

文章编号 1004-924X(2017)02-0537-10

## GEO 碎片天基观测图像速度估计与动态规划检测

黄建余, 谭继波\*, 吴文堂, 王鲲鹏  
(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:**本文提出了一种基于位置预测的动态规划方法,用于快速检测 GEO 带天基观测图像中的暗弱碎片。首先对实测数据进行分析,得出不同 GEO 碎片在图像中的运动速度相似,接着,进一步对数据做拟合,得到了 GEO 碎片速度和观测卫星星下点纬度之间的映射模型,并提出了 GEO 带天基观测图像中碎片速度估计方法。最后,利用估计速度预测碎片位置,在传统动态规划递归方程中采取位置信息加权,得到了基于位置预测的目标搜索范围,从而减少了递归方程中的目标状态个数。实测数据验证了速度映射模型的拟合偏差在 1 pixel 以内。选取一个典型观测周期的实测数据进行实验,结果表明本文方法的检测时间比传统动态规划方法减少了 90% 以上,虚警率降低了 5.9% 以上,适合于 GEO 带天基观测图像中暗弱碎片的检测。

**关键词:**GEO 碎片;目标检测;动态规划;速度估计;位置预测

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0537

## Velocity estimation of GEO debris space-based observation image and dynamic programming detection

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

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

\* Corresponding author, E-mail: tjbl20b@126.com

**Abstract:** An improved dynamic programming method based on position predication was proposed in the paper to quickly detect dim and small debris from the space-based observed images on GEO band. Firstly, after analyzing the observed data, we found that different GEO debris have same movement velocity in images, after further data fitting, we obtained a mapping model between the velocity of image debris and sub-star latitude of observation satellite and proposed a method to estimate the debris velocity in space-based observation images on the GEO band, at last, debris position was predicted by estimating velocity, then position information weight was applied in traditional dynamic programming recursive equation, and the object searching range was obtained based on position prediction, resulting in the number of object status in the recursive equation were reduced. Measured data verified that fitting deviation of velocity mapping model was within 1pixel. We selected the measured data within typical observation period for test and the results show that the detection time taken by proposed method has been reduced by more than 90% as compared with traditional dynamic programming methods, and the virtual scenery rate has also been

收稿日期:2016-08-05;修订日期:2016-09-02.

基金项目:国家高技术 863 计划资助项目(No. 2015AA7088061)

reduced by more than 5.9%. It can be conclusion that the method is suitable for detection of dim and small debris from the space-based observation images on GEO band.

**Key words:** GEO debris; object detection; dynamic programming; velocity estimate; position prediction

## 1 引言

天基光学观测是获取 GEO 带空间碎片信息的重要手段,观测图像中碎片信噪比低,灰度形态与背景恒星相似,往往湮没在复杂的背景噪声中,难以区分。因此,如何在低信噪比条件下实现暗弱 GEO 碎片检测具有重要的现实意义和应用价值<sup>[1-3]</sup>。

对于暗弱 GEO 碎片检测,目前有两种典型的技术思路:检测后跟踪(Detect-Before-Track, DBT)和检测前跟踪(Track-Before-Detect, TBD)方法。DBT 技术研究起步较早,典型的处理方式是阈值分割法。该方法对单帧图像进行门限分割,检测门限可减少后续跟踪处理数据量,但会丢失目标信息,不利于暗弱目标的检测。TBD 技术适合检测暗弱目标,典型方法包括多极假设检验<sup>[4]</sup>、粒子滤波<sup>[5]</sup>和动态规划<sup>[6-8]</sup>。多极假设检验法在信噪比较低的条件下,候选轨迹起始点较多,导致检测性能有所下降;粒子滤波法可有效检测单目标,但在多目标检测中算法性能有所下降。动态规划法(Dynamic Programming Algorithm, DPA)通过分段最优化解决了暗弱目标轨迹搜索问题,由 BARNIV 最早提出并应用于小目标检测<sup>[9]</sup>。随后 JAMES 将递归方程中的似然函数修改为对数似然比函数<sup>[10]</sup>,使得算法能够更好地适应非线性噪声模型。TONISSEN 等人<sup>[11]</sup>将量测和作为最优值函数,省去了递归过程中复杂的转移函数,使算法适用于检测灰度起伏的目标。BARNIV、JAMES 和 TONISSEN 的 3 种方法是 DPA 研究的基础。

动态规划通过递归求解各个阶段函数的最大值,计算量通常较大。陈尚锋等人<sup>[12]</sup>以 TONISSEN 的方法为基础,在递归方程中增加了方向系数,来减小计算量和虚警。文献<sup>[13]</sup>采用历史检测点拟合直线与目标运动方向的偏差,作为方向控制函数。王学伟等人则将多速度平面分别计算简化为速度初始化与历史速度修正方式<sup>[14]</sup>。总

的来说,这些改进方法要在目标速度较小( $< 3 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ )的情况下才能保证算法性能。

对于 GEO 带天基观测而言,角分辨率越高,像面目标移动速度越快,目前典型系统中,图像中暗弱碎片的运动速度通常大于  $15 \text{ pixel/frame}$ ,传统动态规划检测方法的计算量将显著增加,检测性能下降。本文通过估计观测图像中碎片的速度,对碎片运动位置进行预测,提出了基于位置预测的动态规划方法。位置预测可缩小目标搜索范围,有效减少算法计算量。另外,改进方法减少了递归方程中的目标状态个数,可降低孤立噪声等干扰因素带来的检测虚警。

## 2 碎片速度估计

### 2.1 GEO 带天基观测图像中碎片运动特点分析

GEO 区域空间碎片轨道主要受日月引力摄动、地球扁率及其带谐系数  $J_2$  的影响,轨道倾角遵循发生周期约为 54 年的循环变化,变化范围在  $i_{\max} = 15^\circ$  以内。不同 GEO 碎片的运动轨迹并不是任意存在的,而是呈现出明显的正弦形状包络面,这是因为在摄动力的长期作用下,GEO 带空间碎片具有相同的演化规律<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。

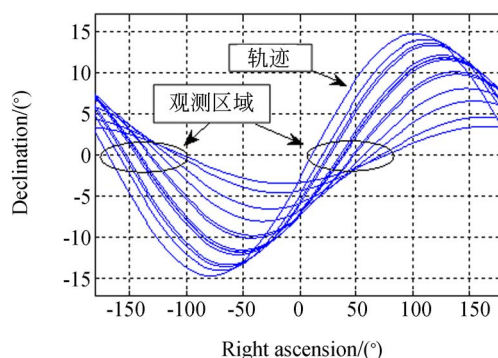


图 1 GEO 碎片轨迹分布

Fig. 1 Track distributions of GEO debris

GEO 带天基观测系统通常采用太阳同步轨道,对 GEO 轨道带的一定区域采取恒星跟踪模式观测<sup>[16]</sup>。在此模式下,恒星背景在图像中保持

静止,目标发生运动典型的观测系统是美国的可见光(Space-based Visible, SBV)传感器<sup>[17]</sup>,其观测模式如图 2 所示。

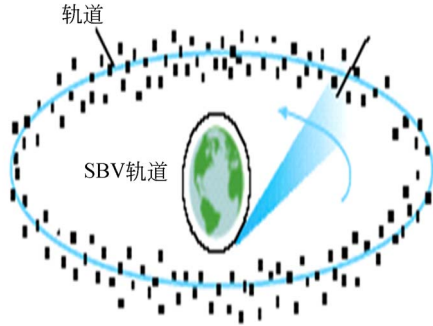


图 2 GEO 碎片天基观测示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Space-based observation schematic for GEO debris<sup>[17]</sup>

根据 GEO 带碎片的演化规律,以及观测系统的成像特性,通过摄影测量分析可知 GEO 带碎片天基观测图像存在两个特点:(1)图像中不同的 GEO 碎片运动规律相似;(2)不同观测周期的相同观测位置,碎片的运动速度相似。根据观测图像特点可得出,碎片目标在图像中的速度和观测位置之间存在映射关系,且不同碎片近似满足相同的映射模型。本文选用观测卫星星下点纬度来确定卫星在观测周期内的不同位置。观测图像中 GEO 碎片的运动特点也可通过图像数据分析,图 3 为 SBV 观测图像中不同碎片的运动轨迹<sup>[18]</sup>。

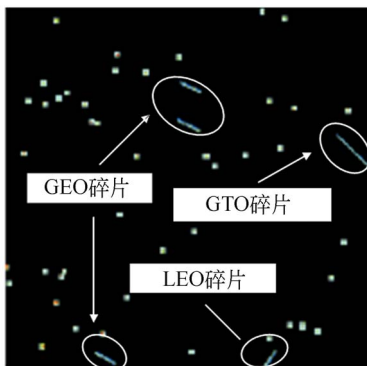


图 3 SBV 观测图像碎片运动轨迹<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Moving trajectories of debris on observed image of SBV<sup>[18]</sup>

从图中可以看出,不同 GEO 碎片运动相似,均为类直线运动,且与其他轨道的碎片运动存在差异。图 4 和图 5 为典型连续图像中碎片在不同方向的速度。

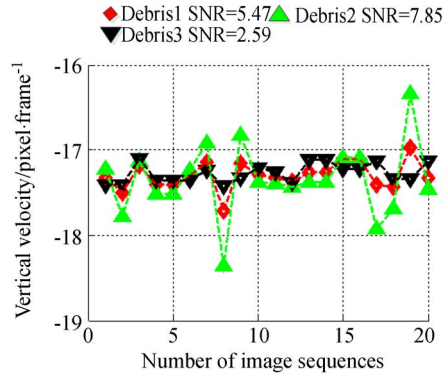


图 4 典型碎片竖直方向运动速度

Fig. 4 Vertical velocity of typical debris

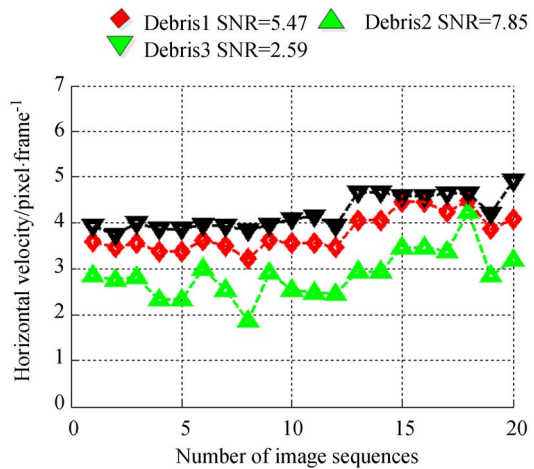


图 5 典型碎片水平方向运动速度

Fig. 5 Horizontal velocity of typical debris

从图中可看出,不同碎片的运动速度差别较小,可采用平均速度反映观测图像中碎片目标的运动。因此,本文分析了碎片目标平均速度与观测卫星星下点纬度之间的映射规律。一个完整的观测周期包括降轨段和升轨段,图 6 为典型观测周期内观测卫星星下点纬度和碎片速度的分布,星下点为负值代表南纬度。实验中对不同观测周期的处理结果具有相似的特性。

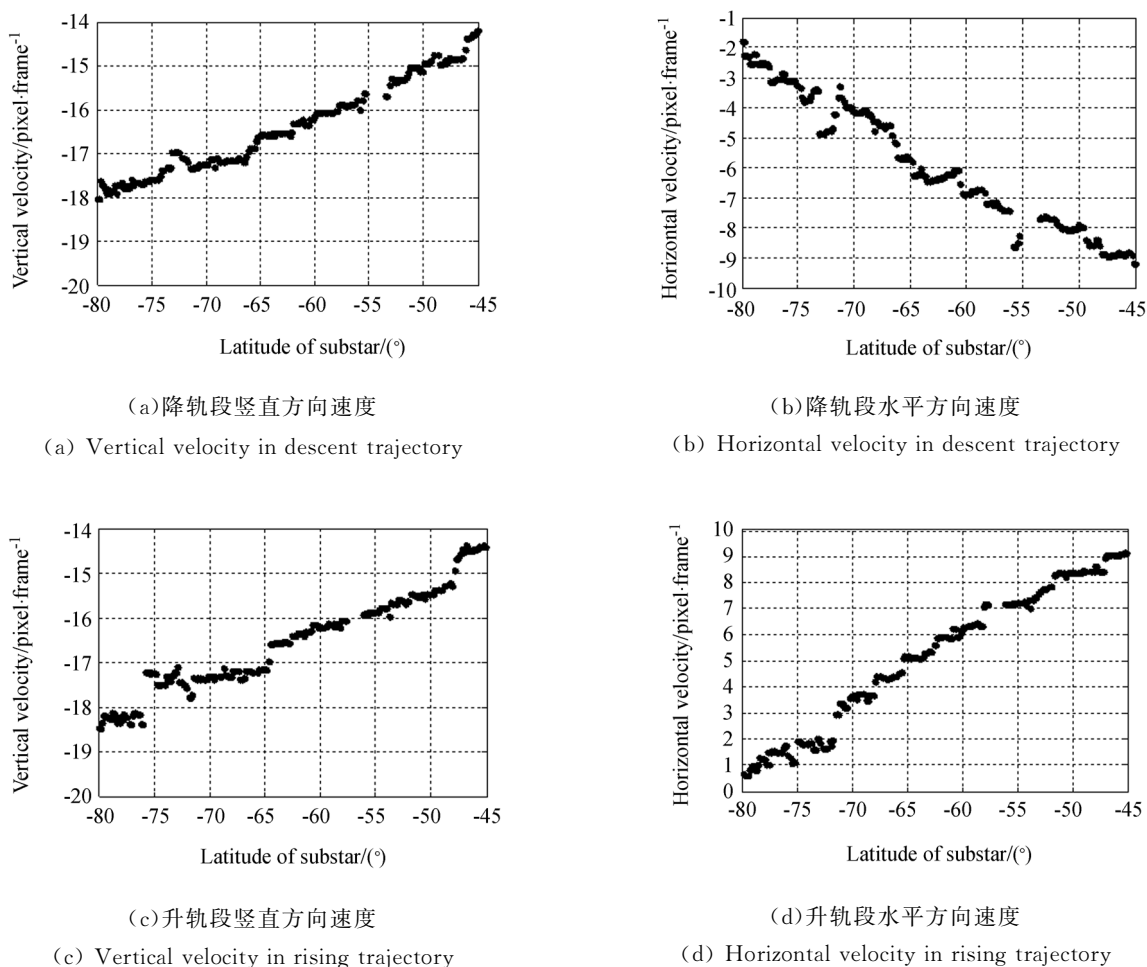


图 6 星下点纬度和碎片速度分布

Fig. 6 Distribution of sub-star latitudes and debris' velocities

## 2.2 速度估计模型的建立与分析

2.1 分析表明,观测图像中 GEO 碎片的速度和观测卫星星下点纬度之间存在映射关系。为了确定映射模型,从实测数据中选择 3 个完整的观测周期进行分析,数据 1 包含 587 帧,含有 15 个目标;数据 2 包含 595 帧,含有 23 个目标;数据 3 包含 595 帧,含有 26 个目标;3 个观测周期的数据为同一天拍摄。GEO 带天基观测系统采用恒星跟踪模式,在卫星姿态不作机动的条件下,观测相机视场只在南半球的一定纬度内才能指向 GEO 带。降轨和升轨过程中目标的运动不同,因此本文分别对降轨段和升轨段进行分析。

通过建立 GEO 碎片的速度和观测卫星星下点纬度之间的映射模型,可对碎片目标的速度进行估计。假设碎片在竖直方向和水平方向的速度

分别为  $f(x)$  和  $g(x)$ ,其中  $x$  为观测卫星星下点纬度。对实验数据进行拟合,可得出  $f(x)$  和  $g(x)$  的表达式。估计速度的精确性决定了预测位置是否精确,而位置预测偏差就是改进算法中目标可能的机动范围。由于图像中最小单位是像素,为了使得算法计算量最小,将 1 pixel 偏差作为速度估计目标。速度拟合模型的结构应该尽量简单,以降低模型的计算复杂度。

为了使拟合模型有较强的适应性,本文对 3 个图像序列进行综合分析,计算碎片在相同星下点纬度的平均速度。以均方根误差(RMSE)和相关系数(R-square)作为评价指标,得到了满足速度估计偏差目标值的函数模型,拟合结果如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出,拟合模型与实际数据相符合,除少数观测位置外,拟合偏差小于 1

pixel,拟合表达式如公式(1)和(2)所示:

$$f(x) = a + b\cos(dx) + c\sin(dx), \quad (1)$$

$$g(x) = a\sin(bx + c), \quad (2)$$

其中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为模型拟合参数,具体数值如表 1 所示。

表 1 拟合参数及评价指标

Tab. 1 Fitting parameters and evaluation indexes

	$a$	$b$	$c$	$d$	RMSE	R-square
$f_1$	-16.550	0.224	1.385	0.102	0.253	0.950
$f_2$	-16.240	-0.967	1.108	0.091	0.230	0.955
$g_1$	11.440	0.024	-7.442		0.332	0.983
$g_2$	11.440	0.024	-4.237		0.254	0.991

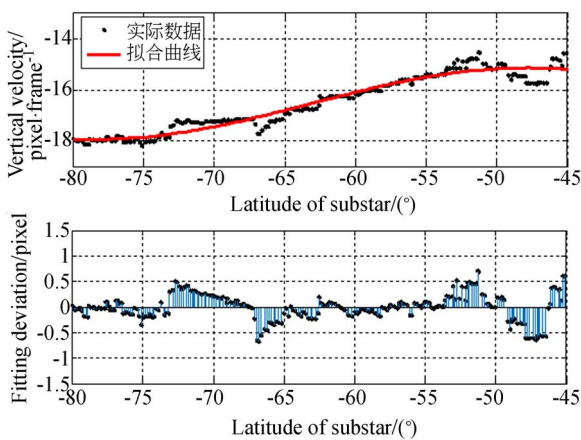
表中,  $f_1$  和  $g_1$  为降轨段不同方向的速度映射模型,  $f_2$  和  $g_2$  为升轨段不同方向的速度映射模型。从表 1 可看出,拟合模型的均方根误差(RMSE)小于 0.4 pixel,表明拟合曲线和实际数据偏差较小;相关系数(R-square)均超过 0.95,表明拟合曲线与实际数据相似度较高。

从图中可以看出,拟合偏差近似满足高斯分布,因此可根据公式(3)确定速度预测偏差。

$$d v = u + 3\sigma, \quad (3)$$

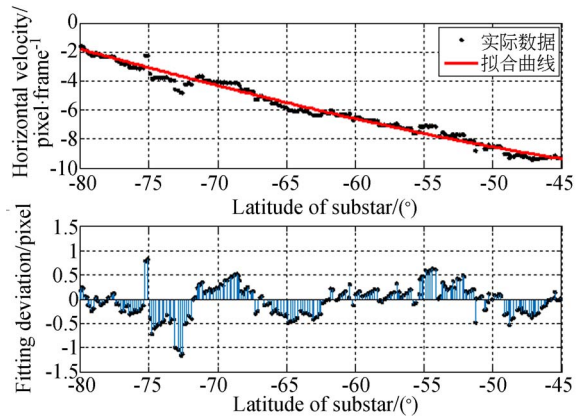
其中,  $u$  和  $\sigma$  分别为拟合偏差的均值和方差。根据实际数据,本文得到的速度预测偏差为 1.004 pixel,满足最小化目标搜索范围的目标。

利用天基观测卫星的星下点纬度,由式(1)和式(2)可得到图像中碎片目标的估计速度  $v_0$ 。观测图像中碎片速度  $v$  可由公式(4)计算:



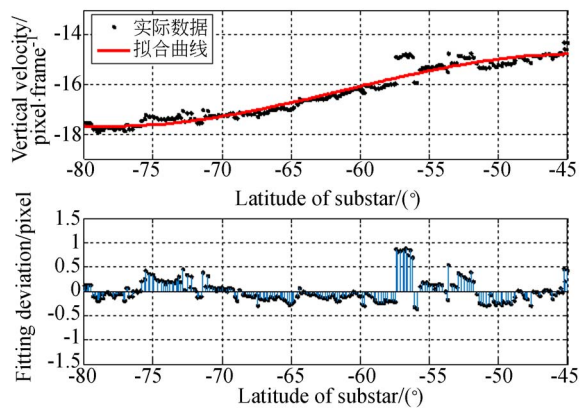
(a) 降轨段垂直方向速度拟合结果

(a) Vertical fitting velocity results in descent trajectory



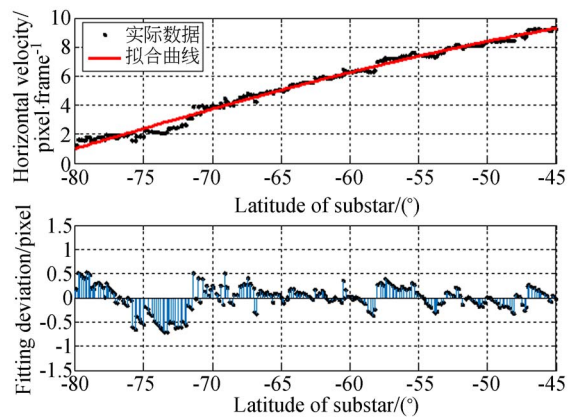
(b) 降轨段水平方向速度拟合结果

(b) Horizontal velocity fitting results in descent trajectory



(c) 升轨段垂直方向速度拟合结果

(c) Vertical velocity fitting results in rising trajectory



(d) 升轨段水平方向速度拟合结果

(d) Horizontal velocity fitting results in rising trajectory

图 7 不同观测数据拟合结果

Fig. 7 Fitting results of different observed data

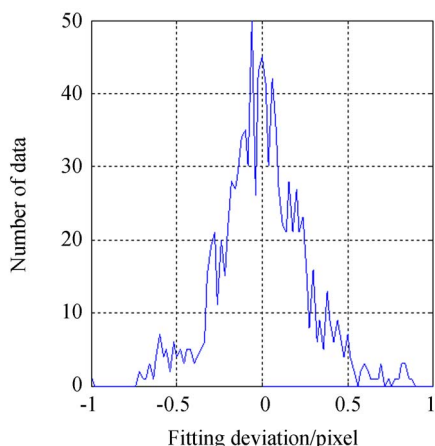


图 8 拟合偏差分布

Fig. 8 Distribution of fitting deviation

$$v = v_0 + dv \quad (4)$$

### 3 基于位置预测的改进动态规划方法

#### 3.1 动态规划的数学描述

动态规划应用到小目标检测时,其递归基本关系式如式(5)所示<sup>[7]</sup>:

$$f_k(x_k) = \max_{u_k} \left\{ \tau_k(x_k, u_k) + \sum_{i=1}^{k-1} \tau_i(x_i, u_i) \right\} = \max_{u_k} \left\{ \tau_k(x_k, u_k) + \max_{u_{k-1}} \left\{ \tau_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}) + \dots + \max_{u_2} \left\{ \tau_2(x_2, u_2) + \tau_1(x_1, u_1) \right\} \right\} \right\} = \max_{u_k} \left\{ \tau_k(x_k, u_k) + f_{k-1}(x_{k-1}) \right\} = \max_{u_k} [h_k(x_k)], \quad (5)$$

其中  $f_k(x_k)$  是从初始状态  $x_1$  到最终状态  $x_k$  的最优值函数或目标函数;  $h_k(x_k)$  表示阶段值函数,如公式(6)所示:

$$h_k(x_k) = \tau_k(x_k, u_k) + \max_{u_{k-1}} \{ h_{k-1}(x_{k-1}) \}, \quad (6)$$

式(5)中:  $\tau_i(x_i, u_i)$  表示第  $i$  阶段,状态  $x_i$  作出决策  $u_i$  情况下的阶段指标函数,本文定义观测图像的量测值,如公式(7)所示:

$$z_k(i, j) = \begin{cases} A_k + N_k(i, j), \\ N_k(i, j) \end{cases}, \quad (7)$$

式(7)中  $z_k(i, j)$  的两种不同表达形式分别表示有无目标的量测值,其中  $A_k$  为目标灰度;  $N_k(i, j)$  为背景灰度,假设其满足独立高斯分布。假设(亚)像素级点目标的运动速度满足  $v < m \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ , 定义集合 PRE:

$$\text{PRE}(X=(x, y)) = \left\{ \begin{array}{l} X'=(x', y') | x' \in (x-m, x+m), \\ y' \in (y-m, y+m) \end{array} \right\}, \quad (8)$$

PRE 反映了  $X$  作为可能目标点的像素点来源以及扩展范围。据此得到改进的递归方程:

$$h_k(x_k) = z_k(i, j) + \max_{x_{k-1} \in \text{PRE}(x_k)} \{ h_{k-1}(x_{k-1}) \}, k=2, 3, \dots, N, \quad (9)$$

$$h_1(x_1) = z_1(i, j), k=1, \quad (10)$$

#### 3.2 算法改进及分析

由于观测卫星与 GEO 碎片目标相距较远,在图像中可近似为匀速直线运动<sup>[14]</sup>。本文以 TONISSEN 方法为基础,在递归方程中增加位置信息加权,如公式(11)所示:

$$h_k(x_k) = \tau_k(x_k, u_k) + \max_{x_{k-1} \in \text{PRE}(x_k)} \{ \text{dir} \cdot h_{k-1}(x_{k-1}) \}, k=2, 3, \dots, N \quad (11)$$

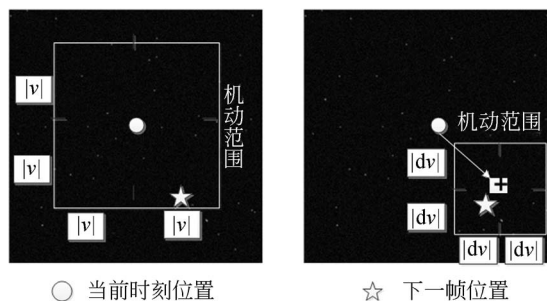
递归处理序列图像时,可利用 2.2 得到的估计速度预测目标在相邻帧的位置。由于速度映射模型偏差  $dv$  已知,则目标搜索范围  $S(x_k)$  可由公式(12)确定。

$$S(X=(x, y)) = \left\{ \begin{array}{l} X''=(x'', y'') \\ x'' \in (x + v_x - dv_x, x + v_x + dv_x) \\ y'' \in (y + v_y - dv_y, y + v_y + dv_y) \end{array} \right\}, \quad (12)$$

从定义可知,  $S(x_k) \in \text{PRE}(x_k)$ , 目标的位置权重  $\text{dir}$  由公式(13)定义:

$$\text{dir} = \begin{cases} 1, & x \in S(x_k) \\ 0, & x \notin S(x_k) \end{cases}. \quad (13)$$

通过公式(11)、(12)和(13)可得到改进的动态规划检测方法。改进方法与传统动态规划递归方程中目标搜索范围对比如图 9 所示。



○ 当前时刻位置      ☆ 下一帧位置  
(a) 传统 DPA 方法结果      (b) 本文方法结果  
(a) Results of traditional DPA method      (b) Results of proposed method

图 9 目标搜索范围对比

Fig. 9 Comparison of object maneuvering range

图中,  $v$  表示碎片目标的当前速度,  $d v$  表示速度估计偏差。假设目标速度恒定, 传统 DPA 的目标搜索范围为  $|2 v|$ , 本文方法为  $|2 d v|$ 。假设目标搜索范围内的每个位置对应一个状态, 传统 DPA 和本文方法在单帧图像内的状态个数之比如公式(14)所示:

$$\eta = \frac{(2v)^2}{(2dv)^2} = \frac{v^2}{(dv)^2}, \quad (14)$$

假设递归方程的累积帧数为  $k$ , 则相同条件下传统 DPA 和本文方法的状态个数之比为  $\eta^k$ 。当目标位置预测精度较高时, 由于改进方法减少了递归方程中的状态个数, 可降低检测时间和虚警率。

#### 4 实验及结果分析

为了分析本文方法对 GEO 带天基观测图像中暗弱碎片的检测性能, 首先利用实测数据进行速度模型应用验证。验证数据为一个随机选择的观测周期, 序列长度为 595 帧, 包含 24 个目标, 与 2.2 中实验数据为同一天拍摄。采用文献[2]的

方法定义目标局部信噪比, 如公式(15)所示:

$$Snr_t = \frac{u_t - u_b}{\sigma_b}, \quad (15)$$

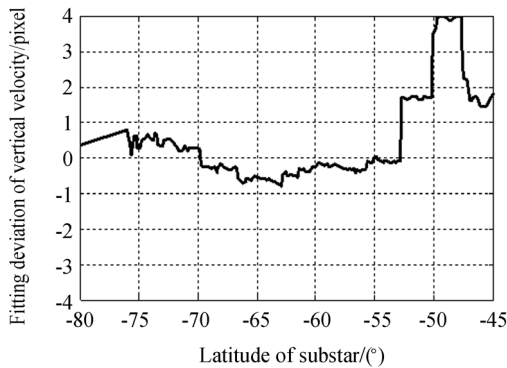
其中,  $u_t$  和  $u_b$  分别为目标和周围局部背景灰度均值,  $\sigma_b$  为目标周围局部背景的标准差。低信噪比目标一般指局部信噪比小于 3 的目标<sup>[2]</sup>, 工程应用中为了提高检测率, 通常将局部信噪比小于 5 的碎片定义为暗弱空间碎片。暗弱空间碎片检测率  $p_d$  和虚警率  $p_f$  定义如公式(16)所示:

$$p_d = \frac{k}{T}, p_f = \frac{f}{T}, \quad (16)$$

其中,  $k$  和  $f$  分别为目标检测次数和检测虚警个数,  $T$  表示目标实际出现的帧数。

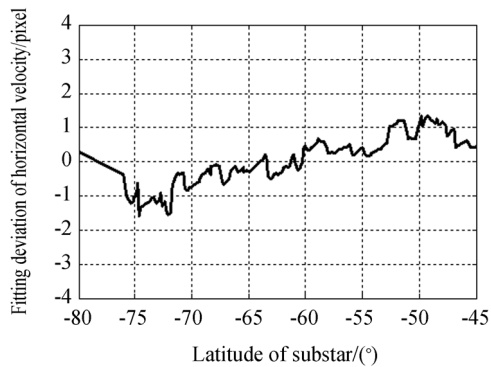
##### 4.1 速度映射模型的应用验证

图 10 表示速度映射模型应用验证结果。从图中可以看出, 除某些观测位置外, 速度映射模型的拟合偏差小于一个像素。对目标轨道进行分析发现, 偏差较大的位置是由于观测视场内出现了非 GEO 带目标。因此, 本文得到的速度映射模型可应用于 GEO 带天基观测图像中碎片目标的检测。



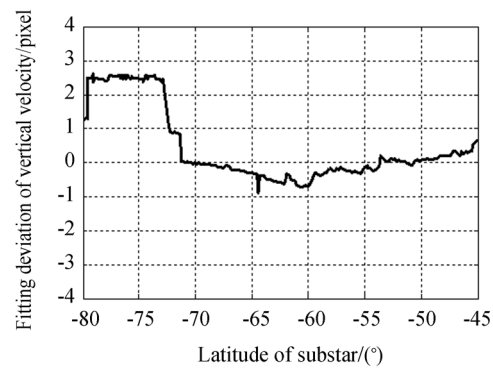
(a) 降轨段竖直方向偏差

(a) Vertical deviation of descent trajectory



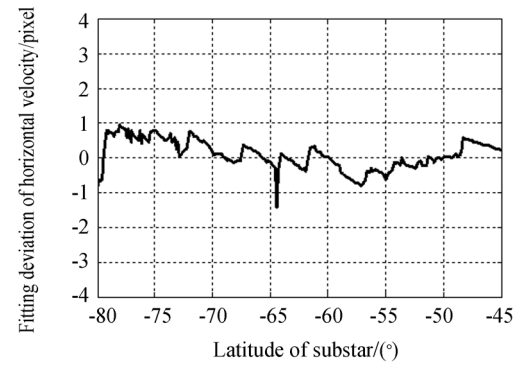
(c) 降轨段水平方向偏差

(c) Horizontal deviation of descent trajectory



(b) 升轨段竖直方向偏差

(b) Vertical deviation of rising trajectory



(d) 升轨段水平方向偏差

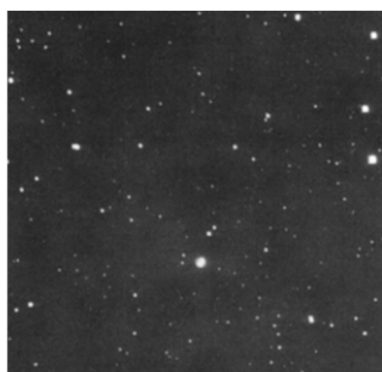
(d) Horizontal deviation of rising trajectory

图 10 数据 4 拟合偏差  
Fig. 10 Fitting deviation of data 4

## 4.2 目标检测结果分析

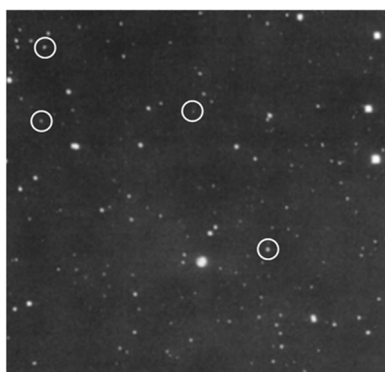
为了检验目标检测方法的有效性,利用实测图像数据进行实验。软件平台为 matlab2014,硬件配置为 Intel 四单核 2.8G CPU,4G 内存。

图 11 为 GEO 观测图像的检测结果,(a)是原始图像数据,包含 4 个信噪比不同的目标;(b)是目标检测结果。从图中可以看出,本文方法可有效检测出观测图像中的暗弱 GEO 碎片。



(a)原始图像

(a) Original image



(b)检测结果

(b) Detection results

图 11 实际图像检测结果

Fig. 11 Detection results of actual image

### 4.2.1 检测时间对比分析

从图 9 可以看出,本文方法缩小了目标搜索范围,可以减少计算量。在同样的实验平台下,统计不同机动范围的计算时间随递归帧数的变化,如表 2 所示。

表 2 不同目标搜索范围下的运算时间

Tab. 2 Operation times under different search windows (s)

机动范围 /pixel	2 帧	3 帧	4 帧	5 帧	6 帧	7 帧
3×3	5.7	5.9	6.0	8.4	26.9	126.8
7×7	5.9	6.2	8.7	31.3	105.8	894.8
30×30	6.1	7.9	28.5	107.4	425.6	5223.3

从表 2 可知,当递归处理的图像序列小于 3 帧时,不同机动范围下的运算时间无明显区别。当处理帧数大于 3 帧时,目标搜索范围的增大将导致运算时间显著增加。GEO 带天基观测图像中碎片目标的运动速度通常大于  $15 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ ,因此传统 DPA 目标搜索范围需要大于  $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$ ,而改进方法的目标搜索范围为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 。当递归处理的图像序列大于 5 帧时,改进方法的检测时间比传统 DPA 减少 90%以上。对比不同序列长度的检测时间可知,当累积帧数为 5 帧时算法计算效率较高,帧数超过 5 帧时,不同目标搜索范围的运算时间都迅速增加。

### 4.2.2 检测虚警率对比分析

对传统 DPA 的目标搜索范围采取位置信息加权,可减少孤立噪声带来的检测虚警,然而位置信息加权后的机动范围也可能丢失目标。选择实际数据中 3 个典型目标进行实验,对比分析本文方法和传统 DPA 的检测率和检测虚警率。实验中,本文方法的目标搜索范围为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ ,传统 DPA 的目标搜索范围为  $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$ ,递归帧数均为 5 帧,检测结果如表 3 所示。从表中可以看出,本文方法和传统 DPA 的检测率相当;而检测虚警率显著降低。当递归帧数为 5 帧时,对于信噪比大于 2.803 的目标,本文方法的检测虚警率降低了 5.9%以上。

表 3 不同方法的检测结果

Tab. 3 Detection results of different methods (%)

	平均信噪比	本文方法		传统 DPA	
		检测率	虚警率	检测率	虚警率
目标 1	3.427	94.64	7.414	94.64	12.5
目标 2	2.803	91.18	10.29	92.65	16.18
目标 3	4.494	96.67	6.67	96.67	10.00

### 4.2.3 不同方法检测效果评价

为了验证改进方法在检测性能方面的优越性,使用其他方法开展对比实验。由于目标在图像中为类直线运动,选择基于检测前跟踪思想的霍夫变换和基于检测后跟踪思想的帧差法进行对比,图12为不同信噪比条件下的检测率。

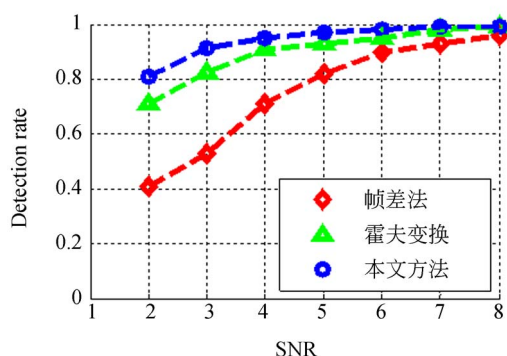


图12 不同方法检测结果

Fig. 12 Detection results of different methods

本文方法在实验中选择的目標搜索范围为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ , 累积帧数为5帧, 平均处理时间为5.83 s。帧差法平均处理时间为2.1 s, 霍夫变换方法的平均处理时间为8.2 s。从图中可以看出, 当目标信噪比大于6时, 3种方法检测率相差不大; 在信噪比低于5时, 本文方法的检测率高于

其他两种方法, 检测时间少于霍夫变换方法。

实验结果表明, 本文得到的 GEO 碎片速度估计方法精度较高, 可有效缩小动态规划递归方程中目标搜索范围, 减少算法计算时间和检测虚警率。对比实验表明, 本文方法在检测率和计算效率方面具有较高的性能。

## 5 结 论

为了从 GEO 带天基观测图像中快速检测出暗弱碎片, 本文在分析碎片运动特点的基础上, 提出了一种基于位置预测的动态规划方法。首先对实测数据进行分析, 得出不同碎片目标运动相似的特性, 并拟合实验数据, 得到图像中的碎片速度和观测卫星星下点纬度之间的映射模型, 提出了 GEO 碎片速度估计方法。最后利用估计速度预测碎片位置, 在动态规划递归方程中加入位置信息权值, 得到缩小的目标搜索范围。实验表明, 速度估计偏差小于 1 pixel; 通过对一个典型观测周期的实测数据进行处理, 得知当递归方程的累积帧数大于5帧时, 本文方法的检测时间比传统 DPA 减少了 90% 以上, 检测虚警率降低了 5.9% 以上, 适用于 GEO 带天基观测图像中暗弱碎片的检测。

### 参考文献:

- [1] 李振伟, 张涛, 孙明国, 等. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 589-599.  
LI ZH W, ZHANG T, SUN M G, *et al.*. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 589-599. (in Chinese)
- [2] 张辉, 田宏, 林玲, 等. 空间目标天基天文定位偏差分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1345-1351.  
ZHANG H, TIAN H, LIN L, *et al.*. Error analysis of spaced-based celestial positioning for space object [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1345-1351. (in Chinese)
- [3] 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目标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 179-189.

- YAO R, ZHANG Y N, YANG T, *et al.*. Detection of small space target based on iterative distance classification and trajectory association [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 179-189. (in Chinese)
- [4] DAVEY S J, RUTTEN M G, CHEUNG B. A comparison of detection performance for several track-before-detect algorithms [J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2008(1): 1-10.
- [5] 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.  
ZHU R Q, QI N X, ZHANG SH X, *et al.*. Improved infrared object tracking algorithm based on particle filter [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(3): 133-136. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] MOREIRA G J, PAQUETE L, DUCZMAL L H, *et al.*. Multi-objective dynamic programming for spatial cluster detection [J]. *Environmental & Ecological Statistics*, 2015, 22(2): 369-391.
- [8] 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.
- [9] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, 21(1): 144-156.
- [10] JAMES A, SCOTT S, HENRY P. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(1): 44-56.
- [11] JOHNSTON L A , KRISHNAMURTH Y V. Performance analysis of a track before detect dynamic programming algorithm[C]. *IEEE International Conference on Acoustics , Speech, and Signal Processing, Istanbul*, 2000: 49-52.
- [12] 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.  
CHEN SH F, CHEN H M , LU H ZH . 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. (in Chinese)
- [13] 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.
- CAO Q, WANG D J, ZHANG Q, *et al.*. Energy accumulation in infrared point target detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
- [14] 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.  
WANG X W, WANG CH X, ZHANG Y Y, *et al.*. Detection of small space target by dynamic programming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 477-484. (in Chinese)
- [15] 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.  
WU L D. *Orbits and Detection of Satellite and Space Debris* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 周一宇, 李骏, 安玮. 天基光学空间目标监视信息处理技术分析[J]. *光电工程*, 2008, 35(4): 43-48.  
ZHOU Y Y, L J, A W. Information processing technology in optical space-based space surveillance [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2008, 35(4): 43-48. (in Chinese)
- [17] 唐毅, 钟文安, 首俊明, 等. 基于 SBV 传感器的地球同步带目标监视系统星座设计[J]. *空间科学学报*, 2015, 35(1): 94-103.  
TANG Y, ZHONG W A, SHOU J M, *et al.*. Constellation design for geosynchronous belt surveillance system based on the SBV sensor[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, 35(1): 94-103. (in Chinese)
- [18] STROKE G, VO C, SRIDHARAN R, *et al.*. The space-based visible program[C]. *Space 2000 Conference and Exposition*, 2000.

#### 作者简介:



谭继波(1992—),男,云南丽江人,硕士研究生,2014年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事空间目标探测与图像信号处理方面的研究。E-mail: tjb1206@126.com

#### 导师简介:



黄建余(1967—),男,江西南昌人,副研究员,1996年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事空间碎片观测与目标识别方面的研究。E-mail: jianyu2875@126.com