

引用格式: YANG Yuan-zhao, YU Lu-wei, MAO Xiao-nan, *et al.* Algorithm of Space Target Quick Acquisition in the Complex Background of the Sky[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0710005

杨元钊,余路伟,毛晓楠,等. 复杂星空背景下的空间目标快速捕获算法[J]. 光子学报, 2020, 49(7):0710005

复杂星空背景下的空间目标快速捕获算法

杨元钊^{1,2}, 余路伟^{1,2}, 毛晓楠^{1,2}, 闫晓军^{1,2}, 郑循江^{1,2}

(1 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

(2 中国航天科技集团公司 红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘 要: 针对现有方法在大视场、高灵敏度条件下星空背景复杂导致的空间目标捕获速度慢的问题, 利用大视场星图识别的优势, 提出了复杂星空背景下的空间目标快速捕获算法. 采用分级曝光策略, 基于短曝光获取有限数量的恒星以大幅度提高星图识别速度; 利用二维最大背景估计方法, 实现星图预处理, 获得质心数据信息; 最后基于星图目标序列剔除自然天体. 通过星图目标排序横向剔除, 保证剔除准确性的前提下有效提高了剔除效率, 实现了空间目标快速捕获. 仿真试验结果表明, 本文方法快速性好、准确率高, 与已有算法中较快算法相比, 目标捕获所用时间减少 41.92%.

关键词: 空间目标; 捕获算法; 分级曝光策略; 星图识别

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204907.0710005

Algorithm of Space Target Quick Acquisition in the Complex Background of the Sky

YANG Yuan-zhao^{1,2}, YU Lu-wei^{1,2}, MAO Xiao-nan^{1,2}, YAN Xiao-jun^{1,2}, ZHENG Xun-jiang^{1,2}

(1 Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

(2 Research and Development Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract: As a solution of the slow space target acquisition caused by the complexity of starry sky background and the large field of view with relatively high sensitivity, a fast space target acquisition algorithm was proposed. This algorithm executes by taking advantage of star map recognition in large field of view. The speed of stars map recognition is largely improved by the short-time exposure on basis of the graded exposure strategy. Then, two-dimensional maximum background estimation method is used to realize star map preprocessing and obtain centroid data information. Finally, a natural object culling method based on star map target sequence is proposed. By horizontal culling of star map target sequence, the culling efficiency is effectively improved on the premise of ensuring the culling accuracy and realizing the rapid acquisition of space objects simultaneously. According to the simulation results, the proposed method is fast and accurate. Additionally, the period of target acquisition is reduced by 41.92% favorably compared with competitors.

Key words: Space target; Acquisition algorithm; Graded exposure strategy; Stars map recognition

OCIS Codes: 100.4999; 100.0100; 100.5010

基金项目: 中国航天科技集团钱学森青年创新基金

第一作者: 杨元钊(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间目标识别与跟踪. Email: 244415854@qq.com

导师: 郑循江(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学精密仪器. Email: goodzxj@163.com

收稿日期: 2019-09-29; 录用日期: 2019-10-29

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着航天技术的不断发展,星载目标探测与态势感知技术逐渐成为研究的热点方向.空间目标的捕获是星载目标探测与态势感知的关键技术^{[1][2]}.基于可见光谱段的空间目标捕获因其成像范围广、搜索速度快、探测精度高、功耗低等优点,已成为重要的探测手段^[3].本文主要研究利用大视场($30^\circ \times 30^\circ$)、高灵敏度(7.5 Mv)光学搜索相机实现对空间目标捕获的快速算法.

空间目标主要包括卫星、空间站和空间碎片等.空间目标捕获的核心问题是利用目标与自然天体的特征差异,在数量众多的自然天体构成的背景中快速、准确辨识出空间目标.大视场、高灵敏相机进行远程目标搜索时,空间目标与自然天体的成像均为点目标.该情况下空间目标捕获存在的难点问题有:1)空间目标与星点相比,无论在光学特性上,还是空间特征上,均无显著差别;2)星空背景复杂,视场内自然天体众多,平均达到440颗左右^[4],现有方法捕获空间目标的耗时比较长,难以满足当前星载目标搜索任务对时间的要求.

当前主流研究方向是利用运动特征实现空间目标的检测,主要有:背景掩模法,光流法,帧间差分法等.背景掩模法是将参考帧图像进行处理形成掩模帧图像,利用该帧图像对拍摄图像进行屏蔽,检测到移动目标,该方法所需曝光时间较长^[5-6];光流法是通过判断光流矢量的运动连续性来搜索运动目标,该方法计算量大,鲁棒性差^[7-9];王思旺等提出了改进的帧间差分法,该方法虚警率较高^[10];王敏等提出基于时空域的暗弱空间运动点目标检测算法,虽然具有较低的虚警率,无法应用在大视场条件下^[11].以上方法都耗时比较长.王敏等提出了基于距离矩阵的星图运动目标检测方法,该方法在星空背景复杂的条件下耗时有了提高,但需要前后帧图像目标数相同,实际应用时限制较大^[12].

综上,已有方法主要针对小视场相机拍摄的图像,没有利用星图快速识别技术以提高目标捕获的效率,其时间开销对于背景复杂度十分敏感,应用于大视场条件时,数量庞大的自然天体构成的背景导致算法时间复杂度高,无法满足对时间的要求.基于星载广域空间搜索任务指标要求:200 ms内对1帧图像的目标进行搜捕,本文提出了复杂星空背景下的空间目标快速捕获算法,设计了分级曝光策略,充分利用大视场星图识别的优势,实现对单帧图像空间目标的快速捕获.该方法优势体现在大视场($30^\circ \times 30^\circ$)、高灵敏度(7.5 Mv)星空背景复杂情况下,利用全天识别算法获取姿态信息,推算出空间目标与已知自然天体之间的位置特征差异,在复杂星空背景下实现了对自然天体的排序横向快速剔除,保证了剔除的快速性与较高的剔除率,有效降低了全天识别耗时,实现了空间目标快速捕获.算法性能满足星载目标搜索任务对实时性的要求.

1 基于分级曝光策略的星图识别

星空背景复杂度决定了星图识别算法效率.为满足星载目标搜索任务实时性要求,设计了分级曝光策略,星图识别时采用短曝光,在保证识别准确前提下有效提高星图识别算法效率,为整体算法实时性打下坚实基础.

1.1 图像预处理

星图识别的前提是图像预处理.对于空间目标搜索相机而言,其图像由以下元素构成:空间目标、星点、噪声和背景^[11].

$$f(x, y) = t(x, y) + s(x, y) + n(x, y) + b(x, y) \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 表示像平面 (x, y) 处像元的总灰度值; $t(x, y)$ 表示像平面 (x, y) 处像元的空间目标目标灰度值; $s(x, y)$ 表示像平面 (x, y) 处像元的自然天体目标灰度值; $n(x, y)$ 表示像平面 (x, y) 处像元的噪声灰度值; $b(x, y)$ 表示像平面 (x, y) 处像元的背景灰度值.

运用背景估计的思想,将有效像素与背景分割,剔除复杂背景的干扰.本文采用二维最大背景估计法

$$\begin{cases} B = \max(B_{ul}, B_{ur}, B_{ll}, B_{lr}) \\ B_{ur}(x, y) = \sum_{i=x-r}^{x+r} \sum_{j=y-r}^{y+r} W_{ij} I(i, j) \\ B_{ul}(x, y) = \sum_{i=x-r}^{x+r} \sum_{j=y}^{y+r} W_{ij} I(i, j) \\ B_{ll}(x, y) = \sum_{i=x-r}^{x+r} \sum_{j=y-r}^{y+r} W_{ij} I(i, j) \\ B_{lr}(x, y) = \sum_{i=x-r}^{x+r} \sum_{j=y}^{y+r} W_{ij} I(i, j) \end{cases} \quad (2)$$

式中, B 为背景估计结果, B_{ur} 、 B_{ul} 、 B_{ll} 、 B_{lr} 分别为第一至第四象限区域估计结果, W 为权值.

$$W(r) = \begin{cases} 0 & r \leq c \\ (r - c) / \sum W(r) & r > c \end{cases} \quad (3)$$

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

对剔除背景后的图像, 采用固定阈值进行分割, 以剔除绝大部分高频随机噪声. 保留下来的目标, 大于 2 个像素的, 认为是有效提取的目标点. 此时, 一般仅含有空间目标、星点和极少量噪声.

上述方法可以实现大视场条件下点目标的快速提取, 得到实拍目标集合为

$$ST = [s(1), \dots, s(p), t(1), \dots, t(i), n(1), \dots, n(j)]^T \quad (4)$$

式中, $s(1), \dots, s(p)$ 为 p 个自然天体目标集合; $t(1), \dots, t(i)$ 为 i 个空间目标目标集合; $n(1), \dots, n(j)$ 为 j 个随机噪声集合.

$$N = p + i + j \quad (5)$$

式中, N 为目标集合 ST 包含的总目标数, 经上述处理后, 获得的目标集合包含相机视场天区的自然天体、空间目标与预处理时未筛减掉的随机噪点.

1.2 背景复杂度分析

在深空背景中, 存在着成千上万的自然天体. 按照光谱类型, 恒星可以分为 O、B、A、F、G、K、M 七个大类, 每个大类又可分为从 0 到 9 的十个小类, 因此全天空自然天体的光谱类型多达 70 种, 差异显著^[13]. 全天空为 41 253 平方度, 自然天体在天空不是均匀分布的, 7.5 Mv 以下自然天体分布形态如图 1 所示.

矩阵视场内恒星数量、探测星等与视场角的关系^[14]为

$$N_{\text{FOV}} = 6.57 \exp \left\{ 1.08 M_v \frac{2\pi - 4 \arccos \left[\sin^2 \left(\frac{A_{\text{FOV}}}{2} \right) \right]}{4\pi} \right\} \quad (6)$$

式中, N_{FOV} 为视场内恒星数量; M_v 为探测星等; A_{FOV} 为视场角.

全天空 7.5 Mv 以下自然天体有 25 713 颗, 平均星密度为 0.62 颗/平方度. 本文采用 $30^\circ \times 30^\circ$ 方视场, 7.5 Mv 灵敏度相机, 视场内最大自然天体数为 558 颗, 最少自然天体数为 320 颗, 平均自然天体数为 461.868 8 颗左右.

表 1 为 $30^\circ \times 30^\circ$ 方视场, 不同探测星等条件下, 视场内恒星平均数量. 表 2 为 7.5 Mv 灵敏度条件下, 不同范围视场内恒星平均数量. 现有方法应用场景视场最大为 10° , 其视场内平均恒星数为 52.335 5 颗, 星空背景较简单, 对算法速度影响较小; 当视场为 30° 时, 平均恒星数量为 461.868 8 颗, 数量增大 9 倍, 星空背景复杂, 对算法速度影响较大.

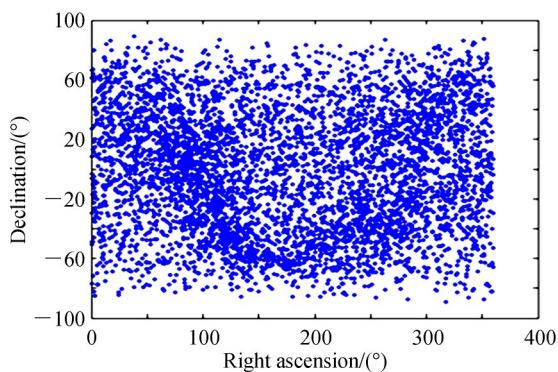


图 1 全天空恒星分布情况(7.5 Mv 以下自然天体)
Fig. 1 All-sky stellar distribution (under 7.5 Mv)

表1 不同灵敏度的恒星数

Table 1 Number of stars with different sensitivities

M _v	N _{FOV}	M _v	N _{FOV}
3	3.579 7	5.5	53.265 1
3.5	6.142 8	6.0	91.403 2
4	10.541 1	6.5	156.848 6
4.5	18.088 6	7.0	269.153 2
5	31.040 1	7.5	461.868 8

表2 不同视场大小的恒星数(7.5 M_v)Table 2 Number of stars with different field of view (7.5 M_v)

A _{FOV}	N _{FOV}	A _{FOV}	N _{FOV}
1.5	1.180 4	10	52.335 5
3	4.721 0	15	117.386 2
5	13.108 7	20	207.781 6
5.5	15.859 4	25	322.874 2
8	33.525 2	30	461.868 8

1.3 基于分级曝光策略的星图识别方法

星图识别是从预处理后的图像中提取目标及其特征,与预先存放的导航星库相比较,建立起观测星图中恒星与内部星库中恒星的对应关系^[14].星对角距具有最高的数值精度,因此作为星图识别的特征,广泛用于各类星图识别算法^[15-16].

当前工程应用最普遍的星图识别算法是三角形匹配算法,算法逻辑图如图2所示.在构建三角形、匹配三角形、识别验证过程中需要多次遍历星图与导航星库,因此算法计算量与视场内星数成正比.曝光灵敏度与视场内星数呈指数关系,5 M_v图像中平均星数为31.040 1颗,已经可以满足星图识别所需星数;若采用7.5 M_v图像做星图识别,图像中平均星数为461.868 8颗,星数是5 M_v图像的14.87倍,算法计算量将成倍增加,且对星图识别精度无明显改善,不满足星载目标搜索任务对目标捕获任务实时性的要求.

因此,设计了基于分级曝光策略的星图识别方法,空间目标搜索相机进入工作状态后,先采用5 M_v灵敏度拍摄3帧图像用于星图识别,然后再采用7.5 M_v灵敏度拍摄数帧图像用于目标捕获.一般情况下,单帧图像即可完成星图识别,预留3帧图像可确保完成星图识别.现有大视场星敏感器技术可在100 ms内完成全天识别^[17].

2 基于星图目标序列的自然天体剔除方法

在采用本文第1章所述方法预处理后,经星图识别,获得相机在惯性系下的姿态信息,查找自然天体数据库,结合星等阈值可获得视场内自然天体数据库BS,实拍目标集合ST.此时需要将自然天体

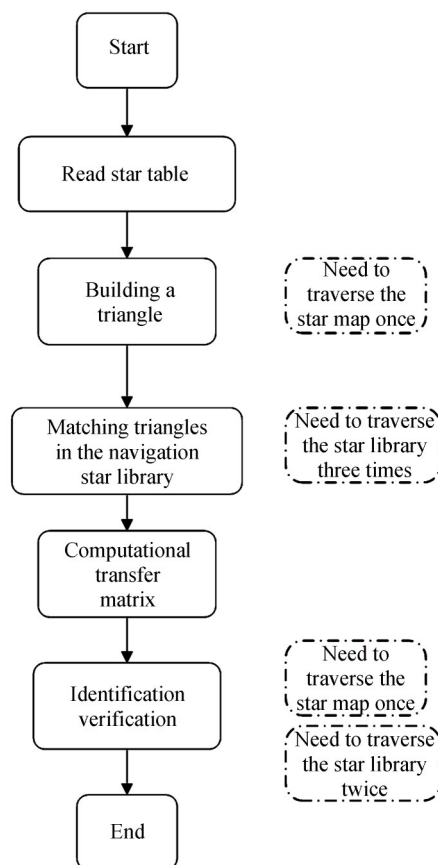


图2 星图识别算法逻辑图

Fig. 2 Star map recognition algorithm logic diagram

$s(1), \dots, s(p)$ 从实拍目标集合ST中剔除,实现目标初步筛选的目的.

式(1)与式(4)为单帧图像自然天体、疑似目标集合.将其扩展到多帧情况,多帧图像自然天体集合为

$$BS(k) = [bs_k(1), \dots, bs_k(u)]^T \quad (7)$$

式中, $BS(k)$ 为第 k 帧图像位置自然天体数据库; $bs_k(1), \dots, bs_k(u)$ 为第 k 帧图像位置中 u 个自然天体,其中包含像平面坐标、星等等信息.

多帧图像实拍目标集合为

$$ST(k) = [s_k(1), \dots, s_k(p), t_k(1), \dots, t_k(i), n_k(1), \dots, n_k(j)]^T \quad (8)$$

式中, $ST(k)$ 为第 k 帧实拍目标集合; $s_k(1), \dots, s_k(p)$ 为第 k 帧图像中 p 个自然天体目标集合; $t_k(1), \dots, t_k(i)$ 为第 k 帧图像中 i 个空间目标集合; $n_k(1), \dots, n_k(j)$ 为第 k 帧图像中 j 个随机噪声集合.其中包含像平面坐标、星等等信息

大视场条件下,影响目标搜索的核心因素为视场内自然天体数目,在确定了相机的惯性姿态信息后,若使用常规的无序剔除方法,依旧无法满足实时性要求.

本文通过以下方法实现对自然天体的快速剔除.设计了排序横向对比的剔除方法,显著降低了对比查找次数与时间复杂度.自然天体位置特征具有拓扑稳定性,在同一帧图像中自然天体间相对位置关系恒定,不受误差影响.在不存在随机噪点与空间目标的理想情况下,若按照统一规则将实拍目标集合与该位置自然天体库重新排序(如按横坐标升序排序),获得的两个新集合中自然天体是一一对应的.

排序横向对比剔除方法需要面对三种情况:1)实拍星图中临界星等自然天体出现的不确定性,图像中可能存在高于探测星等自然天体,易被误识别为空间目标;2)实拍图像中临界星等自然天体淹没在背景中,未被检测到;3)实拍图像中存在空间目标与随机噪声.

以上三种情况在实际中可能同时出现,任何一种情况都会导致排序横向对比出错.针对情况1)为确保自然天体全部被剔除,选取的视场内自然天体数据库 $BS(k)$ 的星等阈值需略高于相机探测灵敏度,本文采用 7.7 Mv 作为星等阈值;针对情况2)、3),综合考量设计算法以消除其对排序横向对比的不利影响.如图3为该方法流程图,这种方法克服了临界星等天体缺失对自然天体排序逐项剔除的影响,快速将实拍目标集合中包含的自然天体进行有效剔除,在大视场中包含大量目标时能保证剔除的快速性与较高的剔除率.

具体步骤如下:

1)排序准备:设自然天体数据库 $BS(k)$ 为基准集合,实拍目标集合 $ST(k)$ 为待剔除集合.将式(7),(8)两分别按 x 坐标升序排列.

$$\begin{cases} BS(k) = [B_k(1), \dots, B_k(u)]^T \\ ST(k) = [S_k(1), \dots, S_k(N)]^T \end{cases} \quad (9)$$

2)确定容差 σ :

$$\sigma = f \cdot \tan(\tau + \rho) \quad (10)$$

$$\Delta x = \Delta y = \sigma \quad (11)$$

式中, f 为搜索相机焦距; τ 为相机指向误差; ρ 为相机测角精度. Δx 为横向最大容差, Δy 为纵向最大容差.

d_{ij} 为 $B_k(i)$ 与 $S_k(j)$ 之间的欧氏距离

$$|d_{ij}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (12)$$

式中, (x_i, y_i) 为基准集合 $BS(k)$ 中,第 i 个自然天体在像平面的坐标信息; (x_j, y_j) 为待剔除集合 $ST(k)$ 中,第 j 个疑似目标在像平面的坐标信息.

3)标志位函数:以 $B_k(l)$ 为基准,判断 $S_k(w)$ 是否为自然天体,其中: $l = 1, 2, \dots, i, \dots, u, w = 1, 2, \dots, j, \dots, N$.

横向对比

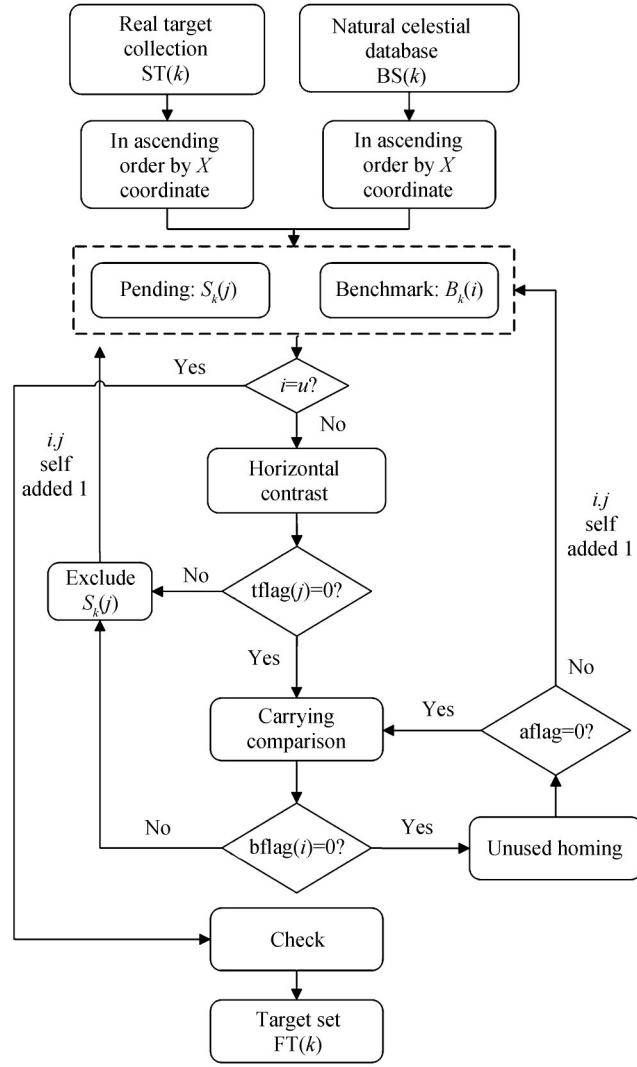


图3 目标排序横向剔除流程
Fig. 3 Target sorting horizontal culling flowchart

$$tflag(j) = bflag(i) = \exp\left(\frac{\sigma - |d_{ij}|}{|\sigma - |d_{ij}||}\right) \quad (13)$$

式中, $tflag(j)$ 为实拍目标集合中第 j 个目标剔除标志位, 1 为已被剔除, 0 为未被剔除; $bflag(i)$ 为自然天体数据库中第 i 个自然天体使用标志位, 1 为已被使用, 0 为未被使用.

进位对比

$$pflag = e^{bflag(i)} = \begin{cases} 1 & n = n + 1 \\ e & \end{cases} \quad (14)$$

$$tflag(j+n) = bflag(i) = \exp\left(\frac{\sigma - |d_{ij+n}|}{|\sigma - |d_{ij+n}||}\right) \quad (15)$$

式中, n 为实拍目标集合进位次数 (初始为 0); $pflag$ 为进位标志位, 1 表示进位, e 表示完成剔除. 进位对比解决了情况 2) 带来的剔除问题.

未用归位

$$\text{aflag} = \exp\left(\frac{|d_{ij+n}| - 5\sigma}{|5\sigma - |d_{ij+n}||}\right) = \begin{cases} 1 & \text{bflag}(i) = 2, i = i + 1 \\ 0 & \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{tflag}(j) = \text{tflag}(j + 1) = \dots = \text{tflag}(j + n) = 0 \quad (17)$$

式中, aflag 为未用标志位, 1 代表自然天体数据库中第 i 自然天体未在实拍目标集中找到对应目标, 选用下一个自然天体作为基准继续对比. 未用归为解决了情况 3) 带来的剔除问题.

4) 剔除步骤

Step1 横向对比

以 $B_k(l)$ 为基准, 判断 $S_k(w)$ 是否为自然天体, 利用式 (13) 横向对比函数求 $\text{tflag}(j)$, $\text{bflag}(i)$, 若 $\text{tflag}(j) = \text{bflag}(i) = 0$, 进入 Step2; 若 $\text{tflag}(j) = \text{bflag}(i) = 1$, 将 $S_k(j)$ 从实拍目标集合 $\text{ST}(k)$ 中剔除, i, j 自加 1, 再次进行 Step1.

Step2 进位对比

利用式 (14)、(15) 进位对比函数求 pflag , $\text{tflag}(j+n)$, 若 $\text{tflag}(j+n) = \text{bflag}(i) = 0$, 进行 Step3; 若 $\text{tflag}(j+n) = \text{bflag}(i) = 1$, 将 $S_k(j+n)$ 从实拍目标集合 $\text{ST}(k)$ 中剔除, i, j 自加 1, 进行 Step1.

Step3 未用归位

利用式 (16)、(17) 未用归位函数求 aflag, 若 $\text{aflag} = 0$, 进入 Step2; 若 $\text{aflag} = 1$, j 自加 1, 进行 Step1.

Step4 完成剔除

当 $i = u$ 时, 自然天体剔除完成, 实拍目标集合 $\text{ST}(k)$ 剩余的目标放入捕获目标集合 $\text{FT}(k) = [\text{ft}_k(1), \dots, \text{ft}_k(q)]^T$, 为保证较高的剔除率, 还需对捕获目标集合进行检查 $\text{FT}(k)$ 核对.

5) 检查核对

以 $\Delta X = 5 \times \Delta x$ 为检查窗口宽度, 将像平面分割成 X 个检查窗口, 逐个计算初筛目标 $\text{ft}_k(j)$ 与同窗口内自然天体 $B_k(i)$ 的欧式距离 $|d_{ij}|$, 若 $|d_{ij}| > \sqrt{2}\sigma$, 则进行下一个目标检查; 若 $|d_{ij}| \leq \sqrt{2}\sigma$, 则将该目标从 $\text{FT}(k)$ 中剔除, 随后进行下一个目标检查.

经过上述步骤, 最终获得初筛目标集合 $\text{FT}(k)$, 此时 $\text{FT}(k)$ 中包含空间目标与少数随机噪点.

该算法计算复杂度为 $O(u \log u)$, u 为视场内自然天体数; 已有方法中速度最快的算法^[8] 计算复杂度为 $O(u^2)$. 本文算法快速性优于现有算法.

经过该算法剔除自然天体后, 无法根据初筛单帧目标集合直接对目标进行跟踪与航迹拟合, 需要将目标集合 $\text{FT}(k)$ 做时间维度的关联, 实现目标的跟踪与航迹提取.

3 仿真结果

本文仿真所用相机视场: $30^\circ \times 30^\circ$, 灵敏度: 7.5 Mv; 图像大小为: 1024×1024 , 像平面坐标原点为图像左上角. 本文所用图片均为经过预处理后图像, 不再对预处理过程进行累述.

本文仿真软件平台为 Matlab2014a, 硬件配置为 Intel 双核 3.20G CPU, 2G 内存.

仿真分为两个部分: 第一部分主要验证复杂背景条件下自然天体剔除算法的基本能力与准确性; 第二部分主要验证算法快速性, 为了进行对比验证, 本文选择传统帧间差分法, 改进帧间差分法^[10] 以及基于距离矩阵的星图运动目标检测算法^[12] 作为对比方法.

3.1 算法基本能力验证

图 4(a) 为经过预处理后的实拍第一帧星图; 图 4(b) 为剔除自然天体后的还原星图. 由图 4(a) 可以看出在 $30^\circ \times 30^\circ$ 大视场条件下, 视场内星点数量较多, 总目标数达到 406 颗, 运用本文算法对自然天体进行剔除, 剔除结果如图 4(b), 得到 7 个空间目标, 经查星表验证, 均为空间目标, 算法运行时间小于 1 ms.

为验证本文算法多目标处理能力, 在实拍星图数据基础上, 添加 35 个仿真空间目标目标进行算法验证, 其中 2 个目标与自然天体位置重合(被自然天体遮挡), 此时空间目标目标数为 42 个. 图 4(c) 为添加仿真目

标后的星图;图4(d)为剔除自然天体后的仿真还原星图.图4(d)中空间目标数为40个,其中目标用红色矩阵标注,增加验证点用黄色三角标注,其信息与预设仿真空间目标相同,2个被自然天体遮挡目标被成功剔除,算法运行时间小于1 ms.

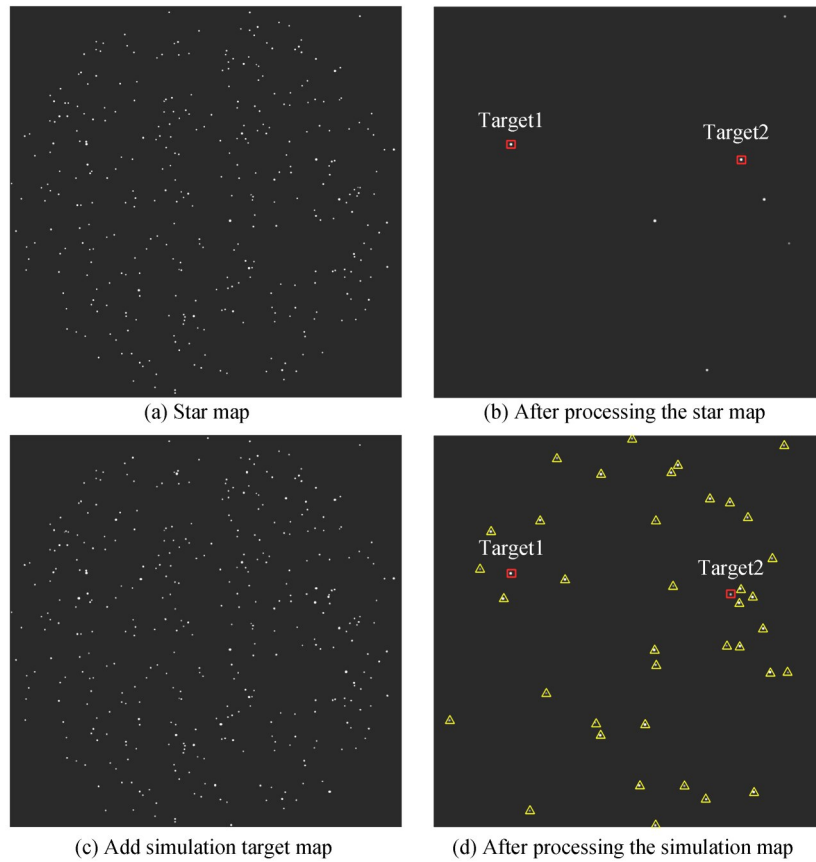


图4 基本能力验证

Fig. 4 Basic competency verification

为验证本文算法的准确性,进行1000次独立随机试验,每次试验抽取不同天区,加入10个目标点,进行仿真验证.试验结果如图5所示,目标全部正确提取的概率为98.5%;15次漏检测的情况中,漏检测的原因是仿真目标被恒星遮蔽;无误检测目标,意味着算法可将自然天体准确剔除.被恒星遮蔽目标可利用多帧信息进行拟合.本文算法能在大视场条件下实现对自然天体的准确剔除,并具备多目标处理能力.

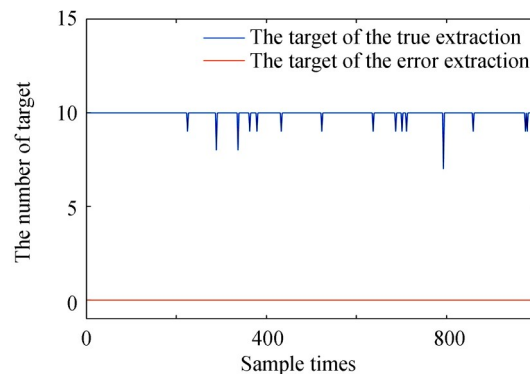


图5 提取准确性验证结果

Fig. 5 Extraction accuracy verification result

3.2 算法与快速性验证

本文从两个层次验证算法快速性,算法在所用帧数与单帧处理时间均最短的情况下,则认为该算法快速性最好.

设计对比试验:进行1000次独立随机试验,每次试验随机抽取不同天区,加入10个目标点(目标点不与自然天体点重合),构成20帧试验图像;选用不同方法进行仿真验证,正确提取率达到90%以上,视为处理完毕.均对图像进行预处理.

试验结果见图6,本文算法达到试验要求所需帧数最少为2帧,部分天区需要3帧图像,其原因为单帧未实现星图识别;距离矩阵法所需帧数为2~3帧,其平均数大于本文算法;帧间差分法与改进的帧间差分法所需帧数均多于3帧.

为进一步对比距离矩阵法与本文算法,在不同自然天体数情况下(同一天区),分别处理20帧图像,以平均每帧处理时间判定快速性优劣,结果如图7所示,本文算法速度优于距离矩阵法,在平均星数为461颗情况下,本文算法目标捕获时间减少41.92%.

本文算法具有较好的快速性,可以满足大视场条件下自然天体快速剔除的需求.

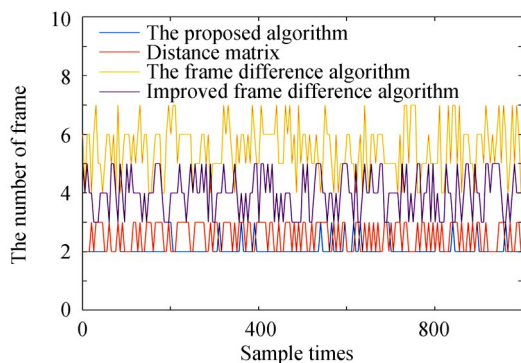


图6 算法对比验证结果

Fig. 6 Algorithm comparison verification result

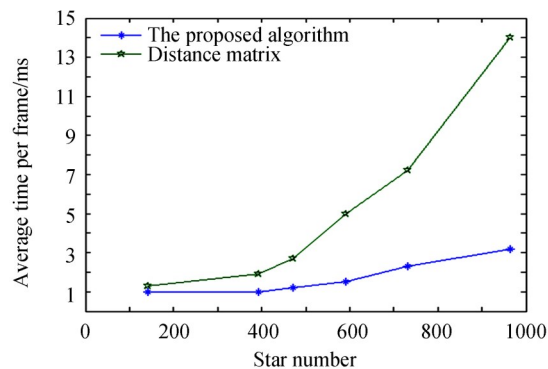


图7 算法耗时对比

Fig. 7 Algorithm time-consuming comparison

4 结论

针对大视场、高灵敏度相机条件下星空背景复杂导致的空间目标捕获速度慢的问题,提出了复杂星空背景下的空间目标快速捕获算法,设计了分级曝光策略,以保证快速完成星图识别,获得相机在惯性系下的姿态信息;设计了基于星图目标序列的自然天体剔除方法,采用排序横向对比的剔除策略,实现对单帧图像自然天体快速、准确剔除,最终实现空间目标快速捕获的目标,满足星载目标搜索任务对目标捕获实时性的要求.本文算法与已有算法中较快算法-距离矩阵法相比,目标捕获所用时间减少41.92%.

参考文献

- [1] WANG Xiao-hai. Research progress on space-based space target detection system technology[J]. *Satellite and Network*, 2017, (11):64-70.
王晓海. 天基空间目标探测系统技术研究进展[J]. *卫星与网络*, 2017, (11):64-70.
- [2] LI Shao-min, NIU Wei, MA Xin. Research on space target detection technology[J]. *National Defense Technology*, 2009, (3): 6-13.
李少敏, 牛威, 马鑫. 空间目标探测技术研究[J]. *国防科技*, 2009, (3):6-13.
- [3] ZHANG Ying, NIU Yan-xiong, YANG Lu, et al. Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1):101-106.
张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(1):101-106.
- [4] YE Zhi-long, SUN Shuo-dong, CHEN Shu, et al. Establishment of a navigation star database based on star distribution[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(1):90-96.
叶志龙, 孙朔冬, 陈纾, 等. 一种基于恒星分布的星敏感器导航星库制作方法[J]. *深空探测学报*, 2018, **5**(1):90-96.
- [5] SCHILDKNECHT T, HUGENTOBLE U, VERDUN A. CCD algorithms for space debris detection[R]. ESA Study Final Report, ESA/ESOC Contract No. 10623/93/D/IM, 1995.

- [6] TALENT D L, POTTER A E, HENIZE K G. A search for Debris in GEO [C]. Proceedings of the Second European Conference on Space Debr, 1997:17-19.
- [7] LAI Li-jun, XU Zhi-yong, ZHANG Xu-yao. Improved gradient optical flow for digital image stabilization[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(7):273-279.
赖丽君, 徐智勇, 张栩铤. 应用于稳像系统中的改进梯度光流法[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(7):273-279.
- [8] SENST T, EISELEIN V, EVANGELIO R H, *et al.* Robust modified L2 local optical flow estimation and feature tracking [C]. Applications of Computer Vision, IEEE, 2011:685-690.
- [9] LI Cheng-mei, BAI Hong-yang, GUO hong-wei, *et al.* Moving object detection and tracking algorithm based on improved optical flow method [J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, **39**(5): 249-256.
李成美, 白宏阳, 郭宏伟, 等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, **39**(5):249-256.
- [10] WANG En-wang, WANG En-da. Application of improved frame difference method in space moving target detection [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2016, **13**(3): 333-339.
王恩旺, 王恩达. 改进的帧差法在空间运动目标检测中的应用[J]. 天文研究与技术, 2016, **13**(3): 333-339.
- [11] WANG Min, ZHAO Jin-yu, CHEN Tao. Moving point object detection from faint space based on temporal-spatial domain [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2017, **39**(7):1578-1584.
王敏, 赵金宇, 陈涛. 基于时空域的暗弱空间运动点目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2017, **39**(7):1578-1584.
- [12] WANG Min, ZHAO Jin-yu, CHEN Tao. Star map moving target detection based on distance matrix [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(7): 1954-1960.
王敏, 赵金宇, 陈涛. 基于距离矩阵的星图运动目标检测[J]. 光学精密工程, 2017, **25**(7): 1954-1960.
- [13] JIA Dong-mei, HU Zhan-yi, ZHAO Yong-heng. A fast classification method of stellar spectroscopy based on principal component analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, **23**(1):182-186.
覃冬梅, 胡占义, 赵永恒. 一种基于主分量分析的恒星光谱快速分类法[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, **23**(1):182-186.
- [14] 刘朝山. 弹载星敏传感器原理及系统应用[M]. 国防工业出版社, 2011.
- [15] HUI L I, WANG A G, ZHANG L. Modified pyramid algorithm for small FOV star image recognition[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(2):267-272.
- [16] GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1698-1703.
巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(11):1698-1703.
- [17] 王宏力, 陆敬辉, 崔祥祥. 大视场星敏传感器星光制导技术及应用[M]. 国防工业出版社, 2015.