

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2016.06.005

## 基于改进联邦 Kalman 滤波的组合校准方法研究

陈晶<sup>1</sup>,袁书明<sup>1</sup>,程建华<sup>2</sup>,曹新宇<sup>2</sup>

(1. 海军装备研究院,北京 100161;2. 哈尔滨工程大学自动化学院,哈尔滨 150001)

**摘要:**联邦滤波器广泛应用于多传感器信息融合领域,联邦滤波中的信息分配原则影响滤波精度。针对联邦 Kalman 滤波器进行改进,采用基于估计协方差阵奇异值动态确定信息分配系数。对子滤波器进行重置时,采用新的重置方法,保证了子滤波器误差协方差阵的对称性,确保 Kalman 滤波器的一致收敛稳定性。新的联邦滤波算法允许每个状态分量拥有不同的动态信息分配因子,从而改进了联邦滤波信息融合的精度。设计了 SINS/GPS/电子罗盘组合导航系统,仿真结果说明,与传统联邦滤波算法相比,改进的联邦滤波器估计精度得到了提高,可以更好地对 SINS 误差进行校准,提高系统的精度。

**关键词:**信息分配;信息融合;联邦滤波;组合校准

中图分类号:U666.12

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2016)06-0021-05

### Research on Integrated Calibration Based on Improved Federated Kalman Filter

CHEN Jing<sup>1</sup>, YUAN Shu-ming<sup>1</sup>, CHENG Jian-hua<sup>2</sup>, CAO Xin-yu<sup>2</sup>

(1. Naval Armament Research Institute, Beijing 100161, China;

2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Federated filter has been widely used in the field of multi-sensor information fusion, and information distribution rule can directly affect the filtering accuracy. In this article, federated Kalman filter is improved by determining the information-distributing coefficients dynamically for federated filter with resetting configuration based on singular value of the covariance matrix of the estimated errors. The sub-filter is reset with new methods to ensure the symmetry of the sub-filters' error covariance matrix and the stability of the Kalman filter's uniform convergence. The new algorithm allows each system state variable to have different information distribution factors, and hence improves the estimation accuracy of the federated filter. An INS/GPS/electrical compass integrated navigation system is designed by using federated Kalman filter technique. The simulation shows that compared with the traditional method, the new federated Kalman filter can improve the precision of the estimated errors and enable better error-correction and accuracy of SINS.

**Key words:** Information distribution; Information fusion; Federated filter; Integrated calibration

## 0 引言

捷联惯导系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)是一种自主式导航系统,其优点在于不受外界干扰,独立地进行三维空间定位解算,提供比较完备的导航信息,并且成本低、体积小、易维护,因此在军事领域有着不可替代的作用。由于惯性器件受加工材料和工艺的限制而存在误差,从而导致 SINS 导航误差随时间积累,尤其是经度误差随

时间发散,这限制了捷联惯导系统导航时间长度。因此有必要利用其他导航方式和 SINS 联合应用,取长补短并对 SINS 进行修正。

GPS 导航定位信号在真空和大气层中传播不受限制,可以进行全球导航定位,具有定位精度高、长期稳定、误差不随时间累积等优点,因此可全天候地在全球范围内提供实时的导航信息<sup>[1-2]</sup>。但其缺点在于易受干扰、动态性能差,因此不能作为绝对依赖的导航方式<sup>[3-4]</sup>。电子罗盘(Electronic Com-

收稿日期:2016-08-23;修订日期:2016-10-18。

基金项目:国家自然科学基金(61374007,61104036);中央高校基本科研业务费(HEUCFX41309)。

作者简介:陈晶(1966-),女,高级工程师,主要从事舰船综合导航方面的研究。

pass, CE)是一种结构简单的航向测量装置,启动速度快,可以全天候精确地提供航向、俯仰、翻滚等姿态角信息,利用它的这些特点可以作为一种辅助导航设备。电子罗盘的原理是测量地球磁场,但若使用的环境中有地球以外的磁场且这些磁场无法有效屏蔽时,那么电子罗盘的使用就有很大的问题。

本文根据以上三种导航方式的优缺点,将其构成组合系统,采用改进的联邦 Kalman 滤波器进行误差估计。其中 SINS/GPS 构成一个子系统, SINS 和电子罗盘构成另一个子系统,对带重置联邦滤波器的信息分配方式进行改进,相对于传统的联邦滤波形式,该滤波算法可以提高对 SINS 误差的估计精度。

## 1 联邦滤波算法

### 1.1 联邦滤波器概述

联邦 Kalman 滤波理论是一种特殊形式的分布式 Kalman 滤波方法,由若干个子滤波器和一个主滤波器组成,是一个具有分块估计、两步级联的分散化滤波方法,有重置的联邦滤波器的结构如图 1 所示。

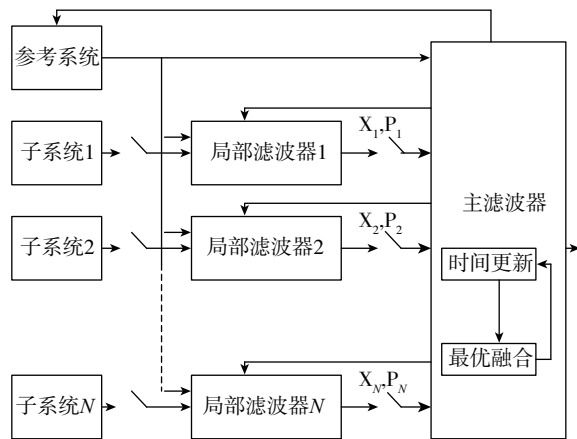


图 1 联邦 Kalman 滤波器结构

Fig. 1 The structure of the federated Kalman filter

联邦滤波器的关键在于它采用信息分配原理,需要向各子滤波器分配动态信息,这些信息包括两大类:状态方程的信息和观测方程的信息。最早的信息分配是固定比例的,而在实际导航环境中,各子滤波器的性能是不断变化的。为了提高联邦滤波器的性能,国外学者提出了动态信息分配方法,例如基于估计协方差特征值或 Frobenius 范数、基于可观测矩阵条件数等<sup>[7-8]</sup>。动态信息分配方法在一定程度上可以对系统状态进行实时跟踪,滤波效果

得到了改善。但是上边的信息分配系数都是标量,实质是把每个状态分量的特征看成是相同的。但是实际情况却不是如此,每个子系统的特性和精度不同,使得各子滤波器的状态方程和量测方程不同,进而导致状态分量具有不同的估计精度和收敛速度。所以,信息分配系数是标量时,不能很好地反映每个状态分量的变化情况。

针对上述问题,本文提出了一种基于系统协方差阵信息的动态矢量信息分配方法。该方法能够充分体现每个状态分量的变化,实时地得到不同的信息分配因子。对于滤波器协方差阵采用的反馈重置方法,可以保证其对称性,从而确保滤波器的一致收敛稳定性。

### 1.2 联邦滤波算法及过程

联邦滤波算法的基本思想是先将各个传感器信息分散处理,然后在主滤波器中进行信息融合。也即子滤波器之间并行运行,他们的输出再在主滤波器中周期性的融合处理,得到全局状态估计。在这个过程中,主滤波器将子滤波器的估计值融合成系统全局估计值,同时按照信息分配原理将全局估计值分配给各个子滤波器,进而完成一次滤波。根据联邦 Kalman 滤波器基本原理,假设有  $n$  个子滤波器,第  $i$  个子滤波器的状态方程和观测方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i(k) &= \Phi(k, k-1)\mathbf{X}_i(k-1) + \mathbf{W}(k) \\ \mathbf{Z}_i(k) &= \mathbf{H}_i(k)\mathbf{X}_i(k) + \mathbf{V}_i(k) \end{aligned} \quad (1)$$

联邦 Kalman 滤波器的过程如下。

1) 信息分配过程:信息分配就是将系统的过程信息分配给各子滤波器和主滤波器。按照如下的分配原则进行分配:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_i^{-1}(k) = \beta_i \mathbf{Q}_g^{-1}(k) \\ \mathbf{P}_i^{-1}(k) = \beta_i \mathbf{P}_g^{-1}(k) \\ \hat{\mathbf{X}}_i(k) = \hat{\mathbf{X}}_g(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\beta_i$  是信息分配因子,满足信息守恒原则,

$$\text{即 } \sum_{i=1}^n \beta_i + \beta_m = 1。$$

2) 信息的时间更新:时间更新在子滤波器之间独立进行,时间更新算法为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_i(k) = \Phi(k, k-1)\hat{\mathbf{X}}_i(k-1) \\ \mathbf{P}_i(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\mathbf{P}_i(k-1)\Phi^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_i(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

3) 信息的量测更新:由于主滤波器无量测值,所以没有量测更新。量测更新只在各子滤波器中

进行,有:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_i^{-1}(k) = \mathbf{P}_i^{-1}(k, k-1) + \mathbf{H}_i^T(k)\mathbf{R}_i^{-1}(k)\mathbf{H}_i(k) \\ \mathbf{P}_i^{-1}(k)\hat{\mathbf{X}}_i(k) = \mathbf{P}_i^{-1}(k, k-1)\hat{\mathbf{X}}_i(k, k-1) + \mathbf{H}_i^T(k)\mathbf{R}_i^{-1}(k)\mathbf{Z}_i(k) \end{cases} \quad (4)$$

4) 信息融合:在主滤波器中将各子滤波器估计值进行融合,得到全局最优估计值:

$$\hat{\mathbf{X}}_g = \mathbf{P}_g \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i^{-1} \hat{\mathbf{X}}_i, \mathbf{P}_g = \left( \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i^{-1} \right)^{-1} \quad (5)$$

信息分配系数的确定在联邦滤波器的设计中非常重要,不同的取值会得到不同的联邦滤波器结构和性能。现在常用的信息分配方案均采用标量形式,无法反应出每个状态变量的具体变化特性。

## 2 改进联邦滤波算法设计

### 2.1 信息分配和重置优化

在 Kalman 滤波过程中,状态估计误差协方差  $\mathbf{P}(k)$  反映了  $\mathbf{X}(k)$  的估计精度,  $\mathbf{P}(k)$  越大,  $\mathbf{X}(k)$  的估计精度就越差;  $\mathbf{P}(k)$  越小,  $\mathbf{X}(k)$  的估计精度就越好。从联邦滤波过程可知,每当主滤波器对子滤波器的信息融合一次,都会将融合后的全局估计信息通过信息分配系数  $\beta_i$  反馈给各子滤波器。从而改变子滤波器的滤波模型,实现对子滤波器数学模型的误差补偿,信息分配系数的大小反映了对误差的补偿程度。

根据各子滤波器估计的精度来动态地确定信息分配系数,可以更好地反映估计精度的变化情况,减小系统精度下降或者失效带来的影响。假设有  $n$  个子滤波器,先确定主滤波器的信息分配系数  $\beta_m$ ,之后可以用下述方法确定子滤波器的信息分配系数  $\beta_i$ 。

估计误差协方差阵  $\mathbf{P}_i$  可以按照它的特征值分解为  $\mathbf{P}_i = \mathbf{L}\mathbf{\Lambda}_i\mathbf{L}^T$ 。其中,  $\mathbf{\Lambda}_i = \text{diag} \{ \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in} \}$ ,  $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in}$  是  $\mathbf{P}_i$  的特征值。信息分配系数采用对角矩阵形式,  $\beta_i = \text{diag} \{ a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij} \}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n$

$$a_{ij} = \frac{1/\lambda_{ij}}{1/\lambda_{i1} + 1/\lambda_{i2} + \dots + 1/\lambda_{in}} \quad (6)$$

这种信息分配形式对每一个状态分量独立进行信息分配,可以避免子滤波器的方差阵太小而导致主滤波器无法求逆。信息分配系数由标量变成矢量,但信息分配过程不变

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i(k) &= \beta_i^{-1} \mathbf{P}_g(k) \\ &= \begin{bmatrix} 1/\beta_{i1} & & & \\ & 1/\beta_{i2} & & \\ & & \dots & \\ & & & 1/\beta_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g11} & P_{g12} & \dots & P_{g1n} \\ P_{g21} & P_{g22} & \dots & P_{g2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{gn1} & P_{gn2} & \dots & P_{gnn} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_{g11}/\beta_{i1} & P_{g12}/\beta_{i1} & \dots & P_{g1n}/\beta_{i1} \\ P_{g21}/\beta_{i2} & P_{g22}/\beta_{i2} & \dots & P_{g2n}/\beta_{i2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{gn1}/\beta_{in} & P_{gn2}/\beta_{in} & \dots & P_{gnn}/\beta_{in} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

因为  $\beta_{i1} \neq \beta_{i2}$ , 所以  $\mathbf{P}_i(k)$  不对称,这会破坏 Kalman 滤波的一致收敛稳定性,使得滤波误差增大,甚至失去滤波效果。为了解决该问题,改进信息分配形式如下

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i(k) &= \begin{bmatrix} 1/\sqrt{\beta_{i1}} & & & \\ & 1/\sqrt{\beta_{i2}} & & \\ & & \dots & \\ & & & 1/\sqrt{\beta_{in}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{P}_g(k) &= \begin{bmatrix} 1/\sqrt{\beta_{i1}} & & & \\ & 1/\sqrt{\beta_{i2}} & & \\ & & \dots & \\ & & & 1/\sqrt{\beta_{in}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_{g11}/\beta_{i1} & P_{g12}/\sqrt{\beta_{i1}\beta_{i2}} & \dots & P_{g1n}/\sqrt{\beta_{i1}\beta_{in}} \\ P_{g21}/\sqrt{\beta_{i1}\beta_{i2}} & P_{g22}/\beta_{i2} & \dots & P_{g2n}/\sqrt{\beta_{i2}\beta_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{gn1}/\sqrt{\beta_{i1}\beta_{in}} & P_{gn2}/\sqrt{\beta_{i2}\beta_{in}} & \dots & P_{gnn}/\beta_{in} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

可以看出此时的误差协方差阵是对称的。系统的过程信息分配按照式(9)进行:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_i^{-1}(k) = \sqrt{\beta_i} \mathbf{P}_g^{-1}(k) \sqrt{\beta_i} \\ \mathbf{Q}_i^{-1}(k) = \sqrt{\beta_i} \mathbf{Q}_g^{-1}(k) \sqrt{\beta_i} \end{cases} \quad (9)$$

该方案中,如式(6)所示,每进行一次滤波信息融合,就利用该次的估计误差协方差阵  $\mathbf{P}_i$  确定信息分配系数  $\beta_i$ ,从而实现信息分配系数的动态确定过程。

### 2.2 SINS/电子罗盘子滤波器设计

选取东-北-天坐标系作为导航坐标系,将电子罗盘误差项扩充进到捷联惯导(SINS)状态空间,可得状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{F}_1(t)\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{G}_1(t)\mathbf{W}_1(t) \quad (10)$$

式中,状态变量为

$$\mathbf{X}_1 = [\delta V_x \quad \delta V_y \quad \delta V_z \quad \delta V_\varphi \quad \delta V_\lambda \quad \delta V_h \quad \delta \varphi_x \quad \delta \varphi_y \quad \delta \varphi_z \quad \varepsilon_{rx} \quad \varepsilon_{ry} \quad \varepsilon_{rz} \quad \varepsilon_{bx} \quad \varepsilon_{by} \quad \varepsilon_{bz} \quad \nabla_{rx} \quad \nabla_{ry} \quad \nabla_{rz} \quad \alpha \quad \beta \quad \gamma]^T$$

状态噪声为

$$\mathbf{W}_1 = [v_{rx} \quad v_{ry} \quad v_{rz} \quad v_{gx} \quad v_{gy} \quad v_{gz} \quad v_{ax} \quad v_{ay} \quad v_{az} \quad w_{c1} \quad w_{c2} \quad w_{c3}]^T$$

状态转移矩阵为:  $\mathbf{F}_1 = \text{diag}\{\mathbf{F}_I \quad \mathbf{F}_C\}$ ,  $\mathbf{F}_C =$

$$\text{diag}\left[-\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c}\right], \mathbf{G}_1 = \text{diag}\{\mathbf{G}_I \quad \mathbf{I}_{3 \times 3}\}。$$

将捷联惯导和电子罗盘输出姿态之差作为量测值,得到观测方程为

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} \varphi_x - \alpha_c \\ \varphi_y - \beta_c \\ \varphi_z - \gamma_c \end{bmatrix} = \mathbf{H}_1(t) \mathbf{X}_1(t) + \mathbf{V}_1(t) \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{H}_1 = [\mathbf{O}_{3 \times 6} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{O}_{3 \times 9} \quad -\mathbf{I}_{3 \times 3}]$ ,  $\mathbf{V}_1 = [m_1 \quad m_2 \quad m_3]^T$  是零均值白噪声。

SINS 输出的姿态值是在导航坐标系下的,电子罗盘输出的姿态角是在载体坐标系下的,需要进行坐标转换,转换到导航坐标系下,这里省略不写。

### 2.3 SINS/GPS 子滤波器设计

把 GPS 误差项扩充进 SINS 状态空间,得到状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_2(t) = \mathbf{F}_2(t) \mathbf{X}_2(t) + \mathbf{G}_2(t) \mathbf{W}_2(t) \quad (12)$$

其中,状态向量为

$$\mathbf{X}_1 = [\delta V_x \quad \delta V_y \quad \delta V_z \quad \delta L \quad \delta \lambda \quad \delta h \quad \delta \varphi_x \quad \delta \varphi_y \quad \delta \varphi_z \quad \varepsilon_{rx} \quad \varepsilon_{ry} \quad \varepsilon_{rz} \quad \varepsilon_{bx} \quad \varepsilon_{by} \quad \varepsilon_{bz} \quad \nabla_{rx} \quad \nabla_{ry} \quad \nabla_{rz} \quad \delta L_G \quad \delta \lambda_G \quad \delta h_G \quad \delta V_{Gx} \quad \delta V_{Gy} \quad \delta V_{Gz}]^T$$

系统噪声为

$$\mathbf{W}_1 = [v_{rx} \quad v_{ry} \quad v_{rz} \quad v_{gx} \quad v_{gy} \quad v_{gz} \quad v_{ax} \quad v_{ay} \quad v_{az} \quad w_D]^T$$

状态转移矩阵为:  $\mathbf{F}_1 = \text{diag}\{\mathbf{F}_I \quad \mathbf{F}_C\}$ ,  $\mathbf{F}_C =$

$$\text{diag}\left[-\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c} \quad -\frac{1}{\tau_c}\right],$$

$\mathbf{G}_2 = \text{diag}\{\mathbf{G}_I \quad \mathbf{I}_{3 \times 3}\}。$

将捷联惯导和 GPS 输出的速度和位置信息作为量测值,得到观测方程为

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} V_x - V_{Gx} \\ V_y - V_{Gy} \\ V_z - V_{Gz} \\ L - L_G \\ \lambda - \lambda_G \\ h - h_G \end{bmatrix} = \mathbf{H}_2(t) \mathbf{X}_2(t) + \mathbf{V}_2(t) \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{H}_2(t) = [\mathbf{I}_{6 \times 6} \quad \mathbf{O}_{6 \times 12} \quad -\mathbf{I}_{6 \times 6}]$ ,  $\mathbf{V}_2(t) =$

$[a_i]^T$  是零均值白噪声。

### 3 算法仿真与验证

初始位置为纬度  $\varphi = 30^\circ$ , 经度  $\lambda = 120^\circ$ ; 东向和北向速度都是 6m/s, 陀螺的常值漂移为  $0.01(^\circ)/h$ ; 陀螺的随机漂移为  $0.001(^\circ)/h$ ; 加速度计零偏为  $100\mu g$ ; 加速度计随机偏差为  $5\mu g$ ; 初始航向误差为  $0.02^\circ$ ; 初始速度误差均为  $0.1m/s$ ; 初始位置误差分别为  $0.05'$ 。GPS 的水平位置误差均方根为  $0.002'$ , 速度误差均方根为  $0.1m/s$ 。电子罗盘的航向经度为  $0.5^\circ$ , 纵摇和横摇角精度为  $0.2^\circ$ 。

图 2~图 4 中, 蓝色曲线表示传统的信息分配方法, 信息分配系数都是  $1/3$ , 红色曲线为采用本文的动态信息分配矩阵和重置方法的结果。

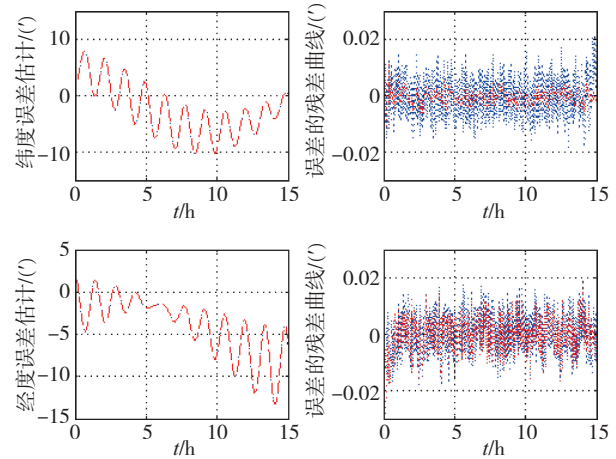


图 2 位置误差估计及其误差残差

Fig. 2 The estimation of the position errors and their residuals

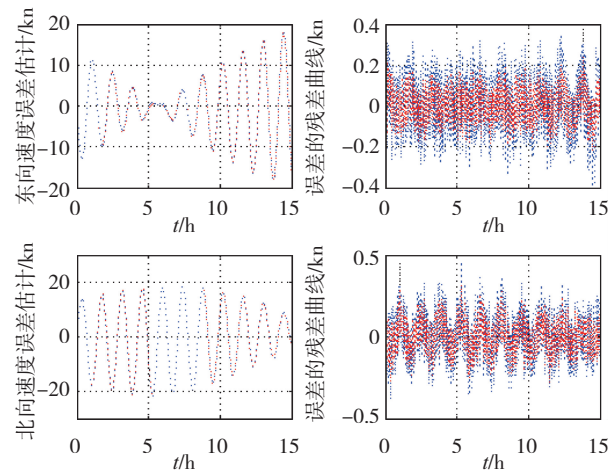


图 3 水平速度误差估计及其误差残差

Fig. 3 The estimation of the velocity errors and their residuals

根据图 2~图 4 可以看出, 将 SINS/GPS/电子罗



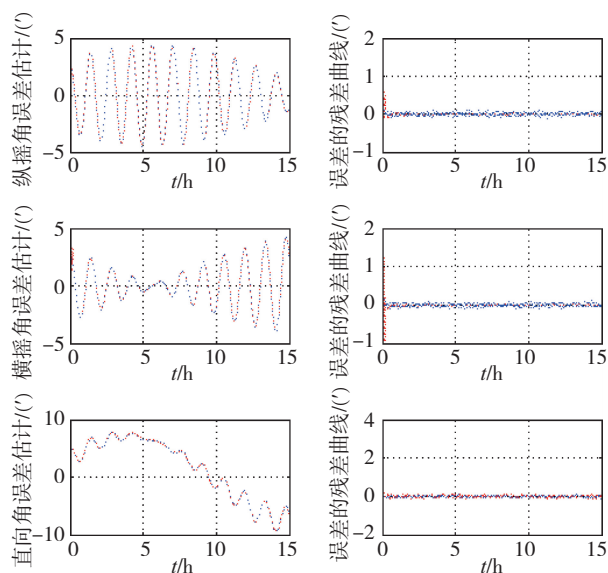


图4 姿态角误差估计及其误差残差

Fig. 4 The estimation of the attitude errors and their residuals

盘组合后,可以有效地跟踪惯导系统的误差传播规律,实现对惯导系统误差的准确估计。其中,位置估计误差的残差控制在10m左右,水平速度估计误差的残差在0.1m/s左右,纵摇和横摇角的估计误差的残差控制在0.17'以内,航向角估计误差的残差控制在0.15'左右。组合后利用各导航误差的估计值,对惯导系统解算结果进行误差补偿,可以显著地遏制SINS误差随时间发散的趋势。红色曲线代表使用本文的信息分配方法,与传统的固定信息分配系数相比,可以看出纬度、东向速度、纵摇和横摇角误差估计精度得到了显著提升,经度、北向速度和航向角的误差估计精度也稍好于传统的信息分配方法。

#### 4 结论

本文从系统状态估计误差协方差表示估计精

度出发,研究了一种动态信息分配的联邦 Kalman 滤波器,与传统固定信息分配系数相比,可以反映每个状态分量的情况。在对子滤波器重置时,采用新的重置方法保证了子滤波器误差协方差阵的对称性,避免了因协方差阵不对称导致滤波误差增大,甚至失去滤波效果。本文通过建立SINS/GPS/电子罗盘组合导航系统,采用改进的联邦 Kalman 滤波器对捷联惯导系统进行组合校准。通过计算机仿真结果表明,采用本文提出的信息分配和重置方法的SINS/GPS/电子罗盘联邦滤波算法有效地提高了组合校准精度。

#### 参考文献

- [1] 崔鹏程,邱宏波. 舰载导弹用捷联惯导系统校准技术研究[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(1):12-15.
- [2] 陈建国,练军想,张伦东,等. 一种用于舰船 CNS/RLG/SINS 组合导航系统校准的分段估计方法研究[J]. 导航与控制,2010,15(1):12-15.
- [3] 马卫华,罗建军,袁建平. 空间转移飞行器自主导航系统 SINS/GPS/SS 的卡尔曼滤波器降阶方案[J]. 宇航学报,2008,29(5):1556-1662.
- [4] Jwo D J, Hsieh M Y, Lai S Y. GPS navigation processing using the quaternion-based divided difference filter[J]. GPS Solutions, 2010,14(3):217-228.
- [5] Carlson N A. Federated filter for fault-tolerant integrated navigation systems[C]. Position Location and Navigation Symposium, IEEE PLANS,1988:110-119.
- [6] Carlson N A, Berarducci M P. Federated Kalman filter simulation results[J]. Navigation,1994,41(3):297-321.
- [7] 胡建,马大为,程向红,等. 联邦滤波信息分配方法及其在传递对准中的应用[J]. 南京理工大学学报,2011,35(2):224-229.
- [8] 刘瑞华,刘建业. 联邦滤波信息分配新方法[J]. 中国惯性技术学报,2001,9(2):28-32.