

doi: 10.7690/bgzdh.2016.05.014

## 舰艇姿态对作战系统动态对准精度的影响分析

周志恒<sup>1,2</sup>, 赵建军<sup>1</sup>, 桑德一<sup>1</sup>, 杨利斌<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001;

2. 中国人民解放军 92840 部队, 山东 青岛 266405)

**摘要:** 为提高舰艇作战系统动态对准精度, 笔者以舰载三坐标雷达为例, 研究了舰艇姿态对作战系统动态对准精度的影响。建立了作战系统对准的坐标系, 推导了其中主要的坐标转换, 计算了舰艇姿态引起的传感器测量误差, 分析了舰艇摇摆对动态对准精度的影响, 并进行仿真实验。仿真结果表明: 舰艇艏摇角造成了传感器测量的方位角误差, 舰艇的纵摇角、横摇角造成了传感器测量的方位角和俯仰角误差, 但舰艇姿态对传感器的距离测量影响较小。需要在后续的动态对准数据处理过程中对误差进行修正, 从而满足舰艇作战系统动态对准的要求。

**关键词:** 作战系统; 动态对准; 舰艇姿态; 坐标转换; 误差分析

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Analysis of Effects on Alignment in Dynamic State Precision of Warship Combat System Caused by Its Attitude

Zhou Zhiheng<sup>1,2</sup>, Zhao Jianjun<sup>1</sup>, Sang Deyi<sup>1</sup>, Yang Libin<sup>1</sup>

(1. Department of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001 China;

2. No. 92840 Unit of PLA, Qingdao 266405, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of warship combat system alignment in dynamic state, the author has taken shipborne 3D radar as an example to study the effects on alignment in dynamic state of warship combat system caused by its attitude. A coordinate system aligned combat system was established in this paper, the mainly coordinate conversion were derived, sensor measurement errors caused by warship's attitude were calculated and simulated by computer. Simulation results show that: the warship's heading angle causes the azimuth angle error of sensor measurements, the warship's pitch angle, roll angle cause the angle azimuth and elevation angle error of sensor measurements, and there is almost no influence on sensor distance measurement caused by warship's attitude. Error correction is need in the subsequent data processing of dynamic alignment to meet the requirements of warship combat system alignment in dynamic state.

**Keywords:** combat system; alignment in dynamic state; warship attitude; coordinate conversion; error analysis

### 0 引言

舰艇作战系统对准是将全舰探测器、跟踪器、武器系统、导航等系统(设备)的机械零位和电气零位在甲板坐标系内取齐, 使机械零位和电气零位统一于一个基准, 以保证作战系统零位的一致性<sup>[1]</sup>, 即保证作战系统中各传感器对同一目标的距离、方位角/舷角、俯仰角的认定相一致<sup>[2]</sup>。舰艇作战系统对准是确保战斗舰艇充分发挥作战效能、保证武器命中概率的关键性工作<sup>[1]</sup>, 对作战系统的精度和战技指标起着基础和决定性作用; 因此, 作战系统对准精度要求很高。

考虑舰艇在码头系泊或者海上锚泊的动态环境, 传感器在对准过程中需要对海上标定物的方位角、俯仰角和距离进行测量, 舰艇的姿态变化必然会导致各传感器对海上标定物测量数据产生偏差,

从而对作战系统的对准精度产生影响; 因此, 研究舰艇姿态对作战系统动态对准精度的影响, 本质上就是研究舰艇姿态对传感器测量精度的影响。目前, 对于静态对准, 已经有了许多研究成果, 并在实际工作中得到了很好的应用<sup>[3-4]</sup>; 但是对于动态条件下的舰艇作战系统对准方法和技术的研究很少, 几乎处于空白状态<sup>[5]</sup>。究其原因, 就是在动态条件下, 影响传感器测量精度的因素众多, 无法定量分析舰艇姿态变化、甲板变形等对传感器测量结果的影响。崔琦等<sup>[5]</sup>、马曦等<sup>[6]</sup>做了一些尝试, 但都是以静态对准方法为基础的改进, 没有充分考虑舰艇摇摆对传感器测量精度的影响, 且以人工的瞬时读数来代替动态条件下的传感器测量数据读数, 是一种伪动态对准。文献[7-10]研究了载体摇摆对舰载雷达测量精度的影响, 但都未能理解卡尔丹环架结构下平台罗经航向角、纵摇角和横摇角的实际物理意义,

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-03-02

作者简介: 周志恒(1981—), 男, 江苏人, 在读博士, 从事武器系统与应用工程、武器系统标校研究。

其坐标转换推导过程与实际不符。雷达的角度(方位角、俯仰角)对准和距离对准是舰艇作战系统对准的一项主要内容<sup>[1]</sup>。为方便描述,笔者以舰载三坐标雷达为例,研究了舰艇姿态对作战系统动态对准精度的影响。

### 1 常用坐标系和坐标转换

舰艇作战系统中各传感器在舰艇上所处位置不同,对目标的测量元素不同,所基于的坐标系也是不一样的。在对准过程中,需要将各传感器的测量数据及真值获取设备获取的约定真值统一转换到舰艇甲板坐标系中,其数据处理所涉及的坐标系主要包括世界大地坐标系、地心地固坐标系、舰艇地理坐标系、舰艇甲板坐标系、传感器测量坐标系、传感器极坐标系和传感器舷角坐标系,它们的转换关系如图 1 所示。

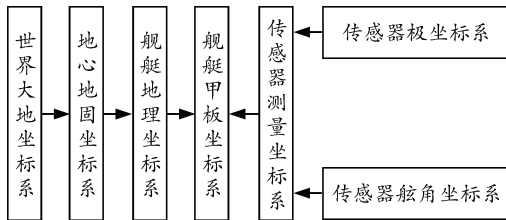


图 1 坐标系及之间的转换关系

#### 1.1 常用坐标系

##### 1.1.1 地心地固坐标系(ECEF)

ECEF 的原点  $O_e$  位于地球质量中心,  $X_e$  轴指向赤道面与本初子午线交点,  $Z_e$  轴与参考椭球体旋转轴重合,指向地球北极,  $Y_e$  轴在赤道面内且与  $X_e$  轴和  $Z_e$  轴构成右手直角坐标系。坐标系中点的坐标用  $(x_e, y_e, z_e)$  表示。

##### 1.1.2 舰艇地理坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$

舰艇地理坐标系的原点  $O_1$  位于舰艇摇摆中心,  $X_1$  轴平行于当地水平面指向正东,  $Y_1$  轴平行当地水平面指向正北,  $Z_1$  轴垂直于水平面向上,  $X_1$ 、 $Y_1$  和  $Z_1$  组成右手坐标系。舰艇地理坐标系是以舰艇摇摆中心为原点的直角坐标系,坐标系中点的坐标用  $(x_1, y_1, z_1)$  表示。

##### 1.1.3 舰艇甲板坐标系 $O_d-X_dY_dZ_d$

舰艇甲板坐标系又称为舰艇不稳定坐标系,其原点  $O_d$  位于舰艇摇摆中心,  $Y_d$  轴平行于舰艇艏艉线,指向舰艏为正,  $X_d$  轴垂直  $Y_d$  轴且平行于甲板,

指向右舷为正,  $Z_d$  轴垂直甲板向上,坐标系中点的坐标用  $(x_d, y_d, z_d)$  表示。

### 1.2 舰艇姿态角定义

舰艇的姿态由舰艇的导航设备(如平台罗经等)提供,包括舰艇的航向、纵摇和横摇。平台罗经采用卡尔丹环架结构,其航向角、纵摇角和横摇角示意图如图 2 所示。 $O$  为舰艇摇摆中心,  $BCDEFNG$  为水平面,  $MHJKL$  为甲板平面,纵轴  $JL$  为舰船艏艉线,  $A$  为天顶。 $OE$  指向正东为  $X_1$  轴,  $ON$  指向正北为  $Y_1$  轴,  $OA$  指向天顶为  $Z_1$  轴,  $OE$ 、 $ON$  和  $OA$  构成  $O-X_1Y_1Z_1$  舰艇地理坐标系。横轴  $OH$  指向右舷为  $X_d$  轴,纵轴  $OJ$  指向舰艏为  $Y_d$  轴,  $OS$  垂直于  $OH$  和  $OJ$  为  $Z_d$  轴,  $OH$ 、 $OJ$  和  $OS$  构成  $O-X_dY_dZ_d$  舰艇甲板坐标系。

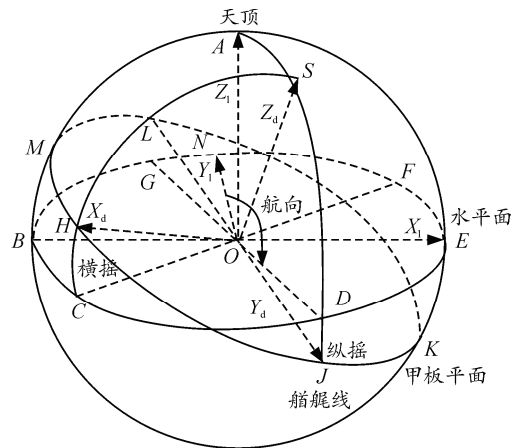


图 2 单位球体内舰艇姿态角示意图

航向角  $C_w$  表示从正北顺时针旋转到本舰艏艉方向的角度,在水平面内测量,图 2 中  $ON$  与  $OD$  ( $OJ$  在水平面的投影)之间的夹角为航向角,顺时针为正。纵摇角  $\psi$  表示甲板平面绕横轴 ( $OH$ ) 旋转的角度,即舰艇艏艉线与水平面之间的夹角,在铅垂面内测量,弧  $DJ$  为纵摇角,舰艏在水平面上为正。横摇角  $\theta$  为甲板平面绕舰艇艏艉线旋转的角度,即舰艇横剖面和水平面的交线 ( $OC$ ) 与舰艇横轴 ( $OH$ ) 之间的夹角,测量平面垂直于甲板平面且垂直于艏艉线。弧  $HC$  为横摇角,右舷下倾为正。

### 1.3 主要的坐标转换

#### 1.3.1 地心地固坐标系转换到地理坐标系

对于空间中的任意一点,在知道舰艇地理坐标系的原点坐标  $(x_{e_0}, y_{e_0}, z_{e_0})$  及其大地经纬度  $(l_0, b_0)$  的情况下,只需要先将 ECEF 的原点平移到舰艇地理

坐标系的原点位置，再进行 3 次坐标轴旋转变换：首先绕 ECEF 的  $Z_e$  轴旋转  $(180+l_0)^\circ$ ；然后再将得到的坐标系绕  $Y_e$  轴旋转  $(270+b_0)^\circ$ ；最后将得到的坐标系绕  $X_e$  旋转  $180^\circ$ 。

则根据 Bursa-Wolf 坐标系转换模型，可得

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{el} \cdot \begin{bmatrix} x_e - x_{e_0} \\ y_e - y_{e_0} \\ z_e - z_{e_0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{T}_{el} = \mathbf{R}_x(180^\circ) \mathbf{R}_y(B+270^\circ) \mathbf{R}_z(L+180^\circ) = \begin{bmatrix} -\sin b_0 \cos l_0 & -\sin b_0 \sin l_0 & \cos b_0 \\ -\sin l_0 & \cos l_0 & 0 \\ -\cos b_0 \cos l_0 & -\cos b_0 \sin l_0 & -\sin b_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.3.2 舰艇地理坐标系转换到甲板坐标系

舰艇地理坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$  和舰艇甲板坐标系  $O_d-X_dY_dZ_d$  的原点都位于舰艇摇摆中心，从舰艇地理坐标系转换到甲板坐标系只需要进行角度的旋转。引起角度旋转的原因是舰艇姿态的变化，即舰艇的航向变化、纵摇和横摇。由于舰船平台罗经采用卡尔丹环架结构，由图 3 可知：从舰艇地理坐标系到舰艇甲板坐标系的坐标变换必须按先航向、再纵摇最后横摇的变换顺序进行<sup>[11]</sup>。即舰艇地理坐标系  $O-X_1Y_1Z_1$  经由航向变换（变换矩阵  $\mathbf{R}_z(C_w)$ ）—绕  $OZ_1$  轴旋转航向角  $C_w$  为  $O-X_hY_hZ_h$ ，再由纵摇变换（变换矩阵  $\mathbf{R}_x(\psi)$ ）—绕  $OX_h$  轴旋转纵摇角  $\psi$  为

$$\mathbf{T}_{ld} = \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\psi) \mathbf{R}_z(C_w) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi \sin C_w & -\cos \theta \sin \psi \sin C_w & \sin \theta \cos \psi & -\sin \theta \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi \sin C_w & \cos \theta \cos \psi \sin C_w & \sin \theta \sin \psi & \sin \theta \cos \psi \\ \sin \theta \cos C_w & -\sin \theta \sin C_w & \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 2 舰艇摇摆对动态对准精度的影响分析

设舰艇处于码头系泊或者海上锚泊的情况下，则舰艇在海风、海浪的作用下处于自然摇摆状态。

### 2.1 距离误差

如图 4 所示，设雷达天线中心位于  $A_1$  点，雷达测得的目标距离为  $R_1$ ；当舰艇的偏航角、纵摇角和横摇角分别为  $C_w$ 、 $\psi$  和  $\theta$  时，雷达天线中心位于  $A_2$  点，雷达测量的目标距离为  $R_2$ ，雷达天线中心产生的位移为  $d$ 。

$OX_hY_dZ'$ ，最后由横摇变换（变换矩阵  $\mathbf{R}_y(\theta)$ ）—绕  $OY_d$  轴旋转横摇角  $\theta$  为甲板坐标系  $O_d-X_dY_dZ_d$ <sup>[12]</sup>。

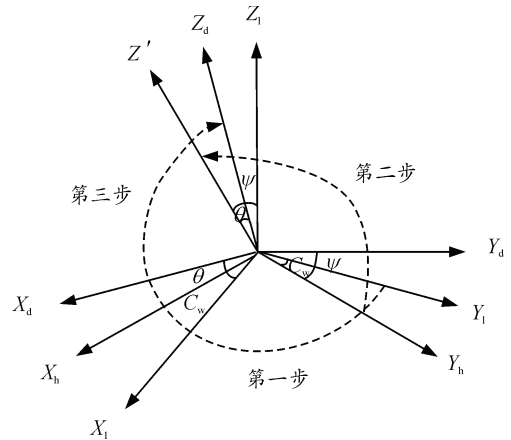


图 3 从舰艇地理坐标系到甲板坐标系的转换

其中航向变换矩阵

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos C_w & -\sin C_w & 0 \\ \sin C_w & \cos C_w & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

纵摇变换矩阵

$$\mathbf{R}_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

横摇变换矩阵

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此，从舰艇地理坐标系到甲板坐标系的旋转矩阵

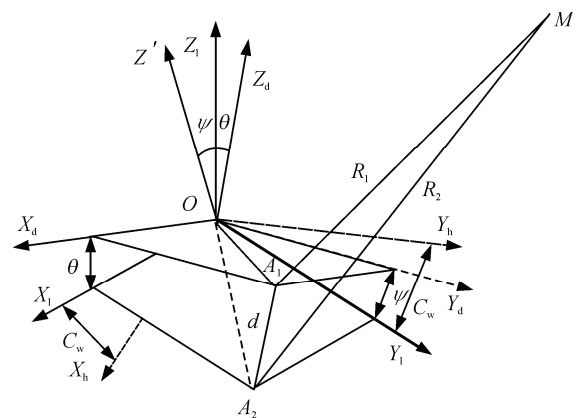


图 4 舰艇姿态对雷达测量距离的示意图



$$\Delta A \approx \varphi \cdot \tan E \cdot \sin(A - A_m) = \arccos(\cos \theta \cos \psi) \cdot \tan E \cdot \sin(A + \arctan(\sin \theta \cot \psi)). \quad (19)$$

### 3 仿真分析

当舰艇处于码头系泊或海上锚泊状态时，进行对准工作一般要选取风平浪静时进行，舰艇自然摇摆，纵摇和横摇均应不大于 0.5°，载荷状况应不低于正常排水量的 90%，无人旋翼直升机搭载龙伯球反射体作为海上标定物距离舰艇约 10 km。

为研究舰艇姿态变化对雷达测量结果的影响，对舰艇单独存在艏摇、纵摇和横摇时的情形进行了仿真，仿真结果如图 6~图 8 所示。

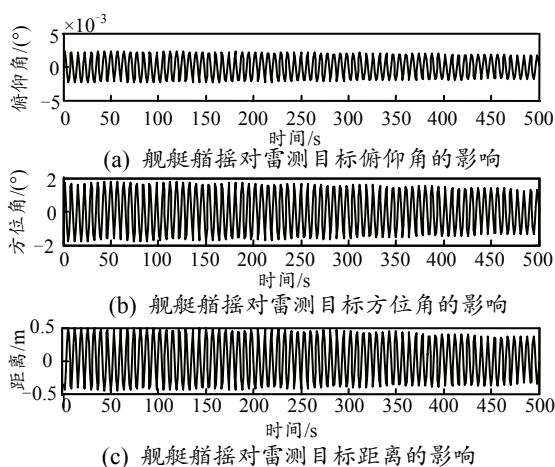


图 6 舰艇艏摇对雷测结果的影响

由图 6 可知：舰艇艏摇角对位置信息中的距离造成了约 2 m 的误差，对方位角造成了约 1° 的误差，且方位角误差与舰艇艏摇角成线性关系，而对俯仰角基本无影响。

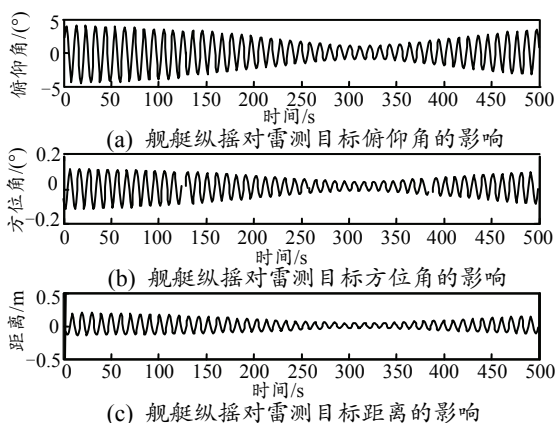


图 7 舰艇纵摇摇对雷测结果的影响

由图 7 可知：舰艇纵摇角对位置信息中的距离造成了约 2 m 的误差，对俯仰角造成了约 1° 的误差，且俯仰角误差与舰艇纵摇角呈线性关系，而对方位

角基本无影响。

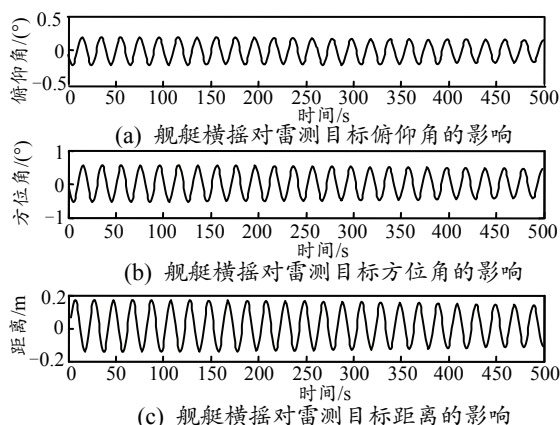


图 8 舰艇横摇对雷测结果的影响

由图 8 可知：舰艇横摇角造成的距离误差约为 0.5 m，俯仰角误差和方位角误差分别为 0.2°。

最后，综合考虑舰艇的艏摇角、纵摇角和横摇角，仿真计算舰艇姿态对雷达测量结果的影响，仿真结果如图 9 所示。通过与基准测量设备测得的约定真值比对可知，舰艇姿态的变化对距离、俯仰角和方位角造成了约 5 m，1.5° 和 1° 的误差。

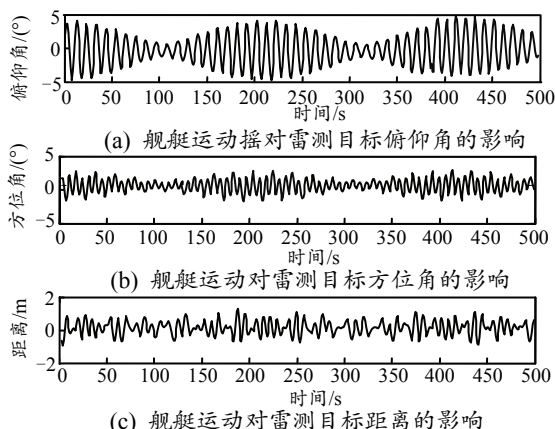


图 9 舰艇姿态对雷测结果的影响

### 4 结束语

笔者建立了作战系统对准的坐标系，推导了其中主要的坐标转换，对舰艇姿态引起的传感器测量误差进行了计算及仿真。根据上面的仿真结果及分析，可以得出以下结论：舰艇艏摇角造成了传感器测量的方位角误差，舰艇的纵摇角、横摇角造成了传感器测量的方位角、俯仰角误差，而舰艇姿态对传感器的距离测量影响较小；因此，在后续的动态对准数据处理过程中，需要对舰艇姿态造成的传感器测量误差进行修正，以保证作战系统的对准精度。