

基于能量函数的极值中值滤波星图去噪算法

王敏^{①②} 赵金宇^{*①} 陈涛^① 崔博川^{①②} 高扬^{①②}

^①(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 利用地基观测相机拍摄的以深空为背景的星图受星空复杂背景的影响,往往具有较高的噪声水平。同时由于星图主要由恒星、空间目标和星空背景噪声组成,且成点状分布,星图目标和噪声呈现较大的相似性,传统的图像去噪算法并不适用于星图。为此,该文提出一种基于能量函数的极值中值滤波去噪算法,该算法在去除星图椒盐噪声的同时能够较好地保持图像目标信息。该方法针对疑似噪声点采用二次检测的方式,并且结合改进的自适应中值滤波和能量函数模型进行灰度值恢复。该文分别使用仿真试验和真实星图处理试验对该方法进行验证,在客观评价中,图像峰值信噪比 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)最高可提高 3 倍多,均方误差 MSE(Mean Squared Error)减小为加噪图像的 3.16×10^{-5} 。试验结果表明,该方法可有效地降低传统方法的噪声误检问题,同时提高噪声图像的恢复精度,非常适合星图噪声的去除。

关键词: 星图去噪; 极值中值滤波; 峰值信噪比; 均方差

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)06-1387-07

DOI: 10.11999/JEIT160955

Extremum Median Filter Map Denoising Algorithm Based on Energy Function

WANG Min^{①②} ZHAO Jinyu^① CHEN Tao^① CUI Bochuan^{①②} GAO Yang^{①②}

^①(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The star maps acquired by the ground-based cameras are susceptible to the complex background of the starry sky and thus have high noise levels. In addition, the targets in star maps are similar to the noises due to their punctate shapes. As a result, the traditional image denoising method is not applicable to star maps. A new adaptive extremum median filtering denoising algorithm is put forward based on energy function, which can effectively remove the salt and pepper noise of the star maps and keep the small target information at the same time. This method employs a twice-check strategy to reduce the false detection ratio of noisy pixels and uses the improved adaptive median filter and the energy function model to recovery noise imagery. The simulated and real star map experiments show that, the Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) is improved about 3 times and the Mean Squared Error (MSE) is reduced by 3.16×10^{-5} in the terms of objective evaluations, the proposed method can effectively improve the denoising result and thus is applicable to star maps.

Key words: Star map denoising; Extremum median filter; Peak Signal to Noise Ratio (PSNR); Mean Squared Error (MSE)

1 引言

近年来,星图在军事和民用方面都有着很重要

的用途,由于受星空复杂背景的影响,星图存在对比度低、视觉效果差的问题,直接影响了整个星图识别系统(图像分割,特征提取,图像识别)的性能和精度。为此,在进行星空目标检测和质心定位前必须对星图进行预处理,尽可能抑制星图中的噪声。然而由于星图中目标呈点状分布,与噪声具有较高的相似度,传统的图像去噪算法并不适用于星图去噪处理。如何在去除噪声的同时,又保留星图的目标信息和目标定位精度,是一个具有挑战性的问题^[1,2]。

收稿日期: 2016-09-22; 改回日期: 2017-02-15; 网络出版: 2017-04-14

*通信作者: 赵金宇 zhaoyj@ciomp.ac.cn

基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA8082035), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(065X32CN60)

Foundation Items: The National 863 Program of China (2011AA8082035), The Third Phase of Innovative Engineering Projects of the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (065X32CN60)

研究表明,椒盐噪声^[1]是星图最重要的一种噪声,因此本文针对此类噪声进行研究。对普通图像而言,中值滤波技术是去除椒盐噪声简单有效的处理方法之一,具有计算量小,运算速度快,满足图像处理的实时性要求。但是,当噪声密度增加到一定程度时,其滤波性能显著降低;并且由于其并未完全利用图像模型的统计知识,具有一定的盲目性。为改善中值滤波的去噪效果,学者们提出了很多新型的去噪方法。杨卓东等人^[3]提出了一种改进的自适应中值滤波算法,此算法引入角度和相关性的概念,通过判断角度的大小和与邻域信号点之间的关系来确定噪声点,最后基于窗口中的均值和中值进行加权滤波;周玲芳等人^[4]提出了基于斜率差值的自适应滤波算法,在传统自适应中值算法的基础上,以斜率差值作为噪声判定标准,有效保留了极值附近的信号,滤波的保真性也得到了提高,最后利用均值滤波处理密度较大的噪声块;黄存令等人^[5]提出了改进的极值中值滤波算法,其通过二次检测噪声点来降低误检率,并用窗口内的信号点的中值进行滤波替换,避免了噪声的传播。

对于星图而言,由于目标呈点状分布,和噪声具有较高的相似度,现有的中值滤波和一些改进算法并不适用。本文针对星图的特点,提出一种基于能量函数的极值中值滤波去噪算法。首先寻找图像全局极值,然后设定阈值,以确定疑似噪声点并做标记,接着对窗口内的非噪声点取中值,将其作为下一步的输入中值参考值;再根据能量最小化理论,建立新的能量函数模型,对疑似噪声点进行二次检测;最后利用能量函数模型计算出最终中值,对确定为噪声的像素点进行恢复。试验结果表明,本文方法对星图去噪具有良好效果,在去除噪声的同时,可以有效地保留点状目标信息。同时,该算法对普通图像也具有较好的效果,试验表明,在不同强度噪声下,本文算法都能较好地清除椒盐噪声,有效地保留图像细节。

2 算法原理分析

利用地基光学望远镜得到的星图往往具有多种噪声,包括 CCD 成像的光子噪声、暗电流噪声、读出噪声、点扩散模糊噪声等多种原因引起的噪声。由于星图成像背景为亮度极低的深空,因此 CCD 成像暗电流噪声和光子噪声成为影响星图成像质量的重要因素,这两种因素引起的噪声往往表现为“椒盐噪声”^[1]。本文主要针对椒盐噪声进行分析,并在传统极值中值滤波算法的基础上提出了改进算法去除星图椒盐噪声。星图中,星点分布在大面积带噪声的背景中,近似为圆形点状高斯分布,占据一个或几个像素点,成像亮度不稳定,而背景噪声成分

复杂,很难直接从背景中提取星点目标。椒盐噪声^[1]是一种表现为胡椒加盐效果的噪声,噪声点表现为黑色噪声点(椒噪声点)与白色噪声点(盐噪声点)的相间且噪声点随机分布。

传统的极值中值算法^[6]是以局部窗口内的极值点作为判断噪声点的基准,当图像被幅度比较大的椒盐噪声污染时,该算法比较有效。但这种方法存在以下两种问题:其一,并非所有的极值点均为噪声点,如果图像中含有较多的窄带、细线时(比如星图),该算法容易将这些像素点判断为噪声点,通过中值滤波改变其像素点的值,从而会造成细节损失,图像模糊;其二,当噪声点是非极值点时,这就容易造成漏检。因此,传统的极值中值滤波算法并不适用于星图去噪处理。

3 改进的极值中值滤波算法

为了减小误判和漏检概率,更加有效地保持星图的点目标信息,本文提出了一种基于能量函数的极值中值滤波算法,以期达到更好的去噪效果。

3.1 检测疑似噪声点

令 X 和 F 分别表示原始图像和椒盐噪声污染后的图像, $z = f_{i,j} - f'_{i,j}$ 为窗口的中心点像素值, $F_{i,j}$ 为被污染图像中的任意点像素值。首先选定一个 $k \times k$ 的窗口 w , 并找到整个图像中的最大和最小灰度值,记为 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 。考虑到传统极值中值滤波原理存在漏检和误检的问题,本文采用以下判定条件,首先确定疑似噪声:

$$F_{i,j} \in \begin{cases} S, & |F_{i,j} - f_{\min}| > T_1 \cap |F_{i,j} - f_{\max}| > T_1 \\ N, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, S 和 N 分别表示未被污染像素和被污染像素集合, T_1 为阈值。对 S 和 N 分别标记,如式(2):

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1, & F_{i,j} \in N \\ 0, & F_{i,j} \in S \end{cases} \quad (2)$$

其中, $g_{i,j}$ 是本文初步确定的疑似噪声点集合,通过这一初步处理,噪声点都在这个集合内,但是集合内的像素点未必都是噪声点,尤其在信噪比较高的图像,会造成误检。所以本文提出进一步噪声点判断。

3.2 初步替代疑似噪声点

本文先将疑似噪声集合 $g_{i,j}$ 标记的像素初步替换,作为下一步二次判断噪声点的输入。噪声初步替换步骤如下:首先去掉窗口中所有标记为 1 的疑似噪声点,然后统计剩下标记为 0 的信号点,由信号点的中值进行中心噪声点的替换,初步替换后的像素灰度值记为 $f'_{(i,j)}$ 。

3.3 建立能量函数模型

为了解决初步中值替换过程中的误检问题, 本文结合能量最小化原理, 构造了一个新的能量函数模型。算法思想是: 结合像素点局部邻域信息, 计算局部邻域能量值, 从而判断是否替换原像素值, 如果需要替换, 则求使得能量函数值取极小时的中值替换值。经过这一步处理, 本文算法不再是对灰度值的简单替换, 不仅可以降低噪声误判概率, 同时可对图像的边缘和目标细节进行很好的保护。

对于一幅图像, 临近像素点之间存在着很强的相关性, 中心点的灰度值与周围点的灰度值十分接近, 除了孤立点(一般认为是噪声), 即使是边缘也有同样的特性。如果一个像素点的值远大于或小于其邻域的值, 那么该点就可能被污染了, 反之, 它是一个有效的信号点。噪声点与其邻域像素灰度值的差异可以通过构造能量函数计算出来, 因此, 图像去噪可以转化为能量函数取得极小值时 $f'_{(i,j)}$ 的取值问题。

本文定义 E 为像素点的能量函数, 该函数反应邻域系统内图像中心像素点与周围像素点的差异程度。令 E_s 表示像素点 (i, j) 自身的能量势能, E_d 表示邻域内中心像素点 (i, j) 与邻域内其他各点的能量值, $v(i, j)$ 表示像素点 (i, j) 的四邻域, 不包含 (i, j) 点本身。本文建立如式(3)所示的能量函数模型:

$$E(i, j) = E_s(i, j) + E_d(i, j) \quad (3)$$

其中,

$$E_s(i, j) = |f_{i,j} - f'_{i,j}|, E_d(i, j) = \frac{\beta}{2} \sum_{(k,l) \in v(i,j)} \varphi(f_{1(i,j)} - f_{k,l})$$

$\varphi(\cdot)$ 为边缘保持势函数^[7]。该能量函数模型满足如下的性质:

(1) 未受污染的像素点, 估计值满足 $f_{i,j} = f'_{i,j}$, 即保持原值不变。

(2) 受污染的像素点, 边缘保持势函数 φ 对保持图像的边缘和细节起到了很大的作用。

本文采用 $\varphi(t) = |t|^\alpha$, $1 \leq \alpha \leq 2$ 作为边缘保持函数。

首先判断噪声点, 根据被噪声污染的像素点与邻域像素点之间的灰度差值急剧增加的原理, 计算原中心像素点与邻域像素点及灰度替换值之间的能量函数值, 本文取 $f_{1(i,j)} = f_{i,j}$, $\alpha = 1$, $\beta = 2$, 则能量函数为

$$E(i, j) = |f_{i,j} - f'_{i,j}| + \sum_{(k,l) \in v(i,j)} |f_{i,j} - f_{k,l}| \quad (4)$$

具体规则如下:

(1) 计算被污染图像中每一个像素点的初始能量值 E_0 和全部像素点的能量值之和 E_{00} ;

(2) 对被污染图像进行初步中值恢复得到新的图像, 然后计算每个像素点的能量 E 。若疑似噪声点满足 $E < E_0$ 并且 $E_{00}/M < E_0$ (M 为图像总像素数), 则判定其为噪声点; 否则, 为信号点, 保持原值不变。可以迭代多次计算。

通过这一步已经确定了噪声点, 然后需要进行噪声点灰度值恢复。事实上是计算能量函数 $E(i, j)$ 取得极小值时的 $f'_{i,j}$ 。根据现有研究^[8], 噪声恢复步骤中, 本文取值 $f_{1(i,j)} = f'_{i,j}$, $\alpha = 1.3$, $\beta = 2.5$, 则能量函数计算如式(5):

$$E(i, j) = |f_{i,j} - f'_{i,j}| + 1.25 \times \sum_{(k,l) \in v(i,j)} |f'_{i,j} - f_{k,l}|^{1.3} \quad (5)$$

第1项和第2项分别是数据逼近条件和边缘保持正则化条件。令 $z = f_{i,j} - f'_{i,j}$, 代表滤波后的图像和被噪声污染的图像之间的差值, $f'_{i,j}$ 按如下步骤求解:

(1) 初始化 $z_{ij}^{(0)} = 0$ (i, j 是噪声集合点);

(2) 循环迭代, 计算 $\varepsilon_{ij}^{(k)} = \beta \sum_{k,l \in V_{ij}} \varphi'_\alpha(f_{i,j} - z_{k,l} - f_{k,l})$, 在 (i, j) 的四邻域内进行, 其中 z 是上次迭代所使用的值。 φ'_α 是一阶导数;

(3) 如果 $\varepsilon_{ij}^{(k)} \leq 1$, $z_{ij}^{(k)} = 0$, 否则通过式(6)非线性等式求得 $z_{ij}^{(k)}$,

$$\beta \sum_{m,n \in V_{ij}} \varphi'_\alpha(z_{ij}^{(k)} + f_{i,j} - z_{k,l} - f_{k,l}) = \text{sgn}(\varepsilon_{ij}^{(k)}) \quad (6)$$

(4) 估计值可以表示为 $f'_{i,j} = f_{i,j} + z_{ij}$ 。

假设输入图像 X 为8位图像, 灰度值范围为 $[0, 255]$, 本文算法的完整步骤如下:

(1) 初始化阈值 $T = 5$, 然后根据判断准则, 初步代替疑似噪声点, 获得一个新的图像, 计算其信噪比;

(2) 将 $T+1$ 赋值给 T , 计算新的图像的信噪比, 如果信噪比增大, 则迭代进行步骤(2), 否则转步骤(3);

(3) 把 T 值作为最终阈值, 对噪声点进行初步检测并标记。疑似噪声点的检测灰度范围设定为 $[0, T]$, $[T, 255]$;

(4) 初步替换疑似噪声点;

(5) 二次检测噪声点。根据能量最优化原则, 构造能量函数模型 E , 对疑似噪声点进行二次判断, 如果 $E < E_0$ 且 $E_{00}/M < E_0$, 则确定为噪声点;

(6) 对灰度值为0和255的噪声点进行中值滤波, 这一步中, 本文采用的是改进的自适应中值滤波方法^[9-12];

(7) 利用构造的能量函数模型, 求使得式(7)取得

极小时的 $f'_{i,j}$, 进行剩下噪声点的替换。

$$f'_{i,j} = \arg \min_{f_{i,j}} \left\{ |f'_{i,j} - f_{i,j}| + 1.25 \times \left(2 \times \sum_{(k,l) \in v_1} |f'_{i,j} - f_{k,l}|^{1.3} + \sum_{(k,l) \in v_2} |f'_{i,j} - f_{k,l}|^{1.3} \right) \right\} \quad (7)$$

其中, v_1 表示四邻域中的信号点集合, v_2 表示四邻域中的噪声点集合。括号内多项式系数的差别是因为对于恢复该处像素点, 一个未被污染的邻域像素点的作用要远大于一个被污染的邻域像素点^[13]。

3.4 计算复杂度分析

本文提出基于能量函数的极值中值滤波去噪算法, 通过构建能量函数模型克服传统极值中值滤波算法的误检和漏检问题, 但同时增加了计算复杂度。对于传统极值中值滤波算法和本文改进方法的计算复杂度理论分析如下: 令 M 为图像像素总数, 滤波窗口 w 大小为 $k \times k$, 传统极值中值滤波算法需要对窗口内像素排序, 并计算最大最小值, 排序算法按平均计算复杂度为 $O(n \lg(n))$ 计算, 则单个窗口所需的计算复杂度为 $2k^2 \lg(k)$, 因此传统中值滤波算法总计算复杂度为 $2Mk^2 \lg(k)$; 本文改进算法首先利用传统极值中值滤波算法迭代确定椒盐噪声阈值, 设迭代次数为 q (一般 $1 \leq q \leq 5$), 则这一步需要的计算复杂度为 $2qMk^2 \lg(k)$, 然后需要计算每个像素的能量函数和灰度恢复值, 分别如式(4)和式(7)所示, 用以完成噪声点进行二次判断、像素值恢复以及非噪声点的替换, 这一步需要对 4 邻域像素计算, 每个像素需要 8 次计算, 全图计算复杂度为 $8M$, 因此本文算法总计算复杂度为 $2qMk^2 \lg(k) + 8M \approx 2qMk^2 \lg(k)$, 近似认为传统极值中值滤波算法的 q 倍。

需要说明的是, 从上述分析可以看出, 本文方法在计算噪声点阈值时需要迭代使用传统极值中值滤波方法, 而计算能量函数所需计算量则可忽略不计。关于快速的中值滤波有了较深入的研究^[14-16], 这些方法同样可用于本文算法提高计算效率。

4 仿真验证与分析

4.1 仿真分析

为了验证所提方法的有效性本文首先对 256×256 大小的 Cameraman 图进行了仿真测试。使用仿真方法进行试验验证可以掌握图像的原始信息(如噪声情况), 从而可以更客观、更准确地对算法进行评价。本文对原始图像分别加入不同强度的椒盐噪声(分别为 $P = 0.25$, $P = 0.6$ 以及 $P = 0.8$), 然后进行噪声误检试验和噪声去除试验。

(1)噪声误检试验: 本文分别采用传统中值滤波算法^[17], 极值中值滤波算法^[6]和自适应中值滤波算法^[10,17]与本文提出的改进算法对噪声图进行处理, 并统计了不同处理方法在不同的噪声强度下, 中值滤波错误概率(错误的中值点总数占中值点总数的比率)之间的关系, 统计结果如图 1 所示。

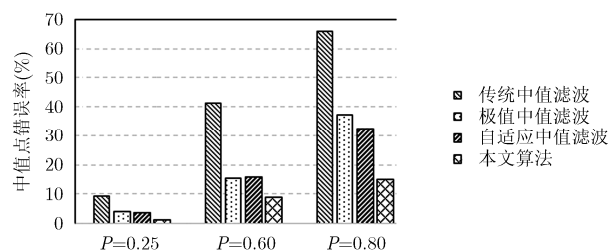


图 1 不同滤波算法中值点错误率与噪声率的关系

从图 1 中可以看出, 随着噪声水平的增加, 所有算法的中值滤波错误概率都呈现增加趋势。传统中值滤波算法错误概率最高, 仅在噪声水平较低时 ($P = 0.25$), 才具有可接受的中值滤波错误概率 (9.77%)。自适应中值滤波方法和极值中值滤波方法错误概率接近, 在噪声水平较低时, 自适应中值滤波算法具有更低的错误概率; 但当 $P = 0.8$ 时, 极值中值滤波错误率更低。本文提出的滤波算法在各个噪声强度下都能获得最低的中值滤波错误概率, 并且随着噪声水平的增加, 本文方法的优势更加明显。这是由于本方法主要针对噪声误检问题进行了设计和改进, 采用基于能量函数的方法, 并且使用两步噪声像素确认流程, 大大降低了中值滤波错误概率。

(2)噪声去除试验: 本文试验进行各个方法的噪声去除比较, 采用传统中值滤波算法, 极值中值滤波算法和自适应中值滤波算法与本文提出的改进算法分别进行去噪处理, 试验结果如图 2 所示。可以看出, 本文提出的基于能量函数的中值滤波算法可以有效的去除不同强度的椒盐噪声。当噪声强度 $P = 0.25$ 时, 恢复的图像具有极高的精度。整体而言, 传统中值滤波算法的结果最差, 尤其是噪声强度较高时, 几乎没有去噪效果。其他三种方法, 当噪声强度比较低时, 极值中值算法、自适应中值算法以及本文算法都能取得较好的效果, 此时, 仅从目视解译难以判断各个算法的优劣; 当噪声强度较高时, 如 $P = 0.8$, 本文方法处理的结果明显比其他方法得到的结果好。

为了对各个方法进行定量比较, 本文采用两个测量指标^[18]: 峰值信噪比 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)和均方误差 MSE(Mean Squared Error)。



图2 不同噪声强度下各种去噪算法处理结果对比图

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left[\frac{255^2 mn}{\sum_{i,j} (u_{i,j} - x_{i,j})^2} \right]$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i,j} |u_{i,j} - x_{i,j}|^2$$

其中, $u_{i,j}$ 表示原始图像灰度值, $x_{i,j}$ 表示中值滤波后的图像灰度值, m, n 表示图像的大小, i 表示图像的灰度级, P_i 表示灰度值为 i 出现的频率。峰值信噪比是用来权衡图像的信息量, 信噪比越大, 表示图像包含的细节越多, 均方误差代表的意义恰好相反。本文分别统计了在 5 种不同噪声强度下, 用 4 种方法去噪后的 PSNR 和 MSE 值, 见表 1 和表 2。

在表 1 和表 2 中, 通过性能指标的对比可以看出, 在相同的噪声密度条件下, 与其他几种算法相比本文算法的 PSNR 值最大, MSE 值最低, 说明本文算法去噪效果最好。计算结果显示, 信噪比最多可提高 3 倍多, 均方误差减小为加噪图像的 3.16×10^{-5} 。在不同强度的椒盐噪声下, 本文算法都可以提高去噪性能, 而且随着噪声强度的增加, 本

文算法的优势越来越明显, 这个结论与图 2 的结果吻合。

4.2 实际星图去噪试验

为了验证本文方法在实际星图中去噪的性能, 本文选取了由实验室大视场地基光学望远镜拍摄的星图, 为了便于处理, 截取了 256×256 大小的星图块, 如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看出, 原始图像中噪声水平较高, 如不进行去噪处理, 则会极大影响后续星图处理过程。

从前面仿真试验可以看出, 极值中值滤波和自适应中值滤波算法比传统中值滤波算法效果好, 因此本文选择极值中值滤波^[6]和自适应中值滤波算法^[10,17]跟本文算法进行去噪比较, 结果如图 3 所示, 方框标记区域是空间目标点, 结果显示本文算法处理效果较佳, 不仅去除了噪声, 而且很好地保持了星点细节, 而极值中值滤波和自适应中值滤波算法虽然也能较好地去除噪声, 却模糊了原有星点。

关于计算时间, 传统极值中值滤波算法在测试机器(Intel Core i7-3770 8 核处理器, 4 GB 内存, Matlab 2013 环境)所用时间为 0.023 s, 本文算法计

表 1 不同噪声密度下各种滤波算法对应的 PSNR 值比较(dB)

滤波算法	椒盐噪声密度大小(%)				
	10	30	50	70	80
传统中值滤波算法	25.7067	21.0452	14.4107	9.4556	7.7875
极值中值滤波算法	31.3384	26.5046	23.0614	19.5424	16.0011
自适应中值滤波算法	29.2107	26.6394	23.6482	19.8855	16.9442
本文算法	30.5399	26.9627	23.7060	21.2541	19.5395

表 2 不同噪声密度下各滤波算法对应的 MSE 值比较

滤波算法	椒盐噪声密度大小(%)				
	10	30	50	70	80
传统中值滤波算法	174.7476	511.1665	2355.1182	7370.8551	10822.4698
极值中值滤波算法	47.7796	145.4223	321.3224	722.5079	1632.9315
自适应中值滤波算法	77.9844	140.9743	280.7116	667.6215	1314.2571
本文算法	57.4235	130.8610	277.0003	487.1585	722.9867

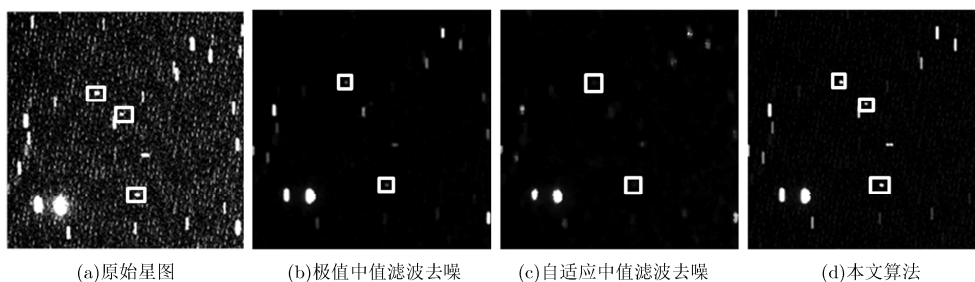


图 3 星图处理结果

算时间为 0.055 s。本试验时间测试使用传统方法实现,如使用快速方法^[14-16],则可达到实时处理效果。

5 结束语

椒盐噪声是影响星图成像质量的重要噪声类型之一,椒盐噪声的去除对后续星图目标识别等应用具有重要意义,由于星图本身的特点,传统的去噪方法并不适用于星图。为此,本文提出了一种基于能量函数的改进的极值中值滤波去噪算法。该方法不仅减小了椒盐噪声的误检和漏检概率,而且避免了传统去噪算法处理噪声时的简单替换的弊端。试验结果表明,改进算法适合处理信噪比低的图像,并且去噪效果与人类视觉系统的一致性较好,在提高图像对比度的同时,有效地保留了图像的纹理细节信息,为下一步星图处理打下基础。除椒盐噪声外,星图还受其他类型噪声的影响,如高斯噪声,传统图像去噪方法并不适合星图处理,如何去除复合类型的噪声需要进一步的研究。

参考文献

- [1] NIKOLOVA M. A variational approach to remove outliers and impulse noise[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Version*, 2004, 20(1/2): 99-120. doi: 10.1023/B:JMIV.0000011326.88682.e5.
- [2] 魏伟,刘恩海. 红外星图预处理及星点定位精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 991-996. doi: 10.3969/j.issn.1007-2276.2014.03.057.
- [3] 杨卓东,张欣,张涛,等. 改进自适应中值滤波的图像去噪[J]. *通信技术*, 2015, 48(11): 1257-1260. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2015.11.010.
- [4] 周玲芳,陈菲. 基于斜率差值的自适应图像椒盐噪声滤波算法[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(4): 695-700. doi: 10.3788/YJYXS20153004.0695.

- ZHOU Lingfang and CHEN Fei. Adaptive slope difference algorithm for filtering salt and pepper noise in image[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 695-700. doi: 10.3788/YJYXS.20153004.0695.
- [5] 黄存令, 段锦, 祝勇, 等. 一种改进的极值中值滤波算法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(3/4): 141-143. doi: 10.3969/j.issn.1672-9870.2013.03.042.
- HUANG Cunling, DUAN Jin, ZHU Yong, *et al.* An improved extremum and median filtering algorithm[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(3/4): 141-143. doi: 10.3969/j.issn.1672-9870.2013.03.042.
- [6] 王红梅, 李言俊, 张科. 基于极值检测的图像滤波算法[J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1117-1119. doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2007.10.026.
- WANG Hongmei, LI Yanjun, and ZHANG Ke. An image filter algorithm based on extremum detection[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(10): 1117-1119. doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2007.10.026.
- [7] 王益艳, 王珉. 基于2级噪声检测的改进中值滤波算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(11): 2841-2843. doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2008.11.029.
- WANG Yiyan and WANG Xuan. Improved median filter algorithm based on two-stage noise detection[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29(11): 2841-2843. doi: 10.16208/j.issn 1000-7024.2008.11.029.
- [8] CHAN R H, HO C W, and NIKOLOVA M. Convergence of Newton's method for a minimization problem in impulsenoise removal[J]. *Journal of Computational Mathematics*, 2004, 22(2): 168-177.
- [9] 钟涛, 张建国, 左俊彦. 一种改进的中值滤波算法及其应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 505-510. doi: 10.7540/j.ynu.20140432.
- ZHONG Tao, ZHANG Jianguo, and ZUO Junyan. An improvement median filter algorithm and its application[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Science Edition)*, 2015, 37(4): 505-510. doi: 10.7540/j.ynu.20140432.
- [10] 王晓凯, 李锋. 改进的自适应中值滤波[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(3): 175-176. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.03.053.
- WANG Xiaokai and LI Feng. Improved adaptive median filtering[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(3): 175-176. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.03.053.
- [11] 王明佳, 张旭光, 韩广良, 等. 自适应权值滤波消除图像椒盐噪声的方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 779-783. doi: 10.3321/j.issn:1004-924X.2007.05.026.
- WANG Mingjia, ZHANG Xuguang, HAN Guangliang, *et al.* Elimination of impulse noise by auto-adapted weight filter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(5): 779-783. doi: 10.3321/j.issn:1004-924X.2007.05.026.
- [12] 李阳, 张欣, 张涛, 等. 一种保留图像边缘的自适应中值滤波器算法[J]. 通信技术, 2015, 48(12): 1367-1371. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2015.12.010.
- LI Yang, ZHANG Xin, ZHANG Tao, *et al.* An adaptive median filter algorithm for preserving image edges[J]. *Communications Technology*, 2015, 48(12): 1367-1371. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2015.12.010.
- [13] CHAN R H, HO C W, and NIKOLOVA M. Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(10): 1479-1485. doi: 10.1109/TIP.2005.852196.
- [14] PERREAULT S and HÉBERT P. Median filtering in constant time[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(9): 2389-2394. doi: 10.1109/TIP.2007.902329.
- [15] YANG Qingxiong, AHUJA N, and TAN K H. Constant time median and bilateral filtering[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 112(3): 307-318. doi: 10.1007/s11263-014-0764-y.
- [16] ZHAO Hanli, GAO Dandan, WANG Ming, *et al.* Real-time edge-aware weighted median filtering on the GPU[J]. *Computers & Graphics*, 2016, 61: 11-18. doi: 10.1016/j.cag.2016.09.003.
- [17] 牛秀琴. 几种改进的中值滤波算法研究[D]. [硕士论文], 四川师范大学, 2009: 13-19.
- NIU Xiuqin. Research on several improved median filter algorithms[D]. [Master dissertation], Sichuan Normal University, 2009: 13-19.
- [18] 杨文波, 马天玮, 刘剑. 非局部变分修复法去除高密度椒盐噪声[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 876-884. doi: 10.3788/CO.20130606.0876.
- YANG Wenbo, MA Tianwei, and LIU Jian. Elimination of impulse noise by non-local variation inpainting method[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 876-884. doi: 10.3788/CO.20130606.0876.
- 王 敏: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为复杂背景下的空间目标自动识别、图像处理.
- 赵金宇: 男, 1976年生, 研究员, 研究生导师, 主要从事地基空间目标探测设备软件设备、图像采集等方面的研究.
- 陈 涛: 男, 1965年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密跟踪测量技术的研究.
- 崔博川: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为图像处理.
- 高 扬: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为天文导航.