

文章编号 1004-924X(2025)11-1771-11

## 空间碰撞碎片云探测识别与快速编目能力评估

曹利颖<sup>1</sup>, 桑吉章<sup>1\*</sup>, 李 彬<sup>1</sup>, 刘 磊<sup>1</sup>, 雷祥旭<sup>2,3</sup>, 赵 有<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079;

2. 山东理工大学, 山东 淄博 255000;

3. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101)

**摘要:**随着天地一体化空间监测技术的发展, 监测覆盖范围扩大、目标重访间隔缩短, 较短时间内有可能获得新碎片的多个观测弧段, 使新碎片的快速编目成为可能。因此, 本文对天基光学监测碎片云的探测和快速轨道编目能力进行了评估。以 COSMOS-2251/Iridium-33 卫星碰撞事件为例, 基于美国空间目标编目库二行根数, 分析 COSMOS-2251/Iridium-33 卫星碰撞新碎片的可识别分离和快速编目可能性。实验结果表明, 采用光学监测手段, 对于 COSMOS-2251 和 Iridium-33 碎片, 在碰撞 20 min 后, 能够有效识别出 99% 以上的新碎片。选择 COSMOS-2251 和 Iridium-33 的各 100 个新碎片, 基于 24 颗卫星组成的天基光学监测星座, 碰撞后一天内 81% 的 COSMOS-2251 和 87% 的 Iridium-33 新碎片有至少 10 个可观测弧段。采用一天内的观测弧段进行新目标编目, 70% 的 COSMOS-2251 新碎片和 73% 的 Iridium-33 新碎片可成功编目。由此表明, 基于合理设计的天基光学监测星座, 有能力在一天内对 70% 以上碰撞新碎片进行轨道编目。

**关键词:**空间碰撞; 碎片云; 目标识别; 轨道编目; 天基光学监测

**中图分类号:** V447; P412.4 **文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20253311.1771 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253311.1771

## Evaluation of detection, identification and rapid cataloging capabilities for space debris cloud

CAO Liying<sup>1</sup>, SANG Jizhang<sup>1\*</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, LEI Xiangxu<sup>2,3</sup>, ZHAO You<sup>3</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology,  
Zibo 255000, China;

3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

\* Corresponding author, E-mail: bli@sgg.whu.edu.cn

**Abstract:** Advancements in space-ground integrated surveillance techniques have expanded detection coverage and reduced object revisit times, enabling the collection of multiple orbit tractlets of new debris within hours of an event and thereby facilitating timely tracking and cataloging. This study evaluates the detection and cataloging capabilities for monitoring debris clouds using space-based optical systems. Utilizing historical two-line element data, the identification and cataloging potential of debris generated by the COS-

**收稿日期:** 2025-03-22; **修订日期:** 2025-05-27.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 12373083, No. 12403083); 山东省自然科学基金面上项目 (No. ZR2023MD098)

MOS-2251/Iridium-33 satellite collision were analyzed, assuming a space-based optical detection constellation of 24 satellites. Results indicate that 99% of new debris fragments can be resolved within 20 minutes post-collision. Analysis of randomly selected samples of 100 debris fragments from each satellite revealed that 81% of COSMOS-2251 debris and 87% of Iridium-33 debris possess at least 10 observable tractlets within one day following the collision. Considering all observable tractlets within this timeframe, 70% of COSMOS-2251 debris and 73% of Iridium-33 debris were successfully cataloged. These findings demonstrate that a well-designed space-based optical surveillance system can catalog over 70% of new debris resulting from space collisions within one day.

**Key words:** space collision; debris cloud; object detection; orbital catalogue; space-based space surveillance

## 1 引言

随着人类航天活动的日益频繁,空间碎片数量快速增长。近年来发生的碰撞、解体事件显示,空间碎片对空间设备安全构成严重威胁<sup>[1-2]</sup>,作为空间碰撞预警基础的空间目标编目库建设愈加重要。空间目标中的碎片占比高于正常工作的航天器,快速编目新碎片,特别是碰撞、解体或爆炸生成的碎片云,成为编目技术研究的一个热点问题。

2009年2月10日,Iridium-33工作卫星和Cosmos-2251废弃卫星之间的碰撞产生了两千多个编目碎片,在碰撞后的1天内产生的碎片有可能出现在26 000 km轨道高度以下的任何区域<sup>[3]</sup>;根据北美防空司令部(North American Aerospace Defense Command, NORAD)的二行根数(TLE)编目库,该碰撞产生的碎片在7天之后才被逐渐编目。事实上,NORAD的Iridium-33/Cosmos-2251碎片编目可分为三个阶段:第一阶段为碰撞后的一个月以内,只编目了193个Iridium-33和432个Cosmos-2251碎片;第二阶段为碰撞发生后30天至150~200天,大部分碎片在这段时间被编目;第三阶段为遗漏碎片编目,这个阶段通常会持续数年<sup>[4]</sup>。由于产生了大量空间碎片,COSMOS-2251/Iridium-33碰撞事件发生后的一年里,在轨卫星与大于10 cm的空间碎片碰撞的风险增加了25%,碰撞风险最大的区域位于轨道高度700至800公里<sup>[4]</sup>。2021年3月23日,我国气象卫星云海一号02星与SL-16火箭体(1996年用于发射俄罗斯Cosmos 2333卫星)碎片发生碰撞,产生37个已编目空间碎片<sup>[5]</sup>。考查

NORAD编目库,第一个碎片的编目轨道在碰撞23天之后才发布。

近年来,随着低轨大型星座的大量布设,在轨航天器的数量快速增长,低轨空间目标的碰撞风险大幅增加<sup>[6]</sup>。由于目前的编目速度仍需要7天,无法及时开展未编目碎片的碰撞预警,增加了次级碰撞甚至Kessler级联碰撞的风险。

随着监测技术的进步和发展,空间监测的覆盖范围将进一步扩大、监测时效不断提高。研究表明<sup>[6]</sup>,假设一个由12颗圆轨卫星组成的Walker型低轨监测星座,其轨道高度为830 km、轨道倾角为98.7°,均匀布设在4个轨道面上,当卫星数量超过8颗时,该星座有能力维护20万低轨碎片的动态编目。对于一个新碎片的编目,需要在1~2天获得该碎片的至少3个轨道测量弧段<sup>[7]</sup>,弧段越多,编目成功率越高。鉴于天基光学监测的广域覆盖性,在碰撞或爆炸发生后的短时间之内快速采集新碎片的多个测轨弧段并编目新碎片的需求与日俱增。因此,本文以COSMOS-2251/Iridium-33碰撞为例,根据碎片云中各碎片之间的距离变化和监测装备的测轨数据精度,分析了新碎片探测分离识别所需的最快时间。在此基础上,统计分析天基光学监测星座条件下新碎片的可监测弧段数,从而评估新碎片的快速编目能力。

## 2 基于碎片之间距离的监测分离

COSMOS-2251在碰撞前的近地点高度为784 km,远地点高度为826 km,轨道倾角为74.0°。Iridium-33卫星碰撞前的近地点高度为

779 km,远地点高度为 808 km,轨道倾角为  $86.4^{\circ}$ <sup>[8]</sup>。碰撞发生之后的 20 个轨道周期内,新碎片轨道有一个共同的交点,即碰撞发生点。碎片会在不同时间经过这个点,因此这个点被称为“收缩点”;新碎片同样会通过一条共同的线,连接各自新的近地点和远地点,这条线被称为“收缩线”<sup>[9]</sup>。早期的碎片云演变阶段,碎片都集中在“收缩点”和“收缩线”附近,极大地提高了这些区域的空间目标密度,导致这些区域的碰撞风险上升<sup>[9]</sup>。因此,快速编目新碎片的关键是识别分离这些高密度碎片区域的碎片。

现有碎片编目的基础数据是轨道弧段,每个弧段由监测装备观测所得的测轨数据构成。光学弧段的测轨数据是碎片相对于装备的一组测角数据(时间/赤经/赤纬),而雷达弧段测轨数据为一组时间/距离/方位角/高度角。

对于碎片云而言,在碰撞之后的短时间内,碎片之间的距离小于监测装备的观测分辨率,因此难以得到单个碎片的观测弧段。随着时间的推进,碎片之间的距离逐渐增大,当距离足够大时,监测装备就可以获得该碎片的观测弧段。假定一个碎片与其他碎片之间的距离至少为装备观测误差的 3 倍时,该碎片可被监测装备识别分离而生成其测轨弧段。由此这里对 COSMOS-2251/Iridium-33 碎片在碰撞后 200 min 之内的距离进行演化分析。

## 2.1 数据预处理

NORAD TLE 编目库的分析研究表明,自 2009 年 2 月 10 日(碰撞日)至 2009 年 3 月 9 日,分别源自 COSMOS-2251 和 Iridium-33 的 432 个和 193 个碰撞碎片编目入库。基于这些碎片在此期间的 TLE 数据,本文采用联合多个两行根数进行轨道确定和预报的方法<sup>[6,10]</sup>,反演确定碰撞时刻各空间碎片的状态信息<sup>[11]</sup>,并与碰撞发生时刻碎片的状态信息进行比较,剔除相对距离大于 100 km 的空间碎片,最终选择 374 个 COSMOS-2251 碎片和 154 个 Iridium-33 碎片进行实验。图 1 给出了用于实验的 COSMOS-2251 和 Iridium-33 空间碎片相对于碰撞参考点(碰撞时刻的位置)的距离。

由图 1 可知,参与实验的 85% 以上的碎片与碰撞参考点的相对距离小于 50 km。对于 COS-

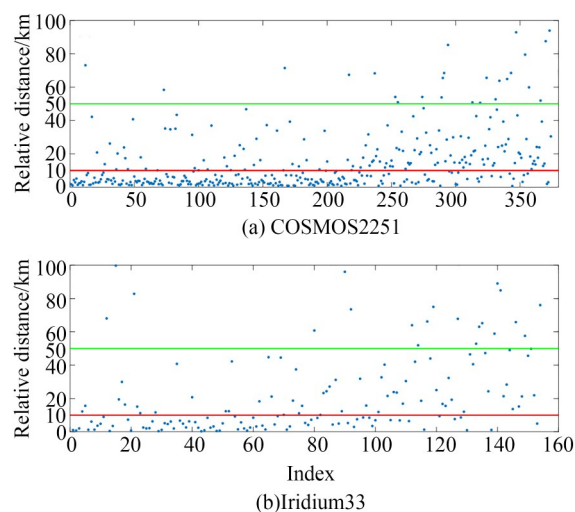


图 1 根据 TLE 反演的碰撞时刻碎片相对于碰撞参考点的距离

Fig. 1 Distances of debris relative to collision reference point at collision epoch

MOS-2251 卫星,57% 的空间碎片相对距离小于 10 km;对于 Iridium-33 卫星,48% 的空间碎片相对距离小于 10 km。理论上,碰撞时刻碎片之间的距离为零,但由于采用 TLE 数据反演确定碰撞时刻的碎片间距离,数据存在误差,计算所得的碰撞时刻碎片间距离不为零。不过,这一问题对后续所得结论的影响有限。

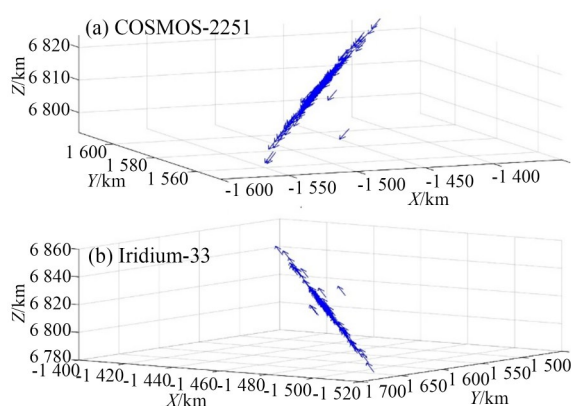


图 2 碎片在碰撞点的初始速度分布

Fig. 2 Initial velocity distributions of debris at collision reference point

图 2~图 3 分析了碎片云在碰撞点的初始速度分布及速度大小。由图可见,COSMOS-2251 碎片云的速度方向基本都沿原 COSMOS-2251

的运动方向,速度差异最大达 400 m/s;Iridium-33 碎片云的速度方向基本都沿原 Iridium-33 的运动方向,但速度差异小于 150 m/s。通过碎片在碰撞点的初始位置和速度可进行轨道预报。

2.2 空间碎片间最小距离统计分析

为分析空间碎片间相对距离的演变情况,两颗卫星碰撞产生的碎片云碰撞发生时刻起大约运行 100 min 回到碰撞原点,即新碎片的轨道周期约为 100 min。在一个轨道周期内大部分空间碎片沿着母星轨道运动,只是随着时间的推进,部分碎片开始偏离母星轨道。

根据碎片间的相对距离和监测装备的测量精度,可确定新碎片的监测分离和识别能力。通常,当碎片间距大于距离误差的 3 倍以上时,可以分离识别单个碎片,得到碎片的独立观测弧段。设监测装备的碎片三维位置分量观测误差为  $\sigma_x$  (且各分量的误差相等、互相独立),则两碎片间的距离误差为  $\sqrt{2}\sigma_x$ ,碎片可分离识别的距离为  $s=3\sqrt{2}\sigma_x$ 。假设光学监测的角度观测精度为  $20''$ ,监测距离为 1 500 km,则轨道位置分量的观测误差约为 145 m,可得碎片的可分离距离为 615 m。设雷达监测的距离误差为 100 m、角度误

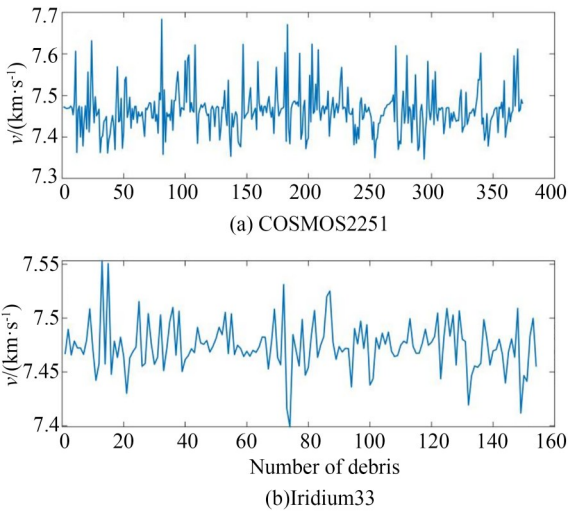


图3 碎片在碰撞点的初始速度  
Fig. 3 Magnitude of initial velocities of debris at collision reference point

差为  $150''$ ,监测距离为 1 500 km,则轨道位置分量的观测误差约为 1 190 m,碎片的可分离距离为 5 049 m。根据上述假定得到碎片的可分离距离,碰撞后 200 min 内 COSMOS-2251/Iridium-33 碎片间距随时间的变化与可分离距离统计见表 1,同时给出了关于 2 倍可分离距离的结果。

表1 COSMOS-2251/Iridium-33 碎片在指定相对距离范围内的碎片个数与总碎片数的百分比  
Tab. 1 Percentage of debris from COSMOS-2251/Iridium-33 within specified relative distances compared to total number of debris (%)

| 时间/<br>min | $\leq 0.615$ km |            | $\leq 1.230$ km |            | $\leq 5.049$ km |            | $\leq 10.098$ km |            |
|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
|            | COSMOS-<br>2251 | Iridium-33 | COSMOS-<br>2251 | Iridium-33 | COSMOS-<br>2251 | Iridium-33 | COSMOS-<br>2251  | Iridium-33 |
| 1          | 99              | 53         | 92              | 75         | 98              | 95         | 100              | 99         |
| 10         | 77              | 1          | 3               | 1          | 32              | 34         | 59               | 71         |
| 20         | 1               | 1          | 1               | 1          | 14              | 14         | 39               | 42         |
| 30         | 0               | 0          | 1               | 0          | 11              | 5          | 28               | 29         |
| 50         | 0               | 0          | 4               | 0          | 18              | 18         | 34               | 47         |
| 100        | 0               | 1          | 13              | 12         | 50              | 52         | 66               | 77         |
| 150        | 0               | 0          | 3               | 1          | 16              | 16         | 34               | 39         |
| 200        | 0               | 0          | 5               | 0          | 29              | 33         | 49               | 56         |

由表 1 可知,在一个轨道周期内,对于 COSMOS-2251 碎片,采用光学监测手段,碰撞发生 20 min 后,理论上可监测分离 99% 以上的新碎片;采用雷达监测手段,理论上碰撞发生 20 min 后可监测分离约 86% 的新碎片。对于 Iridium-33

卫星碎片,发生碰撞 10 min 后,相对距离大于 0.615 km 的空间碎片个数达到总个数的 99%,因此,光学监测理论上可监测分离 99% 的新碎片;采用雷达监测手段,发生碰撞 20 min 后,理论上可监测分离 86% 的新碎片。需要特别说明的



是,在回到碰撞点位置时,部分碎片具有靠近的趋势,在该点附近的监测分离能力较弱。

根据表 1 得出,基于固定的碎片面质比为 0.006。由于面质比差异引起轨道变化,对实验中碎片的面质比随机取原值的 1~10 倍进行一天的轨道预报,并与固定面质比的轨道预报比较,得各碎片预报轨道位置之差的最大值,如图 4 所示。可见,即使面质比差达 10 倍, COSMOS-2251 和 Iridium-33 碎片的轨道位置差均小于 100 m,远远小于前述碎片的可分离距离。因此,在碎片快速编目时,不同面质比取值对于分析碎片云监测分离结果和可测弧段计算基本不产生影响。

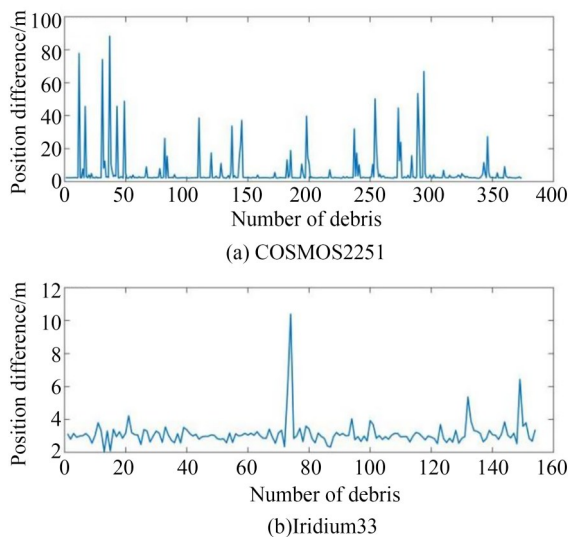


图 4 采用不同面质比的碎片一天内的位置差

Fig. 4 Position errors of debris with different area-to-mass ratios over one day

### 2.3 碎片间距离变化的周期性

为了进一步分析 COSMOS-2251/Iridium-33 空间碎片间相对距离的总体变化趋势,统计了 2 个轨道周期内空间碎片相对距离的平均值、最大值和最小值,结果如图 5 所示。

由图 5 可知, COSMOS-2251 碎片间相对距离的最大值和平均值随着时间的增加而变大,其最小值具有周期性,周期为轨道周期的一半; Iridium-33 空间碎片间相对距离的平均值、最大值和最小值均具有周期性,周期也为轨道周期的一半。当运行一个周期回到碰撞位置时,部分碎片

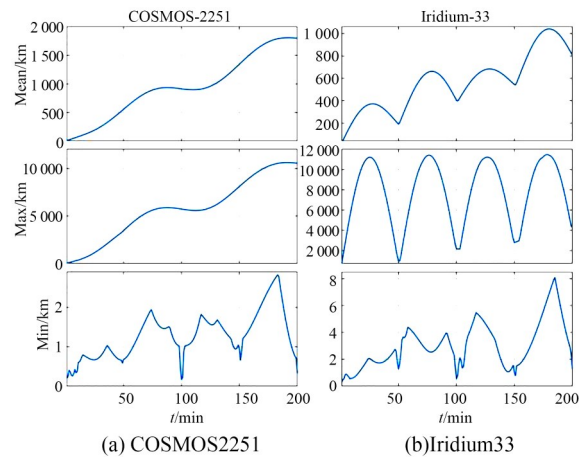


图 5 碎片间相对距离的平均值、最大值和最小值

Fig. 5 Average, maximum, and minimum values of relative distances between debris

间的相对距离缩短,其相对距离在一个周期内达到最小。为此,提取相对距离具有周期性的空间碎片,并对其周期性进行分析,结果见图 6。

图 6 展示了部分 COSMOS-2251 碎片和 Iridium-33 碎片间相对距离变化的周期性,从图中可知,其变化周期为一个或半个轨道周期。对于相对距离变化具有一个轨道周期的空间碎片而言,碰撞发生后,空间碎片的距离不断增大,到半周期时达到最大随后减小;到一个周期时,达到最小。对于相对距离变化具有半个轨道周期的空间碎片而言,碰撞发生后,空间碎片的距离不断增大,到四分之一周期时达到最大随后减小;到半个周期时达到最小随后增大,到四分之三周期时再达最大随后减小;到一个周期时,达到最小。

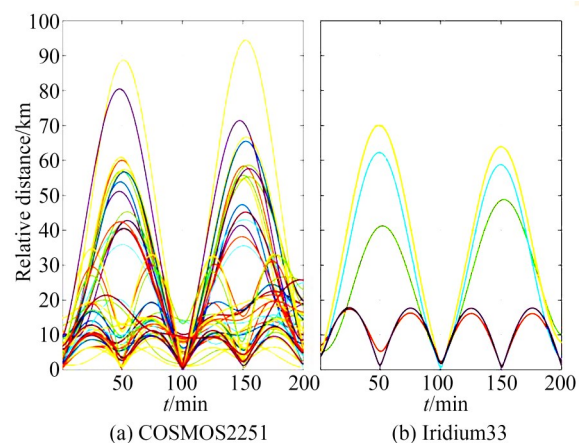


图 6 部分碎片之间距离的周期性

Fig. 6 Periodicity of distances between some debris

图 7(a)和 7(b)分别为两个磁片之间的距离在碰撞后两个轨道周期内的变化,以及相对距离最短时刻前后 5 min 内的时间序列。

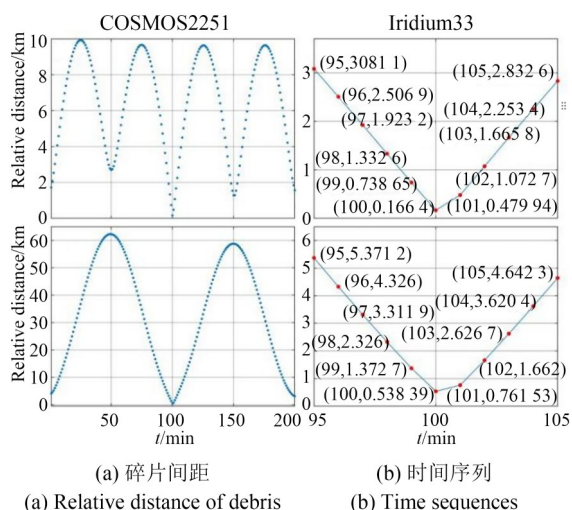


图 7 碎片间相对距离的时间序列

Fig. 7 Time series of relative distances between debris

由图 7(a)可知,这两个 COSMOS-2251 碎片间距离变化的周期为半个轨道周期,而 Iridium-33 碎片间距离变化周期则为一个轨道周期。图 7(b)表明,在碰撞发生后 100~101 min 内,对于 COSMOS-2251 碎片,相对距离的变化率约为 300 m/min,其他时段相对距离的变化率约为 600 m/min,呈线性变化;对于 Iridium-33 碎片,相对距离的变化率约为 200 m/min,其他时段相对距离的变化率约为 1 km/min,也呈线性变化。运行一周回到碰撞点, COSMOS-2251 碎片 1 min 后的相对距离已达到 600 m, 2 min 后该碎片的相对距离已大于光学监测分离的要求, 9 min 后相对距离可达 5 400 m,符合雷达监测分离的要求;而 Iridium-33 碎片 1 min 后的相对距离约为 1 km,达到光学监测分离的要求, 6 min 后相对距离约为 6 km,达到雷达监测分离的要求。因此,新碎片回到碰撞点附近时,碎片间距离小于监测分离距离只需 1~2 min。也就是说,在碰撞后的最初几个轨道周期内,绝大部分时间碎片间的距离大于监测分离距离,完全有可能获得碎片云中单个碎片的多个测轨弧段。

### 3 快速轨道编目能力分析

#### 3.1 轨道编目

基于碎片间的最小距离和监测装备的监测精度,得到了碎片云中单个碎片的监测分离和识别条件,单个碎片通过某监测装备视场并满足条件时,可获得该碎片的一个测轨弧段。在数小时至数天内采集一个新碎片至少 3 个弧段,则可利用图 8 所示的方法进行新碎片的轨道编目。

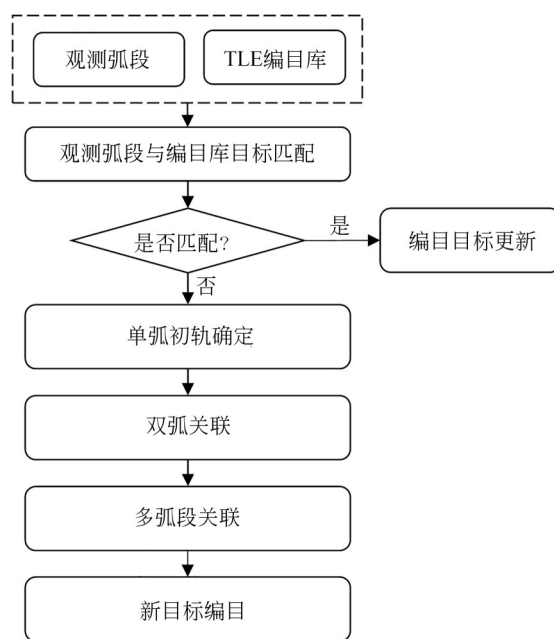


图 8 基于多个测轨弧段的新目标编目流程

Fig. 8 Flowchart of new space object orbit cataloging using multiple arcs

对于获得的多个观测弧段,作者团队提出了基于“目标匹配-初轨确定-双弧关联-多弧编目”的目标轨道编目方法<sup>[12,7]</sup>,具体包括 4 个步骤。

(1)首先进行目标匹配,判别空间目标观测弧段是属于空间目标编目库(例如 NORAD 的 TLE 编目库)中的已知编目目标,还是属于轨道信息完全未知的新目标<sup>[13]</sup>。弧段与目标之间的匹配通常采用  $O-C$  残差检验法,即利用编目目标的轨道参数计算观测时刻的预报观测值( $C$ ),与实际观测值( $O$ )组成残差序列( $O-C$ );然后,通过残差序列的均方根(RMS)与设定的阈值进行比较,即可判断观测弧段与编目库中的目标是否匹配。若匹配成功,则利用匹配弧段更新编目目标

的轨道;否则,该弧段源于未知目标,将进行后续的新目标轨道编目。

(2)对于目标归属未知的测轨弧段,需要进行单弧初轨确定,获得新目标较粗略的初始轨道参数<sup>[14]</sup>。为了解决光学短弧时轨道参数与距离初值难以估计的难题,本文采用距离搜索法进行初轨确定<sup>[15-17]</sup>。该方法取观测弧段的首尾两观测方向,并假设首尾两方向所对应的距离值为 $\rho_1$ , $\rho_2$ ;给定 $\rho_1, \rho_2$ 的搜索范围,在此范围内以一定的步长改变距离值;每一组 $\rho_1, \rho_2$ 可以得到目标首尾两个时刻的位置矢量,基于两组位置矢量,可以通过 Lambert 问题<sup>[18,13]</sup>来确定一组轨道参数,进而计算中间任意时刻的位置。在此基础上,反算出观测时刻的角度观测值,与真实的角度观测值进行比较得到残差序列,再基于残差分析确定一组初轨参数。

(3)对于两个测轨弧段,进行双弧关联,以确定两个弧段是否属于同一未知目标。双弧关联旨在形成同一目标的弧段对,为后续进行三个及以上弧段之间的关联提供基础。本文采用基于摄动改正的双弧关联定轨一体化解算方法<sup>[12,7]</sup>。该方法根据两个观测弧段上的三个位置(例如第一个弧段的开始与结束时刻的位置及第二个弧段开始时刻的位置)的距离观测值(根据初轨根数计算的目标与测站间的距离),利用 Gooding 初轨确定法进行双弧定轨<sup>[7]</sup>。

(4)最后在双弧关联的基础上进行多弧段关联。假设双弧关联数据库中的两组弧段对( $A_1, A_2$ )和( $A_2, A_3$ )属于同一新目标 A,则可确定公共弧段为 $A_2$ 。将含有 $A_2$ 弧段的双弧关联数据组合成三弧组合( $A_1, A_2, A_3$ ),然后选择( $A_1, A_2$ )或( $A_2, A_3$ )的双弧关联定轨结果作为三弧关联的初始值,采用 SGP4/SDP4 最小二乘定轨法进行编目定轨<sup>[12]</sup>。如果轨道收敛且 RMS 值小于关联阈值,那么判断三弧关联成功。在三弧关联的基础上,不断重复以上步骤,就可以得到多弧段的新目标编目结果。

### 3.2 基于天基光学监测系统的碎片云快速编目

基于上述轨道编目方法,利用一定时间段内至少三个弧段可以对未知目标进行编目定轨<sup>[12]</sup>。理论上,弧段越多,定轨精度越高。若三个弧段关联成功,则可完成基本的新目标编目。

对碎片云进行快速编目,首先每个碎片已分离可被监测装备观测得到独立弧段,其次在较短时段内具有三个或更多个弧段。由于碰撞 20 min 后,绝大部分碎片已分离可观测,因此,快速编目的关键是尽快获得碎片至少三个弧段的信息。

天基光学监测系统具备全天时、全天候的观测能力,重访周期相对较短,能够在较短时间内对覆盖范围内的目标进行多次观测<sup>[7]</sup>。实验设计了由 24 颗轨道高度为 750 km 的太阳同步轨道卫星组成的天基光学监视系统,卫星平均分布到 4 个轨道面,每个轨道面均匀分布 6 颗卫星,相邻轨道面上相邻卫星之间的相位因子为 1。相位因子用于表征相邻轨道面上卫星之间的相对位置关系。第一个轨道面和第三个轨道面的望远镜指向为速度方向,第二个轨道面和第四个轨道面的望远镜指向为与速度方向相反的方向,第一个轨道面与第二个轨道面和第三个轨道面与第四个轨道面的升交点赤经间隔均为  $20^\circ$ ,第一个轨道面与第三个轨道面和第二个轨道面与第四个轨道面的升交点赤经间隔均为  $180^\circ$ ,视场角为  $15^\circ$ 。具体参数设置见表 2。

表 2 天基光学监测系统的参数设置

Tab. 2 Parameter configurations of space-based surveillance system

| 轨道类型 | 长半轴/<br>km | 偏心率     | 倾角/ $(^\circ)$ | 测角精度/<br>$('' )$ |
|------|------------|---------|----------------|------------------|
| LEO  | 7 128      | 0.000 1 | 98             | 2                |

根据星座和望远镜设计能力仿真生成碎片的可观测弧段<sup>[19]</sup>。计算时设碎片尺寸为 10 cm、碎片反射率为 0.1、日月规避角分别为  $30^\circ$  和  $15^\circ$ ,不在地影,不被地球遮挡,在视场内,删除弧长 60 s 以下的弧段。

对观测平台与碎片之间的距离分布进行统计分析,见图 9。结果显示,62.49% 的 COSMOS-2251 碎片和 78.68% 的 Iridium-33 碎片与观测平台的距离小于 1 500 km,最大距离为 2 500 km。这个距离仅影响碎片间的可分离距离,光学观测条件下,可分离相对距离约为 1 082 m;雷达观测条件下,对应可分离距离约为 7 721 m。由表 1 可知,30 min 后, COSMOS-2251 和



Iridium-33 中 70% 以上的碎片间相对距离大于 10 km。此仿真实验验证的是一天内可快速编目。因此,观测平台与碎片间距离的动态变化对于本文的仿真实验而言影响较小,以 1 500 km 为代表距离所建立的误差模型在绝大多数观测场景下是合理且有效的。

可测弧段统计结果如图 10 和图 11 所示。由图 10(a)可知,碰撞后 6 h 内,56.70% 的 COSMOS-2251 新碎片至少有 3 个可测弧段,26.80% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,12.37% 新碎片至少有 10 个可测弧段。由图 10(b)可知,碰撞后 12 h 内,89% 的 COSMOS-2251 新碎片至少有 3 个可测弧段,56% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,25% 的新碎片至少有 10 个可测弧段。由图 10(c)可知,碰撞后 18 h 内,98% 的 COSMOS-2251 新碎片至少有 3 个可测弧段,89% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,48% 的新碎片至少有 10 个可测弧段。由图 10(d)可知,碰撞后一天内,95% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,81% 的新碎片至少有 10 个可测弧段。

对于 Iridium-33 新碎片,6 h 内,88.89% 的新

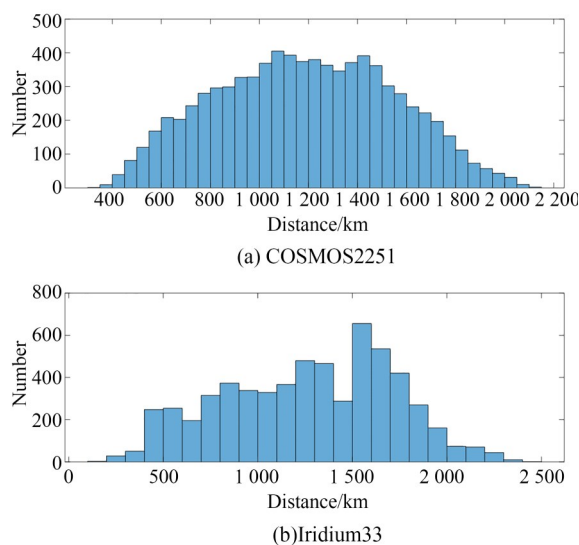


图 9 观测平台与碎片间距离的分布

Fig. 9 Distribution of distances between observation platform and debris

碎片至少有 3 个可测弧段,43.33% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,所有新碎片的可测弧段均小于 10 个,如图 11(a)所示;12 h 内,92.78% 的新碎片至少有 3 个可测弧段,80.41% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,58.76% 的新碎片至少有 10

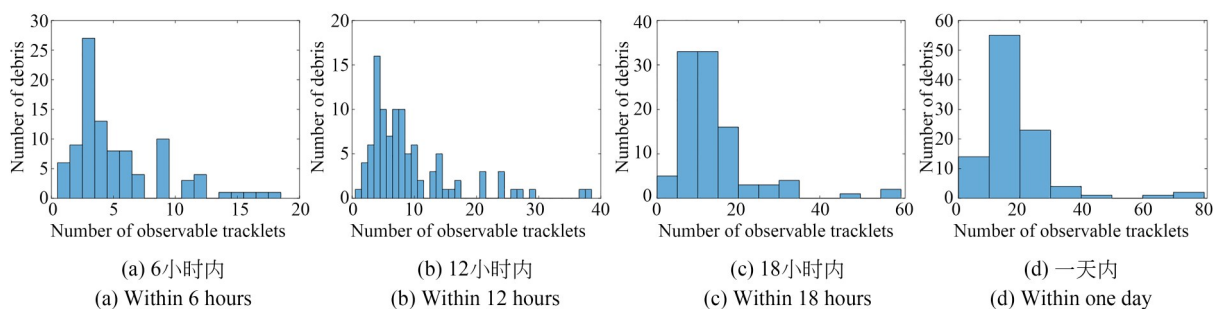


图 10 碰撞后 COSMOS-2251 碎片可测弧段数的统计结果

Fig. 10 Statistical results for number of observable arcs of COSMOS-2251 debris after collision

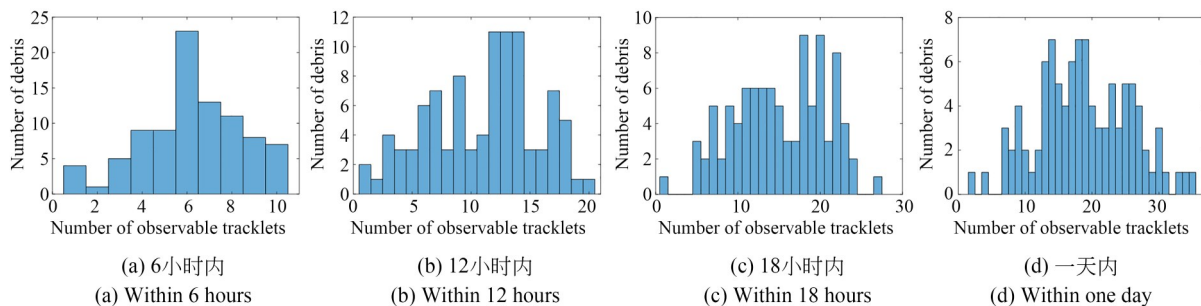


图 11 碰撞后 Iridium-33 碎片可测弧段数的统计结果

Fig. 11 Statistical results for number of observable arcs of Iridium-33 debris after collision



个可测弧段,如图 11(b)所示;18 h 内,98.98% 的新碎片至少有 3 个可测弧段,93.88% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,77.55% 的新碎片至少有 10 个可测弧段,如图 11(c)所示;一天内,99% 的新碎片至少有 3 个可测弧段,98% 的新碎片至少有 6 个可测弧段,87% 的新碎片至少有 10 个可测弧段,如图 11(d)所示。

利用碰撞后一天内所有的可测弧段,基于研究团队研制的新碎片编目软件,分别对 COSMOS-2251 和 Iridium-33 的 100 个新碎片进行编目, COSMOS-2251 和 Iridium-33 碎片弧段的初轨确定 (Initial Orbit Determination, IOD) 成功率分别为 99.9% 和 100%; 然后,生成双弧关联的目标库;最后,进行三弧或更多弧的关联定轨,分别成功编目了 70 个 COSMOS-2251 和 73 个 Iridium-33 新碎片,即新碎片在碰撞后一天内的编目成功率分别为 70% 和 73%。由此可知,采用碰撞发生后一天内的可监测弧段,可对 COSMOS-2251 和 Iridium-33 的大部分新碎片进行编目。

## 4 结 论

本文以 Iridium-33 和 COSMOS-2251 卫星碰撞为例,基于历史二行根数,开展了碰撞碎片云监测和快速编目研究。研究发现,早期的碎片云都集中在“收缩点”和“收缩线”附近,以单次过收缩点的时间为一个周期, COSMOS-2251/Iridium-33 碎片间相对距离最小值的变化周期为一个或半个轨道周期。假设光学监测误差为 20"、监测距离为 1 500 km,在发生碰撞 20 min 后,99%

以上的碎片可以被光学监测分离;再设雷达监测的距离误差为 100 m、角度误差为 150", 监测距离为 1 500 km,发生碰撞 20 min 后,86% 以上的碎片可被雷达监测分离。也就是说,在碰撞 20 min 后,碎片之间的距离足以识别分离大多数碎片,监测装备能够得到单个碎片独立的观测弧段;即使碎片面质比有 10 倍之差,这一结论仍成立。仿真结果表明,至少需要三个弧段可实现新碎片的编目,但由于碰撞发生后弧段的空间分布较为密集,只利用三个弧段进行编目,编目的成功率较低,因此需要更多的弧段以提高编目成功率。构建一个有 24 颗卫星组成的空间目标光学监测系统,随机从 COSMOS-2251 和 Iridium-33 中各选择 100 个碎片,利用一天内的观测弧段进行这些碎片的编目。实验结果表明,在碰撞后一天内,81% 的 COSMOS-2251 和 87% 的 Iridium-33 碎片有至少 10 个可测弧段,实现了新碎片编目。最后,基于研究团队的新碎片编目软件,处理碰撞后一天内所有的观测弧段,成功编目了 70% 的 COSMOS-2251 新碎片和 73% 的 Iridium-33 新碎片。由此表明,基于合理设计的天基光学监测星座,能够在一天内对碰撞新碎片进行轨道编目。

## 作者贡献声明:

曹利颖:方法提出,论文构思和撰写,实验设计;

桑吉章:论文的指导、审核与编辑;

李彬:实验设计及数据分析;

刘磊:实验验证及数据分析;

雷祥旭,赵有:实验数据分析。

## 参考文献:

- [1] PARDINI C, ANSELMO L. Physical properties and long-term evolution of the debris clouds produced by two catastrophic collisions in Earth orbit [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(3): 557-569.
- [2] 桑吉章,李彬,刘宏康. 空间碎片轨道协方差传播及其动态校正[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2139-2146.
- [3] SANG J Z, LI B, LIU H K. Orbital covariance propagation of space debris and its dynamic calibration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2139-2146. (in Chinese)
- [4] OLTROGGE D L, ALFANO S. The technical challenges of better space situational awareness and space traffic management[J]. *Journal of Space Safety Engineering*, 2019, 6(2): 72-79.
- [5] WANG T. Analysis of debris from the collision of

- the cosmos 2251 and the iridium 33 satellites [J]. *Science & Global Security*, 2010, 18(2): 87-118.
- [5] MILLER R, HEATHER C P D. Orbital debris quarterly news[J]. *A publication of the NASA Orbital Debris Program Office (ODPO)*, 2021, 25(4).
- [6] 杜建丽. 面向空间碎片编目的天基监测系统研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- DU J L. *Researches on Space-Based Surveillance System for Cataloging Space Debris* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [7] 赵广宇. 光学监测空间新目标关联编目关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
- ZHAO G Y. *Research on Key Technologies of Correlative Cataloging of New Objects in Optical Monitoring Space* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2023. (in Chinese)
- [8] 卢哲俊. 空间碎片群目标状态估计理论与方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- LU ZH J. *Research on Theory and Method of State Estimation of Space Debris Group* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] KLINKRAD H 著. 空间碎片: 模型与风险分析 [M]. 钱卫平译. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- KLINKRAD H. *Space Debris-Models and Risk Analysis* [M]. QIAN W P, Translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [10] 陈俊宇, 李彬, 陈立娟, 等. 联合多个两行根数进行轨道预报[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S2): 35-39.
- CHEN J Y, LI B, CHEN L J, *et al.* Combined with multiple two-line elements for orbit prediction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): 35-39. (in Chinese)
- [11] 陈俊宇, 李彬, 桑吉章. 基于 TLE 数据的编目目标轨道改进及再编目[C]. 第二届中国空天安全会议论文集. 大连, 2017: 31-36.
- CHEN J Y, LI B, SANG J ZH. Orbit improvement and re-cataloging of catalogued objects based on tle data [C]. *Proceedings of the 2nd China Space and Air Security Conference*. Dalian, 2017: 31-36. (in Chinese)
- [12] 刘磊. 基于雷达数据的空间目标编目定轨关键技术及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- LIU L. *Research on the Key Technology and Application of Cataloging Orbit Determination of Space Targets Based on Radar Data* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022. (in Chinese)
- [13] LIU L, LI B, CHEN J Y, *et al.* Applying Lambert problem to association of radar-measured orbit tracks of space objects[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(12): 301.
- [14] 雷祥旭, 劳振迪, 王东亚, 等. 基于动态阈值的距离搜索初轨确定[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(13): 2103-2111.
- LEI X X, LAO ZH D, WANG D Y, *et al.* Initial orbit determination in range search based on dynamic thresholds [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(13): 2103-2111. (in Chinese)
- [15] 章品, 桑吉章, 潘腾, 等. 应用距离搜索的低轨空间碎片初始轨道确定方法[J]. *航天器工程*, 2017, 26(2): 22-28.
- ZHANG P, SANG J ZH, PAN T, *et al.* Initial orbit determination method based on range searching for LEO space debris[J]. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(2): 22-28. (in Chinese)
- [16] 雷祥旭, 桑吉章, 李振伟, 等. 低轨空间目标甚短弧初轨关联[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(10): 1526-1532.
- LEI X X, SANG J Z, LI Z W, *et al.* Association of very-short-arc angles data for LEO space objects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1526-1532. (in Chinese)
- [17] 张郑元. Gooding 甚短弧初轨确定方法的改进技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- ZHANG Z Y. *Study on the Improvement Technology of Gooding Very Short Arc Initial Orbit Determination Method* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (in Chinese)
- [18] GOODING R H. A procedure for the solution of Lambert's orbital boundary-value problem[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1990, 48(2): 145-165.
- [19] 李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 260-267.
- LI M, XUE L, HUANG CH, *et al.* Estimation

of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability[J]. *Optics*

*and Precision Engineering*, 2016, 24 (2) : 260-267. (in Chinese)

#### 作者简介:



曹利颖(1991—),女,内蒙古赤峰人,博士研究生,2016年于桂林理工大学获得硕士学位,主要从事空间碎片云的识别与跟踪研究。E-mail: liying.cao@whu.edu.cn

#### 通讯作者:



桑吉章(1963—),男,教授,主要从事空间态势感知、空间环境监测、卫星轨道理论、数据关联等研究。E-mail: jzhsang@sgg.whu.edu.cn