectral imaging system[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 63(3): 204-210.
- [6] Chen Weifeng. Research of IRFPA Non-uniformity adaptive correction based on DSP[D]. Chengdu: XIHUA University, 2010. (in Chinese)
陈未峰. 基于 DSP 的 IRFPA 非均匀性自适应校正研究[D]. 成都: 西华大学, 2010
- [7] Li Hang. The research of non-uniformity correction for Infrared focal plane array[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
李航. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

- [8] Zhang Kehang, Song Hongfei, Tan Wen, et al. Nonuniform correction algorithm for residual estimation of nonlinear filter based on neural network[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2023, 46(5): 66 – 74. (in Chinese)
张科航, 宋鸿飞, 谭文, 等. 基于神经网络的非线性滤波残差估计非均匀校正算法[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2023, 46(5): 66 – 74.
- [9] Scribner, Dean A. et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks[C]//Infrared Sensor: Detectors, Electronics, and Signal Processing, 1991.
- [10] SCRIBNER D A, SARKADY K A, KRUEER M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks[C]//The International Society for Optical Engineering, 1991: 100 – 109.
- [11] Zuo C, et al. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2011, 28(6): 1164 – 1176.
- [12] 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 & Technology, 2011, 16(2): 16 – 19. (in Chinese)
孙慧, 孙凯, 侯晴宇. 基于国家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.
- [13] Jin B, Park N, George K M, et al. Modeling and analysis of soft-test/repair for CCD-based digital X-ray systems[J]. Instrumentation & Measurement IEEE Transactions on, 2003, 52(6): 1713 – 1721.
- [14] Wei Wei, Liu Enhai. Denoising algorithms to infrared star map of daytime star observation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1923 – 1927. (in Chinese)
魏伟, 刘恩海. 白天观星红外星图噪声抑制算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1923 – 1927.
- [15] Sun T, Xing F, You Z, et al. Motion-blurred star acquisition method of the star tracker under high dynamic conditions[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20096 – 20110.
- [16] Liu Ziyuan. Research on the stripe noise removal method for uncooled infrared images[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023. (in Chinese)
刘致源. 非制冷红外图像条纹噪声去除的方法研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.