

基于时间误差修正与多特征联合判决的空间碎片测轨数据关联方法

王东亚[†] 黄剑 梁伟[‡]

(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要 针对大批量空间碎片的编目管理,广域监视测轨数据与编目目标的关联匹配是前提和关键,关联正确率不仅影响正常编目处理,也影响观测数据利用率和监视体系效能。提出一种改善大批量空间碎片测轨数据关联正确率的方法。首先,根据轨道预报误差特点,建立了将大尺度轨道空间位置误差向小尺度时间误差转换的时间误差参数估计与观测量残差修正模型;然后,构造基于时间误差参数(包括常数项和线性项)、修正后观测量残差RMSE统计值以及关联价值函数等四特征量联合的关联判决模型,并给出关联判决门限设置策略和关联处理流程;最后,进行了光电望远镜(阵)的仿真和实测数据验证,结果显示该方法的测轨数据-目标关联正确率可达约98%的水平。

关键词 方法: 数据分析, 编目: 空间碎片, 天体力学: 观测数据关联

中图分类号: P128; **文献标识码:** A

1 引言

空间碎片编目管理是太空态势感知和太空交通管理的重要基础。为实现对数以万计乃至十万计规模量级的空间碎片进行编目管理,一般主要采用广域探测手段(如相控阵雷达、光电阵等),对多目标进行同时测量,以获取大批量目标测轨数据。针对设备端获取的大量未知目标测轨数据,首选需要解决其与编目数据库中已知目标之间的关联匹配(即观测数据-编目目标关联匹配,简称数据-目标关联)问题。考虑到日常观测数据量巨大,如何进一步提高数据-目标关联正确率,对提高测轨数据应用效益、维持稳定编目管理具有重要意义。

目前,主要采用两种数据-目标关联方法^[1-2]。

2024-05-07收到原稿, 2024-07-02收到修改稿

[†]dongyaww@163.com

[‡]wliang@whu.edu.cn

第1种方法是采用基于轨道参数判决的关联方法,首先对观测弧段进行初轨确定处理,然后将初轨参数与已编目目标的轨道参数进行比较,通过构建合适的判决量,优选关联结果。该方法受限于初轨结果的不确定性,当初轨确定成功率较低、初轨精度不稳定时,都会影响关联效果。第2种方法是采用基于观测残差分析的关联方法,分别计算各已编目目标在观测时段的观测预报值,提取实际观测值与观测预报值的残差序列,并结合门限进行关联目标判决。该方法避开了初轨条件约束,可在一定程度上提高关联正确率。但是,由于空间碎片轨道预报误差的个体性差异大,直接基于观测残差进行关联判决,门限设置困难,且对已编目目标轨道根数时效及精度质量要求较高,制约了关联正确率的进一步提高。

针对上述问题,本文针对广域探测数据通过分析轨道预报误差特点及其对数据-目标关联正确率的影响,提出一种基于时间误差修正的方法,将大尺度空间位置预报误差转换为小尺度预报时间误差;在此基础上,构造基于时间误差参数与观测量残差统计值等多个特征量联合的关联判决方法,并给出相应的门限设置策略以及目标关联处理流程;针对大批量仿真及实测数据进行目标关联验证分析,结果表明该方法的空间碎片测轨数据关

联正确率约98%,具有较高的应用价值.

2 测轨数据-目标关联准确率的影响因素分析

2.1 关联结果分类与概率定义

将探测设备获取的单圈测轨数据,与已知目标集合进行关联,可能存在如下5种关联结果(关联矩阵如表1所示):

表 1 测轨数据-目标关联结果分类矩阵
Table 1 The matrix for correlation results of observations to orbits

True orbit condition	Correlation result		
	Observations are correlated		Observations are not correlated
	Observations are correlated to true orbit	Observations are not correlated	
True orbit is in catalog	TP	FP ₁	FP ₂
True orbit is not in catalog	—	FN	TN

(1)真关联TP,真实目标在已知目标集中存在,且与测轨数据关联结果(目标编号)一致;

(2)真未关联TN,真实目标在已知目标集中不存在,且测轨数据关联失败(无关联结果);

(3)误关联FP₁,真实目标在已知目标集中存在,但与测轨数据关联结果编号不相同;

(4)漏关联FP₂,真实目标在已知目标集中存在,但测轨数据关联失败(无关联结果);

(5)虚关联FN,真实目标在已知目标集中不存在,测轨数据关联结果为已知目标集中其他目标.

根据关联结果分类情况,将正确关联概率、错误关联概率、漏关联概率分别定义为:

$$P_{\text{true}} = \frac{TP + TN}{TP + FP_1 + FP_2 + FN + TN}; \quad (1)$$

$$P_{\text{false}} = \frac{FP_1 + FN}{TP + FP_1 + FP_2 + FN + TN}; \quad (2)$$

$$P_{\text{miss}} = \frac{FP_2}{TP + FP_1 + FP_2 + FN + TN}. \quad (3)$$

日常空间碎片编目管理过程中,要求测轨数据-目标关联正确率越高越好;在此基础上,尽量

减少发生错误关联(误关联和虚关联)的情况,以避免将错误数据代入后续编目定轨处理中^[3],影响编目轨道生成的精度.相比较而言,漏关联产生的影响要小一些,可以通过动态计划调度补充观测数据、“新”目标与已知目标关联等途径,对因漏关联可能导致的编目中断进行恢复.

2.2 影响关联正确率的因素

将测轨数据与已知目标进行关联,本质上是判断已知目标在观测时刻的空间参数与测轨数据所映射的空间参数能否在一定程度上具有同一性.不同的关联方法,采用的判决量有所差异,但最终本源都是针对已知目标轨道外推至观测时刻的空间参数与目标实测空间参数之间的差异进行判断.

针对给定的观测量 y ,下标o标识利用测轨数据计算的观测量实测值,下标c标识利用已知目标轨道参数计算的观测量计算值,其中 y_c^r 标识真实的观测量计算值, y_c^p 标识预报的观测量计算值, ε 为测量误差.对某一观测时刻 $t_i(i=0,1,\dots,n)$ 的观测量误差可用下式表示:

$$\begin{aligned} (y_o - y_c)_i^r &= y_{oi} - y_{ci}^r + \varepsilon_i = \\ &= (y_o - y_c^p)_i + (y_c^p - y_c^r)_i + \varepsilon_i. \end{aligned} \quad (4)$$

从上式可以看出, 在利用已知目标编目轨道对测轨数据进行目标关联时, 由于采用轨道预报方式获得观测量计算值, 会引入观测预报误差。该引入误差一般远超出测量误差, 直接影响关联判决正确与否。

进一步来说, 观测预报误差来源于编目轨道外推预报所产生的轨道位置误差。根据轨道预报误差传播规律^[4], 对于近圆轨道, 轨道预报误差主要集中在沿迹方向(沿轨道飞行方向), 且随预报期(从根数历元时刻到给定的预报时间点的间隔)的延长而不断发散。不同目标或者同一目标的不同预报期时刻, 对应的轨道预报位置误差均具有较大差异性, 导致直接针对轨道预报位置误差进行关联判决的门限设置难度很大, 这是影响最终关联效果的核心因素。

3 测轨数据目标匹配关联模型建立

3.1 基本思路

充分利用轨道预报误差在短时间范围内呈线性缓变的发散特点, 将轨道位置预报误差变量转化为时间预报误差, 并基于时间预报误差对观测预报误差进行补偿修正; 在此基础上, 联合时间预报误差、修正后的观测量误差统计值等多个特征量, 建立联合判决模型, 设置判决门限, 实现对测轨数据的高正确率目标关联。

3.2 基于时间误差的观测预报误差修正

轨道预报的时间误差, 定义为空间碎片沿轨道飞行方向的位置误差与飞行速率的比值: $\Delta T_i = \frac{\Delta P_i^v}{v}$ 。其中, ΔT_i 为空间碎片在某一观测时刻 $t_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 的时间误差。由于观测弧段时长一般远小于轨道周期, 因此可以假定在观测时段内, 时间误差是线性的, 可表征为:

$$\Delta T_i = \Delta T_0 + K(t_i - t_0). \quad (5)$$

利用观测量变率和时间误差, 建立对观测预报误差进行修正的模型:

$$\begin{aligned} (y_o - y_c)_i^{\text{mod}} &= \dot{y}_i \Delta T_i = \\ &= \dot{y}_i \Delta T_0 + \dot{y}_i(t_i - t_0)K \approx \\ &= \dot{y}_i \Delta T_0 + K(t_i - t_0), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, \dot{y}_i 为 t_i 时的观测量变率, ΔT_0 和 K 为模型参数。

结合(4)式、(6)式, 建立时间误差参数估计模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 & 0 \\ \dot{y}_2 & t_2 - t_0 \\ \dots & \dots \\ \dot{y}_n & t_n - t_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_0 \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_o - y_c)_1 \\ (y_o - y_c)_2 \\ \dots \\ (y_o - y_c)_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对应的矩阵形式为:

$$A\vec{x} = \vec{b} + \vec{\varepsilon}, \quad (8)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 & 0 \\ \dot{y}_2 & t_2 - t_0 \\ \dots & \dots \\ \dot{y}_n & t_n - t_0 \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} \Delta T_0 \\ K \end{bmatrix}, \quad \vec{b} =$$

$$\begin{bmatrix} (y_o - y_c)_1 \\ (y_o - y_c)_2 \\ \dots \\ (y_o - y_c)_n \end{bmatrix}, \quad \vec{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}.$$

采用奇异值分解(SVD)方法求解上述最小二乘拟合问题, 解算时间误差参数 ΔT_0 和 k :

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T \cdot \vec{b}. \quad (9)$$

在此基础上, 得到修正后的观测量误差时间序列:

$$(y_o - y_c)_i^{\text{final}} = (y_o - y_c^p)_i - [\dot{y}_i \Delta T_0 + K(t_i - t_0)]. \quad (10)$$

3.3 多特征联合的目标关联结果判决

选取观测量的时间误差参数 ΔT_0 、 K , 构建关联判决特征矢量:

$$\vec{d} = [\text{RMSE} \quad \Delta T_0 \quad K]^T, \quad (11)$$

其中, $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(y_o - y_c)_i^{\text{final}}]^2}$ 为修正后的观测量误差序列的统计均方根误差。

利用判决特征矢量, 定义多特征联合判决的初始关联价值函数:

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{d_i}{R_i} \right)^2, \quad (12)$$

其中, d_i 为 \vec{d} 的分量, R_i 为各特征量的加权值 ($\vec{R} = [R_1 \ R_2 \ R_3]^T$).

采用两层关联判决模型对测轨数据进行目标关联结果判决. 第I层联合判决条件为:

$$\begin{cases} \text{abs}(d_i) \leq g_i \quad (i = 1, 2, 3) \\ V \leq g_V \quad (R_i = g_i, i = 1, 2, 3) \end{cases}, \quad (13)$$

其中, g_1 、 g_2 、 g_3 分别为 RMSE、 ΔT 、 K 的门限值, g_V 为初始关联价值函数的门限值.

对满足第I层联合判决条件的多个疑似关联目标, 进行第II层优选判决. 首先, 分别计算优选关联价值函数; 然后从疑似关联目标中挑选优选关联价值函数值最小的, 作为最终的关联结果目标. 各疑似关联目标的优选关联价值函数为:

$$V' = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{d_i}{R'_i} \right)^2, \quad (14)$$

其中, $R'_i = \max(d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im})$ 为 m 个疑似关联目标的特征量 d_i 中的最大值.

3.4 关联判决门限设置

本方法涉及的关联判决门限数量较少, 且设置较为便捷, 设置方法分别如下所述.

(1) 均方根误差RMSE的门限值

理想条件下, 修正后的观测量误差仅包含测量误差. 因此, 均方根误差门限值设置的参考量为测轨数据对应的探测设备测量误差. 考虑到观测预报误差的非线性特性, 该门限值一般可取观测量对应的10倍测量误差值.

(2) 时间误差参数 ΔT 的门限值

仅与已知目标轨道根数的精度质量以及预报期(从根数历元时刻到测轨数据观测时刻的时间间隔)有关. 针对工程中常用的双行根数(Two-Line-Elements, TLE)数据, 在预报期不超过7 d条件下, 低轨目标时间误差参数 ΔT 的门限一般控制在20 s以内.

(3) 时间误差参数 K 的门限值

主要与轨道预报误差的非线性特性以及非飞

行方向误差对测量误差的影响大小有关, 一般取到观测量测量误差的2~3倍.

(4) 初始关联价值函数的门限值

在计算初始关联价值函数时, 各特征量的加权值可取对应的门限值, 因此根据初始关联价值函数的定义, 相应的门限值可在0.8~1.0之间取值.

3.5 目标关联处理流程

对单圈测轨数据进行目标关联处理, 包括疑似目标初筛、第I层联合判决筛选、第II层优选判决等3个部分.

(1) 疑似目标初筛

对测轨数据进行平滑, 计算该未知目标在参考时刻(一般取弧段中间点时刻)的空间位置(或测站空间指向)实测值. 从已知目标集合中, 挑选满足历元时间范围条件的已知目标轨道根数; 然后逐一将各目标轨道根数外推至该参考时刻, 计算对应的空间位置(或测站空间指向)预报值. 设置初筛空间位置差(或空间指向角度差)门限, 利用参考时刻的空间位置差(或空间指向角度差)进行关联初筛判断, 保留处于门限范围以内的已知目标, 转入下一步联合判决筛选.

疑似目标初筛的目的是减少后续关联处理的目标容量, 初筛门限取值可适当放宽范围, 空间位置差门限值一般可在50~100 km区间内取值, 空间指向角度差门限取值范围可取5°~10°.

(2) 第I层联合判决筛选

对初筛后的每一疑似目标, 首先分别利用其轨道根数, 计算各观测时刻的观测量计算值以及观测量变率, 生成 A 和残差向量 \vec{b} ; 然后利用(9)式计算时间误差参数 ΔT_0 和 K , 并利用(6)式、(10)式计算修正后的观测量误差, 提取 RMSE; 再利用(12)式计算该疑似目标对应的初始关联价值函数 V ; 最后基于(13)式给出的判决条件, 对该疑似目标进行多特征量联合判决. 若满足判决条件, 则将该疑似目标加入候选关联目标集合中.

若第I层联合判决筛选没有达标的候选关联目标, 则判断无关联结果, 退出目标关联处理. 若经第I层联合判决筛选后仅有1个候选关联目标, 则认为该候选关联目标即为关联结果, 并退出目标关

联处理。若第I层联合判决筛选的候选关联目标数量超过1个，则转入下一步优选判决。

(3) 第II层优选判决

对多个候选关联目标，先利用(14)式计算各目标的优选关联价值函数；再对候选关联目标按照优选关联价值函数值从小到大进行顺序排列，挑选首个候选关联目标作为关联结果，并退出目标关联处理。

4 大批量测轨数据的目标关联验证分析

4.1 仿真数据分析

从互联网公开发布¹的某天TLE根数文件(种

子根数文件)中读取低轨目标初始轨道根数集合，采用高精度轨道预报模型对大批量低轨目标进行轨道外推预报，并分别仿真生成地基光电阵观测数据以及天基光学观测数据。其中，地基光电阵天文定位测角的赤经/赤纬测量误差设置为 $12.5''$ ，天基望远镜的赤经/赤纬测量误差设置为 $5''$ 。

利用提前2 d发布的TLE根数文件，作为已知目标根数集合，开展大批量测量数据的目标关联处理与结果分析。表2列出了测轨数据仿真场景基本信息，时间标准为UTC (Universal Time Coordinated)。

针对光学测角类测轨数据，采用空间指向角作为观测量进行数据-目标关联处理。表3列出了两类设备的目标关联门限值。

表 2 光学测轨数据仿真场景基本信息

Table 2 The information of optical observation data simulation scenario

Epoch of the seed TLE orbits	2022-08-01	
Start and End Epoch of the simulation scenario	2022-08-01 UTC 00: 00: 00—2022-08-02 UTC 00: 00: 00	
Number of space objects in simulation	19226	
Astronomical positioning error	ground based telescope array	12.5''
	space-based telescope	5.0''
Number of tracks simulated	ground based telescope array	19110
	space-based telescope	14952
Epoch of the seed TLE orbits	2022-07-30	

表 3 光学仿真测轨数据目标关联门限设置

Table 3 The threshold for the optical simulated data track-catalogue correlation

Equipment	Threshold			
	$g_1/''$	g_2/s	$g_3/[('') \cdot s^{-1}]$	g_V
ground based telescope array	150	10	30	1
space-based telescope	50	10	15	1

表4列出了地基光电阵和天基望远镜的测轨数据-目标关联结果分类统计信息。统计结果表明，

两类探测设备的测轨数据-目标关联正确率基本上接近98%，且错误关联概率均不超过1%；大部分漏

¹ <http://www.celestrak.org>

关联是由于已知目标轨道根数预报误差较大导致

的, 85%的漏检目标沿迹误差超过100 km.

表 4 光学仿真测轨数据目标关联结果分类统计

Table 4 The statistics of the optical simulated data track-catalogue correlation result

Equipment	Category						
	TP	TN	P_{true}	FP_1	FN	P_{false}	FP_2
ground based telescope array	18475	382	97.90%	139	10	0.78%	253
space-based telescope	14378	301	98.17%	13	20	0.22%	240

针对两组探测设备的测轨数据真关联(TP)样本, 进一步对关联判决参数值分布情况进行统计. 图1所示为4个特征值的直方分布, 从图中可以看出, 无论是地基光电阵设备还是天基望远镜设备,

对应的各特征值均在设定门限范围内集中分布, 具有较好的聚集性, 表明本方法所选判决量利于关联门限值设置.

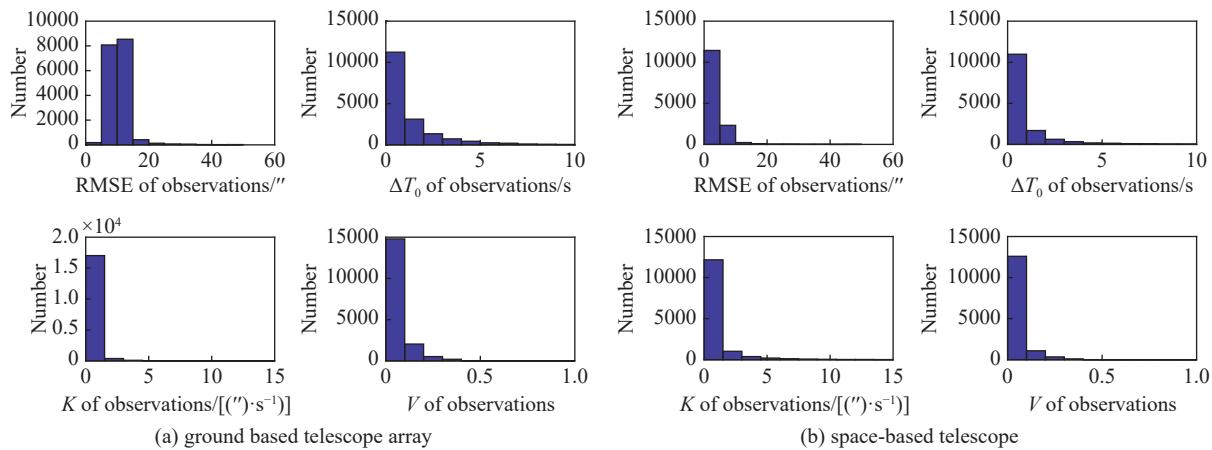


图 1 仿真场景测轨数据-目标关联TP样本的特征值直方分布

Fig. 1 The distribution of TP samples in the track-catalogue correlation simulation

4.2 实测数据分析

以长春15 cm口径光电望远镜阵在2023年8月14日获取的大批量低轨碎片目标实测数据进行目标关联效果分析验证.

(1) 关联结果基准建立

针对2023年8月14日观测夜获取的实测数据, 从公开发布的TLE数据中, 挑选根数历元在2023-08-15 UTC 00: 00: 00–2023-08-16 UTC 00: 00: 00之间的事后根数(共22090个目标), 将每一圈实测数据与挑选的事后根数进行直接观测残差计算, 结合TLE根数精度水平^[5-6], 挑选角度残差RMS最

小且不超过250''的事后根数目标作为该圈实测数据的真实目标(评估基准). 累计提取4772圈实测数据(测试数据)、共3206个目标的基准编号, 这部分数据之外观测圈的事后根数中没有相关根数的真实目标跟踪观测数据, 也可能是观测图像目标提取的虚假观测数据, 它们会干扰正确关联概率、错误关联概率、漏关联概率的计算, 暂不纳入讨论. 下图为各圈数据关于事后根数的角度残差及事后根数预报期统计结果.

(2) 关联门限设置

考虑到长春15 cm口径光电望远镜阵的天文

定位角度测量误差为 $10''$, 结合3.4节门限设置策略, 设置实测数据测试的关联门限, 其取值如表5所示。

(3) 关联处理分析

分别选择观测日期前2 d、前1 d发布的TLE根数文件, 作为已知目标根数集合, 进行两组关联

处理, 并将各组关联结果与基准编号进行比较。表6列出了本方法关联结果与基准编号进行比较的分类统计情况。其中, 两组测试均得到相同的7个真未关联结果, 原因是测试用的已知目标根数集合中不存在对应的目标根数(事后根数中不包含该目标根数)。

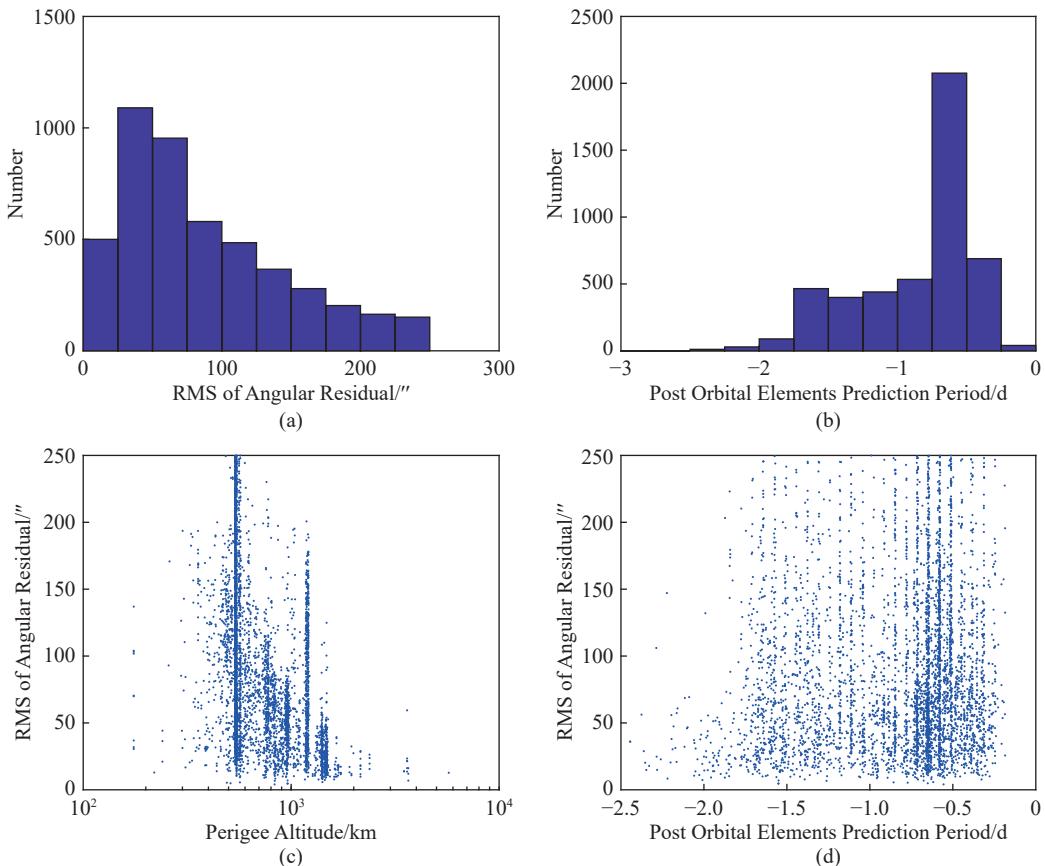


图 2 测试数据角度残差及事后根数预报期统计分布

Fig. 2 The statistics distribution of angle observation residuals and post-elements

表 5 实测数据目标关联门限设置

Table 5 The threshold for real data to catalogue correlation simulation

Threshold	$g_1/''$	g_2/s	$g_3/[('') \cdot s^{-1}]$	g_V
Threshold value	100	10	25	1

从表6给出的关联结果分类统计数据可以看出: (1)本方法关联正确弧段数量占比可达到98%以上, 效果较为理想; (2)本方法对已知目标根

数适应性强, 在采用相同关联门限的条件下, 利用观测日期前1 d或前2 d的发布根数得到的关联结果差别小(总量相差约0.5%), 关联结果稳定。

表 6 光电望远镜阵实测数据目标关联结果分类统计

Table 6 The statistics of optical data to catalogue correlation for telescope array data

Group	First group (Epoch of orbit on 2023-08-12)	Second group (Epoch of orbit on 2023-08-13)
Number of objects	25604	25596
TP	4688	4710
TN	7	7
P_{true}	98.39%	98.85%
FP_1	23	27
FN	11	9
P_{false}	0.71%	0.75%
FP_2	43	19
P_{miss}	0.90%	0.40%

5 有关结论与讨论

本文提出的基于时间误差修正与多特征联合

判决的数据-目标关联方法, 将观测时段大尺度轨道空间位置误差转换为小尺度预报时间误差, 实现了观测量误差空间压缩, 便于判决门限设置; 通过多维度约束联合判决, 在保证高正确关联率的前提下, 可有效降低错误关联概率。经过对光电望远镜(阵)的仿真和实测数据验证, 测轨数据-目标关联正确率可达约98%的水平。此外, 即使少量错误关联结果, 也将对相应目标的正常编目数据造成“污染”, 影响轨道改进, 后续还有必要研究基于轨道改进结果对目标关联结果进行优选的方法。

参 考 文 献

- [1] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 250
- [2] Yu S, Sun R, Zhang C. Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference, Darmstadt, Germany, January 22-24, 2019
- [3] Pastor A, Escobar D, Sanjurjo-Rivo M, et al. LPI Contributions, Texas, USA, December 9-12, 2019
- [4] 李元新, 俞涵. 空间碎片研究与应用, 2012, 12: 12
- [5] 韦栋, 赵长印. 天文学报, 2009, 50: 332
- [6] We D, Zhao C Y. ChA&A, 2010, 34: 69

A Track-Catalogue Correlation Method for Space Debris Utilizing Time Error Correction and Multi-Features Joint Judgements

WANG Dong-ya HUANG Jian LIANG Wei
(Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094)

ABSTRACT Track-Catalogue correlation is the precondition and foundation of large scale space object cataloguing maintenance. The accuracy of correlation not only affects normal cataloguing processing, but also affects the utilization of observation data and the effectiveness of space object surveillance system. In this paper, a method is put forward to improve the correlation accuracy of large-batch orbital track data. Firstly, based on the characteristics of orbit error propagation, a model is constructed to estimate the orbital prediction time error and to correct observation residual, aiming to transfer the large scale spatial error to a small scale time-domain error. Secondly, a correlation judgement model involving a four-parameter-joint feature vector is proposed, with threshold setting guidelines and a data correlation processing flow followed. Finally, some examples with regard to large-batch simulated and actual measured tracks are checked to illustrate the effectiveness of the method.

Key words methods: data analysis, catalogs: space debris, celestial mechanics: correlation of observations