

doi: 10.7690/bgzd.2023.09.010

太空目标光电监视装备探测精度评估方法

秦晓珊, 李博骁, 赵会朋, 万 华, 刘志钊

(中国电子科学研究院战略预警系统研究所, 北京 100041)

摘要: 为评估太空目标光电监视装备的探测精度, 针对不同数据采样率装备及不同时间间隔的星历真值文件, 分析不同阶数拉格朗日插值算法效果。数据试验表明, 针对低轨目标(2 000 km 以下)的星历文件, 5 阶拉格朗日算法便可满足需求; 针对中高轨目标(2 000 km 以上)星历文件, 9 阶拉格朗日算法精度最高。针对角度类精度指标计算, 提出一种计算角度均值的方法。试验结果表明: 该方法能较好地衡量角度均值, 为后续角度类指标评估提供有效支撑。

关键词: 拉格朗日插值; 星历文件; 探测精度; 角度均值

中图分类号: V419 **文献标志码:** A

Detection Accuracy Evaluation Method of Space Target Electro-optical Surveillance Equipment

Qin Xiaoshan, Li Boxiao, Zhao Huipeng, Wan Hua, Liu Zhizhao

(Institute of Strategic Warning Systems, China Academy of Electronic and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: In order to evaluate the detection accuracy of space target electro-optical surveillance equipment, the effect of Lagrange interpolation algorithm with different orders is analyzed for different data sampling rate equipment and ephemeris true value files with different time intervals. The data test shows that the 5-order Lagrangian algorithm can meet the requirements for the LEO ephemeris file (below 2 000 km), and the 9-order Lagrangian algorithm has the highest accuracy for the MEO ephemeris file (above 2 000 km). Aiming at the calculation of angle accuracy index, a method for calculating the angle mean value is proposed. The experimental results show that the method can measure the mean angle well and provide effective support for the subsequent evaluation of angle indicators.

Keywords: Lagrange interpolation; ephemeris file; detection accuracy; angle mean value

0 引言

在对太空目标光电监视装备探测精度进行评估时, 需要将装备探测数据和太空目标真值数据进行对比。太空目标真值数据通常通过星历文件获得, 其数据时间间隔通常分别为 30 s 或 15 min。而太空目标光电监视装备通常包括雷达、光学望远镜等, 其测量数据时间分别是 1、2、5、10、30、45 s 等不同采样间隔^[1]。故在实际应用中, 需要内插出探测时刻相应的太空目标真实位置。

通常, 太空目标监视雷达装备探测精度评估主要对雷达装备探测距离、方位、俯仰的系统差、随机差和均方根误差进行评估计算; 太空目标监视光学装备探测精度评估主要对光学装备测量角度(赤经、赤纬)的系统差、随机差和均方根误差进行评估计算。以上均涉及角度类均值和标准差的计算方法, 若计算方法选取不当, 会对计算结果产生很大影响。

对太空目标真值数据进行准确插值, 并正确计算角度的均值和标准差是评估太空目标光电监视装备探测精度的重要环节, 对用户后续利用数据进行相关分析有重要意义。

1 评估流程概述

笔者主要针对太空目标监视雷达、光学装备的探测精度评估方法进行研究, 探测精度类指标主要包括系统差、随机差、均方根误差, 具体定义如下:

系统差: 探测值与真值一次差的平均值;

随机差: 探测值与真值一次差的标准差;

均方根误差: 探测值与真值一次差的平方和与探测总点数比值的平方根。

为评估以上指标, 首先给出太空目标监视雷达装备和光学装备探测精度评估的具体流程。

1.1 太空目标监视雷达装备评估流程

太空目标监视雷达装备通常给出的是距离

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-06-25

作者简介: 秦晓珊(1992—), 女, 宁夏人, 博士。

(R)、方位(A)、俯仰(E) 3 个维度的探测数据,而太空目标真值文件通常给出的是地心地固坐标系(earth centered earth fixed, ECEF)下的数据,所以,太空目标监视雷达装备评估具体流程如下:

1) 给定评估时间段和待评估太空目标监视雷达装备;

2) 针对装备探测到的某太空目标,读取评估时间段内该目标的真值星历文件数据和太空目标监视雷达装备探测数据;

3) 根据太空目标监视雷达装备探测时刻,利用拉格朗日插值算法对 ECEF 坐标系下的真值数据进行插值,得到每一探测时刻,该目标的真实位置信息;

4) 将插值后 ECEF 坐标系下的真值数据转换到 RAE 坐标系中;

5) 在 RAE 3 个维度,分别计算每个时刻探测值与真值的差,即 RAE 一次差;

6) 在 RAE 3 个维度,分别利用 RAE 一次差,计算装备的系统差、随机差和均方根误差。

1.2 太空目标监视光学装备评估流程

如前所述,太空目标真值文件给出的是 ECEF 坐标系下的数据,而太空目标监视光学装备通常给出的是赤经、赤纬 2 个维度的探测数据,所以太空目标监视光学装备评估具体流程如下:

1) 给定评估时间段和待评估太空目标监视光学装备;

2) 针对装备探测到的某太空目标,读取评估时间段内该目标的真值星历文件数据和太空目标监视光学装备探测数据;

3) 根据太空目标监视光学装备探测时刻,利用拉格朗日插值算法对 ECEF 坐标系下的真值数据进行插值,得到每一探测时刻,该目标的真实位置信息;

4) 将插值后 ECEF 坐标系下的真值数据先转到地心惯性坐标系(earth center inertial frame, ECI)中,并将光学装备站址信息由大地坐标系转为 ECEF 坐标系,再转为 ECI;

5) 在 ECI 坐标系下,计算太空目标真值数据和光学装备站址信息的坐标差,得到太空目标相对光学装备的位置信息,再将其转为赤经赤纬;

6) 在赤经赤纬 2 个维度,分别计算每个时刻探测值与真值的差,即赤经、赤纬一次差;

7) 利用赤经、赤纬一次差,在赤经、赤纬 2 个

维度,分别计算装备对目标的系统差、随机差和均方根误差。

2 评估方法研究

在空间目标监视领域,于欢欢等^[2]利用内符合精度和外符合精度对某型光电望远镜的观测数据进行了观测精度分析,陆长明等^[3]基于北斗精密星历对某中高轨望远镜的测量精度进行了检测;二者皆给出了太空目标光电监视装备的观测原理及精度分析评估原理。由此及第 1 节可知,太空目标光电监视装备评估流程中涉及到的主要算法有插值算法、坐标转换(ECEF \rightarrow RAE, ECEF \rightarrow ECI \rightarrow 赤经赤纬)、指标算法(包括系统差、随机差、均方根误差的计算方法)。坐标转换和距离指标算法较为简单,故笔者主要对插值算法和角度类指标算法进行分析。

2.1 拉格朗日多项式插值法

目前,国内外对太空目标真值星历文件进行插值常用的算法有多项式内插法和三角内插法,且大部分都是针对 IGS 精密星历文件做研究。由 S.Mark^[4]的研究结果可知,采用多项式内插法和三角内插法得到的精度基本相当,并且内插法造成的卫星坐标精度损失远小于星历本身的误差。陈远鸿^[5]提出了将 Neville 算法实现于精密星历的插值,其计算结果都是基于节点位于插值区间中央进行操作的;马俊等^[6]用实例分析了多种插值算法在 IGS 精密星历中的应用效果,其取 30 min 间隔的历元作为内插点计算各个内插时间段中间时刻的卫星位置;刘金健^[7]将 IGS 精密星历中的某一时刻剔除,对该时刻进行各阶拉格朗日插值,并将得出的结果与真值进行比较得出结论;何玉晶等^[8]分析了星历插值,发现在最开始阶段,插值精度随着阶数的增大而增大。

对于多项式插值法,给定 $n+1$ 个互异的点,有且仅有唯一 1 个次数不超过 n 的多项式正好穿过这些点^[9],所以,拉格朗日插值法、牛顿插值法等多项式插值法,除计算性能上有所区分外,在插值精度上并无差异。故笔者主要采用拉格朗日插值多项式对太空目标监视数据进行分析。

若已知太空目标坐标函数 $x=f(t)$ 的 $n+1$ 个节点 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ 及其对应的太空目标坐标 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, 则对插值区间内任意探测时刻 t , 利用拉格朗日插值多项式计算得到的该时刻卫星坐标为:

$$f(t) = \sum_{k=0}^n \prod_{i=0, i \neq k}^n \frac{t-t_i}{t_k-t_i} x_k。$$

在笔者的应用场景中，若选择 m 阶拉格朗日插值算法，则针对每个探测时刻，寻找 $m+1$ 个真值时刻点，使该探测时刻位于插值区间（即找到的 $m+1$ 个真值时刻点）中央（可避免龙格现象），在 ECEF 坐标系下的 $X/Y/Z$ 3 个维度，分别利用这 $m+1$ 个时刻对应的真值坐标点便可得到 3 个维度的 m 阶拉格朗日多项式，从而得到该探测时刻的真实坐标位置。

2.2 角度类指标计算方法

由于太空目标监视雷达装备的探测方位、俯仰，以及光学装备探测数据中的赤经、赤纬均是角度值，系统差和随机差的本质分别是均值和标准差，而角度是一种周期数据（也是方向数据），所以在计算其一次差、系统差和随机差时，不能直接使用常规的一次差、均值和标准差定义。例如，假设直接计算得到的探测方位与真实方位一次差为 $\{43^\circ, 45^\circ, 52^\circ, 61^\circ, 75^\circ, 88^\circ, 88^\circ, 297^\circ, 357^\circ\}$ ，则按常规方式数据计算得到的系统差为 122.8889° ，随机差为 117.8743° ，该结果显然不对。

V.M.Kanti 等^[10]在 1999 年提出了一种适用广泛的求取方向数据均值和标准差的方法。本文中具体实现过程如下。

设有 n 个探测时刻点，每一时刻角度（在本节，角度均指方位/俯仰/赤经/赤纬中的一种）探测值为 θ_i ，对应真值为 ϑ_i ，记 $\alpha_i = \theta_i - \vartheta_i$ ，则：

1) 角度一次差 oc_a_i 计算方法：

$$oc_a_i = \text{mod}(\alpha_i + 180, 360) - 180。$$

式中 $\text{mod}(\alpha, \beta)$ 为 α 模去 β 的余数。由上式便可将角度一次差均转换为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之间。

2) 角度系统差 mse 计算方法：

设每一时刻点，角度一次差 oc_a_i 在笛卡尔坐标系中对应的坐标是 $(\cos(oc_a_i), \sin(oc_a_i))$ ，记：

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(oc_a_i), \quad \bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(oc_a_i)。$$

则角度系统差 mse 在笛卡尔坐标系中对应的坐标便是 (\bar{C}, \bar{S}) ，由该坐标值便可得到角度系统差。

3) 角度随机差 mse 计算方法：

记 $\bar{R} = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2}$ ，则：

$$\text{mre} = \sqrt{2(1 - \bar{R})}。$$

针对前面提到的“假设直接计算得到的探测方位与真实方位一次差为 $\{43^\circ, 45^\circ, 52^\circ, 61^\circ, 75^\circ, 88^\circ, 88^\circ, 297^\circ, 357^\circ\}$ ”，利用本文中方法计算得到的一次

差为 $\{43^\circ, 45^\circ, 52^\circ, 61^\circ, 75^\circ, 88^\circ, 88^\circ, -63^\circ, -3^\circ\}$ ，系统差为 49.5828° ，随机差为 0.7206° 。

3 测试分析

由于太空目标监视装备探测弧段时长大部分不超过 10 min，并且采样率较低，而真值星历文件数据点均匀分布，并且有的真值文件时间间隔超过 10 min（如 IGS 精密星历文件），故很多探测时刻找不到与之对应的真值数据，无法直接利用星历文件和探测数据进行插值误差结果分析。另外，光学装备探测精度评估与雷达装备探测精度评估在指标计算方法上并无本质差异，故笔者利用 STK 软件生成多组雷达装备探测数据和真值数据，借助 Matlab 编程工具对其进行测试分析，具体如下：

1) 针对高度为 2 000 km 以下的低轨目标，生成时间间隔为 30 s 的真值数据，以及时间间隔分别为 1、2、5、10 s 的雷达装备探测数据和对应的真值数据（后者用于支撑分析拉格朗日插值方法）；

2) 针对高度为 2 000 km 以上的中高轨目标，生成时间间隔为 15 min 的真值数据（IGS 精密星历数据时间间隔通常为 15 min），以及时间间隔分别为 5、30、45 s 的雷达装备探测数据和对应的真值数据（后者用于支撑分析拉格朗日插值方法）。

针对每类多组数据，笔者随机取其中一组数据，对其进行不同阶数的拉格朗日插值，插值后的 ECEF 坐标系下 $X/Y/Z$ 3 个维度的标准差、均方根误差随阶数的变化信息可参考图 1—4 所示。

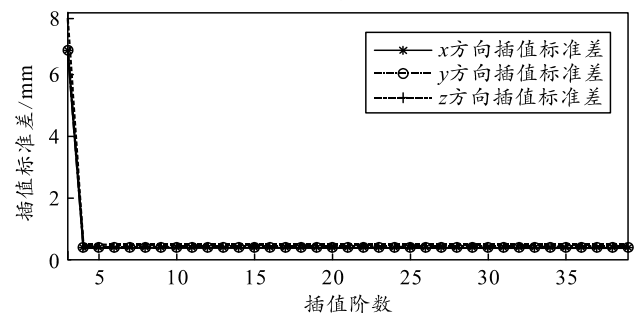


图 1 拉格朗日插值法不同阶次标准差分析 (3-39 阶)

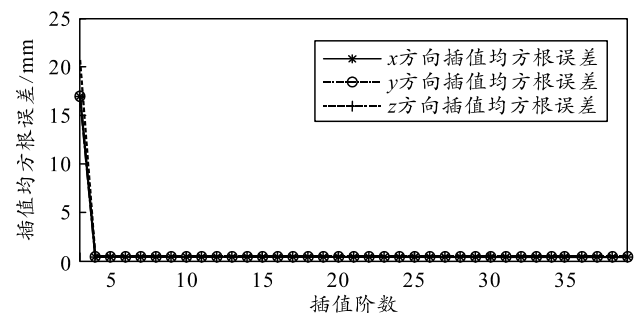


图 2 拉格朗日插值法不同阶次均方根误差分析 (3-39 阶)

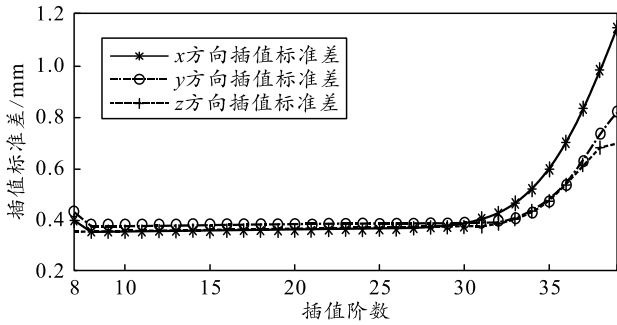


图 3 拉格朗日插值法不同阶次标准差分析(7-39 阶)

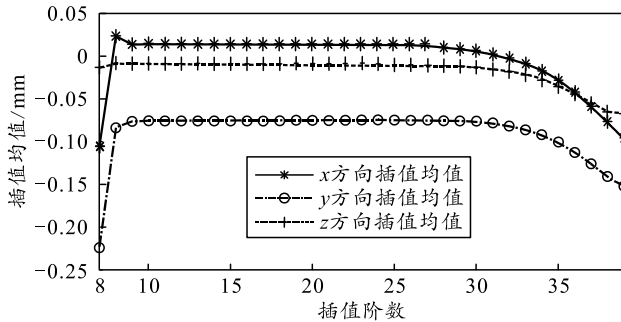


图 4 拉格朗日插值法不同阶次均方根误差分析(7-39 阶)

图 1 和 2 是真值时间间隔为 30 s、探测时间间隔为 1 s 时 X/Y/Z 3 个方向的标准差、均方根误差随拉格朗日插值阶数的变化曲线。从图中可以看到，插值阶数小于 4 阶时，插值误差较大；当插值阶数大于等于 4 阶时，插值精度较小。

图 3 和 4 是真值时间间隔为 15 min、探测时间间隔为 45 s 时 X/Y/Z 3 个方向的标准差、均方根误差随拉格朗日插值阶数变化的曲线。从图中可以看到：插值阶数小于 8 阶时，插值误差较大；当插值阶数大于 30 阶时，插值精度又随阶数增高而变大。

插值结束后，经坐标转换^[11]，利用 2.2 节算法对角度类指标进行计算。以真值时间间隔为 30 s、探测时间间隔为 1 s 的数据为例，得到计算结果如图 5 所示(由于篇幅关系，仅给出俯仰均方根误差图)。

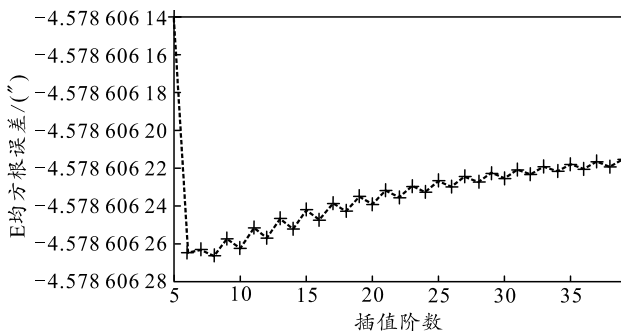


图 5 不同阶数探测俯仰均方根误差

4 结论

为评估太空目标光电监视装备(主要包括雷达、光学装备)的探测精度,重点对 2 类评估流程中涉及到的插值算法和角度均值、标准差计算方法进行了研究。研究结果表明:

由于过 $n+1$ 个互异点且次数不超过 n 的多项式是唯一的,所以各多项式插值法在误差精度上没有区别;

针对真值时间间隔为 30 s 的低轨目标真值星历文件,选取 5 阶拉格朗日插值多项式插值即可满足需求;

针对真值时间间隔为 15 min 的高轨目标真值星历文件,选取 8 阶拉格朗日插值多项式插值即可满足需求,9 阶拉格朗日插值多项式误差最小;

在计算角度数据的均值和标准差时,要注意周期数据,需要做一定转换。

以上结论,为太空目标监视装备探测精度的评估提供了有效支撑。

参考文献:

- [1] 陈兆林, 张书毕, 佟瑞菊. 用拉格朗日多项式内插计算 GPS 卫星位置[J]. 全球定位系统, 2007, 32(2): 33-35.
- [2] 于欢欢, 沈鸣, 高鹏骐, 等. APOSOS 光电望远镜空间目标观测精度分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 154-160.
- [3] 陆长明, 高昕, 李希宇, 等. 基于北斗卫星精密星历的中高轨望远镜测量精度标定方法[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 1012001.
- [4] MARK S. A brief review of basic GPS orbit interpolation strategies[J]. GPS Solutions 2003, 6(4): 265-267.
- [5] 陈远鸿. 基于精密星历的计算卫星位置的方法[J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(2): 10-11.
- [6] 马俊, 唐诗华, 黄鹰, 等. 基于 IGS 精密星历的卫星位置内插方法比较[J]. 城市勘测, 2011(5): 89-93.
- [7] 刘金健. 基于拉格朗日插值法的 GPS 卫星轨道位置拟合[J]. 科技创新与生产力, 2018(7): 19-21.
- [8] 何玉晶, 杨力. 基于拉格朗日插值方法的 GPS IGS 精密星历插值分析[J]. 测绘工程, 2011, 20(5): 60-62, 66.
- [9] 李庆杨. 数值分析[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 22-32.
- [10] KANTI V M, PETER E J. Directional Statistics[M]. Chicester: John Wiley and Sons, Inc, 1999: 25-56.
- [11] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 23-29.