

· 系统研究与分析 ·

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^{*}

房建成 申功勋

(北京航空航天大学)

万德钧

(东南大学)

摘要—本文设计了实现车载 GPS/DR 组合导航系统最优综合的联合卡尔曼滤波器,并给出了滤波算法。提出了一种自适应联合卡尔曼滤波器结构及其算法,并应用于 GPS/DR 组合导航系统的最优综合校正中。理论分析及计算机仿真结果均表明,应用该自适应联合卡尔曼滤波器可大大提高车载 GPS/DR 组合导航系统的定位精度及容错能力。

关键词 GPS 航位推算系统 组合导航 陆地导航 联合卡尔曼滤波器 自适应算法

An Adaptive Federated Kalman Filter and Its Application at GPS/DR Integrated Navigation System in Land Vehicle^{*}

Fang Jiancheng Shen GongXun

(Beijing University Aeronautics and Astronautics)

Wan Dejun

(Southeast University)

ABSTRACT—A federated Kalman filter mechanization to realize the optimal synthesis of GPS/DR integrated land navigation system is designed first, and its algorithm is presented. Moreover, an adaptive federated Kalman filter mechanization and its algorithm are creatively proposed for GPS/DR integrated land vehicle navigation system. The theoretical analysis and computer simulation results all show that the positioning accuracy and fault-tolerance ability of the GPS/DR integrated navigation system can be greatly improved by using this adaptive federated Kalman filter.

Keywords GPS dead reckoning integrated navigation land navigation
Kalman filtering adaptive algorithm

1 前言

任何一种导航设备或系统都是为了完成某种特定的导航需要而产生的,它通常既有优点也有弱点,不可避免地存在着某种局限性。就陆地车辆导航而言,尽管 GPS 定位导航系统能够全天候、连续实时地提供高精度的三维位置和速度信息,但是当车辆行驶在高楼林立的市区时,由于 GPS 卫星信号经常受到遮挡,有些情况下通过 GPS 系统实现连续准确的定位是不可

收稿日期:1997-08-07 * 中船总“八五”预研及江苏省应用基础研究基金项目资助

能的。而车辆航位推算导航系统(DR)是一种自主式的车辆导航系统,它短时间内精度高,但导航误差随时间积累。因此,这两种导航方式都有其缺点。但是,利用组合导航技术把上述两种导航系统结合起来,构成 GPS/DR 组合导航系统,利用其各自的优点,互相取长补短,能够获得优于任何单独一种导航系统的导航精度和可靠性。目前,在国外,将组合导航技术应用于陆地车辆的导航正愈来愈受到重视。

在多传感器系统中,联合卡尔曼滤波器利用信息分配原理能够实现多传感器信息的最优综合,并且使整个系统具有一定的容错能力,从而能够获得整体上最优的性能。联合卡尔曼滤波的思想本身起源于解决组合导航系统的容错及最优信息综合问题。车载 GPS/DR 组合导航系统是由 GPS 定位系统和 DR 系统两个相互独立的子系统构成的多传感器系统,因此,将联合卡尔曼滤波技术应用于车载 GPS/DR 组合导航系统能够实现定位导航信息的最优综合及相互校正。

2 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波器设计

GPS/DR 组合导航系统的整体状态变量取为 $X_g = [e, v_e, a_e, n, v_n, a_n, \epsilon, \Psi]^T$, 其中 e, n 分别为车辆东向和北向的位置分量, v_e, v_n 分别为车辆东向和北向的速度分量, a_e, a_n 分别为车辆东向和北向的加速度分量, ϵ 为速率陀螺的漂移误差, Ψ 为车辆里程表的标定系数。采用机动载体的“当前”统计模型^[4], 建立组合导航系统总体方程如式(1)。

$$\begin{bmatrix} V_e \\ a_e \\ a_e \\ V_n \\ a_n \\ a_n \\ \epsilon \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ V_e \\ a_e \\ n \\ V_n \\ a_n \\ \epsilon \\ \Psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1-\tau_e}{\tau_e} a_e \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1-\tau_e}{\tau_e} a_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_{a_e} \\ 0 \\ 0 \\ w_{a_n} \\ w_\epsilon \\ w_\Psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于 GPS 定位子系统(子系统 1), 取其系统状态变量 $X_1 = X_g$, 子系统方程同总体系统方程。其外观测量为 GPS 接收机输出的车辆东向和北向位置坐标分量 e_{obs}, n_{obs} (单位均化成米), 观测方程可表示为

$$Z_1(k) = H_1(k) X_1(k) + V_1(k) \quad (2)$$

这里

$$Z_1(k) = \begin{bmatrix} e_{obs}(k) \\ n_{obs}(k) \end{bmatrix} \quad H_1(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$V_1(k) = \begin{bmatrix} w_e(k) \\ w_n(k) \end{bmatrix}$, 其中, $w_e(k)$ 和 $w_n(k)$ 分别为 $(0, \hat{\sigma}_e^2)$ 和 $(0, \hat{\sigma}_n^2)$ 的高斯白噪声序列。

对于 DR 系统(子系统 2), 取其系统状态变量 $X_2 = X_g$, 子系统方程同总体系统方程, 其外观测量取为压电晶体陀螺的输出 ω 和车辆里程表输出的车辆在采样周期 T 时间内行进的距

离 s 。即系统的观测矢量为 $Z_2 = [\omega_s]^T$, 可写为

$$Z_2 = \begin{bmatrix} \omega \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial} [tg^{-1} [\frac{V_e}{V_n}]] + \xi \\ \Psi_T \quad \frac{1}{V_e^2 + V_n^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

即

$$Z_2(t) = h_2[t, X(t)] + V_2(t) \quad (5)$$

ξ_1 为速率陀螺漂移误差中的高斯白噪声分量(0, $\hat{\sigma}_\omega$), ξ_2 为里程表输出量的观测噪声, 为(0, $\hat{\sigma}_s$)的高斯白噪声。可以看出, 观测方程(4)为一非线性方程, 为了应用标准卡尔曼滤波方程, 需要进行线性化。首先将其离散化, 然后再进行线性化处理。线性化后的 $H_2(k)$ 为

$$H_2(k) = \begin{bmatrix} 0 & H_{01} & H_{02} & 0 & H_{04} & H_{05} & H_{06} & 0 \\ 0 & H_{11} & 0 & 0 & H_{14} & 0 & 0 & H_{17} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中

$$H_{01} = \frac{\hat{a}_n(k|k-1) \hat{V}_e^2(k|k-1) - 2\hat{V}_e(k|k-1) \hat{V}_n(k|k-1) \hat{a}_n(k|k-1) - \hat{a}_n(k|k-1) \hat{V}_n^2(k|k-1)}{[\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)]^2} \quad (7)$$

$$H_{02} = \frac{\hat{V}_n(k|k-1)}{\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)} \quad (8)$$

$$H_{04} = \frac{\hat{a}_e(k|k-1) \hat{V}_e^2(k|k-1) - 2\hat{V}_e(k|k-1) \hat{V}_n(k|k-1) \hat{a}_e(k|k-1) - \hat{a}_e(k|k-1) \hat{V}_n^2(k|k-1)}{[\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)]^2} \quad (9)$$

$$H_{05} = \frac{\hat{V}_e(k|k-1)}{\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)} \quad (10)$$

$$H_{06} = 1$$

$$H_{11} = \frac{T \hat{\Psi}(K|k-1) \hat{V}_e(k|k-1)}{\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)} \quad (11)$$

$$H_{14} = \frac{T \hat{\Psi}(K|k-1) \hat{V}_n(k|k-1)}{\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)} \quad (12)$$

$$H_{17} = T \frac{1}{\hat{V}_e^2(k|k-1) + \hat{V}_n^2(k|k-1)} \quad (13)$$

在进行联合卡尔曼滤波器设计时, 令 $\beta_0 = 0$, 则主系统不占有任何全局信息, 而只完成估计各子系统的综合运算。这时主系统的计算量很小, 而总体系统前向滤波速度最快, 系统设计最佳。GPS 定位系统所对应的信息分配系数为 β_1 , DR 系统对应的信息分配系数为 β_2 。所设计的联合卡尔曼滤波器的结构如图 1 所示:

3 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波算法

先考虑局部卡尔曼滤波器 1(LF1), 这是一标准卡尔曼滤波器, LF1 的模型为

$$X_1(k+1) = \Phi(k) X_1(k) + U(k) + W(k)$$

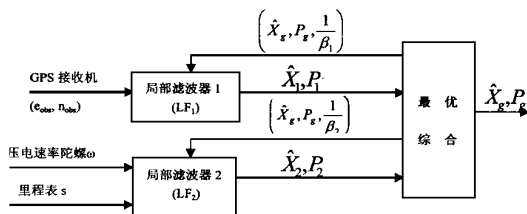


图 1 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波器结构图

$$Z_1(K) = H_1(k) X_1(k) + V_1(k)$$

算法为

$$\hat{X}(k+1) = P_1(k+1) [H_1^T(k+1) R_1^{-1}(k+1) Z_1(k+1) + P_1^{-1}(k+1|k) \hat{X}_1(k+1|k)]$$

$$P_1^{-1}(k+1) = P_1^{-1}(k+1|k) + H_1^T(k+1) R_1^{-1}(k+1) H_1(k+1)$$

$$\hat{X}(k+1|k) = \Phi(k) \hat{X}_1(k)$$

$$P_1(k+1|k) = \Phi(k) P_1(k) \Phi^T(k) + Q_1(k)$$

这里 $\Phi(k)$ 如式(14)所示。

$$\Phi(k) = \text{diag} \{ \Phi_e(T), \Phi_n(T), e^{-\frac{T}{T_s}}, I_{1 \times 1} \} \quad (14)$$

$$\Phi_e(T) = \Phi_n(T) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 为牛顿矩阵, } I_{1 \times 1} = 1, \text{diag 表示对角矩阵。}$$

此外,机动加速度均值和方差的自适应算法见参考文献[4],此处不再介绍。

$$\text{信息分配:} \begin{cases} P_1^{-1}(k) = \beta P_g^{-1}(k) \\ Q_1^{-1}(k) = \beta Q_g^{-1}(k) \\ \hat{X}(k) = \hat{X}_g(k) \end{cases}$$

再考虑局部卡尔曼滤波器 2(LF2),这是对应 DR 系统的扩展卡尔曼滤波器 LF2 的模型为

$$X_2(k+1) = \Phi(k) X_2(k) + U(k) + W(k)$$

$$Z_2(k) = h_2[k, X_2(k)] + V_2(k)$$

算法为

$$\hat{X}_2(k+1) = \hat{X}_2(k+1|k) + K_2(k+1) [Z_2(k+1) - h[k+1, \hat{X}_2(k+1|k)]]$$

$$\hat{X}_2(k+1|k) = \Phi(k) \hat{X}_2(k); \text{这里 } \Phi(k) \text{ 同式(14)。}$$

$$P_2(k+1|k) = \Phi(k) P_2(k) \Phi^T(k) + Q_2(k)$$

$$K_2(k+1) = P_2(k+1|k) H_2^T(k+1) [H_2(k+1) P_2(k+1|k) H_2^T(k+1) + R_2(k+1)]^{-1}$$

$$P_2(k+1) = [I - K(k+1) H_2(k+1)] P_2(k+1|k)$$

此外,机动加速度均值和方差的自适应算法同 LF1。

$$\text{信息分配:} \begin{cases} P_2^{-1}(k) = \beta P_g^{-1}(k) \\ Q_2^{-1}(k) = \beta Q_g^{-1}(k) \\ \hat{X}_2(k) = \hat{X}_g(k) \end{cases}$$

整体状态的最优综合为

$$\hat{X}_g(k+1) = P_g(k+1) [P_1^{-1}(k+1) \hat{X}_1(k+1) + P_2^{-1}(k+1) \hat{X}_2(k+1)]$$

$$P_g^{-1}(k+1) = P_1^{-1}(k+1) + P_2^{-1}(k+1)$$

$$Q_g^{-1}(k+1) = Q_1^{-1}(k+1) + Q_2^{-1}(k+1)$$

信息分配系数 β 和 β 应满足 $\beta + \beta = 1$ 。证明可知,整体状态的估计 $\hat{X}_g(k+1)$ 是最优的。

4 一种自适应联合卡尔曼滤波器及其算法

在上述 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波器结构中,若考虑到机动加速度均值和

方差的自适应算法,分别对应 GPS 定位系统和 DR 系统的两局部卡尔曼滤波器 LF1 和 LF2,它们实际上都是自适应滤波器。但是,这里所指的自适应联合卡尔曼滤波器另有新的含义。

我们知道,在联合卡尔曼滤波器中,各局部滤波器和主滤波器的信息分配系数 β, \dots, β , β 的取值,决定着联合卡尔曼滤波器的性能。就前面所设计的 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波器而言, β, β 的取值影响联合卡尔曼滤波器的性能,正因为如此,便可通过选择不同的信息分配系数,来改变滤波器的性能,以满足不同的需要。

根据信息分配原理,有 $\beta + \beta = 1$ 。下面考虑一个特殊情况,即令 $\beta = 0, \beta = 1$ 。对 LF1,因为 $\beta = 0$,故经推导可知,此时 LF1 输出的状态估计值 $\hat{X}_1(k+1)$ 对整体状态输出 $\hat{X}_g(k+1)$ 的影响最小。同理,当 $\beta = 0$ 时,局部滤波器 LF2 的输出 $\hat{X}_2(k+1)$ 对整体状态输出 $\hat{X}_g(k+1)$ 的影响最小。当然在实际滤波算法中,不能取 $\beta = 0$ 或 $\beta = 0$,否则将会出现发散,但可根据需要取 β 或 β 为尽可能小的值。

经过大量的计算机仿真研究发现,当取 $\beta = \beta = \frac{1}{2}$ 时,联合卡尔曼滤波器的整体输出 \hat{X}_g 有最好的估计精度。若 $\beta > 0.5, \beta < 0.5$,则滤波器的整体输出在性能上以局部滤波器 LF1 为主,且 β 越接近 1 及 β 越小,滤波器的整体输出 \hat{X}_g 中,LF1 的输出 \hat{X}_1 所占的比重越大,也即整个联合卡尔曼滤波器在性能上越接近 LF1,这正是我们所希望的性能。在市区内,由于遮挡等原因,GPS 定位系统不能正常定位或定位精度较差时,可取 $\beta \leq 1, \beta \approx 1$ ($\beta + \beta = 1$),使联合卡尔曼滤波器的整体状态输出近似为 LF2 的输出,即 DR 系统的输出,在性能上接近 DR 系统的性能。而 GPS 能正常工作,定值精度较高时,取 $\beta = 0.5, \beta = 0.5$ ($\beta + \beta = 1$),使得联合卡尔曼滤波器的整体输出具有较好的综合性能,即获得较高的定位精度和容错能力。

若能根据具体情况自动调整 β 和 β 的大小,这时联合卡尔曼滤波器便成为一种自适应联合卡尔曼滤波器。如何自动调整 β, β 的大小呢?可利用 GPS 接收机输出的反映定位精度的参数,以其为依据。对 Magellan 公司的 GPS-OEM 接收机,其定位精度完全由 PDOP 反映(包括卫星测量误差、SA 影响、DOP 影响),可根据其 PDOP 的大小,决定 β 的取值。 β, β 的自适应算法为

$$\beta = \begin{cases} 0.99 & PDOP \leq 2 \\ \frac{2}{PDOP} & (2 < PDOP < 5) \\ \frac{1}{PDOP} & (5 \leq PDOP < 10) \\ \frac{1}{2PDOP} & (10 \leq PDOP) \end{cases}$$

$$\beta = 1 - \beta$$

而对于 Rockwell 公司出品的 Navcard GPS 接收机,其定位精度由 PDOP 和 FOM 两个参数反映,这时 β, β 的自适应算法为

$$\beta = \begin{cases} \frac{5}{4PDOP} + \frac{1}{10FOM} & (PDOP > 5) \\ \frac{1}{2PDOP} + \frac{1}{20FOM} & (PDOP \geq 5) \end{cases}$$

$$\beta = 1 - \beta$$

这样, GPS/DR 组合导航系统的自适应联合卡尔曼滤波结构如图 2 所示。

5 计算机仿真结果

假定车辆以 $10\sqrt{2}$ m/s 的速度沿 45° 航向匀速运动, GPS 定位数据在静态实测数据的基础上仿真得到。采用上述的自适应联合卡尔曼滤波算法, 进行 GPS/DR 组合导航系统动态定位的最优综合, 计算机仿真结果如图 3 所示, 图中虚线部分为原始 GPS 定位误差, 实线为组合导航系统经自适应联合卡尔曼最优综合后的定位误差, 采用自适应联合卡尔曼滤波器的定位精度 GPS/DR 组合导航系统优于采用的定位精度集中滤波模型^[4]。联合卡尔曼滤波器的实际应用研究开展的时间不长, 仍有不少问题需要进一步探索, 将其应用于车辆 GPS/DR 组合导航系统是一种新的尝试, 在进一步提高滤波器的容错性能和精度, 及提高系统鲁棒性方面还需要进一步深入研究。

6 参考文献

- Carlson, N. A. . Information Sharing approach to federated Kalman filtering. Proceedings of National Aerospace Electronics Conference, 1988, Dayton, OH, USA.
- Carlson, N. A. , Berarducci, M. P. . Federated Kalman filter simulation results. Journal of The Institute of Navigation, 1994(41) 3: 297~321.
- Gao, Y. , Krakiwsky, E. J. , Abousalem, M. A. , and Mclellan, J. F. . Comparison and analysis of centralized, decentralized, and federated filters. Journal of The Institute of Navigation, 1993(40) 1: 69~86.
- 房建成. 最优估计理论与方法在组合导航中的应用研究, 东南大学博士学位论文, 1996.
- 房建成, 万德钧. GPS 组合导航系统在车辆导航中的应用. 东南大学学报, 1996(26) 3: 96~102.
- Ramjattan, A. N. , and Gross, P. A. . A Kalman filter model for an integrated land vehicle navigation system. The Journal of Navigation, 1995(48) 2: 293~302.
- Kao, W. W. . Integration of GPS and dead reckoning navigation system. In: Proceedings of VNIS'91, Dearborn, Michigan. America, 1991: 635~643.
- Fang Jiancheng, Wan Dejun. . The fault tolerance and fault detection of multisensor systems with an federated Kalman filter. Proceedings of ICEMI'95. October 17~20, 1995, Shanghai China.

作者简介 房建成, 博士后, 副教授, 研究方向为定位导航与测控技术、最优估计理论与应用、多传感器信息融合技术, 100083 北京航空航天大学第五研究室。

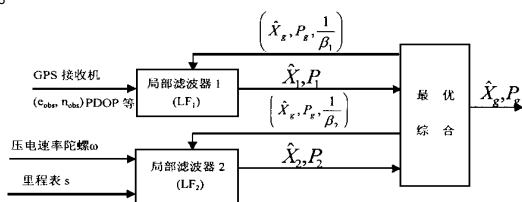


图2 GPS/DR 组合导航系统的自适应联合卡尔曼滤波结构图

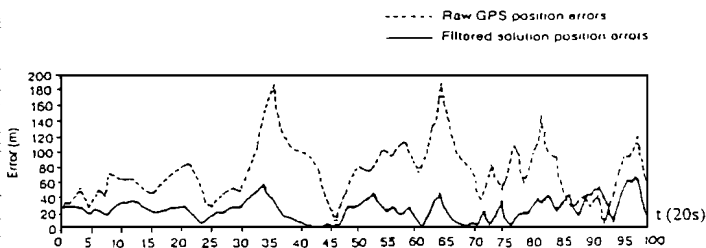


图3 计算机半物理仿真结果