

doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2013.07.024

基于恒星测量的船载雷达轴系误差修正参数动态标定*

康德永**, 傅敏辉, 赵文华, 杨磊, 李玉剑

(中国卫星海上测控部 飞行器海上测量与控制联合实验室, 江苏 江阴 214431)

摘要:提出了一种动态条件下通过船载经纬仪和雷达标校电视联合测恒星, 标定雷达轴系误差修正参数的数学方法, 从理论上推导了相关的模型。在此基础上, 通过实测数据进行了试算分析。分析结果表明: 利用动态标定方法给出的船载无线电雷达轴系误差修正参数吸收了经纬仪光轴和雷达光轴之间的偏差, 有效提高了雷达测角精度。

关键词:船载雷达; 轴系参数; 动态标定

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)07-0949-04

Dynamic Calibration for Shaft Parameters of Ship-borne Radiometer Equipment Based on Star Observation

KANG De-yong, FU Min-hui, ZHAO Wen-hua, YANG Lei, LI Yu-jian

(Joint Laboratory of Ocean-based Flight Vehicle Measurement and Control, China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: A new parameter-correction technique is proposed, which can calibrate the radiometer shaft parameters by means of radar-theodolite joint star observation. The related model is derived and linked with practice. By using this technique, the related task data is analyzed. The results indicate that the ship-borne radio shaft parameters corrected by the dynamic calibration can eliminate the error between the radio optical axis and theodolite optical axis. The technique can obviously improve the measurement accuracy of the ship-borne radio system.

Key words: ship-borne radar; shaft parameter; dynamic calibration

1 引言

航天测量船是我国航天测控网不可缺少的重要组成部分, 测量船的测轨数据对航天器发射任务的轨道确定起到非常关键的作用。船载雷达对飞行器的测量采用单站定位体制(测元为方位角、俯仰角、测距、视向速度), 由于测距的精度高于测角的精度, 因此提高测角精度对提高整体测控水平有着非常重要的意义, 而雷达的轴系误差修正参数直接影响雷达本身的精度。

目前使用的船载雷达轴系误差修正参数通过传统的坞内标校方法^[1]获取, 即在测量船进船坞坐墩

静止不动的条件下, 在船坞四周建立方位标、校准塔和大地测量基准点等标校设施, 以当地水平面和方位标的大地测量成果为基准, 通过标校获得高精度的轴系误差修正参数。该方法组织实施难度大、耗资多、周期长, 一般只在测量船建成时或设备进行了较大规模的技术改造后才进行。在动态条件下, 雷达轴系误差修正参数有可能发生变化从而影响测量精度, 为此有必要研究动态条件下的雷达轴系误差修正参数的标定问题。

船载雷达上安装有标校电视, 其光轴指向即为雷达的光轴指向, 同时测量船上安装高精度的标校经纬仪, 因此可以考虑利用经纬仪和标校电视同时测量指定目标, 以经纬仪数据为基准, 通过参数估计的方法

* 收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2013-04-23 Received date: 2012-09-25; Revised date: 2013-04-23

** 通讯作者: kdyongcn@foxmail.com Corresponding author: kdyongcn@foxmail.com

给出轴系误差修正参数的标定值,用标定值代替坞内标校提供的轴系误差修正参数,应用于测量数据轴系误差修正,从而达到提高测角精度的目的。

2 船载雷达轴系误差修正参数动态标定方法

动态条件下标定船载雷达的轴系误差修正参数,除了参数估计方法外,还涉及到试验设计、船摇测量误差和蒙气差修正误差的分离等关键环节。下面从试验设计、动态标定模型、误差分析 3 个方面加以阐明。

2.1 试验方案设计

对于船载雷达的动态标定试验,目标选取、方位角和俯仰角的覆盖范围、编码器误差的消除是试验设计需要考虑的主要因素。

在远航条件下,恒星是光学测量的理想目标,为保证测量角度尽可能覆盖雷达的保精度测量范围,考虑在测量船保航向航行的测量工况下,通过雷达标校电视与船载经纬仪同时正倒镜^[1]四象限旋转测恒星(方位覆盖 $0^\circ \sim 360^\circ$,俯仰覆盖 $20^\circ \sim 60^\circ$)的方法进行。一次正镜 360° 测恒星和一次倒镜 360° 测恒星记为一组试验,每一象限均匀选星 4 颗以上,取两套设备同时脱靶量稳定、有效的段落参与数据处理,进行 3 组以上试验以确保试验结果的一致性。正倒镜法测量同一目标,可有效消除码盘误差。

2.2 动态标定模型

船载雷达光轴的轴系误差修正模型为

$$\begin{aligned} A' &= A - \beta_m \cdot \text{tg} E \text{sinc} - \delta_m \cdot \text{tg} E - S_b \cdot \text{sec} E \\ E' &= E - \beta_m \cdot \cos(A - A_m) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $(E_c \ A_c)$ 为数据合检后测角观测资料(俯仰角和方位角,下同)、 $(E \ A)'$ 为轴系误差修正后的测角观测资料, $(E_0 \ A_0)$ 为测角系统零值, $(\beta_m \ A_m)$ 为大盘不水平最大倾斜量和最大倾斜方向, δ_m 为俯仰轴与方位轴不垂直, S_b 为俯仰轴与光轴不垂直, $A = A_c - A_0$, $E = E_c - E_0$ 。

将 $\sin(A - A_m)$ 和 $\cos(A - A_m)$ 展开,将非线性问题线性化,记

$$\kappa = \beta_m \cdot \cos(A_m), \psi = \beta_m \cdot \sin(A_m),$$

对任一观测时刻 t_i ,轴系误差修正量为 ΔY_i ,数据合检后实测测角资料 $(E_i \ A_i)$,则有

$$\Delta Y_i = \begin{pmatrix} A_0 + \kappa \cdot \text{tg}(E_i) \cdot \sin(A_i) - \psi \cdot \text{tg}(E_i) \cdot \cos(A_i) + \\ \delta_m \cdot \text{tg}(E_i) + S_b \cdot \text{sec}(E_i) \\ E_0 + \kappa \cdot \cos(A_i) + \psi \cdot \sin(A_i) \end{pmatrix}$$

将上式用矩阵形式表示:

$$\Delta Y_i = Q_i \cdot X \quad (2)$$

其中:

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \text{tg}(E_i) \cdot \sin(A_i) & -\text{tg}(E_i) \cdot \cos(A_i) & \text{tg}(E_i) & \text{sec}(E_i) \\ 0 & 1 & \cos(A_i) & \sin(A_i) & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$X = (A_0 \ E_0 \ \kappa \ \psi \ \delta_m \ S_b)^T$$

轴系误差修正量又可表示为

$$\Delta Y_i = \begin{pmatrix} A_i - \bar{A}_i \\ E_i - \bar{E}_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, $(\bar{E}_i \ \bar{A}_i)$ 为经纬仪测量数据转换到雷达测量坐标系的计算结果。应用最小二乘参数估计方法,可以得到 X 的估计: $\hat{X} = (Q^T \cdot Q)^{-1} \cdot Q^T \cdot \Delta Y$ 。

2.3 数据处理过程的误差分析

已知船载经纬仪实测数据零值修正、轴系误差修正后数据为 $(E_j \ A_j)$,可通过测量船惯导甲板系^[2]将其转换到雷达测量坐标系 $(\bar{E}_c \ \bar{A}_c)$,考虑到对于测量恒星,视差可以忽略不记,转换公式为

$$\begin{pmatrix} \cos(\bar{E}_c) \cdot \cos(\bar{A}_c) \\ \sin(\bar{E}_c) \\ \cos(\bar{E}_c) \cdot \sin(\bar{A}_c) \end{pmatrix} = B_b^T \cdot \begin{pmatrix} \cos(E_j) \cdot \cos(A_j) \\ \sin(E_j) \\ \cos(E_j) \cdot \sin(A_j) \end{pmatrix} \stackrel{\text{记为}}{=} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}$$

可得

$$\bar{E}_c = \arcsin(X_2)$$

$$\bar{A}_c = \arctan(X_3 \ X_1)$$

其中, B_b 为变形旋转矩阵。

从以上数据处理过程看,由于雷达标校电视和经纬仪均为光学测量,且处理段落相同,蒙气差可相互抵消;由于两套设备均在同一理想甲板系中,没有转地平的过程,有效地规避了船摇测量误差的影响;参数估计结果中引入了变形测量误差,但由于变形测量的精度是经纬仪测量精度的 3 倍,该项误差可以忽略。

3 试算结果与分析

3.1 动态标定试验结果

某测量船组织了 3 组雷达标校电视与经纬仪联合测恒星试验,以船载经纬仪数据为比较基准进行了参数估计,结果见表 1。表 1 中 A_0 为坞内标校参数, A_1 、 A_2 、 A_3 分别为 3 组试验的标定结果, A_4 为 3 组试验全部恒星的标定结果。 A_0 、 E_0 、 δ_m 、 S_b 、 β_m 的单位为角秒,各参数的定义在动态标定模型部分有详细说明。

表 1 雷达轴系误差动态标定结果
Table 1 The dynamic calibration results about
the radar shaft parameter

标识	参数估计结果					
	A_0 /角秒	E_0 /角秒	δ_m /角秒	S_b /角秒	β_m /角秒	A_m
A0	269.41	345.39	-5.00	73.47	52.70	330°26'25.59"
A1	218.34	422.71	-34.51	187.62	98.85	330°26'25.23"
A2	218.33	422.34	-36.07	189.67	97.85	330°26'25.18"
A3	218.71	428.66	-36.23	188.48	105.09	330°26'25.39"
A4	219.21	423.04	-42.32	192.28	99.85	330°26'25.25"

从表 1 可以看出:

(1) 各组动态标定结果之间的一致性较好;

(2) 动态标定参数与坞内标校参数的大盘不水平最大倾斜方向 A_m 较为一致。

3.2 试验结果验证

选取该雷达参试的多组跟踪过境目标或实战任务共 7 组数据对进行验证,分别使用坞内标校参数和表 1 中动态标定参数 A4 进行处理,然后与比对标准进行比对,统计雷达方位和俯仰角的比对残差,残差均值与雷达测角精度指标的比值见表 2。

表 2 验证试验数据处理比对残差均值与设备系统误差指标的比值

Table 2 The ratio of the expected residual value versus the system error

序号	坞内标校参数 处理比对结果		动态标定参数 处理比对结果	
	方位	俯仰	方位	俯仰
	1	1.08	2.28	-0.71
2	1.09	1.05	-0.43	-0.08
3	2.33	1.73	0.65	0.58
4	1.08	1.64	-0.42	0.78
5	1.47	3.79	0.46	1.50
6	1.04	2.06	0.03	-0.24
7	1.18	3.59	-0.67	1.15

从表 2 的处理结果看:

(1) 利用坞内标校参数进行数据处理,与经纬仪进行数据比对,方位角残差均值与设备精度指标相比大于 1 倍,俯仰角残差均值与设备精度指标相比在 1~4 倍之间,说明在动态条件下,雷达光轴指向与坞内静态条件下相比,已经发生了明显的变化;

(2) 利用动态标定参数进行数据处理,与经纬仪进行数据比对,方位角残差均值与设备精度指标相比均在 1 倍以内,俯仰角残差均值与设备精度指标

相比在 0~1 倍附近,动态标定参数代表的光轴指向更接近经纬仪的光轴指向。

3.3 分析与讨论

(1) 与坞内标校的单项轴系误差独立静态标定方法不同,动态标定的原理是通过多样本地跟踪恒星,采用参数估计的方法使得轴系参数最优地拟合雷达系统与比对标准的残差,从而使得整个测量系统的误差最小。

(2) 从多次试验的结果看,动态标定结果具有较好的一致性、稳定性,验证结果表明动态标定结果整体效果优于坞内标校参数处理结果,说明本文提出的方法是一种合理、有效的轴系误差修正参数动态标定技术,适用于船载外测设备动态条件下的参数标定。

(3) 从误差分析的角度看,对于船载测量系统,船姿、船位的测量误差对测轨均有一定的影响^[2-3],而本方法没有转地平的过程,不引入船摇测量误差,虽然引入了船体变形测量误差,但由于变形的测量精度远高于经纬仪的测量精度,可忽略不计。

(4) 若不采用雷达为标校电视与经纬仪联合测恒星的试验方式,而是直接以恒星理论值为比较基准进行参数估计,则需要将恒星理论位置进行蒙气差的方向修正,并通过惯导地平系转到雷达测量系,这样会引入船姿船位测量误差和蒙气差修正剩余误差;同时,由于需要使用船姿船位数据,对测量工况^[4]的要求也较高。

4 结束语

船载雷达轴系误差修正参数动态标定方法的本质是通过经纬仪与雷达标校电视联合测恒星,利用经纬仪的光轴指向校准雷达光轴指向,实现提高整个测量系统精度的目的。开展动态标定试验的保障要求较低,在测量船航渡或锚泊期间均可实施。由于本方法依赖经纬仪的精度,而在动态条件下经纬仪的精度尚无有效方法检验,因此有必要继续开展相应的技术研究工作,为保持或提高船载测量系统的精度提供技术支撑。

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. TT&C Communication Equipment and Calibration Technology for Space Ship [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

- [2] 张忠华. 航天测量船船姿数据处理方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHANG Zhong-hua. Ship Attitude Data Processing for TT&C Ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 康德勇, 李晓勇, 王旭良, 等. 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): 102-105.
KANG De-yong, LI Xiao-yong, WANG Xu-liang, et al. Influence of Ship's Position on Exterior Trajectory Measurement and Orbit Determination[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(9): 102-105. (in Chinese)
- [4] 简世龙. 航天测量船海上测控技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
JIAN Shi-long. Overview of Maritime TT&C Technology for TT&C Ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



康德永(1973—),男,河北三河人,2006年于中科院紫金山天文台获硕士学位,现为高级工程师,主要从事弹道数据处理、精度分析等方面的研究工作;

KANG De-yong was born in Sanhe, Hebei Province, in 1973. He received the M. S. degree from Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Science in 2006. He is now a senior engineer. His research concerns trajectory data processing and precision analysis.

Email: kdyongcn@foxmail.com

赵文华(1965—),男,江苏江阴人,2007年于南京理工大学获硕士学位,现为高级工程师,主要从事测控设备研究应用和科技管理;

ZHAO Wen-hua was born in Jiangyin, Jiangsu Province, in 1965. He received the M. S. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2007. He is now a senior engineer. His research concerns application of TT&C equipment and technology management.

傅敏辉(1972—),男,江西赣榆人,2011年于南京大学获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航天测量船发展建设;

FU Min-hui was born in Ganyu, Jiangxi Province, in 1972. He received the M. S. degree from Nanjing University in 2011. He is now a senior engineer. His research concerns the development of TT&C ship.

杨磊(1983—),男,甘肃兰州人,2008年于国防科技大学获硕士学位,现为工程师,主要从事海上测控数据处理工作;

YANG Lei was born in Lanzhou, Gansu Province, in 1983. He received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2008. He is now an engineer. His research concerns maritime measurements data processing.

李玉剑(1983—),男,吉林通化人,2011年于中国科学技术大学获博士学位,现为工程师,主要从事海上测量数据处理和统计物理研究工作。

LI Yu-jian was born in Tonghua, Jilin Province, in 1983. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2011. He is now an engineer. His research concerns trajectory data processing, statistical physics.