

文章编号: 1001-2486 (2001) 01-0031-05

组合导航系统故障检测技术研究*

陶俊勇, 陶利民, 杨定新

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 提出了一种新的故障检测算法。该算法由联合滤波器的全局估计与各局部估计之差, 得到残差序列, 通过残差 χ^2 检验, 来判别系统是否出现了故障。同时进一步讨论了故障分离方法。数值仿真及实际应用结果表明, 该算法能有效地检测出组合导航系统的故障, 保证了系统的安全性和可靠性。

关键词: 组合导航系统; 故障; 检测

中图分类号: TP277 **文献标识码:** A

New Fault Detection Method for the Integrated Navigation System

TAO Jun-yong, TAO Li-min, YANG Ding-xin

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new fault detection method is proposed for the integrated navigation system. Fault detection is undertaken by checking the consistency between the global state estimate and the local state estimate of federated filter by means of the chi-square test (CST). Meanwhile, the fault isolation method is also discussed. The simulation and laboratory experimental results show that the new method is very efficient and practical; the reliability and safety of the system can be improved.

Key words: integrated navigation system; fault; detection

组合导航系统故障检测通常采用基于卡尔曼滤波器的设计方法, 例如 Mehra 提出的特性检验法^[1], Brumaback 提出的状态残差 χ^2 检验法^[2]以及 Da 对该方法提出的改进算法^[3]等, 其检测性能主要取决于残差对故障的敏感度。本文基于 Carlson 的联合滤波器^[4], 提出了由全局估计与各局部估计之差构造检验统计量, 利用 χ^2 检验对全局估计与局部估计的一致性进行检验, 来判别系统是否出现了故障, 在此基础上进一步讨论了故障分离方法。作为应用, 将该方法用于某车载 SINS/GPS (捷联惯导系统/全球定位系统) 组合导航系统的故障检测。

1 组合导航系统故障检测算法

1.1 联合滤波的简单回顾

联合滤波是一种两级滤波结构, 详见文献 [4, 5]。它由 n 个局部滤波器和一个主滤波器组成, 各局部滤波器只处理来自相应子系统的测量值, 以产生局部状态估计 \hat{x}_i 及其协方差阵 P_i , 各局部估计及协方差阵送入主滤波器和主滤波器的状态估计 \hat{x}_m 及其协方差阵 P_m 一起进行融合得到全局最优估计。联合滤波器的全局状态估计 \hat{x}_f 及其协方差阵 P_f 的最优综合和信息分配过程如下:

$$\left. \begin{aligned} P_f^{-1} &= P_1^{-1} + \dots + P_n^{-1} + P_m^{-1}, Q_f^{-1} = Q_1^{-1} + \dots + Q_n^{-1} + Q_m^{-1} \\ P_f^{-1} \hat{x}_f &= P_1^{-1} \hat{x}_1 + \dots + P_n^{-1} \hat{x}_n + P_m^{-1} \hat{x}_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$P_i^{-1} = \beta_i P_f^{-1}, \quad Q_i^{-1} = \beta_i Q_f^{-1}, \quad \hat{x}_i = \hat{x}_f \quad (2)$$

$$\beta_1 + \dots + \beta_n + \beta_m = 1 \quad (3)$$

其中 β_i 表示各个滤波器的信息分配系数; $i = 1, 2, \dots, n, m$. 表示有 n 个局部滤波器和一个主滤波器。

* 收稿日期: 2000-09-01
基金项目: 国家部委基金项目资助 (97J9.3.6KG0136)
作者简介: 陶俊勇 (1969-), 男, 讲师, 博士。

1.2 故障检测算法的推导

为了推导的方便并不失一般性,假设主滤波器不进行滤波运算,只完成局部滤波器信息的综合,即 $\beta_m = 0$ 。且设系统状态的真实值为 x ,则各局部估计及全局估计的误差及相应协方差阵为

$$\bar{x}(k|k) = x(k) - \hat{x}(k|k) \quad (4)$$

$$P(k|k) = E\{\bar{x}(k|k) \bar{x}(k|k)^T\} \quad (5)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n, f$ 。表示有 n 个局部估计及一个全局估计,则残差(检验统计量) b_j 为 $b_j(k) = \hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k) = [x(k) - \hat{x}(k|k)] - [x(k) - \hat{x}(k|k)] = \bar{x}_j(k|k) - \bar{x}(k|k)$ (6)

其中 $j = 1, 2, \dots, n$ 。表示有 n 个局部估计分别与全局估计构成残差序列。

为了检验全局估计与局部估计的一致性,必须知道正常情况下残差的统计特性,即它的均值和协方差矩阵。当无故障时,由于局部估计及全局估计都是真实状态的无偏估计,则有

$$E[b_j(k)] = E[\bar{x}_j(k|k)] - E[\bar{x}(k|k)] = 0 \quad (7)$$

残差协方差阵 B_j 由正交投影定理及各局部估计的相互独立性推得。设 $y_j(k)$ 为第 j 个局部滤波器的测量输入,引入规范化状态空间 X , $x(k) \in X$, 和子空间 $Y_j(k)$

$$Y_j(k) = \{\text{由 } x_0, y_j(1), \dots, y_j(k) \text{ 张成的子空间}\} \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

由正交投影定理知, $\hat{x}_j(k|k)$ 是 $x(k)$ 到 $Y_j(k)$ 的正交投影,即 $\bar{x}_j(k|k)$ 正交于 $Y_j(k)$, 且有

$$E[\bar{x}_j(k|k) a^T(k)] = 0 \quad \text{对于所有的 } a(k) \in Y_j(k) \quad (9)$$

由(6)式知,残差 b_j 的协方差阵 B_j 为

$$\begin{aligned} B_j(k) &= E\{b_j(k) b_j(k)^T\} \\ &= P_j(k|k) + P_f(k|k) - E\{\bar{x}_j(k|k) \bar{x}_j(k|k)^T\} - E\{\bar{x}(k|k) \bar{x}(k|k)^T\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} E\{\bar{x}_j(k|k) \bar{x}_j(k|k)^T\} &= E\{[x(k) - \hat{x}_j(k|k)] + [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)] \times [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T\} \\ &= P_j(k|k) + E\{[\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)] [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T\} \end{aligned} \quad (11)$$

由各局部状态估计的独立性条件得

$$\begin{aligned} E\{\hat{x}_i(k|k) [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T\} &= E\{[x(k) - \bar{x}_i(k|k)] [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T\} = 0 \quad i \neq j \\ &\text{且 } i, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (12)$$

考虑(1)式~(3)式、(9)式及(12)式,得

$$\begin{aligned} E\{[\hat{x}_f(k|k) - \hat{x}(k|k)] [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T\} &= E\{[\beta_1 \hat{x}_1(k|k) + \dots + (\beta_j - 1) \hat{x}_j(k|k) \\ &\quad + \dots + \beta_r \hat{x}_r(k|k)] \times [\beta_1 \hat{x}_1^T(k|k) + \dots + \beta_j \hat{x}_j^T(k|k) \\ &\quad + \dots + \beta_n \hat{x}_n^T(k|k)]\} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

由(13)式、(11)式,得

$$E\{\bar{x}_j(k|k) \bar{x}_j(k|k)^T\} = E\{\bar{x}_j(k|k) \bar{x}_j(k|k)^T\} = P_j(k|k) \quad (14)$$

将(14)式代入(10)式,得

$$B_j(k) = E\{b_j(k) b_j(k)^T\} = P_j(k|k) - P_f(k|k) \quad (15)$$

基于以上推导,当无故障时,残差 b_j 为满足 $b_j \sim N[0, B_j(k)]$ 的高斯白噪声。当有故障发生时,残差的期望将变为非0,且其协方差阵不再为 B_j 。因此通过以下统计假设检验可实现故障检测

$$\left. \begin{aligned} H_0: b_j(k) &\sim N[0, B_j(k)] \\ H_1: H_0 &\text{ 为假} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

构造检测统计量

$$\lambda(k) = [b_j(k)]^T [B_j(k)]^{-1} b_j(k) \sim \chi^2(N) \quad (17)$$

其中 $\lambda_j(k)$ 服从自由度为 N 的 χ^2 分布, N 为残差的维数。根据取定的虚警率, 由 χ^2 分布表可查得检测阈值 ϵ , 则故障检测准则为

$$\left. \begin{aligned} \eta(k) &= \lambda_j(k)/\epsilon > 1 && \text{有故障} \\ \eta(k) &= \lambda_j(k)/\epsilon \leq 1 && \text{无故障} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

为了提高对故障的敏感性, 可采用对残差各分量单独检验的方法^[3], 则检测统计量为

$$\lambda_j(k) = [b_j^l(k)]^2 / B_j^l(k) \sim \chi^2(1) \quad (19)$$

其中 b_j^l 和 B_j^l 分别是 b_j 的第 l 个分量及 B_j 对角线的第 l 项。确定阈值 ϵ_1 后, 故障检测准则为

$$\left. \begin{aligned} \eta(k) &= \lambda_j(k)/\epsilon_1 > 1 && \text{有故障} \\ \eta(k) &= \lambda_j(k)/\epsilon_1 \leq 1 && \text{无故障} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

需指出, 用全局估计与局部估计之差构造检验统计量时会有这样的可能: 因为全局估计与局部估计都受故障污染, 它们的差值可能对故障不敏感。为解决这一问题, 可以采用以下两种方案^[4,5]:

① 采用无重置的联合滤波结构。由于没有主滤波器对各局部滤波器的反馈重置, 各局部滤波器独立工作。这样就避免了某一子系统的故障, 通过主滤波器的反馈重置污染具有良好子系统的局部滤波器估计, 从而保证全局估计与具有良好子系统的局部滤波器估计之差对故障的敏感性。

② 对于有重置的联合滤波结构, 由于融合周期可以长于各局部滤波周期, 因此可以选择适当的足够长的融合周期, 这样在融合前软故障有较长的发展时间, 从而使得在融合后进行故障检测时, 具有良好子系统的局部滤波器估计与被故障污染的全局估计之差足够大, 并可以被该方法检测出来。

这两种方案的唯一不足之处是使得联合滤波估计精度稍有下降, 但换来的是系统的高可靠性和容错性, 故在实际应用中是可行的设计方案。

2 故障检测算法在车载 SINS/GPS 组合导航系统中的应用

由于车载 SINS/GPS 组合导航系统中, 只有 SINS 和 GPS 两个子系统, 因此建立的 SINS/GPS 联合滤波器中不包括参考系统^[6,7], 如图 1 所示。其中主滤波器不进行滤波运算, 只完成局部滤波器信息的综合, 两个局部滤波器的状态方程、测量方程^[7,8]及信息分配描述如下:

1) 组合系统状态方程

在东北天坐标系中, 为了确定载体的位置和速度, 组合系统状态变量取为 $x = [x_e \ v_e \ x_n \ v_n]^T$, 其中 x_e 和 x_n 分别为东向和北向位置, m; v_e 和 v_n 分别为东向和北向速度, m/s。则组合系统状态方程为

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + G(k)w(k) \quad (21)$$

$$\text{其中 } \Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G(k) = \begin{bmatrix} \Delta^2/2 & 0 \\ \Delta & 0 \\ 0 & \Delta^2/2 \\ 0 & \Delta \end{bmatrix} \quad \Delta \text{ 为采样时间间隔; 系统噪声 } w(k)$$

为高斯白噪声序列, 并有 $E[w(k)w^T(j)] = Q(k)\delta(k-j)$ $Q(k) \geq 0$, $\delta(k-j)$ 是 Kronecker 函数。

2) 测量方程

对于 SINS 局部滤波器: 状态变量 $x_1 = x$, 其状态方程等同组合系统状态方程 (21) 式; 假设只观测到载体沿东向和北向的位置信息, 观测向量 $z_1 = [x_e \ x_n]^T$, 则其测量方程为

$$z_1(k) = H_1(k)x(k) + v_1(k) \quad (22)$$

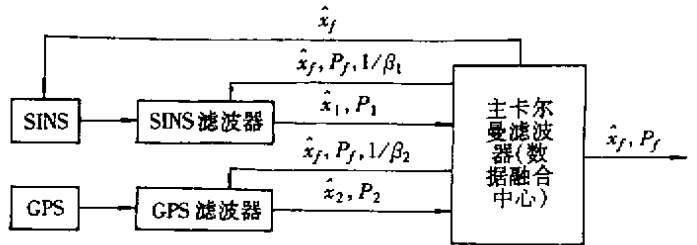


图 1 SINS/GPS 组合导航系统联合滤波器

Fig. 1 Federated filter of SINS/GPS integrated navigation system

其中 $H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, 测量噪声 $v_1(k)$ 为白噪声, 并有 $E[v(i)v^T(j)] = R_1(k)\delta(i, j)$, $R_1(k) \geq 0$.

对于 GPS 局部滤波器: 状态变量 $x_2 = x$, 状态方程等同组合系统状态方程; 同样假设只观测到载体的位置信息, 观测向量 $z_2 = [x_e, x_n]^T$, 则其测量方程为

$$z_2(k) = H_2(k)x(k) + v_2(k) \tag{23}$$

其中 $H_2(k)$, $v_2(k)$ 和 SINS 局部滤波器的测量方程相应变量意义相同, 此处不再赘述.

3) 信息分配

联合滤波过程中, 两个局部滤波器的信息分配系数取固定值 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$, 信息综合和分配按式 (1) ~ (3) 进行. 为了提高联合滤波器性能, 可以根据一定的准则, 对信息分配系数进行在线自适应调节^[6,7].

基于以上讨论, 对 SINS/GPS 组合系统的故障检测问题进行了仿真研究. 假设正常情况下陀螺漂移 ϵ_i 及加速度计零偏误差 ∇_i 的方差为 $P(\epsilon_i) = (0.01^0/h)^2$ 和 $P(\nabla_i) = (5 \times 10^{-5}g)^2$. 这里故障模拟为两种情况: ① x 轴陀螺阶跃故障; ② GPS 发生阶跃型定位故障. 故障均发生在第 200s, 持续到第 400s 止. 采用 (20) 式的归一化故障检测准则.

当 x 轴陀螺发生 $0.2^0/h$ 阶跃故障时, 图 2 给出了东向位置残差检验结果, 图 3 给出了北向位置残差检验结果; GPS 故障是在正常实测位置信号的基础上叠加一个大小为 $b_f = [15 \ 15]$ 的阶跃故障, 图 4 给出了东向位置残差检验结果, 图 5 给出了北向位置残差检验结果.

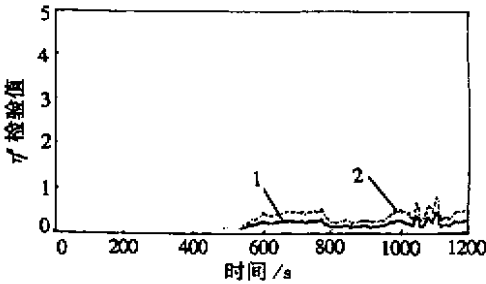


图 2 x 轴陀螺故障东向位置残差检验
Fig.2 East-position CST results of the x-gyro failure

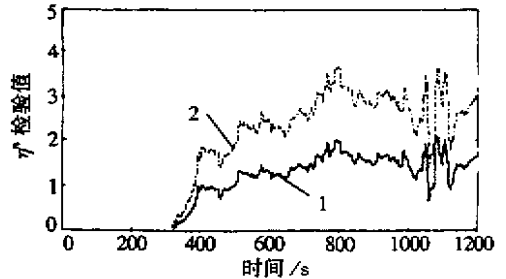


图 3 x 轴陀螺故障北向位置残差检验
Fig.3 North-position CST results of the x-gyro failure

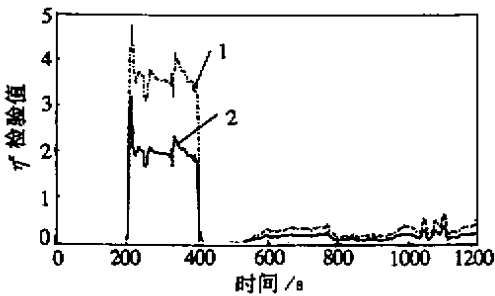


图 4 GPS 故障东向位置残差检验
Fig.4 East-position CST results of GPS failure

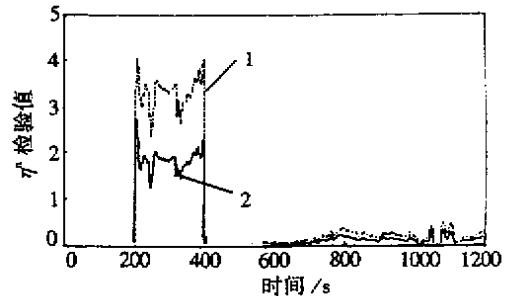


图 5 GPS 故障北向位置残差检验
Fig.5 North-position CST results of GPS failure

在某 SINS/GPS 组合系统的正常实测信号基础上, 对算法作了进一步验证. 假设故障为阶跃型, 发生在第 200s, 持续到第 400s 止, 大小为正常值的 5 倍. 图 6 为 x 轴陀螺故障北向位置残差检验结果; 图 7 为 x 轴加速度计故障东向位置残差检验结果. 各实验结果中, 曲线 1 表示全局估计与 SINS

滤波器估计之差的检验结果，曲线 2 表示全局估计与 GPS 滤波器估计之差的检验结果。

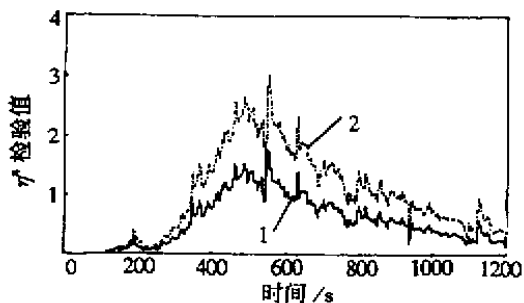


图 6 实测 x 轴陀螺故障北向位置残差检验

Fig.6 Real data north-position CST results of x -gyro failure

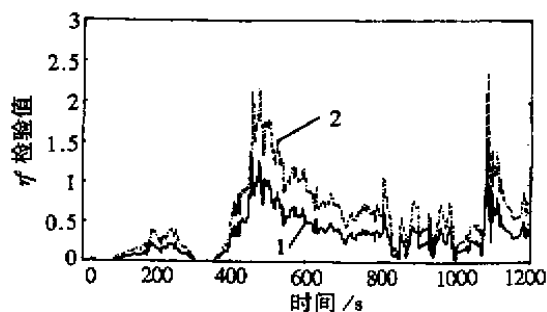


图 7 实测 x 轴加速度计故障东向位置残差检验

Fig.7 Real data east-position CST results of x -gyro failure

由图 3、图 6、图 7 可知：当陀螺或加速度计发生故障后，全局估计与 SINS、GPS 滤波器估计之差的检验结果均有显著变化，且曲线 1 的变化程度较曲线 2 要小，这是因为全局估计和 SINS 滤波器估计都受到故障污染，因此降低了它们的差值对故障的敏感度，而 GPS 滤波器估计没有受到故障污染，因此它与全局估计的差值对故障的敏感度高。同样当 GPS 发生故障后，曲线 1 的变化程度较曲线 2 要大，如图 4、图 5 所示。总之，仿真计算和实际应用结果表明，该算法能及时、有效地检测出系统的故障，但它不能分离 SINS 故障和 GPS 故障。下面对故障分离方法作进一步的讨论：

经理论推导和实验分析知：陀螺或加速度计故障对组合系统状态变量各分量影响程度不同，即：

① x 轴陀螺和 y 轴加速度计故障只对北向位置和速度有显著影响，而对东向位置和速度几乎没有影响。

② y 轴陀螺和 x 轴加速度计故障只对东向位置和速度有显著影响，而对北向位置和速度几乎没有影响。

由此导致了它们对残差各分量的影响程度也不同，如图 2、图 3 所示；对于 GPS 故障而言，由 GPS 定位原理可知：用于定位解算的任何一颗卫星发生故障，都将直接造成 GPS 定位的位置误差，其对残差各分量都将产生显著影响，如图 4、图 5 所示。

因此，在假设单故障情况下（即同一时刻只有 SINS 的某个惯性器件或 GPS 发生故障），一个简单的故障分离方法是：通过对残差各分量检验的综合分析，来实现 SINS 故障与 GPS 故障的分离。例如，分析图 3 和图 2 的结果可知：故障使得北向位置残差检验有显著变化，而东向位置残差检验几乎没有变化，由此可以断定是 SINS 故障；同样由图 4 和图 5 的结果可知：故障使得北向位置和东向位置残差检验都有显著变化，由此可以判断是 GPS 故障。

参考文献：

- [1] Mehra R K, Peschen J. An Innovations Approach to Fault Detection and Diagnosis in Dynamics System[J]. Automatica, 1971, (7): 637 - 640.
- [2] Brumaback B D, Srinath M D. A Fault - Tolerant Multisensor Navigation System Design[J]. IEEE Trans. on AES, 1987, 23 (6): 738 - 755.
- [3] Da R, Lin C F. Failure Detection and Isolation Structure for Global Positioning System Autonomous Integrity Monitoring[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18 (2): 291 - 297.
- [4] Carlson N A. Federated Filter for Fault - Tolerant Integrated Navigation[R]. N 96 - 13415.
- [5] 张洪钺. 联邦滤波器的设计理论[J]. 导航, 1998, (3): 61 - 80.
- [6] 房建成, 申功勋. 一种自适应联合卡尔曼滤波器及其在车载 GPS/DR 组合导航系统中的应用研究[J]. 中国惯性技术学报, 1998, 6 (4): 1 - 6.
- [7] 陶俊勇, 邱静. 自适应联合滤波模型及其在车载 SINS/GPS 组合导航系统中的应用[J]. 信息与控制, 2000, 29 (2): 168 - 172.
- [8] Sengupta D, Iltis R A. Neural Solution to the Multitarget Tracking Data Association Problem[J]. IEEE Trans. on AES, 1989, 25 (1): 96 - 108.

