文章编号:1001-5078(2017)07-0889-07 ·图像与信号处理·

采用最大背景估计的星敏感器图像处理方法

余路伟[1,2],毛晓楠[1,2],周 琦[1,2],金 荷[1,2],胡雄超[1,2],朱 虹[1],张 晴[3]
(1. 上海航天控制技术研究所,上海 200233;2. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心,上海 200233;
3. 上海应用技术大学计算机科学与信息工程学院,上海 201418)

摘 要:星图处理是星敏感器运行的基础,而杂光干扰是影响星敏感器图像处理的主要因素之一,是算法设计需要重点考虑的干扰源。为消除杂光干扰的影响,通过分析星图中目标及背景的特征,根据星点二维高斯分布模型构造了权值参考函数,改进了最大化背景估计模型,设计了欧几里德四象限旋转对称的掩模,辅以图像分割、去噪,构成采用最大背景估计的星敏感器图像处理算法。另外采用了星点提取率、虚警率、极限探测星等、单星定位精度和仿真时序综合评价星图处理算法性能。实验证明该图像处理算法星点提取率高、虚警率低、单星定位精度高、抗杂光干扰性能优异且具有通用性。

关键词:光学测量;星点背景估计;最大化背景模型;星图处理;抗杂光;星敏感器
中图分类号:W488.22 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.07.020

Image processing of star sensor based on maximum background estimation

YU Lu-wei[1,2],MAO Xiao-nan[1,2],ZHOU Qi[1,2],JIN He[1,2],HU Xiong-chao[1,2],
ZHU Hong[1],ZHANG Qing[3]
(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology,Shanghai 200233,China;
2. Research and Development Center of Infrared Detection Technology,CASC,Shanghai 200233,China;
3. School of Computer Science and Information Engineering,Shanghai Institute of Technology,Shanghai 201418,China)

Abstract: Stray light interference is one of the main effect factors for image process of star sensor. To eliminate the effect of stray light,features of targets and background in star image were analyzed. According to 2D-Gaussian distribution,a weight reference function was constructed,and maximum background estimation model was improved. A Euclid four-quadrant rotational symmetric mask was designed,combining with image segmentation and denoising,an image processing algorithm of star sensor based on maximum background estimation was proposed. A comprehensive method was adopted to evaluate the performance of the image process algorithm,including star detection ratio,false-alarm ratio,star detection limit magnitude,single star position accuracy and timing sequence. The experiment results prove that the proposed algorithm is effective and universal for star detection,also robust for stray light interference.

Key words:optical measurement;star background estimation;maximum model of background;star Image processing;stray light inhibition;star sensor

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61401281);上海市自然科学基金项目(No.14ZR1440700)资助。
作者简介:余路伟(1992-),男,硕士生,主要从事星敏感器图像处理研究工作。E-mail:helloylw@163.com
收稿日期:2016-11-01;**修订日期:**2016-11-30

1 引 言

星敏感器是目前精度最高的姿态敏感器,具有无累积误差、可靠性强等特点[1-3],是决定卫星能否在轨稳定运行的关键因素之一。

星敏感器主要技术指标[4-7]有精度、数据有效率、动态性能、强光抑制角等,这些指标的实现要求星图处理具有速度快、精度高、抗杂光等性能,具体可分解为星点提取率、虚警率、单星定位精度和实时性等指标。这些指标相互联系,相互制约,研究兼具上述性能的星图处理算法成为高性能星敏感器研制的关键问题之一。

弱小目标检测的方法按利用的图像帧数分为单帧处理[8]和多帧处理[9-10]。多帧处理一般信息交互量大、计算复杂,不利于提高算法实时性与产品的动态性能。单帧处理一般采取图像增强和图像分割两种途径[11]。图像增强常用方法有基于直方图的灰度增强、空域滤波、频域滤波等;图像分割则有边缘检测、阈值分割等。毛晓楠等[12]所提出的方法计算简单易实现,但抗杂光能力弱;Bernsen 算法[13]局部提取能力良好,但进行全帧处理时,对背景能量的估计失真严重,难以求得最优分割阈值;OTSU 算法计算量大,实时性不佳;徐军等[14-15]在背景估计的基础上提出了最大化背景模型,但针对星点提取需要改进。

针对星敏感器星点成像特征以及在轨面对的复杂工况,建立了星敏感器图像处理的星点背景估计参考模型,综合考虑实时性与工程可实现性,设计了星图处理的背景估计象限掩模,并在残差图像之上进行了目标分割及去噪处理,形成完整有效的背景估计星图处理方法,并基于星点提取率、虚警率、极限探测星等和单星定位精度综合评价了算法性能。

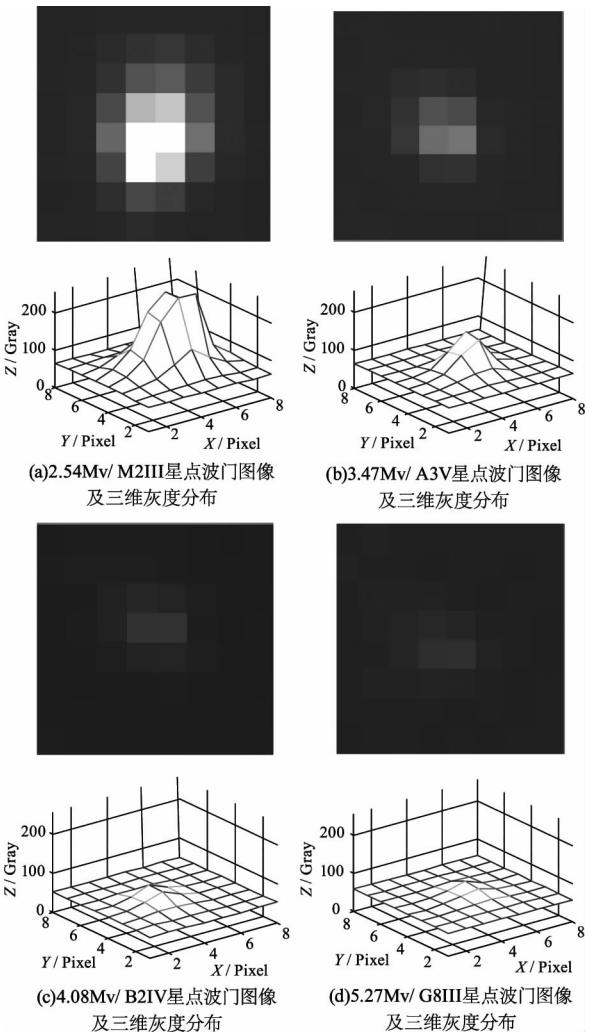
2 星图特征分析

2.1 星点特征

由于星点质心定位采用亚像元细分技术,故一般采用离焦的方法使星点弥散为近圆形的光斑。理想星点像斑的能量分布可用二维高斯分布近似[16],用式(1)表示:

$$E(x,y) = \frac{E_0}{2\pi\sigma^2}\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{1}$$

其中,$E(x,y)$ 表示像素点(x,y) 生成的光电子数,图像上表现为灰度;(x_0,y_0) 为星点质心坐标;E_0 为星点在探测器上产生的光电子总数;σ 为高斯半径,一般 $\sigma=0.8$。某 APS 星敏感器(通光孔径 40 mm,焦距 43.39 mm,积分时间 300 ms)外场观星拍摄的星点像斑、能量分布及对应的星等、光谱信息如图 1 所示,星等值大于 2 M_v 的星点能量分布均在 8×8 像素范围内。



(a)2.54Mv/ M2III星点波门图像及三维灰度分布
(b)3.47Mv/ A3V星点波门图像及三维灰度分布
(c)4.08Mv/ B2IV星点波门图像及三维灰度分布
(d)5.27Mv/ G8III星点波门图像及三维灰度分布

图 1 外场观星实测星斑

Fig. 1 Star spotfrom star Image got in real-sky experiment

2.2 背景特征

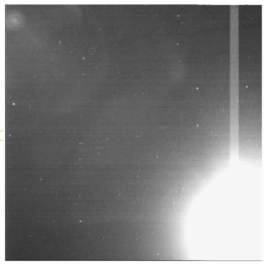
星图中目标与背景、噪声呈叠加关系,如式(2),三者相互独立,具有可分割性[17-18]。

$$G(x,y) = S(x,y) + B(x,y) + N(x,y) \tag{2}$$

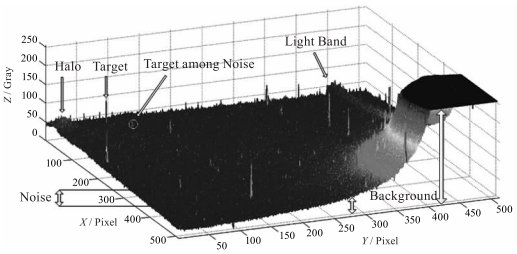
其中,$G(x,y)$ 为某点灰度值,$S(x,y)$ 为星点在该点处的灰度值,$B(x,y)$ 为该点背景灰度,$N(x,y)$ 为该点叠加的随机噪声。

图 2 表现了目标、背景、噪声三者间的关系。随着星敏感器噪声水平逐渐升高,弱小目标湮没于噪

声信号中,可辨识度下降,提取难度大大增加。当星敏感器受到杂光干扰时,背景能量分布的均匀性被破坏,严重影响星点目标提取。由 CCD 探测器的成像特点,杂光照射后可能在成像时生成光带或光环,容易产生大量虚警目标,影响星点目标提取与识别。



(a)月光干扰星图



(b)三维灰度分布

图 2　星图特征

Fig. 2 Star image feature

3　最大背景估计算法

3.1　传统背景估计

传统的背景估计先以目标像素点周围像素灰度值的线性组合估计图像背景,再将两者作差得到残差图像 I_t ,理想情况下残差图像中仅保留目标和少量高频噪声。

$$I_b(x,y) = \sum_{i=x-k}^{x+k}\sum_{j=y-k}^{y+k} W_{ij}I(i,j) \tag{3}$$

$$I_t = I - I_b \tag{4}$$

其中, $I_b(x,y)$ 为背景估计得到的某一像素背景值,构成图像背景 I_b;$I(i,j)$ 为原始图像 I 中 (x,y) 点邻域内坐标为 (i,j) 像素点灰度值;w_{ij} 为相应点的权值;k 为参考邻域半径。

3.2　最大背景估计

传统背景估计存在无法去除强边缘(如图 2(a)中光带)、抗噪性能差等问题。最大化背景模型[14]针对强边缘问题,提出利用目标点附近亮区域进行背景估计的思想,以目标像元为中心,将特定掩模覆盖到的区域分为欧几里德四个象限,如图 3 所示,选取区域估计最大值作为背景,这样一种有偏估计解决了传统背景估计在亮暗背景交界处估计不合理的问题。

$$B = \max(B_{ul}, B_{ur}, B_{ll}, B_{lr})$$

$$\begin{aligned} B_{ur}(x,y) &= \sum_{i=x}^{x-r}\sum_{j=y}^{y+r} W_{ij}I(i,j)B_{ul}(x,y) \\ &= \sum_{i=x}^{x-r}\sum_{j=y}^{y-r} W_{ij}I(i,j) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} B_{ll}(x,y) &= \sum_{i=x}^{x+r}\sum_{j=y}^{y-r} W_{ij}I(i,j)B_{lr}(x,y) \\ &= \sum_{i=x}^{x+r}\sum_{j=y}^{y+r} W_{ij}I(i,j) \end{aligned}$$

其中, B 为背景估计结果;B_{ur},B_{ul},B_l 分别为第一至第四象限区域估计结果;W 为权值。

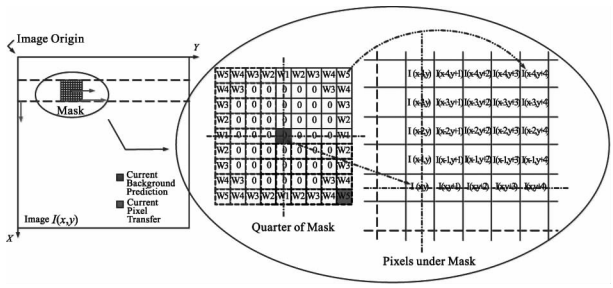


图 3　最大背景估计掩模

Fig. 3 Max background estimation mask

最大背景估计可以很好地解决受杂光干扰后形成的光斑、光带及亮环等问题,但同样带来了强背景削弱目标完整性的问题。由于星点质心定位对星点边缘的保留要求较高,即定位精度与边缘完整性成正比,故需要针对星点特征重新设计最大背景模型,其中掩模是关键。

由 2.1 节对星点高斯分布特征的分析,结合外场拍摄星图中典型星等值对应的能量分布图可知,对于星敏感器使用的 0 ~ 6.0 M_v 星,使用 8 × 8 像元的窗口即可包络其全部有效像元及周边的背景像元。考虑到在做背景估计时留有余量,兼顾计算的时间与存储开销,设定掩模尺寸为 9 × 9 像素。对于不同型号的星敏感器,掩模的尺寸需根据星点弥散斑的实际特点做适当调整。

对背景的估计,考虑避免受目标像素灰度影响,权值与距估计点距离应存在正比关系,设计星点背景估计参考模型为:

$$W(r) = \begin{cases} 0 & ,r \leqslant c \\ (r-c)/\sum W(r) & ,r > c \end{cases} \tag{6}$$

其中, $W(r)$ 为距估计点距离为 r 的像素点处的权值;c 为星斑半径。

以式(6)为基准,综合考虑对星点边缘的保留效果以及 FPGA 可实现性,设计第一象限掩模为 W_{ur},如式(7),其余象限掩模与其存在逆时针旋转对称关系,最大背景估计算法所用掩模及计算方法

见图 3。式(7)中靠近星点范围内权值置为 0,远离星点逐次升高。为便于工程实现,将各像元权值均取为整数值,且权值之和凑成 2 的整数次幂,以便于 FPGA 除法运算。

$$W_{ur} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} / 16 \tag{7}$$

3.3 星图分割与去噪

将原始星图与估计背景作差得到残差图像 I_r,即式(8),大量低频背景得以去除,包括缓慢变化的杂光污染。残差图像中剩余目标和噪声的高频部分,如式(9)。通过对星图全帧噪声水平评价,选取恰当阈值偏移量,去除高频噪声 N_h,如式(10),其中一般取阈值偏移量 $T=5$,分割后得到目标图像 I_t。在目标聚类环节,将像素总数仅一个或两个的目标簇舍弃,即可去除其中椒盐噪声导致的单像素、双像素虚假目标[3,12]。经分割、去噪,目标图像中基本仅剩余星点,即可完成星点提取,虚警率控制在可接受的范围内。

$$I_r = I - I_b \tag{8}$$

$$G(x,y) = S(x,y) + N_h(x,y) \tag{9}$$

$$I_t = I_r - T \tag{10}$$

3.4 算法实时性设计

本文算法依 FPGA 并行处理特点开发设计,采用 4 级流水线操作,如图 4 所示。象限背景估计、最大化背景计算、阈值分割和目标聚类分级处理,各模块间并行运行,极大提高了计算速度,满足星图处理实时性要求。

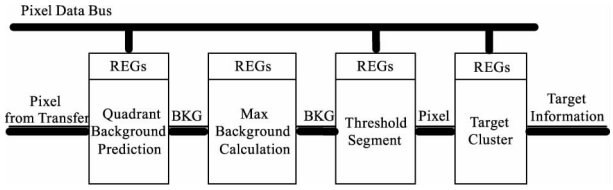


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

最大背景估计图像处理算法 FPGA 实现的四级流水任务调度方式见图 5,像素输出的时序驱动四级流水中各级计算任务,概要说明如下:

a) 像素转移与象限背景估计(Pixel Transfer and Quadrant Background Estimation):由本文 3.2 节给出的设计,每个像素点最多将参与 36 个掩模计算,因此,本级任务将设置 36 个并行的"乘法 - 加法"链,像素依次由探测器输出后,可并行输出 36 个掩模累加计算的分量;

b) 最大背景计算(Max Background Calculation):不考虑数字星图边缘的 4 行(或列),在每个像素输出后,即可完成以该像素对应掩模的(该像素位于掩模右下角)全部四个象限背景值的计算,通过 3 次比较,即可输出最大背景值;

c) 阈值分割(Threshold Segment):在得到最大背景值后,加上阈值偏移量 T,即得最终分割阈值,用其判断位于掩模中心的像素是否为背景点,当灰度值小于阈值时,该像素为背景点,不做处理,否则该像素可能属于星点,标记星点标识,计算对应的"灰度 - 坐标"加权乘积;

d) 目标聚类(Target Cluster):在阈值分割确定了可能属于星点的像素后,基于四连通域准则,进行星点像素的聚类及真伪星点判断[12]。

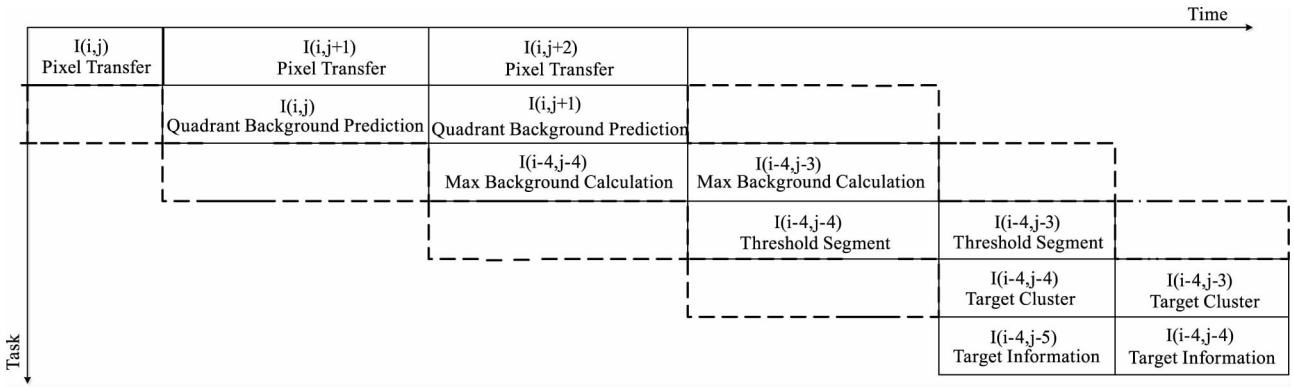


图 5 算法 4 级流水线

Fig. 5 4-stage assembly line for algorithm

4　算法仿真与分析

4.1　星图处理结果分析

在典型杂光干扰工况下，选用分块阈值法与本文设计的最大估计法相比较。分块阈值法已经历试验卫星四号等三个卫星型号共 5 台星敏感器的飞行试验，在轨飞行考核时间长达 5 年，在轨经历了杂光干扰、辐射噪声增大等多种工况，获得大量宝贵的飞行数据。该算法以 16 像素为步长对图像分块，每块分割阈值 $T = M_{block} + T_{offset}$，其中 M_{block} 为块均值，T_{offset} 为阈值偏移量，依据工程经验设置。

为便于识别，下列处理结果反向二值化，即背景为白色、目标为黑色。文中灰度量程为 0 - 255。如图 6(a)、(b)分别为在轨拍摄的受太阳光和月光干扰的星图，且星敏感器处于寿命中期，成像噪声水平偏大。(b)中受月光干扰存在高亮度的光带和光晕，为星图处理中最为复杂的工况之一。处理结果图中，正确提取星点、虚警点分别以五角星和方框标记。分块法处理结果由于虚警严重，未进行标记。统计数据如表 1 所示。

表 1　处理结果

Tab. 1 Process results

		分块阈值	本文方法
(a)组	阈值偏移量	9	5
	设计内提取率	57.69 %	71.15 %
	参考段提取率	1.73 %	5.20 %
	虚警率	17.78 %	6.15 %
	极限探测星等实测值	7.32	7.67
(b)组	阈值偏移量	10	5
	设计内提取率	72.41 %	86.21%
	参考段提取率	6.83 %	17.27 %
	虚警率	52.50 %	10.64 %
	极限探测星等实测值	7.51	8.36

注：设计内指[0,6.0]m_v，参考段指(6.0,8.0]m_v

由实验结果知：本方法相对分块阈值法提取率明显提高，虚警率大幅降低。其中弱星提取能力可由参考段提取率体现，(a)组中本文方法参考段提取率略高；(b)组中参考段提取率高出分块阈值法 10.44%。特别地，在(b)图右侧高亮光带的处理结果中，最大估计能有效抑制强边缘，如图 6(b2)。另外本文方法对复杂背景适应性好，在两种截然不同的杂光干扰背景下选取了相同的阈值偏移量 5，最终设计内提取率均在 70% 以上；分块阈值法对不同工况的兼顾能力较弱，面对杂光干扰时需调高阈值偏移量，但弱星提取能力会被削弱，且其虚警率高，不利于确保星敏感器在轨稳定可靠运行。

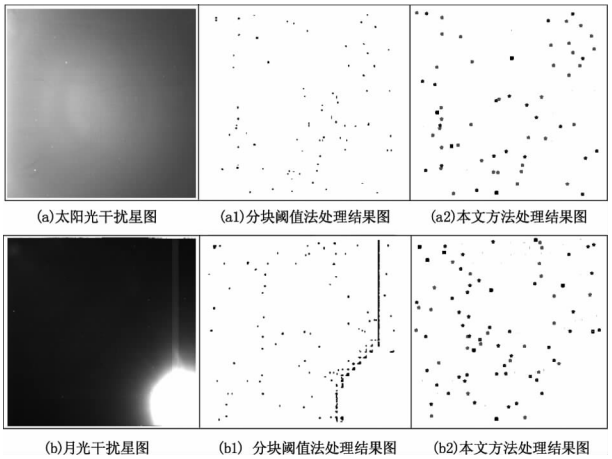


图 6　星图处理对比

Fig. 6 Contrast for star image process

4.2　算法单星定位精度与实时性分析

基于某 APS 星敏感器(视场 20°，分辨率 1024 × 1024 pix.)和静态星光模拟器对算法的单星定位精度[4-5]进行仿真验证。首先，将星敏感器与静态星光模拟器固联，连续拍摄星图，另与外场观星实际拍摄的月光干扰星图叠加，生成受杂光干扰星图。分别运用本方法和分块阈值法处理，并统计有无杂光两种工况下的单星定位误差，结果如表 2 所示。

表 2　算法单星定位精度

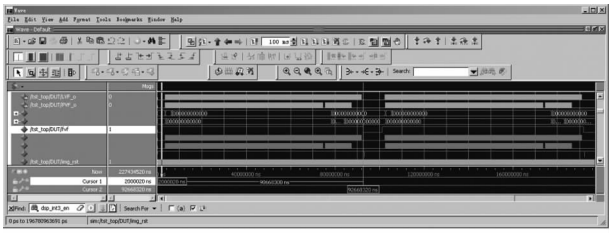
Tab. 2 Single star position accuracy for algorithms

	分块阈值法	本文算法
无杂光单星定位误差(3σ)/ Pixel	0.0287	0.0205
有杂光单星定位误差(3σ)/ Pixel	0.0302	0.0286

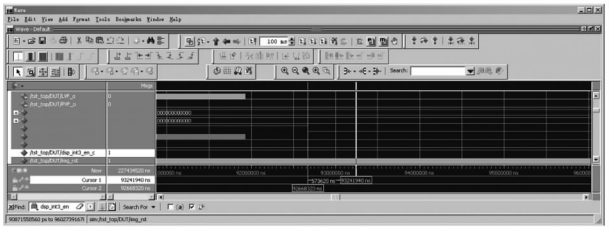
由统计结果可知，无论有无杂光干扰，本算法均可实现优于 1/30 pix. 的单星定位精度，且较分块阈值法有提升，可满足高精度星敏感器单星定位精度要求。

本文算法使用 VHDL 设计星点提取 IP 核，并用 modelsim 进行算法仿真。算法实时性可由以下仿真时序图说明，图 7(a)中显示了 2 个星敏感器周期，其中 *fvf*、*lvf*、*pvf* 分别为帧、行、像素有效信号，表示相应的转移时序，一帧图像转移需要约 90 ms；(b)中 dsp_int3_en_c 为图像处理完成的中断使能信号，

从帧转移结束至中断使能仅耗时 0.5 ms,满足实时性要求。



(a)两个星敏感器周期仿真时序



(b)一个星敏感器周期仿真时序

图 7 本文算法仿真时序

Fig. 7 Timing sequence of the method

5 结 论

本文针对星敏感器在轨面对的杂光干扰、图像噪声增大等问题,提出了基于最大背景估计的图像处理算法。首先基于星图中目标与背景的特征,建立了权值函数参考模型;利用最大化背景估计思想,兼顾杂散光滤除与完整保留星点有效像素的应用要求,设计了适用于星敏感器图像处理的四象限旋转对称掩模;为满足实时性要求,设计了基于 FPGA 的四级流水处理框架。采用星点提取率、虚警率、极限探测星等、单星定位精度和仿真时序综合评价星图处理算法性能。基于在轨、外场观星和静态恒星模拟器拍摄的星图完成了算法验证,结果表明本文提出的算法提取率高,虚警率低,单星定位精度高,抗杂光性能优异,且具有良好的通用性,为提升星敏感器数据有效率以及姿态稳定性奠定基础。

参考文献:

[1] ZHOU Qi, MAO Xiaonan, ZHANG Qing, et al. A image processing algorithm with marker for high-speed and multi-channel star sensor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(10): 119 – 124. (in Chinese)
周琦,毛晓楠,张晴,等. 采用标记的高速多通道星敏感器图像处理算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(10):119 – 124.

[2] Carl Christian Liebe. Accuracy performance of star trackers-A tutorial[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 2002, 38(2). 587 – 599.

[3] GUAN Fengwei. Typical work states analysis on thermal design of the sun-synchronous orbit star sensors[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1482 – 1487. (in Chinese)
关奉伟. 太阳同步轨道星敏感器热设计典型工况确定[J]. 激光与红外,2015,45(12):1482 – 1487.

[4] Dan Michaels, James Speed. Ball Aerospace Star Tracker Achieves High Tracking Accuracy for a Moving Star Field [J]. IEEE, 2004. 7: 1 – 7.

[5] Roelof W H van Bezooijen, Kevin A. Anderson, David K. Ward. Performance of the st – 201 star tracker for themicrowave anisotropy probe [C]. California: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2002, 4582: 1 – 11.

[6] LUO Changzhou, WANG Jie, SHAO Lei, et al. Improving data update speed of star sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 111 – 116. (in Chinese)
罗长洲,王杰,邵雷,等. 提高星敏感器数据刷新速率技术研究[J]. 应用光学,2013,34(1):111 – 116.

[7] ZHANG Chunming, XIE Yongchun, WANG Li, et al. Analysis of influence of earth albedo on star tracker[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(9): 1011 – 1015. (in Chinese)
张春明,解永春,王立,等. 地球反照对星敏感器的影响分析[J]. 激光与红外,2012,42(9):1011 – 1015.

[8] LI Deliang, RUAN Jin. Method adapting to the star sensor's star extraction [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (12): 1348 – 1350. (in Chinese)
李德良,阮锦. 一种适用于星敏感器的星点提取方法[J]. 激光与红外,2009,39(12):1348 – 1350.

[9] Carl A Nardell, James Wertz, Paul B Hays. Image Processing. Simulation and performance predictions for the microMak star tracker[J]. Mathematical Methods in Pattern and Image Analysis, SPIE, 2005, 5916: 59160U.

[10] Ludovic BLARRE, Damien PIOT, Philippe JACOB, et al. SED16 autonomous star sensor product line in flight results, new developments and improvements in progress [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005, San Francisco, California.

[11] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital image processing[M]. Electronic Industry Press, 2005.

[12] MAO Xiaonan, LIANG Weisheng, ZHENG XunJiang. A

parallel computing architecture based Image processing algorithmfor star sensor[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(3):613 – 619. (in Chinese)
毛晓楠,梁为升,郑循江. 基于并行运算体系结构的星敏感器感器图像处理算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(3):613 – 619.

[13] John Bernsen. Dynamic thresholding of grey-level images [J]. IEEE, 1986(4):1251 – 1255.

[14] XU Jun, XIANG Jianhua, LIANG Changhong. Small target detection based on maximumbackground model in IR images[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(12):1483 – 1486. (in Chinese)
徐军,向健华,梁昌洪. 最大化背景模型用于检测红外图像中的弱小目标[J]. 光子学报, 2002, 31(12):1483 – 1486.

[15] WANG Hongtao, LUO Changzhou, WANG Yu, et al. Algorithm for star extraction based on self-adaptive background prediction[J]. Optical Technique, 2009, 35(3):412 – 418. (in Chinese)
王洪涛,罗长洲,王渝,等. 基于背景自适应预测的星点提取算法[J]. 光学技术, 2009, 35(3):412 – 418.

[16] LIU Taiyang, WANG Shicheng, LI Qinghui, et al. Fake star detection based on Gaussian parameter interpolation [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6):678 – 682. (in Chinese)
刘太阳,王仕成,李庆会,等. 基于高斯弥散参数拟合的伪星检测[J]. 激光与红外, 2011, 41(6):678 – 682.

[17] YU Luwei, MAO Xiaonan, JIN He, et al. Study on image process method of star tracker for stray lights resistance filtering based on background[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 4(33):26 – 31. (in Chinese)
余路伟,毛晓楠,金荷,等. 星敏感器抗杂光背景滤波图像处理方法研究[J]. 上海航天, 2016, 4(33):26 – 31.

[18] WANG Chen, WANG Hongqiang, et al. The analysis and disposal of imaging circuit noise effect on star sensor[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7):692 – 696. (in Chinese)
王辰,王宏强,陈明华,等. 星敏感器成像电路噪声分析及降噪处理[J]. 激光与红外, 2008, 38(7):692 – 696.