

文章编号:1001-893X(2011)10-0071-05

航天测量船角度系统误差偏大问题的分析与解决^{*}

陈红英,李辉芬,吴 君,杨 磊

(中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431)

摘 要:在测量船某型号任务的数据处理过程中,通过比对两套外测设备的原始测量数据,发现方位角的系统误差偏大。针对设备严重超出精度指标的问题,通过进一步的试算,利用箭载 GPS 数据进行比对,仔细分析了引起方位角系统误差偏大的各种因素,逐步排查后找出了问题原因,并由船载设备进行修正。通过排查分析,验证了船载设备零值修正处理方法的正确性,为船载系统类似问题的解决积累了经验。

关键词:航天测量船;数据处理;系统误差;方位角测量;零值修正

中图分类号:TN911;V55 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.10.015

Analysis of and Solution to Relatively Large Azimuth System Error Problem in a Task by Space TT&C Ship

CHEN Hong-ying, LI Hui-fen, WU Jun, YANG Lei

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

Abstract: In data processing of a task by space TT&C ship, it is found out that the azimuth error is relatively large through comparing the data of two measurement equipment. By calculating and comparing the data of rocket-borne GPS, possible factors causing the large azimuth error are analysed and the reason is found. The error is corrected by equipment onboard ship. The zero-value correction method proposed is validated through investigation and analysis, which provides reference for such problems.

Key words: space TT&C ship; data processing; system error; azimuth measurement; zero-value correction

认真分析原因,找到解决方法。

1 问题的提出

海上测控的主要任务是实时获取目标飞行的弹道数据,为型号任务发射测控的组织指挥与决策提供依据。外测精度是衡量目标外弹道测量水平的重要指标,也是测量船系统建设质量的重要技术指标。在某型号任务中,将测量船两套外测设备 A 和 B 的测量数据同时转到惯导地平系,发现两套设备的方位角系统误差相差数十倍,严重影响了数据处理结果的准确性,以及利用外弹道参数测轨的精确度,需

2 测角误差的影响

在海上测量任务中,影响测量精度的因素主要有站址误差、电波(光波)折射误差、测量元素误差、时间不同步误差、光速测不准误差。在这 5 项误差中,我们主要分析测量元素误差对测量精度的影响^[1]。

船上跟踪测量设备采用的是单站定位体制,测量元素为 R 、 E 、 A ,定位原理如图 1 所示。

^{*} 收稿日期:2011-05-31;修回日期:2011-08-11

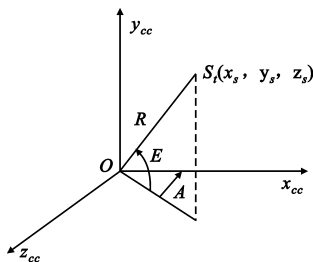


图 1 单站定位原理图
Fig.1 Positioning principle of a station

t 时刻目标在测量坐标系中的位置是将极坐标投影到直角坐标中的 3 个分量,其函数关系为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos E \cos A \\ R \sin E \\ R \cos E \sin A \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设测量元素的误差分别为 σ_R 、 σ_E 、 σ_A ,根据误差传播规律,可以得到目标的位置误差(均方差)为

σ_{x_s} 、 σ_{y_s} 、 σ_{z_s} 。

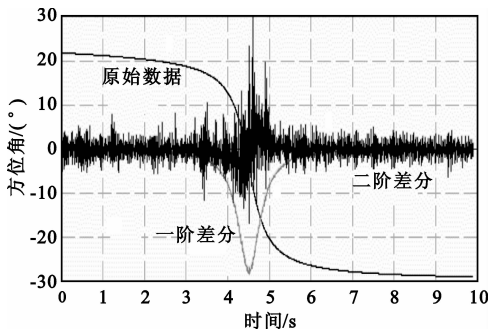
$$\begin{bmatrix} \sigma_{x_s}^2 \\ \sigma_{y_s}^2 \\ \sigma_{z_s}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 E \cos^2 A \sigma_R^2 + R^2 \sin^2 E \cos^2 A \sigma_E^2 + R^2 \cos^2 E \sin^2 A \sigma_A^2 \\ \sin^2 E \sigma_R^2 + R^2 \cos^2 E \sigma_E^2 \\ \cos^2 E \sin^2 A \sigma_R^2 + R^2 \sin^2 E \sin^2 A \sigma_E^2 + R^2 \cos^2 E \cos^2 A \sigma_A^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

海上测量数据中的测角误差,除跟踪测量设备本身的测角误差外,还要加船体姿态(即基座的姿态)测量误差。从式(2)可以看出,角度误差对位置误差的影响随着距离的增加而增加,这是由测量体制所决定的。测角误差对船载测控系统的测量精度有直接影响,必须找出误差源予以消除。

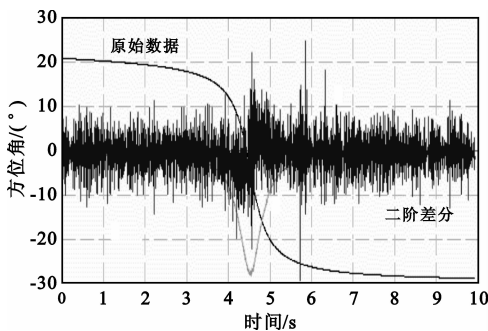
3 故障设备定位过程

3.1 数据质量分析

为保证数据通信及测量设备提供数据的准确性,在原始数据复原后必须进行数据质量的检查。数据质量检查主要是判别是否存在偏大或偏小而不符合统计规律的数据、明显的跳点、抖动以及野值等,这些异常值必定引起数据统计系统误差的偏大^[2]。本次任务中通过最小二乘法统计随机误差,采用绘图法检查设备 A、B 的数据质量。为了直观地表达出原始数据质量情况,我们利用两套设备的原始数据绘制了原始、一阶、二阶差分图,如图 2 所示。



(a) 设备 A 测量数据差分结果



(b) 设备 B 测量数据差分结果

图 2 设备 A、B 数据差分结果
Fig.2 The data difference of equipment A and B

从图 2 可以看出,两套设备原始数据变化平稳,并没有发现有跳点、抖动、野值等异常数据,这就排除了数据质量引起误差偏大的原因,需要继续进行分析。

3.2 两套外测设备比对

将一条测量船上的 A 套和 B 套设备测量数据分别转换到惯导地平坐标系^[3],具体公式为

$$\begin{bmatrix} x_{gd} \\ y_{gd} \\ z_{gd} \end{bmatrix} = B(c) \left[B(b) \begin{bmatrix} R_{cl} \cos E_{cl} \cos A_{cl} \\ R_{cl} \sin E_{cl} \\ R_{cl} \cos E_{cl} \sin A_{cl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{cg_0} \\ y_{cg_0} \\ z_{cg_0} \end{bmatrix} \right] \quad (3)$$

式中, $B(c)$ 为进行船姿修正时的坐标转换矩阵, $B(b)$ 为进行船体变形修正时的坐标转换矩阵。 $i = c, b_1, b_2, b_3$, 再由 (x, y, z) 解算目标在公共坐标系下的 (R_{gd}, E_{gd}, A_{gd}) :

$$R_{gd} = \sqrt{x_{gd}^2 + y_{gd}^2 + z_{gd}^2} \quad (4)$$

$$A_{gd} = \arctan \frac{z_{gd}}{x_{gd}} \quad (5)$$

$$E_{gd} = \arcsin \frac{y_{gd}}{\sqrt{x_{gd}^2 + y_{gd}^2 + z_{gd}^2}} \quad (6)$$

由于星箭分离后设备 A 和 B 跟踪目标不一致

(A 跟踪卫星,B 跟踪火箭),我们只将星箭分离前的 160 s 数据进行比对。

根据总联文件约定的测量船精度指标要求,船载设备 B 方位角系统误差超过精度指标要求 20 多倍,设备 A 方位角系统误差超过精度指标要求近 10 倍,由此得出此系统误差不管是因为哪套设备引起的,都严重超出了精度指标。

3.3 外测设备与卫导数据比对

利用卫星导航设备获得的弹道参数序列 $(x_i, y_i, z_i)_{gps}$ 可以解算出目标在测量船惯导地平坐标系中的坐标^[4]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{gd} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{gps} + \begin{bmatrix} \cos k_c & 0 & -\sin k_c \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin k_c & 0 & \cos k_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi_c & -\sin \phi_c & 0 \\ \sin \phi_c & \cos \phi_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_c & -\sin \theta_c \\ 0 & \sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

利用直角坐标转极坐标公式解算目标在公共坐标系下的 (R_{gd}, E_{gd}, A_{gd}) ,为了进一步明确是哪套设备出了问题,我们将 GPS 提供的火箭弹道数据(遥测弹道)反算测元,来与设备 A 和设备 B 的实测数据进行比对(同为星箭分离前160 s数据)。

从比对结果我们得出结论:设备 A 与 GPS 的方位系统误差接近,基本符合精度指标要求,而设备 B 与 GPS 的方位系统误差超过指标要求近 10 倍。设备 B 与 GPS 的方位系统误差和设备 A 与 GPS 的方位系统误差之间的差值正好为两设备比对的系统误差,由此可判断设备 B 的方位角系统误差偏大。

4 误差原因分析

通过船载测控系统与箭载 GPS 数据的比对,我们确定了测控设备 B 的方位角系统误差偏大。下面具体分析引起这个误差的原因。通过查阅外测数据处理模型可知,设备 A 与设备 B 测角数据处理流程基本一致,因此可以排除船摇、变形、电波折射(对方位无影响)的影响,需要从参数配置、系统误差修正模型、零值修正方法中查找问题^[5]。

4.1 系统误差修正

角度的系统误差修正主要包括天线座水平误差、方位轴和俯仰轴垂直误差、光机轴不平行误差、动态滞后误差和天线重力变形误差。系统误差修正

模型如下:

$$R' = R \quad (8)$$

$$E' = E - \beta_m \cdot \cos(A - A_m) - C_e - \Delta E_Z - \Delta E_g \cdot \cos E \quad (9)$$

$$A' = A - \beta_m \cdot \operatorname{tg} E \sin(A - A_m) - \delta_m \cdot \operatorname{tg} E - S_b \cdot \sec E - C_s \cdot \sec E - \Delta A_Z \cdot \sec E \quad (10)$$

式中, ΔE_Z 为俯仰动态滞后, ΔA_Z 为方位动态滞后, ΔE_g 为重力下垂量(若无重力下垂,计算时置 0), R' 、 E' 、 A' 为轴系误差修正后的观测资料。

从上面的修正公式中可以得出数据处理过程需要配置的现场测量参数:大盘不水平最大倾斜量 β_m ,大盘不水平最大倾斜方向 A_m ,俯仰轴/方位轴不正交度 δ_m ,俯仰轴/光轴不正交 S_b ,光电偏差 C_s 和 C_e 。这些值大部分都是在坞内标校和海上校飞过程中经过多次检测最终确定的,任务中基本不做改动;而光电偏差 C_s 和 C_e 的最终确定,是在任务前用跟踪标定球的方法进行标定获取的。经了解,本次任务中光电偏差值的标定方法与以往一致,可排除光电偏差使用错误的可能性。

我们将测量船实战任务中实时发往西安卫星测控中心的设备 B 瞬时站址数据(1 点/秒)与事后处理的数据进行比对,实时发送数据与事后记录数据比对结果一致,说明系统误差修正的参数设置没有问题。这就排除了事后数据处理中系统误差修正环节参数设置出错的可能性。难道是标定参数有变化?需要继续进行分析。

设备 A、设备 B 与箭载 GPS 比对的方位角系统误差残差如图 3 所示。

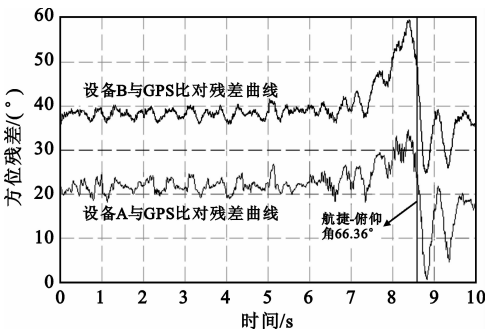


图 3 设备 A、设备 B 与箭载 GPS 方位角系统误差残差曲线
Fig.3 Curves of azimuth error for equipment A and B to rocket-borne GPS

从图 3 可以看出,两条残差曲线变化趋势基本一致,存在的问题有两个。

(1) 航捷点处残差变化趋势与动态滞后一致

经过分析,设备数据本身在航捷点处有动态滞后问题,而箭载 GPS 数据没有动态滞后,事后数据处理过程中两套设备均未进行动态滞后误差修正。我们将设备与 GPS 数据作差后,残差曲线的动态滞后情况与图 3 中航捷点以外的曲线变化趋势一致。

(2) 数据存在固定偏差

图 3 中两条残差曲线一直存在一个固定偏差,排除了重力下垂、光电偏差量计算方法的问题。从偏差的大小来看,零值修正可能是引起系统误差的原因。

4.2 零值修正

4.2.1 方位角度零位记忆装置

将 TH_{010} 经纬仪安装在天线规定位置上,使其位于设备方位旋转中心,并仔细调整,使经纬仪转盘平面与设备的方位转盘平面平行。被测天线顺时针或逆时针(应只选择一个方向)转动方位,对准方位刻线后让天线方位静止。 TH_{010} 经纬仪对准一个距离大于 1 km、仰角接近 0° 的目标,读取方位轴角编码器读数 A_{coi} 和 TH_{010} 经纬仪读数 A_{ji} 。重复对刻线 5 次以上。

在坞内标校时,对角度零位记忆装置的指向(记忆值)和重复精度进行了标定。记住了这个记忆值就等于记住了坐标取齐时轴角编码器的位置,等于记住了设备的甲板零位。这是测量船出坞后在海上实现无方位标、无标校塔标的重要技术措施。

4.2.2 问题分析

在坞内标校时,对设备 B 方位、俯仰刻线的指向和重复精度进行了标定。在海上执行任务前,只要对准方位、俯仰刻线,轴角编码器保持坞内标定的记忆值不变,就保持了设备的方位、俯仰零位。我们查看设备 B 在任务中的方位零值与设备最近一次坞内标校结果基本一致,既然设备的零值与标校结果一致,难道是零值本身发生了变化引起的误差?我们来分析这种可能性。

对测量船而言,由于从起航点到测量海域需要经过漫长的航渡过程,在此期间,设备将在风吹浪打中经受冲击、振动、温差、盐雾腐蚀等多种恶劣环境的影响,因此而产生的设备故障和技术状态改变是不可避免的^[6]。为了明确方位零值是否发生了变化,我们与设备研制方人员进行了交流,了解到本次

任务出航前,测量船设备 B 对刻线时发现方位零位记忆装置有松动,技术人员对方位的零位记忆装置进行了拆卸,发现在刻线基准下有大量的干黄油、铁锈,清洗后进行了重新安装。由于零位记忆装置有定位销固定,重新安装后基本恢复到原位置,于是按坞内标校成果调整了码盘值作为记忆基准。出海后,先后进行了 4 次对刻线检查,方位零位一直稳定、重复性好。但是,查阅了以往对刻线的历史记录后可以看出:从前一次任务后到本次任务时,设备 B 方位对刻线时码盘累计调整量增大了近 10 倍,这个数值与本次任务事后数据处理的结果相当,而且前一次任务设备 A 与设备 B 方位角比对残差的系统误差是符合精度指标的。

据此,基本可以认为设备 B 在此次任务中方位角系统误差偏大的原因是其方位零位发生了变化,具体原因是刻线受黄油、铁锈等影响产生了扭曲变形所致。

问题已经基本明确,我们将设备 B 方位零值修正后重新进行外测数据事后处理,两套外测设备方位角比对残差的系统误差由原来超出精度指标数十倍减小为零点几倍,数值在精度允许范围之内。

5 结束语

在后续的海上测量任务中,将设备 B 方位零值按修正值进行计算,设备 A 与设备 B 之间方位角比对残差的系统误差在精度指标允许范围内,验证了上述修改方位零值的正确性。目前,测量船设备 B 的方位零位经多次对刻线检查,数据稳定,满足实际测量任务的需要。

参考文献:

- [1] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
LIU Li - sheng. Data Processing of Exterior Trajectory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 李辉芬,张忠华,朱伟康,等. 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, et al. 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)
- [3] 李辉芬,朱伟康,周朝猛,等. 基于比对分析技术的船载设备故障分析[J]. 无线电工程,2009,39(4):30 - 35.

LI Hui - fen, ZHU Wei - kang, ZHOU Chao - meng, et al. Ship - borne Equipments of Fault Analysis Based on Comparison Analysis Technique [J]. Radio Engineering of China, 2009, 39(4): 30 - 35. (in Chinese)

[4] 李辉芬,朱伟康,周朝猛,等. 船载 USB 瞬时站址残差异常情况分析[J]. 电讯技术, 2010, 50(2): 57 - 62.

LI Hui - fen, ZHU Wei - kang, ZHOU Chao - meng, et al. Exceptional Phenomenon Analysis of Instrumentation Ship's USB Residual Error [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(2): 57 - 62. (in Chinese)

[5] 李辉芬,周锦标,何剑伟,等. 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, ZHOU Jin - biao, HE Jian - wei, et al. Adaptive Processing of Abnormal Value in Measured Data by Space Tracking Ship [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(4): 54 - 59. (in Chinese)

[6] 江文达. 航天测量船 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 13 - 129.

JIANG Wen - da. Space Tracking Ships [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 13 - 129. (in Chinese)

作者简介:

陈红英(1982—),女,四川营山人,2005 年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为海上测量数据处理与精度分析;

CHEN Hong - ying was born in Yingshan, Sichuan Province, in 1982. She received the B. S. degree in 2005. She is now an engineer. Her research concerns maritime measurement data processing and precision analysis.

李辉芬(1968—),女,云南人,高级工程师,长期从事海上测量数据处理工作;

LI Hui - fen was born in Yunan Province, in 1968. She is now a senior engineer. Her research concerns maritime measurement data processing.

吴 君(1982—),男,江苏人,工程师,长期从事海上测控设备研究方面的工作;

WU Jun was born in Jiangsu Province, in 1982. He is now an engineer. His research concerns maritime TT&C equipment.

Email: wujun2001@sina.com

杨 磊(1983—),男,甘肃人,工程师,长期从事海上测量数据处理工作。

YANG Lei was born in Gansu Province, in 1983. He is now an engineer. His research concerns maritime measurement data processing.

关于本刊编辑部授权中国知网优先数字出版的通知

根据期刊出版业态创新的需要,为了寻找新的发展空间和经营模式,争取成果首发权,提高期刊的国际竞争力,本刊编辑部已授权中国知网(www.cnki.net)对本刊所录用稿件优先数字出版。作者投稿时需按本刊网站“相关下载”栏目中“《电讯技术》数字优先出版论文模板.doc”格式进行排版。

谢谢支持与合作! 让我们为《电讯技术》的发展而共同努力、携手共进!

《电讯技术》编辑部