

文章编号:1671-6833(2015)02-0110-05

大失准角传递对准杆臂效应影响研究

丁国强¹, 马军霞², 熊明¹, 乔相伟³

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州轻工业学院 软件学院, 河南 郑州 450002; 3. 西安航天精密机电研究所 系统工程事业部, 陕西 西安 710100)

摘要:从舰船舰载机惯导系统传递对准实际需要出发, 针对刚性舰船载体分析杆臂效应对子惯导系统速度、加速度(比力)影响, 在大角度失准角情形下引入标称失准角和计算失准角概念构建传递对准速度姿态匹配非线性误差模型, 对系统误差模型展开状态参数估计研究, 通过比较研究杆臂矢量对子惯导系统失准角估计误差及其对准精度的影响以及不同初始杆臂矢量对标称失准角估计误差及其精度影响情况, 验证本模型在舰船舰载机惯导系统海上对准有效性及其对准精度。

关键词:传递对准; 杆臂效应误差; 标称失准角; 速度姿态匹配; 误差补偿

中图分类号: U666.12; V249.32⁺2 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.024

0 引言

传递对准是舰载机子惯导系统在舰船运动情况下初始对准主要方法, 它利用高精度舰载主惯导系统导航参数与机载子惯导系统导航参数进行匹配计算, 通过滤波技术估计出子惯导系统失准误差角, 进而实现对子惯导系统导航参数初始化。由于主、子惯导间存在距离, 载体做角运动会造成主、子系统惯性器件敏感到比力误差及由此计算的导航速度误差, 造成主子、系统传递对准中的杆臂效应误差。将导致子惯导导航参数估计精度下降, 降低惯导系统导航性能。

目前针对机载子惯导系统在舰船载体运动情形中传递对准问题, 国内外学者对小角度失准角情形从建模方法、滤波技术和各种误差因素对传递对准精度影响等方面展开研究^[1-2], 取得较好研究成果; 实际情况中舰载机可能会停靠在舰船甲板任意位置, 舰载机指向任意, 导致主、子惯导间初始失准角较大, 主、子系统间也可能存在较大杆臂矢量。

笔者根据舰载机惯导系统传递对准要求, 以大初始失准角情形下传递对准为研究对象, 采用速度姿态匹配方法得到适用于任意大小初始失准角情形传递对准模型, 着重研究主、子惯导系统传

递对准中存在的杆臂效应误差影响, 采用扩维法把杆臂矢量 \mathbf{r}^m 作为系统状态量进行估计, 因此本模型算法可以在杆臂效应误差没有补偿或者补偿不完全情况下使用。

1 杆臂效应误差影响分析

假设舰船重心固定, 并且主惯导安装位置 M 点与摇摆中心重合。通常情况下子惯导安装位置与 M 点不重合, 以杆臂矢量 \mathbf{r}^m 表示主、子系统相对位置矢量, 实际情况中主惯导系统存在着安装位置误差矢量, 定义机载子惯导系统相对于舰船摇摆中心为名义杆臂矢量。笔者仅考虑舰船刚性情形, 认为主惯导系统建立高精度基准系统, 不存在其它误差源, 子系统惯性器件也不存在其它误差源, 理论上分析主、子系统传递对准中杆臂矢量对机载子惯导系统的速度、加速度和姿态等计算数值影响。根据图 1 所示, 假设主、子系统都是点测量组件, 主惯导系统的质心和舰船中心重合, 即 $\mathbf{r}'_s = \mathbf{r}^m, \mathbf{R}'_o = \mathbf{R}^e_m$ 。

1.1 杆臂效应对子惯导系统速度影响

主子系统在地球系 e 中矢量 \mathbf{R}^e_m 和 \mathbf{R}^e_s 有关系

$$\mathbf{R}^e_s = \mathbf{R}^e_m + \mathbf{C}^e_m \mathbf{r}^m,$$

式中: \mathbf{C}^e_m 表示 m 系到 e 系的方向余弦矩阵。按照文献[3-5]对传递对准中杆臂效应分析, 对其两

收稿日期: 2014-09-01; 修订日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1204603)

作者简介: 丁国强(1975-), 男, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要从事非线性最优估计理论与算法与导航自动化技术研究, E-mail: dinglyit@163.com.

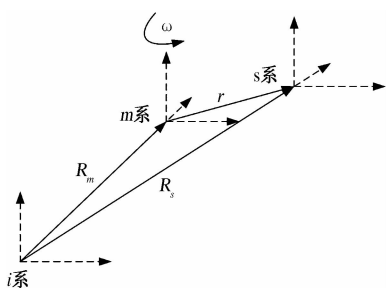


图1 主、子惯导系统之间杆臂效应原理图

Fig. 1 The principle diagram of lever-arm effects between master and slave inertial navigation system

边求导得到杆臂效应影响的速度矢量式

$$\dot{\mathbf{R}}_s^e = \dot{\mathbf{R}}_m^e + \dot{\mathbf{r}}^m + \boldsymbol{\omega}_{em} \times \mathbf{r}^m,$$

令杆臂速度 $\mathbf{V}_r^e = \dot{\mathbf{R}}_s^e - \dot{\mathbf{R}}_m^e$, 进一步整理得

$$\mathbf{V}_r^e = \dot{\mathbf{r}}^m + \mathbf{C}_m^e (\boldsymbol{\omega}_{em}^m \times \mathbf{r}^m),$$

式中: $\boldsymbol{\omega}_{em}^m$ 为舰船相对 e 系转动角速度矢量; $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{em}^m$ 为转动角加速度矢量; \mathbf{C}_m^e 可从主惯导系统姿态矩阵中提取。假设初始时刻主子系统间杆臂位移固定不变, 即 $\dot{\mathbf{r}}^m = 0$, 杆臂速度可简化为

$$\mathbf{V}_r^e = \mathbf{C}_m^e (\boldsymbol{\omega}_{em}^m \times \mathbf{r}^m).$$

将其两边同时乘 \mathbf{C}_e^n (即 e 系到 n 系的方向余弦矩阵), 得到 n 系中杆臂速度

$$\mathbf{V}_r^n = \mathbf{C}_m^n (\boldsymbol{\omega}_{em}^m \times \mathbf{r}^m). \quad (1)$$

1.2 杆臂效应对子惯导系统加速度的影响

把图1中基准坐标系由 e 系变为惯性系 (i), 相应位置矢量 \mathbf{R}_m^e 、 \mathbf{R}_s^e 和 \mathbf{R}_o^e 变为 \mathbf{R}_m^i 、 \mathbf{R}_s^i 和 \mathbf{R}_o^i , 在 i 系中推导杆臂效应影响下加速度 (比力) 表达式, 在 i 系中 \mathbf{R}_m^i 和 \mathbf{R}_s^i 关系式^[6]

$$\mathbf{R}_s^i = \mathbf{R}_m^i + \mathbf{C}_m^i \mathbf{r}^m,$$

式中: \mathbf{C}_m^i 表示主惯导系统由 m 系到 i 系的方向余弦矩阵。对其两边同时求导可得到

$$\dot{\mathbf{R}}_s^i = \dot{\mathbf{R}}_m^i + \mathbf{C}_m^i (\boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m), \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}_{im}^m$ 表示主惯导系统相对于系 i 的旋转角速度。再次对式(2)两边求导

$$\dot{\mathbf{R}}_s^i = \dot{\mathbf{R}}_m^i + \mathbf{C}_m^i (\boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{im}^m \times \mathbf{r}^m + \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times (\boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m)), \quad (3)$$

考虑到

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{R}}_m^i = \mathbf{f}_m^i + \mathbf{g}_m^i + \boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times \mathbf{R}_m^i) \\ \dot{\mathbf{R}}_s^i = \mathbf{f}_s^i + \mathbf{g}_s^i + \boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times \mathbf{R}_s^i), \end{cases}$$

式中: \mathbf{f}_m^i 和 \mathbf{f}_s^i 分别表示主子惯导加速度计敏感的比力在 i 系中的投影; \mathbf{g}_m^i 和 \mathbf{g}_s^i 分别表示主子惯导加速度计敏感的重力加速度; $\mathbf{g}_m^i + \boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times \mathbf{R}_m^i)$ 和 $\mathbf{g}_s^i + \boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{ie}^i \times \mathbf{R}_s^i)$ 分别是主子惯导加速度计敏感的万有引力分量。假设 $\mathbf{g}_m^i = \mathbf{g}_s^i$ 对式(3)整理可得到加速度计敏感比力表达式

$$\dot{\mathbf{f}}_s^i = \dot{\mathbf{f}}_m^i + \mathbf{C}_m^i (\boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{im}^m \times \mathbf{r}^m).$$

对其两边同时乘以 \mathbf{C}_m^m , 并整理得到

$$\mathbf{C}_m^s \dot{\mathbf{f}}_s^s = \dot{\mathbf{f}}_m^m + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{im}^m \times \mathbf{r}^m + \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m, \quad (4)$$

定义式(4)中的 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{im}^m \times \mathbf{r}^m + \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m$ 项为杆臂加速度 (比力)

$$\mathbf{f}_r^s = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{im}^m \times \mathbf{r}^m + \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \boldsymbol{\omega}_{im}^m \times \mathbf{r}^m. \quad (5)$$

在已知杆臂矢量情况下可以根据式(1)和式(5)计算杆臂速度和杆臂加速度 (比力), 进而在 n 系中对子惯导系统的速度输出和加速度计输出进行补偿。

2 速度姿态匹配传递对准模型

速度姿态匹配传递对准中存在两种误差角, 一种是子惯导计算载体坐标系 s^* 与主惯导载体 m 系间计算误差角 ϕ_m ; 另一种是子惯导 s 系与主惯导 m 系间的标称误差角 ϕ_a 。传递对准中把舰船主惯导作为基准系统, 认为传递对准过程中主、子惯导系统相对静止, ϕ_a 保持不变; 若子惯导系统本身存在误差, ϕ_m 会随时间发生变化, ϕ_a 和 ϕ_m 的方向余弦矩阵分别定义为

$$\mathbf{C}_m^s = \begin{bmatrix} c_{ay}c_{az} - s_{ay}s_{ax}s_{az} & c_{ay}s_{az} + s_{ay}s_{ax}c_{ay} & -s_{ay}c_{ax} \\ -c_{ax}s_{az} & c_{ax}c_{az} & s_{ax} \\ s_{ay}c_{az} + c_{ay}s_{ax}s_{az} & s_{ay}s_{az} - c_{ay}s_{ax}c_{az} & c_{ay}c_{ax} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_m^{s^*} = \begin{bmatrix} c_{my}c_{mz} - s_{my}s_{mx}s_{mz} & c_{my}s_{mz} + s_{my}s_{mx}c_{my} & -s_{my}c_{mx} \\ -c_{mx}s_{mz} & c_{mx}c_{mz} & s_{mx} \\ s_{my}c_{mz} + c_{my}s_{mx}s_{mz} & s_{my}s_{mz} - c_{my}s_{mx}c_{mz} & c_{my}c_{mx} \end{bmatrix},$$

式中: $c_{ij} = \cos \phi_{ij}$; $s_{ij} = \sin \phi_{ij}$, $i \in \{a, m\}$, $j \in \{x, y, z\}$ 。

2.1 标称误差角 ϕ_a 微分方程

在子惯导系统初始对准中, 把 ϕ_a 当作常数, 其微分方程为

$$\dot{\phi}_a = 0. \quad (6)$$

2.2 计算误差角 ϕ_m 微分方程

主惯导姿态矩阵和子惯导系统解算姿态矩阵微分方程分别为 $\dot{\mathbf{C}}_m^n = \mathbf{C}_m^n (\boldsymbol{\omega}_{nm}^m \times)$, $\dot{\mathbf{C}}_{s^*}^{n^*} = \mathbf{C}_{s^*}^{n^*} [(\boldsymbol{\omega}_{ns}^s + \boldsymbol{\epsilon}_s^s) \times]$, 式中: $\boldsymbol{\omega}_{nm}^m$ 是主惯导 m 系相对 n 系的转动角速度, 假设主、子惯导系统之间不存在相对转动, 存在 $\boldsymbol{\omega}_{ns}^s = \mathbf{C}_m^s \boldsymbol{\omega}_{nm}^m$, 分解子惯导系统解算姿态矩阵为

$$\mathbf{C}_{s^*}^{n^*} = \mathbf{C}_m^n \mathbf{C}_{s^*}^{m^*}. \quad (7)$$

对式(7)两边求导, 并连同主惯导系统和机载子惯导系统姿态微分方程一起整理获得

$$\dot{\mathbf{C}}_{s^*}^{m^*} = \mathbf{C}_{s^*}^{m^*} (\boldsymbol{\omega}_{ns}^s \times) - (\boldsymbol{\omega}_{nm}^m \times) \mathbf{C}_{s^*}^{m^*} + \mathbf{C}_{s^*}^{m^*} (\boldsymbol{\epsilon}_s^s \times), \quad (8)$$

又由于 $\dot{\mathbf{C}}_{s^*}^{m^*} = \mathbf{C}_{s^*}^{m^*} (\boldsymbol{\omega}_{ms^*}^{s^*} \times)$, 其中 $\boldsymbol{\omega}_{ms^*}^{s^*}$ 表示 s^* 系相

对 m 系旋转角速度, 考虑

$$\begin{aligned} C_m^{s*}(\omega_{nm}^m \times) C_m^{s*} &= C_m^{s*}(\omega_{nm}^m \times), \text{化简式(8)得到} \\ (\omega_{ms}^{s*} \times) &= (\omega_{ns}^s \times) - (C_m^{s*}(\omega_{nm}^m \times)) + (\varepsilon_s^s \times), \end{aligned} \quad (9)$$

把式(9)改写成向量形式

$$\omega_{ms}^{s*} = \omega_{ns}^s - C_m^{s*} \omega_{nm}^m + \varepsilon_s^s, \quad (10)$$

把 ω_{ns}^s 表达式代入式(10)中得到

$$\omega_{ms}^{s*} = (C_m^s - C_m^{s*}) \omega_{nm}^m + \varepsilon_s^s,$$

由于 $\omega_{ms}^{s*} = \dot{\phi}_m$, 则其可进一步写成

$$\dot{\phi}_m = (C_m^s - C_m^{s*}) \omega_{nm}^m + \varepsilon_s^s, \quad (11)$$

式(11)对于大角度误差角 ϕ_m 和 ϕ_a 是非线性微分方程; 如果 ϕ_a 和 ϕ_m 是小角度时, 可应用 $\sin \phi_{ij} \approx \phi_{ij}$, $\cos \phi_{ij} \approx 1$ 对 C_m^s 和 C_m^{s*} 线性化处理, 把式(11)简化为线性微分方程

$$\dot{\phi}_m = (\phi_m - \phi_a) \omega_{nm}^m + \varepsilon_s^s. \quad (12)$$

2.3 速度误差微分方程

主、子惯导速度微分方程为

$$\begin{cases} \dot{V}_m^n = C_m^n f_m^n - (2 \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V_m^n + g_m^n, \\ \dot{V}_{s*}^n = C_{s*}^n (f_s^s + \nabla_s^s) - (2 \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V_{s*}^n + g_{s*}^n, \end{cases}$$

式中: V_m^n 是主惯导在 n 系的速度; V_{s*}^n 是机载子惯导解算速度. 定义主子惯导系统的速度误差

$$\delta V = V_{s*}^n - V_m^n - V_r^n,$$

式中: 子惯导速度解算输出值减去了杆臂速度实现杆臂速度误差补偿. 对其求导得到主、子惯导系统加速度误差

$$\delta \dot{V} = \dot{V}_{s*}^n - \dot{V}_m^n - \dot{V}_r^n. \quad (13)$$

将式(1)和主、子惯导速度微分方程代入式(13)中整理获得

$$\begin{aligned} \delta \dot{V} &= C_{s*}^n (I - C_m^{s*} C_m^n) f_s^s - (2 \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V - \\ &\quad \omega_{ie}^n \times (\omega_{em}^n + \omega_{en}^n) \times r^n + C_{s*}^n \nabla_s^s. \end{aligned} \quad (14)$$

2.4 大失准角快速传递对准系统方程

文献[7-9]给出了小角度误差角传递对准系统线性化模型; 当误差角 ϕ_a 和 ϕ_m 为大角度时快速传递对准系统成为非线性系统, 即有

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + v, \\ z = Hx + \tau, \end{cases} \quad (15)$$

式中: x 和 z 分别为系统状态向量和量测向量; v 和 τ 分别为系统过程噪声和量测噪声.

考虑惯性元件误差和杆臂矢量, 系统状态向量 x 定义为 $x = [\delta V^T \quad \phi_m^T \quad \phi_a^T \quad \nabla_s^{sT} \quad \varepsilon_s^{sT} \quad r^{mT}]^T$, 假设传递对准中子惯导的陀螺漂移和加速度计偏差为常值, 有陀螺漂移误差微分方程

$$\dot{\varepsilon}_s^s = 0, \quad (16)$$

和加速度计偏差微分方程

$$\nabla \cdot \dot{s} = 0, \quad (17)$$

取主惯导和子惯导系统速度差值和 ϕ_m 作为量测量 z

$$z = \begin{bmatrix} z_v \\ z_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta V + (\omega_{em}^n \times) C_m^n r^m \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_{s*}^n - \hat{V}_m^n \\ g(\hat{C}_{s*}^{s*} \hat{C}_m^n) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

式中: \hat{V}_m^n 和 \hat{V}_{s*}^n 分别表示主、子惯导系统的速度; \hat{C}_{s*}^{s*} 和 \hat{C}_m^n 分别表示子惯导计算姿态矩阵转置和主惯导的姿态矩阵; $g(\cdot)$ 表示从方向余弦矩阵

得到 Euler 角的函数, 也可写成 $\hat{\phi}_m = g(\hat{C}_{s*}^{s*} \hat{C}_m^n)$

$= g(\hat{C}_{s*}^{s*})$. 系统量测矩阵 H

$$\text{为} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\omega_{em}^n \times) C_m^n \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3 仿真研究

3.1 仿真条件

笔者主要研究舰载机停驻在舰船甲板上进行的海上对准方式. 海上对准仿真中采用舰船三轴摇摆运动模型^[10]. 仿真参数 λ_0 和 φ_0 分别是舰船所在位置的初始经度和纬度值, 机载子惯导系统采用中等精度陀螺^[11], 随机漂移取为 $N(0, (0.1 \text{ deg/h})^2)$ 的高斯白噪声; 不考虑垂向加速度计, 机载子惯导系统的加速度计随机偏差取为 $N(0, (10^{-5} g)^2)$ 的高斯白噪声; 机载子惯导系统的初始 ϕ_{a0} 数值比较大. 模型仿真中, 杆臂矢量初始值设三组 $r_{0i}^m = [r_{0ix}^m \ r_{0iy}^m \ r_{0iz}^m]^T$ ($i = 1, 2, 3$). 根据文献[12~16], 按照文献[17]方法选用 UKF 滤波器进行滤波估计计算.

仿真研究取初始水平速度误差为 $\delta V_0 = [\delta V_{0x} \ \delta V_{0y}]^T$ 情况下比较杆臂估计对标称误差角估计影响, 有杆臂估计时取初始杆臂矢量为 r_{02}^m 获得仿真图 2; 仿真研究取初始姿态误差 $\delta \phi_0 = [\delta \phi_{x0} \ \delta \phi_{y0}]^T$ 情况下杆臂估计对机载子惯导系统导航坐标系相对标称导航坐标系的对准误差 $\delta \phi_s$, 有杆臂估计时取初始杆臂矢量为 r_{02}^m , 得到仿真图 3 和 $\delta \phi_s$ 数据表 2; 分别取定杆臂矢量初始值为 $r_{01}^m = [2 \ 20]^T$ 、 $r_{02}^m = [10 \text{ m} \ 10 \text{ m} \ 10 \text{ m}]^T$ 和 $r_{03}^m = [20 \text{ m} \ 20 \text{ m} \ 20 \text{ m}]^T$ 3 种情况, 对比杆臂误差对 ϕ_a 估计误差影响的仿真图 4.

3.2 仿真数据分析

从仿真图 2 看出, 有杆臂估计传递对准算法中, 初始速度误差取为定值情况下 ϕ_a 估计误差是稳态误差, 且其不受杆臂估计影响, 因为在系统方程的杆臂相关项 $-\omega_{ie}^n \times (\omega_{em}^n + \omega_{en}^n) \times (C_m^n r^m)$ 和 $\omega_{em}^n \times (C_m^n r^m)$, 中杆臂系数与舰船运动有关; 另

外仿真中取常值速度误差 55 m/s,不能反映到杆臂效应中去,有杆臂效应系统模型算法不能抵消系统速度误差的影响。

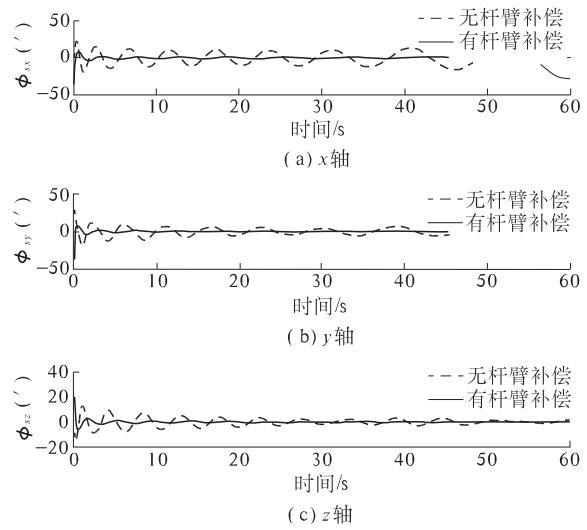


图 2 计算失准角补偿对比曲线
Fig. 2 The comparison curve of calculations misalignment angle compensation

图 3 中取定姿态误差如表 1 中数据比较杆臂矢量对子惯导 $\delta\phi_s$ 影响,有杆臂估计时 $\delta\phi_s$ 得到明显降低,对准精度得到提高;尤其是方位误差角的计算误差显著减小。

表 1 $\delta\phi_s$ 仿真误差数据表

Tab. 1 The simulation error data about variable $\delta\phi_s$

参数名		$\delta\phi_{sx}$	$\delta\phi_{sy}$	$\delta\phi_{sz}$
有杆臂估计	估计值	0.050°	0.015°	0.061 5°
无杆臂估计	估计值	0.150°	-0.027°	0.341 1°

图 4 针对不同的杆臂矢量初始值仿真出它们对 ϕ_a 估计误差影响较大。

表 2 仿真误差数据表

Tab. 2 The simulation error data about variable ϕ_a

参数名	ϕ_{ax}	ϕ_{ay}	ϕ_{az}
估计值 1	0°	0°	0°
估计值 2	2.51°	8.12°	-20.11°
估计值 3	-1.07°	2.52°	-60.13°

当杆臂矢量初始值为(0 0 0)时,失准角 3 个分量的估计误差趋于零值;杆臂矢量初始值达到(30 15 2)m 时,失准角 3 个分量的估计误差分别增加了2.5°、8°和20°;当其达到(50 45 20)m 时,失准角 3 个分量的估计误差分别增加 1°、2.5°和 60°。可见初始杆臂矢量越大,失准角 3 个分量的估计误差就越大,尤其对方位失准角估计误差的影响特别大。

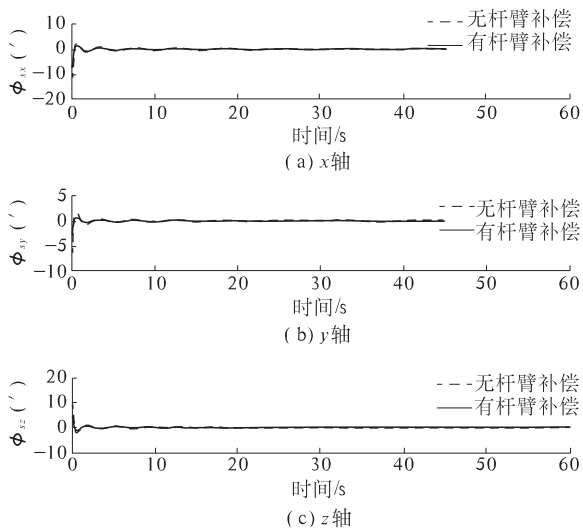


图 3 计算姿态失准角估计误差比较曲线
Fig. 3 The comparison curve of calulate attitude misalignment angle estimation error

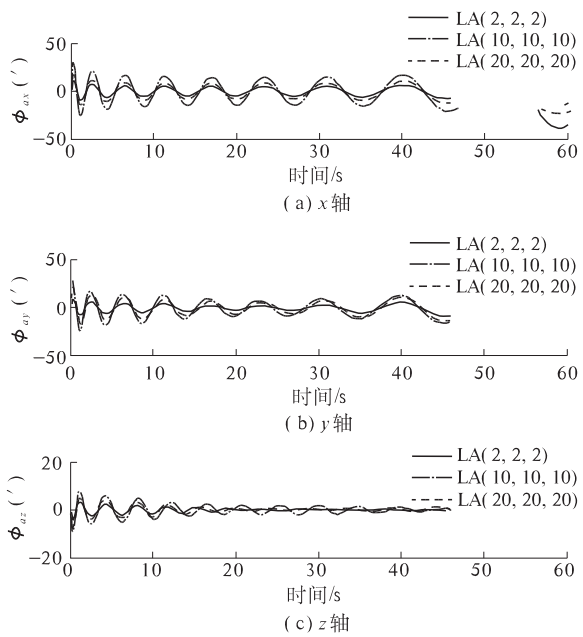


图 4 标称失准角在三种初始杆臂矢量情况下的估计曲线
Fig. 4 The comparison curve of normal attitude misalignment angle estimation error under the three kinds of initial lever arm vectors

4 结论

从舰船舰载机惯导系统初始对准的实际需求出发,考虑杆臂效应误差存在情况,建立主、子惯导系统快速传递对准模型,模型适用于任意角度初始失准角情形,而且提高了模型的计算精度和准确性.该快速对准模型包含杆臂矢量的估计,可以在杆臂误差没有补偿或者补偿不完全的情况下使用.仿真研究结果验证了模型在舰载机惯导系统海上大角度失准角传递对准过程中的有效性以

及模型算法准确性和较高的对准精度。

参考文献:

- [1] 王勇军. 舰载机惯导对准技术研究[D]. 西安: 西北工业大学航海学院, 2007.
- [2] 高伟, 张亚, 孙骞, 等. 传递对准中杆臂效应的误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 559 - 564.
- [3] 刘锡祥, 徐晓苏. 大杆臂条件下传递对准算法的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(5): 1051 - 1058.
- [4] 刘锡祥, 徐晓苏. 传递对准中杆臂长度误差的估计与可观测度分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 247 - 251.
- [5] 丁国强. 惯性导航系统传递对准技术关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2010.
- [6] PAUL D G. Optimising the transfer alignment of weapon INS[J]. Journal of Navigation, 2003(56): 323 - 335.
- [7] CHAUDHURI S K, NANDI P K. Transfer alignment for space vehicles launched from a moving base[J]. Defence Science Journal, 2005, 55(3): 245 - 252.
- [8] 孙伟, 孙枫. 基于 SINS 的杆臂效应误差补偿方法研究[J]. 控制与决策, 2012, 27(6): 891 - 903.
- [9] JAMES R H, VICTOR K HUDDLE J R, CHUEH VK. U S US7206694 B2. Transfer alignment of navigation system[P]. 2007 - 4 - 17.
- [10] 万德钧, 房建成. 惯导系统初始对准[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998: 124.
- [11] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. London: Lavenham Press Ltd, 1997: 193 - 185.
- [12] 李鹏飞, 奔粤阳, 张亚, 等. 基于捷联惯导系统的杆臂效应误差分析[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(3): 53 - 55.
- [13] LEE T H, RA W S, YOON T S, et al. Robust Kalman via Krein space estimation[J]. IEEE Proc. Control Theory Appl. 2004, 151(1): 59 - 63.
- [14] ZHU X, SOH C Y, XIE L. Design and Analysis of Discrete-time Robust Kalman Filters[J]. Automatica, 2002, 38(6): 1069 - 1077.
- [15] BABAK H, ALI H S, KAILATH T. Linear estimation in Krein spaces-part I: theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(1): 18 - 33.
- [16] DIMITRIYEV S P, STIPANOV O A, SHEPEL S V. Nonlinear filtering methods application in INS alignment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 17 - 272.
- [17] 程向红, 仲小丽, 冉昌艳, 等. 箭载 SINS 杆臂效应频域处理方法[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1): 61 - 79.

The Lever-arm Error Effect Research in Transfer Alignment Model with Large Initial Misalignment Angles

DING Guo-qiang¹, MA Jun-xia², XIONG Ming¹, Qiao Xiang-wei³

(1. College of Electrical & Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Software Engineering College, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 3. Xi'an Aerospace Precision Electromechanical Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Proceeding from actual technological needs of the inertial navigation system's initial alignment technology of warship shipboards, specific to rigidity shipboards, this paper analyzed the affect expressions of Lever-arm effect of transfer alignment process in strap-down inertial navigation system's velocity and acceleration (ecificforce) with the effect of lever-arm error vector, and in the situation of large initial misalignment angles, and with the conceptions of the nominal misalignment angle and calculated angle developed the velocity and attitudes matching transfer alignment model algorithm with large misalignment attitudes of SINS' other than traditional models, and carried out the system states and parameters estimation performance research. The simulated results indicate that the model algorithm performance, with comparison studying inhering lever-arm vector error's influence on SINS misalignment attitudes' estimation error and its alignment accuracy, and with different initial lever-arm vectors their effects on misalignment attitudes' estimation error and its accuracy, and verified the model algorithm's validity and its superior alignment accuracy, and the research results are of great theory and application value in design of SINS.

Key words: transfer alignment; lever-arm effect error; nominal misalignment angle; velocity and attitude matching; error compensation