

## 基于合作目标的动态舰载平台综合系统误差估计

陈林元<sup>1</sup>, 何佳洲<sup>2</sup>, 罗双喜<sup>2</sup>, 安瑾<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团第二十九研究所, 成都 610036; 2. 江苏自动化研究所, 江苏连云港 222006)

**摘要:** 动平台传感器配准中综合系统误差估计是误差估计领域中的一个难题。针对舰艇动平台环境下的综合系统误差估计问题, 利用合作目标提供的高精度 GPS 导航信息, 提出了两种误差估计方法。方法 1 基于等效偏差模型, 通过建立综合系统误差观测模型, 将等效偏差中互相耦合的误差分量解耦, 利用近似的等效偏差值估计综合系统误差各误差分量, 克服了等效偏差模型的不足; 方法 2 通过分析经误差传递后综合系统误差分量对舰艇地理坐标系下目标定位精度的影响, 对影响函数进行线性化处理, 从而建立综合系统误差观测方程, 完成综合系统误差估计。仿真验证在两种情形下进行, 仿真结果表明两种方法估计性能互有优劣, 但方法 2 总体表现好于方法 1。利用两种方法估计出来的结果进行误差修正, 修正后的航迹精度与修正前相比均有了大幅提高, 能够满足舰艇平台实际作战需要。

**关键词:** 多传感器组网; 信息融合; 综合系统误差估计; 动平台; 等效偏差模型; 合作目标

**中图分类号:** V271.4<sup>+</sup>92; TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)11-0070-08

## Comprehensive System Error Estimation Algorithm Based on Cooperative Target for Mobile Ship-Born Platform

CHEN Linyuan<sup>1</sup>, HE Jiazhou<sup>2</sup>, LUO Shuangxi<sup>2</sup>, AN Jin<sup>2</sup>

(1. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China;

2. Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222006, China)

**Abstract:** Comprehensive system error estimation on mobile platform sensor registration is a difficult problem. In order to estimate the comprehensive system error for the mobile platform of ships, this paper presents two methods using the high-precision GPS information obtained through cooperative target. In the first method, an observation model was built up to decouple error component in equivalent error model based on it, and the approximate equivalent value was used to estimate each component of comprehensive system error. The first method can overcome the shortage of equivalent error model. In the second method, through analyzing the effect of error component on the location precision and linearizing the influence function, the observation function was established and estimation of comprehensive system error was implemented. Simulation is made for two situations, and the simulation results demonstrate that each method has its advantages and disadvantages. On the whole, the performance of the second method is better. The position precision is improved greatly after error correction using the estimation results of these methods.

**Key words:** multi-sensor network; information fusion; comprehensive system error estimation; mobile platform; equivalent error model; cooperative target

### 0 引言

为了提高多传感器组网跟踪系统的跟踪性能, 需要对来自各传感器的信息进行融合处理。在融合中

心, 将来自各传感器的探测数据进行融合, 从而提高目标跟踪精度, 形成统一的战场态势图。但是各类系统偏差的存在将使得组网融合系统的性能大打折扣。系统误差的存在, 将导致目标关联困难, 从而产生错误的目标航迹: 真实目标航迹丢失; 虚假目标航迹; 冗余目标航迹; 目标航迹不连续。因此, 对传感器系统误差进行估计并修正正是克服上述不利影响, 建立清晰、统一、准确的目标航迹和战场态势的基础和前提。

收稿日期: 2012-09-11 修回日期: 2012-11-20

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(613101)

作者简介: 陈林元(1988—), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 研究方向为信息融合、雷达数据处理、目标定位与跟踪。

在舰艇平台传感器探测过程中,影响传感器探测精度的因素很多,主要有传感器量测误差、甲板形变误差、平台定位误差、平台姿态误差等。这些误差经过坐标旋转后,或单独或相互耦合地对目标跟踪产生影响,最终表现为在某一稳定坐标系下距离、方位和俯仰上的等效偏差。为了叙述方便,本文将传感器量测误差、甲板形变误差、平台定位误差、平台姿态误差定义为综合系统误差。

对于传感器量测误差(距离,方位,俯仰系统误差)的估计已有大量文献可以参考<sup>[1-6]</sup>,但关于动平台传感器配准中综合系统误差估计的相关文献较少。文献[7-9]研究了动平台姿态角的实时估计方法,但没有研究姿态角误差估计;文献[10]采用 MLR 算法对传感器量测误差和姿态误差进行了估计,但没有涉及等效偏差分析以及与之对比分析;文献[11]基于合作目标,给出在稳定地理坐标系下等效误差的表达式,并提出了利用卡尔曼滤波算法来分别估计等效偏差;文献[12]同样利用目标导航系统提供的真值,采用卡尔曼滤波算法对等效误差进行估计,并对误差修正前后的航迹精度进行了对比;文献[11-12]中等效偏差表达式只考虑了传感器测量误差和平台的姿态误差,并且给出的估计均为等效偏差结果;在此基础上,文献[13]研究了传感器量测误差、甲板形变误差、平台定位误差(导航偏差)、平台姿态偏差等多达 18 个独立偏差参数对稳定地理坐标系下定位精度的影响,并基于合作目标给出了这些偏差的估计,分别给出了静止平台与动平台环境下误差修正前后航迹的精度对比,文献[13]给出了综合系统偏差经传递后在稳定地理坐标系下对定位精度影响的表达式。文献[11-12]估计的是由综合系统误差耦合在一块的等效偏差,而没有给出综合系统误差各独立误差分量的估计,不便于对误差源进行修正。文献[13]由于考虑的偏差量太多,从而导致最后的观测方程高度非线性,导致估计结果不甚理想;同时文献[13]的研究思路没有延续文献[11-12]中等效偏差表达式思想,没有对两种不同思路的估计效果进行对比。文献[14]只研究综合系统误差对定位精度的影响,并没有误差估计相关的内容。

为了克服上述不足,本文提出了两种计算综合系统误差的方法:1)基于等效偏差模型来估计综合系统误差分量;2)直接对综合系统误差各分量进行估计。在动平台环境下设置两条典型航路仿真条件,对两种方法的误差估计结果进行比较,并且对误差修正前后的航迹精度进行了对比。由文献[11]可知,因为合作目标 GPS 定位精度很高,基本可以忽略导航偏差的影响。因此,本文研究的综合系统误差估计只包括传感器量测误差(距离、方位、俯仰)、平台姿态误差(艏向、

纵摇、横摇)。

## 1 方法 1:基于等效偏差模型的综合系统误差估计

由文献[11-12,14]可知,当不考虑甲板形变与导航偏差时,基本的等效偏差模型写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta\beta \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\gamma \\ 0 \end{bmatrix} + G_s \left( \begin{bmatrix} \Delta\beta_s \\ \Delta\varepsilon_s \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} -\sin\theta + \cos\theta \sin\beta_s \tan\varepsilon_s \\ \cos\theta \cos\beta_s \end{pmatrix} \Delta\psi + \begin{pmatrix} \cos\beta_s \tan\varepsilon_s \\ -\sin\beta_s \end{pmatrix} \Delta\theta \right) \quad (1)$$

式中: $\beta_s, \varepsilon_s$  分别为传感器量测坐标系下的方位、俯仰量测值; $\Delta\beta_s, \Delta\varepsilon_s$  分别为传感器量测方位、俯仰系统误差; $\beta, \varepsilon$  分别为稳定的舰艇平台地理坐标系下的方位、俯仰量测值; $\Delta\beta, \Delta\varepsilon$  分别为稳定的舰艇平台地理坐标系下的方位、俯仰系统误差(等效); $\gamma, \psi, \theta$  为姿态角(艏向,纵摇,横摇)量测值; $\Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta$  为姿态角系统误差。

$$G_s = \frac{1}{\cos\varepsilon} \begin{bmatrix} \cos(\beta-\gamma) & -\sin(\beta-\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\psi] [\theta] J_s \quad (2)$$

$$\text{式中:} [\psi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}; [\theta] = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix};$$

$$J_s \text{ 为 } f(\beta_s, \varepsilon_s) = \begin{bmatrix} \sin\beta_s \cos\varepsilon_s \\ \cos\beta_s \cos\varepsilon_s \\ \sin\varepsilon_s \end{bmatrix} \text{ 关于 } \begin{bmatrix} \beta_s \\ \varepsilon_s \end{bmatrix} \text{ 的 Jaccobi 矩阵,}$$

$$J_s = \begin{bmatrix} \cos\beta_s \cos\varepsilon_s & -\sin\beta_s \sin\varepsilon_s \\ -\sin\beta_s \cos\varepsilon_s & -\cos\beta_s \sin\varepsilon_s \\ 0 & \cos\varepsilon_s \end{bmatrix}.$$

由于在旋转过程中距离保持不变,因此,舰艇平台稳定地理坐标系下的等效距离误差等于传感器量测坐标系下的距离误差,即  $\Delta r = \Delta r_s$ 。结合式(1),可将等效系统误差与综合系统误差的关系表示成矩阵表达形式

$$\begin{bmatrix} \Delta r \\ \Delta\beta \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} \Delta r_s \\ \Delta\beta_s \\ \Delta\varepsilon_s \\ \Delta\gamma \\ \Delta\psi \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} & [G_s]_{2 \times 2} & \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \left[ \mathbf{0}_{2 \times 1} G_s \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \right] \right)_{2 \times 3} \end{bmatrix}_{3 \times 6}.$$

因此,由等效偏差模型出发得到的综合偏差估计公式为

$$\begin{bmatrix} \Delta r_s \\ \Delta \beta_s \\ \Delta \varepsilon_s \\ \Delta \gamma \\ \Delta \psi \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \begin{bmatrix} \Delta r \\ \Delta \beta \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中的等效偏差由合作目标提供的真值与稳定地理坐标系下的实测值计算得到。

基于等效偏差模型估计综合系统误差的仿真流程如图1所示。

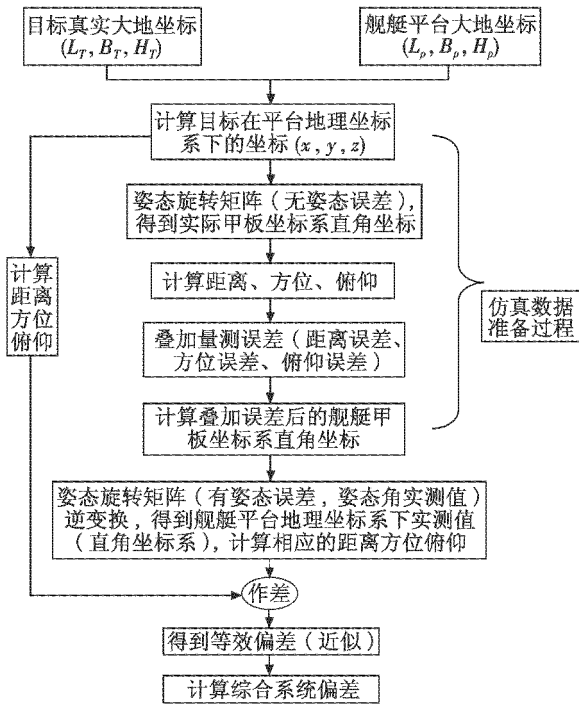


图1 基于等效偏差模型估计综合系统误差仿真过程

Fig.1 Process of simulation for comprehensive error estimation based on equivalent bias model

$$\mathbf{R} = [\boldsymbol{\gamma}][\boldsymbol{\psi}][\boldsymbol{\theta}] = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \psi \sin \gamma & \cos \psi \sin \gamma & \sin \theta \cos \gamma - \cos \theta \sin \psi \sin \gamma \\ -\cos \theta \sin \gamma + \sin \theta \sin \psi \cos \gamma & \cos \psi \cos \gamma & -\sin \theta \sin \gamma - \cos \theta \sin \psi \cos \gamma \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

不考虑姿态误差时的旋转矩阵为

$$\bar{\mathbf{R}} = [\bar{\boldsymbol{\gamma}}][\bar{\boldsymbol{\psi}}][\bar{\boldsymbol{\theta}}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \Delta\theta) \cos(\gamma - \Delta\gamma) + \sin(\theta - \Delta\theta) \sin(\psi - \Delta\psi) \sin(\gamma - \Delta\gamma) & \cos(\psi - \Delta\psi) \sin(\gamma - \Delta\gamma) & \sin(\theta - \Delta\theta) \cos(\gamma - \Delta\gamma) - \cos(\theta - \Delta\theta) \sin(\psi - \Delta\psi) \sin(\gamma - \Delta\gamma) \\ -\cos(\theta - \Delta\theta) \sin(\gamma - \Delta\gamma) + \sin(\theta - \Delta\theta) \sin(\psi - \Delta\psi) \cos(\gamma - \Delta\gamma) & \cos(\psi - \Delta\psi) \cos(\gamma - \Delta\gamma) & -\sin(\theta - \Delta\theta) \sin(\gamma - \Delta\gamma) - \cos(\theta - \Delta\theta) \sin(\psi - \Delta\psi) \cos(\gamma - \Delta\gamma) \\ -\sin(\theta - \Delta\theta) \cos(\psi - \Delta\psi) & \sin(\psi - \Delta\psi) & \cos(\theta - \Delta\theta) \cos(\psi - \Delta\psi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

测量误差与姿态误差修正后目标在舰艇地理坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{R}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_T \\ \bar{y}_T \\ \bar{z}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

设

## 2 方法2:直接计算综合系统误差各分量

合作目标大地坐标由GPS提供,精确已知,为 $(L, B, H)$ ;舰载平台大地坐标精确已知,为 $(L_0, B_0, H_0)$ 。传感器量测为 $r = \bar{r} + \Delta r + w_r, \beta = \bar{\beta} + \Delta \beta + w_\beta, \varepsilon = \bar{\varepsilon} + \Delta \varepsilon + w_\varepsilon$ (距离、方位、俯仰);舰载平台的姿态角为 $\gamma = \bar{\gamma} + \Delta \gamma + w_\gamma, \psi = \bar{\psi} + \Delta \psi + w_\psi, \theta = \bar{\theta} + \Delta \theta + w_\theta$ (艏向、纵摇、横摇)。其中: $(\bar{r}, \bar{\beta}, \bar{\varepsilon}, \bar{\gamma}, \bar{\psi}, \bar{\theta})$ 为相应的真值; $(\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon, \Delta \gamma, \Delta \psi, \Delta \theta)$ 为相应的系统误差; $(w_r, w_\beta, w_\varepsilon, w_\gamma, w_\psi, w_\theta)$ 为相应的噪声项。

$$\text{传感器量测噪声方差矩阵为 } \mathbf{P}_L = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 \\ \sigma_\beta^2 \\ \sigma_\varepsilon^2 \end{bmatrix}, \text{舰载}$$

$$\text{平台姿态角随机噪声方差矩阵为 } \mathbf{P}_z = \begin{bmatrix} \sigma_\gamma^2 \\ \sigma_\psi^2 \\ \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}, \text{不考}$$

虑甲板形变误差,在舰艇甲板坐标系下,传感器基座相

对于舰艇平台中心的坐标为  $\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$ 。

传感器量测坐标系下目标实测位置为

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \beta \\ r \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta \\ r \cdot \sin \varepsilon \end{bmatrix} \quad (5)$$

测量误差修正后为

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_T \\ \bar{y}_T \\ \bar{z}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r - \Delta r) \cdot \cos(\varepsilon - \Delta \varepsilon) \cdot \sin(\beta - \Delta \beta) \\ (r - \Delta r) \cdot \cos(\varepsilon - \Delta \varepsilon) \cdot \cos(\beta - \Delta \beta) \\ (r - \Delta r) \cdot \sin(\varepsilon - \Delta \varepsilon) \end{bmatrix} \quad (6)$$

由传感器量测坐标系到舰艇平台地理坐标系(东北天坐标系)的旋转矩阵为

$$\bar{\mathbf{R}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_T \\ \bar{y}_T \\ \bar{z}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon, \Delta \gamma, \Delta \psi, \Delta \theta) \\ f_2(\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon, \Delta \gamma, \Delta \psi, \Delta \theta) \\ f_3(\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon, \Delta \gamma, \Delta \psi, \Delta \theta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)在 $(\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon, \Delta \gamma, \Delta \psi, \Delta \theta)^T = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 处一阶线性展开,得

$$\begin{bmatrix} f_1(\Delta r, \Delta\beta, \Delta\varepsilon, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta) \\ f_2(\Delta r, \Delta\beta, \Delta\varepsilon, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta) \\ f_3(\Delta r, \Delta\beta, \Delta\varepsilon, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\Delta r, \Delta\beta, \Delta\varepsilon, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta) \\ f_2(\Delta r, \Delta\beta, \Delta\varepsilon, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta) \\ f_3(\Delta r, \Delta\beta, \Delta\varepsilon, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\theta) \end{bmatrix} \Bigg|_{\substack{\Delta r=0 \\ \Delta\beta=0 \\ \Delta\varepsilon=0 \\ \Delta\gamma=0 \\ \Delta\psi=0 \\ \Delta\theta=0}} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta r} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\beta} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\varepsilon} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\gamma} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\psi} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta r} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\beta} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\varepsilon} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\gamma} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\psi} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\theta} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta r} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\beta} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\varepsilon} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\gamma} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\psi} & \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r \\ \Delta\beta \\ \Delta\varepsilon \\ \Delta\gamma \\ \Delta\psi \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

令式(11)中的雅克比矩阵为  $J_f$ , 待估计的系统误差为  $\Delta b$ , 其中

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta r} = -(\cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \psi \sin \gamma) \cos \varepsilon \sin \beta - \cos \psi \sin \gamma \cos \varepsilon \cos \beta - (\sin \theta \cos \gamma - \cos \theta \sin \psi \sin \gamma) \sin \varepsilon \\ \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\beta} = -r(\cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \psi \sin \gamma) \cos \varepsilon \cos \beta + r(\cos \psi \sin \gamma) \cos \varepsilon \sin \beta \\ \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\varepsilon} = r(\cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \psi \sin \gamma) \sin \varepsilon \sin \beta + r(\cos \psi \sin \gamma) \sin \varepsilon \cos \beta + r(\sin \theta \cos \gamma - \cos \theta \sin \psi \sin \gamma) \cos \varepsilon \\ \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\gamma} = r(\cos \varepsilon \sin \beta \cos \theta + \sin \varepsilon \sin \theta) \sin \gamma - r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \theta \sin \psi + \cos \varepsilon \cos \beta \cos \psi - \sin \varepsilon \cos \theta \sin \psi) \cos \gamma \\ \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\psi} = -r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \theta \sin \gamma - \sin \varepsilon \cos \theta \sin \gamma) \cos \psi + r \cos \varepsilon \cos \beta \sin \gamma \sin \psi \\ \frac{\partial f_1}{\partial \Delta\theta} = r(\cos \varepsilon \sin \beta \cos \gamma - \sin \varepsilon \sin \psi \sin \gamma) \sin \theta - r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \psi \sin \gamma + \sin \varepsilon \cos \gamma) \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial f_2}{\partial \Delta r} = (\cos \theta \sin \gamma - \sin \theta \sin \psi \cos \gamma) \cos \varepsilon \sin \beta - \cos \psi \cos \gamma \cos \varepsilon \cos \beta + (\sin \theta \sin \gamma + \cos \theta \sin \psi \cos \gamma) \sin \varepsilon \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\beta} = r(\cos \theta \sin \gamma - \sin \theta \sin \psi \cos \gamma) \cos \varepsilon \cos \beta + r(\cos \psi \cos \gamma) \cos \varepsilon \sin \beta \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\varepsilon} = r(\sin \theta \sin \psi \cos \gamma - \cos \theta \sin \gamma) \sin \varepsilon \sin \beta + r(\cos \psi \cos \gamma) \sin \varepsilon \cos \beta + r(\sin \theta \sin \gamma + \cos \theta \sin \psi \cos \gamma) \cos \varepsilon \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\gamma} = r(\cos \varepsilon \sin \beta \cos \theta + \sin \varepsilon \sin \theta) \cos \gamma + r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \theta \sin \psi + \cos \varepsilon \cos \beta \cos \psi - \sin \varepsilon \cos \theta \sin \psi) \sin \gamma \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\psi} = -r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \theta \cos \gamma - \sin \varepsilon \cos \theta \cos \gamma) \cos \psi + r \cos \varepsilon \cos \beta \cos \gamma \sin \psi \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta\theta} = -r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \gamma + \sin \varepsilon \sin \psi \cos \gamma) \sin \theta - r(\cos \varepsilon \sin \beta \sin \psi \cos \gamma - \sin \varepsilon \sin \gamma) \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial f_3}{\partial \Delta r} = \sin \theta \cos \psi \cos \varepsilon \sin \beta - \sin \psi \cos \varepsilon \cos \beta - \cos \theta \cos \psi \sin \varepsilon \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\beta} = r \cos \varepsilon \cos \beta \sin \theta \cos \psi + r \cos \varepsilon \sin \beta \sin \psi \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\varepsilon} = r(\cos \beta \sin \psi - \sin \beta \sin \theta \cos \psi) \sin \varepsilon - r \cos \varepsilon \cos \theta \cos \psi \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\gamma} = 0 \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\psi} = r(\sin \varepsilon \cos \theta - \cos \varepsilon \sin \beta \sin \theta) \sin \psi - r \cos \varepsilon \cos \beta \cos \psi \\ \frac{\partial f_3}{\partial \Delta\theta} = r \cos \varepsilon \sin \beta \cos \psi \cos \theta + r \sin \varepsilon \cos \psi \sin \theta \end{cases} \quad (14)$$

坐标系下的坐标为  $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$ 。

有两种处理思路如下所述。

1) 认为误差修正后经一阶线性展开得到的目标位置与目标真实位置近似相等。

舰艇地理坐标系为

$$\begin{bmatrix} x_{oe} \\ y_{oe} \\ z_{oe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + J_f \cdot \Delta b \Rightarrow \Delta b = (J_f^T J_f)^{-1} \left( \begin{bmatrix} x_{oe} \\ y_{oe} \\ z_{oe} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

ECEF 坐标系为

$$\begin{bmatrix} x_{oE} \\ y_{oE} \\ z_{oE} \end{bmatrix} = M_{le} \cdot \left( \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + J_f \cdot \Delta b \right) + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \Rightarrow \Delta b = ((M_{le} J_f)^T (M_{le} J_f))^{-1} \cdot$$

舰艇地理坐标系到 ECEF 坐标系下的旋转矩阵为  $M_{le}$ , 目标在舰艇地理坐标系下的真实坐标为  $\begin{bmatrix} x_{oe} \\ y_{oe} \\ z_{oe} \end{bmatrix}$ ,

ECEF 坐标系下的真实坐标为  $\begin{bmatrix} x_{oE} \\ y_{oE} \\ z_{oE} \end{bmatrix}$ , 舰艇平台在 ECEF

$$\begin{bmatrix} x_{oe} \\ y_{oe} \\ z_{oe} \end{bmatrix} - M_{le} \cdot \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} \quad (16)$$

2) 对如下的目标函数求最小值。

$$\min F = \| X_{\text{实测}} + J \cdot \Delta b - X_{\text{真实}} \|_{\Sigma} \quad (17)$$

舰艇地理坐标系:

$$\Delta b = (J_f^T \Sigma J_f)^{-1} \cdot J_f^T \Sigma \begin{bmatrix} x_{oe} \\ y_{oe} \\ z_{oe} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (18)$$

ECEF 坐标系:

$$\Delta b = ((M_{le} J_f)^T \Sigma (M_{le} J_f))^{-1} (M_{le} J_f)^T \cdot \Sigma \begin{bmatrix} x_{oe} \\ y_{oe} \\ z_{oe} \end{bmatrix} - M_{le} \cdot \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中,  $\Sigma = J_f \cdot \begin{bmatrix} P_L \\ P_Z \end{bmatrix} \cdot J_f^T$ 。

思路1)的方法称为最小二乘法,思路2)的方法称为广义最小二乘法。为简化计算,综合误差估计选择利用舰艇地理坐标系下的数据进行。直接计算综合系统误差的仿真流程如图2所示。

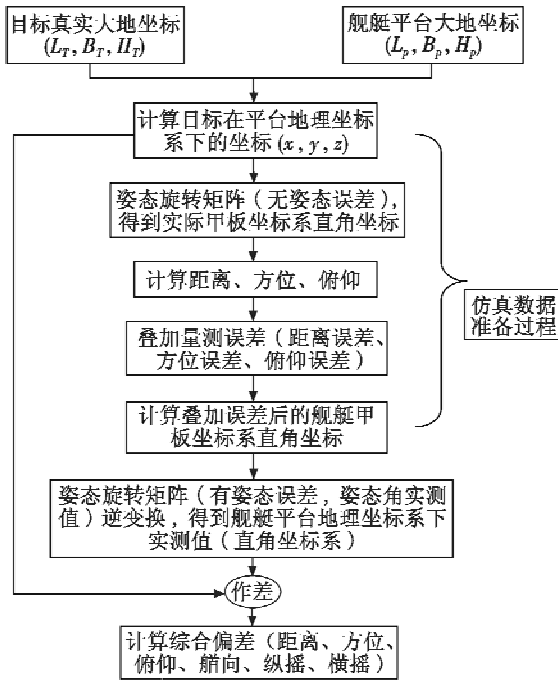


图2 直接计算综合系统误差仿真过程

Fig.2 Process of simulation for direct comprehensive error estimation

### 3 仿真分析

两种典型航路下进行仿真分析对比,包括两种方法误差估计结果对比和修正后航迹精度的对比。

仿真参数设置为:采样步数  $N = 400$ ;采样周期  $T = 1$

s;量测系统误差  $(\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon) = (400 \text{ m}, -1^\circ, 0.3^\circ)$ ;姿态误差  $(\Delta \gamma, \Delta \psi, \Delta \theta) = (-1.2^\circ, 0.5^\circ, 0.4^\circ)$ ;量测噪声  $(\sigma_r, \sigma_\beta, \sigma_\varepsilon) = (50 \text{ m}, 0.2^\circ, 0.06^\circ)$ ;姿态误差  $(\sigma_\gamma, \sigma_\psi, \sigma_\theta) = (0.2^\circ, 0.1^\circ, 0.1^\circ)$ ;纵横摇角的变化规律为  $\psi(k) = 5 * \sin((2\pi/80) * k^\circ)$ ,  $\theta(k) = 3 * \sin((2\pi/60) * k^\circ)$ 。

#### 3.1 情形1

目标飞行航路为:经度  $L_T(k) = (130.5 + 0.003 * k)^\circ$ ;纬度  $B_T(k) = (45.6 + 0.0015 * k)^\circ$ ;高度  $H_T(k) = 5000 \text{ m}$ 。

舰艇平台航路为:经度  $L_p(k) = (130 + 0.0003 * k)^\circ$ ;纬度  $B_p(k) = (45 + 0.00015 * k)^\circ$ ;高度  $H_p(k) = 0 \text{ m}$ 。

图3给出了在大地坐标系下舰艇平台和目标的真实航路;图4为舰艇平台地理坐标系下目标实测航迹与误差修正后的航迹;图5为修正前后目标航迹与真实航迹间的距离;图6~图11为两种方法误差估计结果对比图。

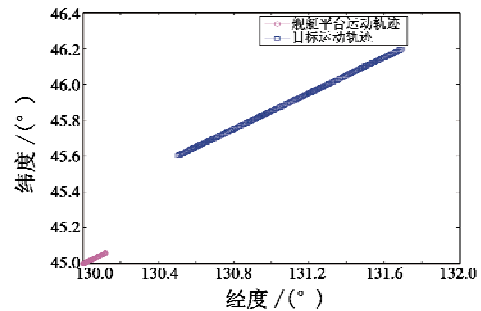


图3 平台与目标运动轨迹  
Fig.3 Track of platform and target

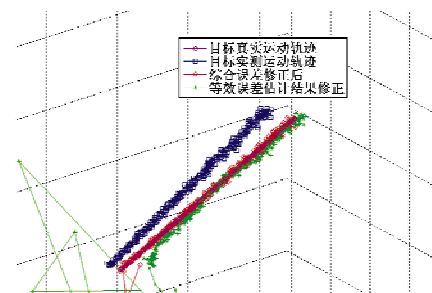


图4 实测航迹与修正后的航迹(平台地理坐标系)  
Fig.4 Actually measured track and the corrected track

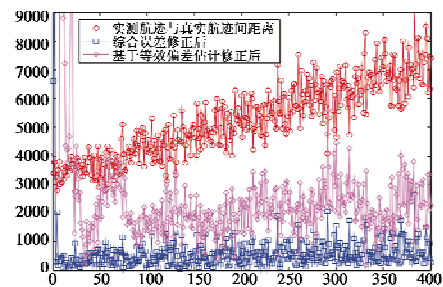


图5 修正前后与真实航迹间的距离  
Fig.5 Distance between true track and detected track before and after correcting

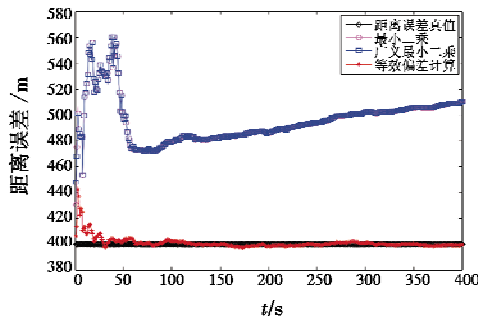


图 6 距离误差估计对比

Fig. 6 Comparison of range error estimation

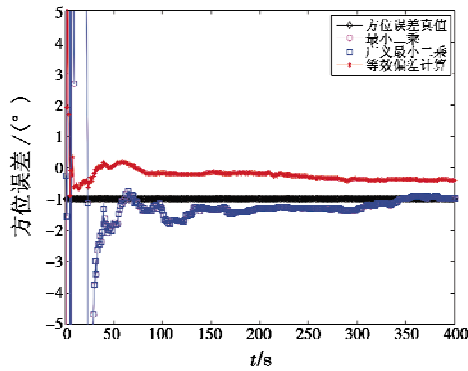


图 7 方位误差估计对比

Fig. 7 Comparison of azimuth error estimation

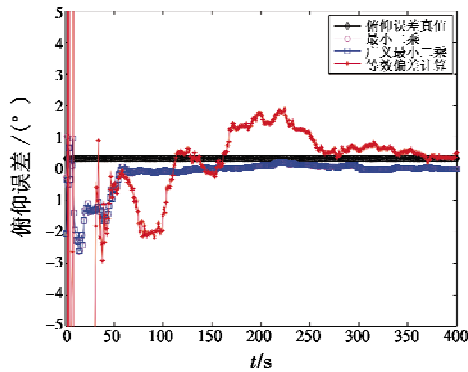


图 8 俯仰误差估计对比

Fig. 8 Comparison of elevation error estimation

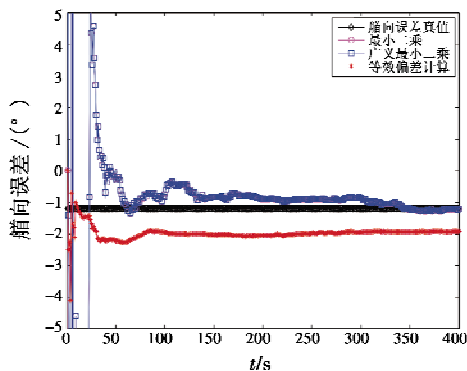


图 9 船向误差估计对比

Fig. 9 Comparison of heading error estimation

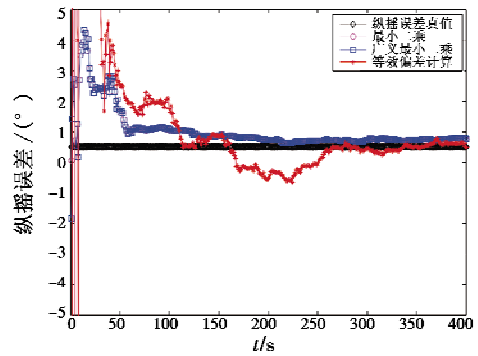


图 10 纵摇误差估计对比

Fig. 10 Comparison of pitch error estimation

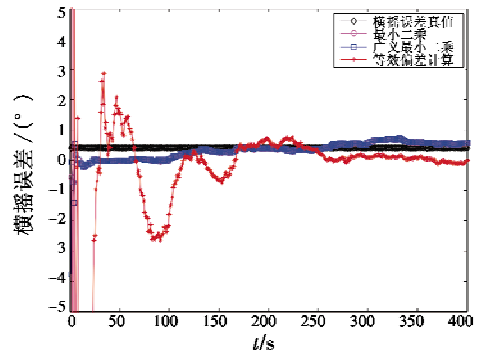


图 11 横摇误差估计对比

Fig. 11 Comparison of roll error estimation

由图 3 ~ 图 11 可以看出,基于等效偏差模型的综合系统误差估计方法在距离、俯仰和纵摇误差估计上表现比直接计算综合系统误差方法好,对于其他误差分量估计,后者好于前者。总体而言,直接计算综合系统误差方法表现好于基于等效偏差模型的综合系统误差估计方法。表 1 为两种方法的具体指标对比。

真实误差在与真实航迹距离一项中指误差修正前实测航迹与目标真实航迹间的距离偏差;剩余残差是针对误差修正后的探测航迹与真实航迹间的距离偏差的描述;消去率为被补偿掉的误差与补偿前真实误差的比值。

表 1 两种方法的具体指标对比

Table 1 Index comparison between two algorithms

误差类型	真实误差	剩余残差/估计值	消去率/%
与真实航迹间的 距离/m	3500 ~ 9000	方法 1: 1000 ~ 3000	68 ~ 73
		方法 2: 100 ~ 800	91 ~ 97
距离误差/m	400	方法 1: 400	100
		方法 2: 470 ~ 500	75 ~ 82
方位误差/m	-1	方法 1: -0.3	30
		方法 2: -0.9	90
俯仰误差/m	0.3	方法 1: 0.35	80
		方法 2: 0.05	16
船向误差/(°)	-1.2	方法 1: -2	20
		方法 2: -1 ~ -1.3	83 ~ 91
纵摇误差/(°)	0.5	方法 1: 0.6	80
		方法 2: 0.7	60
横摇误差/(°)	0.4	方法 1: 0 ~ 0.1	20
		方法 2: 0.5	75

### 3.2 情形2

目标飞行航路为: $L_T(k) = (130.5 + 0.003 * k)^\circ$ ;  
 $B_T(k) = (45.6 - 0.0015 * k)^\circ$ ; $H_T(k) = 5000$  m。舰艇  
 平台航路为: $L_P(k) = (130 + 0.0003 * k)^\circ$ ; $B_P(k) =$   
 $(45 + 0.00015 * k)^\circ$ ; $H_P(k) = 0$  m。

图12给出了在大地坐标系下舰艇平台和目标的  
 真实航路;图13为舰艇平台地理坐标系下目标实测航  
 迹与误差修正后的航迹;图14为修正前后目标航迹与  
 真实航迹间的距离;图15~图20为两种方法误差估计  
 结果对比图。

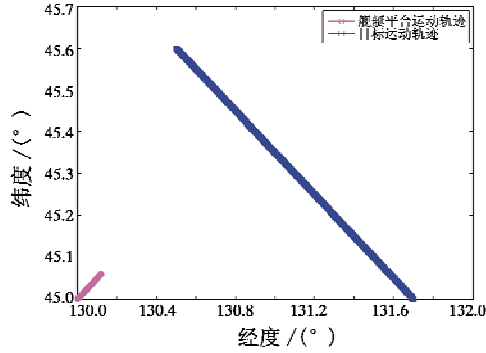


图12 平台与目标运动轨迹

Fig. 12 Track of platform and target

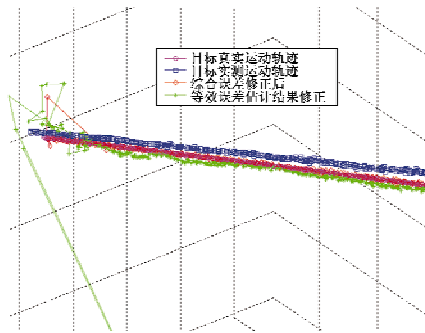


图13 实测航迹与修正后的航迹(平台地理坐标系)

Fig. 13 The detected and corrected track

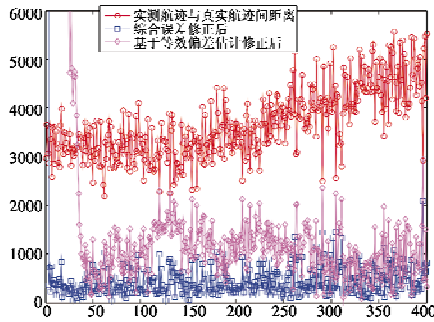


图14 修正前后与真实航迹间的距离

Fig. 14 Distance between true track and detected track before and after correcting

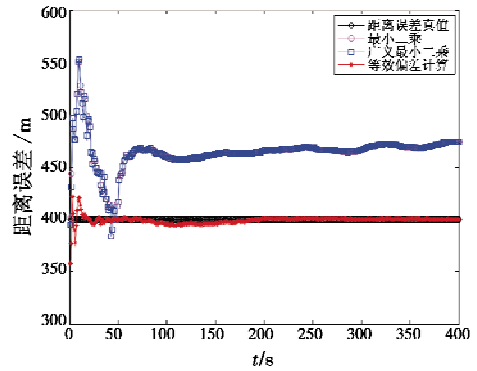


图15 距离误差估计对比

Fig. 15 Comparison of range error estimation

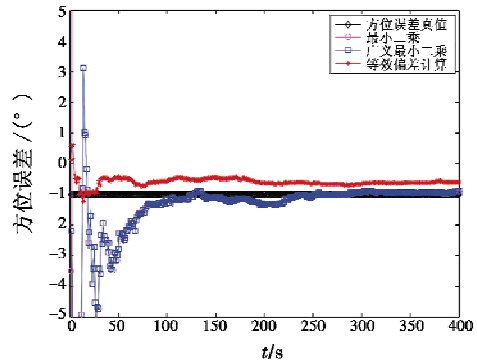


图16 方位误差估计对比

Fig. 16 Comparison of azimuth error estimation

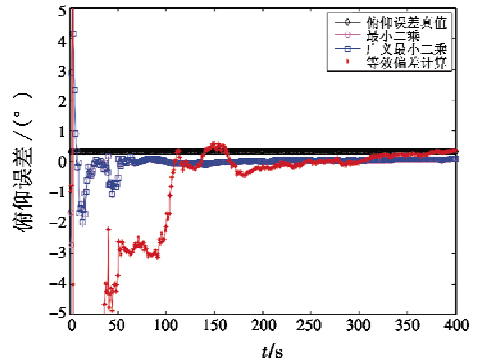


图17 俯仰误差估计对比

Fig. 17 Comparison of elevation error estimation

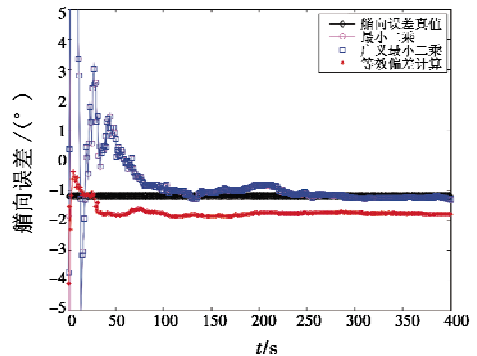


图18 艏向误差估计对比

Fig. 18 Comparison of heading error estimation

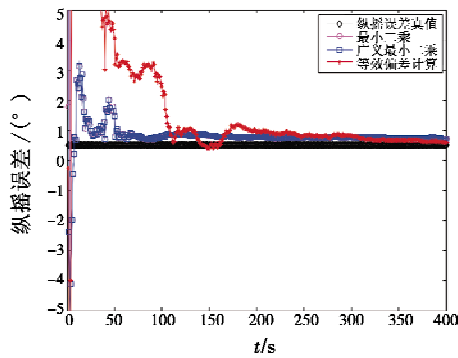


图 19 纵摇误差估计对比

Fig. 19 Comparison of pitch error estimation

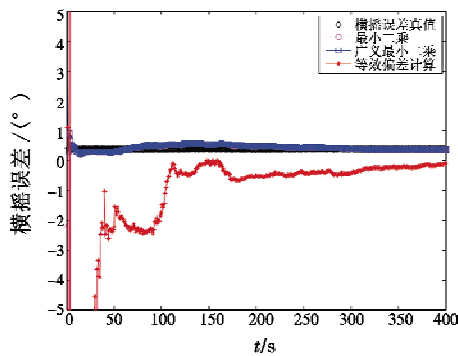


图 20 横摇误差估计对比

Fig. 20 Comparison of roll error estimation

由图 12 ~ 图 20 可以看出,基于等效偏差模型的综合系统误差估计方法在距离、俯仰和纵摇误差估计上表现比直接计算综合系统误差的方法好,其他误差分量估计方法 2 好于方法 1。总体而言,方法 2 表现好于方法 1。表 2 为两种方法的具体指标对比。

表 2 两种方法的具体指标对比

Table 2 Index comparison between two algorithms

误差类型	真实误差	剩余残差/估计值	消去率/%
与真实航迹间的距离/m	3000 ~ 5000	方法 1:200 ~ 2000 方法 2:100 ~ 500	68 ~ 85 94 ~ 97
距离误差/m	400	方法 1:400 方法 2:470	100 82.5
方位误差/(°)	-1	方法 1:-0.6 方法 2:-0.9	60 90
俯仰误差/(°)	0.3	方法 1:0.2 ~ 0.3 方法 2:0.05	85 16
艏向误差/(°)	-1.2	方法 1:-1.8 方法 2:-1 ~ -1.3	50 83 ~ 91
纵摇误差/(°)	0.5	方法 1:0.6 方法 2:0.7	80 60
横摇误差/(°)	0.4	方法 1:失败 方法 2:0.3 ~ 0.4	失败 80

### 3.3 分析总结

由仿真分析可知,在两种情形下,方法 1 在距离、俯仰和纵摇误差上的估计结果好于方法 2,在其他误差分量上的估计上方法 2 好于方法 1。总体而言,方法 2 的表现好于方法 1。对比两种不同情形下的仿真结果

可以发现:情形 2 中,方法 1 在方位和艏向误差上的误差估计精度得到提高,说明情形 2 时综合系统误差的可观测度更高。

根据进一步分析可知,由于在仿真过程中将等效偏差用舰艇平台地理坐标系下的实际距离、方位、俯仰偏差代替,而两者其实并不相等,这降低了基于等效偏差模型的综合误差估计精度。

## 4 总结

本文针对舰艇动平台环境下的综合系统误差估计问题,基于合作目标提供高精度的 GPS 导航信息,提出了两种不同的误差估计方法。设置两种典型的平台与目标相对运动方式作为仿真环境,仿真结果表明两种方法估计性能各有优劣,但方法 2 总体表现好于方法 1;同时,利用两种方法估计出来的结果进行误差修正,修正后的航迹精度与修正前相比有了大幅提高,能够满足舰艇平台实际作战需要。动平台环境下如何对包含更多误差源因素:平台导航误差、甲板形变误差的综合系统误差进行有效稳健的估计是今后研究的方向。

## 参考文献

- [1] BURKE J J. The SAGE real time quality control function and its interface with BUIC II/BUIC III [ R ]. MTRE Corporation Technical Report, 1996.
- [2] 陈林元,何佳洲,罗双喜. 误差配准在两种纯距离定位算法的应用比较[J]. 指挥控制与仿真,2012(5):26-32.
- [3] LEUNG H, BLANCHETT M. A least square fusion of multiple radar data[C]//Proceedings of RADAR, Paris, 1994, 94: 364-369.
- [4] DANA A M P. Registration:A prerequisite for multiple sensor tracking [ M ]//BAR-SHALOM Y. Multitarget-multisensor Tracking: Advanced Applications. Norwood: Artech House, 1990.
- [5] ZHOU Yifeng, HENRY L. An exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion[J]. IEEE Transactions Signal Processing, 1997, 45(6):1560-1572.
- [6] OKELLO N, RISTIC B. Maximum likelihood registration for multiple dissimilar sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2003, 39(3):1074-1083.
- [7] HUA M D, RUDIN K, DUCARD G, et al. Nonlinear attitude estimation with measurement decoupling and anti-windup gyro-bias compensation [ C ]//Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano, 2011:2972-2978.

(下转第 83 页)



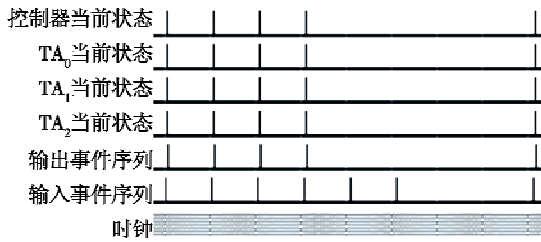


图 16 输入事件符合  $r_2$  的测试波形

Fig. 16 Test waveform when the input curves is  $r_2$

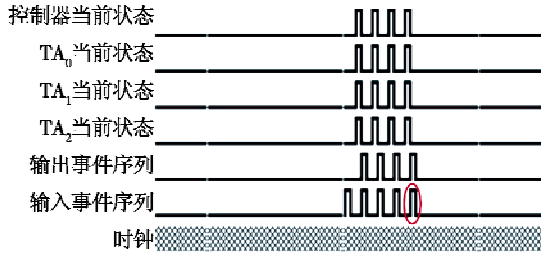


图 17 输入事件符合  $r_3$  的测试波形

Fig. 17 Test waveform when the input curves is  $r_3$

### 6 结束语

本文所述的工作立足于时间自动机的硬件实现,在线模拟网络节点流量特性并进行必要的流量整形,给出了时间自动机模型与硬件逻辑的对应方法,设计实现了一种能够衔接 RTC 分析模型和 TA 模型的流量特性硬件转换接口,并通过功能仿真验证了其对于流量特性约束和模拟的正确性。这些工作表明并验证了用硬件实现时间自动机模型的可行性,为进一步验证分布式实时系统的多组件的协议行为和在线监测研究

打下基础。

### 参考文献

[1] RAJEEV A, DAVID L D. A theory of timed automata [J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126(2):183-235.

[2] 孙全勇. 时间自动机及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.

[3] ANDERS H, LARSEN K G, MIKUCIONIS M, et al. Testing real-time systems using UPPAAL[M]. Formal Methods and Testing, LNCS 4949, Berlin Heidelberg:Springer-Verlag, 2008:77-117.

[4] LARSEN K G, MIKUCIONIS M, NIELSEN B, et al. Testing real-time embedded software using UPPAAL-TRON: An industrial case study [C]//ACM. EMSOFT'05, Jersey City, New Jersey, USA, 2005:299-306.

[5] KROKORA J, HANZALEK Z. FPGA based tester tool for hybrid real-time systems [J]. Microprocessors and Microsystems, 2008, 32(8):447-459.

[6] LAMPKA K, PERATHONER S, THIELE L. Analytic real-time analysis and timed automata: A hybrid methodology for the performance analysis of embedded real-time systems [J]. Design Automation for Embedded Systems, 2010, 14(3):193-227.

[7] BEHRMANN G, DAVID A, LARSEN K A. A tutorial on UPPAAL [Z]. Denmark: Department of Computer Science, Aalborg University, 2004.

[8] LE BOUDEC J Y, THIRAN P. Network calculus: A theory of deterministic queuing systems for the internet [M]. New York:Springer-Verlag, 2001.

(上接第 77 页)

[8] HADRI A E, BENALLEGUE A. Attitude estimation with gyros-bias compensation using low-cost sensors[C]//Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P. R. China, December 16-18, 2009:8077-8082.

[9] KUMAR N S, JANN T. Estimation of attitudes from a low-cost miniaturized inertial platform using Kalman filter-based sensor fusion algorithm[R]. Sadhana, 2004.

[10] 崔亚琦,熊伟,何友. 基于 MLR 的机动平台传感器误差配准算法[J]. 航空学报, 2012, 33(1):118-128.

[11] HELMICK R E, CONTE H E, RICE T R. Absolute sensor alignment using GPS[C]//SPIE, 2739:168-179.

[12] WATSON G A, RICE T R. Sensor alignment and compensation for composite tracking [C]//Proceedings of SPIE 4728, 2002:354-367.

[13] HERMAN S M, POORE A B. Nonlinear least-squares estimation for sensor and navigation biases[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6236:623617-1-623617-18.

[14] 潘江怀,何佳洲,罗双喜. 舰载雷达探测误差传递与灵敏度分析[C]//第三届中国信息融合大会论文集, 西安, 2011:514-520.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅