

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1269 - 06

基于非规律变化信标球数据的精度检验新方法*

李辉芬, 朱伟康, 李红艳, 伍辉华, 茅永兴

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要:针对测量船施放信标球时经纬仪观测数据存在时间不连续、有效数据段落短的问题,提出了基于不连续数据开展精度检验的新思路,利用自适应信息检择算法、拟合残差法解决了非等时距变化的不连续数据野值检择难题,实现了基于经纬仪数据的精度评估和处理流程设计,完成了船载雷达距离零值、标定参数的精度检验。

关键词:航天测量船; 船载雷达; 不连续数据; 动态时距; 非等间隔; 距离零值; 精度检验

中图分类号: TN959.72 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.010

Accuracy Evaluation Method Based on Irregular Variation of Beacon Balloons

LI Hui-fen, ZHU Wei-kang, LI Hong-yan, WU Hui-hua, MAO Yong-xing

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: This paper proposes a discontinuous data accuracy evaluation method based on irregular variation of time interval with regard to the short data paragraph and broken time line of theodolite when space TT&C ship releases beacon balloons. It applies self-adaptive outlier detection method and fitting residual error method to solve the problem of scientifically outlier detection discontinuous data, which effectively fulfills ship-borne radar distance zero value and adjustment parameter accuracy evaluation, and realizes data accuracy evaluation based on theodolite.

Key words: space TT&C ship; shipborne radar; discontinuous data; dynamic time interval; unequal interval; distance zero value; accuracy evaluation

1 引言

船载雷达长期处于测量船载体运动条件下,设备零值、标校参数会出现漂移,这些变化直接影响了测量船的定轨精度,要使船载测量设备保持良好的状态和具备较高的测量精度,必须适时对误差系数进行标定,对误差修正系数的准确性进行评估,检验标定参数用于误差修正对测量船精度的影响。

目前测量船使用的精度鉴定方法是校飞,用携带合作目标的飞机,在预定的航路上按一定的飞行

工况飞行,被鉴定的测量设备和作为比较标准的设备同时跟踪飞机,通过飞行试验发现并解决影响测量设备精度的硬件或软件问题,评估测量设备的精度。测量船海上精度校飞选用卫星导航精度鉴定系统做比较标准设备,该系统是全天候的,但其精度受基准站与动态站之间距离的限制,距离越远精度越低^[1]。与陆基测量设备校飞有很大不同的是,由于近海海域渔业、养殖业、交通运输业等的不断扩展,使选择适合测量船机动布站的海域非常困难。飞机校飞方法组织协调困难,需要耗费大量的人力和财力,需要特殊的海域、空域和气象保障,且飞机改装

* 收稿日期: 2012 - 04 - 11; 修回日期: 2012 - 05 - 28

要求高,制约因素多,不可能经常进行,所以,寻找有效的精度检验新途径已非常必要。

为检验测量船测控设备的测量精度,测量船开展了一系列的研究工作,如校飞新方法研究、动态标定技术研究、基于在轨卫星的精度检验等方法,在航天测控任务中进行了应用,取得了较好的效果,但在实施过程中,也发现了它们的局限性,如基于在轨卫星的精度鉴定以过境卫星为跟踪目标,以高精度的卫星星历为比对标准,无特殊的人力、财力投入,具有成本低、效率高的特点,但该方法难以实时获取高精度卫星星历和获取航行状态下测量船的高精度船位数据^[2];选择跟踪目标时还须考虑卫星的上下行频率、有效反射面积、是否能计算精确的卫星星历和卫星是否在测量船的可跟踪测量弧段内等因素,限制了该方法应用的自主性。

为标定距离零值和光电偏差等参数,测量船要施放信标球,船载雷达和经纬仪会同时跟踪气球,这是测量船可自主获取精确的比对数据的一条有效途径,可作为精度评估的重要资源,但由于信标球航路变化的不可预见性,再加上跟踪过程中经纬仪易受天气、船舶摇摆的影响,难以长时间稳定跟踪气球,测量数据的典型特点是有效数据弧段短、时间不连续,没有足够量的连续有效数据,无法满足目前测量船使用的精度鉴定方法对数据的要求,虽然经纬仪观测资料精度高,但其数据特性限制了它在精度评估中的作用。针对经纬仪数据特点,我们提出了基于不连续数据开展精度检验的新思路。

2 测量船精度检验模式

测量船精度检验采用“硬比较法”来评估测量设备的综合测量精度^[3]。所谓“硬比较法”是指选用测量精度更高的测量设备做比较标准设备,与被鉴定设备同时跟踪测量同一目标,事后通过对被鉴定设备跟踪参数的分析及测量元素的处理,评价其动态跟踪性能,鉴定测量设备的综合测量精度,同时检验设备的工作状态、数据传输、录取、处理及软件设计的正确性和可靠性,利用获取的数据完成精度鉴定工作,发现并解决影响测量设备精度的硬件或软件问题。“硬比较法”因所选用比较标准设备不同,在具体实施方法上有所不同。用卫星导航精度鉴定系统作为比较标准的关键是精确测定飞机和测量船的瞬时位置,再把飞机的精确位置换算成被鉴定设

备应答机天线的位置,在其比对残差中就引入了船摇、变形、船位误差,这些误差难以有效分离,影响了精度的分析和评估。但利用经纬仪做比较标准设备,在数据处理过程中不会引入测量船姿态误差和船位误差,得到的精度评估结果能更真实地反映设备的实际情况。

3 方案设计

3.1 跟踪资料的选取

校飞时,飞机按预先设计好的航路飞行,测量设备能录取到高质量的观测资料,数据有典型的航路特征:从远距离、低仰角跟踪,至近距离、高仰角,过航捷后再变为远距离、低仰角。有效数据的选取只需考虑跟踪仰角即可,但信标球数据不具备校飞数据所具有的航路特征,气球受风向的影响,其变化是随机的、不可预测的,无规律可循。选择数据时要使目标的动态特性能满足鉴定测量设备的跟踪性能和有关技术指标验证的需要,还要保障测量设备在保精度跟踪特性范围之内,保障船载测量系统的测量精度。

3.2 时间取齐

对于被观测的运动目标而言,观测时间误差会引起运动目标的位置误差,而目标的位置误差必然导致对被鉴定设备附加测量精度误差,基于不连续数据进行精度评估要重点关注数据时间,必须确保所有参与比对数据的时间要一致。

3.3 足够的数据量

根据误差理论可知,当统计的样本数达到一定量后,其统计值会趋向一个稳定值。为保证精度检验结果的可靠性,一定要保证用于精度鉴定的比对数据有足够的数量。本文提出的基于不连续数据进行精度评估的思路就是为获取精度分析所需的足够的数量而提出的,将经纬仪稳定跟踪弧段内能满足要求的有效数据合并后使用,对相邻数据时间是否连续不作要求。

3.4 不连续数据野值的检择

测量数据中异常数据的存在会恶化整个测量数据的品质,导致对测量系统性能评定缺乏真实性,因此,参与精度检验的数据一定要保证其数据能真实可靠的反映设备正常工作状态,如何辨识和消除测量数据中的异常值一直是数据预处理工作的重要组

成部分。实测数据分析表明,当测量设备从失锁状态恢复时,其初始几个测元表现为野值的概率很大,对数据合检是精度鉴定的关键环节,利用合并后的不连续数据开展精度检验工作要解决的关键问题就是非连续变化数据的野值检择问题,即如何剔除参与精度检验的数据中的异常值。

目前,测量船使用的差分检测法和拟合外推检测法均是基于等时间间隔连续变化数据建立的,不适用于信标球这种时间间隔不规则变化数据的处理。一个好的纠错算法,应该在处理包含异常数据的测量数据序列时有好的可靠性和尽可能不受异常数据影响的能力,经过分析试算后,我们选择了自适应信息检测法、拟合残差法和管道检择法^[4]来完成经纬仪数据的检择工作。

3.4.1 异常数据的处置原则

测量船进行精度检验,不仅要得到被鉴定设备的精度,通过精度检验工作也要发现外测系统软硬件存在的各种问题,异常值是分析了解整个测量过程的重要情报,因此在选用异常数据的检测算法时,不仅要考虑所用算法自动纠错的能力及纠错效果,同时也要充分暴露数据反映出的问题,所以,在数据质量检查工作流程中,将野值检测和野值处理分为两个独立的步骤进行,在野值检测阶段,构造检测函数

$$\mathfrak{R}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq c \\ 0, & |x| > c \end{cases}$$

式中, c 为检测门限, $\mathfrak{R}(x)$ 为 1 时,数据正常; $\mathfrak{R}(x)$ 为 0 时,标识为异常数据。将野值点检择问题转化为如下的 0/1 序列:

$$\{\mathfrak{R}_c(\Delta y_i), i = 1, 2, 3, \dots\}$$

序列中 0 的检测问题(当 0 成串出现时所对应的多个野值点为斑点),对于孤立型异常数据可即时进行剔除或替换,对于斑点型异常数据,在做好野值标识后需作进一步分析。

对异常数据不能一剔了之,但最后用于精度统计的数据一定要保证其数据真实可靠地反映设备正常工作状态,对于已经找出原因的,要将其舍弃;对于未找到原因,而在统计检验中又高度异常的数据,也要剔除;对于一时难以查清原因,又不容易纠正的异常数据,也要删除,不参与结果的处理。

3.4.2 不连续数据的野值检择方法

(1) 自适应信息检测法

参数自适应信息检择算法^[5]是为解决航天测量船含有复杂变形、船摇周期的测量系数据的纠错

难题而设计的,它能适应测量船蕴含有船摇周期非单调变化数据的特点,刚合并的不连续信标球数据在局部区域内仍然具有连续性,用该算法来完成小区域内连续变化的信标球数据野值的初检工作比较合适。参数自适应信息检择算法是我们选用文献^[4]提出的“滑动中值平滑估计模型”,结合周期图方法构建的野值检择算法。

假定采样数据序列为 $y_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 滑动中值平滑估计模型定义如下^[4]:

$$\hat{y}_{j|k} = \begin{cases} y_j, & j = 1, \dots, k; n - k + 1, \dots, n \\ \text{med}(y_{j-k}, \dots, y_j, \dots, y_{j+k}), & k < j \leq n - k \end{cases}$$

式中, $y_{(j)}$ 表示对 $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 按从小到大排序后的第 j 个数值, $\text{med}\{\cdot\}$ 为中值算子:

$$\text{med}\{y_1, y_2, \dots, y_m\} = \begin{cases} y_{(k+1)}, & m = 2k + 1 \\ (y_{(k)} + y_{(k+1)})/2, & m = 2k \end{cases}$$

参数自适应信息检择算法处理流程如下:

step 1: 利用周期图方法搜寻该组数据蕴含的变化周期,确定参数 m 、 s 、 p 的初值;

step 2: 设置参数 $k = m$, 用滑动中值平滑器构造滑动中值平滑序列 $\{\hat{y}_{i|m} | i = 1, 2, 3, \dots\}$;

step 3: 设置参数 $k = s$, 用滑动中值平滑器对平滑序列 $\{\hat{y}_{i|m} | i = 1, 2, 3, \dots\}$ 进行第二次中值平滑,得到平滑结果 $\{\hat{\hat{y}}_{i|s} | i = 1, 2, 3, \dots\}$;

step 4: 设置参数 p , 对二次中值平滑结果 $\{\hat{\hat{y}}_{i|s} | i = 1, 2, 3, \dots\}$ 进行局部滑动均值平滑:

$$\bar{y}_{j|p} = \begin{cases} \hat{\hat{y}}_{j|s}, & j = 1, \dots, p; n - p + 1, \dots, n \\ \frac{1}{2p + 1} \sum_{i=j-p}^{j+p} \hat{\hat{y}}_{i|s}, & p < j \leq n - p \end{cases}$$

step 5: 为补偿中值均值平滑对采样数据列中趋势性分量的不利影响,构造过程信号的中值-均值平滑残差序列:

$$\Delta y_i = y_i - \bar{y}_{i|p} (i = 1, 2, 3, \dots)$$

step 6: 对残差序列 $\{\Delta y_i | i = 1, 2, 3, \dots\}$, 重复 step 1~3, 得到残差序列的滑动中值-均值平滑估计: $\{\Delta \bar{\hat{y}}_{i|s} | i = 1, 2, 3, \dots\}$;

step 7: 计算序列 $\{y_i | i = 1, 2, 3, \dots\}$ 的平滑结果:

$$\tilde{y}_i = \bar{y}_{i|s} + \Delta \bar{\hat{y}}_{i|s} (i = 1, 2, 3, \dots)$$

step 8: 以平滑估计值 \tilde{y}_i 为比对标准数据构造残差序列: $\Delta y_i = y_i - \tilde{y}_i$;

step 9: 构造检择函数

$$\mathfrak{R}(\Delta y_i) = \begin{cases} 1, & |\Delta y_i| \leq c \\ 0, & |\Delta y_i| > c \end{cases}$$

将野值点检择问题转化为0/1序列。 $\mathfrak{R}(x)$ 为1时,数据正常, $\mathfrak{R}(x)$ 为0时,标识为异常数据。对于单点野值,用平滑值替代,对于成片野值,舍弃。

该算法对含有时变趋势分量或均值非平稳的采样时间序列的数据检择效果好,既能滤去异常数据,同时又不破坏数据本身隐含周期的变化规律。刚合并的不连续信标球数据野值比率较高,该算法在野值点的个数不足一半时算法都不会崩溃^[4],非常适用于信标球数据的初检。

(2)拟合残差法

利用自适应信息检测算法完成信标球数据的初检工作后,合并数据在小区域内所具有的连续性已经被破坏,复检时选用拟合残差法来完成不等间隔离散数据的合检工作,该算法适应性强,可实现数据合检的自动建模,方法简单,实现容易。

假如在时间 $t_1 < t_2 < \dots < t_N$ 上有一组数据 x_1, x_2, \dots, x_N , 序列 $\{x_i\}$ 可表示为 $x_i = y_i + \varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 式中 y_i 为观测数据的真实信息与系统误差之和, ε_i 为观测随机误差。 y_i 可以用一个 m 阶多项式来描述,即

$$y_i = \sum_{j=0}^m a_j t_i^j$$

则方程组 $x_i = y_i + \varepsilon_i$ 可以表示为

$$x_i = \sum_{j=0}^m a_j t_i^j + \varepsilon_i$$

化成矩阵形式:

$$X = Ta + \varepsilon$$

其中:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \dots & t_1^m \\ 1 & t_2 & \dots & t_2^m \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & t_N & \dots & t_N^m \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

应用最小二乘估计可得到多项式系数向量 a 的估计 \hat{a} 为

$$\hat{a} = (T^T T)^{-1} T^T X$$

将 $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_m$ 代入方程组可得到观测数据 x_i 的估计

$$\hat{x}_i = \sum_{j=0}^m \hat{a}_j t_i^j$$

以 \hat{x}_i 为标准数据构造残差序列:

$$\Delta x_i = x_i - \hat{x}_i$$

根据残差即可得到随机误差均方差 σ 的估计:

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{N - M - 1} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N - M - 1} \sum_{i=1}^N (x_i - \sum_{j=0}^m \hat{a}_j t_i^j)^2}$$

构造检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta x_i) = \begin{cases} 1, & |\Delta x_i| \leq 3\sigma \\ 0, & |\Delta x_i| > 3\sigma \end{cases}$ 进行数据诊断,依据莱以特准则完成粗差的判别和剔除。

(3)管道检择法

为保证统计结果能真实可靠地反映设备正常工作状态时的精度,在利用高精度的经纬仪数据完成船载雷达精度鉴定工作前,可利用经纬仪数据 \hat{y}_i 作为标称数据构造管道检择法完成最后一个环节雷达数据 y_i 的野值剔除工作:

step 1: 计算比对残差 $\Delta y_i = y_i - \hat{y}_i$;

step 2: 确定常数

$$c_{\Delta y} = 1.483 \operatorname{med}_{i=1, \dots, n} \{ |\Delta y_1|, \dots, |\Delta y_n| \};$$

step 3: 构造检择函数

$$\mathfrak{R}_c(\Delta y_i) = \begin{cases} 1, & |\Delta y_i| \leq c_{\Delta y} \\ 0, & |\Delta y_i| > c_{\Delta y} \end{cases}$$

$\mathfrak{R}_c(\Delta y_i)$ 为1时,数据正常,接收; $\mathfrak{R}_c(\Delta y_i)$ 为0时,数据异常,剔除。

3.5 精度检验流程

信标球数据精度检验流程如下。

step 1: 船载雷达和经纬仪同时对施放的带有合作目标的信标球进行跟踪测量,测量船中心计算机记录雷达测量数据和经纬仪测量数据。

step 2: 用新标定的修正参数按下式对雷达测量值进行修正:

$$R'_l = R_l - R_0$$

$$E'_l = E_l - E_0 - \beta_m \cdot \cos(A - A_m) -$$

$$C_e - \Delta E_Z - \Delta E_g \cdot \cos E$$

$$A'_l = A_l - A_0 - \beta_m \cdot \operatorname{tg} E \sin(A - A_m) - \delta_m \cdot \operatorname{tg} E -$$

$$S_b \cdot \sec E - C_s \cdot \sec E - \Delta A_Z \cdot \sec E$$

式中, $(R, E, A)_l$ 为雷达测量数据, $(R_0, E_0, A_0)_l$ 为雷达距离零值和角度零值, β_m 为大盘不水平最大倾斜量, A_m 为大盘不水平最大倾斜方向, δ_m 为俯仰轴、方位轴不垂直, S_b 为俯仰轴、光轴不垂直, C_s 为大天线光电轴横向不匹配, C_e 为大天线光电轴纵向不匹配, ΔE_Z 俯仰动态滞后, ΔA_Z 方位动态滞后, ΔE_g 重力下垂量, $(R, E, A)'_l$ 为各项误差修正后的观测资料。

step 3: 雷达数据检择, 分两级进行: 第一级对雷达测量数据进行直接检择, 剔除不能满足精度鉴定要求的数据, 得到一组不连续的分段雷达数据, 此时的数据在小区域内具有连续性; 第二级检择剔除超过其正常误差范围的野值, 这些野值的出现是因为测量设备或中心机的偶然故障、传输等因素引起的, 分两步进行。

第一步: 用自适应信息检测算法分别对各分段内连续的雷达数据进行初检, 构造检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta y_i)$ 。依据检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta y_i)$ 完成粗差的判别和剔除, 对于单点野值, 用平滑值 \tilde{y}_i 替代; 对于成片野值, 剔除。

第二步: 用拟合残差法完成数据复检, 依据莱以特准则构造检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta x_i)$ 。根据检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta x_i)$, 剔除野值, 得到一组不连续的雷达数据。

step 4: 经纬仪数据筛选: 根据经纬仪状态码完成经纬仪数据的初次筛选, 得到一组不连续的分段经纬仪数据。

step 5: 对经纬仪的测量值进行零值修正、时延修正、轴系误差修正:

$$R'_j = R_j - R_0 - R \cdot \frac{f - f_0}{f}$$

$$E'_j = E_j - E_0 - \gamma \cos(A - A_m) + \Delta E$$

$$A'_j = A_j - A_0 - C \cdot \sec E - i \cdot \operatorname{tg} E -$$

$$\gamma \cdot \operatorname{tg} E \cdot \sin(A - A_m) + \Delta A$$

式中, $(R, E, A)_j$ 为经纬仪测量数据, $(R_0, E_0, A_0)_j$ 为零值, C 照准差, i 为横轴差, γ 为竖轴差, A_m 为竖轴倾斜方位角, ΔE 为高低脱靶量, ΔA 为方位脱靶量, f_0 为激光理论频率, f 为激光实测频率, $(R, E, A)'_j$ 为各项误差修正后的观测资料。

step 6: 经纬仪数据检择, 分两步进行, 剔除超过正常误差范围的野值。

第一步: 用自适应信息检测算法分别对各分段内连续的经纬仪数据进行初检, 构造检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta y_i)$ 。依据检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta y_i)$ 完成粗差的判别和剔除, 对单点野值, 用平滑值替代; 对成片野值, 剔除。

第二步: 用拟合残差法完成数据的复检, 依据莱以特准则构造检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta x_i)$ 。根据检择函数 $\mathfrak{R}(\Delta x_i)$, 剔除野值, 得到一组不连续的经纬仪数据。

step 7: 比对数据时间取齐: 将经纬仪数据转至雷达测量坐标系, 选取两套设备重叠时段内的数据, 使经纬仪和雷达数据比对时间取齐。

step 8: 数据比对和参数评估。对相同时刻的经

纬仪数据 $(R, E, A)'_j$ 和雷达数据 $(R, E, A)'_l$ 作差, 得到比对残差 $\Delta \xi_i = \xi'_l - \xi'_j$ ($\xi = R, E, A$), 绘制残差曲线, 按下式统计系统误差和随机误差^[6]:

$$\xi_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta \xi_i$$

$$\sigma_{\xi} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta \xi_i - \xi_B)^2}$$

根据误差统计结果, 完成距离零值、标定参数的精度评估工作, 检验标定的设备零值和标校参数用于误差修正对提高测量船总精度的效果。如结果不能满足精度要求, 分析残差曲线, 修订距离零值或重新标定相关参数, 返回步骤 2; 正常, 则转入步骤 9。

step 9: 用管道检择法对雷达数据进行检择, 剔除已通过合检但带有一定规律的固定性偏差。对 $y = R, E, A$ 中某一参数若 $|y_i - \hat{y}_i| < c_{\Delta y}$ 则 y_i 被接收, 检择函数 $\mathfrak{R}_c(\Delta y_i) = 1$; 否则, 剔除 y_i , 检择函数 $\mathfrak{R}_c(\Delta y_i) = 0$ 。

step 10: 精度鉴定。选取检择函数 $\mathfrak{R}_c(\Delta y_i) = 1$ 时刻的经纬仪和雷达数据进行比对, 统计误差, 得到精度评估结果。

4 应用情况

测量船执行某次航天发射任务时, 由于任务海区海况恶劣, 一直未能施放信标球标定距离零值和光电偏差等误差修正系数, 直到任务发射当天上午, 海区天气才好转。施放信标球后同时跟踪了过境卫星, 但高精度的卫星星历要第二天才能获取, 无法在当天的发射任务前完成标定参数的验证工作, 为确保实战任务装订参数的准确性, 我们基于经纬仪跟踪观测到的信标球数据进行了精度检验, 发现某点频放球数据处理结果精度超标, 经分析发现是标定参数异常, 设备人员及时进行了参数复核和重新标定工作, 确保了实战任务中装订参数的准确无误。第二天得到精确星历后基于在轨卫星再次组织了精度鉴定, 评估结果与信标球数据的评估结果一致。

5 结束语

基于信标球数据的战前精度检验, 是测量船首次利用不连续的经纬仪数据开展精度检验工作, 提高了测量船海上测量精度鉴定的自主性, 效益明显。它克服了测量船传统的精度鉴定方法只能处理等间隔数据的局限性, 在处理过程中不会引入船摇和船

位误差,评估结果能更真实地反映设备的实际情况。但由于其处理流程不同于海上精度校飞,其误差传递特性也不同,相关分析工作还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 钟德安. 航天测量船测控通信设备标校与校飞技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
ZHONG De-an. Technology of Calibration and Flight Test for TT&C Ship's Measuring-communicating Equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 康德勇. 船位误差对外弹道测量及定轨精度的影响[J]. 电讯技术,2010,50(9):106-109.
KANG De-yong. Influence of Ship's Position Error on Exterior Trajectory Measurement and Orbit Determination[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(9):106-109. (in Chinese)
- [3] 江文达. 航天测量船[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
JIANG Wen-da. TT&C Ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 胡绍林,许爱华,郭小红. 脉冲雷达跟踪测量数据处理技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
HU Shao-lin, XU Ai-hua, GUO Xiao-hong. Data processing technology applied to pulse radar tracking[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 李辉芬. 航天测量船外测数据异常值自适应处理算法设计[J]. 电讯技术,2011,51(4):54-59.
LI Hui-fen. Self-adaptive Outlier Detection of Parameters of Space Tracking Ships[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(4): 54-59. (in Chinese)

- [6] 李辉芬,张忠华,朱伟康. 船载设备测量数据处理结果的综合分析方法[J]. 飞行器测控学报,2008,27(6):65-70.
LI Hui-fen, ZHANG Zhong-hua, ZHU Wei-kang. The Exterior Tracking & Measuring Data Analyzing and Processing of Instrumentation Ship[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(6): 65-70. (in Chinese)

作者简介:

李辉芬(1968—),女,云南昭通人,硕士,高级工程师,主要研究方向为海上测量数据处理与精度分析工作;

LI Hui-fen was born in Zhaotong, Yunnan Province, in 1968. She is now a senior engineer with the M.S. degree. Her research concerns maritime measurement data processing and precision analysis.

Email: wylhf@yeah.net

朱伟康(1961—),男,上海人,硕士,高级工程师,主要从事航天测控总体工作;

ZHU Wei-kang was born in Shanghai, in 1961. He is now a senior engineer with the M.S. degree in 1983. He is engaged in space TT&C system.

李红艳(1976—),女,云南人,高级工程师,主要从事航天测控总体工作;

LI Hong-yan was born in Yunnan Province, in 1976. She is now a senior engineer. She is engaged in space TT&C system.

伍辉华(1983—),男,湖南人,工程师,主要从事数据处理与精度分析工作;

WU Hui-hua was born in Hunan Province, in 1983. He is now an engineer. He is engaged in data processing and accuracy analysis.

茅永兴(1967—),男,江苏人,高级工程师,主要从事航天测控总体工作。

MAO Yong-xing was born in Jiangsu Province, in 1967. He is now a senior engineer. He is engaged in space TT&C system.