

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.017

# 基于矢量信息分配的 INS/GNSS/CNS 组合导航系统

周卫东, 王巧云

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 针对组合导航系统中多传感器输出不同步的问题, 提出一种基于矢量信息分配的异步联邦滤波算法的 INS/GNSS/CNS 组合方案, 根据各子系统的工作特性, 分析并设计了基于 INS/GNSS 位置组合以及 INS/CNS 姿态组合的联邦滤波模型, 并采用矢量形式的信息分配方法提高了滤波器的精度. 针对量测异步问题, 设计了时间与量测更新分离的异步非等间隔算法. 系统仿真实验表明, 该算法可以有效地实现对 INS、GNSS、CNS 的多信息的异步融合, 与常规异步滤波方法相比较, 组合系统的滤波精度有明显提高, 具有重要的实际应用价值.

**关键词:** 组合导航; INS/GNSS/CNS; 联邦滤波; 信息分配; 异步模型

**中图分类号:** V249.32      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2015)04-0099-05

## The INS/GNSS/CNS integrated navigation system based on vector information distribution

ZHOU Weidong, WANG Qiaoyun

(College of Automation, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** To solve the problem of asynchronism of sensors' outputs in integrated navigation systems a novel INS/GNSS/CNS integrated federated filtering algorithm based on dynamic vector formed information distribution is proposed. Based on the operating character of the subsystems, an INS/GNSS position integrated model and an INS/CNS velocity integrated model are analysed and designed as the federated filtering model. And the filtering accuracy is improved by using the dynamic vector formed information distribution algorithm. To solve the problem of asynchronism in measurement, an asynchronous incoordinate interval algorithm is proposed, and the filtering period is divided into time update period and measurement update period. Simulation results indicate that this algorithm can effectively implement the asynchronism fusion of the information from INS, GNSS and CNS. Comparing with the general asynchronism federated filter, the proposed algorithm has significant improvement in estimation accuracy and important application value.

**Keywords:** integrated navigation; INS/GNSS/CNS; federated filter; information distribution; asynchronism filter

随着高空长航飞行技术的发展, 对导航系统精度以及实时性要求不断提高, 单一的导航系统已经无法满足飞行器的导航需求, 多系统构成的组合导航系统受到了越来越多的关注和研究. 考虑到惯导系统的自主实时性, 卫星系统的高精度定位性能以及天文导航系统的高精度定姿特性, 将惯导、卫星、天文导航系统组合起来构成的 INS/GNSS/CNS 组合导航系统成了主要的研究方向<sup>[1]</sup>.

在组合导航系统多传感器信息融合中, 主要有集中式滤波和分布式滤波两种算法<sup>[2]</sup>. 其中 Carlson

等提出的分散化联邦滤波算法在不增加计算量的基础上提高了系统的容错性能, 因此得到了广泛应用<sup>[3-4]</sup>. 常规的联邦滤波采用均值分配原则对导航子系统进行信息分配<sup>[5]</sup>, 考虑到此分配方法无法满足飞行器实际飞行过程中的高动态运动环境和导航系统异步非等间隔滤波实时性的要求, 文献<sup>[6]</sup>研究了一种动态矢量形式的分配算法, 通过提取系统协方差矩阵的特征值和观测阵的奇异值, 推导出了矢量形式的信息分配公式, 有效提高了联邦滤波的精度. 另一方面, 对于多传感器信息融合过程中必然会出现的量测异步问题, 文献<sup>[7]</sup>通过硬件方法设计了时间同步装置, 但该方法实现的成本较高. 文献<sup>[8]</sup>使用扩充状态的扩展卡尔曼滤波器解决异步问题, 但由于状态扩充使得计算量增加. 文

收稿日期: 2014-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金(61102107; 61374208).

作者简介: 周卫东(1966—), 男, 博士生导师.

通信作者: 王巧云, 626992529@qq.com.

献[9]提出了一种异步集中式滤波处理法,该方法能比较好地处理多传感器异步带来的误差,但集中式滤波器的容错性能较差<sup>[10]</sup>.本文以 INS、GNSS、CNS 多传感器信息融合技术为背景,设计了基于动态矢量信息分配的 INS/GNSS/CNS 分布式联邦滤波器模型,分析并推导出了 INS/GNSS 位置组合以及 INS/CNS 姿态组合算法.针对多传感器量测异步问题设计了将时间与量测更新分离的异步非等间隔算法模型.解决了组合导航系统的信息异步融合问题,并提高了系统滤波精度.

## 1 系统设计与建模

### 1.1 组合导航系统联邦滤波器模型

本文提出的基于联邦滤波的 INS/GNSS/CNS 组合导航系统结构模型如图 1 所示.该滤波器中子滤波器分别进行时间和量测更新,主滤波器进行信息最优融合.矢量分配系数为  $C_i$ ,子滤波器的信息分配按  $\sqrt{C_1^{-1}P_g}\sqrt{C_1^{-1}}$ ,  $\sqrt{C_2^{-1}P_g}\sqrt{C_2^{-1}}$  原则进行<sup>[11-12]</sup>,其中  $P_g$  为全局状态估计误差方差矩阵.

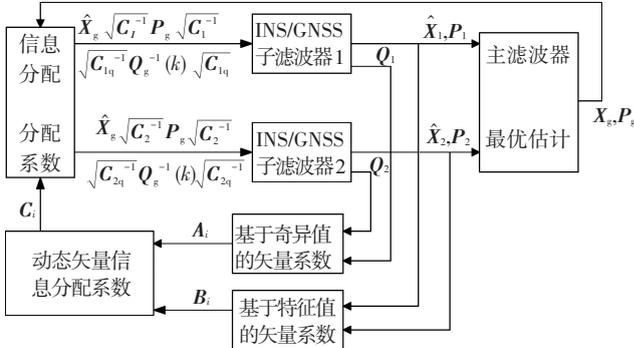


图 1 基于矢量信息分配的 INS/GNSS/CNS 组合导航系统联邦滤波模型

### 1.2 INS/GNSS/CNS 组合导航系统模型

选取东北天地理坐标系为导航坐标系,导航系统状态量选取为 INS 的误差量<sup>[13]</sup>,量测量分别为 INS 与 GNSS 给出的位置信息差值<sup>[14]</sup>和 INS 与 CNS 给出的姿态信息差值<sup>[15]</sup>,以此构建组合系统的状态和量测方程.组合系统的状态方程为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t). \quad (1)$$

式中:  $F(t)$  为组合导航系统误差方程所对应的系统矩阵;  $X(t)$  为组合导航系统状态向量;  $G(t)$  为组合导航系统误差方程所对应的系统噪声矩阵;  $W(t)$  为组合导航系统误差方程所对应的系统噪声向量.

INS 作为组合系统的参考系统,取其 18 维误差量作为状态量  $X_1$ :  $X_1 = [\Phi \ \delta V \ \delta r \ \varepsilon_b \ \varepsilon_r \ \nabla_a]^T$ ,其中状态量依次

为 INS 平台角误差  $\Phi$ ,速度误差  $\delta V$ ,位置误差  $\delta r$ ,陀螺随机常值和一阶马尔科夫漂移  $\varepsilon_b, \varepsilon_r$  以及加速度计误差  $\nabla_a$ . INS 系统噪声向量  $W_1$  为

$$W_1 = [w_{gx} \ w_{gy} \ w_{gz} \ w_{rx} \ w_{ry} \ w_{rz} \ w_{ax} \ w_{ay} \ w_{az}]^T.$$

对于卫星子系统,取 GNSS 的 3 维位置误差量作为其状态变量  $X_C$ :  $X_C = [\delta L_C \ \delta \lambda_C \ \delta h_C]^T$ .对于天文子系统,取 CNS 的 3 维姿态误差量作为其状态变量  $X_c$ :  $X_c = [\delta \gamma_C \ \delta \theta_C \ \delta \psi_C]^T$ .

则 INS/GNSS 子系统和 INS/CNS 子系统的状态方程分别为

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & \\ & F_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 & \\ & G_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_C \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & \\ & F_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 & \\ & G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中: INS 的状态量  $X_1$  为组合系统的公共状态量;  $F_1, F_C, F_c$  分别为 INS、GNSS、CNS 导航子系统误差方程对应的系统矩阵;  $W_C, W_c$  均为白噪声阵.

针对 INS/GNSS 子系统,量测误差考虑为高斯白噪声,量测方程为

$$Z_1(t) = \begin{bmatrix} (L_1 - L_C)R_N \cos L \\ (L_1 - L_C)R_M \\ h_1 - h_C \\ R_N \cos L \delta L + N_E \\ R_M \delta L + N_N \\ \delta h + N_U \end{bmatrix} = [H_1(t) \ H_C(t)]X(t) + V_1(t). \quad (4)$$

式中:  $R_M, R_N$  分别为地球子午圈和卯酉圈半径;  $H_1 = [0_{3 \times 6} \ \text{diag}[R_N \cos L \ R_M \ 1] \ 0_{3 \times 9}]$  和  $H_C = [-I_{3 \times 3}]$  为量测矩阵;噪声量  $V_1 = [N_E \ N_N \ N_U]^T$ ,  $\lambda_1, L_1, h_1$  分别为 INS 给出的经纬度及高度信息,  $\lambda_C, L_C, h_C$  分别为 GNSS 给出的经纬度及高度信息.

针对 INS/CNS 子系统,量测误差考虑为高斯白噪声,量测方程为

$$Z_2(t) = \begin{bmatrix} \gamma_1 - \gamma_C \\ \theta_1 - \theta_C \\ \psi_1 - \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_\gamma + N_{CE} \\ \varphi_\theta + N_{CN} \\ \varphi_\psi + N_{CU} \end{bmatrix} = [H_2(t) \ H_C(t)]X(t) + V_2(t). \quad (5)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \psi}{\cos \theta} & -\frac{\cos \psi}{\cos \theta} & 0 \\ -\cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\frac{\sin \psi \sin \theta}{\cos \theta} & -\frac{\cos \psi \sin \theta}{\cos \theta} & 1 \end{bmatrix} 0_{3 \times 15}$$

$$\mathbf{H}_C = -\frac{1}{\cos \theta} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta & 0 \\ \cos \psi \sin \theta & \sin \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

式中:  $\mathbf{H}_2, \mathbf{H}_C$  为量测矩阵, 噪声量  $\mathbf{V}_2 = [N_{CE} \ N_{CN} \ N_{CU}]^T$ ,  $\gamma_1, \theta_1, \psi_1$  分别为INS给出的横滚、俯仰和航向角,  $\gamma_C, \theta_C, \psi_C$  分别为CNS给出的横滚、俯仰和航向角,  $\varphi_\gamma, \varphi_\theta, \varphi_\psi$  为横滚、俯仰及航向角误差。

### 1.3 基于矢量形式信息分配的联邦滤波算法

结合INS/GNSS/CNS组合导航系统特性,对采用矢量形式信息分配的联邦滤波算法如下。

#### 1.3.1 矢量形式的信息分配过程

1) 求解反应系统状态估计精度的矢量系数  $\mathbf{A}_i$ 。提取出子系统的误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_i$ , 并将该矩阵进行特征值分解, 即

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{G}_i \mathbf{A}_i \mathbf{G}_i^T \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{A}_i = \text{diag}\{\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in}\}$ ,  $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in}$  均为矩阵  $\mathbf{P}_i$  的特征值。信息分配原则为给精度高的子系统分配更大的系数, 因此可推导得矢量系数  $\mathbf{A}_i$ 。

$$\mathbf{A}_i = \text{diag}\{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\} \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{A}_i$  满足信息守恒原则  $\sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i = \mathbf{I}_{18 \times 18}$ , 且有

$$a_{ij} = \frac{\frac{1}{\alpha_{ij}}}{\frac{1}{\alpha_{1j}} + \frac{1}{\alpha_{2j}} + \dots + \frac{1}{\alpha_{nj}}}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

2) 求解反应系统可观测程度的矢量系数  $\mathbf{B}_i$ 。在对组合导航系统的可观测性分析过程中, 为简化分析过程, 一般采用分段线性定常系统的奇异值分解进行分析。假设某段时间系统的可观测性矩阵为  $\mathbf{Q}$ , 对其进行奇异值分解, 即

$$\mathbf{Q} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{r \times r} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A}_{r \times r} = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r\}$ , 且有  $\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]$  及  $\mathbf{V} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]$  为任意正交矩阵,  $r, \sigma_i$  分别为可观测性矩阵的秩和奇异值。基于精度高的子系统分配系数大的原则, 可推导得矢量系数  $\mathbf{B}_i$ 。

$$\mathbf{B}_i = \text{diag}\{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}\} \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{B}_i$  满足信息守恒原则  $\sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i = \mathbf{I}_{18 \times 18}$ , 且有

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{1j} + \sigma_{2j} + \dots + \sigma_{nj}}, & \sigma_{ij} \neq 0; \\ 0, & \sigma_{ij} = 0. \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

3) 综合求解信息分配矢量系数  $\mathbf{C}_i$ 。为更好地进行信息的调整优化, 因此联合  $\mathbf{A}_i$  和  $\mathbf{B}_i$  得到联邦滤波矢量分配系数  $\mathbf{C}_i$ 。

$$\mathbf{C}_i = 0.5(\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i) = \text{diag}\{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}\} \quad (12)$$

式中:  $c_{ij} = 0.5(a_{ij} + b_{ij})$ , 此时信息分配系数  $\mathbf{C}_i$  依旧满足信息守恒原则。

4) 对联邦滤波信息分配公式进行改造。为保证滤波的一致收敛稳定性, 需要子系统误差协方差阵  $\mathbf{P}_i$  为对称阵, 而由上述信息分配系数得到子系统的分配协方差阵中有

$$\mathbf{P}_i(k)(1,2) = \frac{1}{c_{i1}} \cdot P_{g11} \neq \mathbf{P}_i(k)(2,1) = \frac{1}{c_{i2}} \cdot P_{g21}$$

式中:  $P_{gij}$  为全局估计误差方差矩阵  $\mathbf{P}_g$  的第  $i$  行第  $j$  列数值; 此时滤波子系统误差协方差阵为不对称阵。令  $\mathbf{P}_i^{-1}(k) = \sqrt{\mathbf{C}_i} \mathbf{P}_g^{-1}(k) \sqrt{\mathbf{C}_i}$ , 可推导得

$$\mathbf{P}_i(k) = \begin{bmatrix} \frac{P_{g11}}{c_{i1}} & \frac{P_{g12}}{\sqrt{c_{i1}c_{i2}}} & \dots & \frac{P_{g1n}}{\sqrt{c_{i1}c_{in}}} \\ \frac{P_{g21}}{\sqrt{c_{i1}c_{i2}}} & \frac{P_{g22}}{c_{i2}} & \dots & \frac{P_{g2n}}{\sqrt{c_{i2}c_{in}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{P_{gn1}}{\sqrt{c_{i1}c_{in}}} & \frac{P_{gn2}}{\sqrt{c_{i2}c_{in}}} & \dots & \frac{P_{gnn}}{c_{in}} \end{bmatrix}$$

此时子系统的误差协方差阵为对称阵。则可对子系统的过程信息  $\mathbf{Q}_i^{-1}(k)$  和  $\mathbf{P}_i^{-1}(k)$  进行信息分配, 改进后的信息分配公式为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_i^{-1}(k) = \sqrt{\mathbf{C}_i} \mathbf{P}_g^{-1}(k) \sqrt{\mathbf{C}_i}, \\ \mathbf{Q}_i^{-1}(k) = \sqrt{\mathbf{C}_{iq}} \mathbf{Q}_g^{-1}(k) \sqrt{\mathbf{C}_{iq}}, \\ \hat{\mathbf{X}}_i(k) = \hat{\mathbf{X}}_g(k). \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{C}_{iq}$  为矢量信息系数  $\mathbf{C}_i$  阵的后 9 个对角线元素。

#### 1.3.2 联邦滤波算法

结合上述过程确定的信息分配算法, 可得到本文所用的联邦滤波具体过程如下。

1) 确定起始时刻系统协方差矩阵  $\mathbf{P}_{g,0}$ , 并按信息分配原则将其分配到各子滤波器和主滤波器中, 即

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{i,k}^{-1} = \sqrt{\mathbf{C}_{i,k}} \mathbf{P}_{g,k}^{-1} \sqrt{\mathbf{C}_{i,k}}, \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{C}_{i,k} = \mathbf{I}. \end{cases} \quad (14)$$

2) 公共系统噪声  $\mathbf{Q}_i$  和状态估计值  $\hat{\mathbf{X}}_i$  的分配, 即

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_{i,k}^{-1} = \sqrt{\mathbf{C}_{iq,k}} \mathbf{Q}_{g,k}^{-1} \sqrt{\mathbf{C}_{iq,k}}, \\ \hat{\mathbf{X}}_{i,k} = \hat{\mathbf{X}}_{g,k}. \end{cases} \quad (15)$$

3) 各子滤波器和主滤波器进行时间更新, 即

$$\begin{cases} \hat{X}_{i,k/k-1} = \Phi_{i,k/k-1} \hat{X}_{i,k-1}, \\ P_{i,k/k-1} = \Phi_{i,k/k-1} P_{i,k-1} \Phi_{i,k/k-1}^T + \Gamma_{i,k/k-1} Q_{i,k-1} \Gamma_{i,k/k-1}^T. \end{cases} \quad (16)$$

式中： $\Phi_{i,k/k-1}$  为第  $i$  个子滤波器对应的状态转移矩阵； $\Gamma_{i,k/k-1}$  为其对应的噪声驱动阵。

4) 各子滤波器利用对应子传感器量测信息进行量测更新，即

$$\begin{cases} \hat{X}_{i,k} = \hat{X}_{i,k/k-1} + K_{i,k} [Z_{i,k} - H_{i,k} \hat{X}_{i,k/k-1}], \\ K_{i,k} = P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T [H_{i,k} P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T + R_{i,k}]^{-1}, \\ P_{i,k} = [I - K_{i,k} H_{i,k}] P_{i,k/k-1} [I - K_{i,k} H_{i,k}]^T + K_{i,k} R_{i,k} K_{i,k}^T. \end{cases} \quad (17)$$

式中： $K_{i,k}$  为第  $i$  个子滤波器的滤波增益矩阵。

5) 主滤波器进行信息融合，即

$$\begin{cases} P_{g,k}^{-1} = \sum_{i=1}^n P_{i,k}^{-1}, \\ \hat{X}_{g,k} = P_{g,k} \sum_{i=1}^n P_{i,k}^{-1} \hat{X}_{i,k}. \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\hat{X}_g$  和  $P_g$  分别为全局状态估计及其对应的估计误差方差矩阵。

### 1.4 INS/GNSS/CNS 组合系统信息异步算法

由于不同导航系统的数据输出频率不同，导致滤波子系统的量测周期不同，此异步问题会导致滤波精度降低。本文采用非等间隔滤波算法来解决此问题。

设子系统量测周期分别为  $T_i$ ，子滤波器与主滤波器的计算周期均为  $T_c = GCD(T_1, T_2, \dots, T_n)$ ，融合周期为  $T_f = LCM(T_1, T_2, \dots, T_n)$ 。此时令  $T_i = k_i T_c$ 。当  $k = LCM(k_1, k_2, \dots, k_n)$ ，即各子系统均存在量测输入时，可直接按照本文 1.3.2 小节给出的算法进行滤波；当  $k \neq LCM(k_1, k_2, \dots, k_n)$  时，表示此时只有一个或没有子系统存在量测输入，对应的子滤波器信息更新过程和主滤波器信息融合过程如下。

1) 子滤波器信息更新过程。用  $k_p$  表示当前子滤波器进行更新的时刻，当  $k = k_p$  时，同时进行时间和量测的更新，即

$$\begin{cases} P_{i,k/k-1} = \Phi_{i,k/k-1} P_{i,k-1} \Phi_{i,k/k-1}^T + \Gamma_{i,k/k-1} Q_{i,k-1} \Gamma_{i,k/k-1}^T, \\ \hat{X}_{i,k/k-1} = \Phi_{i,k/k-1} \hat{X}_{i,k-1}, \\ \hat{X}_{i,k} = \hat{X}_{i,k/k-1} + K_{i,k} [Z_{i,k} - H_{i,k} \hat{X}_{i,k/k-1}], \\ K_{i,k} = P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T [H_{i,k} P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T + R_{i,k}]^{-1}, \\ P_{i,k} = [I - K_{i,k} H_{i,k}] P_{i,k/k-1} [I - K_{i,k} H_{i,k}]^T + K_{i,k} R_{i,k} K_{i,k}^T. \end{cases}$$

当  $k \neq k_p$  时，即表示当前子滤波器的计算周期到来时没有量测信息输入，此时只进行时间更新，即

$$\begin{cases} P_{i,k/k-1} = \Phi_{i,k/k-1} P_{i,k-1} \Phi_{i,k/k-1}^T + \Gamma_{i,k/k-1} Q_{i,k-1} \Gamma_{i,k/k-1}^T, \\ \hat{X}_{i,k/k-1} = \Phi_{i,k/k-1} \hat{X}_{i,k-1}. \end{cases}$$

2) 主滤波器信息融合过程。主滤波器没有信息分配和量测输入，因此只进行信息融合。当计算周期到来时存在一个或一个以上子滤波器有量测更新时，主滤波器就进行信息融合以确保不丢失任何信息，融合公式参见式 (18)。

## 2 算例仿真与结果分析

仿真初始条件为：飞行器初始位置为东经  $110^\circ$ ，北度  $20^\circ$ ，飞行高度  $400 \text{ m}$ ，初始速度为  $0 \text{ m/s}$ ，初始航向角为  $90^\circ$ 。飞行轨迹包含爬升、变速和转弯等状态，仿真共进行  $500 \text{ s}$ 。INS 采样周期为  $0.02 \text{ s}$ ，GNSS 的数据输出频率为  $1 \text{ Hz}$ ，水平和垂直距离误差均为  $30 \text{ m}$ ，CNS 数据输出频率为  $1.5 \text{ Hz}$ ，所用传感器精度为  $5''$ ，滤波器信息融合周期均为  $1 \text{ s}$ 。惯导系统的等效陀螺漂移为  $0.1^\circ/\text{h}$ ，等效加速度计零偏为  $0.000 \text{ 1g}$ ，陀螺一阶马尔科夫相关时间为  $3\ 600 \text{ s}$ ，加速度一阶马尔科夫相关时间为  $1\ 800 \text{ s}$ 。

在联邦滤波算法信息分配过程中，分别采用常规方法和动态矢量两种方法，并同时对具有异步算法的组合系统模型进行仿真，在表 1 中给出了两种方法应用在组合导航系统时的滤波误差均方差，图 2~7 为两种方法的仿真结果。其中仿真 1 表示常规平均信息分配法的仿真结果，仿真 2 表示动态矢量信息分配法的仿真结果。

表 1 组合导航结果误差均方差

方法	经度/m	纬度/m	高度/m	$\delta\gamma/ (")$	$\delta\theta/ (")$	$\delta\psi/ (")$
仿真 1	3.524	4.571	4.817	9.231	10.264	9.876
仿真 2	1.437	2.054	2.143	8.314	8.756	8.735

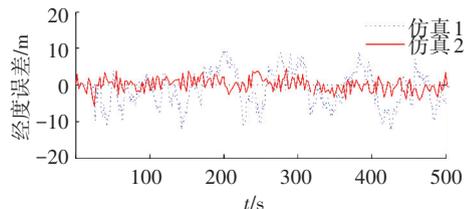


图 2 经度误差对比曲线

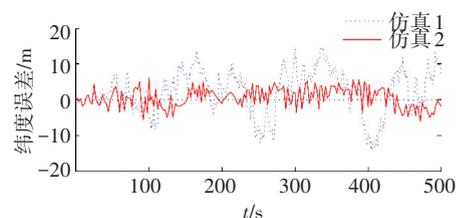


图 3 纬度误差对比曲线

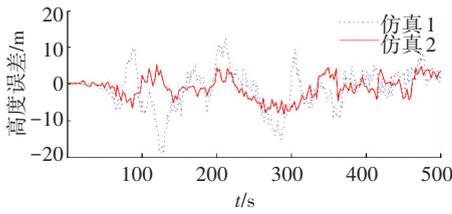


图4 高度误差对比曲线

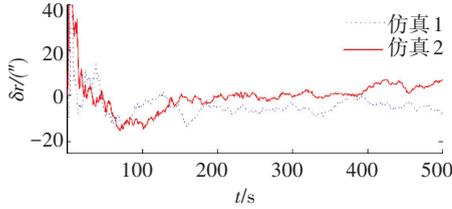


图5 横滚角误差对比曲线

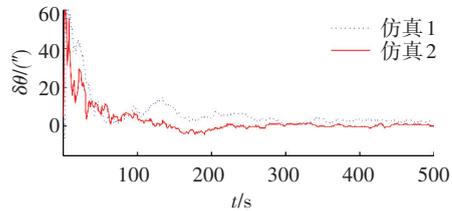


图6 俯仰角误差对比曲线

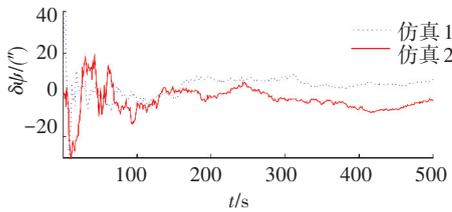


图7 航向角误差对比曲线

仿真结果表明:本文提出的组合导航系统方案与常规INS/GNSS/CNS联邦滤波模型相比较,由表1可以看出组合导航结果误差均方差明显减小,说明本方案能有效地提高组合导航系统的性能.由图2~4的位置误差对比可以看出,采用本方案时位置误差波动范围明显减小,滤波误差估计方差更加稳定,位置误差精度提高了一倍.由图5~7的姿态误差对比可以看出,采用本方案时姿态误差收敛速度加快,误差曲线更加平缓,姿态误差精度也有一定的改善和提高.

### 3 结论

1)从解决INS/GNSS/CNS组合导航系统多传感器量测输出不同步的问题出发,提出了解决该问题的INS/GNSS/CNS联邦滤波方案.设计了时间更新与量测更新分离的异步非等间隔联邦滤波模型,解决了组合系统的多传感器异步融合问题.并采用矢量形式的信息分配方法,与常规联邦滤波方法相比较,提高了组合系统的导航精度.

2)提出的基于矢量信息分配的INS/GNSS/

CNS组合导航系统没有改变联邦滤波器的结构,也没有增加计算量.该滤波算法也同样适用于具有类似特性的其他多传感器信息融合的组合导航系统,具有较强的理论价值和实际意义.

### 参考文献

- [1] WANG R, XIONG Z, LIU J, et al. SINS/GPS/CNS information fusion system based on improved Huber filter with classified adaptive factors for high-speed UAVs [C]//Position Location and Navigation Symposium. Myrtle Beach, SC: IEEE, 2012: 441-446.
- [2] CABALLERO-AGUILA R. Information fusion algorithms for state estimation in multi-sensor systems with correlated missing measurements [J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 226: 548-563.
- [3] GAO S, ZHONG Y, ZHANG X, et al. Multi-sensor optimal data fusion for INS/GPS/SAR integrated navigation system [J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(4): 232-237.
- [4] 华冰,刘建业,熊智,等. SINS/北斗/星敏感器组合导航系统研究[J]. 应用科学学报, 2006, 24(2): 120-124.
- [5] 王海波,蔡迎波. 基于联邦滤波的INS/GPS/CNS位置、姿态组合算法[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(2): 1-4.
- [6] XIONG Zhi, CHEN Jihui. A new dynamic vector formed information sharing algorithm in federated filter [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 29(3): 37-46.
- [7] 冷雪飞,刘建业,熊智. SAR/INS/TAN组合导航系统中的滤波算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(1): 23-25.
- [8] DING W D, WANG J L, LI Y. Times synchronization error and calibration in integrated GPS/INS systems [J]. ETRL Journal, 2009, 30(1): 59-67.
- [9] 于永军,刘建业. 非同步量测特性的惯性/星光/卫星组合算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2761-2767.
- [10] 刘准,陈哲. 基于联邦滤波器的新型故障检测结构及算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 550-554.
- [11] WOFFINDEN D C, GELLER D K. Observability criteria for angles-only navigation [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transaction on, 2009, 45(3): 1194-1208.
- [12] HU X, LIU F, WENG H. Observability analysis of MSINS/GPS complete integrated system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 38-45.
- [13] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 赵琳,丁继成,马雪飞. 卫星导航原理及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011.
- [15] 房建成,宁晓琳,田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

(编辑 魏希柱)