

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.009

基于矢量化检测联邦滤波的INS/BDS/地磁 组合导航容错方法

邵宇强

(哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要:组合导航能够将多种类型的导航信息进行结合,实现优势互补,因此成为了目前导航应用领域的主要发展方向。然而,导航信息的增多势必会引入更多的风险源,从而降低导航系统的可靠性。基于联邦滤波的容错方法是目前抑制故障信息影响的主要解决手段,但是现有的故障容错方法普遍采用统一的检测机制,没有根据各个导航子系统的误差传播特性针对性地构建故障检测模型,因此会引起较高的误警率与漏检率。针对上述问题,提出了基于矢量化检测联邦滤波的INS/BDS/地磁组合导航容错方法。通过构建面向INS/BDS/地磁不同导航信息的故障检测函数,能够实现更加准确的矢量化信息分配,从而可以有效避免可用导航信息的损失以及故障导航信息对整体系统的影响。仿真结果表明,提出的方法可以有效隔离不同类型的故障信息,并减小其对无故障导航信息及整体系统的影响,从而提高了组合导航的精度和可靠性。

关键词:矢量化检测;联邦滤波;组合导航;容错;故障检测与隔离

中图分类号:TP302.8; TN967.2; V249.32 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)04-0094-09

Fault-tolerant approach for INS/BDS/geomagnetic integrated navigation based on vector inspection federal filtering

SHAO Yuqiang

(School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Integrated navigation, which combines multiple types of navigation information to achieve complementary advantages, has become the main direction of development in the field of navigation applications. However, the increase of navigation information is bound to introduce more sources of risk, reducing the reliability of the navigation system. The fault-tolerant method based on federated filtering is currently the main solution to suppress the impact of fault information. Nevertheless, the existing fault-tolerant methods generally adopt a unified detection mechanism, without building fault detection models according to the error propagation characteristics of each navigation subsystem, which may cause higher false alarm rates and missed detection rates. To address these problems, this paper proposes an INS/BDS/geomagnetic integrated navigation fault-tolerant method based on vectorized detection and federated filtering. By constructing fault detection functions for different navigation information of INS/BDS/geomagnetic, more accurate vectorized information allocation can be achieved, thereby effectively avoiding the loss of available navigation information and the impact of fault navigation information on the overall system. Simulation results show that the proposed method can effectively isolate different types of fault information, and reduce its impact on fault-free navigation information and the overall system, thereby improving the accuracy and reliability of integrated navigation.

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-04-19

作者简介: 邵宇强(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事组合导航方面的研究。

lation results show that the proposed method can effectively isolate different types of fault information, reduce their impact on fault-free navigation information and the overall system, and improve the accuracy and reliability of integrated navigation.

Key words: Vectorized detection; Federated filtering; Integrated navigation; Fault tolerance; Fault detection and isolation

0 引言

随着科技的不断发展和进步,人类对于迈入深空、挺进深海、探索地球各个角落的热情日益高涨。导航是人类进行各种探索活动与科学研究的重要基础,目前对于高精度、高可靠导航手段^[1]的需求与日俱增。以全球定位系统(global positioning system, GPS)、北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)为代表的全球卫星导航系统是一种重要的导航手段,但卫星信号极易受到遮挡与干扰,难以在复杂环境下提供可靠的导航信息^[2-3]。而其他常用的导航系统,例如惯性导航系统(inertial navigation system, INS)等也存在着各自的局限性^[4],单独运行时无法提供连续精确的导航信息^[5]。单一的导航方式已经难以满足日益增长的需求,一般采用多种导航手段相融合的方式,取长补短,进而提升导航系统的整体性能^[6]。联邦卡尔曼滤波^[7]是实现多种导航信息融合的主要方式^[8],是一种分散化的多传感器数据融合方法^[9],能够消除不同导航信息之间的相关性,并保证信息守恒,因此具有良好的容错性、精确性与高效性,是一种理想的容错信息融合算法。

保证基于联邦卡尔曼滤波的组合导航系统的性能的关键问题之一,是对各导航信息源进行有效的故障诊断,该问题已成为国内外相关领域专家和学者的重点研究方向,并在理论层面已经有了很多成果。在众多故障诊断方法中, χ^2 检验法^[10]是应用最为广泛的故障诊断方法(包含状态 χ^2 检验法和残差 χ^2 检验法)。在进行组合导航系统故障检测时,一般将故障子系统当作一个整体来分析,并假设所有观测量具有相同的估计精度和收敛速度,按照统一的权重来分配信息^[11],可称谓“基于系统层次的故障检测方法”。但是,在实际情况中,故障子系统里通常仍有部分观测量没有出现异常,这样就会造成对导航子系统信息利用不充分。为解决该问题,何广军等^[12]提出了一种基于矢量信息分配的容错联邦滤波算法,能对每个状态变量单独进行故

障判断和信息调整。吕建新等^[13]提出了一种基于观测残差的自适应联邦卡尔曼滤波导航方法。当载体受到异常干扰或动力学模型有较大误差时,该方法能够根据观测残差自动调整信息分配权重,减小导航误差。不过,该方法只能影响子滤波器的状态估计质量,不会对主滤波器的状态估计质量产生影响。许丽佳等^[14]提出了一种基于模糊推理系统和卡尔曼滤波的方法,用于克服联合卡尔曼滤波法的缺点。该方法能在线调整噪声统计特性,实现子滤波器和主滤波器的自适应融合。此外,他们还提出了一种新颖的信息融合算法,根据模糊推理系统给出的各状态估计量的信任权重,动态地进行加权融合,从而提高了融合精度。蒋锐等^[15]在联邦卡尔曼子滤波器和主滤波器之间加入故障检测,自适应调整故障子滤波器的滤波增益矩阵。该方法可以有效检测系统故障并对其进行实时处理,提高系统的可靠性。

然而,上述传统方法均是对整个系统采取相同的检测机制,没有针对不同导航方式的特点矢量化地检测故障是否发生。对于导航信息丰富的系统而言,浪费了本可以使用的信息,而对于需要快速检测的系统,则增加了计算量。因此,本文采用INS/BDS/地磁导航的多源组合导航模型,设计了一种基于矢量化检测联邦滤波的INS/BDS/地磁组合导航容错方法。通过构建面向不同导航信息的故障检测函数,能够实现更加准确的矢量化信息分配,从而提高导航精度和容错性能。

1 INS/BDS/地磁组合导航模型

本文选择“东—北—天”导航坐标系作为参考坐标系。在该坐标系下,系统的状态变量包括位置误差、速度误差、姿态角误差以及陀螺仪和加速度的随机常值漂移。

1.1 组合导航系统状态方程

$$\mathbf{X} = [\delta E, \delta N, \delta h, \delta v_e, \delta v_n, \delta v_u, \varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T \quad (1)$$

式中: $\delta E, \delta N, \delta h$ 分别表示东向、北向和高度的位

置误差; $\delta v_e, \delta v_n, \delta v_u$ 分别为东向、北向、天向速度误差; $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 分别为东向、北向、天向数学平台角误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为3个方向的陀螺随机常值漂移; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为3个方向的加速度计随机常值零偏。建立组合导航子系统状态方程

$$\mathbf{X}_i(k) = \mathbf{F}_i(k|k-1)\mathbf{X}_i(k-1) + \mathbf{G}_i(k|k-1)\mathbf{W}_i(k-1) \quad (2)$$

其中, \mathbf{F}_i 为系统矩阵, \mathbf{X}_i 为状态变量, \mathbf{G}_i 为系统噪声矩阵, 下标 i 表示第 i 个子系统。系统噪声为

$$\mathbf{W} = [\omega_{\varepsilon_x}, \omega_{\varepsilon_y}, \omega_{\varepsilon_z}, \omega_{\nabla_x}, \omega_{\nabla_y}, \omega_{\nabla_z}]^T \quad (3)$$

其中, $\omega_{\varepsilon_x}, \omega_{\varepsilon_y}, \omega_{\varepsilon_z}$ 为陀螺噪声; $\omega_{\nabla_x}, \omega_{\nabla_y}, \omega_{\nabla_z}$ 为加速度计噪声。

1.2 组合导航系统量测方程

针对 INS、BDS 和地磁导航 3 种导航方式的特点, 以惯性导航作为基础导航方式, 分别构造 INS/BDS 组合导航为子系统 1, INS/地磁组合导航为子系统 2, 各子系统的量测方程如下。

子系统 1: 对 INS 与 BDS 的位置信息和速度信息分别做差构建观测量。

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_1(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_P \\ \mathbf{H}_V \end{bmatrix} \mathbf{X}_1(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_P(k) \\ \mathbf{V}_V(k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_P = [\text{diag}(R_M \quad R_N \cos L \quad 1), \mathbf{0}_{3 \times 6}, \mathbf{0}_{3 \times 6}] \\ \mathbf{H}_V = [\mathbf{0}_{3 \times 3}, \text{diag}(1 \quad 1 \quad 1), \mathbf{0}_{3 \times 9}] \\ \mathbf{V}_P = [N_{B_e}, N_{B_n}, N_{B_u}]^T \\ \mathbf{V}_V = [v_{B_e}, v_{B_n}, v_{B_u}]^T \end{cases} \quad (4)$$

其中: R_M, R_N 分别为地球子午面及卯西面主曲率半径; $N_{B_e}, N_{B_n}, N_{B_u}$ 和 $v_{B_e}, v_{B_n}, v_{B_u}$ 分别为北斗卫星导航沿东、北、天方向的位置误差和速度误差。

子系统 2: 观测量选取为 INS 与地磁罗盘的姿态角误差。

$$\mathbf{Z}_2(k) = \mathbf{H}_a \mathbf{X}_2(k) + \mathbf{V}_a(k) \quad (5)$$

其中, 量测矩阵 $\mathbf{H}_a = [\mathbf{0}_{3 \times 6}, \mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 6}]$, $\mathbf{V}_a(k) = [V_{M_\gamma}, V_{M_\theta}, V_{M_\phi}]^T$ 为地磁罗盘量测噪声。

2 矢量化检测容错联邦滤波器设计

在本文提出的 INS/BDS/地磁组合导航系统中, 根据各子系统的特点, 分别使用不同的故障检测方式。子系统 1 中, BDS 易受环境影响从而产生误差, 但其所能提供的导航信息较为丰富, 若采用传统的故障检测方法, 进行系统层面的故障诊断和隔离, 会丢失正常的观测量信息, 降低子系统 1 的信息利用率。因此, 本文对子系统 1 的各状态变量分别进行故障诊断, 只隔离其故障信息, 对无故障的

信息加以保留和利用, 从而增加信息利用率。子系统 2 中, 地磁罗盘通过测量地磁场提供姿态角信息^[16], 当存在磁场干扰或其他因素使得地磁场的测量存在故障时, 信息不再可靠, 需要快速检测隔离, 且由于子系统 2 信息量相对较少, 对其使用系统层面的故障诊断。

2.1 面向不同导航信息的故障检测方法

在卡尔曼滤波中, 当故障发生时, 其产生的残差会偏离零均值的高斯白噪声。因此, 检测系统中的故障有赖于对残差的分析。故障检测通常采用基于残差的 χ^2 检测法, 构建一个故障检测函数, 该函数可以捕捉到残差的统计特性, 然后使用该函数来确定是否发生了故障。这种方法能够有效地检测出系统中的故障, 并采取纠正措施以保持数据的完整性。基于 χ^2 检测法, 本文构建了针对不同类型导航信息的故障检测函数。

子系统 1 的矢量形式的故障检测函数为

$$\mathbf{\Lambda}_1(k) = \mathbf{r}_1(k) \mathbf{r}_1^T(k) \cdot \{ \mathbf{H}_1 \mathbf{P}_1[k/(k-1)] \mathbf{H}_1^T + \mathbf{R}_1 \}^{-1} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1(k) &= \mathbf{Z}_1(k) - \hat{\mathbf{Z}}_1[k/(k-1)] \\ &= \mathbf{Z}_1(k) - \mathbf{H}_1 \hat{\mathbf{X}}_1[k/(k-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, \mathbf{r}_1 表示子系统 1 在 k 时刻的残差值, $\mathbf{\Lambda}_1$ 为 m 阶方阵, 表示为

$$\mathbf{\Lambda}_1(k) = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{21} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \cdots & \mu_{mm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, m 为子系统 1 观测量维数。无故障情况下, $\mu_{jj} (j = 1, 2, 3, \dots, m) \sim \chi^2(1)$; 而当系统存在故障时, 则不再服从自由度为 1 的 χ^2 分布。因此, 当 $\mu_{jj} \leq \chi_{\alpha_j}^2 (j = 1, 2, 3, \dots, m)$ 时, 认为子系统 1 的第 j 个观测量 $\mathbf{Z}_{1,j}$ 观测正常; 当 $\mu_{jj} > \chi_{\alpha_j}^2 (j = 1, 2, 3, \dots, m)$ 时, 认为 $\mathbf{Z}_{1,j}$ 存在故障。可以通过调节 $\chi_{\alpha_j}^2$ 来调节系统对故障的灵敏度, α_j 为观测量 $\mathbf{Z}_{1,j}$ 的误警概率。

子系统 2 的系统层面的故障检测函数为

$$\mathbf{\Lambda}_2(k) = \mathbf{r}_2^T(k) \mathbf{V}_2^{-1}(k) \mathbf{r}_2(k) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_2(k) &= \mathbf{Z}_2(k) - \hat{\mathbf{Z}}_2[k/(k-1)] \\ &= \mathbf{Z}_2(k) - \mathbf{H}_2 \hat{\mathbf{X}}_2[k/(k-1)] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{V}_2(k) = \mathbf{H}_2(k) \mathbf{P}_2[k/(k-1)] \mathbf{H}_2^T(k) + \mathbf{R}_2(k) \quad (11)$$

其中, \mathbf{r}_2 表示子系统 2 在 k 时刻的残差值, $\mathbf{V}_2(k)$ 表示其方差。 $\Lambda_2(k) \sim \chi^2(n)$, n 为量测 $\mathbf{Z}_2(k)$ 的维数。当 $\Lambda_2(k) \leq T_D$, 判定为子系统 2 无故障; 当

$\Lambda_2(k) > T_D$, 判定为子系统 2 存在故障。 T_D 为预先设置的故障检测门限。

2.2 存在故障时的信息分配方法

信息分配系数的设置关系到联邦滤波器的性能。信息分配方案的不同会导致状态估计的精度和系统的鲁棒性的不同, 两者往往难以兼顾^[17]。对于各子系统, 过大的系数会使全局融合精度下降; 过小的系数虽然能提升全局估计精度, 但也会致使系统稳定性更容易受故障量测信息干扰。因此, 在联邦滤波器设计时, 要同时考虑状态估计精度和系统鲁棒性, 做好平衡。本文提出的方法通过动态地调整状态估计方差、系统噪声方差和量测噪声方差, 可同时提高系统的精度和鲁棒性。

设子系统 i 的量测噪声系数为

$$\mathbf{B}_i = \text{diag}(b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,j}) \quad (12)$$

$$\text{其中, } b_{1,j} = \begin{cases} 1 & \mu_{jj} \leq \chi_{\alpha_j}^2 \\ 0.01 & \mu_{jj} > \chi_{\alpha_j}^2 \end{cases}, j = 1, 2, 3, \dots, m;$$

$$b_{2,j} = \begin{cases} 1 & \Lambda_2(k) \leq T_D \\ 0.01 & \Lambda_2(k) > T_D \end{cases}, j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

子系统 1 和 2 的观测量维数分别为 m 和 n 。对于出现故障的观测量, 令其量测噪声系数为 0.01; 而无故障观测量的量测噪声应保持不变的, 其量测噪声系数设置为 1。以此规则构造一个新的量测噪声系数矩阵 \mathbf{B}_i , 从而实现对量测噪声方差阵的动态调整。具体如下

$$\mathbf{R}_i(k) = \mathbf{B}_i^{-1} \mathbf{R}_i^{\text{real}}(k) = \text{diag}\left(\frac{R_{11}}{b_{i,1}}, \frac{R_{22}}{b_{i,2}}, \dots, \frac{R_{jj}}{b_{i,j}}\right) \quad (13)$$

其中, $\mathbf{R}_i^{\text{real}}(k)$ 为子系统 i 的真实量测噪声。经过 \mathbf{B}_i 调整后, 存在故障的观测量测噪声方差被放大, 从而隔离了故障观测量。

系统的估计精度可以由当前的误差估计方差体现, 对第 i 个子系统的协方差阵 \mathbf{P}_i 进行特征值分解, 得到信息分配系数 \mathbf{G}_i ^[18]。

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{L}_i \mathbf{D}_i^T \quad (14)$$

$$\mathbf{L}_i = \text{diag}(\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots, \lambda_{i,n}) \quad (15)$$

$$\mathbf{A}_i = \text{diag}(\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}, \dots, \alpha_{i,n}) \quad (16)$$

其中, $\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots, \lambda_{i,n}$ 为子系统 i ($i=1, 2$) 的协方差阵特征值, 状态变量为 n 维。 \mathbf{A}_i 各元素应满足信

息守恒, 即 $\sum_{i=1}^2 \mathbf{A}_i = \mathbf{I}_{18 \times 18}$ 。其中

$$\alpha_{i,j} = \frac{1/\lambda_{i,j}}{\sum_{j=1}^n 1/\lambda_{i,j}} \quad i=1, 2; j=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

估计的准确性可以通过状态估计的方差来衡量。状态估计的方差越大, 说明精度越低, 因此, 相应的分配系数应该越小。此外, 还要确保每个子系统的状态协方差矩阵保持对称性, 信息分配方式为

$$\mathbf{P}_i = \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \mathbf{P}_g \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \quad (18)$$

$$\mathbf{Q}_i = \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \mathbf{Q}_g \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{P}_g, \mathbf{Q}_g$ 分别为主滤波器全局信息融合后的协方差矩阵和系统噪声矩阵; $\mathbf{P}_i, \mathbf{Q}_i$ 分别为子系统 i 信息重置后的协方差阵和系统噪声矩阵。

2.3 容错联邦滤波算法

为减小主滤波器出现故障时反馈信息对子滤波器的不利影响, 本文采用了如下的应对方法。首先, 子滤波器独立完成其测量更新和时间更新, 然后将所得信息输入主滤波器完成融合。融合后的信息按照设计的信息分配方法在各子滤波器之间进行分配, 各子滤波器根据分配的信息再进行新的时间更新和测量更新。这种方法有效地解决了主滤波器故障对子滤波器信息的污染问题, 同时保证了滤波过程的连续性和鲁棒性^[19]。

根据上文提及的量测噪声系数 \mathbf{B}_i 及信息分配系数矩阵 \mathbf{G}_i , 设计容错联邦滤波算法:

(1) 子滤波器时间更新

$$\mathbf{X}_i[(k+1)/k] = \mathbf{F}_i[(k+1)/k] \mathbf{X}_i(k) \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_i[(k+1)/k] = \mathbf{F}_i[(k+1)/k] \mathbf{P}_i(k) \cdot$$

$$\mathbf{F}_i^T[(k+1)/k] + \mathbf{F}_i(k) \mathbf{Q}_i(k) \mathbf{F}_i^T(k) \quad (21)$$

(2) 故障诊断

建立故障检测函数 \mathbf{A}_i , 对观测量进行故障诊断, 得到量测噪声系数 \mathbf{B}_i 和量测噪声矩阵 \mathbf{R}_i , 减少对故障观测量信息的利用。

$$\mathbf{R}_i(k+1) = \mathbf{B}_i^{-1} \mathbf{R}_i^{\text{real}}(k+1) \quad (22)$$

(3) 子滤波器量测更新

即

$$\mathbf{K}_i(k+1) = \mathbf{P}_i[(k+1)/k] \mathbf{H}_i^T(k+1) \cdot$$

$$\{\mathbf{H}_i(k+1) \mathbf{P}_i[(k+1)/k] \cdot$$

$$\mathbf{H}_i^T(k+1) + \mathbf{R}_i(k+1)\}^{-1} \quad (23)$$

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{X}_i[(k+1)/k] + \mathbf{K}_i(k+1) \cdot \{\mathbf{Z}_i(k+1) - \mathbf{H}_i(k+1) \mathbf{X}_i[(k+1)/k]\} \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_i(k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_i(k+1) \mathbf{H}_i(k+1)] \cdot \mathbf{P}_i[(k+1)/k] [\mathbf{I} - \mathbf{K}_i(k+1) \mathbf{H}_i(k+1)]^T + \mathbf{K}_i(k+1) \mathbf{R}_i(k+1) [\mathbf{K}_i(k+1)]^T \quad (25)$$

(4) 构建信息分配矢量系数 \mathbf{G}_i

$$\mathbf{G}_i = \frac{\mathbf{A}_i + \mathbf{H}_i^T \mathbf{B}_i \mathbf{H}_i}{2} \quad (26)$$

(5) 主滤波器信息融合

当子系统 1 中的部分信息失效时,采用如下的融合方式

$$\mathbf{P}_g(k+1) = \left[\sum_{i=1}^2 \mathbf{P}_i^{-1}(k+1) \right]^{-1} \quad (27)$$

$$\mathbf{X}_g(k+1) = \quad (28)$$

$$\mathbf{P}_g(k+1) \sum_{i=1}^2 \mathbf{P}_i^{-1}(k+1) \mathbf{X}_i(k+1)$$

当子系统 2 失效时,对其整体隔离,因此系统误差状态的整体估计为

$$\mathbf{X}_g(k+1) = \mathbf{X}_1(k+1) \quad (29)$$

此时,子系统 2 的输出估计值为

$$\mathbf{Z}_2(k+1) = \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_g(k+1) \quad (30)$$

(6) 子滤波器信息分配

$$\mathbf{P}_i(k+1) = \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \mathbf{P}_g(k+1) \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \quad (31)$$

$$\mathbf{Q}_i(k+1) = \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \mathbf{Q}_g(k+1) \sqrt{\mathbf{G}_i^{-1}} \quad (32)$$

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{X}_g(k+1) \quad (33)$$

由以上公式可得容错联邦滤波器结构如图 1 所示。

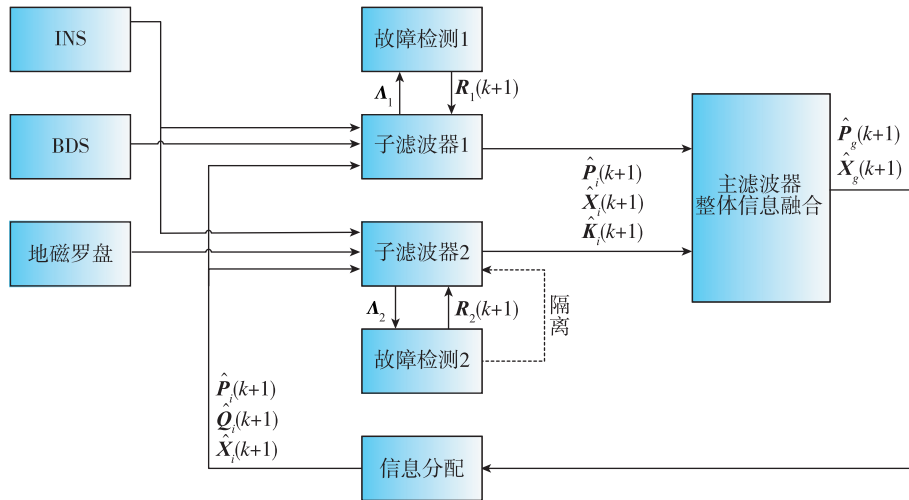


图 1 联邦滤波器结构图

Fig. 1 Structure of the federated filter

子系统 2 中,由于地磁罗盘仅提供姿态角信息,对于速度和位置状态的影响随时间累积较快,因此当其发生故障时,将其快速隔离有利于提高系统的整体精度。子系统 2 的故障检测函数 Λ_2 相比于子系统 1 的 Λ_1 ,计算量减小,故障检测更快,从而能更快速地隔离故障。

当系统出现故障时,通过噪声系数放大故障观测量的测量噪声 \mathbf{R}_i ,从而使协方差 \mathbf{P}_i 变大,故障子系统在信息融合中的权重减小,进而减少了对它的信息利用。通过调节噪声系数 $b_{i,j}$ 来处理故障观测量,如果噪声系数较小,状态估计的精度就会降低,全局融合中对故障状态变量的使用减少;如果噪声系数较大,状态估计的精度就会提高,对故障子系统错误观测量使用减少,同时正确观测量的使用率增加。

3 仿真实验与分析

通过仿真实验对本文提出方法的有效性进行验

证。采用 INS/BDS/地磁罗盘组合导航系统,其中,INS/BDS 组成子系统 1;INS/地磁罗盘组成子系统 2。模拟匀速直线运动,航向角为 45° ,真实速度为:东向速度 $v_E = 10$ m/s,北向速度 $v_N = 10$ m/s,天向速度 $v_U = 1$ m/s。滤波周期为 1 s,仿真时间为 1 000 s。假设陀螺随机常值漂移为 0.1 ($^\circ$)/h,加速度计随机常值漂移为 $10^{-4} g$,BDS 位置误差为 10 m,速度误差为 0.5 m/s,电子罗盘的航向角精度为 0.5° ,俯仰角、横滚角精度为 0.1° 。

3.1 无故障发生

为了评估本文算法在无故障条件下对组合导航系统性能的影响,分别使用传统的联邦滤波算法和本文算法进行了仿真实验。传统方法采用固定的信息分配方法,子滤波器 1 和子滤波器 2 的信息分配比例相同,为 1 : 1,即 $\beta_1 = \beta_2 = \frac{1}{2}$ 的分配方式。两种方法误差曲线比较如图 2。

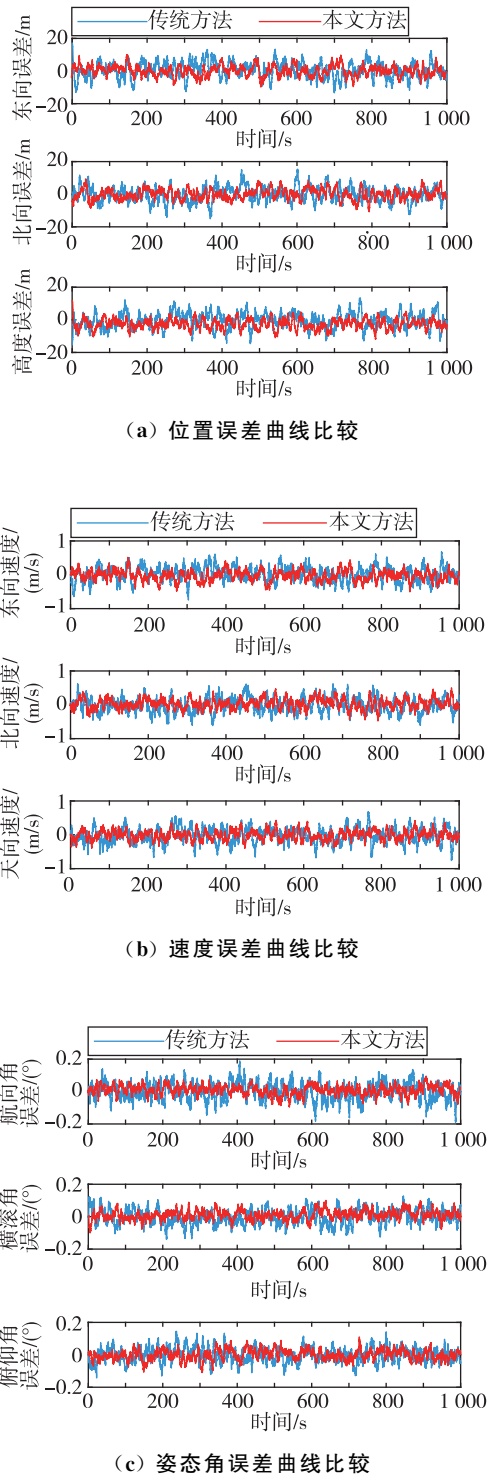


图 2 误差曲线比较

Fig. 2 Comparison of error curves

通过对比可知,当无故障发生时,本文算法的误差波动区间明显减小,曲线更为平缓,导航精度有所提升。因此,本文所述算法优于传统联邦滤波平均分配方法。

3.2 系统出现故障

模拟 BDS 出现故障的场景。由于 BDS 能提供位置和速度信息,因此分别对其位置信息和速度信息添加误差。

(1) BDS 位置信息异常

在 400 s 时,在东、北、天 3 个方向上各施加 30 m 的位置误差,该情况下本文算法的位置误差曲线如图 3(a)所示;速度误差曲线如图 3(b)所示。

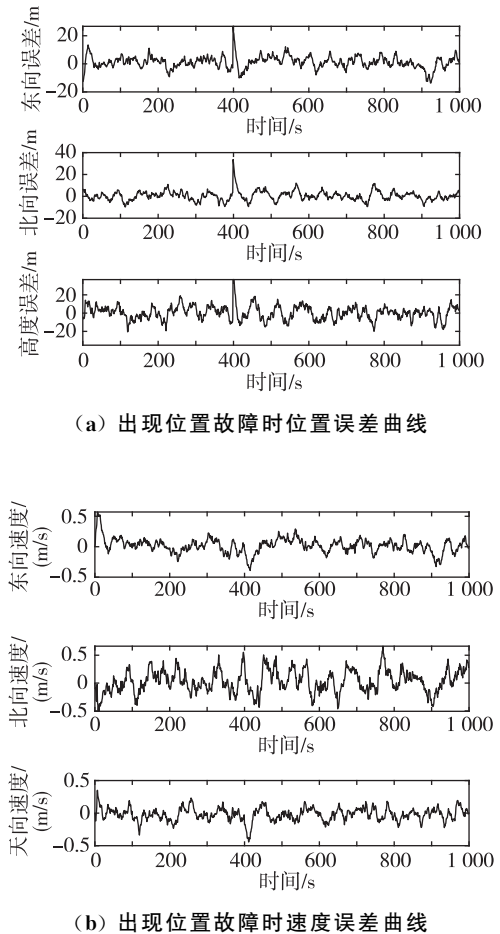


图 3 出现位置故障时本文算法的误差曲线

Fig. 3 Error curves of the algorithm in this paper with failure of position

在图 3(a)中,400 s 时,3 个方向上的位置误差突然增大,而后降为正常水平。由于系统可对 BDS 的导航信息分别检测和利用,当出现位置误差时,速度信息仍能在系统中发挥作用。因此,在图 3(b)中,速度误差在该时间段内变化不明显,与其他时间段内持平。说明系统可以提高故障子系统中无故障信息的利用率。

(2) BDS 速度信息异常

在 600 s 时,在东、北、天 3 个方向上各施加 1.5 m/s 的速度误差,该情况下的本文算法的位置误差曲线如图 4(a)所示;速度误差曲线如图 4(b)所示。

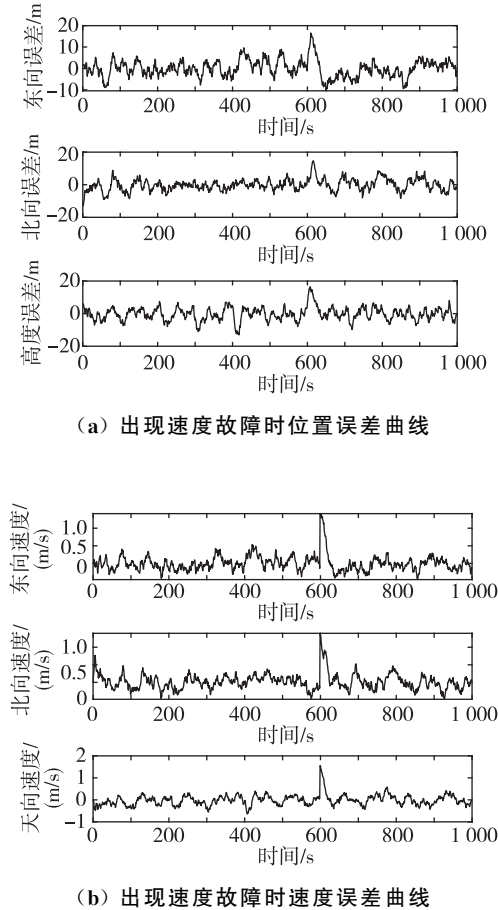


图 4 出现速度故障时本文算法的误差曲线
Fig. 4 Error curves of the algorithm in this paper with failure of velocity

在图 4(b)中,600 s 时,3 个方向上的速度误差突然增大,故障被隔离后误差降为正常水平。在图 4(a)中,虽然系统可对异常的速度信息进行隔离,但检测需要一定时间,受此影响,在 600 s 左右位置误差有小幅增加,而后由于故障信息被隔离,且 BDS 继续提供位置信息用于校正,故位置误差在一段时间后回归正常水平。由此可见,BDS 所提供的无故障信息发挥了重要的作用。

(3)地磁罗盘故障

模拟地磁罗盘出现故障的场景。地磁罗盘能提供姿态角信息,但 3 个姿态角存在相关性。因此当其出现故障时需要对其进行整体隔离,以免故障扩散到整个系统中。在 600 s 时,在航向、俯仰、横

滚 3 个方向上各施加 0.2° 的角度误差,该情况下本文算法的位置误差曲线如图 5(a)所示;速度误差曲线如图 5(b)所示;姿态角误差曲线如图 5(c)所示。

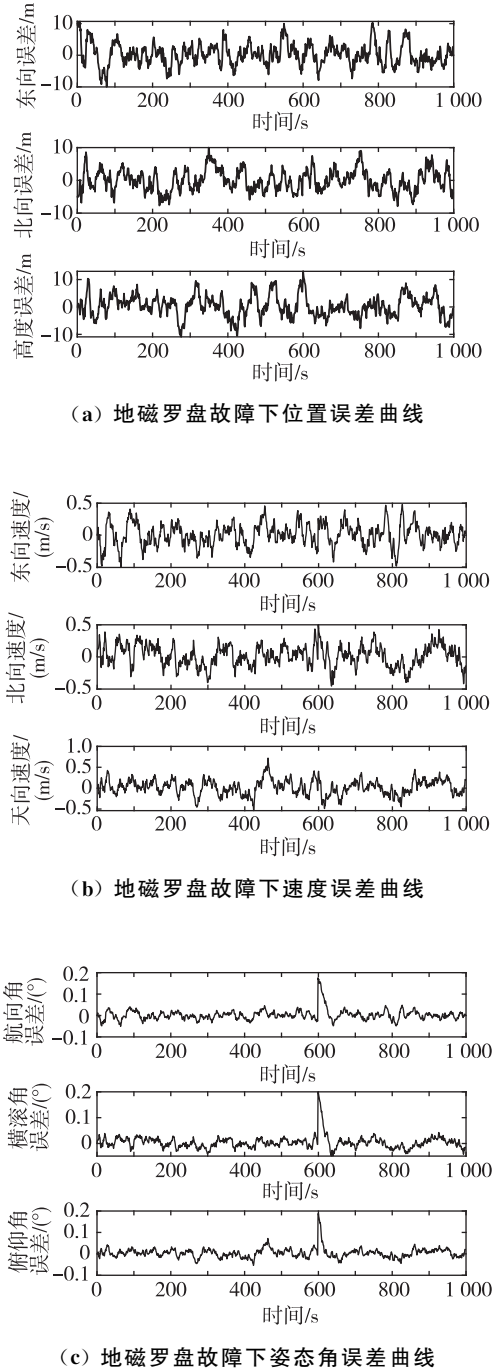


图 5 地磁罗盘故障下本文算法的误差曲线
Fig. 5 Error curves of the algorithm in this paper with failure of geomagnetic compass

在图 5(c)中,角度误差增大后迅速下降,快速回归正常水平,表明故障信息被系统隔离。而在图 5(a)和 5(b)中,对应时间内,误差无明显变化,INS 和 BDS 继续发挥作用,提供速度和位置信息。

4 结论

本文提出了一种基于矢量化检测联邦滤波的INS/BDS/地磁组合导航容错方法,实验结果表明,该方法可以提高系统在不同故障情况下的稳定性和鲁棒性。主要结论如下:

1)构建了面向不同导航信息的故障检测方法。针对BDS信息多,但易受干扰的特点,对其子系统的每个观测量均进行检测,在隔离故障信息的同时最大程度利用剩余的无故障信息,提高了信息利用率;针对地磁罗盘各观测量相关且误差对导航结果影响大的特点,对其组成的子系统使用计算量小的系统检测方式,快速检测隔离故障,防止误差扩散到整体系统中,提高了组合导航系统的鲁棒性。

2)通过使用矢量形式的信息分配方式来进行主滤波器的信息反馈,可以充分发挥各子系统的优点,并有效利用其中正常的状态估计信息,从而提高了整体组合导航系统的精度。

3)通过动态调整测量噪声矩阵,提高导航各子系统量测信息利用的可靠性,从而有效减小故障观测量对状态估计的影响。

参考文献

- [1] LO S. Navigation for aviation[M]. USA: Wiley-IEEE Press, 2021.
- [2] LI B, ZHAN X, ZHAN L. Research on vehicle-borne GPS/SINS/OD integrated navigation system[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(11): 43-47.
- [3] ZHANG X, ZHU F. Newoptimal smoothing scheme for improving relative and absolute accuracy of tightly coupled GNSS/SINS integration[J]. GPS Solutions, 2017, 29(2): 44-49.
- [4] 臧中原,董亮,毋蒙,等. SINS/BDS紧组合系统中自适应两阶段扩展卡尔曼滤波[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(6): 85-91.
ZANG Zhongyuan, DONG Liang, WU Meng, et al. Adaptive two-stage extended Kalman filter algorithm for SINS/BDS tightly integrated system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(6): 85-91 (in Chinese).
- [5] 郭银景,孔芳,张曼琳,等. 自主水下航行器的组合导航系统综述[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 107-119.
GUO Yinjing, KONG Fang, ZHANG Manlin, et al. Review of integrated navigation system for AUV [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(5): 107-119 (in Chinese).
- [6] 董亮,臧中原,许东欢,等. 一种惯性/卫星容错组合导航系统设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(9): 104-108.
DONG Liang, ZANG Zhongyuan, XU Donghuan, et al. Design of a fault-tolerant SINS/GNSS integrated navigation system[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9): 104-108 (in Chinese).
- [7] CARLSON N A. Federated square root filter for decentralized parallel processes[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(3): 517-525.
- [8] Gong X, Liu H, Fang J, et al. Multi-node transfer alignment based on mechanics modeling for airborne DPOS[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(2): 669-679.
- [9] 张康皓,董希旺,于江龙,等. 多传感器融合状态估计方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(5): 28-37.
ZHANG Kanghao, DONG Xiwang, YU Jianglong, et al. A survey of multisensor data fusion state estimation methods[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(5): 28-37 (in Chinese).
- [10] BRUMABAEK B D, SRINATH M D. A fault-tolerant multisensor navigation system design[C]//IEEE Trans. on AES. 1987, 23(6): 738-755.
- [11] 吴训忠,周军,邱恺. 基于故障因子函数的鲁棒联邦滤波算法研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(1): 57-60.
WU Xunzhong, ZHOU Jun, QIU Kai. Study of a robust federated filtering algorithm based on fault factor function[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(1): 57-60 (in Chinese).
- [12] 何广军,康旭超. 基于矢量分配的组合导航容错联邦滤波算法[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(5): 98-106.
HE Guangjun, KANG Xuchao. Fault-tolerant federated filtering algorithm based on vector assignment in integrated navigation system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(5): 98-106 (in Chinese).
- [13] 吕建新,周翟和,伏家杰,等. 自适应联邦卡尔曼滤波在机器人组合导航系统中的应用研究[J]. 测控技术, 2017, 36(6): 15-19.
LYU Jianxin, ZHOU Zhaihe, FU Jiajie, et al. Application of adaptive federated Kalman filter in robot integrated navigation system[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(6): 15-19 (in Chinese).
- [14] 许丽佳,陈阳舟,崔平远. 组合导航系统的模糊信息

- 融合[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 124-128.
- XU Lijia, CHEN Yangzhou, CUI Pingyuan. Fuzzy information fusion in integrated navigation system [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(1): 124-128 (in Chinese).
- [15] 蒋锐, 李俊, 徐友云, 等. 基于联邦卡尔曼滤波器的容错 BDS-AOA-SINS 组合导航算法[J]. 通信学报, 2022, 43(8): 78-89.
- JIANG Rui, LI Jun, XU Youyun, et al. Fault tolerant GPS-AOA-SINS integrated navigation algorithm based on federated Kalman filter [J]. Journal on Communications, 2022, 43(8): 78-89 (in Chinese).
- [16] 胡宁博, 李剑, 赵榭云. 基于 HMC5883 的电子罗盘设计[J]. 传感器世界, 2011, 17(6): 35-38.
- HU Ningbo, LI Jian, ZHAO Juyun. Digital electronic compass based on HMC5883[J]. Sensor World, 2011, 17(6): 35-38 (in Chinese).
- [17] 杨镜, 华冰, 熊智. 多源导航系统软、硬故障检测新方法研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(5): 647-652.
- YANG Jing, HUA Bing, XIONG Zhi. New method for soft and hard fault detection in multi-source navigation system [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(5): 647-652 (in Chinese).
- [18] XIONG Z, CHEN J H, Wang R, et al. A new dynamic vector formed information sharing algorithm in federated filter [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 29(1): 37-46.
- [19] MAIER A, KIESEL S, TROMMER G F. Performance analysis of federated filter for SAR/TRN/BDS/INS integration [J]. Gyroscopy and Navigation, 2011, 2(4): 293-300.

(编辑: 黄利华)