

利用数学形态学算子方法处理无快门相机的拖尾图像*

孙荣煜^{1,2,3†} 赵长印^{1,2} 平一鼎^{1,2}
熊建宁^{1,2} 张 晨^{1,2,3}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 使用全帧转移 CCD 相机观测空间目标往往拆除快门, 从而产生拖尾, 严重影响了目标的探测和定位. 基于星像与拖尾几何形态的不同, 使用数学形态学方法处理拖尾图像. 通过比较拖尾处理前后图像中恒星的定位精度和空间目标的定位精度, 验证形态学方法可以有效消除天文图像中的拖尾, 显著提高拖尾图像中恒星与动目标的探测率及定位精度. 结果表明数学形态学方法是一种有效的去除拖尾的方法.

关键词 航天器, 技术: 图像处理

中图分类号: P 123; **文献标识码:** A

1 引言

空间目标观测需要很高的帧频, 频繁的开合极易损坏机械快门, 使得系统维护不便. 因此, 空间目标观测时往往需要拆除机械快门, 从而导致实测 CCD 图像产生严重的拖尾. 拖尾是全帧 CCD 转移电荷信号时的一种噪声, 其形成原因是在 CCD 的非积分时间内, 拍摄对象仍处于露光状态并产生了电荷^[1]. 拖尾降低了图像质量, 增加了虚警概率, 给空间目标的识别和定位带来了额外的难度, 在后续的图像处理工作中应当予以消除.

数学形态学建立在集合论的基础之上^[2], 其本质在于使用一定形态的结构元素度量并提取图像中对应的几何形状, 达到分析和识别图像的目的. 本文分析天文 CCD 图像中拖尾形成的原因, 介绍数学形态学的基本原理, 利用图像中拖尾与星像几何形态的不同, 基于数学形态学方法处理了图像中的拖尾, 并对星像做定位, 比较图像处理前后, 恒星及空间目标的定位精度与信噪比. 结果表明形态学方法提高了拖尾图像中星像的探测率, 定位精度及信噪比, 从而验证了形态学方法处理拖尾图像的有效性.

2011-8-17 收到原稿, 2011-10-10 收到修改稿

* 国家自然科学基金重点项目 (11033009) 资助

† rysun@pmo.ac.cn

2 基本原理

2.1 CCD 拖尾产生原因

全帧 CCD 传感器主要由感光区和水平移位寄存器组成。曝光时光敏像元不断累积电荷，曝光结束后，转移脉冲使光敏像元上的电荷逐行进入水平移位寄存器，直至一幅完整图像的电荷全部被转移出感光区。进入水平移位器的电荷信号在脉冲作用下依次移出并由后续电路读出。由于电荷转移效率达不到百分之百，CCD 相机每次曝光之前都要进行擦除操作。擦除的过程可认为是在转移脉冲的作用下，感光阵列的最上面一行移至最下面一行，每移动一次，就擦除一行。

由于相机不使用快门，在光电荷转移和擦除过程中，光敏像元便处于感光状态，如果某一行存在亮目标，在曝光电荷转移过程中，亮目标会在该行沿电荷转移相反的方向产生拖尾，在相机擦除操作时，同理产生与电荷转移方向相同的拖尾。在空间目标观测中，由于视场中恒星的运动速度较慢，产生一条自上而下的完整拖尾，而对于运动速度较快的空间目标，则产生倾斜的拖尾，如图 1 所示。

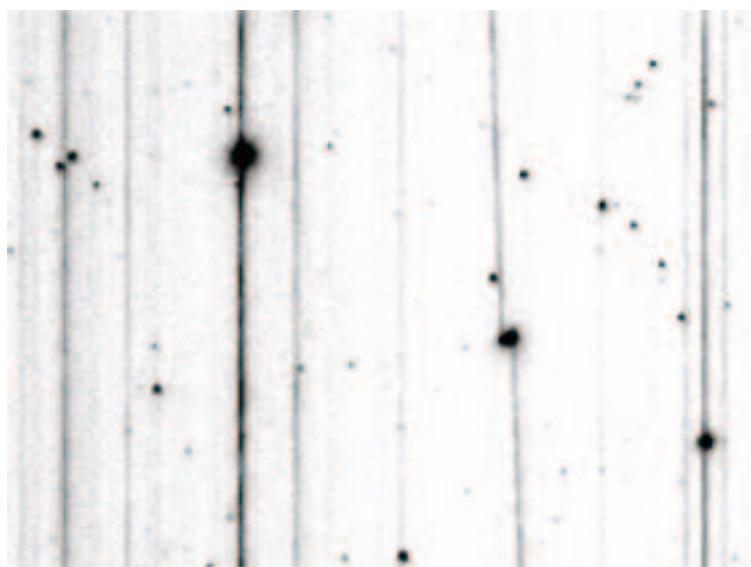


图 1 天文拖尾图像

Fig.1 Astronomical image with smear

2.2 数学形态学方法介绍

数学形态学方法的处理过程是空间域内一种以结构元素为模板的二维卷积运算。结构元素是图像中组成一定几何形状的像元的集合，具有固定的中心，其形状视不同的处理目的而定。在具体图像处理时，将结构元素的中心遍历图像中的每个像元，并对结构元素中心对应的像元作相关运算。运算过程包含膨胀、腐蚀、开、闭 4 个基本的代数运

算子, 膨胀与腐蚀算子定义式如下:

$$\begin{aligned} D^{SE}(f(x)) &= \max\{f(x+y) : y \in SE\} \\ E^{SE}(f(x)) &= \min\{f(x+y) : y \in SE\} \end{aligned} \quad (1)$$

膨胀运算 (简称为 D 算子) 相当于一个极大值滤波器. 在给定的结构体 SE 内, 将待处理像元的值取为结构体内所有像元值的最大值. 其扩展了图像中的亮区域, 消除了暗细节. 腐蚀运算 (简称为 E 算子) 等效于一个极小值滤波器, 将待处理像元值取为结构体内所有像元值的最小值, 扩展了图像中暗区域, 消除了突出的亮峰. 图 2 为以相邻的两个像元组成的结构元素, 对一维图像 $f(x)$ 做 D 运算与 E 运算的示意图.

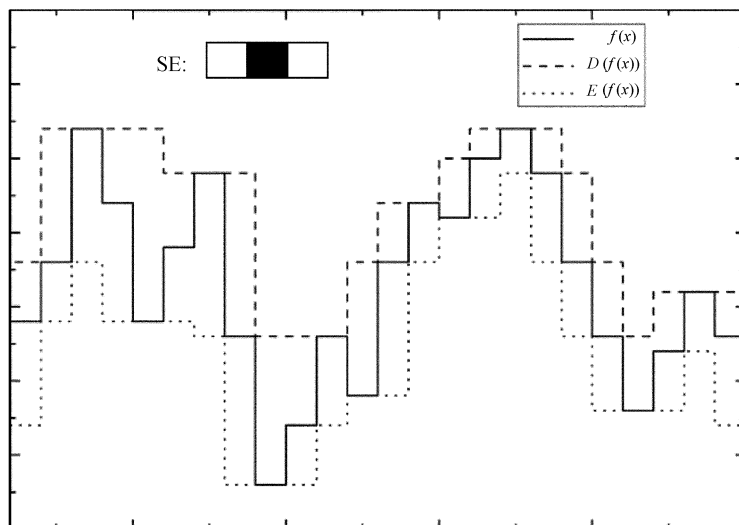


图 2 一维图像 $f(x)$ 膨胀与腐蚀运算示意图

Fig. 2 Illustration of dilation and erosion for one dimensional signal

基于膨胀与腐蚀算子, 开闭算子的定义如下:

$$\begin{aligned} O^{SE}(f(x)) &= D^{SE}(E^{SE}(f(x))) \\ C^{SE}(f(x)) &= E^{SE}(D^{SE}(f(x))) \end{aligned} \quad (2)$$

开算子 (简称为 O 算子) 处理图像 $f(x)$ 时, 先对图像做腐蚀运算, 后做膨胀运算. 开算子可以平滑图像, 抑制信号峰值噪声, 消除图像中与结构元素相比尺寸较小的亮细节, 保留与结构元素几何特征类似的信号; 闭算子 (简称为 C 算子) 则先对图像做膨胀运算, 后做腐蚀运算, 可以有效抑制图像的波谷噪声, 填平小沟结构, 消除尺寸小于结构元素的暗细节.

2.3 处理拖尾的原理

天文图像中, 根据产生拖尾的星像亮度不同, 拖尾呈粗细不一的长条形状. 对于单通道读出的全帧 CCD 图像, 拖尾是一条横贯图像的亮条; 而观测图像中的星像成点状,

与拖尾存在几何形态上的差异. 鉴于这种情况, 可以利用数学形态学思想, 使用一定的结构元素对图像做空间域的卷积, 除去图像中的长条形状, 保留点状结构, 从而实现拖尾的去除.

定义 TopHat 变换 [3]:

$$TH^{SE}(f(x)) = f(x) - O^{SE}(f(x)). \quad (3)$$

TopHat 变换先用结构元素 SE 对图像 $f(x)$ 做开运算, 随后用原图减去开运算后的图像. TopHat 变换相当于一种非线性高通滤波器 [4], 使用单一的结构元素做变换, 开运算后的图像中只含有与结构元素类似的几何信息, 而其余几何信息都会被消除, 再用原图减去开运算后的图像, 最终图像便只含有与结构元素形态不同的几何信息. 因此, 通过合适的结构元素对图像进行开操作, 可以滤掉图像中星像的信息, 保留拖尾的信号, 再用原图减去开运算后的图像, 便可得到只含有目标信息及一些孤立的噪声点的图像.

为了抑制变换后图像中的孤立噪声点, 使用 Spread TopHat 变换 [5]:

$$STP^{SE}(f(x)) = f(x) - O^{SE}(C^{SE}(f(x))). \quad (4)$$

STP 变换先对图像 $f(x)$ 做闭运算, 再做开运算, 随后用原图减去形态学算子处理后的图像. 与 TopHat 方法类似, Spread TopHat 方法也是期望将拖尾包含进形态学算子处理后的图像中, 通过与原始图像相减, 分离出目标的星像信息.

具体实验时, 选取合适的结构元素, 使用 TopHat 方法和 Spread TopHat 方法分别处理图像. 消除图像中呈长条形状的信号, 保留点状结构的星像信息, 便能实现拖尾的去除.

3 处理方法

3.1 结构体的选取

结构元素的选择对形态学方法的计算结果有很大影响 [6], 不同的结构元素得到的结果也不尽相同. 大尺寸的结构元素去除噪声能力强, 但容易丢失星像边缘的信息, 而且过大的尺寸容易使处理后的星像边缘混叠; 小尺寸的结构元素去除噪声能力弱, 能保持星像的边缘信息, 但过小的尺寸也会使得星像边缘连续性差.

针对 TopHat 变换, 为了尽可能的保留开运算后图像中的拖尾信息, 应使结构元素的几何形状与拖尾的形态符合良好. 考虑到实验处理的所有图像中, 拖尾呈沿图像列方向的长条形状, 因此, 选取沿图像列方向的矩形结构元素. 为了拟合拖尾的几何形状, 减少变换后图像中残留的噪声点, 节省计算时间, 选取结构元素宽度为 1 像素; 考虑到空间目标观测设备的图像比例尺较大, 实验图像中星像直径一般不大于 7 像素, 可认为图像中拖尾信号为长度大于 7 像素的矩形结构的集合, 而星像中不存在类似结构. 因此, 选定结构元素长度为 7 像素, 开运算后, 图像中所有 7×1 像素的矩形形状会保留, 点状结构被消去. 即如 (5) 式所示, 针对 x 行 y 列的图像 $f(x, y)$, 结构元素为 7×1 像素大小, 沿图像列方向.

$$SE = \{f(x+3, y), f(x+2, y), f(x+1, y), f(x, y), f(x-1, y), f(x-2, y), f(x-3, y)\}. \quad (5)$$

针对 Spread TopHat 变换, 开运算与闭运算时分别使用不同的矩形结构元素 SE1 与 SE2, SE2 尺寸过大不仅会使邻近的星像相连, 而且不利于运算速度的加快, 因此选取 SE2 为 3×1 像元, 沿图像列方向. SE1 结构体用于消除闭运算后图像中的点状星像, 保留矩形拖尾结构. 考虑到闭运算后星像会略微扩展, 因此, 处理时选取 SE1 尺寸为 9×1 像元, 沿图像列方向, 如 (6) 式所示:

$$\begin{aligned} SE1 &= \{f(x+4, y), f(x+3, y), f(x+2, y), f(x+1, y), f(x, y), \\ &\quad f(x-1, y), f(x-2, y), f(x-3, y), f(x-4, y)\}, \\ SE2 &= \{f(x+1, y), f(x, y), f(x-1, y)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 图像处理与定位精度分析

针对原始图像及处理后的图像, 使用 SExtractor 软件扫描星像¹, 获得相关信息. 分析恒星的定位精度时, 使用逆向匹配法找到图像中的背景恒星, 并计算 J2000.0 平历元下的赤道坐标, 与 Tycho 星表比对. 在具体处理时, 针对单颗恒星, 使用除该恒星以外所有匹配的背景星计算 20 底片常数^[7], 再用该底片常数计算恒星的赤道坐标, 通过统计同一幅图像中多颗背景恒星位置的残差, 分析经处理后恒星定位精度的提升. 研究空间目标的定位精度时, 通过观测轨道预报精度最高的激光星, 将其星历外推至观测时刻, 在图像邻域内匹配目标. 然后计算相应的赤道坐标, 并与外推星历对比得出残差. 激光星的外推星历精度为 m 级, 满足本文工作的精度要求.

为了考察经形态学运算后, 星像信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 的提升程度, 采用图像学的信噪比公式计算. 具体公式如下:

$$SNR = \frac{S - B}{\sigma}. \quad (7)$$

其中 S 为目标的均值, B 为背景的均值, σ 为背景的标准方差.

4 试验结果

4.1 针对背景恒星处理结果

采用上述方法, 对多台设备采集的 400 多幅带有拖尾的天文观测图像进行处理. 图像的相关数据如表 1 所示:

表 1 图像信息

Table 1 Information of image

Parameter	Value
Size	1024×1024
Field of view	$7^\circ \times 7^\circ$
Spatial sampling	24.6 arcsec
Exposure time	200 millisecond
CCD operating mode	Full frame

原图与处理后的图像如图 3 所示.

¹Bertin E. SExtractor v2.5 User's manual.

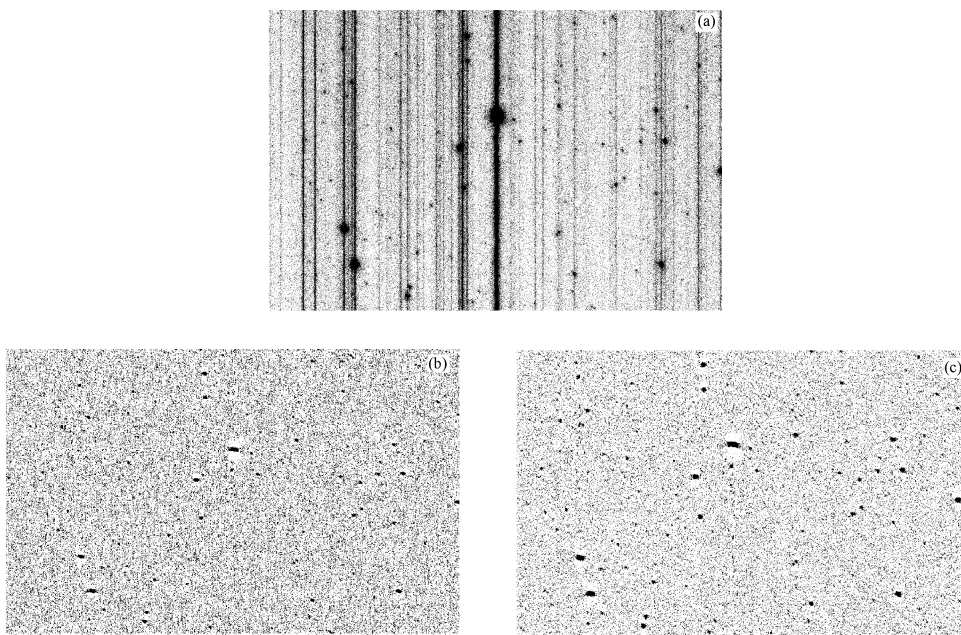


图 3 实验图像. (a) 原始图像, (b) TopHat 方法处理结果, (c) Spread TopHat 方法处理结果

Fig. 3 Images for test. (a) Original image, (b) Transformed by TopHat, (c) Transformed by Spread TopHat

选取单个恒星, 形态学方法处理前后星像的等高图如图 4 所示.

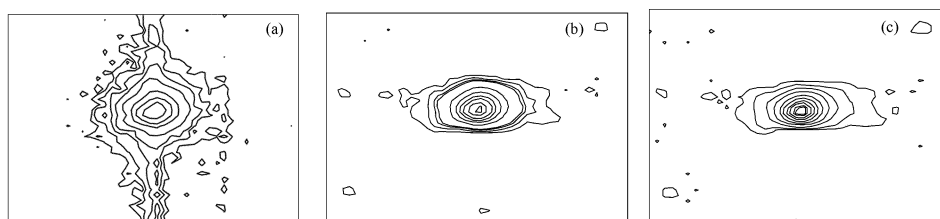


图 4 星像的等高图. (a) 原始星像, (b) TopHat 方法处理结果, (c) Spread TopHat 方法处理结果

Fig. 4 Contour plot of images. (a) Original image. (b) Transformed by TopHat. (c) Transformed by Spread TopHat

从图 3~4 中不难发现, 形态学方法较好的消除了观测图像中恒星的拖尾, 显著改善了图像质量, 还原了因拖尾而扭曲的星像, 大幅减少了虚警数量, 从而降低了恒星和空间目标的识别难度, 有利于提高星像的定位精度. 形态学方法只对单帧图像处理, 不需要更多的先验信息, 对图像背景的适应能力强, 运算速度快.

在对经不同形态学方法处理的图像天文定位过程中, 匹配的背景恒星数目如图 5 所示.

对原图做定位时, 受拖尾的影响, 匹配的背景恒星数目最少. 经形态学方法处理后, 匹

配的恒星数目明显提升. 经 TopHat 方法处理的图像匹配恒星数目最多, Spread TopHat 方法处理的图像其次, 均优于原图.

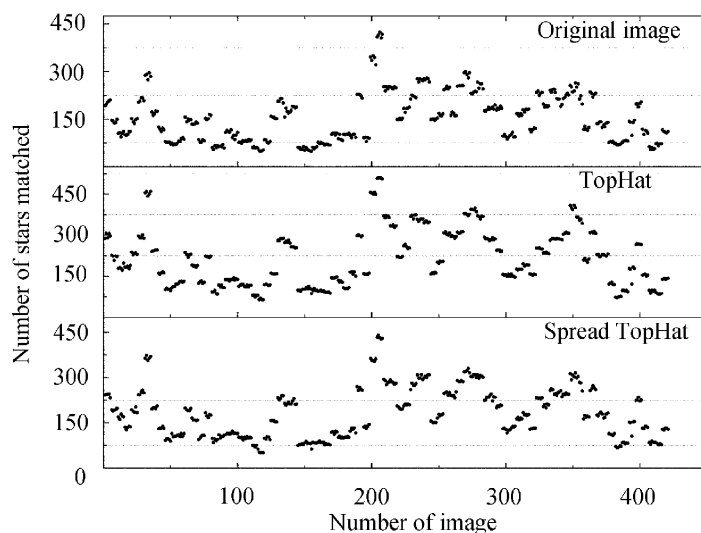


图 5 天文定位匹配背景恒星数目

Fig. 5 Background stars matched in astronomical orientation

针对所有图像, 计算处理前后每张图像中背景恒星的赤道坐标误差, 包括赤经 (RA)、赤纬 (Dec) 并做统计平均, 结果如图 6 所示.

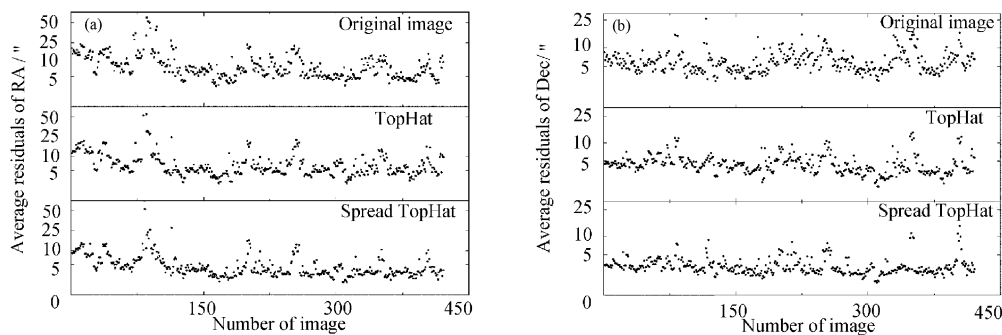


图 6 恒星的位置误差. (a) 赤经, (b) 赤纬

Fig. 6 Residuals of position of stars. (a) RA, (b) Dec

经处理的图像中, 背景恒星赤道坐标精度提升的幅度如图 7 所示.

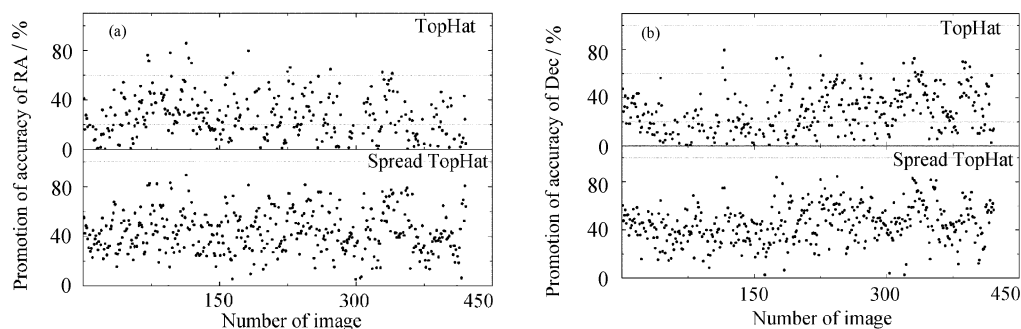


图 7 恒星定位精度的提升. (a) 赤经, (b) 赤纬

Fig. 7 Promotion of position accuracy of stars. (a)RA, (b) Dec

结果显示, Spread TopHat 方法对于背景恒星的赤道坐标精度的提升幅度在 50% 左右, 而 TopHat 方法的提升幅度在 25% 左右. 运用形态学方法能提高图像中恒星的定位精度, Spread TopHat 方法优于 TopHat 方法. 形态学方法的处理结果与恒星在图像中的位置无关. 恒星定位精度的提高, 使得底片常数的精度也相应提升, 从而提高了空间移动目标的定位精度.

不同方法处理后恒星的平均信噪比及平均信噪比提升幅度如图 8 所示.

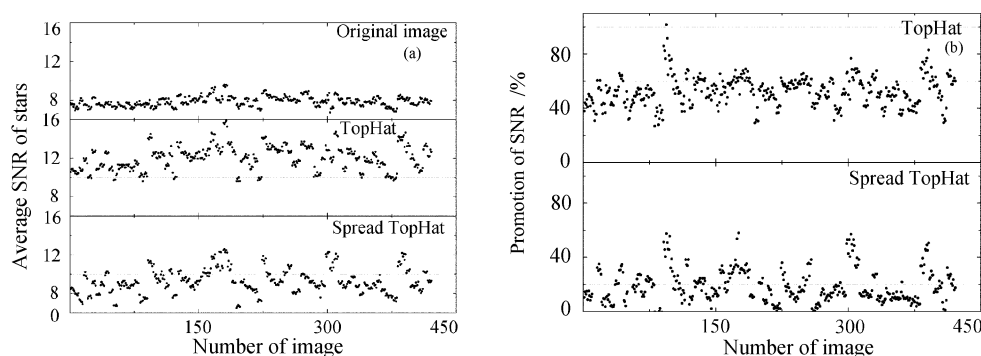


图 8 恒星的信噪比与信噪比提升幅度. (a) 信噪比, (b) 信噪比的提升幅度

Fig. 8 Average SNR and SNR promotion of stars. (a)SNR, (b)Promotion of SNR

结果显示, 形态学方法有效的提高了图像中恒星的信噪比. 运用 TopHat 方法, 信噪比的提升幅度平均在 50% 左右. Spread TopHat 方法对于信噪比的提升不如 TopHat 方法, 提升幅度在 10% 左右. 两种形态学方法都提高了图像中恒星的信噪比, 但初始信噪比小的恒星的最高提高幅度优于初始信噪比大的恒星. 形态学方法提高恒星定位精度的幅度相对原始星像的信噪比成均匀分布, 无特别明显趋势.

使用形态学方法提高了图像中恒星的识别率, 增加了天文定位中背景恒星的匹配数目, 提高了图像中背景恒星的定位精度. 对于恒星星像信噪比的提升 TopHat 方法优于 Spread TopHat 方法, 但 Spread TopHat 方法更好的构造了星像轮廓, 提高了星像的采样率, 因此对于背景恒星定位精度的提升, Spread TopHat 方法优于 TopHat 方法, 平均可

达 50% 左右.

4.2 针对空间目标的处理结果

拖尾对空间目标探测的影响主要有两种,一是目标亮度较大,使得 CCD 图像上直接形成倾斜的拖尾;另一种是空间目标的像与恒星的拖尾混叠. 两种情况下拖尾都对目标探测识别带来困难,降低了目标的定位精度. 目标星像的倾斜拖尾处理后的等高图如图 9 所示,与恒星混叠的空间目标星像处理结果如图 10 所示. 不难发现,形态学方法有效去除了空间目标的拖尾,处理后的星像有利于目标的识别与定位.

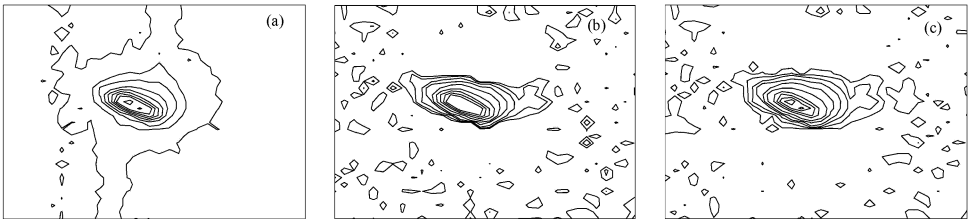


图 9 星像的等高图. (a) 原始星像, (b) TopHat 方法处理结果, (c) Spread TopHat 方法处理结果
Fig.9 Contour plot of images. (a) Original image, (b) Transformed by TopHat, (c)Transformed by Spread TopHat



图 10 星像的等高图. (a) 原始星像, (b) TopHat 方法处理结果, (c) Spread TopHat 方法处理结果
Fig.10 Contour plot of images. (a) Original image, (b) Transformed by TopHat. (c) Transformed by Spread TopHat

选取受拖尾影响严重的激光星数据,处理全弧段观测图像,结果如表 2, 表 3 所示,其中前两个目标自身存在拖尾,第 3 个目标存在较多星像与恒星拖尾混叠的情况.

表 2 目标的探测数和平均信噪比

Table 2 Detections and average SNR of objects

Original results			TopHat		Spread TopHat	
ID	Detection	Average SNR	Detection	Average SNR	Detection	Average SNR
1	24	8.19	57	34.41	57	30.43
2	2	7.47	14	34.50	16	34.28
3	10	9.25	22	36.67	21	34.63

表 3 目标的定位精度 (单位: ")

Table 3 Position accuracy of objects (Unit: ")

ID	Original results		TopHat		Spread TopHat	
	Residuals of RA	Residuals of Dec	Residuals of RA	Residuals of Dec	Residuals of RA	Residuals of Dec
1	22.8	24.3	7.4	6.4	6.5	4.9
2	17.9	5.2	4.3	5.6	2.6	4.3
3	17.6	19.5	14.7	18.2	14.9	18.0

结果显示, 对于自身产生拖尾的空间目标, 处理后目标的信噪比提升了约 4 倍, 探测数大幅增加, 定位精度也显著提高. 目标 1 经不同方法处理, 整个弧段的定位残差如图 11 所示. 对于自身不存在拖尾, 但星像与恒星拖尾混叠严重的空间目标, 形态学方法既能保证定位精度, 又能提高目标的信噪比, 提升目标的探测率, 基本消除了恒星拖尾与目标星像混叠带来的影响. 针对空间移动目标, 两种形态学方法处理效果相似, 不同方法处理后目标的定位精度与信噪比相差不大.

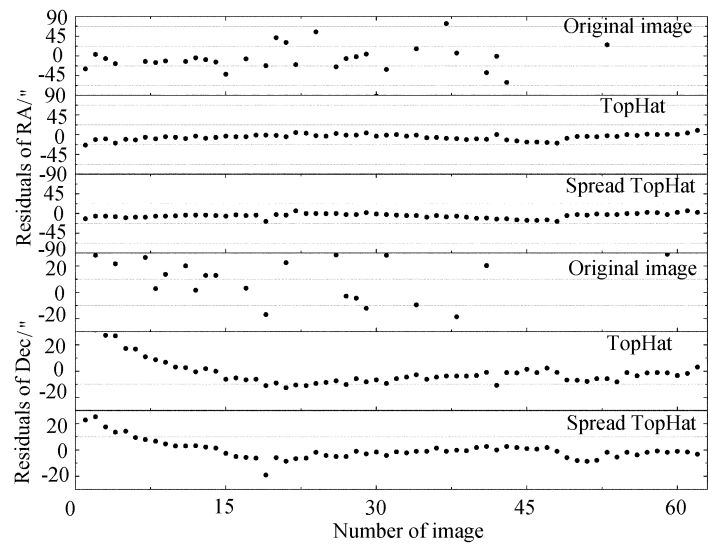


图 11 目标全弧段的位置残差

Fig. 11 Residuals of positions of object in all the observation arc

对于不受拖尾影响的激光星数据, 从处理结果表 4~5 不难发现, 处理前后目标的探测数与定位精度相差不大, 但处理后目标的信噪比大幅提高. 对于不带拖尾的空间目标, 两种形态学方法处理效果相差不大.

表 4 目标的探测数和平均信噪比

Table 4 Number of detections and average SNR of objects

Original results			TopHat		Spread TopHat	
ID	Detection	Average SNR	Detection	Average SNR	Detection	Average SNR
1	10	11.06	12	28.33	12	26.18
2	4	15.66	4	21.62	4	22.07

表 5 目标的定位精度 (单位: ")

Table 5 Position accuracy of objects (Unit: ")

Original results			TopHat		Spread TopHat	
ID	Residuals of RA	Residuals of Dec	Residuals of RA	Residuals of Dec	Residuals of RA	Residuals of Dec
1	21.2	22.6	22.7	15.4	13.7	17.7
2	12.2	20.7	10.2	15.8	9.5	16.8

形态学处理方法提高了空间目标的信噪比,可以大幅提高目标的定位精度和探测率,有效解决了空间目标探测受拖尾的影响.

5 结论

在空间目标的天文观测中不使用机械快门,从而导致 CCD 图像上拖尾严重,大幅度降低了图像质量,使图像背景变得复杂,增加了目标探测识别的难度. 本文使用数学形态学算子,处理观测图像中的拖尾,比较处理前后图像中背景恒星与空间目标的定位精度. 试验表明,形态学方法能较好的消除图像中背景恒星的拖尾,提高图像质量,降低虚警率,提高了拖尾恒星与空间目标的信噪比及探测率. 最终提升了背景恒星与空间目标的定位精度. 利用形态学方法处理拖尾在实际工作中具有一定的应用价值.

参 考 文 献

[1] 黄宗福,王宏义,韩建涛,等. 信号处理, 2010, 24: 607

[2] 刘海波,沈晶,郭耸,等. Visual C++ 数字图像处理技术详解. 北京: 机械工业出版社, 2010: 245-260

[3] Matheron G, Serra J. Proceedings of VIth International Symposium on Mathematical Morphology, 2002, pp: 1-16

[4] 董文娟,王宏义,黄宗福,等. 信号处理, 2009, 25: 807

[5] Van Droogenbroeck M, Buckley M J. Math. Imaging Vis, 2005, 22: 121

[6] Laas-Bourez M, Blanchet G, Boer M, et al. AdSpR, 2009, 44: 1270

[7] 冒蔚,季凯帆,李彬华,等. CCD 天体测量学. 昆明: 云南科技出版社, 2003: 85-143

Using Operators of Morphological Mathematic for Processing Smeared Image of Camera without Shutter

SUN Rong-yu^{1,2,3} ZHAO Chang-yin^{1,2} PING Yi-ding^{1,2} XIONG Jian-ning^{1,2}

ZHANG Chen^{1,2,3}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(3 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT In observations of space objects, the shutter of camera is often removed and hence the smear noise is ineluctable. Smear noise brings in difficulties on target detection and location calculation, so it must be handled properly. Based on the differences of geometry between stars and smear noise, two operators (TopHat and Spread TopHat) of morphological mathematic are presented to resolve this problem. They're sufficiently flexible to be applied. Tests carried out indicate that smear noise can be removed effectively, and detection rate of objects and stars is improved distinctly. Through the compare of position accuracy of stars and objects, it's demonstrated that both two operators work with a high degree of location precision, and Spread TopHat has a better performance when dealing with stars. At last, the efficiency of methods is proved.

Key words space vehicles, technique: image processing