

基于轨迹一致性检测的空间碎片天基识别方法

雷毓璠 王龙 钟红军 张辉 武延鹏

Space-based identification method for space debris based on trajectory consistency detection

Lei Yunfan, Wang Long, Zhong Hongjun, Zhang Hui, Wu Yanpeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间碎片天基激光辐照下的轨道特性仿真分析

Simulation analysis of orbit characteristics of space debris irradiated by space-based laser system

红外与激光工程. 2017, 46(3): 329005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0329005>

天基激光清除小尺度空间碎片变轨模型研究

Research on de-orbiting model of small scale space debris removal using space-based laser

红外与激光工程. 2017, 46(3): 329004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0329004>

自由振荡激光天基清扫空间碎片机理研究

Mechanism study of removing space debris with space-based free running laser

红外与激光工程. 2021, 50(S2): 20200198 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200198>

地基激光测距系统观测空间碎片及其探测能力研究

Observation of space debris by ground-based laser ranging system and research on detecting ability

红外与激光工程. 2017, 46(3): 329001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0329001>

基于梯度方向一致性和特征分解的红外小目标检测算法

Infrared small target detection algorithm based on gradient direction consistency and eigendecomposition

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0126001 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0126001>

空间碎片探测与测距复合系统光学望远镜

Optical telescope of space debris detection and ranging compound system

红外与激光工程. 2021, 50(7): 20200464 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200464>

基于轨迹一致性检测的空间碎片天基识别方法

雷韞璠¹, 王 龙^{1*}, 钟红军², 张 辉¹, 武延鹏¹

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190;
2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 针对空间碎片天基观测与编目数据库在轨关联难题, 建立天基光学相机对空间碎片的观测模型, 分析在轨应用环境对观测信息的影响, 基于碎片轨迹一致性检测设计识别方法。为适应在轨应用的需求, 提出了 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合的空间碎片识别方法。首先, 依据 DTW 原理筛选出与待检测真实轨迹形貌最接近的预报轨迹; 进一步, 将初选相似轨迹之间的形貌差异量化为轨迹间总误差的标准差; 最后, 通过统计量检验实现轨迹一致性确认, 轨迹一致则碎片成功识别。对所提出方法与轨迹直线拟合参数误差检验识别法进行碎片识别稳定性的仿真与实验对比。结果表明: DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法是一种更稳定的碎片识别方法, 对仿真及实验中的全部碎片及低轨卫星均能实现稳定识别, 较轨迹直线拟合参数误差检验识别法稳定性明显提升。文中提出方法具有不受碎片运动特性、观测环境等因素影响的特点, 可在卫星感知与防护领域广泛应用。

关键词: 空间碎片; 天基观测; 轨迹一致性检测; 统计量检验

中图分类号: P41 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220076

Space-based identification method for space debris based on trajectory consistency detection

Lei Yunfan¹, Wang Long^{1*}, Zhong Hongjun², Zhang Hui¹, Wu Yanpeng¹

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;
2. DFH Satellite Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at on-orbit correlation between space-based observations and cataloging of space debris, observation model of space-based optical cameras for debris was established, the impact of on-orbit environment on observations was analyzed, furthermore, a space debris identification method based on trajectory consistency detection was designed. In order to satisfy the applications on-orbit, a debris identification method, fusion of DTW and trajectory topography difference quantification, was proposed. Firstly, using DTW to screen out one predicted trajectory which is closest to the real trajectory; Further, quantifying the morphology difference between the closest trajectories found in the first step as the standard deviation of the total error between them; Finally, using statistical testing to confirm the consistency between the two trajectories. The two trajectories were consistent means that the debris was identified successfully. The comparison of the stability between the method proposed in this paper and the method based on trajectory line fitting and parameter error testing was carried out, and the results demonstrate that, method based on fusion of DTW and trajectory topography difference

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-06-25

基金项目: 科工局民用航天 (KJSP2020020203)

作者简介: 雷韞璠, 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事空间目标探测与感知技术方面的研究。

通讯作者: 王龙, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事空间光电测量与感知技术方面的研究。

quantification is the more stable method, and the stability is improved by 56.5% compared with another method. The method proposed in this paper is not being affected by the factors such as debris motion characteristics and observation environment, and can be widely used in satellite perception and protection.

Key words: space debris; space-based observation; trajectories consistency detection; statistical testing

0 引言

1957年,前苏联将世界上第一颗人造地球卫星送入轨道,截止到2021年8月21日,全世界已进行6100多次火箭发射,将大约12020个航天器送入太空^[1-3]。在日渐饱和的太空环境中,航天器解体、爆炸、碰撞等事件时有发生。如2009年2月10日,美国卫星Iridium-33与俄罗斯失效卫星Cosmos-2251在西伯利亚上空相撞,事故产生上千块空间碎片;2021年11月,俄罗斯发射导弹摧毁本国卫星Cosmos-1408,据报道此次反卫星实验将至少产生1500块可追踪空间碎片。空间碎片严重威胁在轨任务航天器的正常运行,高精度的空间碎片碰撞预警与在轨航天器稳定运行息息相关。

碰撞预警需借助碎片的编目信息和轨道外推模型^[4-7]。如参考文献[4]提出根据两行轨道根数(Two Line Elements, TLE)计算两目标在轨道交会处的相对距离以及到达轨道交会处的时间差,若最近相对距离及时间差满足阈值要求则发布碰撞预警。然而,碎片的编目信息以及轨道外推模型均存在误差,以TLE和SGP4(Simplified General Perturbations 4)模型为例,SGP4模型未考虑地球非球形引力项对定轨精度的影响^[8]。有研究表明,TLE历元与预报时刻间隔3天预报误差可达40 km^[9]。编目信息和轨道外推的误差使得碎片碰撞虚警、漏警问题时有发生。

碎片的天基观测是优化碰撞预警精度的有效数据,卫星上携带的光学相机能够实现对空间碎片的相对近距离观测。借助碎片的天基观测实现高精度碰撞预警的关键在于碎片的识别,即碎片观测与编目信息的在轨关联。由碎片的编目信息可预报出该碎片在相机探测器像面上的位置,但编目信息的历元与预报时刻之间的时间差、探测器性能以及碎片自身特性均会影响碎片在像面上的真实位置。除此之外,由于空间碎片不具备姿态稳定机制,姿态旋转使得碎片反射太阳能量不稳定,易间断出现能量过低不可观测的情况。对于碎片的天基观测而言,在设备体

积、数据处理能力均受限的情况下,不易实现碎片的观测与编目信息的快速关联。

碎片真实轨迹与预报轨迹之间虽然存在偏差,但轨迹形貌特征相似,可通过轨迹一致性检测实现碎片天基观测与编目信息的关联。现有轨迹一致性检测方法多以轨迹间距离作为判据,依据距离计算原理,判据可分为基于点的距离,如欧式距离(Euclidean Distance, ED)、动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)、最长公用子序列(Longest Common Sub-Sequence, LCSS)等^[10-11];基于形状的距离,如豪斯多夫距离(Hausdorff Distance)、弗雷歇距离(Frechet Distance)等^[12-13];基于分段的距离,如单程距离(One Way Distance)、多线位置距离(Locality In-between Polylines Distance, LIPD)等。但上述判据对轨迹误差敏感。LCSS虽然对轨迹误差不敏感,但该方法阈值不易确定。对于空间碎片轨迹一致性检测问题而言,碎片编目信息库中不同碎片定轨精度差异使得不同碎片的轨迹间距离不同,固定距离阈值无法适用于所有碎片轨迹的一致性检测。

针对上述问题,文中提出了一种DTW与轨迹形貌差异量化检验融合的空间碎片天基识别方法。该方法首先依据DTW原理进行轨迹一致性初筛;其次,将初选相似轨迹的形貌差异量化为轨迹间随机误差;最后,根据随机误差的概率分布利用统计量检验实现轨迹一致性确认,轨迹一致则认为碎片成功识别。

基于Fengyun 1 C、Iridium-33卫星碎片编目数据对文中提出方法进行仿真验证。由于在一定时间内碎片轨迹可近似为直线,因此以直线拟合参数误差检验识别法作为另一种空间碎片识别方法,并与文中提出方法进行碎片识别稳定性对比。结果表明,在碎片角速度与可见性相同的情况下,DTW与轨迹形貌差异量化检验融合的碎片识别法识别稳定性更佳。某型号光学相机的地面观测低轨卫星实验证明,DTW与轨迹形貌差异量化检验融合的碎片识别方法能够在低轨卫星通过光学相机视场的全过程中实现稳定识别。

1 空间碎片的观测模型

在天基光学相机拍摄的图像中,远距离空间碎片表现为具有一定能量的像点,能量分布遵循点扩散函数(Point Spread Function, PSF)。根据参考文献[14],理想二维高斯点扩散函数可表示为:

$$I(x,y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_{PSF}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_{PSF}^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_{PSF}^2}\right] \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0) 为像点的能量中心; σ_{PSF} 为高斯半径,表示点扩散函数的能量集中度; I_0 为像点的总能量,按如下方式计算:

$$I_0 = \frac{Mi_0}{2.512^{mV}} \quad (2)$$

式中: Mi_0 为零等星电子数,由探测器参数决定; mV 为碎片等效星等。采用镜面反射与漫反射的混合建模,

$$C_{SI} = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_0^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_0) & 2(q_1q_3 - q_2q_0) \\ 2(q_1q_2 - q_3q_0) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_0^2 & 2(q_2q_3 - q_1q_0) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_0) & 2(q_2q_3 - q_1q_0) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_0^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

依据成像原理推导出碎片在探测器像面上的二维坐标可表示为:

$$\begin{cases} u = u_0 + \frac{P_{S_{ix}}}{P_{S_{iz}}} \cdot \frac{f}{d_u} \\ v = v_0 + \frac{P_{S_{iy}}}{P_{S_{iz}}} \cdot \frac{f}{d_v} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_0, v_0 为探测器像面的中心坐标; f 为焦距; $(P_{S_{ix}}, P_{S_{iy}}, P_{S_{iz}})$ 为碎片在光学相机测量坐标系下的位置矢量; d_u, d_v 为探测器像元尺寸。

实际情况下应考虑以下不确定性对碎片真实位置及可见性的影响:

(1) 探测器背景噪声。光电探测器将积分时间内入射到像面上的光子转化为电子,再通过存贮这些电子的电容转换为电压信号,经此信号放大、量化最终转化为数字图像的灰度值。上述过程中,光电转换、信号放大过程以及探测器构造均会带来噪声。

(2) 姿态计算误差。受任务航天器所处环境及设备自身精度影响,星载定姿设备存在姿态计算误差,定姿误差在真实位置与预报位置之间引入随机误差。

(3) 质心提取误差。令设备积分时间为 T ,探测器面阵大小为 $N \times N$,视场大小为 FOV ,碎片相对任务航天器运动角速度为,则设备的瞬时视场为:

空间碎片的等效星等 mV 可表示为:

$$mV = -26.7 - 2.5 \log[A \cdot \rho \cdot F(\Phi)] + 5 \log(r) \quad (3)$$

式中: A 为碎片的等效截面积; ρ 为碎片的反射率; r 为碎片与任务航天器的相对距离; $F(\Phi)$ 为反射率函数; Φ 为太阳入射角。

在不考虑误差的理想情况下,根据空间碎片与任务航天器位置预报时刻的精确轨道信息,可计算出像点在像面上的准确位置。假设 t 时刻碎片在地心惯性坐标系中的位置矢量为 P_{Ti} ,任务航天器的位置矢量为 P_{TI} ,则碎片在光学相机测量坐标系下的位置矢量为:

$$P_{Si} = C_{SI}(P_{Ti} - P_{TI}) \quad (4)$$

式中: C_{SI} 为地心惯性系到测量系的旋转矩阵。由 t 时刻设备输出姿态四元数 q_0, q_1, q_2, q_3 由公式(5)计算可得:

$$IFOV = \frac{FOV}{N} \quad (7)$$

积分时间内,碎片划过的角度为:

$$A = \omega \cdot T \quad (8)$$

空间碎片所成像点在探测器像面上拖尾像素数为:

$$P = \frac{A}{IFOV} \quad (9)$$

理想像点与拖尾像点的对比如图1所示。像点拖尾越长,占用像素数越多,每个像素上能量越低,边缘的暗像素将被背景噪声淹没从而导致像点形状不规则,进而引入质心提取误差。质心提取误差在真实位置与预报位置之间引入随机误差。

(4) 编目信息更新延迟。空间碎片不具备合作定轨机制,精确轨道信息无法获取。编目轨道与精确轨

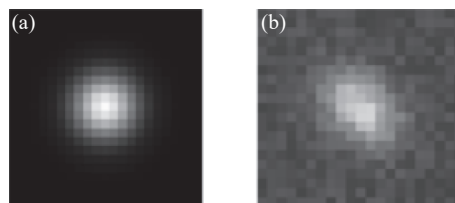


图 1 (a) 理想像点; (b) 拖尾像点

Fig.1 (a) Ideal point; (b) Trailing point

道之间的偏差将随着轨道外推时长的增加而逐渐放大。编目信息更新延迟在真实位置与预报位置之间引入系统误差。

(5) 空间碎片的光变特性。空间碎片不具备姿态稳定机制, 姿态旋转使得碎片的等效截面积时变从而导致像点反射太阳能量大小不稳定。碎片姿态稳定与旋转时的光变曲线对比见图 2, 姿态旋转时可能间断出现像点能量低于背景噪声从而无法提取的情况。

综上所述, 碎片的真实轨迹与预报轨迹的仿真对比结果如图 3 所示。两轨迹之间存在偏差, 且无法保证连续可见。对于空间碎片天基观测而言, 受星上携带设备体积、处理器性能的限制, 不易实现碎片的在轨识别。

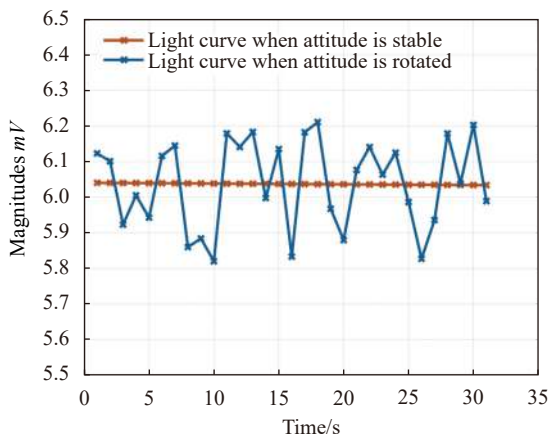


图 2 空间碎片姿态稳定及旋转时的光变曲线

Fig.2 Light curve of space debris when attitude stabilization and rotation

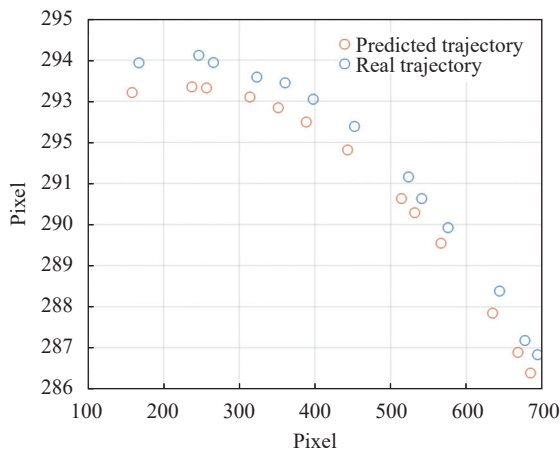


图 3 空间碎片真实轨迹与预报轨迹

Fig.3 Real and forecast trajectories of space debris

2 空间碎片天基识别方法

通过建立空间碎片观测模型发现, 碎片真实轨迹与预报轨迹之间的形貌特征有一定的相似性。轨迹一致性检测是实现碎片天基观测与编目数据库在轨关联的有效方法。

一定时间内碎片轨迹可近似为直线, 真实轨迹与预报轨迹直线拟合参数误差检验是最简单的轨迹一致性检测方法。方法通过比较碎片真实轨迹与预报轨迹的斜率、长度误差实现轨迹一致性检测。令碎片的真实轨迹长度为 l_1 、斜率为 θ_1 , 预报轨迹长度为 l_2 、斜率为 θ_2 , 长度和斜率的判断阈值分别为 T_l 、 T_θ , 若满足:

$$\begin{cases} |l_1 - l_2| < T_l \\ |\theta_1 - \theta_2| < T_\theta \end{cases} \quad (10)$$

则认为轨迹一致, 碎片识别成功。上述方法原理简单但碎片识别稳定性易受碎片角速度、观测环境等因素影响。

文中设计了一种无需参数拟合, 识别稳定性不受外界因素影响的碎片识别方法。该方法流程如图 4 所示。首先, 根据 DTW 原理进行轨迹一致性初筛; 其次, 在此基础上将初选相似轨迹的形貌差异量化为轨迹间随机误差; 最后, 根据随机误差的概率分布利用统计量检验实现轨迹一致性确认, 轨迹一致则碎片成功识别。

当视场中同时出现多个碎片时, 首先需要根据 DTW 原理进行轨迹一致性初筛, 其方法为: 分别计算

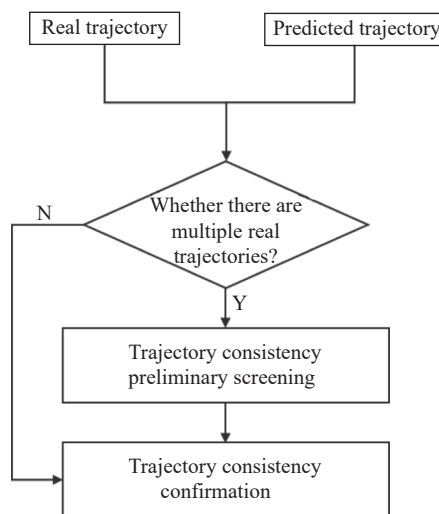


图 4 识别方法流程图

Fig.4 Flow chart of identification method

对每条真实轨迹与所有预报轨迹的规整路径距,以规整路径距极小值作为确定初选相似轨迹的判据。

然而,当视场中存在未编目碎片时,该碎片与其他碎片的预报轨迹之间的规整路径距同样存在极小值,因此,需要进一步通过轨迹间形貌差异化与统计量检验进行轨迹一致性确认。此时,以轨迹间误差的标准差作为轨迹一致性确认的判别依据,如果标准差服从随机误差的先验概率分布则认为轨迹一致,碎片成功识别。

2.1 基于 DTW 的碎片轨迹一致性初筛方法

轨迹一致性检测的本质为曲线相似性检测。最早的轨迹一致性检测以欧式距离为判据,欧式距离越小轨迹间形貌差异越小。但欧式距离仅适用于长度相等的轨迹,令两条轨迹分别为 Q_1 、 Q_2 , 轨迹间的欧式距离按如下方式计算:

$$D = \sum_{i=1}^n |Q_{1i} - Q_{2i}| \quad (11)$$

式中: $|Q_{1i} - Q_{2i}|$ 为两轨迹中时间对应点之间的距离。

DTW 是一种基于动态规划 (Dynamic Planning, DP) 的弹性度量,通过时间规整来计算两个时间序列的一致性。与传统欧式距离相比,DTW 将两轨迹的对应关系由时序关联改为形貌关联,形貌关联的原理如图 5 所示。DTW 以一条轨迹为模板,依次从另一条轨迹中找出与模板中各点距离最近的点,从而实现两条轨迹的形貌关联。形貌关联时遵循轨迹时间的连续与单调性。以图 5 中 a 点为例,若按时序关联 a 点对应 b 点,动态时间规整后 a 点的对应点变为 b' 点。

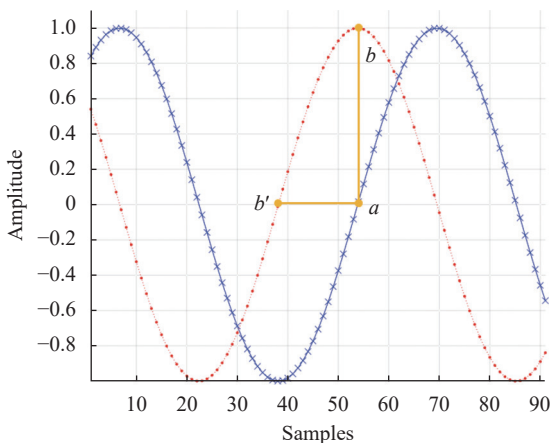


图 5 DTW 形貌关联原理

Fig.5 Principle of Topographic correlation in DTW

基于 DTW 原理的碎片轨迹一致性初筛方法原理示意图如图 6 所示。令真实轨迹的像面坐标序列为 U 、 V , 预报轨迹的像面坐标序列为 U' 、 V' , 序列中包含散点数目为 m 个。计算各散点之间的误差构成大小为 $m \times m$ 的矩阵,矩阵中元素 $E(i, j)$ 表示真实轨迹中第 i 个点与预报轨迹中第 j 个点之间的误差,定义 $E(i, j)$ 的计算方式如下:

$$E(i, j) = (U_i - U'_j) + (V_i - V'_j) \quad (12)$$

该方法的本质在于找到从矩阵起点 $E(1, 1)$ 到终点 $E(m, m)$ 所需代价最小的路径,即规整路径,按规整路径计算得到两轨迹之间的欧式距离即为规整路径距。令规整路径中的一点为 p_x , p_{x+1} 与 p_x 之间应遵循时间连续且单调的原则,即 p_{x+1} 点与 p_x 点在矩阵中位置相邻,且 p_{x+1} 点的时序不能早于 p_x 点。根据参考文献 [11], 规整路径距的计算方式如下:

$$D(i, j) = |E(i, j)| + \min \{ |E(i-1, j)|, |E(i-1, j-1)|, |E(i, j-1)| \} \quad (13)$$

由此计算得到的 $D(m, m)$ 即为规整路径距。

当光学相机同时探测到多个碎片时,对每个碎片的真实轨迹分别计算其与所有预报轨迹之间的规整路径距,最小规整路径距对应预报轨迹与该碎片的真实轨迹组成初选匹配轨迹。

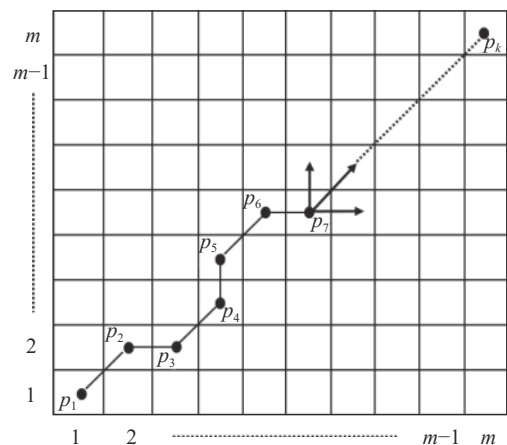


图 6 基于 DTW 原理的碎片轨迹一致性初筛法原理图

Fig.6 Schematic diagram of debris trajectory consistency preliminary screening based on DTW

2.2 基于形貌差异化与统计量检验的碎片轨迹一致性确认方法

碎片真实轨迹与预报轨迹之间的误差包括系统

误差与随机误差,其中随机误差仅与设备性能相关,不受碎片间定轨精度差异的影响,是一种误差不敏感的轨迹一致性检测判据。

轨迹形貌差异量化与统计量检验以轨迹间误差的标准差为检测量,利用统计量检验的方式检测轨迹一致性。令初选匹配轨迹中,真实轨迹的像面坐标序列为 U 、 V , 预报轨迹的像面坐标序列为 U'' 、 V'' , 轨迹中各点之间的误差序列为 E , 其中:

$$E_i = (U_i - U''_i) + (V_i - V''_i) \quad (14)$$

误差序列 E 的标准差为:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}}{n - 1} \quad (15)$$

某次地面观测实验中实际拍摄的低轨卫星真实轨迹与预报轨迹间去掉长周期偏移量影响后误差分布直方图如图 7 所示。轨迹间误差近似服从高斯分布。若不考虑系统误差的影响,随机误差可视为零均值高斯分布。

令总误差的统计分布服从 $S \sim N(\mu, \sigma)$, 则随机误差统计分布服从 $S \sim N(0, \sigma)$ 。指定随机误差分布的置信区间为 $\pm \varepsilon \sigma$ 。检验统计量 ε' 按如下方式计算:

$$\varepsilon' = \frac{s}{\sigma} \quad (16)$$

若 $\varepsilon' \leq \varepsilon$ 则认为真实轨迹与预报轨迹具有一致性,碎片识别成功。

3 仿真验证

以 Celestrak 网站公开的 Fengyun 1 C、Iidium-33 编目轨道数据库为参考碎片编目信息进行了碎片识别方法的仿真验证,仿真流程如图 8 所示。

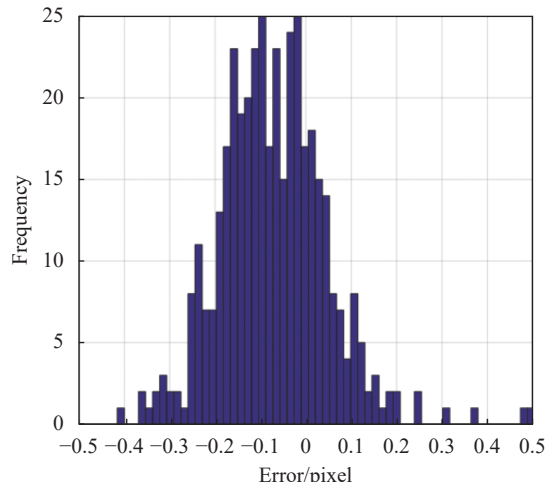


图 7 真实轨迹与预报轨迹间误差分布

Fig.7 Error distribution between real trajectories and predicted trajectories

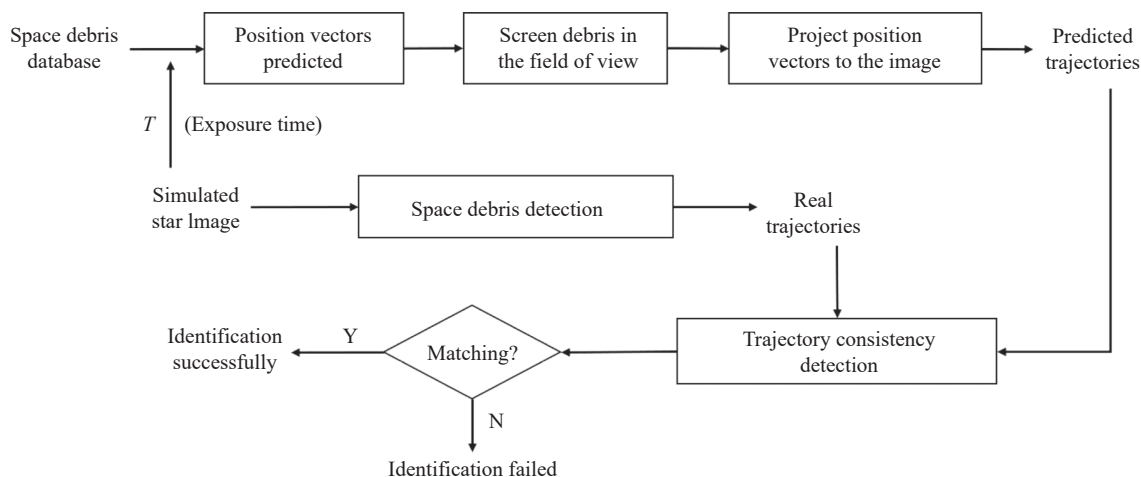


图 8 仿真验证算法流程图

Fig.8 Flowchart of simulation verification algorithm

随机生成初始时刻,筛选该时刻光轴指向的天区中可见恒星与碎片并生成仿真星图。星图中碎片的位置由 TLE 与 SGP4 模型预报得到。

分别采用 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合的碎片识别方法、轨迹直线拟合参数误差检验碎片识别方法进行仿真星图中空间碎片的识别。分别仿真验

证碎片可见性间断问题与目标角速度对两种方法识别稳定性的影响。验证碎片可见性间断对识别稳定性的影响时,生成轨道高度相似的碎片 TLE, 随即从姿态连续变化的 20 帧星图中剔除一定帧数模拟碎片可见性间断;验证碎片角速度对识别稳定性的影响时,保持剔除星图帧数不变,生成轨道高度不同的碎片 TLE, 模拟碎片角速度差异。

考虑姿态指向误差三轴各 $\pm 3''(3\sigma)$ 、质心提取误差 UV 方向各 $\pm 0.5 \text{ pixel}(3\sigma)$, 真实轨迹与预报轨迹间随机误差服从高斯分布 $S \sim N(0, 0.2581)$ 。取随机误差分布的置信区间为 1.5σ 、轨迹长度误差阈值为 $T_l = 0.35 \text{ pixel}$ 、轨迹斜率误差为 $T_\theta = 0.808^{-2.805\omega_{\text{pixel}}} +$

0.02, 其中 ω_{pixel} 为曝光时间内碎片在像面上移动的像素数。

表 1、表 2 分别为两种方法的碎片识别结果。其中,方法 1 为轨迹直线拟合参数误差检验识别法;方法 2 为 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法。由统计结果可以看出,当碎片可见性连续且角速度较大时,两种方法均能实现碎片稳定识别。随着数据连续率下降或碎片角速度减小,轨迹直线拟合参数误差检验识别法成功识别碎片数目占可见碎片总数的比例逐渐下降,而 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法则能保证全部碎片稳定识别。

表 1 数据连续率对两种方法识别稳定性的影响

Tab.1 Influence of data continuity rate on the identification stability between two methods

Simulated frame num	Data continuity rate	Angular rate of debris/($''$)·s $^{-1}$	Simulated total debris	Proportion of identified number to the total	
				Method1	Method2
20	100%	2 700	100	97.1%	98.3%
20	90%	2 700	100	90.1%	97.6%
20	80%	2 700	100	83.6%	100.0%
20	70%	2 700	100	77.2%	96.7%
20	60%	2 700	100	72.0%	99.1%
20	50%	2 700	100	67.8%	98.5%

表 2 目标角速度两种方法识别稳定性的影响

Tab.2 Influence of angular rate of debris on the identification stability between two methods

Simulated frame num	Data continuity rate	Angular rate of debris/($''$)·s $^{-1}$	Simulated total debris	Proportion of identified number to the total	
				Method1	Method2
20	60%	3 600	100	98.3%	100%
20	60%	2 700	100	72.0%	96.2%
20	60%	1 500	100	45.3%	97.5%
20	60%	720	100	26.1%	99.7%
20	60%	360	100	10.6%	98.3%
20	60%	200	100	0	97.1%

分析发现,轨迹直线拟合参数误差检验法识别失败多由于轨迹直线拟合后斜率误差超过阈值引起。下面分析数据连续率和碎片角速度对轨迹拟合斜率误差的影响。以仿真中两个可见碎片为例,分别绘制两碎片仿真观测数据在数据连续率为 100%、数据连续率为 50% 时的碎片轨迹以及轨迹直线拟合的结果如图 9、图 10 所示。碎片轨迹的拟合斜率及拟合斜

率误差见表 3。

由碎片 1、2 的轨迹拟合结果对比可以看出,碎片 1 角速度较大,轨迹较长,真实轨迹与预报轨迹间的误差对拟合斜率影响不大,碎片可见性间断对碎片 1 的斜率拟合结果没有明显影响;但碎片 2 速度较小,轨迹较短,拟合斜率受真实轨迹与预报轨迹间的误差影响较大,此时碎片可见性间断加剧了误差对斜率拟

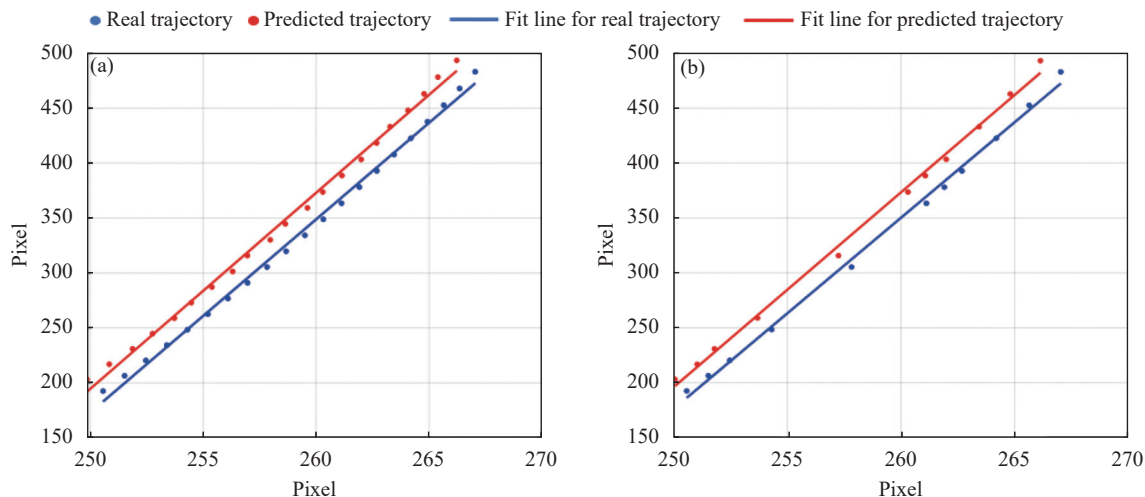


图 9 碎片 1 轨迹拟合结果。(a) 数据连续率 100%; (b) 数据连续率 50%

Fig.9 Debris 1 trajectory fitting results. (a) Data continuity rate 100%; (b) Data continuity rate 50%

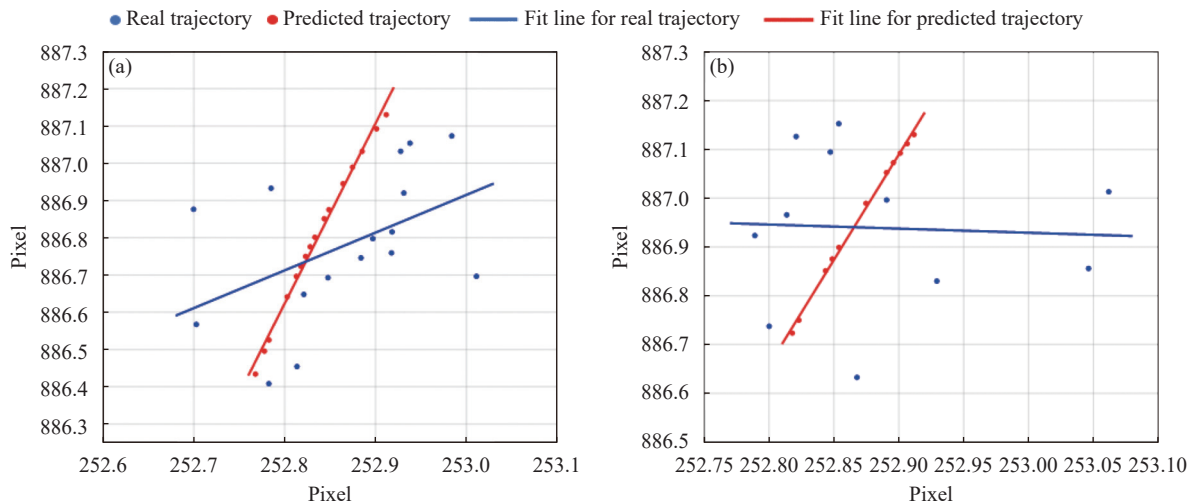


图 10 碎片 2 轨迹拟合结果。(a) 数据连续率 100%; (b) 数据连续率 50%

Fig.10 Debris 2 trajectory fitting results. (a) Data continuity rate 100%; (b) Data continuity rate 50%

表 3 仿真样本的拟合斜率及误差

Tab.3 Fitting slope and error of simulation samples

Name	Do not extract simulated observations			Extract 10 frames from the simulated images		
	Fitting slope		Error	Fitting slope		Error
	Real	Predicted		Real	Predicted	
Debris 1	17.587	17.885	0.298	17.743	17.471	0.272
Debris 2	0.710	4.236	3.526	-0.066 2	4.411	4.477

合的影响,进而导致斜率误差不能满足阈值限制。仿真结果表明,当碎片相对任务航天器运动角速度在一个积分时间内小于 0.01° 时轨迹直线拟合参数误差检验识别法失效。

综上,轨迹直线拟合参数误差检验识别法的识别稳定性易受碎片角速度、碎片可见性间断问题的影响,而 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合的碎片识别方法则是一种能实现碎片稳定识别的方法。

4 实验验证

采用某型号光学相机进行了四次观星实验。实验所用光学相机视场 $20^\circ \times 20^\circ$ 、灵敏度 $7 mV$ 、像面大小 1024×1024 、曝光时间为 $0.1 s$ 。由于观测距离限制, 敏感器无法实现对空间碎片的在地面观测, 因此实验以轨道高度低于碎片的低轨卫星为观测对象。实验前根据网站 Heavens Above 提供观测时段卫星过境信息, 筛选出敏感器可见卫星并记录其 TLE 作为编目信息数据库。

Cosmos-2344 卫星于 2021 年 6 月 3 日 21:15:49.468-21:15:52.383 经过敏感器视场时的真实轨迹与预报轨迹如图 11 所示。可以看出, 低轨卫星观测结果与碎片特征建模结果类似, 但卫星相对碎片姿态稳定能力较好, 因此连续可见性相对较好。

四次观星实验共计观测到低轨卫星 20 个, 分别采用 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合的碎片识别方法、轨迹直线拟合参数误差检验碎片识别方法进行实拍星图中空间目标的识别。其中, DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法在目标通过光学相机视场的全过程中均能稳定识别, 而轨迹直线拟合参数误

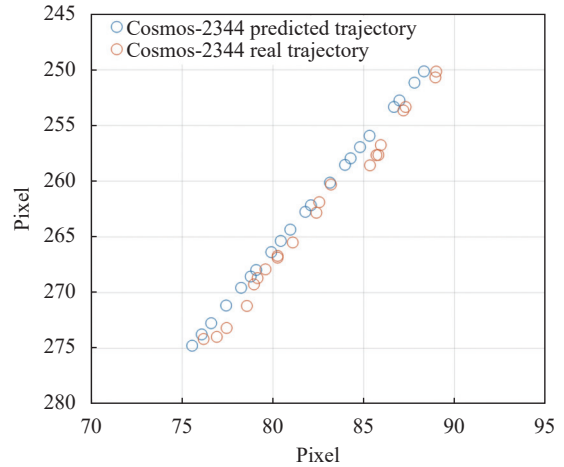


图 11 Cosmos-2344 真实轨迹与预报轨迹

Fig.11 Real trajectory and predicted trajectory of Cosmos-2344

差检验识别法在目标可见性较差的时段会出现关联失败的情况。

实验中每 2 s 进行一次目标识别, 以其中 3 个目标为例, 分别统计目标通过光学相机视场的全过程中两种方法成功识别次数占卫星在视场中停留时间内识别总次数的比例。统计结果见表 4。其中, 方法 1 为轨迹直线拟合参数误差检验识别法; 方法 2 为 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法。

表 4 观星实验中低轨卫星识别结果

Tab.4 Identification results of low-orbit satellites in stargazing experiments

Name	Zenith angle/(°)	Magnitudes mV	Total identification times	Proportion of identification times to the total	
				Method1	Method2
Object 1	87	3.5	13	100%	100%
Object 2	84	4.0	10	90%	100%
Object 3	81	4.6	11	72.7%	100%

目标 1 高度角高且亮度较大, 目标轨迹靠近像面中心且可见性较好, 此时两种方法均能稳定识别。随着目标轨迹偏向视场边缘且亮度下降, 目标可见性及质心提取精度变差, 轨迹直线拟合参数误差检验识别法稳定性下降, 而 DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法则仍能保持稳定识别。

综上, DTW 与轨迹形貌差异量化检验融合识别法是一种有效的空间碎片天基识别方法, 在碎片真实轨迹可见性间断、质心提取精度较差时能保持稳定的识别能力。

5 结论

针对空间碎片天基观测信息与编目数据库在轨关联难题, 文中提出了一种基于轨迹一致性检测的空间碎片天基识别方法。方法首先依据 DTW 原理筛选出与待检测真实轨迹形貌最接近的预报轨迹; 其次, 将初选相似轨迹之间的形貌差异量化为轨迹间误差的标准差; 最后, 通过统计量检验进行轨迹一致性的进一步确认。仿真及实验验证结果表明, 文中提出方法具有不受碎片运动特性、观测环境等因素影响的特

点,是一种稳定的空间碎片天基识别方法。

参考文献:

- [1] Du X P, Li Z, Wang Y. Research on the building of US space situational awareness capability [J]. *Journal of Equipment Academy*, 2017, 28(3): 67-74. (in Chinese)
- [2] Wang C Y. Review of space debris removal methods [C]//Proceedings of 3rd Chinese Aerospace Safety Symposium, 2021. (in Chinese)
- [3] Houman H, Barry S, Marc F, et al. Space-object identification satellite (SOISat) mission[C]//2020 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2021: 14-17.
- [4] Zheng Q Y, Wu L D. A computation method to warn the collision event between space probe and debris [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2004, 45(4): 422-427. (in Chinese)
- [5] Wang R L, Liu W, Liu S Q, et al. An orbital anomaly analysis method base on TLE data [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(2): 208-213. (in Chinese)
- [6] Wang R P, Zhang J Z, Zheng Y, et al. Space objects collision prediction based on TLE [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009, 36(4): 269-271, 275. (in Chinese)
- [7] Ardanes J, Gabriella G. Spaceborne autonomous vision-based navigation system foe avanti[C]//65th International Astronautical Congress, 2014.
- [8] Xu X L, Xiong Y Q. Research on orbit error of two line-orbit elements cataloging system [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2018, 59(3): 31-38. (in Chinese)
- [9] Zhao G Y, Sang J Z, Cheng J Y. Improving the orbit prediction accuracy for NOARD objects using sparse angles data [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(S1): 301-304. (in Chinese)
- [10] Wei L X, He X H, Teng Q Z. Trajectory classification based on hausdorff distance and longest common subsequence [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 784-790. (in Chinese)
- [11] Wei Y, Yang F, Zhu H T. A matching method for dynamic and static inspection data of track based on dynamic time warping [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 19(1): 78-86.
- [12] Li Y L, Zhang T S. Hybrid hausdorff distance track correlation algorithm based on time sliding window [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(10): 52-56, 60. (in Chinese)
- [13] Zhang W H. Embedded module of curve similarity judging based on Fréchet distance [J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2020, 20(9): 17-20, 50. (in Chinese)
- [14] Xing F, You Z, Sun T, et al. Principle and Implementation of APS COMS Star Tracker[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)