### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.009

**引用格式:**张同双,钟德安,潘良,等. 基于星敏感器指向的船载雷达轴系误差分离模型[J]. 电讯技术,2015,55(5):516-521. [ZHANG Tongshuang,ZHONG Dean,Pan Liang, et al. Error Separation Model for Shaft Parameters of Ship-borne Radar Based on Pointing of Star Sensor [J]. Telecommunication Engineering,2015,55(5):516-521. ]

# 基于星敏感器指向的船载雷达轴系误差分离模型\*

# 张同双<sup>1,2,\*\*</sup>, 钟德安<sup>1</sup>, 潘 良<sup>1,2</sup>, 焦宏伟<sup>1,2</sup>, 王二建<sup>1</sup>

(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:针对现有船载雷达动态标校方法的不足,提出了一种基于星敏感器的船载雷达轴系误差标 校方法。该方法以精确的星敏感器地平指向为比对基准,解算船载雷达的轴系误差。设计了基于星 敏感器的船载雷达动态标校方案,分析了船摇测量误差对雷达测角精度的影响,推导了天线座垂向 变形引起的雷达测角误差修正模型。根据测量目标的不同,分别建立了联合测星与跟踪目标时的船 载雷达轴系误差分离模型。最后通过联合测星试验对轴系误差分离模型进行了验证。试验结果表 明,利用动态标校成果修正后的船载雷达方位、俯仰系统残差分别为 3"和 9",随机残差分别为 40"和 45",满足雷达轴系误差标定要求,具有较高的实用价值。

关键词:船载雷达;星敏感器;轴系误差;动态标定;误差分离

中图分类号:TN953;V556.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)05-0516-06

# Error Separation Model for Shaft Parameters of Ship-borne Radar Based on Pointing of Star Sensor

ZHANG Tongshuang<sup>1,2</sup>, ZHONG Dean<sup>1</sup>, PAN Liang<sup>1,2</sup>, JIAO Hongwei<sup>1,2</sup>, WANG Erjian<sup>1</sup>

(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 view of the deficiency of existing dynamic calibration methods for ship-borne radar, a shaft parameter calibration method for ship-borne radar based on star sensor is proposed. This method calculates the shaft parameters of ship-borne radar by taking the precise horizontal orientation of star sensor as comparison basis. A dynamic calibration scheme of ship-borne radar based on star sensor is designed, the influence of ship swing measurement error on radar angle measurement precision is analyzed and the angle measurement error correction model of radar antenna pedestal deformation is derived. According to the different measuring targets, the error separation models for shaft parameters of ship-borne radar in joint measuring star and tracking target are founded respectively. By the experiment of joint measuring star, the error separation model for shaft parameters is verified. Experimental results show that, by using the dynamic calibration results, the rectified system residuals of ship-borne radar azimuth angle and pitch angle are 3" and 9", the random errors are 40" and 45", respectively. The results meet the technical requirements and the model is valuable in practice engineering applications.

Key words: ship-borne radar; star sensor; shaft parameter; dynamic calibration; error separation

## 1 引 言

船载雷达采用单站定位测量体制,轴系误差直 接影响测量精度,因此必须对其精确标校。船载雷 达轴系误差主要标校方法有坞内标校<sup>[1]</sup>、卫星标 校<sup>[2-4]</sup>及天文标校<sup>[5-7]</sup>等。坞内标校的优点是标定 项目全面、标定精度高,不足是组织实施难度大、耗

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-01-30;修回日期:2015-04-07 Received date:2015-01-30;Revised date:2015-04-07

<sup>\*\*</sup> 通讯作者:zts\_123@163.com Corresponding author:zts\_123@163.com

资多、周期长,一般只在测量船建成或设备进行较大 规模的技术改造后进行<sup>[5]</sup>。卫星标校和天文标校 通过跟踪已知精密星历的卫星或恒星目标,获取雷 达的系统误差,根据误差分离模型与算法,解算雷达 的轴系误差。卫星标校和天文标校具有保障要求 低、操作简便、自动化程度高等优点,但在标校过程 中均未考虑船体姿态对标校结果的影响,因而标校 结果重复性差,有时严重偏离实际情况。

星敏感器是目前已知的精度最高的载体姿态敏 感器件<sup>[8]</sup>。采用基于星敏感器的分布式船姿测量 方案,有望将船姿测量误差对动态标校的影响降至 最低,在此基础上,在船载雷达上捷联安装一套星敏 感器作为测角元件,可以提供一个不依赖于雷达编 码器的、独立的高精度雷达角度测量基准<sup>[9]</sup>,从而 提高轴系误差分离精度。

本文在分析现有标校技术的基础上,以星敏感 器为船载雷达指向基准,研究了基于星敏感器的船 载雷达轴系误差分离方法,分析了船摇测量误差对 雷达测角精度的影响,推导了雷达天线座垂向变形 测角误差修正模型。根据雷达测量目标的不同,建 立了不同的轴系误差分离模型,最后通过试验验证 了模型的正确性。

# 2 基于星敏感器的船载雷达轴系误差分离 方法

### 2.1 坐标系及其定义

船载雷达甲板坐标系与地平坐标系定义如图 1 所示, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 和 $O_J - X_J Y_J Z_J$ 分别为惯导地平坐 标系和甲板坐标系。其中, $O_c X_c$ 指向真北, $O_c Y_c$ 指 向天顶, $O_c Z_c$ 与 $O_c X_c$ 、 $O_c Y_c$ 成右手关系; $O_J X_J$ 沿 艏艉线指向船艏, $O_J Y_J$ 垂直于甲板平面向上, $O_J Z_J$ 与 $O_J X_J$ 、 $O_J Y_J$ 成右手关系; $A_i$ 、 $E_i$ 分别为测量设备甲 板实测方位角与俯仰角。



图 1 惯导地平坐标系与甲板坐标系 Fig. 1 Coordinate system of inertial horizontal and deck

#### 2.2 误差分离原理

基于星敏感器的船载雷达误差分离方法如图 2 所示,在船载雷达三轴中心附近捷联安装一套星敏 感器 B,用于精确测量船载雷达的精确地平指向,精 度可达角秒量级。由于星敏感器的参考坐标系为地 平坐标系,而雷达参考坐标系为甲板坐标系,因此需 要将其转换到同一参考坐标系,才能得到船载雷达 相对星敏感器 B 的角度误差。为此,在船载雷达过 渡座内安装一套激光陀螺捷联惯导/GPS 组合导航 系统和双星敏感器组合(星敏感器 A,角秒级精 度),用于测量天线基座处的船摇角。利用激光陀 螺捷联惯导或星敏感器 A 的船摇测量数据,将雷达 测角数据转换到地平坐标系,并与星敏感器 B 的测 角数据进行比较,得到船载雷达的测角误差,在此基 础上,根据轴系误差分离模型,解算得到船载雷达的 轴系误差。



图 2 庆左刀 丙床连 Fig. 2 Principle block diagram of error separation

## 3 船体姿态对雷达测角精度的影响

#### 3.1 船摇测量误差对雷达测角精度的影响

船摇测量误差对雷达地平测角精度的影响如式 (1)所示<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta A_i = \Delta K_{ci} + \Delta \psi_{ci} \sin A_i \tan E_i + \Delta \theta_{ci} \cos A_i \tan E_i \\ \Delta E_i = \Delta \psi_{ci} \cos A_i - \Delta \theta_{ci} \sin A_i \end{cases}$$
(1)

式中, $\Delta A_i$ 、 $\Delta E_i$ 分别为由船摇测量误差引起的*i*时刻雷达方位、俯仰测角误差; $\Delta K_{ci}$ 、 $\Delta \psi_{ci}$ 及 $\Delta \theta_{ci}$ 分别为 *i*时刻的航向、纵摇及横摇测量误差; $A_i$ 和 $E_i$ 分别为 *i*时刻的雷达实测甲板方位角与俯仰角。

由式(1)可知,航向误差相当于引入了一个方 •517• 位零位,纵、横摇误差相当于大盘不水平。星敏感器 具有极高的船摇测量精度,因此若能获取星敏感器 A 测量数据, 可减小船摇测量误差对标校结果的 影响。

# 3.2 天线座垂向变形对雷达测角精度的影响

采用分布式船体姿态测量方案时,船载雷达处 的水平方向船体变形可以忽略,天线座垂向变形对 雷达测角精度的影响可以由式(2)推导得到<sup>[10]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \cos A_{bi} \cos E_{bi} \\ \sin E_{bi} \\ \sin A_{bi} \cos E_{bi} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} \cos A_i \cos E_i \\ \sin E_i \\ \sin A_i \cos E_i \end{bmatrix}_{\circ}$$
(2)

式中,A<sub>h</sub>、E<sub>h</sub>为经变形修正后的雷达实测甲板方位 角和俯仰角:B 为变形转换矩阵:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{R}_{y}(K_{bni})\boldsymbol{R}_{z}(-\boldsymbol{\psi}_{bni})\boldsymbol{R}_{x}(-\boldsymbol{\theta}_{bni}), \qquad (3)$$

式中, $R_{x}(\delta)$ , $R_{x}(\delta)$ 及 $R_{z}(\delta)$ 分别表示 Y-Z 平面绕 X  $轴_X - Z$ 平面绕 Y 轴及 X-Y 平面绕 Z 轴逆时针旋转 δ角后所形成的单位转换矩阵; $K_{\mu\nu}$ 、 $\psi_{\mu\nu}$ 及  $\theta_{\mu\nu}$ 分别 为*i*时刻的等效艏挠角、纵挠角和横扭角,它与*i*时 刻的实测艏挠角  $K_{\mu}$ 、纵挠角  $\psi_{\mu}$  及横扭角  $\theta_{\mu}$ 存在如 下关系:

$$K_{bni} = -K_{bi}, \psi_{bni} = \psi_{bi}, \theta_{bni} = \theta_{bi} \circ$$
(4)

假设无变形时的方位角、俯仰角分别为 Am 和  $E_{b0i}$ ,显然 $A_{b0i} = A_i \ E_{b0i} = E_i \circ$ 由式(2)得

$$\tan(A_{b0i} + \Delta A_i) = C/D_{\circ}$$
(5)

式中.C、D分别为

$$C = \cos A_i \cos E_i \sin K_{bni} \cos \psi_{bni} + \\ \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \cos \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi} \sin \theta_{nbi}) + \\ + \sin E_i (\cos K_{bni} \sin \theta_{nbi} - \sin K_{bni} \sin \theta_{nbi} \sin \theta$$

$$\sin A_i \cos E_i (\cos K_{bni} \cos \theta_{nbi} + \sin K_{bni} \sin \psi_{bni} \sin \theta_{nbi})$$

 $D = \cos A_i \cos E_i \cos K_{bni} \cos \psi_{bni} -$ 

$$sinE_{i}(sinK_{bni}sin\theta_{bni}+cosK_{bni}sin\psi_{bni}cos\theta_{bni}) - sinA_{i}cosE_{i}(sinK_{bni}cos\theta_{bni}-cosK_{bn}sin\psi_{bni}sin\theta_{bni}), \\ 由于变形角为小角度量,则有$$

$$\begin{cases} \sin K_{bni} \approx K_{bni}, \sin \psi_{bni} \approx \psi_{bni}, \sin \theta_{bni} \approx \theta_{bni} \\ \cos K_{bni} = \cos \psi_{bni} = \cos \theta_{bni} \approx 1 \end{cases}$$

根据式(5),并忽略二阶以上小量,可得

$$\Delta A_{i} = \frac{K_{bni} + \theta_{bni} \cos A_{i} \tan E_{i} + \psi_{bni} \sin A_{i} \tan E_{i}}{1 - \psi_{bni} \cos A_{i} \tan E_{i} + \theta_{bni} \sin A_{i} \tan E_{i}}$$
(6)

当仰角不是很高时,上式分母项约为1,具体如 图 3~4 所示的仿真曲线。仿真条件:等效艏挠角、 纵挠角及横扭角分别为 200″、100″和 25″,方位角等 于 45°, 俯仰角在 0°~90°变化。







Fig. 4 Calculation error of radar angular error

由图可知:天线座垂向变形对雷达测角精度具 有较大的影响,且随仰角的增加而增大;由忽略分母 项引起的计算误差随仰角的增加而增大。当仰角小 于87°时,由忽略分母项而引起的最大计算误差小 于4.0",相对雷达测角精度,完全可以忽略,因而当 仰角低于 87°时,式(6)可以简化为

 $\Delta A_i = K_{bni} + \psi_{bni} \sin A_i \tan E_i + \theta_{bni} \cos A_i \tan E_i \circ$ (7)将等效变形角转换为船体变形角时,有

$$\Delta A_{i} = -K_{bi} + \psi_{bi} \sin A_{i} \tan E_{i} + \theta_{bi} \cos A_{i} \tan E_{i} \circ \quad (8)$$
同理,根据式(2)可得

 $\sin(E_{b0i} + \Delta E_i) = \cos A_i \cos E_i \sin \psi_{bni} + \sin E_i \cos \psi_{bni} \cos \theta_{bni} -$ 

$$inA_i cosE_i cos\psi_{bni} sin\theta_{bni}$$
 (9)

忽略相关小角度量并写成船体变形角的形式为

$$\Delta E_i = \psi_{bi} \cos A_i - \theta_{bi} \sin A_i \, \circ \tag{10}$$

由此,由天线座垂向变形所引起的船载雷达角 度误差如下所示,

$$\begin{cases} \Delta A_i = -K_{bi} + \psi_{bi} \sin A_i \tan E_i + \theta_{bi} \cos A_i \tan E_i \\ \Delta E_i = \psi_{bi} \cos A_i - \theta_{bi} \sin A_i \end{cases}$$
(11)

目前,天线座垂向变形缺乏有效的测量手段,因 此该项误差始终存在,且无法修正。

(16)

#### 4 船载雷达轴系误差分离模型

### 4.1 联合测星时的轴系误差分离模型

此模型适用于标校经纬仪、标校电视及星敏感 器联合测星。假设船载雷达采用标校电视跟踪测量 恒星目标,星敏感器 B 同步测星,从而获得星敏感 器精确地平指向。

不考虑船体姿态引起的误差时,船载雷达轴系 误差分离模型为

$$\begin{cases} \Delta A_i = \Delta A_0 + \beta_m \sin(A_i - A_m) \tan E_i + \\ \delta_m \tan E_i + (S_b + \Delta A_{BTV} + \Delta A_{TVi}) \sec E_i \circ (12) \\ \Delta E_i = \Delta E_0 + \Delta E_{BTV} + \Delta E_{TVi} + \beta_m \cos(A_i - A_m) \end{cases}$$

式中, $\Delta A_0$ 、 $\Delta E_0$ 分别为雷达甲板方位角零位和俯仰 角零位:β\_、A\_分别为雷达大盘不水平最大倾斜量 和最大倾斜方向; $\delta_m$ 为横轴差; $S_b$ 为标校电视光机 偏差; $\Delta A_{\rm BTV}$ 、 $\Delta E_{\rm BTV}$ 是星敏感器 B 与标校电视间的方 位、俯仰光轴不平行度; $\Delta A_{TVi}$ 、 $\Delta E_{TVi}$ 分别是 *i* 时刻的 标校电视方位、俯仰脱靶量。

令  $X = \beta_m \sin A_m , Y = \beta_m \cos A_m , 且考虑船体姿态对$ 雷达测角精度的影响时,雷达测角误差为

$$\begin{cases} \Delta A_{i} = (\Delta A_{0} + \Delta K_{ci} - K_{bi}) + (\Delta \psi_{ci} + \psi_{bi} + Y) \sin A_{i} \tan E_{i} + \\ (\Delta \theta_{ci} - X + \theta_{bi}) \cos A_{i} \tan E_{i} + \\ \delta_{m} \tan E_{i} + (S_{b} + \Delta A_{BTV} + \Delta A_{TVi}) \sec E_{i} & \circ \\ \Delta E_{i} = (\Delta E_{0} + \Delta E_{BTV} + \Delta E_{TVi}) + (X - \Delta \theta_{ci} - \theta_{bi}) \sin A_{i} + \\ (Y + \Delta \psi_{ci} + \psi_{bi}) \cos A_{i} \end{cases}$$
(13)

由此可知,当船载雷达坐标变换时,测角误差不 仅与船载雷达自身测角误差有关,还与船体姿态等 有关。此时利用该模型进行动态标校时,只能得到 包含相关误差源的等效轴系误差(下同)。

## 4.2 跟踪目标时的轴系误差分离模型

#### 4.2.1 目标与恒星光学均可见

假设船载雷达采用电跟踪方式跟踪目标,且目 标与恒星均光学可见,星敏感器 B 跟踪目标的同时 测量恒星,从而给出星敏感器 B 的精确地平指向。

不考虑船体姿态引起的误差时 船载雷达轴系 误差分离模型为

$$\begin{cases} \Delta A_{i} = \Delta A_{0} + X \sin A_{i} \operatorname{tg} E_{i} + Y \cos A_{i} \operatorname{tg} E_{i} + \\ (S_{b} + C_{s} + \Delta U_{Ai} / C_{A}) \operatorname{sec} E_{i} + \delta_{m} \times \operatorname{tg} E_{i} \\ \Delta E_{i} = (\Delta E_{0} + C_{e} + \Delta U_{Ei} / C_{E}) + \\ Y \cos A_{i} + X \sin A_{i} + \Delta E_{w} \cos E_{i} \end{cases}$$
(14)

 $Y \cos A_i + X \sin A_i + \Delta E_{\alpha} \cos E_i$ 

式中, $C_s$ 、 $C_e$ 分别为方位、俯仰光电偏差; $\Delta U_{Ai}$ 、 $\Delta U_{Ei}$ 分 别为*i*时刻的方位、俯仰误差电压;*C*<sub>4</sub>、*C*<sub>E</sub>分别为方 位、俯仰支路定向灵敏度; $\Delta E_{a}$ 为设备重力下垂误差。

同理.考虑船体姿态对雷达测角误差影响时的

误差分离模型为

$$\begin{cases} \Delta A_{i} = (\Delta A_{0} + \Delta K_{ci} - K_{bi}) + (Y + \psi_{bi} + \Delta \psi_{ci}) \sin A_{i} \operatorname{tg} E_{i} + \\ (X + \Delta \theta_{ci} + \theta_{bi}) \cos A_{i} \operatorname{tg} E_{i} + \\ (S_{b} + C_{s} + \Delta U_{A} / C_{A}) \sec E_{i} + \delta_{m} \times \operatorname{tg} E_{i} \end{cases} \\ \Delta E_{i} = (\Delta E_{0} + C_{e} + \Delta U_{E} / C_{E}) + \\ (Y + \Delta \psi_{ci} + \psi_{bi}) \cos A_{i} + \\ (X - \Delta \theta_{ci} - \theta_{bi}) \sin A_{i} + \Delta E_{g} \cos E_{i} \end{cases}$$

$$(15)$$

定向灵敏度参数难以精确标定,因此标校时船 载雷达尽量采用电跟踪方式,以减小误差电压对雷 达测角精度的影响。

### 4.2.2 目标光学不可见,恒星光学可见

当目标光学不可见、恒星光学可见时,此时相当 于星敏感器自主测星,可以标定与电轴无关的轴系 误差,具体模型如下:

$$\begin{cases} \Delta A_{i} = (\Delta A_{0} + \Delta K_{ci} - K_{bi}) + (\Delta \psi_{ci} + \psi_{bi} + Y) \sin A_{i} \tan E_{i} + (\Delta \theta_{ci} - X + \theta_{bi}) \cos A_{i} \tan E_{i} + \delta_{m} \tan E_{i} + S_{b} \sec E_{i} \\ \Delta E_{i} = \Delta E_{0} + (X - \Delta \theta_{ci} - \theta_{bi}) \sin A_{i} + (Y + \Delta \psi_{ci} + \psi_{bi}) \cos A_{i} \end{cases}$$

#### 试验结果分析 5

为验证误差分离模型的准确性,在某船载雷达上 进行了海上联合测星试验,试验时,船载雷达标校电 视采用电视跟踪方式观测恒星,星敏感器进行同步测 星,由此解算船载雷达标校电视光轴相对星敏感器光 轴的地平指向残差与轴系误差。图 5~6 是某次联合 测星试验时,船载脉冲雷达与星敏感器 B 地平指向测 量结果。本次试验中,由于星敏感器A有效测星数据 较少,因而使用捷联惯导船摇测量数据。本次试验 中,标校电视共测到了25组有效恒星数据。





由图 5 可知, 雷达与星敏感器 B 的地平指向一 致性较好。雷达相对星敏感器 B 地平指向残差如 图 6 所示。



图 6 轴系误差修正前船载雷达角度残差 Fig. 6 Residual error of ship-borne radar before correction

由图 6 可知, 雷达方位角残差随仰角的变化而 起伏, 俯仰角残差受雷达仰角的影响相对较小, 这是 受天线座垂向变形、等效大盘不水平及等效光机偏 差等的共同影响造成的。雷达相对星敏感器 B 地 平方 位、俯 仰 系 统 残 差 分 别 为 0.034 136°和 0.350 680°, 随 机 残 差 分 别 为 0.034 136°和 0.012 664°。

根据式(13)所示的雷达轴系误差模型,分别利 用最小二乘算法与递推最小二乘算法,进行误差分 离,具体结果如表1所示。

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			
等效轴系 误差	最小 二乘	递推最 小二乘	坞内标 校成果
方位零位/(")	1998.10	1997.86	2093.93
最大倾斜 方向/(°)	0.089 513	0.089 514	217.342 413 9
最大倾斜量/(")	32.84	32.85	55.53
光机偏差/(")	840.08	840.39	-25.82
横轴差/(")	-82.13	-82.33	
俯仰零位/(")	1262.58	1262.58	1047.67

利用该成果对随后进行的测星试验结果进行了 试修正,修正结果如图7所示。



图 7 轴系误差修正后船载雷达角度残差 Fig. 7 Residual error of ship-borne radar after correction

由表1及图7可知:修正后的船载雷达相对星 敏感器方位、俯仰系统残差分别为3"和9",随机残 差分别为40"和45",说明标校成果是可信的;两种 算法的解算结果一致性很好,但与坞内标校成果存 在较大的差异,这主要是由于船摇测量误差和天线 座垂向变形等引起的。

虽然动态误差分离结果与坞内标校成果不具有可比性,但其结果仍具有重要的使用价值,使用该参数进行轴系误差修正,不仅可以消除传统意义上的轴系误差对船载雷达测量结果的影响,还可消除船体姿态等对船载雷达外测精度的影响。

## 6 结束语

不同于基于标校电视的船载雷达动态标校,星 敏感器可以提供一个不依赖于雷达编码器的、独立 的高精度雷达角度测量基准。在气象条件较好的条 件下,甚至可以跟踪测量中低轨空间目标,因而标校 方法灵活多样,同时可以消除船体姿态对雷达测角 精度的影响,因而具有广阔的应用前景。但由于船 体姿态特别是垂直方向的天线座变形对雷达测角精 度的影响难以消除,该法难以实现传统意义上的坞 内标校项目的标定。后续工作的重点是在现有研究 的基础上,如何进一步分离船载雷达自身的轴系 误差。

## 参考文献:

- [1] 钟德安,崔庆华,张同双,等. 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 Dean, CUI Qinghua, ZHANG Tongshuang, et al. Technology of Calibration and Flight Test for TT&C Ship's Measuring - communicating Equipment [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2009. (in Chinese)
- [2] 金胜,邓颖丽,朱天林. 脉冲雷达卫星标定方法研究

[J]. 飞行器测控学报,2005,24(4):66-70.

JIN Sheng, DENG Yingli, ZHU Tianlin. Study on Satellite Calibration Method for Pulse Instrumentation Radar [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2005, 24(4):66 -70. (in Chinese).

- [3] 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.
  HUANG Jiagui,YANG Xiao. Implement of Pulse Radar's Calibration by Measuring Optical Tracking Satellites[J]. Systems Engineering and Electronics,2007,29(10):1600
- -1602. (in Chinese)
  [4] 钟霞,张建伟,于灏. 基于最小二乘估计的雷达系统误差 卫星标定方法[J].空间科学学报,2013,35(5):554-560.
  ZHONG Xia,ZHANG Jianwei,YU Hao. A Method of Satellite Calibration for Radar's System Error Based on Least -square Estimation[J]. Chinese Journal of Space Science,2013,35(5):554-560. (in Chinese)
- [5] 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):29-32.
  SUN Xiaochang, HUANGFU Kan. Precision calibration of moving platform based radar with stars as reference marks
  [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23 (3): 29 - 32. (in Chinese)
- [6] 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):949-952.

KANG Deyong, FU Minhui, ZHAO Wenhua, et al. Dynamic Calibration for Shaft Parameters of Ship-borne Radiometer Equipment Based on Star Observation [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(7):949-952. (in Chinese)

[7] 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 Dean, ZHANG Tongshuang, FENG Hongkui, et al. Calculation Method of Error-correction Parameters for Shipborne Radar Based on Star Sensors[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8):1077-1081. (in Chinese)

- [8] 刘冰,朱伟康,张同双,等. 基于双星敏感器的船体姿态确定[J]. 光学精密工程,2014,22(3):570-575.
  LIU Bing, ZHU Weikang, ZHANG Tongshuang, et al. Ship Attitude determination based on dual star sensors
  [J]. Optics and Precision Engineering,2014,22(3):570-575. (in Chinese)
- [9] 张同双,钟德安,潘良,等. 船用星敏感器姿态测量误差模型研究[J]. 电讯技术,2014,54(2):218-223.
  ZHANG Tongshuang, ZHONG Dean, PAN Liang, et al. Research on Attitude Error Model of Ship-borne Star Sensor[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(2): 218-223. (in Chinese)

[10] 刘利生,吴斌,吴正容,等.外弹道测量数据处

理[M].北京:国防工业出版社,2002.

LIU Lisheng, WU Bin, WU Zhengrong, et al. Post-flight data processing of trajectorymeasurement [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

# 作者简介:



**张同双**(1968—),男,江苏泗阳人,1993 年于重庆大学获学士学位,2006年于中国科 学技术大学获硕士学位,现为高级工程师,主 要研究方向为船姿船位测量技术;

ZHANG Tongshuang was born in Siyang, Jiangsu Province, in 1968. He received the B. S degree from Chongqing University and the M. S.

degree from University of Science Technology of China in 1993 and 2006, respectively. He is now a senior engineer. His research concerns attitude and position determination technique for TT&C ship's measuring equipment.

Email:zts\_123@163.com

**钟德安**(1964—),男,江苏江阴人,1990年于东南大学 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 Dean was born in Jiangyin, Jiangsu Province, in 1964. He received the M. S. degree from Southeast University in 1990. He is now a senior engineer of professor. His research concerns calibration techniques for TT&C ship's measuring equipment.

Email:zda1014@126.com

**潘**良(1967—),男,浙江苍南人,1988年于浙江大学 获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为船姿船位测 量技术;

PAN Liang was born in Cangnan, Zhejiang Province, in 1967. He received the B. S. degree from Zhejiang University in 1988. He is now a senior engineer. His research concerns attitude and position determination technique for TT&C ship's measuring equipment.

Email: qianyan99@126. com

**焦宏伟**(1982—),男,吉林梨树人,2012年于国防科技 大学获博士学位,主要研究方向为船姿船位测量技术;

JIAO Hongwei was born in Lishu, Jilin Province, in 1982. He received the Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2012. His research concerns attitude and position determination technique for TT&C ship's measuring equipment.

Email: jhw23@ aliyun. com

**王二建**(1982—),男,江苏淮安人,2006年于装甲兵工程学院获硕士学位,现为工程师,主要从事航天测控技术研究。

WANG Erjian was born in Huai'an, Jiangsu Province, in 1982. He received the M. S. degree from Armored Force Engineering Institute in 2006. He is now an engineer. His research concerns spacecraft tracking and control technology.

Email:hk\_zgy@126.com