

基于标校卫星的测量设备精度鉴定系统设计与实现

张小飞, 陈欣, 涂鑫, 邱维江, 方毅*

西昌卫星发射中心, 四川 西昌

收稿日期: 2025年11月7日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月12日

摘 要

针对目前“天平一号”标校卫星系统的使用效益还未充分发挥, 标校任务模式还未完全建立, 缺乏统一的跟踪精度鉴定系统, 未能直接有效地提供测量误差补偿数据等问题, 分析总结标校星的标准化应用流程及应用模式, 设计了标校任务规划、跟踪精度鉴定、精度优化及精度监测等流程, 阐述了关键算法模型, 并对算法进行了验证, 最后设计实现了测量设备鉴定系统。结果表明, 设计实现的精度鉴定系统有效应用“天平一号”标校卫星提供的定轨数据, 为用户提供标校任务规划、跟踪精度鉴定、精度优化及精度监测等服务, 提高测量设备开展精度鉴定、优化与监测的能力。

关键词

标校卫星, 轨道预报, 精度鉴定, 修正估算

Design and Implementation of Accuracy Appraisal System for Measurement Equipment Based on Calibration Satellite

Xiaofei Zhang, Xin Chen, Xin Tu, Wei Jiang Qiu, Yi Fang*

Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan

Received: November 7, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 12, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张小飞, 陈欣, 涂鑫, 邱维江, 方毅. 基于标校卫星的测量设备精度鉴定系统设计与实现[J]. 应用物理, 2026, 16(1): 13-24. DOI: 10.12677/app.2026.161002

Abstract

In response to the current problems of insufficient utilization of the “Tianping-1” calibration satellite system, incomplete establishment of calibration task mode, lack of unified tracking accuracy appraisal system, and inability to directly and effectively provide measurement error compensation data, this paper analyzes and summarizes the standardized application process and mode of calibration stars, designs calibration task planning, tracking accuracy appraisal, accuracy optimization, and accuracy monitoring processes, elaborates on key algorithm models, verifies algorithms, and finally designs and implements a measurement equipment appraisal system. The results show that the precision appraisal system designed and implemented effectively utilizes the orbit determination data provided by the “Tianping-1” calibration satellite, providing users with services such as calibration task planning, tracking precision appraisal, precision optimization, and precision monitoring, and improving the ability of measurement equipment to carry out precision appraisal, optimization, and monitoring.

Keywords

Calibration Satellite, Orbit Forecast, Accuracy Assessment, Revised Estimate

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在航天发射任务中，要求测量设备尤其是新研或改造后在正式投入任务使用前和使用一段时间后，必须进行严格的精度鉴定。现行的设备精度鉴定通常采用传统的飞机校飞模式，由校飞组织单位牵头协调信标合作单位、待校飞单位、数据处理单位等，协调飞机架次，设计飞行航线，收集测量数据和飞机航迹数据，处理测量数据和航迹数据最终给出待鉴定设备的精度鉴定结果。其中飞机架次还受环境气候等因素制约，严重影响设备的精度鉴定效率。2019年，我国天平一号卫星系统服役并投入使用，天平一号卫星系统在空间建立了目标散射特性基准和目标运动状态基准系统[1]，为空间目标探测设备的鉴定与标定提供服务，为空间目标探测技术的研究与实验提供支持。

但从目前的使用情况来看，天平一号卫星系统的应用还不够充分，多数设备单纯用于目标跟踪训练，基于其轨道数据的精度鉴定应用较少，未能有效挖掘大量的设备测量数据和卫星轨道数据的应用效能；并且缺乏应用层面统一的跟踪精度鉴定系统，也未直接有效地提供测量数据服务与计算处理服务等功能，导致未能充分发挥该卫星系统的使用效益。因此亟需建设一个模式统一，功能集成度高，响应速度快，使用过程简单方便的测量设备精度鉴定系统，以解决传统精度鉴定工作中存在的问题，为所有测量设备用户提供统一的、快速的、简便的精度鉴定服务。

2. 功能架构与流程设计

2.1. 功能架构设计

本文设计并实现航天测量设备的快速、简便、统一的精度鉴定系统，以网络化服务模式收集各设备的跟踪测量数据，运用网络爬虫技术[2]自动获取天平一号的轨道数据，进行数据处理、分析、存储及显

示，以线上服务模式为各设备用户提供任务规划、精度鉴定、精度优化、精度监测等服务，大幅度提升设备精度鉴定的效率，同时也为用户提供长效的设备精度变化监测，使其更好地掌握设备的技术性能指标。各种服务的主要功能包括：

(1) 标校星跟踪任务规划

获取标校星预报轨道数据，根据各测量站的地理分布，自动化分析计算各设备的可视情况，同时给出时间规划和空间规划，以完成针对单站跟踪或多站联合跟踪开展跟踪任务规划、引导弹道生成等。

(2) 跟踪精度鉴定

基于各测量设备跟踪标校星的测量数据与标校星精密轨道数据的设备跟踪精度鉴定方法，完成各测量设备的距离精度、方位精度、俯仰精度以及速度精度的鉴定，为用户提供以网络化服务模式的统一的精度鉴定结果。

(3) 测量数据精度优化

通过对测量数据与精密轨道数据的综合分析，研究设备标定数据质量评估方法、测量设备测量数据的误差修正算法，对设备进行测量数据误差修正分析，给出距离零值、角度零值、重力下垂、大盘不水平、机电偏差、方位俯仰不正交度等参数的估算值，以为用户提供数据精度优化的建议。

(4) 设备跟踪精度监测

通过对历次设备的精度鉴定结果数据存储至数据库，积累成精度变化监测的源数据，完成对设备精度的监测。主要包含距离、方位角、俯仰角及速度四个测元的总误差、随机误差和系统误差。

系统的总体功能架构如图 1 所示。

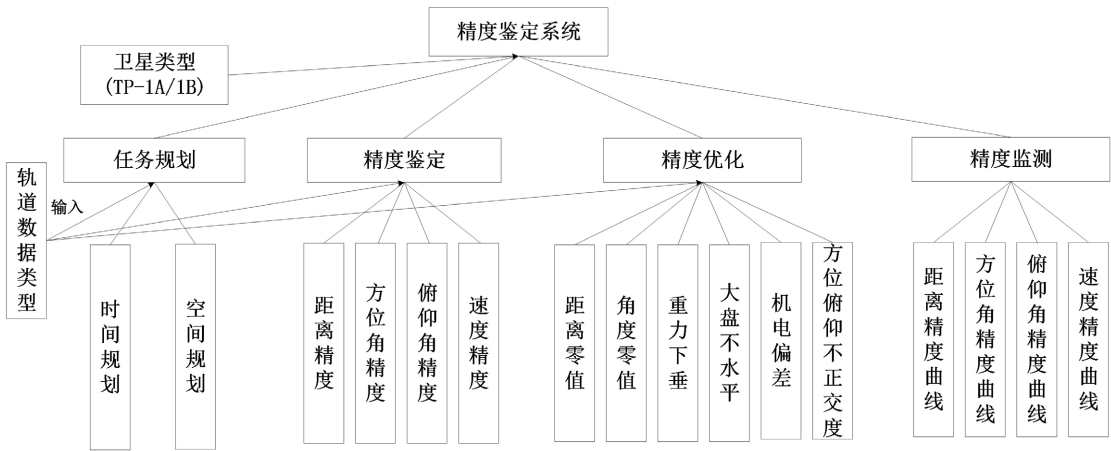


Figure 1. Overall functional architecture
图 1. 总体功能架构图

2.2. 流程设计

2.2.1. 任务规划

任务规划是自动获取天平一号卫星预报轨道数据，完成针对单站跟踪或多站联合跟踪开展鉴定任务的时间和空间规划、引导弹道生成等。主要通过网络爬虫技术定时下载预报轨道数据，根据各用户注册时提供的站址坐标进行坐标转换，再进行可视性判断，默认为俯仰 2° 的判断标准，之后给出所有用户近三日内的所有可跟踪任务的时间规划视图，并提供各可跟踪时段的空间(方位、俯仰角度)覆盖范围，便于用户根据覆盖性需求开展空间规划。同时生成对应规划时段的引导弹道文件，以供用户下载使用。任务规划流程如图 2 所示。

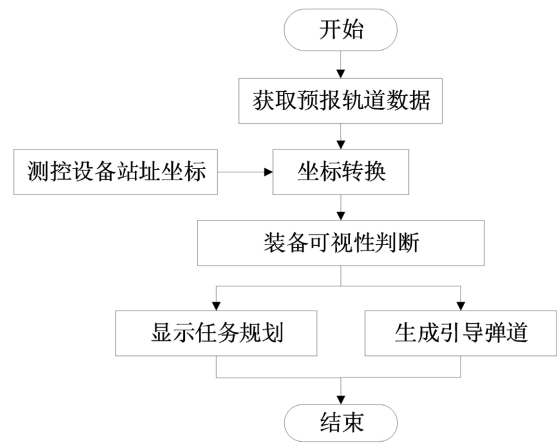


Figure 2. Task planning process
图 2. 任务规划流程

2.2.2. 精度鉴定

精度鉴定[3][4]以运行于空间近地轨道的天平一号标校卫星为基准目标。其基本原理为：被鉴定测量设备跟踪测量卫星目标，获取测量数据；同时，获取该卫星对应于测量弧段的精密轨道数据，将测量数据与卫星精确轨道数据进行对比分析，将统计数据与被鉴定设备战技术指标进行比对，从而对该测量设备精度作出评估。设备测量精度反映测量结果与真值的一致程度，一般由系统差和随机差综合表示。

由于受测量误差、系统动态滞后、大气折射[5]等因素影响，测量数据在做精度鉴定前，用户需要先对数据进行动态滞后修正、系统误差修正及电波折射修正等。同时，在与轨道数据进行比对前，还要做数据对齐处理，包括数据合法性校验、平滑滤波、秒时间处理、丢帧处理等，以解决测量数据与卫星轨道数据采样时刻不一致、时间格式错误、跨零跳点、丢帧等问题。在对数据进行前期对齐处理后，运用卫星定轨数据作为比较标准值，对设备测量数据进行精度分析，最终得到测量设备的跟踪精度。精度鉴定流程如图 3 所示。

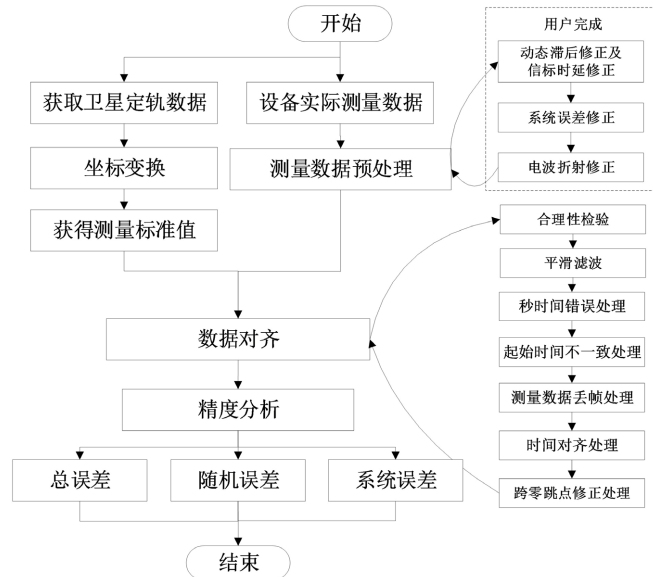


Figure 3. Accuracy appraisal process
图 3. 精度鉴定流程

2.2.3. 精度优化

精度优化是通过对测量数据与定轨数据的综合分析，运用误差修正模型，对设备进行测量数据误差参数估算，优化数据精度。在做精度优化分析前，除了不做系统误差修正外，其他数据处理过程与精度鉴定过程相同。之后运用误差估算模型结合定轨数据进行误差参数估算，以脉冲雷达为例，估算的参数包括：方位零值、俯仰零值、距离零值、大盘不水平方位角、大盘不水平度、方位俯仰不正交度、重力下垂、方位俯仰机电偏差。精度优化流程如图 4 所示。同时，运用设备标定数据质量评估方法，结合精度鉴定功能可对估算的误差参数进行闭环验证，检验其精度优化的质量、效果。

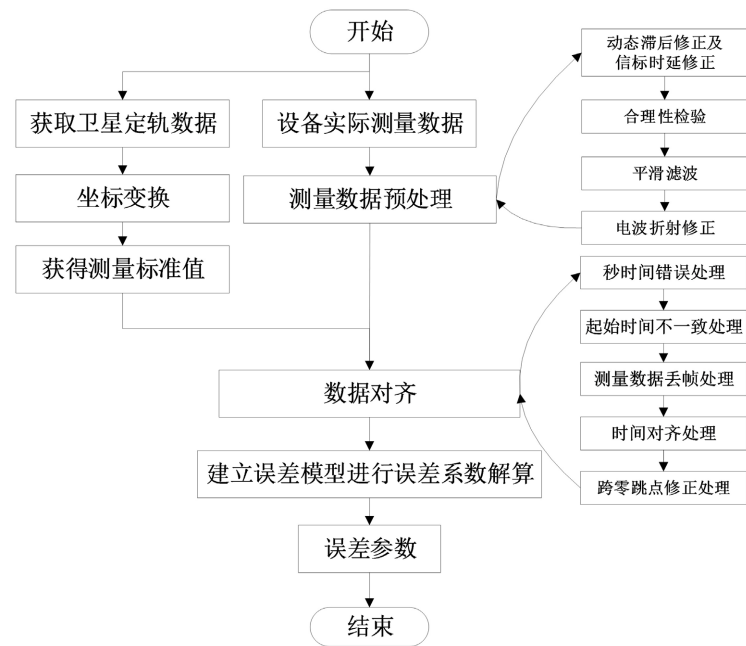


Figure 4. Precision optimization process
图 4. 精度优化流程

2.2.4. 精度监测

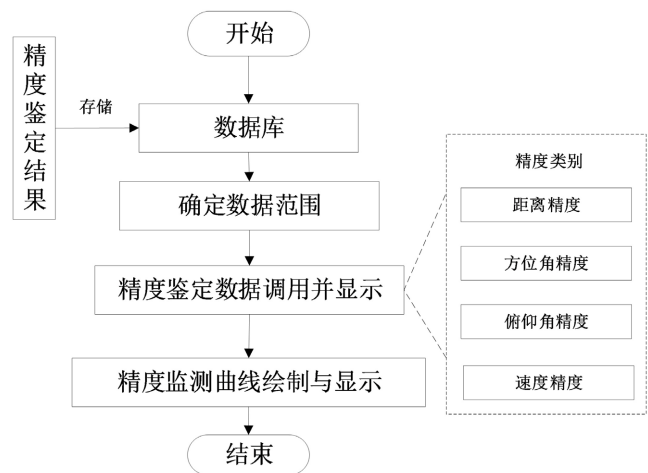


Figure 5. Precision monitoring process
图 5. 精度监测流程

精度监测是通过对历次设备的精度鉴定结果数据存储至数据库, 积累成精度变化监测的源数据, 完成对设备精度的监测。用户通过选定需要查看的数据范围, 主要包括跟踪的圈次、时间等, 调取精度鉴定结果数据, 包含距离、方位角、俯仰角及速度四个测元的总误差、随机误差和系统误差, 将所有数据以原始数据和精度变化监视曲线的方式直观地展示给用户, 并提供曲线图片和详细数据的下载服务。精度监测流程如图 5 所示。

3. 关键算法模型

在数据处理过程中, 涉及到了动态滞后修正、系统误差修正及电波折射修正, 同时还要做数据对齐处理, 包括数据合法性校验、平滑滤波、秒时间处理、丢帧处理等, 其中有部分处理算法均为常见且较为通用的算法, 不再赘述, 主要对精度分析与误差估计算法进行介绍。

3.1. 精度计算算法

精度评定的主要指标有系统误差和随机误差, 以及总误差。以方位角 A 为例, 各误差的计算如下: 测量数据与天平一号定轨轨道数据比对应作差, 按公式(1)得到两测量数据之差:

$$\Delta A_{j,i} = A_{j,i} - A_{j,i}^* \quad (1)$$

式中: $A_{j,i}$ 为测量设备跟踪天平一号标校卫星得到的方位角度测量数据; $A_{j,i}^*$ 为天平一号的定轨轨道方位角度数据, 作为标准对比值; $j=1,2,\dots,m$ 为区段序号; $i=1,2,\dots,n$ 为某区段中的采样点序号。

规定: n 为 400 个点, 每个区段为 20 秒 400 个点。如果在一段内有效数据小于 200 时, 此段就不做处理。

(1) 总误差

由公式(2)计算第 j 区段的方位角度测量误差的总误差:

$$\sigma_{A_j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta A_{j,i}^2} \quad (2)$$

而 m 个区段测量的方位角度总误差按公式(3)计算:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_{A_j}^2} \quad (3)$$

(2) 随机误差

第 j 个区段的测量数据方位角度随机误差按公式(4)的变量差分法计算求解:

$$\sigma_{A_{Rj}} = \text{sqrt} \left[\sum_{i=1}^{n-pt} (\Delta^p A_{j,i})^2 / \left[(n-pt)(2p)! / (p!)^2 \right] \right] \quad (4)$$

取差分阶数 $P=3$, 步长 $t=4$, $n=400$ 个点, 则:

$$\Delta^3 A_{j,i} = \Delta A_{j,i} - 3\Delta A_{j,i+4} + 3\Delta A_{j,i+8} - \Delta A_{j,i+12} \quad (5)$$

而 m 个区段的测量数据的方位角度随机误差按公式(10)计算:

$$\sigma_{A_R} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_{A_{Rj}}^2} \quad (6)$$

(3) 系统误差

第 j 个区段的测量数据的方位角度系统误差按公式(7)计算:

$$\sigma_{A_{Sj}} = \sqrt{\sigma_{A_j}^2 - \sigma_{A_{Rj}}^2} \quad (7)$$

而 m 个区段的测量数据的方位角度系统误差按公式(8)计算:

$$\sigma_{A_S} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_{A_{Sj}}^2} \quad (8)$$

3.2. 误差估算模型

系统误差修正项目包括天线座水平误差、方位轴和俯仰轴垂直误差、光机轴平行误差、动态滞后误差、天线重力变形误差等。根据标校得到的各项误差数据,对设备的外测数据实施方位、俯仰、距离进行系统误差的修正[6] [7],为了方便对误差分量估计[8] [9],对方位、俯仰的系统误差修正模型做一个简化处理:

$$R_r = R_m - R_0 - R_t \times 150 \quad (9)$$

$$A_r = A_m + A_0 + \theta_m \sin(A_m - A_{\max}) \tan E_m + \delta_m \tan E_m + v_{az} \sec E_m \quad (10)$$

$$E_r = E_m + E_0 + \theta_m \cos(A_m - A_{\max}) + \rho_g \cos E_m + v_{el} \quad (11)$$

式中: A_m 为雷达方位测量数值(或码盘提供数值)(°); E_m 为雷达俯仰测量数值(或码盘提供数值)(°); A_0 为方位零值(°); E_0 为俯仰零值(°); θ_m 为方位轴铅锤度(大盘水平度)(°); A_{\max} 为不水平方位角(°); δ_m 为方位轴与俯仰轴的垂直度(°); ρ_g 为天线重力下垂(°); R_t 为信标延迟(μ s); R_0 为距离零值(m), 其中, V_{az} 为方位机电不匹配角, V_{el} 为俯仰机电不匹配角。

由式(9)得到

$$\Delta R = R_m - R_r - R_t \times 150 = R_0 \quad (12)$$

由式(10)得到

$$\begin{aligned} A_r - A_m &= A_0 + \theta_m \sin(A_m - A_{\max}) \tan E_m + \delta_m \tan E_m + v_{az} \sec E_m \\ &= A_0 + \theta_m \sin A_m \tan E_m \cos A_{\max} - \theta_m \cos A_m \tan E_m \sin A_{\max} + \delta_m \tan E_m + v_{az} \sec E_m \end{aligned} \quad (13)$$

令

$$\Delta A = A_r - A_m \quad (14)$$

$$x_0 = A_0 \quad (15)$$

$$x_1 = \theta_m \cos A_{\max} \quad (16)$$

$$x_2 = \theta_m \sin A_{\max} \quad (17)$$

$$x_3 = \delta_m \quad (18)$$

$$x_4 = v_{az} \quad (19)$$

则有

$$\Delta A = x_0 + x_1 \sin A_m \tan E_m - x_2 \cos A_m \tan E_m + x_3 \tan E_m + x_4 \sec E_m \quad (20)$$

同样, 由式(11)得到

$$\begin{aligned} E_r - E_m &= E_0 + \theta_m \cos(A_m - A_{\max}) + \rho_g \cos E_m + v_{el} \\ &= E_0 + \theta_m \cos A_m \cos A_{\max} - \theta_m \sin A_m \sin A_{\max} + \rho_g \cos E_m + v_{el} \end{aligned} \quad (21)$$

令

$$\Delta E = E_r - E_m \quad (22)$$

$$y_0 = E_0 + v_{el} \quad (23)$$

$$y_1 = \theta_m \cos A_{\max} \quad (24)$$

$$y_2 = \theta_m \sin A_{\max} \quad (25)$$

$$y_3 = \rho_g \quad (26)$$

则有

$$\Delta E = y_0 + y_1 \cos A_m - y_2 \sin A_m + y_3 \cos E_m \quad (27)$$

其中, ΔR , ΔA , ΔE 分别表示雷达修正值与原始测量值的距离、方位角、仰角残差。

为了估计误差分量, 测量设备跟踪天平一号卫星得到测量数据, 并用卫星精轨数据代替系统误差修正后的数据, 则上节中的残差表示设备测量数据与卫星精轨数据的残差。

根据最小二乘准则可以估算系统误差分量矩阵:

$$R_0 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta R_i \quad (28)$$

$$X = (M^T M)^{-1} M^T \Delta \bar{A} \quad (29)$$

$$Y = (N^T N)^{-1} N^T \Delta \bar{E} \quad (30)$$

根据式(15)~(19)及式(23)~(26), 可以求得系统误差分量。

需要说明的是, 算法中对仰角 E_0 , V_{el} 进行了合并处理, 只给出了 $E_0 + V_{el}$ 的估计值, 不会影响系统误差修正的结果。

4. 算法验证与系统实现

4.1. 算法验证

4.1.1. 精度计算算法应用验证

对某段测量数据进行精度分析验证, 数据经过了合理性检验、跨零跳点修正、系统误差修正和电波折射修正的处理, 再与对应时段的天平一号定轨轨道数据进行精度分析。区段数据点数为 400, 共计算了 14 段数据, 各区段数据的测元总误差、随机误差及系统误差如表 1 所示, 该测量数据的总的误差结果如表 2 所示。

Table 1. Results of segmented accuracy analysis

表 1. 分段精度分析结果

| 误差 类型 | 总误差 | | | | 随机误差 | | | | 系统误差 | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | σ_{A_j} | σ_{E_j} | σ_{R_j} | σ_{V_j} | $\sigma_{A_{R_j}}$ | $\sigma_{E_{R_j}}$ | $\sigma_{R_{R_j}}$ | $\sigma_{V_{R_j}}$ | $\sigma_{A_{S_j}}$ | $\sigma_{E_{S_j}}$ | $\sigma_{R_{S_j}}$ | $\sigma_{V_{S_j}}$ |
| 区段 序号 | | | | | | | | | | | | |
| 1. | 0.014705 | 0.186243 | 37.07957 | 0.241776 | 0.00274 | 0.004133 | 0.834339 | 0.066143 | 0.014447 | 0.186197 | 37.07018 | 0.232553 |
| 2. | 0.014458 | 0.138293 | 34.30857 | 0.331057 | 0.002896 | 0.002622 | 0.652093 | 0.063379 | 0.014165 | 0.138269 | 34.30237 | 0.324934 |
| 3. | 0.01403 | 0.101797 | 36.42415 | 0.48121 | 0.002599 | 0.002226 | 0.949732 | 0.109613 | 0.013787 | 0.101772 | 36.41177 | 0.46856 |
| 4. | 0.015074 | 0.06723 | 29.20641 | 0.327708 | 0.002017 | 0.002511 | 1.009057 | 0.002794 | 0.014938 | 0.067183 | 29.18897 | 0.327696 |

续表

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5. | 0.015722 | 0.053362 | 30.85997 | 0.3769 | 0.002309 | 0.002125 | 1.146447 | 0.014036 | 0.015552 | 0.05332 | 30.83867 | 0.376638 |
| 6. | 0.015477 | 0.050035 | 23.77126 | 0.372591 | 0.001725 | 0.002364 | 0.857013 | 0.029163 | 0.015381 | 0.049979 | 23.7558 | 0.371448 |
| 7. | 0.014881 | 0.046627 | 24.06435 | 0.407267 | 0.001465 | 0.001589 | 0.94963 | 0.017936 | 0.014808 | 0.0466 | 24.04561 | 0.406872 |
| 8. | 0.018282 | 0.039326 | 19.34072 | 0.496378 | 0.001274 | 0.001096 | 0.752982 | 0.056239 | 0.018238 | 0.03931 | 19.32605 | 0.493182 |
| 9. | 0.021681 | 0.032801 | 18.91825 | 0.598222 | 0.00099 | 0.001136 | 0.929057 | 0.059913 | 0.021658 | 0.032782 | 18.89542 | 0.595214 |
| 10. | 0.029286 | 0.020643 | 13.73426 | 0.694877 | 0.001063 | 0.001232 | 0.21893 | 0.002969 | 0.029267 | 0.020606 | 13.73251 | 0.694871 |
| 11. | 0.033772 | 0.007586 | 14.19678 | 24.73917 | 0.001444 | 0.001227 | 0.258025 | 0.71336 | 0.033742 | 0.007486 | 14.19443 | 24.72888 |
| 12. | 0.017654 | 0.006266 | 11.8203 | 63.62971 | 0.001545 | 0.001251 | 0.405145 | 0.004067 | 0.017587 | 0.00614 | 11.81335 | 63.62971 |
| 13. | 0.012169 | 0.050297 | 7.60993 | 63.35626 | 0.001445 | 0.001393 | 0.243327 | 0.008804 | 0.012083 | 0.050277 | 7.606039 | 63.35626 |
| 14. | 0.00735 | 0.035498 | 7.592265 | 63.17761 | 0.001478 | 0.001705 | 0.792096 | 0.003412 | 0.0072 | 0.035457 | 7.550833 | 63.17761 |

Table 2. Accuracy analysis results
表 2. 精度分析结果

| 误差 类型 | 总误差 | | | | 随机误差 | | | | 系统误差 | | | |
|----------|------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | σ_A | σ_E | σ_R | σ_V | σ_{A_R} | σ_{E_R} | σ_{R_R} | σ_{V_R} | σ_{A_S} | σ_{E_S} | σ_{R_S} | σ_{V_S} |
| 数值 | 0.017467 | 0.059715 | 22.0662 | 15.65934 | 0.001785 | 0.001901 | 0.714134 | 0.082273 | 0.017347 | 0.05967 | 22.05229 | 15.65603 |

4.1.2. 估算算法应用验证

为了确保误差参数解算的精度，要求尽量多的数据应用于参数解算，其中测量数据应覆盖方位 0°~360°空域，仰角在保精度范围内：以 20°~65°的范围为佳，采用 8 组满足上述要求的跟踪测量数据进行精度优化分析。

所有测量数据经过了合理性检验、跨零跳点修正及电波折射修正的处理，再以该跟踪时刻对应的天平一号定轨轨道数据进行误差分量估算，得到简化模型中的各误差分量结果如表 3 所示。

Table 3. Estimation results of error components
表 3. 误差分量估算结果

| 分量名称 | 估算值 | 分量名称 | 估算值 |
|--------------------|-----------|---------------------|---------|
| 方位零值 A_0 | -0.017635 | 方位俯仰不正交角 δ_m | 0.00212 |
| 俯仰零值 E_0 | -0.209912 | 重力下垂 ρ_g | -0.0037 |
| 距离零值 R_0 | 15.00322 | 方位机电偏差 V_{az} | -0.065 |
| 大盘不水平方位角 A_{max} | 65.035 | 俯仰机电偏差 V_{el} | 0 |
| 大盘不水平度 θ_m | 0.010336 | | |

备注：仰角 E_0 ， V_{el} 进行了合并处理，故给出 V_{el} 为零。

将估算的结果装填进修正模型，对未进行系统误差修正的测量数据进行系统误差修正后，一并与运用常规标定的参数进行修正后的测量值同时与天平一号定轨轨道数据进行作差比对，各分量的残差进行分析，结果表明，运用估算的误差分量进行修正后，测量结果基本与常规标定的参数修正基本一致。

再对修正后的数据进行精度分析，结果如表 4 所示。对比表 2 的数据结果，可以看出修正后的数据精度也与人工标定的参数修正结果基本一致。

Table 4. Results of accuracy analysis of measurement data after conventional calibration and parameter correction for estimation
表 4. 常规标定与估算参数修正后的测量数据精度分析结果

| 误差类型 | 总误差 | | | 随机误差 | | | 系统误差 | | |
|------|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 修正类型 | σ_A | σ_E | σ_R | σ_{A_R} | σ_{E_R} | σ_{R_R} | σ_{A_S} | σ_{E_S} | σ_{R_S} |
| 常规参数 | 0.014705 | 0.186243 | 37.07957 | 0.00274 | 0.004133 | 0.834339 | 0.014447 | 0.186197 | 37.07018 |
| 估算参数 | 0.013955 | 0.206532 | 32.43043 | 0.00253 | 0.005641 | 1.021215 | 0.011425 | 0.200981 | 31.409215 |

4.2. 系统功能实现

4.2.1. 任务规划功能实现

任务规划功能中，用户可选择需要跟踪的卫星类别，以查看跟踪规划计划。实现所有用户近三日的任务规划情况视图，如图 6 所示。同时计划视图页面支持放大、缩小、平移等功能，放大后，可以将光标置于弧段前后时显示时间点，便于用户获知精准的时间，而点击空间规划按键，在各时间规划的图条后方给出了空间范围。用户还可以根据需点击某设备的标签按钮，取消查看该设备规划情况，选取需要查看的特定用户的规划情况，如图 7 所示。在需要确定实施跟踪任务计划时，系统实现了当前用户所有规划弧段的引导弹道下载，供用户开展鉴定任务或跟踪训练任务的引导文件使用。



Figure 6. Task planning view
图 6. 任务规划视图



Figure 7. Enlarged user planning view
图 7. 放大后的用户规划视图

4.2.2. 精度鉴定功能实现

在精度鉴定页面，有提供用户选择的卫星类型、轨道产品类型及电波折射修正(大气修正)，以便用户根据自己的跟踪情况及对比轨道情况选择用于精度鉴定的卫星类型及轨道产品。卫星类型的选择依据用户所跟踪的实际卫星而定，卫星类型分为 TP-1A 星和 TP-1B 星；轨道产品选择则根据用户对精度鉴定的比对标准数据的精度要求而定，分为：准实时定轨轨道产品、超快速定轨轨道产品、快速定轨轨道产品及最终定轨轨道产品 4 类，主要区别为定轨精度不同。

上传经过修正后的测量数据，根据弹道文件绘制的 R 、 A 、 E 图像，同时系统开始自动获取轨道数据，并对两组数据进行处理后，给用户提供 A 、 E 、 R 、 V 分别的总误差、随机误差、系统误差的精度鉴定结果及数据下载。如图 8 所示。



Figure 8. Analysis of total error in accuracy appraisal
图 8. 精度鉴定的总误差分析

4.3.3. 精度优化功能实现

同样，在精度优化功能实现上，也具备卫星类型及轨道产品类型的选择，文件上传支持单个及多个测量数据文件同时上传。完成上传文件后，系统对文件进行处理，并根据处理流程进行误差参数估算。并将估算结果显示于用户，如图 9 所示。估算参数包括：方位零值、俯仰零值、距离零值、大盘不水平方位角、大盘不水平度、方位俯仰不正交度、重力下垂、方位机电偏差、俯仰机电偏差。



Figure 9. The revised analysis results
图 9. 修正分析结果显示

4.3.4. 精度监测功能实现

在精度监测功能实现上，主要通过曲线和数据直接展示用户选定范围内的精度鉴定结果，如图 10

所示。同时，可以对绘制的曲线图片及表格中的精度结果数据进行下载，以供用户保存使用。

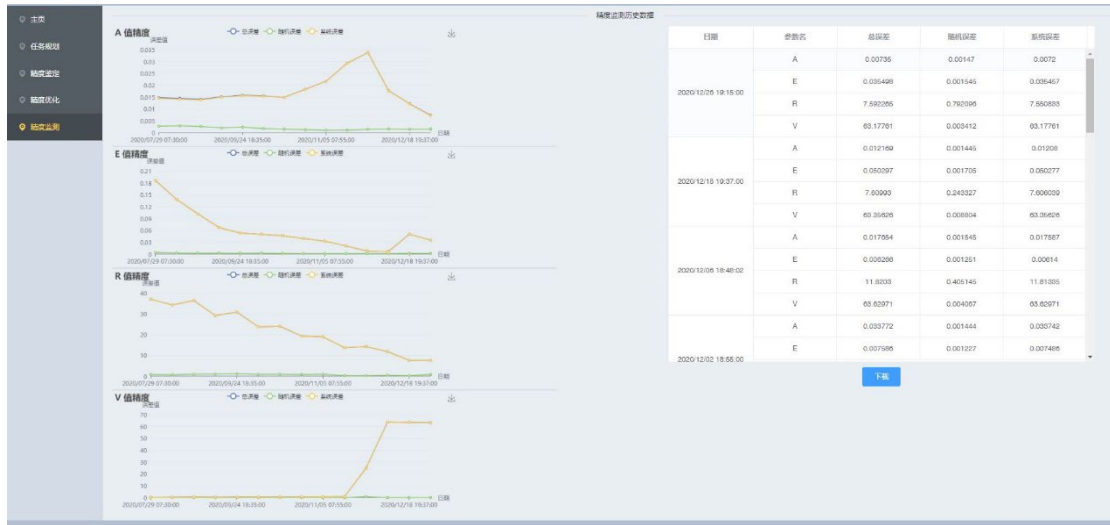


Figure 10. Accuracy monitoring effect
图 10. 精度监测效果

5. 结束语

本文主要设计并实现了为执行航天发射任务的测量设备开展线上服务模式的精度鉴定的系统，包括单套设备的或多套设备的鉴定任务规划、测量设备的精度鉴定、精度优化以及精度监测。规范了设备精度鉴定的各个环节，避免了繁琐的沟通协调工作，省去了校飞飞机的飞行任务，节省了大量的人力物力财力；实现了实时快速规划出单套设备或多套设备联合的鉴定任务，并提供引导弹道数据下载；实现了随时随地由单个设备即可组织本设备的精度鉴定工作，并快速给出真实有效的精度鉴定结果，大幅提升了精度鉴定的工作效率；实现了设备测量数据精度优化建议，有效提高测量设备的跟踪精度；实现了通过积累各设备精度鉴定结果数据，长期有效地监测设备的精度变化，为各测量设备更好地掌握其精度指标提供数据支撑。

参考文献

- [1] 余涛, 陶孙杰, 王钧慧, 缪霖. 标校卫星地面应用系统方案设计[J]. 电讯技术, 2019, 59(10): 1151-1155.
- [2] 熊畅. 基于 Python 爬虫技术的网页数据抓取与分析研究[J]. 数字技术与应用, 2017(9): 35-36.
- [3] 刘利生, 张玉祥. 外弹道测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] GJB 1381A-2011, 导弹、航天器实验光电经纬仪和脉冲雷达测量精度评定[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2011. <https://www.doc88.com/p-0601727998395.html>
- [5] 韩先平. 大气折射误差快速修正方法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 57-60.
- [6] GJB 2246-94, 脉冲测量雷达事后数据处理方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1994. <https://www.doc88.com/p-1806390711446.html>
- [7] 段秀云, 黄瑜. 外弹道测量数据快速融合方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(7): 165-168.
- [8] 黄家贵, 杨潇. 脉冲测量雷达卫星标校的实现[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1600-1602.
- [9] 胡亚男, 淳静. 基于事后数据分析的脉冲雷达误差分离方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(6): 97-101.