

doi:10.3788/gzxb20174602.0210002

地球同步轨道碎片观测图像分级检测方法

谭继波, 黄建余, 王鲲鹏, 吴文堂

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:为了快速检测出地球同步轨道带光学观测图像中的空间碎片,提出了一种基于信噪比的分级检测方法.首先分析实测数据,得出观测图像中不同信噪比碎片运动相似的特性.对于高信噪比碎片,采取帧差法快速检测,并利用多帧图像计算速度信息;对于低信噪比碎片,根据高信噪比碎片检测结果得到的速度信息,采用改进的动态规划检测方法.实际图像检测结果表明:当递归方程的搜索窗口为 5 pixel×5 pixel 时,分级检测方法检测性能最好;当累积帧数大于 5 帧时,检测时间比传统动态规划方法减少了 87% 以上.分级检测方法具有检测率高、虚警率低、计算量小的优势,适合地球同步轨道带光学观测图像中空间碎片的检测.

关键词:地球同步轨道碎片;光学观测;目标检测;帧差法;动态规划

中图分类号:TP399

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0210002-9

Grading Detecting Method for Observation Images of Geosynchronous Earth Orbit Debris

TAN Ji-bo, HUANG Jian-yu, WANG Kun-peng, WU Wen-tang

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100194, China)

Abstract: In order to rapidly detect the space debris in the Geosynchronous Earth Orbit (GEO) image with optical observation, a grading detecting method based on Signal-to-noise Ratio(SNR) was proposed. First, the real measured data are analyzed, and the characteristics that image velocity of different GEO debris are same is acquired. An improved dynamic programming method is proposed based on the velocity information obtained from high SNR debris, which can detect low SNR debris effectively. The results of real image show that the detection performance of the grading detecting method is the best when the search window of recursive equation is 5 pixel×5 pixel, and the detection time is reduced by more than 87% as compared with that of original algorithm when the cumulative number is greater than 5. With the advantages of high detection rate, low false alarm rate and low computational cost, the proposed method is suitable for the detection of space debris in GEO optical observation images.

Key words: Geosynchronous earth orbit debris; Optical observation; Target detection; Frame difference method; Dynamic programming

OCIS Codes: 100.2000; 350.1260; 200.4560; 350.6090; 280.4788

0 引言

目标检测是地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)碎片光学观测图像处理中的关键技术.从观测图像中检测出空间碎片和恒星,可对空间碎片进行天文定位.目标检测的效率对空间碎片的实时预

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2015AA7088061)资助

第一作者:谭继波(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为空间碎片探测与图像信号处理. Email: tjb1206@126.com

导师(通讯作者):黄建余(1967-),男,副研究员,硕士,主要研究方向为空间碎片观测与目标识别. Email: jianyu2875@126.com

收稿日期:2016-08-30;录用日期:2016-10-26

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

警,在轨飞行器安全保障等具有重要的意义.目标检测在保证效率的同时,需要尽可能降低检测虚警率^[1-2].

GEO 带光学观测图像中含有不同信噪比的空间碎片,适合采用不同的检测方法.对于高信噪比碎片^[3],常用的检测技术是检测后跟踪(Detect-Before-Track, DBT)法. DBT 技术原理简单,易于实现,典型处理方法包括阈值分割法^[4]、背景建模法^[5]和帧差法^[6]. 该技术首先对单帧图像进行检测,再关联多帧图像筛选真实目标. 单帧检测可以有效减少后续处理的运算量,降低目标跟踪关联复杂度,但会丢失目标信息. 当观测图像中碎片信噪比不同时,阈值分割法难以有效区分目标和背景恒星. 背景建模法可以检测恒定背景下的运动碎片,但背景模型通常构建复杂,当背景变化时检测性能下降. 帧差法原理简单,适合于非均匀背景以及起伏背景下的碎片检测. 帧差法检测目标过程中会造成信息丢失,丢失信息对于高信噪比目标影响较小,但会降低暗弱碎片检测性能. 暗弱碎片常用检测前跟踪(Track-Before-Detect, TBD)法. TBD 技术不对单帧图像做有无目标的判断,而是对序列图像采取基本无信息损失的跟踪关联,由于目标真实轨迹的能量累积值大于其他虚假轨迹,因而可以被有效筛选出来. TBD 技术包括多极假设检验法^[7]、粒子滤波法^[8]和动态规划法^[9-11]等. 粒子滤波法在单目标数据中检测结果较好,但在多目标处理时检测效率下降. 多极假设检验法在检测暗弱目标时,候选轨迹起始点增多,导致计算量大幅增加,检测性能下降. 动态规划(Dynamic Programming Algorithm, DPA)结构简单,将不可行的穷举搜索转换为马尔可夫过程,通过分段最优化解决了暗弱碎片轨迹关联问题,适合检测任意时刻、任意位置出现的暗弱点目标. 动态规划通过递归处理序列图像,计算量较大. 陈尚锋等^[12]在递归方程中增加了方向系数,文献[13]采用历史检测点拟合直线与目标运动方向偏差作为方向控制函数,从而减少目标状态个数和检测虚警率. 文献[14]将多速度平面分别计算的方式简化为速度初始化与历史速度修正. 这些改进方法需要目标的速度较小(<3 pixel/frame)才能保证算法性能.

实际应用中,GEO 带空间碎片在观测图像中运动速度较大,传统 DPA 的计算量将显著增加,当计算资源有限时,难以满足工程实时性的要求. 本文根据观测图像中不同信噪比碎片的运动特性,提出了一种基于信噪比的分级检测方法. 首先介绍 GEO 带碎片运动规律和恒星跟踪模式成像特点,得出了不同碎片运动相似的特性. 根据这一特性,采用帧差法快速、准确地检测高信噪比碎片,在检测结果中计算碎片的运动速度;根据计算速度对暗弱碎片运动位置进行预测,提出了一种基于位置预测的改进 DPA. 对不同信噪比碎片分级检测,充分发挥了 DBT 和 TBD 检测技术的优势,可有效检测出 GEO 带观测图像中的空间碎片.

1 分级检测基本思路

1.1 GEO 带光学观测图像中碎片运动特点分析

美国天基可见光(Space-based Visible, SBV)传感器在轨工作期间获得的空间碎片亮度分布情况如图 1^[15]. 从图中可以看出,空间碎片亮度不同,观测图像中会出现不同信噪比的碎片.

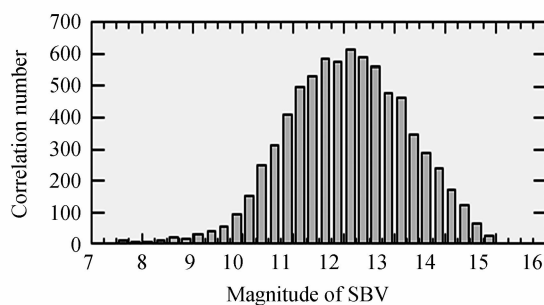


图 1 SBV 观测目标亮度分布
Fig. 1 Brightness distribution of targets observed by SBV

GEO 带空间碎片在摄动力长期作用下具有相同的演化规律^[16],不同碎片的运动轨迹并不是任意存在的,呈现出明显的正弦形状包络面,如图 2. 由图 2 可看出,GEO 带不同碎片具有相同形状的运动轨迹. GEO 碎片光学观测系统通常采取恒星跟踪模式观测,观测图像中恒星背景保持同步,而目标发生运动^[16]. 根据 GEO 碎片的运动演化规律,以及观测系统成像特性,利用摄影测量分析可知 GEO 带观测图像中不同碎片具有相似的运动. 由于 GEO 带光学观测系统视场大,数据采集过程中可能探测到多个碎片目标,如低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)、地球同步轨道以及地球同步转移轨道(Geostationary Transfer Orbit, GTO)

等.图3为SBV传感器获得的观测图像^[15].

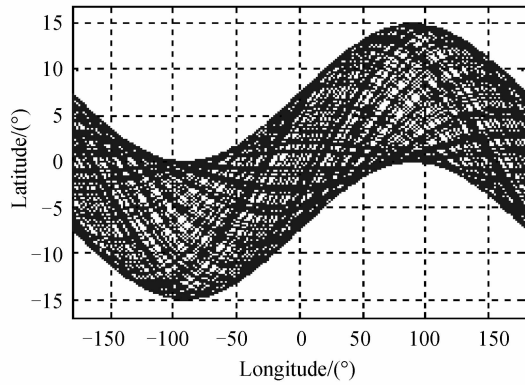


图2 GEO碎片运动轨迹
Fig.2 Track of GEO debris

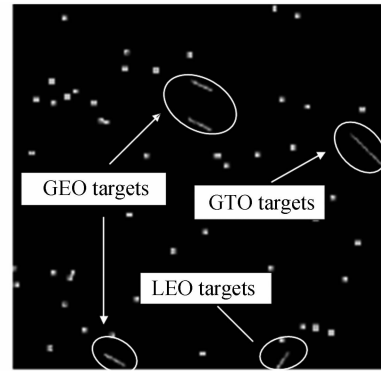


图3 SBV观测图像
Fig.3 Observed image of SBV

从图3中可看出,不同轨道碎片运动速度不同,而GEO带目标在图像中的速度相似.

1.2 检测流程

观测图像中含有不同信噪比的碎片,具有不同的形态分布特点,分级检测可以发挥不同检测技术的优势.对于高信噪比碎片,帧差法可以有效减少数据量;对处理结果进行轨迹关联,可筛选出具有稳定运动特性的空间碎片,根据运动特性可以剔除非GEO碎片.

高信噪比碎片检测结果可以估计出暗弱碎片的运动速度,根据速度信息优化动态规划检测方法,可有效提高检测实时性,降低虚警率.分级检测的流程如图4.

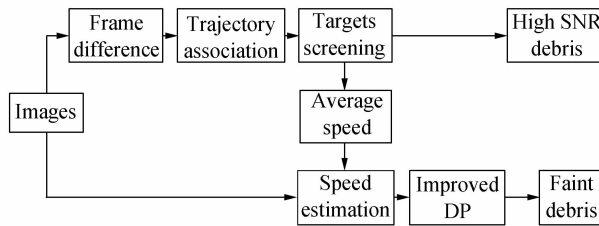


图4 GEO碎片检测流程
Fig.4 Flowchart of GEO debris detection

2 高信噪比碎片检测

观测图像中高信噪比碎片具有能量强、亮度高的特点,多数碎片尺寸较大,运动过程中灰度形态稳定,适合采取帧差法检测.

2.1 结合形态学处理的增强差分方法

观测图像中星空背景和恒星保持同步,而碎片发生运动.根据目标、背景以及噪声之间不同的运动特性,对序列图像相邻帧差分处理,可有效消除星空背景和恒星.相机参量自适应调整、外界复杂环境干扰、相机光学设备噪声等因素会引起图像灰度起伏,差分结果中含有较多的虚警.文献[17]提出了一种消除差分图像中背景残留的方法,即

$$f(i,j) = \begin{cases} \frac{k(f_n(i,j) - o^{se}(f_{n-1}(i,j)))}{\max(f_n(i,j), o^{se}(f_{n-1}(i,j)))} & f_n(i,j) > o^{se}(f_{n-1}(i,j)) \\ 0 & f_n(i,j) < o^{se}(f_{n-1}(i,j)) \end{cases} \quad (1)$$

式中, o^{se} 表示对图像采取形态学膨胀操作, n 为图像序列编号, k 是观测图像的饱和灰度值.该方法在消除背景残留时也降低了碎片信噪比,为了增强图像中的碎片,对式(1)改进得

$$f(i,j) = \begin{cases} l \times (f_n(i,j) - o^{se}(f_{n-1}(i,j))) & f_n(i,j) > o^{se}(f_{n-1}(i,j)) \\ 0 & f_n(i,j) < o^{se}(f_{n-1}(i,j)) \end{cases} \quad (2)$$

式中, l 为调节系数.检测过程中可根据图像特点选取合适的膨胀结构元和调节系数.

2.2 轨迹关联与目标筛选

利用式(2)去除观测图像背景,处理结果中包含空间碎片、恒星残留、噪声等.根据差分后图像的区域连通性特点,提取图像中的各个连通分量,得到各连通区的(星点)集合 $\mathbf{D}(k)$,其中 $k \in \{1, 2, \dots, q\}$ 表示第 k 帧图像, $\mathbf{D}_m(k)$ 表示第 k 帧图像中的第 m 个目标.假设 $N(\mathbf{D}_m(k))$ 表示目标的面积特征,即像素个数.实验中根据图像特点,剔除 $N(\mathbf{D}_m(k))$ 小于一定阈值的星点,从而减少轨迹关联的计算量.星点的质心特征为^[2]

$$\begin{cases} C_x(\mathbf{D}_m(k)) = \frac{\sum_{(x,y) \in \mathbf{D}_m(k)} x \cdot \mathbf{I}(x,y,k)}{\sum_{(x,y) \in \mathbf{D}_m(k)} \mathbf{I}(x,y,k)} \\ C_y(\mathbf{D}_m(k)) = \frac{\sum_{(x,y) \in \mathbf{D}_m(k)} y \cdot \mathbf{I}(x,y,k)}{\sum_{(x,y) \in \mathbf{D}_m(k)} \mathbf{I}(x,y,k)} \end{cases} \quad (3)$$

由于探测距离远,GEO 碎片在相邻图像中运动速度变化较小,而恒星残留和噪声无运动相关性.本文根据速度大小和方向双约束条件,判定三帧连续图像中星点所有的轨迹.星点的速度特征为

$$V(\mathbf{D}_m(k)) = C(\mathbf{D}_m(k)) - C(\mathbf{D}_m(k-1)) \quad (4)$$

$\mathbf{D}_{m1}(k-1), \mathbf{D}_{m2}(k), \mathbf{D}_{m3}(k+1)$ 为碎片运动真实轨迹的判断条件,即

$$\begin{cases} |V(\mathbf{D}_{m2}(k)) - V(\mathbf{D}_{m3}(k+1))| < \delta \\ \theta(\mathbf{D}_{m1}(k-1)\mathbf{D}_{m2}(k), \mathbf{D}_{m2}(k)\mathbf{D}_{m3}(k+1)) < \sigma \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\theta(\mathbf{D}_{m1}(k-1)\mathbf{D}_{m2}(k), \mathbf{D}_{m2}(k)\mathbf{D}_{m3}(k+1)) = \arccos\left(\frac{V(\mathbf{D}_{m2}(k)) \cdot V(\mathbf{D}_{m3}(k+1))}{|V(\mathbf{D}_{m2}(k))| |V(\mathbf{D}_{m3}(k+1))|}\right) \quad (6)$$

实验中可根据实际图像特点确定角度变化量 σ 和速度大小变化量 δ .

利用式(5)和式(6)可以得到具有稳定运动特性的碎片.观测图像中包含非 GEO 碎片,从图 3 可知,非 GEO 碎片与 GEO 碎片的运动差别较大.根据 GEO 碎片的运动稳定性,当 $V(\mathbf{D}_m(k))$ 与 $k-1$ 帧图像中碎片平均速度的差异小于判定阈值时,星点 $\mathbf{D}_m(k)$ 为 GEO 碎片;当速度差异大于判定阈值时,该点为非 GEO 碎片,予以剔除.

3 暗弱碎片检测

3.1 速度估计

采用 2.2 节方法可筛选出高信噪比 GEO 碎片,并得到每个碎片的运动速度.不同信噪比碎片运动存在差异,以及复杂成像环境会导致高信噪比碎片计算速度与实际速度存在偏差.单个高信噪比碎片不能准确估计观测图像中暗弱碎片的速度,本文计算所有高信噪比碎片的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{m=1}^s v(\mathbf{D}_m(k))}{s} \quad (7)$$

式中, s 为第 k 帧图像中检测得到的高信噪比碎片速度.利用式(7)可估计暗弱碎片的运动速度.

为了减少动态规划检测方法的计算量,可对碎片运动速度进行估计.对于第 k 帧图像中的碎片,估计速度 v_k 的方法为:

(1) 当 2.2 节中未能检测到高信噪比碎片时, v_k 为 $k-1$ 帧图像中的估计速度 v_{k-1} ;

(2) 当 2.2 节中检测到高信噪比碎片,且 \bar{v}_k 与 $k-1$ 帧图像中估计速度 v_{k-1} 相差小于 1 pixel 时,估计速度为 v_{k-1} ;

(3) 当 2.2 节中检测到高信噪比碎片,且 \bar{v}_k 与 $k-1$ 帧图像中估计速度 v_{k-1} 相差大于 1 pixel 时,估计速度为 \bar{v}_k .

设 dv 为速度估计偏差,则暗弱碎片的实际速度为

$$v = v_o + dv \quad (8)$$

3.2 基于速度估计的改进 DPA

动态规划的原理是将小目标检测的轨迹搜索问题视为 Markov 过程,通过分段最优化实现轨迹关联.假设光学传感器各像素点的量测值为

$$z_k(i, j) = \begin{cases} T_k + \mathbf{B}_k(i, j) \\ \mathbf{B}_k(i, j) \end{cases} \quad (9)$$

分别表示有无目标的量测值,其中 T_k 为目标灰度; $\mathbf{B}_k(i, j)$ 为背景灰度,假设满足独立高斯分布, k 为图像序列编号.定义 n 帧图像序列中一条轨迹 $\mathbf{p}(n)$ 为

$$\mathbf{p}(n) = \{x_k | k=1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

式中 x_k 为轨迹上的点,当 $\mathbf{p}(n)$ 为目标真实轨迹时,序列图像能量累积值最大^[12],则目标轨迹搜索过程为

$$f_k(x_k) = \max \left\{ z_k + \sum_{i=1}^{k-1} z_i \right\} = \max \left\{ z_k + \max_{\text{PRE}(x_k)} \left\{ z_{k-1} + \dots + \max_{\text{PRE}(x_3)} \left\{ z_2 + \max_{\text{PRE}(x_2)} \left\{ z_1 \right\} \right\} \right\} \right\} \quad (11)$$

其中, $f_k(x_k)$ 是以 x_k 为端点的轨迹目标函数.假设(亚)像素级点目标的运动速度满足 $v < m$ pixel/frame,当速度方向未知时,目标的搜索范围 PRE 为

$$\text{PRE}(x_k) = \left\{ \begin{array}{l} X' = (x', y') | x' \in (x_k - m, x_k + m), \\ y' \in (y_k - m, y_k + m) \end{array} \right\} \quad (12)$$

PRE 反映了目标点的来源以及扩展范围.定义 $h_k(x_k)$ 为阶段值函数

$$h_k(x_k) = z_k + \max_{\text{PRE}(x_k)} \{h_{k-1}(x_{k-1})\} \quad (13)$$

则由式(11)可得

$$f_k(x_k) = \max[h_k(x_k)] \quad (14)$$

根据式(8)预测暗弱碎片在相邻图像帧的位置,可得到缩小的目标搜索范围 $\mathbf{S}(x_k)$

$$\mathbf{S}(x_k) = \left\{ \begin{array}{l} X'' = (x'', y'') \\ |x'' \in (x_k + v_x - dv_x, x_k + v_x + dv_x) \\ y'' \in (y_k + v_y - dv_y, y_k + v_y + dv_y) \end{array} \right\} \quad (15)$$

从定义可知, $\mathbf{S}(x_k) \in \text{PRE}(x_k)$.传统 DPA 的递归方程中,目标搜索范围 $\mathbf{S}(x_k)$ 是碎片可能出现的区域,随速度增大而增大;而改进方法根据估计速度预测碎片在相邻帧的位置,以该位置为中心,以速度估计偏差 dv 作为碎片可能出现的区域,搜索范围和速度大小无关.由于本文方法减少了递归方程的状态个数,可降低检测时间和虚警率.

4 实验结果与分析

4.1 实验条件及相关参量设置

为了验证本文方法的检测性能,选择 GEO 碎片实际天基观测图像进行实验.实验数据为一个完整观测周期,共包含 587 帧,含有 15 个目标,图像采集方式为恒星跟踪模式,数据类型为 16 bit,拍摄时对点目标采取了散焦处理.

实验中定义目标局部信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{u_t - u_b}{\sigma_b} \quad (16)$$

式中, u_t 和 u_b 分别为碎片和碎片周围局部背景灰度均值, σ_b 为碎片周围局部背景灰度标准差.碎片检测率 p_d 和虚警率 p_f 定义如式(17)所示^[2].

$$p_d = \frac{k}{T}, p_f = \frac{f}{T} \quad (17)$$

式中, k 和 f 分别为碎片检测次数和检测虚警个数, T 表示图像序列中所有碎片出现的总次数.实验软件平台为 matlab2014a,硬件配置为 Intel 四单核 2.8G CPU,4G 内存.

实验中膨胀结构体大小为 5×5 Pixel,调节系数 l 为 300.为了确定速度大小变化阈值 σ 和相邻帧速度夹角阈值 δ ,对实测数据中 15 个目标点的速度变化情况进行统计,所有目标总计出现 638 次,统计结果如图 5 和图 6 所示.

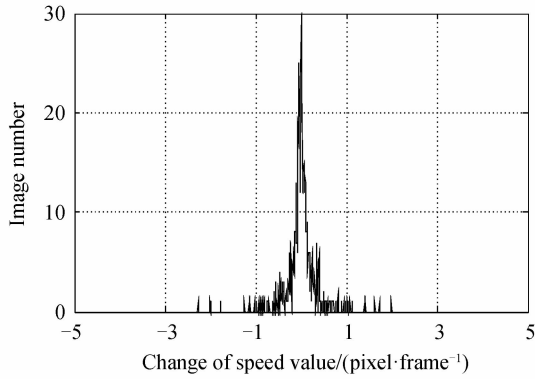


图5 相邻帧速度变化分布
Fig 5 Distribution of velocity variation of adjacent frame

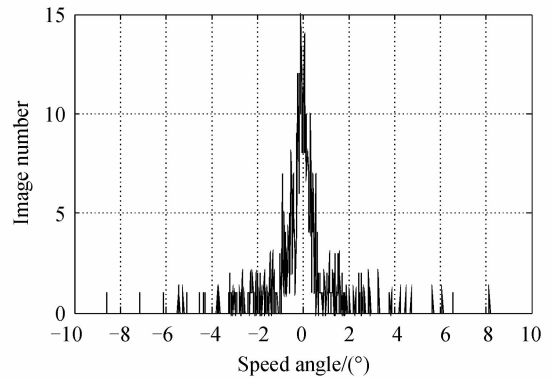


图6 相邻帧速度夹角分布
Fig 6 Distribution of velocity's angle of adjacent frame

可以看出,实际数据中不同碎片速度改变量和相邻帧夹角近似满足高斯分布,阈值计算公式为

$$\text{thred} = u + 3\sigma \tag{18}$$

式中, u 和 σ 分别为相邻帧速度大小变化量和夹角的均值和方差. 实际数据处理结果见表 1.

表 1 处理结果统计

Table 1 Statistical processing results

Parameter index	Velocity variation/(pixel · frame ⁻¹)	Angle variation/(°)
Mean	0.676 3	0.625 4
Variance	2.818 7	1.872
Threshold	9.132 5	6.241 5

根据处理结果,实验中设置速度变化阈值 σ 为 10 pixel/frame;相邻帧速度夹角阈值 δ 设置为 7° . 由于不同周期观测的 GEO 碎片轨道相近,当采取相同的观测模式时,观测图像中碎片运动特点相似,因此本文分析结果同样可作为处理其他观测数据的参考值.

4.2 实验结果分析

图 7 为实际图像检测结果,其中,7(a)是原始图像数据,包含 4 个信噪比不同的碎片目标;7(b)是增强差分检测结果. 从图中可以看出,增强差分未能检测到暗弱碎片,表明处理过程中损失了碎片信息. 7(c)是改进 DPA 的检测结果,可以有效检测出暗弱碎片.

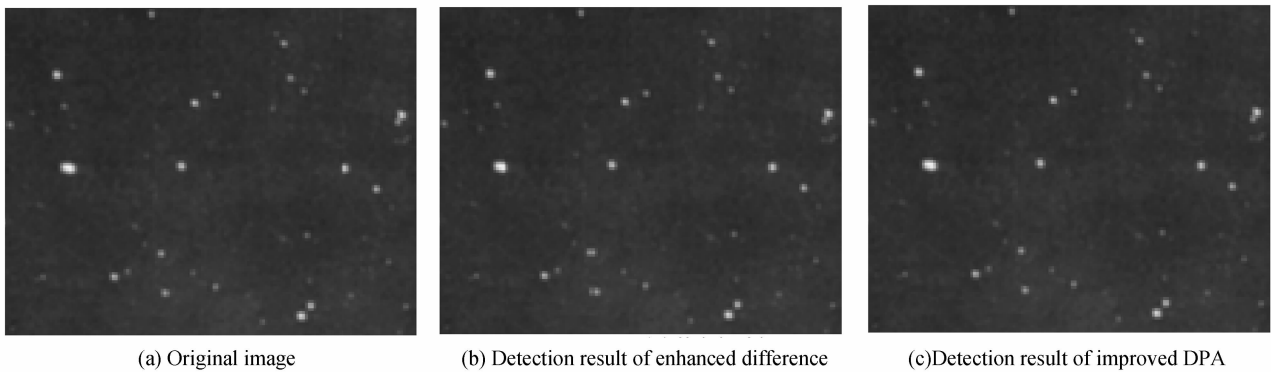


图 7 实际图像检测结果
Fig. 7 Detection result of actual image

4.2.1 检测性能分析

帧差法可以有效检测出高信噪比碎片,根据检测结果可计算碎片的平均速度,并对暗弱碎片的运动进行估计. 改进 DPA 根据估计速度预测暗弱碎片的位置,由于估计速度与实际速度存在偏差,不同碎片的速度估计偏差不相同,当搜索窗口小于速度估计偏差时将丢失目标,搜索窗口增大则算法计算量增加,因此搜索窗口的选择将影响算法性能.

相比于传统 DPA,由于 $S(x_k) \in \text{PRE}(x_k)$,位置预测可以避免预测区域以外的虚假状态引起的检测虚

警.为了分析分级检测方法的有效性,对比不同搜索窗口下的检测性能.实验中递归方程帧数为5帧,对587帧实测图像的检测结果如表2所示.由于实验采用的图像中碎片运动速度最大为15pixel/frame,传统方法的搜索范围设置为3030 pixel.

表2 不同搜索窗口的检测性能

Search window/pixel	Detection rate	False rate
3×3	92.31%	5.21%
4×4	93.25%	5.75%
5×5	96.17%	6.14%
6×6	96.65%	7.16%
7×7	97.05%	8.51%
Original DPA	97.63%	14.21%

从表2中可以看出,不同搜索窗口的检测率均高于90%,表明分级检测方法可以有效检测出空间碎片.当改进动态规划的搜索范围小于5×5 pixel时,目标的检测率小于0.95,随着搜索窗口的增大,目标检测率增大.当搜索范围大于5×5 pixel时,检测率的改变不明显.改进方法在不同搜索范围下的检测虚警率均低于10%,而传统方法由于搜索范围较大,检测虚警率大于10%.当搜索窗口为7×7 pixel时,改进方法的检测率和传统DPA相当,虚警率下降了5.7%,当搜索窗口为5×5 pixel时,检测率较传统DPA下降了1.51%,而虚警率下降了8.08%.

4.2.2 检测时间分析

位置预测可以减少碎片状态个数,从而减少检测计算量.为了确定最佳的搜索窗口,在相同实验条件下,统计了不同大小的目标搜索范围的检测时间,如表3所示.

表3 不同搜索窗口的检测时间

Size/pixel	2 frame	3 frame	4 frame	5 frame	6 frame	7 frame
3×3	5.61 s	5.84 s	6.01 s	8.61 s	26.7 s	127.3 s
4×4	5.68 s	5.93 s	6.57 s	10.11 s	34.35 s	212.13 s
5×5	5.75 s	6.05 s	7.06 s	13.32 s	44.81 s	337.3 s
6×6	5.86 s	6.17 s	8.01 s	16.74 s	57.78 s	469.23 s
7×7	5.99 s	6.32 s	9.1 s	22.61 s	73.13 s	601.21 s
30×30	6.28 s	8.15 s	27.1 s	106.1 s	429.72 s	5 236.25 s

从实验结果可看出,当处理帧数小于3帧时,不同搜索窗口下的检测时间无明显差异;当处理帧数大于5帧时,不同搜索窗口的检测时间均大幅增加.通过处理实际图像数据得知:除少数碎片外,观测图像中碎片的速度差异小于3 pixel/frame.当累积帧数为5帧时,7×7 pixel搜索窗口的检测时间是传统方法(3030 pixel)检测时间的20.36%;而5×5 pixel搜索窗口的检测时间是传统方法检测时间的12.55%.综合分析检测率、虚警率和检测时间,本文方法在5×5 pixel的搜索窗口下检测性能最好.

4.2.3 不同方法检测性能分析

本节详细比较了本文提出的基于信噪比的分级检测方法与其他三种改进动态规划方法的检测速度与性能.对比的三种方法分别为Chen等^[12],Cao等^[13],Wang等^[14]提出的检测方法.下文中,分别简称这三种方法为Chen法,Cao法和Wang法.三种方法均在递归模型中加入了不同形式的方向信息加权,从而提高了轨迹关联的准确性.实验中,本文方法的搜索窗口为5×5 pixel,不同方法均在相同条件下实验,结果如表4所示.

表4 不同方法的检测时间

Size/pixel	2 frame	3 frame	4 frame	5 frame	6 frame	7 frame
Chen	6.09	8.24 s	26.31 s	108.43 s	408.27 s	5 027.31 s
Cao	6.11	8.13 s	26.12 s	101.24 s	4 24.35 s	5 112.34 s
Wang	5.99 s	8.05 s	25.37 s	80.42 s	384.12 s	4 537.3 s
Proposed method	5.81 s	6.12 s	7.46 s	12.52 s	46.32 s	341.23 s

实验过程中发现,当累积帧数为5帧时,四种方法的检测率和虚警率相当.而从表4中可看出,本文方法的检测时间较其他三种方法明显降低,表明通过位置预测可缩小递归方程中目标搜索范围,大幅减少计算复杂度.Chen法和Cao法通过在运动方向上加入速度方向性限制,能够提高检测率和降低虚警率,但未能降低

检测复杂度. Wang 法通过将多速度平面分别计算的方式简化为速度初始化与历史速度修正,检测时间较 Chen 法和 Cao 法下降,但未能明显降低算法复杂度.

基于分级检测的动态规划方法综合了 TBD 和 DBT 检测技术的优势,具有检测率高、虚警率低和实时性好的优势.

5 结论

为了从 GEO 带光学观测图像中快速检测出空间碎片,根据图像中不同信噪比碎片运动相似的特性,提出了一种基于目标信噪比的分级检测方法.采用帧差法快速检测出高信噪比碎片,利用检测结果计算碎片运动速度,对低信噪比碎片运动速度进行估计并预测运动位置,提出了一种改进的动态规划方法.实测数据处理结果表明分级检测法可以有效检测出 GEO 观测图像中的空间碎片,检测概率高于 90%.当目标搜索窗口为 5 pixel \times 5 pixel 时检测性能较优,当累积帧数大于 5 帧时,检测时间比传统 DPA 减少了 87%以上,检测虚警率降低 8.08%.对比实验表明,本文方法的检测效率优于其他几种改进的动态规划方法.综合分析检测率、虚警率和检测时间等性能,本文方法适合于 GEO 带光学观测图像中空间碎片的检测.

参考文献

- [1] LIU Mei-ying, WANG Hu, WEN De-sheng, *et al.* Celestial positioning method and observation analysis for space object [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2014, **43**(11): 1112005.
刘美莹, 王虎, 汶德胜, 等. 空间目标天文定位方法及观测分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 1112005.
- [2] YAO Rui, ZHANG Yan-ning, YANG Tao, *et al.* Detection of small space target based on iterative distance classification and trajectory association[J] *Optics and Precision Engineering*. 2012, **20**(1): 179-189.
姚睿, 张艳宁, 杨涛, 等. 基于迭代距离分类与轨迹关联检测空间暗弱碎片[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(1): 179-189.
- [3] YI Wei. Research on track-before-detect algorithms for multiple-target detection and tracking[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China. 2012.
易伟. 基于检测前跟踪技术的多目标跟踪算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] LONG Jian-wu, SHEN Xuan-jing, ZANG Hui, *et al.* An adaptive thresholding algorithm by background estimation in Gaussian scale space[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(08): 1773-1782.
龙建武, 申铉京, 臧慧, 等. 高斯尺度空间下估计背景的自适应阈值分割算法[J]. 自动化学报, 2014, **40**(08): 1773-1782.
- [5] SUN Xin-de, BO Shu-kui, LI Ling-ling. Study of infrared image clutter suppression based on background estimation[J]. *Laser & Infrared*. 2011, **41**(05): 586-590.
孙新德, 薄树奎, 李玲玲. 基于背景估计的红外图像杂波抑制方法研究[J]. 激光与红外, 2011, **41**(05): 586-590.
- [6] ZHAO Jian, The research of moving target detection method based on three-frame difference [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
赵建. 基于三帧差法的运动目标检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [7] ZHU Rui-qi, QI Nai-xin, ZHANG Sheng-xiu, *et al.* Improved infrared object tracking algorithm based on particle filter [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*. , 2014, **35**(3): 133-136.
朱瑞奇, 齐乃新, 张胜修, 等. 一种基于粒子滤波的改进红外目标跟踪算法[J]. 四川兵工学报, 2014, **35**(3): 133-136.
- [8] DAVEY S, RUTTEN M, CHEUNG B. A comparison of detection performance for several track-before-detect algorithms[J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2007, 2008, **35**(1): 1-10.
- [9] ZHENG D, WANG S, QIN X. A dynamic programming track-before-detect algorithm based on local linearization for non-gaussian clutter background[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2016, **25**(3): 583-590.
- [10] MOREIRA G, PAQUETE L, DUCZMAL H, *et al.* Multi-objective dynamic programming for spatial cluster detection [J]. *Environmental & Ecological Statistics*, 2015, **22**(2): 369-391.
- [11] EMANUEL G, MARCO L, LUCU V, *et al.* A novel dynamic programming algorithm for track-before-detect in radar systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, **61**(10): 2608-2619.
- [12] CHEN Shang-feng, CHEN Hua-ming, LU Huan-zhang. Detection and tracking of dim targets based on dynamic programming and track matching[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2003, **25**(2): 46-50.
陈尚锋, 陈华明, 卢焕章. 基于加权动态规划和航迹关联的小目标检测技术[J]. 国防科技大学学报, 2003, **25**(2): 46-50.
- [13] CAO Qi, WANG De-jiang, ZHANG Qi, *et al.* Energy accumulation in infrared point target detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 741-747.

- 曹琦,王德江,张齐,等. 红外点目标检测中的能量累积[J]. 光学精密工程,2010,**18**(3): 741-747.
- [14] WANG Xue-wei, WANG Chun-xin, ZHANG Yu-ye, *et al.* Detection of small space target by dynamic programming [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 477-484.
王学伟,王春歆,张玉叶,等. 空间小目标动态规划检测[J]. 光学精密工程,2010,**18**(2): 477-484.
- [15] SHARMA J, BRAUN C, GAPOSCHKIN E, *et al.* Space-based visible data reduction[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2015, **23**(23): 170-174.
- [16] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测[M]. 北京:中国科学技术出版社,2011.
- [17] WEI Min, WEN Wu, ZHANG Jiang-nan. A difference enhancement method of small target under celestial background [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2015, **30**(3): 239-242.
魏敏,文武,张江楠. 星空背景的弱小目标差分增强方法[J]. 成都信息工程学院学报, 2015, **30**(3):239-242.