

基于小区域滤波的快速星图弱小目标分割算法

奚晓梁, 周晓东, 张 健

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 时间序列帧星图图像中弱小目标的检测是天基监视地球同步轨道卫星需要解决的关键技术之一, 星图中的背景杂波抑制与小目标分割对运动目标的检测与精确测量是至关重要的。针对这一问题, 提出了一种基于小区域滤波的快速星图弱小目标分割算法。首先采用最小二乘拟合方法得到高斯背景均值和标准差; 然后利用小区域滤波抑制背景杂波; 最后利用固定阈值滤除灰度过小像素点。实验结果表明, 该算法能够较好地保持恒星和运动目标的边缘, 为恒星和运动目标的快速定位奠定了基础。

关键词: 天基监视; 弱小目标分割; 小区域滤波; 背景杂波抑制

中图分类号: V 557.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.01.08

Rapid segmentation algorithm based on small domain filter for small star map targets

XI Xiao-liang, ZHOU Xiao-dong, ZHANG Jian

(Control Engineering Department, Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The detection of small targets in time sequence of orbit star images is a critical problem encountered in the space-based surveillance for geosynchronous earth orbit satellites. The background clutter suppression and the small targets segmentation are significant for the detection and metric parameter estimation of moving targets. To solve this problem, a rapid segmentation algorithm based on small domain filter for small star map targets is proposed. Firstly, the mean and standard deviation of the Gauss background is gotten by adopting the least-square fitting method. Then, a small domain filter is used to suppress the background clutter. Finally, the low pixel gray values are removed through a constant threshold. Simulation results show that the proposed algorithm can keep the total edges of stars and moving targets and is the foundation of the quick tracking of targets.

Keywords: space-based surveillance; small target segmentation; small domain filter; background clutter suppression

0 引言

对天基光学空间地球同步静止轨道 (geosynchronous earth orbit, GEO) 目标的精确探测和跟踪, 通常是根据观测平台的指向读数和星象质心在图像中的坐标位置来完成恒星的匹配及 GEO 目标定轨。与通过星敏感器的星图处理来获取高精度质心坐标以确定航天器姿态的方法所不同, 对 GEO 目标的星图处理不但要求获得具有高精度的星象质心, 而且还需要对弱小运动目标完成检测与识别。

星图的分割是指将天基平台观测图像中的星斑从背景中剥离出来, 这些星斑包括恒星与运动目标两类。由于分

割中出现的误差会传播至高层次处理阶段, 这些处理阶段包括了 GEO 目标的检测和跟踪, 并且 GEO 目标质心精度影响定轨精度。因此, 分割的精确程度是至关重要的。定轨精度依赖于分割精度, 对定轨精度的评估是通过对已知运行轨道的 GEO 目标观测来进行。

目前, 星图预处理主要集中在以下几个方面: ① 去除由高亮恒星产生的 Smear 效应, 由于 Smear 效应对后续目标检测和跟踪以及星点质心计算都有极大的影响, 所以必须去除, 方法有利用恒星成像的频域各向同性和傅里叶变换的自配准性质进行检测^[1-2]、统计与中值滤波的方法^[3]; ② 校正多块 CCD 拼接产生不均匀背景^[4], 不均匀背景对背景估计有较大影响, 主要方法有同态滤波算法^[5-6]、

收稿日期: 2011-03-08; 修回日期: 2011-09-28。

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2010AA8091402D) 资助课题

作者简介: 奚晓梁 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为精确制导智能化、扩频通信。E-mail: xlxi2007yt@163.com

top-hat 变换法^[7];③ 去除星空 CCD 相机“热点”噪声^[4],主要的方法以序列图像统计为主^[4];④ 分析深空背景统计特性,如基于高斯拟合法等^[8];⑤ 增强弱小目标,如基于最优的 Gamma 变换等^[4]。但上述预处理法都是以去除噪声和增强目标为目的的。

目前尚未见到图像处理分割算法对质心精度影响的相关文献,例如,文献[9]讨论了提取星点质心亚像素对定位精度的影响,但并未涉及图像处理算法与质心精度的联系。本文提出了一种自适应多种曝光时间保持星象边缘的小区域分割算法,较好地抑制了背景杂波,同时保持了目标和恒星边缘,不但保证了质心和定轨精度,而且也为后续的跟踪前检测和检测前跟踪算法降低虚警率、提高跟踪精度有十分重要的意义。

1 星象质心定位方法

如果恒星或运动目标在像素点上成像,则其指向精度取决于单个 CCD 像元的角分辨率,单个像元的角分辨率为^[10]

$$\delta = \frac{\theta}{N} \quad (1)$$

式中, θ 为相机视场角(field of view, FOV); N 为 CCD 一行或一列像元数。

本文中拍摄星图所用 CCD 相机视场角为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,像元阵列为 $1\,024 \times 1\,024$ 。根据式(1)计算得出单个像素对应 $0.002\,4^\circ$,对指向精度要求 $2''$ (恒星)和 $5''$ (GEO 目标)而言,换算到图像质心坐标精度为 0.56 像素和 0.22 像素。

目前,常用的质心定位算法并没有形成统一的理论共识。国内外大量研究都集中在采用新的亚像元细分算法来提高星点坐标提取精度^[8,11],一般分为基于灰度和基于边缘两大类。基于灰度的方法有质心法、改进的质心法、曲面(高斯)拟合^[12-13]等。基于边缘的方法有边缘圆拟合、Hough 变换等^[11]。这些算法都是在数值计算的层面去分析如何有效地利用更多的像元灰度信息去提高星点坐标精度,其根本是套用了一个假设的数学模型。所以,无论这个数学模型如何,从图像处理的层面讲,星象的边缘对质心精度保证是至关重要的,精确边缘相当于更多可利用的灰度信息。

当前天文定位常用的质心定位方法是修正二阶矩质心法,表示为

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_x \sum_y x f_T(x, y)}{\sum_x \sum_y f_T(x, y)} \\ y_c = \frac{\sum_x \sum_y y f_T(x, y)}{\sum_x \sum_y f_T(x, y)} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_T(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - T, & f(x, y) \geq T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_c 和 y_c 为质心点坐标; x 和 y 为当前像素点坐标; $f(x, y)$ 为像素灰度值; T 为估计背景均值。

2 4 档曝光时间图像分析

本文主要从统计幅度直方图来分析图像,直方图相当

于一个概率密度函数(probability density function, PDF),用以揭示样本的分析规律。图 1 给出 4 档曝光时间的星图及其灰度直方图,可以看出 4 档曝光时间典型星图直方图呈一个高斯分布,表明图像噪声的主要来源是 CCD 相机系统的热噪声。采用曲线拟合的方式能够很好地估计出图像背景的噪声分布参数,在 3.2 节中推导了满足弱小目标分割标准差倍数的求取方法。

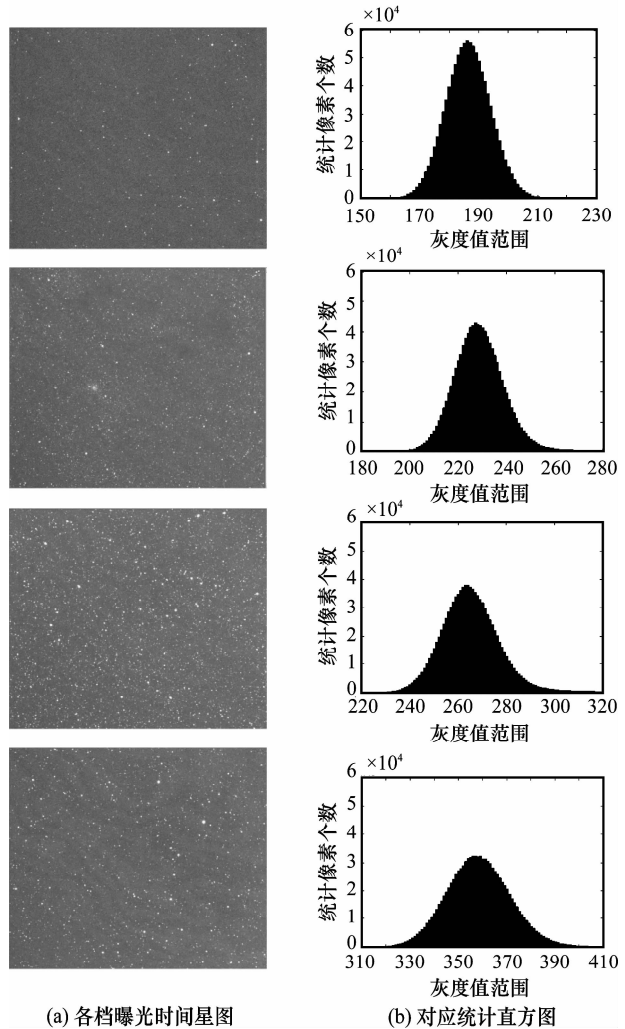


图 1 典型星图及直方图

实际拍摄的 4 组图像,帧数分别为 352、217、281、302,图像大小为 $1\,024 \times 1\,024$,灰度表示范围为 $0 \sim 65\,535$ 。在缺乏先验信息的情况下,目前运动的弱小点状目标必须通过序列图像才能检测。

由图 1 可见,4 档曝光时间图像的平均灰度和整体标准差依次增大,但都呈高斯分布。另外,各档曝光时间单帧图像所包含恒星的数量相差非常大,分别为 450 颗、2 900 颗、2 100 颗、2 100 颗。说明曝光时间越长,图像中所包含的恒星数量也越多。

典型恒星和弱小目标的能量分布如图 2 所示。

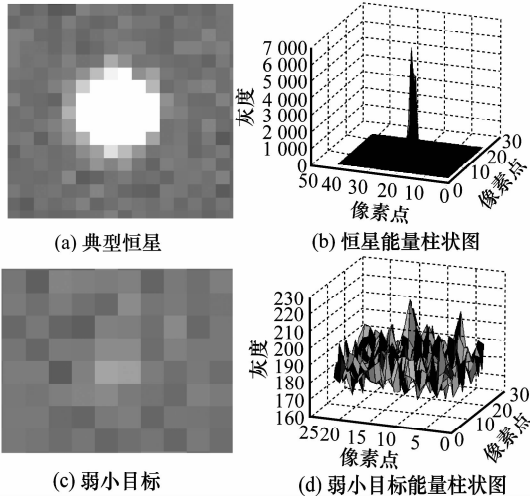


图 2 恒星和弱小目标

图 2(a) 是一个典型的恒星图,最高灰度接近 7 000;图 2(b) 的中心区域显示的是一个弱小目标,大小为 4 个像素,最高灰度为 208,计算得到信噪比为 2.67 dB。其中,信噪比计算式为

$$R = \frac{T - B}{\sigma} \quad (4)$$

式中, T 为目标均值; B 为邻域背景均值; σ 为邻域背景标准差,此处邻域取目标质心区域外扩 10 个像素(不包含目标本身)。

对图像的统计分析可以得知:通过背景估计,选择合适的阈值能够分割出包括弱小目标在内的所有恒星和目标。为保证弱小目标提取,过小的阈值必会引入大量的虚假恒星和目标噪声点。本文提出的小区域滤波算法兼顾以上两个方面,在保证弱小目标提取的同时又能够抑制背景噪声。

3 基于小区域滤波的星图分割算法

通常 CCD 内部噪声可以认为是加性噪声,其分布符合均值为 μ , 标准差为 σ 的高斯分布。根据概率论知识,高斯分布在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 之间的概率为 99.7%, 在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 之间的概率为 95%, 在 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 之间的概率为 69%。因此,工程上通常利用阈值 $\mu + 3\sigma$ 滤掉大部分的背景噪声。但是这样滤除背景杂波的方法,也将图 2 中的弱小目标直接滤掉了,而且也不能保持恒星和目标星象边缘, $\mu + 3\sigma$ 必定滤除了部分弥散区域。

直接利用阈值分割会产生 3 个问题:① 产生大量的虚假星点;② 星象边缘无法保持,对小目标的定位精度有严重影响;③ 直接滤掉了弱小目标。本文提出的小区域滤波算法可以有效克服以上缺点。

3.1 最小二乘拟合估计背景的均值和方差

从对图像统计结果得出单像素的灰度分布是非常广的(150~50 000),像素符合高斯分布,部分恒星像素灰度非常高。故背景杂波均值和方差估计最小二乘拟合方法步骤如下^[4]:

- 步骤 1 计算整图均值 μ_0 和标准差 σ_0 。
- 步骤 2 根据对大量图像的分析,设定最大标准差变化范围 $k=100$ 。
- 步骤 3 计算最小二乘意义下的拟合误差 E 。
- 步骤 4 剔除野点。赋值 $\mu_1 = \mu_0, \sigma_1 = \sigma_0$; 统计灰度介于 $(\mu_1 - 3\sigma_1, \mu_1 + 3\sigma_1)$ 之间的像素均值 μ_0 和标准差 σ_0 。

- 步骤 5 如果 σ_1 与 σ_0 之差大于 k , 跳转到步骤 3。
- 步骤 6 k 自减 1, 如果 k 大于 1, 跳转到步骤 2。
- 步骤 7 找出拟合误差 E 最小时的 μ_{\min} 和 σ_{\min} 。

此时得到的均值 μ_{\min} 和标准差 σ_{\min} 即为背景杂波的最小二乘拟合参数。该方法的流程如图 3 所示。对于图 1 所示星空图,运用该方法可计算得到 $\mu_{\min} = 181.99, \sigma_{\min} = 7.746$ 。

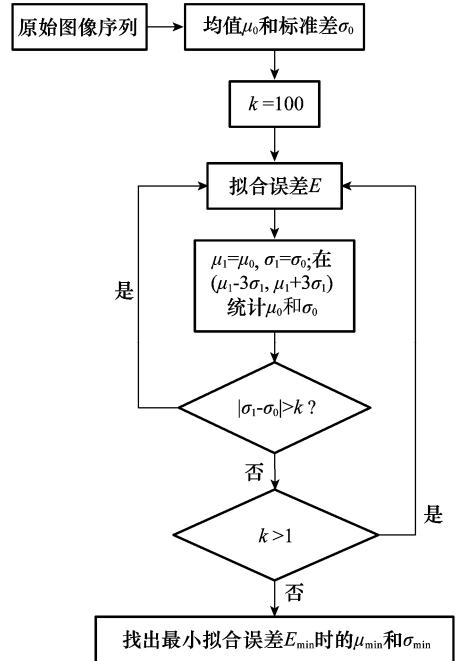


图 3 背景杂波参数最小二乘估计流程图

通过上述方法,估计曝光时间分别为 300 ms、700 ms、1 100 ms、1 600 ms 时共 1 152 帧图像背景噪声的均值和标准差等统计信息如图 4 和表 1 所示。

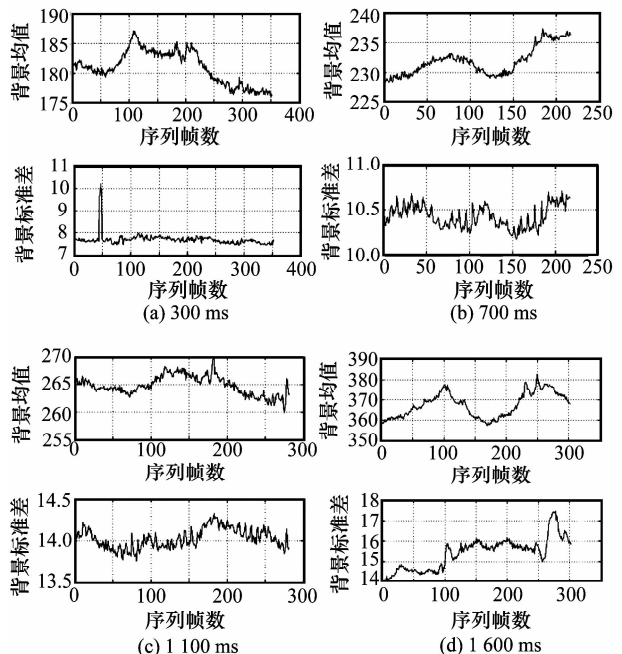


图 4 不同曝光时间背景噪声均值和标准差统计曲线

表 1 背景噪声均值和标准差信息统计

曝光时间 /ms	帧数	最大背 景均值	最小背 景均值	最大 标准差
300	352	187.132	175.943	10.182
700	217	228.115	237.360	10.716
1 100	281	269.625	259.822	14.332
1 600	302	382.4 960	357.406	17.486

统计结果表明,除 300 ms 和 1 600 ms 曝光时间估计背景噪声标准差有一些较大的波动之外,其余相对稳定。产生较大波动的原因是由于图像内容发生了变化,一种情况是图像中观测到高亮的低轨或近地飞行目标,由于观测距离很近,目标像素数在 200 以上,平均灰度达 10 000;另一种情况是 CCD 相机视场剧烈变化,星象产生严重拉线现象。

对灰度直方图进行最小二乘拟合的结果如图 5 所示。

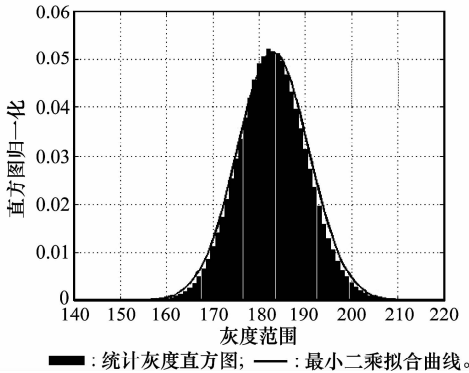


图 5 最小二乘拟合结果

3.2 小区域滤波背景抑制

背景分割时,如果阈值过小会留下大量的噪声和过大的星象边缘;如果阈值过大势必会滤掉弱小目标,且星象边缘没有完整保持,从而影响定位精度。如果在直接阈值分割基础上,结合其他的滤波方式,如滤掉联通区域小于某个阈值的孤立点,也是不合适的。虽然会滤掉大部分孤立的噪声点,但很难保证尺寸小于该阈值的小目标不被滤掉。

如果再考虑采用其他的滤波方式(中值滤波、均值滤波、低通滤波、小波降噪)^[3-4,14]来进行处理,效果也不理想。

小区域滤波算法示意图如图 6 所示。

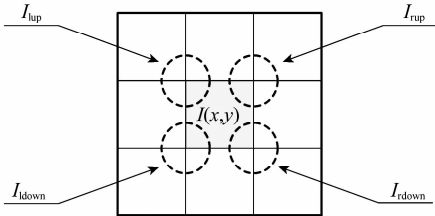


图 6 小区域滤波示意图

为了消除噪声的影响,图像中当前像素点值保留的条件必须满足以下条件:

$$I = \begin{cases} I(x,y), & I_{lup} \geq T \mid I_{rup} \geq T \mid I_{ldown} \geq T \mid I_{rdown} \geq T \\ \mu, & I_{lup} < T \& I_{rup} < T \& I_{ldown} < T \& I_{rdown} < T \end{cases} \quad (5)$$

式中, I 和 $I(x,y)$ 表示当前像素点值, I_{lup} 、 I_{rup} 、 I_{ldown} 和 I_{rdown} 分别表示该当前像素点 $I(x,y)$ 相邻大小为 2×2 的左上、右上、左下、右下 4 个邻域均值,表示为

$$\begin{cases} I_{lup} = (I(x-1,y-1) + I(x,y-1) + \\ I(x-1,y) + I(x,y))/4 \\ I_{rup} = (I(x,y-1) + I(x+1,y-1) + \\ I(x+1,y) + I(x,y))/4 \\ I_{ldown} = (I(x-1,y) + I(x,y) + \\ I(x-1,y+1) + I(x,y+1))/4 \\ I_{rdown} = (I(x,y) + I(x+1,y) + \\ I(x,y+1) + I(x+1,y+1))/4 \end{cases} \quad (6)$$

背景噪声阈值表示为

$$T = \mu + n\sigma \quad (7)$$

式中, μ 和 σ 为最小二乘拟合估计背景均值和标准差; n 为标准差倍数。

式(5)的含义为:如果 4 邻域均值中有一个大于 T ,那么保留该像素点灰度值,否则将像素值置为背景均值。

为满足弱小目标检测,必须选择合适的 n ,其计算方法为

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\mu}^{\mu+n\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \geq N_0/N \quad (8)$$

式中, N_0 为统计得到图像中大于最弱目标灰度值的个数; N 为图像总像素数; μ 和 σ 分别表示拟合估计背景均值和标准差。

从统计数据来看,1 100 ms 曝光时间图像中星点最多,大约 2 100 颗左右,按照每个星象平均 15 个像素计算,所有像素约为 $2\ 100 \times 15 = 31\ 500$;根据式(7)得出 $n=2$,满足使用要求。

另一种方法是通过相机工作参数来计算 n 值。假设相机能探测亮度高于 13 等星的星体,那么根据式(4)能够直接求得阈值 T 。这种方法能够推导出了分割阈值下限。但有一定的局限性,必须得到相机的工作参数。由于工作环境的特殊性,相机工作参数会出现偏差,因此不宜采用此方法。

3 种分割方法的结果对比如图 7 所示,可以看出,恒星星象和弱小目标边缘都得到保持,且没有改变星象内部灰度值。如果星象边缘还存在过小的像素值,那么只需再做一次阈值滤掉即可。

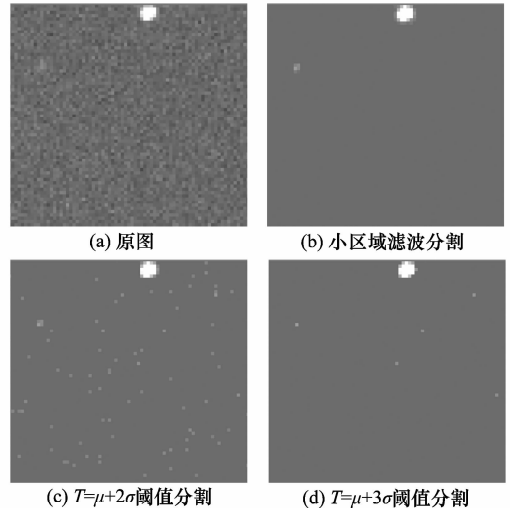


图 7 3 种分割方法结果对比

图 8 表示连续 3 帧图像弱小目标的滤波结果,可以看出信噪比为 2.67 dB 的弱小目标得到了较好的提取, $T = \mu + 2\sigma$ 和 $T = \mu + 3\sigma$ 阈值分割无法分割出目标。

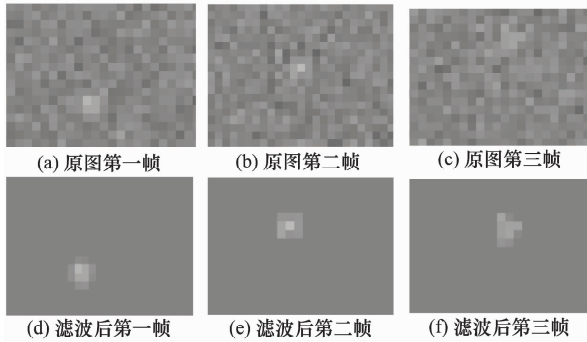


图 8 连续 3 帧图像弱小目标分割结果

4 实验结果与分析

从图 7 的对比结果可以看出,本文算法很好地抑制了背景噪声,为后续检测跟踪奠定了基础。

本文利用获取的 4 组共 1 152 帧图像对基于小区域滤波算法的定位精度进行验证,算法耗时如表 2 所示,可以看出,该算法具有很好的实时性,能够满足工程化使用要求。

表 2 小区域滤波算法耗时

曝光时间/ms	帧数	每帧平均耗时/s
300	352	0.522
700	217	0.031
1 100	281	0.032
1 600	302	0.033

表 3 列出了部分恒星定位精度评估结果,可以看出,每帧图像恒星的定位精度均在 1"左右。表 4 列出了曝光时间为 300 ms 时单帧 GEO 目标定轨精度的评估结果。图 9 给出了 4 档曝光时间 GEO 目标定轨精度的评估结果,可以看出,赤经和赤纬方向各档曝光时刻都存在少量的野值,这主要是由运动目标与恒星交汇引起的,剔除这些野值属于轨迹关联研究的范围,也是下一步研究的内容之一。表 5 列出了 4 档曝光时间运动目标赤经和赤纬精度信息统计结果,并与美国天基可见光监视卫星在轨道运动目标检测中的分割算法^[15]进行了对比,结果表明赤经和赤纬指向误差均值提高了 1"以上,满足了工程指标要求。

表 5 赤经和赤纬精度评估结果统计对比

曝光时间/ms	本文分割算法				文献[15]的分割算法			
	赤经指向误差均值/(")	赤经指向误差方差	赤纬指向误差均值/(")	赤纬指向误差方差	赤经指向误差均值/(")	赤经指向误差方差	赤纬指向误差均值/(")	赤纬指向误差方差
300	-1.73	0.99	-1.21	2.98	-3.14	2.01	-3.51	3.14
700	-2.08	1.33	-0.80	2.00	-3.32	2.78	-2.82	2.46
1 100	-1.53	1.52	-1.00	1.34	1.34	3.02	-3.05	2.47
1 600	-1.74	1.64	-1.45	0.70	4.45	2.56	1.78	4.13

5 结束语

本文针对空间目标图像高精度定位任务的要求,提出一种基于小区域滤波的分割算法,该算法在高斯分布灰度直方图的星图预处理中具有一定通用性。

表 3 部分恒星质位精度评估结果

序列帧	匹配恒星数	精度/(")
1	12	0.717
2	12	0.826
3	12	1.084
4	12	1.201
⋮	⋮	⋮

表 4 GEO 目标定轨精度评估结果

横坐标	纵坐标	赤经精度/(")	赤纬精度/(")
1 021.304	575.849	-3.1	-1.5
1 016.091	575.744	-2.9	-1.9
1 010.965	575.708	-4.6	-1.7
1 005.841	575.756	-2.3	-2.1
1 000.828	575.649	-2.8	-2.9
995.770	575.716	-2.3	-1.2
⋮	⋮	⋮	⋮

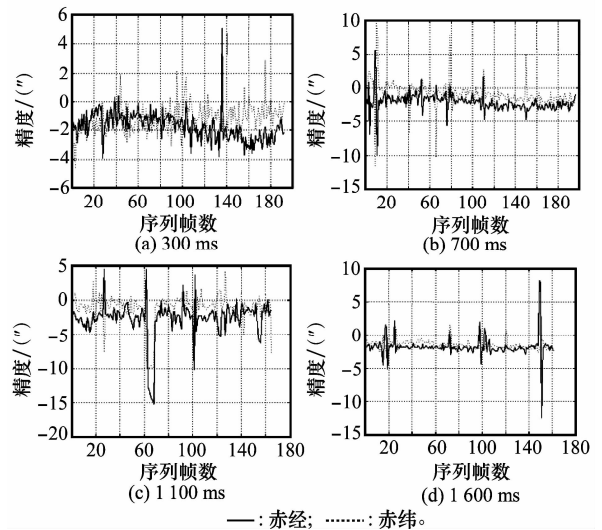


图 9 GEO 质心精度评估结果曲线

(1) 该算法克服了传统算法中背景抑制和弱小目标提取的矛盾,能够很好地保持星象边缘,是后续多目标检测和精确定位的基础。

(2) 通过对 4 组 1 152 帧真实拍摄图像质心定位精度进行的评估表明,小区域滤波预处理算法是行之有效的,能

够使恒星定位精度优于 $2''$, GEO 目标定轨精度优于 $3''$ 。

(3) 本文的分割算法满足工程运用的实时性要求,与后续的跟踪前检测算法配合,能完成星空图像 GEO 目标快速检测。

参考文献:

- [1] 常兴华,江桥.星图中亮线的自动检测算法[J].光电技术应用,2009,24(4):41-43.(Chang X H, Jiang Q. Automatic detection algorithm of bright line in star-sky image[J]. *Electronic-optic Technology Application*,2009,24(4):41-43.)
- [2] 张广军,魏国新.一种改进的三角形星图识别方法[J].航空学报,2006,27(6):1150-1154.(Zhang G J, Wei G X. Star map identification based on a modified triangle algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*,2006,27(6):1150-1154.)
- [3] 王春歆.空间监视图像多目标检测算法研究[D].烟台:海军航空工程学院,2009.(Wang C X. Research on multi-target detection algorithm for space surveillance images[D]. Yantai: Navy Aeronautical and Astronautical University,2009.)
- [4] 张春华.星空背景图像弱小目标运动检测技术研究[D].烟台:海军航空工程学院,2009.(Zhang C H. Research on dim target detection in star-sky images[D]. Yantai: Navy Aeronautical and Astronautical University,2009.)
- [5] 孙济祥.数字图像处理[M].河北:河北教育出版社,1993:156-158.(Sun J X. *Digital images processing*[M]. Hebei: Hebei Education Press,1993:156-158.)
- [6] 赵剡,张怡.星图识别质心提取算法研究[J].空间电子技术,2004,1(4):5-8.(Zhao Y, Zhang Y. Research on centroid extraction algorithms of star images[J]. *Space Electronic Technology*,2004,1(4):5-8.)
- [7] 陈维真,张春华,周晓东.基于局部直方图高斯拟合的星图背景性质研究[J].红外技术,2008,30(4):230-233.(Chen W Z, Zhang C H, Zhou X D. Study of star-sky image background characteristics based on local-histogram Gaussian fitting method[J]. *Infrared Technology*,2008,30(4):230-233.)
- [8] Rafael C. *Gonzalez digital image processing using Matlab*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2008:278-282.
- [9] 杨君,张涛.星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J].光学精密工程,2010,18(4):1002-1009.(Yang J, Zhang T. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. *Optics and Precision Engineering*,2010,18(4):1002-1009.)
- [10] Liebe C C. Star trackers for attitude determination[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*,1995,10(6):10-16.
- [11] Shorts M R, Clarke T A, Short T. A comparison of some techniques for the sub-pixel location of discrete target images[J]. *Proceeding of SPIE*,1994,2350:230-250.
- [12] Wei X G, Zhang G J, Jian G J. Subdivided locating method of star image for starsensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2003,29(9):812-815.
- [13] Rufino G, Accardo D. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement[J]. *Acta Astronautica*,2003,53(3):135-147.
- [14] MÍtre H. *Le traitement des images*[M]. Lavoisier: Hermes Science Publication,2002.
- [15] Chu P L. Efficient detection of samall moving objects[R]. Lexington: MIT Lincoln Laboratory,1989:24-28.