

# 海上多平台多传感器数据位置对准方法

王成飞<sup>1</sup>,李文钦<sup>2</sup>,王航宇<sup>1</sup>,石章松<sup>1</sup>

(1.海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033;

2.海军驻南昌地区航空军事代表室,江西 南昌 330024)

**摘要:** 根据不同的装备条件提出了基于高精度导航设备、舷角-距离、近似经纬度及舷角-距离的海上多平台多传感器数据位置对准方法,建立了每一种方法的对准流程,并对各个环节的坐标变换公式进行了推导,通过分析对准方法的适用环境、误差来源、对准精度和优缺点,给出了该系统对准方案。

**关键词:** 海上协同;数据融合;数据对准;坐标变换

中图分类号: TN957

文献标识码: A

## Data alignment methods for multi-platform multi-sensor on the sea

WANG Cheng Fei<sup>1</sup>, LI Wen Qin<sup>2</sup>, WANG Hang Yu<sup>1</sup>, SHI Zhang Song<sup>1</sup>

(1.College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2.Naval Military Representative Office in Nanchang, Nanchang 330024, China)

**Abstract:** To solve data alignment problem of multi-platform multi-sensor on the sea, three data alignment methods were proposed to be applicable for various conditions, based on high-precision navigation equipments, relative bearing and distance, and approximate latitude and longitude together with relative bearing and distance. The aligning flow of each method and coordinate transformation in every aligning step was discussed. The applicabilities, error sources, aligning precision, advantages and shortcomings of methods were analyzed, and the data aligning scheme for multi-platform multi-sensor on the sea was established.

**Key words:** maritime cooperation; data fusion; data alignment; coordinate transformation

协同作战过程中的一项重要内容就是建立准确、统一的敌我态势图。传感器的数据位置对准作为协同作战的一项关键技术,为统一态势图的形成提供了条件。它将分布于不同平台上多个传感器的量测信息坐标变换到全局的统一坐标系中,然后进行传感器误差配准<sup>[1]</sup>和多传感器数据融合<sup>[2]</sup>。

现有对传感器数据位置对准的研究一般都是针对陆基或者空基多传感器系统的,而海上平台需要考虑海面环境和平台装备情况等因素来进行位置对准。参考文献[3]讨论了几种用于海面多传感器数据融合的坐标转换方法,并对各种方法进行了精度分析;参考文献[4]提出了一种基于雷达相对定位的多平台观测数据对准方法,用于解决低导航精度条件下的数据位置对准问题。本文以海上平台协同为背景,根据不同的平台装备情况,讨论3种多平台多传感器数据位置对准方法,给出位置对准的流程和数学模型,并对各种方法的优缺点、

适用性和误差来源进行分析,以适应不同的使用环境,为海上平台完成传感器数据位置对准提供可行的途径。

### 1 坐标系及其相互转换关系

#### 1.1 坐标系描述

海上多平台多传感器数据位置对准所涉及的坐标系主要有<sup>[5]</sup>:

(1)测地坐标系( $B, L, H$ )

与GPS定位系统一样采用WGS-84模型,纬度、经度和海拔高度分别记为 $B$ 、 $L$ 和 $H$ 。

(2)地心坐标系( $X_e, Y_e, Z_e$ )

以地球中心为原点, $X$ 、 $Y$ 轴互相垂直并固定于赤道面上,其中 $X$ 轴由地心向外指向格林威治子午圈与赤道的交点, $Z$ 轴与地球自转轴重合,指向北极, $Y$ 轴和 $Z$ 轴、 $X$ 轴构成右手坐标系。

(3)传感器地理直角坐标系( $x, y, z$ )

也称为真北坐标系。以传感器位置为坐标原点, $z$ 轴

## 技术与方法 Technique and Method

垂直于地球椭球面，向上为正方向， $x$ 轴和 $y$ 轴与当地地球切面平行，分别指向正东和正北。

### (4) 传感器舷角坐标系 $(R, q, \varepsilon)$

以传感器所在位置为坐标原点，斜距离  $R$  为坐标原点与目标的距离，本舰舷角  $q$  为舰艇航向线到斜距离在水平面上投影的角度，范围是  $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ ，俯仰角  $\varepsilon$  为斜距离与水平面的夹角，向上为正。

### 1.2 坐标系转换关系

各坐标系间的相互转换关系如下：

#### (1) 测地坐标系和地心坐标系的相互转换

测地坐标  $(B, L, H)$  到地心坐标  $(X_e, Y_e, Z_e)$  的转换关系为：

$$\begin{cases} X_e = (N+H)\cos\beta\cos L \\ Y_e = (N+H)\cos\beta\sin L \\ Z_e = [N(1-e^2)+H]\sin\beta \end{cases} \quad (1)$$

其中， $N$  为卯酉圆曲率半径， $N = a/\sqrt{1-e^2\sin^2 B}$ ； $a$ 、 $b$ 、 $e$  分别为地球椭球的长半径、短半径和第一偏心率。

地心坐标  $(X_e, Y_e, Z_e)$  到测地坐标  $(B, L, H)$  的转换关系可以由(1)式反解得到，但是纬度值不能由反解公式直接求得，而需要采用迭代法求解。这里采用参考文献[6]给出的近似直接解算公式：

$$\begin{cases} L = \arctan(Y_e/X_e) \\ B = \arctan \frac{Z_e + e'^2 b \sin^3 u}{r - e'^2 a \cos^3 u} \\ H = r \cos B + Z_e \sin B - a \sqrt{1 - e'^2 \sin^2 B} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $u = \arctan \left[ \frac{b Z_e}{a r} (1 + e' \frac{b}{R}) \right]$ ， $r^2 = X_e^2 + Y_e^2$ ， $R^2 = r^2 + Z_e^2$ ； $e'$  为第二偏心率。

#### (2) 地心坐标系和传感器地理直角坐标系的相互转换

地心坐标系到传感器地理直角坐标系的转换矩阵

$T_{ge}$  为：

$$T_{ge} = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ \frac{-\sin B \cos L}{\sqrt{1 - [1 - (b/a)^4] \cos^2 B}} & \frac{-\sin B \sin L}{\sqrt{1 - [1 - (b/a)^4] \cos^2 B}} & \frac{\cos B}{\sqrt{1 + [(a/b)^4 - 1] \sin^2 B}} \\ \frac{\cos B \cos L}{\sqrt{1 + [(a/b)^4 - 1] \sin^2 B}} & \frac{\cos B \sin L}{\sqrt{1 + [(a/b)^4 - 1] \sin^2 B}} & \frac{\sin B}{\sqrt{1 - [1 - (b/a)^4] \cos^2 B}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

而传感器地理直角坐标系到地心坐标系的转换矩阵  $T_{eg}$  即为  $T_{ge}$  的转置：

$$T_{eg} = \begin{bmatrix} -\sin L & \frac{-\sin B \cos L}{\sqrt{1 - [1 - (b/a)^4] \cos^2 B}} & \frac{\cos B \cos L}{\sqrt{1 + [(a/b)^4 - 1] \sin^2 B}} \\ \cos L & \frac{-\sin B \sin L}{\sqrt{1 - [1 - (b/a)^4] \cos^2 B}} & \frac{\cos B \sin L}{\sqrt{1 + [(a/b)^4 - 1] \sin^2 B}} \\ 0 & \frac{\cos B}{\sqrt{1 + [(a/b)^4 - 1] \sin^2 B}} & \frac{\sin B}{\sqrt{1 - [1 - (b/a)^4] \cos^2 B}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 传感器舷角坐标系和地理直角坐标系的相互转换  
传感器舷角坐标  $(R, q, \varepsilon)$  到地理直角坐标  $(x, y, z)$  的转换关系为：

$$\begin{cases} x = R \sin(q + C_w) \cos \varepsilon \\ y = R \cos(q + C_w) \cos \varepsilon \\ z = R \sin \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

其中， $C_w$  为舰艇航向角，即正北方向顺时针旋转到航向线的角度。

反之，地理直角坐标  $(x, y, z)$  到传感器舷角坐标  $(R, q, \varepsilon)$  的转换关系为：

$$\begin{cases} R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \varepsilon = \arcsin(z/R) \\ q = \begin{cases} \arctan(x/y) - C_w & y > 0 \\ \pi + \arctan(x/y) - C_w & y < 0 \\ \pi/2 - C_w & x \geq 0 \text{ and } y = 0 \\ -\pi/2 - C_w & x < 0 \text{ and } y = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

### 2 多平台多传感器数据位置对准

在海上，根据平台的装备情况和数据对准的使用环境，主要有3种多传感器数据位置对准方法，分别是基于高精度导航设备的数据位置对准，基于舷角-距离的数据位置对准以及基于近似经纬度及舷角-距离的数据位置对准。

#### 2.1 基于高精度导航设备的数据位置对准

地心坐标系是进行数据融合的理想统一坐标系，而基于地心坐标系的传感器误差配准算法也是一类很重要的传感器配准算法<sup>[7]</sup>。所以将量测数据直接转换到地心坐标系下进行位置对准，对于后续的数据融合而言，具备较高的统一性和适用性。

基于高精度导航设备的数据位置对准方法(简称方法1)，需要海上平台在具备高精度导航设备(如GPS、双星定位系统等)时使用。其原理如图1所示，利用导航设备输出的平台测地坐标，将该平台上传感器对目标的量测转换到地心坐标系，然后在地心坐标系下进行目标的位置对准。

$$\begin{bmatrix} X_{Te} \\ Y_{Te} \\ Z_{Te} \end{bmatrix} = T_{eg} \begin{bmatrix} x_{TA} \\ y_{TA} \\ z_{TA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{Ae} \\ Y_{Ae} \\ Z_{Ae} \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### (3) 2.2 基于舷角-距离的数据位置对准

方法1的前提是海上平台能够获得精确、实时的导航信息，但这一要求往往很难满足。另一方面，随着雷达技术的不断发展，特别是多功能相控阵雷达的应用，在GPS等高精度导航设备未装备或不能使用的情况下，可以利用平台之间相互测量的舷角-距离信息来进行多传感器数据位置对准。

基于平台间相对位置信息的数据对准在传感器舷角坐标系下完成，因为相对于传感器真北坐标系而言，舷角坐标系不引进平台的航向误差，故坐标转换精度较

技术与方法 Technique and Method

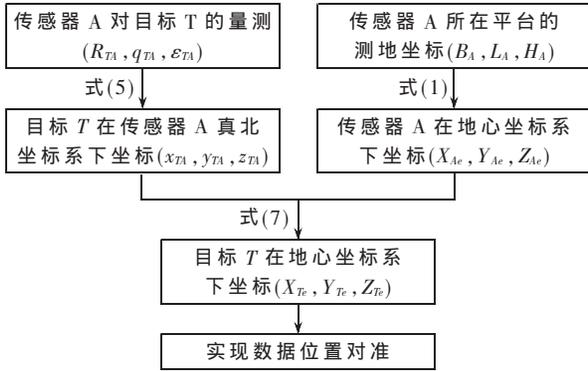


图1 基于高精度导航设备的数据位置对准

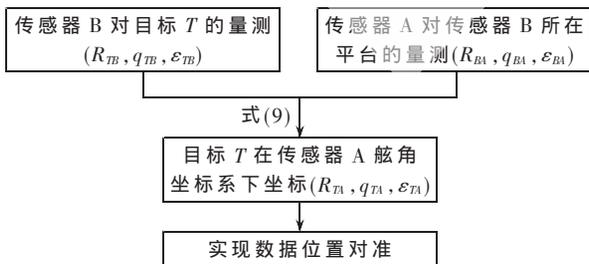
高。且弦角坐标系不依赖平台导航系统, 所以其适用性和独立性也比真北坐标系好。

基于舷角-距离的数据位置对准方法(简称方法2), 适用于可以忽略地球表面曲率影响, 将地表近似看成平面的情况下。原理如图2所示, 利用本平台(传感器A)对其他平台(传感器B)测量的舷角和距离, 将其他平台对目标的量测转换为目标在本平台舷角坐标系下的坐标, 从而进行位置对准。

方法2在实现时有两种坐标变换方式, 一种是直角坐标平移法, 如图2(a)所示; 另一种是三角变换法, 如图2(b)所示。



(a) 直角坐标平移法



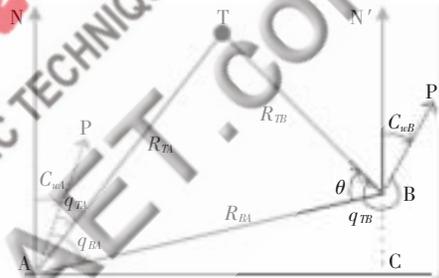
(b) 三角变换法

图2 基于舷角-距离的数据位置对准

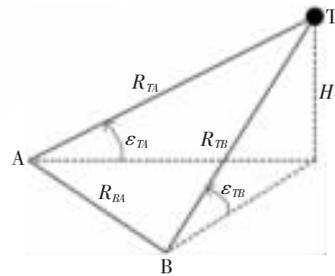
$$\begin{bmatrix} x_{TA} \\ y_{TA} \\ z_{TA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{TB} \\ y_{TB} \\ z_{TB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{BA} \\ y_{BA} \\ z_{BA} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对变换公式进行推导。图3(a)中, AN和BN'分别为传感器A、B的真北方向, A、B所在平台航向角为 $C_{uA}$ 和 $C_{uB}$ 。作辅助线AC, 使AC垂直AN。若忽略地球表面曲率, 则AC与BN'垂直且相交。在三角形ABT中, 根据正弦定理 $R_{TA}/\sin\theta=R_{TB}/\sin\angle TAB$ 以及余弦定理 $R_{TA}^2=R_{BA}^2+R_{TB}^2-2R_{BA}R_{TB}\cos\theta$ , 可以求得传感器A对目标T的量测 $R_{TA}$ 和 $q_{TA}$ 。图3(b)中, 根据关系 $H_T=R_{TB}\sin\varepsilon_{TA}$ 和 $\sin\varepsilon_{TA}=H_T/R_{TA}$ , 可以求得 $\varepsilon_{TA}$ , 则目标T在传感器A舷角坐标系下坐标 $(R_{TA}, q_{TA}, \varepsilon_{TA})$ 可以由式(9)计算得到:

$$\begin{aligned} R_{TA} &= \sqrt{R_{BA}^2 + R_{TB}^2 - 2R_{BA}R_{TB}\cos\theta} \\ q_{TA} &= q_{BA} - \arcsin(R_{TB}\sin\theta/R_{TA}) \\ \varepsilon_{TA} &= \arcsin(R_{TB}\sin\varepsilon_{TB}/R_{TA}) \end{aligned} \quad (9)$$



(a) 求  $R_{TA}$  和  $q_{TA}$



(b) 求  $\varepsilon_{TA}$

图3 三角变换法中传感器A、B和目标T的几何关系图

2.3 基于近似经纬度及舷角-距离的数据位置对准

基于近似经纬度及舷角-距离的数据位置对准方法(简称方法3), 利用本平台低精度导航设备(如罗兰C等)提供的近似经纬度, 以及本平台对其他平台测量的舷角和距离, 得到其他平台的近似经纬度, 以此为基础将其他平台对目标的量测转换到本平台的舷角坐标系下, 从而完成目标的位置对准。图4为方法3的原理示意图。

$$\begin{bmatrix} x_{TA} \\ y_{TA} \\ z_{TA} \end{bmatrix} = T_{ge} \begin{bmatrix} X_{Tc} - X_{Ac} \\ Y_{Tc} - Y_{Ac} \\ Z_{Tc} - Z_{Ac} \end{bmatrix} \quad (10)$$

## 技术与方法 Technique and Method

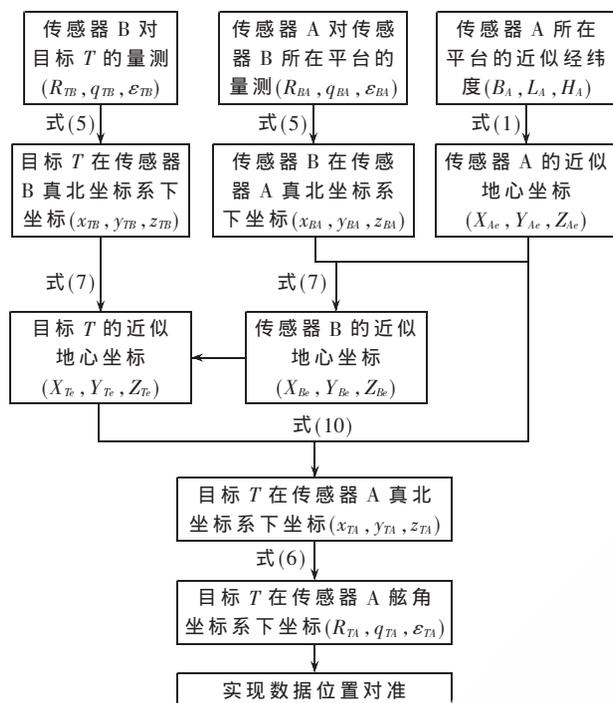


图4 基于近似经纬度及舷角-距离的数据位置对准

## 3 数据位置对准方法误差分析

根据式(1)、(5)和(7)可知,方法1的误差来源包括传感器观测误差、本平台航向系统误差、高精度导航设备定位误差、地心坐标转换误差等。在用方法1进行数据位置准时,考虑了地球表面曲率的影响,精度不依赖于平台间距离的大小,而与导航设备提供的经纬度精度有关,具有位置对准精度高、稳定性好的特点。而且由于直接利用导航信息作坐标转换,将获得更好的数据转换精度,因此在信息中继时,不会出现传感器定位误差累积效应。

方法2的误差来源包括传感器观测误差、本平台航向系统误差、舷角-距离坐标转换误差、平台间航向真北的基准不平行误差等。虽然卫星导航系统精度较高,但易受干扰,特别是在某些情况下无法使用,而方法2克服了上述不足,具有可靠性高、自主性和抗干扰性强的特点。方法2中,采用三角变换法进行坐标转换的精度优于直角坐标平移法。

方法3的误差来源包括传感器观测误差、本平台航向系统误差、导航设备定位误差、近似地心坐标转换误差等。相比于方法2,方法3采用了本平台的近似经纬度,通过近似地心坐标的处理,使其可以适用于平台间距离稍大的情况。而且该方法能够改善方法2的仰角误差。但是后两种方法有一共同的缺点,就是各平台的平台罗经航向误差随时间积累,因此需要及时地加以修正。

本文研究了多平台多传感器的数据位置对准问题,提出了3种适用于海上环境的数据位置对准方法,这些

方法针对海上平台在不同装备情况、不同地理位置下的使用条件,给出坐标变换流程和对应的数学模型,从而将传感器数据对准到同一坐标系,以供后续数据处理使用,最终形成统一敌我态势图。

通过对每种方法的误差来源和优缺点分析,确定如下对准方案:

(1)当平台间距离较远时,采用方法1进行对准,能够保证较高的精确性和稳定性;

(2)当平台间距离较近,且平台传感器具有较高的测角测距精度时,采用方法2和方法3进行对准,不仅可以取得与方法1相近甚至更佳的对准精度,而且还避免了对高精度导航设备的依赖;

(3)方法3比方法2的适用距离更远,并且改善了位置对准的仰角误差,所以在平台配备导航设备时采用方法3;

(4)仅对海面目标进行位置对准,且平台传感器具有较高的测角测距精度时,采用方法2可以获得较高的对准精度。

## 参考文献

- [1] DANA M P.Registration: a prerequisite for multiple sensor tracking[C].Multitarget Multisensor Tracking: Advanced Applications.Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [2] 何友,王国宏,陆大瑜,等.多传感器信息融合及应用(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 毛继志,郭陈江,郑建堂,等.海面多平台多传感器坐标转换精度分析[J].传感技术学报,2004(2):216-219.
- [4] 余安喜,胡卫东,杨宏文,等.低导航精度下多舰雷达数据空间配准方法[J].火力与指挥控制,2003,28(4):74-77.
- [5] 王航宇,王士杰,李鹏.舰载火控原理[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [6] 黄漠涛,翟国君,管铮欧,等.空间直角坐标和大地坐标的转换[J].解放军测绘学院学报,1998,15(3):164-168.
- [7] ZHOU Y F, HENRY L, MARTIN B.Sensor alignment with Earth-Centered Earth-Fixed(ECEF) coordinate system[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999,35(2):410-418.

(收稿日期:2009-11-25)

## 作者简介:

王成飞,男,1983年生,博士研究生,主要研究方向:信息融合和协同控制等。

李文钦,男,1984年生,助理工程师,主要研究方向:信息融合和航空设备等。

王航宇,男,1965年生,博士,教授,主要研究方向:协同控制和火力控制。