

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.007

引用格式:钟德安,张同双,冯鸿奎,等.基于星敏感器的船载雷达误差修正参数解算方法[J].电讯技术,2014,54(8):1077-1081. [ZHONG De-an,ZHANG Tong-shuang,FENG Hong-kui,et al. Calculation Method of Error-correction Parameters for Ship-borne Radar Based on Star Sensor[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(8):1077-1081.]

基于星敏感器的船载雷达误差修正参数解算方法^{*}

钟德安^{1,2,**},张同双^{1,2},冯鸿奎¹,茅永兴^{1,2}

(1. 中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431;2. 飞行器海上测量与控制联合实验室,江苏 江阴 214431)

摘 要:针对动态条件下船载雷达误差修正参数标定困难的问题,提出了基于星敏感器的船载雷达误差修正参数解算方法,该方法以安装于船载雷达天线的星敏感器测角数据为比对基准。总结了船载雷达标定方法的现状,介绍了基于星敏感器的船载雷达误差修正参数解算原理,推导了船载雷达误差计算公式和误差修正参数解算模型。通过计算雷达相对星敏感器的角度残差,采用最小二乘法实现了误差修正参数的解算。最后,通过静态与动态试验对该方法进行了验证。试验结果表明,静态条件下,该方法与传统坞内标定结果相比一致性优于 15",动态条件下的一致性优于 25",说明该方法技术上是可行的。

关键词:船载雷达;误差修正参数;星敏感器;解算方法;最小二乘算法

中图分类号:TN95;V556 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1077-05

Calculation Method of Error-correction Parameters for Ship-borne Radar Based on Star Sensor

ZHONG De-an^{1,2},ZHANG Tong-shuang^{1,2},FENG Hong-kui¹,MAO Yong-xing^{1,2}

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

Abstract: In order to overcome the calibration difficulty of error-correction parameters for ship-borne radar under dynamic condition, a new method based on star sensor is presented, in which angular measurement data obtained by means of star sensor is taken as comparison data. The present calibration methods for ship-borne radar are summarized, the principle of calculation method based on star sensor is introduced, and the error formula and the calculation model are derived. By calculating angle residual error of radar to star sensor and by using least square estimation method, the calculation of the error-correction parameters is realized. Finally, the method is verified by dock-static and wharf-dynamic experiments. The result shows in comparison with traditional calibration method, the consistency is within 15" under dock-static condition, and 25" under wharf-dynamic condition, which proves the feasibility of the method.

Key words: ship-borne radar; error-correction parameters; star sensor; calculation method; least square algorithm

1 引 言

船坞坐墩的静态条件下进行。在海上,船体始终在不停地摇摆,给船载雷达的标定工作造成了很大困

船载雷达误差修正参数的精确标定需要在船进

^{*} 收稿日期:2014-04-29;修回日期:2014-07-03 Received date:2014-04-29;Revised date:2014-07-03

^{**} 通讯作者:Zda1014@126.com Corresponding author:Zda1014@126.com

• 1077 •

难。人们一直在研究解决的办法,如利用安装于雷达天线的标校电视测恒星解算法^[1]、利用同船高精度光学设备比较法^[2-3]和利用空间目标的精密星历解算法^[4]等。这些方法各有特点,但仍处在试验阶段,需要进一步开展工程化研究。

星敏传感器是以恒星为参照系,以星空为工作对象的高精度空间姿态测量装置,近年国内外开始研究星敏传感器在大气层内应用的可行性。将星敏传感器作为一个测角元件,可以提供不依赖于车载雷达编码器的、独立的高精度雷达指向数据。国外多数星敏传感器产品的俯仰/偏航精度优于 1",国内产品的俯仰/偏航精度也可达 3"^[5]。

本文提出了以安装于车载雷达天线的星敏传感器的测角数据为比对基准的雷达误差修正参数解算新方法,由于星敏传感器是最精密的姿态测量部件,将其测角数据作为比对基准不仅可以增加解算手段,而且可以提高解算精度。

2 传统雷达误差修正参数解算方法

传统雷达误差修正参数解算包括 4 种方法,下面分析介绍。

(1) 坞内标校法

坞内标校法是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、距离标、校准塔和大地测量基准点等标校设施,以真地平 and 方位标的大地测量成果为基准,对各测量设备进行全面标校的方法,可获得高精度的零位和轴系误差等误差修正参数,包括大盘不水平、方位零位、俯仰零位、光机偏差等。

(2) 雷达标校电视星体标校法

恒星的位置可以实时地计算出来,其精度很高(利用 FK5 星表可以达到 1"以内的视位置精度)。利用这种恒星位置的确知性,以精确的恒星位置代替方位标,标定雷达的零位和轴系误差。整体过程大致如下:首先利用 FK5 星表选择合适的恒星,雷达标校电视跟踪测量数颗恒星并记盘,再利用 FK5 星表和测量时记录的各帧时间码、船舶位置数据、船体姿态数据计算恒星的理论位置数据,与实测数据作差,利用适当的差分模型求解,进而完成雷达零位和轴系误差的解算^[1]。

(3) 同船高精度光学经纬仪比较法

测量船上安装有高精度光学经纬仪,其测角精度高于雷达 3 倍以上,雷达利用标校电视光轴与光

学经纬仪同步跟踪分布于 4 个象限的恒星,以光学经纬仪为基准,解算雷达零位和轴系误差。该方法的优点是在甲板坐标系中进行比对,不受船体姿态测量数据影响^[2]。

(4) 空间目标的精密星历解算法

雷达跟踪已知其精轨的空间目标,以空间目标的精密星历为比对基准,解算雷达零位和轴系误差。

3 基于星敏传感器的误差修正参数解算方法

3.1 方法原理

星敏传感器用于船体姿态测量时,一般需要 2~3 台星敏传感器组合测量,才能获得高精度的船体姿态测量数据。用于车载雷达精度检验时,需要高精度的星敏传感器光轴指向测量信息。而当星敏传感器用于解算雷达零位和轴系误差等误差修正参数时,与用于检验车载雷达精度一样,仅需星敏传感器光轴指向信息即可,实际上,所有能够检验雷达精度的系统(或设备)均能用于雷达误差修正参数的解算。

星敏传感器用于解算车载雷达零位和轴系误差等修正参数的方法原理为:在车载雷达天线上安装一星敏传感器,精确标定星敏传感器光轴与车载雷达机械轴、电轴间的轴系关系,当车载雷达跟踪空间目标(含标定球、卫星及其他可跟踪目标)时,星敏传感器通过观测视场内的恒星确定星敏传感器光轴在地平系中的精确指向,以该指向作为比较标准解算误差修正参数。

实现本方法的关键在于研制一套能够克服船摇影响和大气折射影响的高动态、高精度地面应用型星敏传感器。

3.2 数据处理方法

将星敏传感器测量数据和雷达测量数据分别完成相应的处理后,转到一公共坐标系中(以车载雷达三轴中心为原点的地平系)即可开始解算工作。因此,数据处理包括星敏传感器测量数据的处理和雷达测量数据的处理两部分。

3.2.1 星敏传感器数据处理

星敏传感器获得的光轴指向是在 J2000.0 坐标系中的,首先需将其转至惯导地平系。设 $(X,Y,Z)_{DP}$ 为星敏传感器光轴在惯导地平坐标系中指向单位矢量端点的直角坐标,则有

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{DP} = EDCBA \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CIS} \tag{1}$$

式中, $\mathbf{E}$ 为地固坐标系与惯导地平坐标系间的转换矩阵, $\mathbf{D}$ 为准地固坐标系与地固坐标系的转换矩阵, $\mathbf{C}$ 为瞬时真赤道地心坐标系与准地固坐标系间的转换矩阵, $\mathbf{B}$ 为瞬时平赤道地心系与瞬时真赤道地心系间的转换矩阵, $\mathbf{A}$ 为 J2000.0 地心惯性坐标系与瞬时平赤道地心坐标系间的转换矩阵, $(X, Y, Z)_{\text{CIS}}$ 为星敏感器光轴在 J2000.0 地心惯性坐标系中指向单位矢量端点的直角坐标^[5]。

为了便于数据处理, 需要进一步将 $(X, Y, Z)_{\text{DP}}$ 转至雷达测量坐标系, 转换流程如图 1 所示。

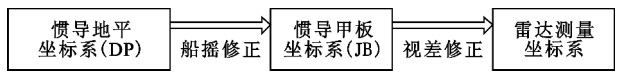


图 1 惯导地平坐标系至雷达测量坐标系转换流程
Fig. 1 Transformation flow chart of inertial horizontal coordinates to radar measuring coordinates

转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_c = \mathbf{B}_b^T \cdot \left[\mathbf{B}_c^T \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{DP}} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right] \quad (2)$$

式中, $(X, Y, Z)_c$ 为恒星(星敏感器光轴方向矢量端点, 下同)在雷达测量坐标系中的直角坐标, $\mathbf{B}_b^T$ 为雷达与惯导之间的变形欧拉角旋转矩阵, $\mathbf{B}_c^T$ 为船摇欧拉角旋转矩阵, $(X, Y, Z)_{\text{DP}}$ 为恒星在惯导地平系中的直角坐标, (X_0, Y_0, Z_0) 为雷达三轴中心在惯导甲板系中的直角坐标(相对视差)。再利用直角坐标与极坐标的转换关系可将 $(X, Y, Z)_c$ 转换为相应的极坐标参数。

则星敏感器光轴在以船载无线电测量设备三轴中心为原点的测量坐标系中的指向 $(A_{\text{egd}}, E_{\text{egd}})$ 为

$$\begin{cases} A_{\text{egd}} = \arctg(Y_c/X_c) \\ E_{\text{egd}} = \arctg(Z_c/\sqrt{X_c^2+Y_c^2}) \end{cases} \quad (3)$$

$(A_{\text{egd}}, E_{\text{egd}})$ 即可用作解算雷达零位和轴系误差修正参数的比较标准。

3.2.2 雷达数据处理

设雷达测得的空间目标在以雷达三轴中心为原点的测量坐标系的角度和距离数据分别为 A_{cl} 、 E_{cl} 、 R_{cl} , 应对 A_{cl} 、 E_{cl} 进行零位和轴系误差修正, 需修正的参数包括方位角零位、俯仰角零位、大盘不水平、光机偏差、俯仰轴和方位轴不正交、光电偏差、天线重力下垂等。修正模型如下式(为清楚起见, 公式中未计入编码器误差、大气折射误差、动态滞后误差等

修正项):

$$\begin{cases} E' = E_{cl} - E_0 - \beta_m \cos(A_{cl} - A_m) - C_e - \Delta E_g \cos E_{cl} \\ A' = A_{cl} - A_0 - \beta_m \tg E_{cl} \sin(A_{cl} - A_m) - \delta_m \tg E_{cl} - S_b \sec E_{cl} - C_s \sec E_{cl} \end{cases} \quad (4)$$

式中, E' 为修正后的俯仰角真值, E_0 为俯仰角零位, β_m 为大盘最大倾斜量, A_m 为大盘最大倾斜量所在方位角, C_e 为俯仰光电偏差, ΔE_g 为重力下垂误差, A' 为修正后的方位角真值, A_0 为方位角零位, δ_m 为两轴不正交误差, S_b 为光机偏差, C_s 为方位光电偏差。

3.2.3 零位和轴系误差修正参数解算

设 t_i 时刻星敏感器光轴在以船载雷达三轴中心为原点的测量坐标系中的指向为 $(A_{\text{cgdi}}, E_{\text{cgdi}})$, 同时, 雷达轴角编码器在 t_i 时刻的输出值为 E_{cli} 、 A_{cli} , 则有

$$\begin{cases} E_{\text{cgdi}} = E_{cli} - E_0 - \beta_m \cos(A_{cli} - A_m) - C_e - \Delta E_g \cos E_{cli} \\ A_{\text{cgdi}} = A_{cli} - A_0 - \beta_m \tg E_{cli} \sin(A_{cli} - A_m) - \delta_m \tg E_{cli} - S_b \sec E_{cli} - C_s \sec E_{cli} \end{cases} \quad (5)$$

上式可简化为

$$\begin{cases} E_{\text{cgdi}} = E_{cli} - E'_0 - \beta_m \cos(A_{cli} - A_m) - \Delta E_g \cos E_{cli} \\ A_{\text{cgdi}} = A_{cli} - A_0 - \beta_m \tg E_{cli} \sin(A_{cli} - A_m) - \delta_m \tg E_{cli} - S_e \sec E_{cli} \end{cases} \quad (6)$$

式中, E'_0 为以天线电轴为基准的俯仰零位, S_e 为机械轴与电轴的不平行度(亦称机电偏差)。

进一步地, 上式可转化为

$$\begin{cases} E_{\text{cgdi}} - E_{cli} = -E'_0 - \Phi \cos A_{cli} - \Theta \sin A_{cli} - \Delta E_g \cos E_{cli} \\ A_{\text{cgdi}} - A_{cli} = -A_0 - \Phi \tg E_{cli} \sin A_{cli} + \Theta \tg E_{cli} \cos A_{cli} - \delta_m \tg E_{cli} - S_e \sec E_{cli} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Phi = \beta_m \cos A_m$, $\Theta = \beta_m \sin A_m$ 。

对于 K 组测量值, 有如下矩阵:

$$\begin{cases} \Delta E_{\text{cgd}} = E_{\text{cgd}} \cdot \xi \\ \Delta A_{\text{cgd}} = A_{\text{cgd}} \cdot \eta \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$\Delta E_{\text{cgd}} = \begin{bmatrix} E_{\text{cgd}1} - E_{\text{cl}1} \\ E_{\text{cgd}2} - E_{\text{cl}2} \\ \vdots \\ E_{\text{cgd}k} - E_{\text{cl}k} \end{bmatrix}$$
$$\Delta A_{\text{cgd}} = \begin{bmatrix} A_{\text{cgd}1} - A_{\text{cl}1} \\ A_{\text{cgd}2} - A_{\text{cl}2} \\ \vdots \\ A_{\text{cgd}k} - A_{\text{cl}k} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_{egd} = - \begin{bmatrix} 1 & \cos A_{cl1} & \sin A_{cl1} & \cos E_{cl1} \\ 1 & \cos A_{cl2} & \sin A_{cl2} & \cos E_{cl2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos A_{clk} & \sin A_{clk} & \cos E_{clk} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\xi} = (E'_0, \boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Theta}, \Delta E_g)$$
$$\boldsymbol{A}_{egd} = - \begin{bmatrix} 1 & \operatorname{tg} E_{cl1} \sin A_{cl1} & -\operatorname{tg} E_{cl1} \cos A_{cl1} & \operatorname{tg} E_{cl1} & \sec E_{cl1} \\ 1 & \operatorname{tg} E_{cl2} \sin A_{cl2} & -\operatorname{tg} E_{cl2} \cos A_{cl2} & \operatorname{tg} E_{cl2} & \sec E_{cl2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \operatorname{tg} E_{clk} \sin A_{clk} & -\operatorname{tg} E_{clk} \cos A_{clk} & \operatorname{tg} E_{clk} & \sec E_{clk} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\eta} = (A'_0, \boldsymbol{\Phi}, -\boldsymbol{\Theta}, \delta_m, S_e)$$

其中, $\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}$ 为零位和轴系误差系数矩阵,包含了待解算的方位角零位、俯仰角零位、大盘不水平、俯仰轴和

方位轴不正交、天线重力下垂等误差修正参数。利用最小二乘参数估计方法可以分别得到 $\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}$ 的估计:

$$\boldsymbol{\xi} = (\boldsymbol{E}_{egd}^T \boldsymbol{E}_{egd})^{-1} \boldsymbol{E}_{egd}^T \Delta \boldsymbol{E}_{egd}$$

(9)

$$\boldsymbol{\eta} = (\boldsymbol{A}_{egd}^T \boldsymbol{A}_{egd})^{-1} \boldsymbol{A}_{egd}^T \Delta \boldsymbol{A}_{egd}$$

(10)

4 试验结果及分析

4.1 静态试验结果及分析

静态试验是在测量船进坞坐墩的静态条件下进行的(此时船摇为零),根据空间目标星历引导雷达跟踪相应空间目标,跟踪时星敏感器和雷达同时录取数据,用于事后解算。共进行了两次试验,结果如表 1 所示。

表 1 静态条件下试验结果

Table 1 Dock-static test results

试验序次	$\beta_m/(\text{''})$	$A_m/(\text{°})$	$E'_0/(\text{''})$	$\Delta E_g/(\text{''})$	$A'_0/(\text{''})$	$\delta_m/(\text{''})$	$S_e/(\text{''})$
第一次	75.1	88.1	89.5	50.4	337.7	15.9	153.3
第二次	70.3	90.3	82.3	57.8	330.9	20.1	161.4
传统标校值	64.6	92.5	84.9	51.1	329.5	22.2	165.8

从表 1 可以看出,两次试验结果一致性较好,除大盘不水平最大倾斜方向外,其余一致性均在 10'' 以内,与传统坞内标校值相比,一致性在 15'' 以内,其量级与传统标校方法相当。

4.2 动态试验结果及分析

动态试验是在测量船码头系泊条件下进行的(此时船摇约为 0.12°/s),雷达跟踪空间目标和数据录取方法同静态试验。试验也进行了两次,试验

结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,无论是自身两次试验结果相比,还是与传统标校结果相比,一致性有所下降。除大盘不水平最大倾斜方向外,自身两次结果一致性最大仍优于 20'',而与传统坞内标校值相比优于 25''。究其原因,是因为将星敏感器数据转换至雷达测量坐标系时要修正惯导的船摇数据,从而引入了惯导的误差,使误差的一致性下降。

表 2 动态条件下试验结果

Table 2 Wharf-dynamic test results

试验序次	$\beta_m/(\text{''})$	$A_m/(\text{°})$	$E'_0/(\text{''})$	$\Delta E_g/(\text{''})$	$A'_0/(\text{''})$	$\delta_m/(\text{''})$	$S_e/(\text{''})$
第一次	85.6	80.5	70.7	33.8	350.7	30.9	179.5
第二次	73.7	91.9	60.6	45.2	333.1	25.1	183.7
传统标校值	64.6	92.5	84.9	51.1	329.5	22.2	165.8

5 结束语

从静态试验结果看,无论是自身多次试验结果,还是与常规标校结果相比,一致性较好。实际上测量船进坞后,其上安装的雷达设备就相当于一个陆上雷达站,不会引入其他额外测量误差。

从动态试验结果看,虽然一致性有所降低,考虑到雷达设备安装在测量船上,船姿船位测量系统引入的额外误差和其他尚未考虑到的一些误差因素,该项结果也是可信的。

本文提出的基于星敏感器的船载雷达误差修正参数解算方法是建立在文献[5]结果基础上的,是

文献[5]工作的继续和深化,对于解决船载雷达某些零位和轴系误差参数经常性的变化问题,对于解决某些尚未考虑到的一些误差因素的影响,提高雷达测量精度,具有重要意义。后续需要对本文提出的方法进一步加以工程化研究。

参考文献:

- [1] 孙晓昶,皇甫堪. 以恒星位置为基准的运动平台上测控雷达精度标校技术[J]. 宇航学报, 2002, 23(3): 29-33.
SUN Xiao-chang, HUANGFU Kan. Precision calibration of moving platform based radar with stars as reference marks[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(3): 29-33. (in Chinese)
- [2] 康德永,傅敏辉,赵文华,等. 基于恒星测量的船载雷达轴系误差修正参数动态标定[J]. 电讯技术, 2013, 53(7): 949-951.
KANG De-yong, FU Min-hui, ZHAO Wen-hua, et al. Dynamic Calibration for Shaft Parameters of Ship-borne Radiometer Equipment Based on Star Observation[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(7): 949-951. (in Chinese)
- [3] 钟德安,张同双,李晓勇,等. 基于标校经纬仪的测量船坞内标校新方法[J]. 无线电工程, 2009, 39(7): 49-52.
ZHONG De-an, ZHANG Tong-shuang, LI Xiao-yong, et al. A New Calibration Method Based on Calibration Theodolite for Spacecraft TT&C Ship at Dock[J]. Radio Engineering of China, 2009, 39(7): 49-52. (in Chinese)
- [4] 袁勇,李革,马鹏斌,等. 雷达的卫星标定技术方法[J]. 陕西科技大学学报, 2008, 26(4): 109-113.
YUAN Yong, LI Ge, MA Peng-bin, et al. Satellite calibration of radar[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2008, 26(4): 109-113. (in Chinese)

- [5] 钟德安,张同双,冯鸿奎,等. 基于恒星观测的船载雷达精度检验方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(9): 1229-1233.
ZHONG De-an, ZHANG Tong-shuang, FENG Hong-kui, et al. Accuracy Tests Method of Ship-borne Radar Based on Star Observation[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(9): 1229-1233. (in Chinese)

作者简介:



钟德安(1964—),男,江苏江阴人,1990年获硕士学位,现为研究员,主要研究方向为测量船标校技术;

ZHONG De-an was born in Jiangyin, Jiangsu Province, in 1964. He received the M. S. degree in 1990. He is now a senior engineer of professor. His research concerns calibration techniques for TT&C ship.

Email: Zda1014@126.com

张同双(1968—),男,江苏淮阴人,2006年获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为船姿船位测量、标校、校飞;

ZHANG Tong-shuang was born in Huaiyin, Jiangsu Province, in 1968. He received the M. S. degree in 2006. He is now a senior engineer. His research concerns attitude and position determination, calibration flight test for TT&C ship.

冯鸿奎(1971—),男,江苏泰州人,1994年获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为惯性导航技术;

FENG Hong-kui was born in Taizhou, Jiangsu Province, in 1971. He received the B. S. degree in 1994. He is now a senior engineer. His research concerns inertial navigation technology.

茅永兴(1968—),男,江苏南通人,2005年获硕士学位,现为研究员,主要研究方向航天测控技术。

MAO Yong-xing was born in Nantong, Jiangsu Province, in 1968. He received the M. S. degree in 2005. He is now a senior engineer of professor. His research concerns aerospace TT&C technology.