

文章编号:1000-582X(2005)10-0086-05

联合卡尔曼滤波在车辆组合导航系统中的应用*

陈则王,袁 信

(南京航空航天大学自动化学院,江苏南京 210016)

摘要:GPS/DR组合导航系统是一种低成本、高可靠性的车载导航设备.针对陆地车辆GPS/DR组合导航系统的特点,设计了用于该系统的联合卡尔曼滤波器,给出了滤波算法,并进行了实地跑车实验.理论分析和跑车实验的结果表明,联合滤波方法不仅有效地抑制了DR系统的误差发散,而且能够充分利用DR的数据信息对GPS定位的随机误差进行补偿,从而有效地提高GPS/DR组合系统的定位精度及容错能力.

关键词:联合卡尔曼滤波;组合导航;GPS;航位推算系统

中图分类号:U666.12

文献标识码:A

在陆地车辆导航系统中,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,但是其可用性会受到环境因素的影响.由于GPS接收机只有在接收到4颗以上的卫星信号后才能完成定位解算,所以当车辆行驶在高楼林立的市区、通过立交桥以及隧道的时候,GPS卫星信号将经常受到遮挡,因此单独使用GPS定位,就不可能实现车辆的连续、准确、可靠的定位.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,并且其有效性不受外界因素的影响.但是由于航位推算只能确定相对位置,推算定位的误差会随着推算过程的进行不断增加.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,充分发挥各自的优点,互相取长补短,就能够获得较好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.对任何性能良好的车辆定位与导航系统来说,精确、可靠的车辆定位是必要的先决条件.笔者研究了GPS/DR组合定位方法,提出了一种联合卡尔曼滤波器及其算法,跑车实验的结果表明,联合滤波方法不仅有效地抑制了DR系统的误差发散,而且能够充分利用DR的数据信息对GPS定位的随机误差进行补偿,从而大大提高了GPS/DR组合导航系统的精度.

1 GPS/DR组合定位系统联合滤波方案

实现GPS/DR组合的核心问题是数据融合方案的设计,即采用何种方法来融合两种定位系统的信息以获得最优的组合定位结果.卡尔曼滤波方法用于GPS/DR的组合定位中,就是将GPS和DR的信息同时用于定位解的求解过程中,使DR系统的状态在滤波过程中不断得到修正,组合定位的输出又可以提供较为准确的初始位置和方向信息,从而即使在GPS失效、单独使用DR推算定位时也能长时间保持较高的定位精度.

利用卡尔曼滤波实现多个传感器的信息融合有两种途径^[1]:一种是标准的集中式卡尔曼滤波,另一种是分散式卡尔曼滤波.采用集中式卡尔曼滤波,理论上可以获得系统状态的最优估计,但系统状态维数高,计算负担重,严重影响了滤波器的动态性能和实时性.当一种传感器的数据出现较大偏差时,这一较大误差将会被传播到所有观测量和状态变量的估计中去,导致状态污染,滤波精度和稳定度下降.分散滤波是一种两阶段数据处理技术,它把原来单独的集中滤波器用一个主滤波器和若干局部滤波器来代替.在第一阶段,直接由各个局部滤波器并行处理传感器信息,产生局部状态的最优估计;第二阶段,主滤波器将局部滤波器输

* 收稿日期:2005-05-16

基金项目:南京航空航天大学科研基金资助项目(S0014-306)

作者简介:陈则王(1968-),男,江西抚州人,南京航空航天大学副教授,主要研究方向:数字系统故障诊断,智能车辆定位系统.

出的局部状态估计进行融合处理,产生整体的状态最优估计.分散化滤波理论已经发展了 20 多年,许多文献都对其进行了描述和改进.在这些分散滤波方法中,由 Carlson^[2]提出的联合滤波方法以其设计灵活、计算量小和容错性好而受到广泛重视.

联合滤波器实际上是一种特殊的分散式卡尔曼滤波器,它的特殊之处在于其包含了一个信息分配的过程.在这一过程中,主滤波器的动态信息被分配到每一个局部滤波器中.车载 GPS/DR 组合导航系统是由两个相互独立的子系统构成的多传感器系统,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.采用联合卡尔曼滤波结构取代标准的集中式卡尔曼滤波器的主要目的是要解决 DR 传感器误差对系统状态估计的不良影响,提高组合系统的整体滤波精度.因此,采用了如图 1 所示的联合滤波器简化结构^[3].称其为简化系统的原因有两个:1)系统中没有参考系统,同时 GPS 接收机作为局部传感器 1,航位推算系统中的角速率陀螺和里程表作为局部传感器 2.2)令 $\beta_m = 0$,则主系统不占有任何全局信息,而仅仅完成对各子系统估计的综合运算.其估计值即为全局估计:

$$\hat{X}_m = \hat{X}_g = P_g(P_1^{-1}\hat{X}_1 + P_2^{-1}\hat{X}_2), \quad (1)$$

系统包含两个局部滤波器,分别处理 GPS 与 DR 系统的定位数据.两者的状态估计输送到主滤波器中进行最优融合并产生高精度的全局估计,然后信息分配系数对局部滤波器进行反馈重置,从而使局部滤波的精度也获得提高.这时主系统的计算量最小,而总体系统与反馈滤波相比速度最快,系统设计最佳.系统中的 GPS 定位系统所对应的信息分配系数为 β_1 ,DR 系统所对应的信息分配系数为 β_2 .

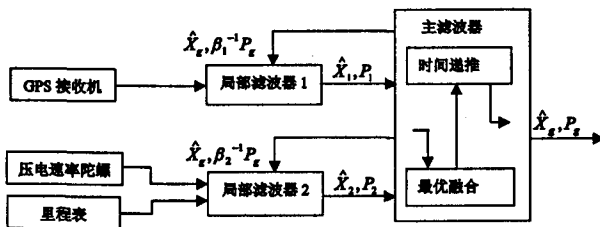


图 1 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波器结构图

2 GPS/DR 组合系统的联合卡尔曼滤波器的设计

2.1 局部滤波器误差模型的建立

2.1.1 GPS 误差模型

对于车辆导航领域,GPS 定位误差包含有多种分量,如导致时钟偏置对应的距离误差、等效时钟频漂所对应的速度误差等.所有这些定位误差的总和表现出

非常明显的随机噪声特性,通常认为在东向和北向两个坐标轴方向上的 GPS 定位误差总和可分别等效为一阶马尔可夫过程,其误差模型描述如下式:

$$\dot{\varepsilon}_e = -\tau_{\varepsilon e}\varepsilon_e + \omega_{\varepsilon e}, \quad \dot{\varepsilon}_n = -\tau_{\varepsilon n}\varepsilon_n + \omega_{\varepsilon n}, \quad (2)$$

其中 ε_e 和 ε_n 表示 GPS 在东向和北向的定位误差总和, $\tau_{\varepsilon e}$ 和 $\tau_{\varepsilon n}$ 分别是对应马尔可夫过程的相关时间常数的倒数, $\omega_{\varepsilon e}$ 和 $\omega_{\varepsilon n}$ 分别是均值为零,方差为 $\sigma_{\varepsilon e}^2$ 和 $\sigma_{\varepsilon n}^2$ 的高斯白噪声.

2.1.2 DR 系统测量元件误差模型

为了估计并校正测量元件误差,需要建立适当的测量元件模型.下面分别给出速率陀螺和里程仪的误差模型.速率陀螺测量的是载体的角速度,其输出量是与载体角运动成正比的电压信号.速率陀螺的误差源主要有 2 个,分别是刻度因子误差和陀螺零偏.通常可以采用一阶马尔可夫过程来描述,即:

$$\dot{\delta}_\theta = -\tau_{\delta\theta}\delta_\theta + \omega_{\delta\theta}, \quad \dot{\delta}_v = -\tau_{\delta v}\delta_v + \omega_{\delta v}, \quad (3)$$

其中 $\tau_{\delta\theta}$ 和 $\tau_{\delta v}$ 分别是对应马尔可夫过程的相关时间常数的倒数, $\omega_{\delta\theta}$, $\omega_{\delta v}$ 是均值为零,方差分别是 $q_{\delta\theta}^2$ 和 $q_{\delta v}^2$ 的高斯白噪声.

对于里程仪来说,车轮每转动一周,里程仪就输出一个脉冲信号.单位时间内,通过积累里程仪输出脉冲数 N ,可获得载体前进的距离 D 和行驶速度 v .刻度系数误差是里程仪载体速度的主要误差源,可认为是附加在测距输出中的一个随机噪声.因此里程仪误差模型也可以采用一阶马尔可夫过程来描述,即:

$$\dot{\delta}_s = -\tau_{\delta s}\delta_s + \omega_{\delta s}, \quad (4)$$

其中 $\tau_{\delta s}$ 是相关时间常数的倒数, $\omega_{\delta s}$ 是均值为零,方差为 $q_{\delta s}^2$ 的高斯白噪声.

2.2 局部滤波器状态方程和量测方程的建立

2.2.1 局部滤波器 1 的状态方程和量测方程

由于是对车辆的 GPS 定位数据进行滤波,因此选择滤波器的状态变量为:

$$X = [e, \dot{e}, \ddot{e}, n, \dot{n}, \ddot{n}, \varepsilon_e, \varepsilon_n]^T, \quad (5)$$

其中 $e, n; \dot{e}, \dot{n}; \ddot{e}, \ddot{n}$ 及 $\varepsilon_e, \varepsilon_n$ 分别是车辆的东向和北向位置坐标、速度、加速度及位置误差.东向和北向两个坐标轴上的 GPS 定位误差被视为各种误差源造成的总的位置误差.采用机动载体的“当前”统计模型^[4],并用一阶马尔可夫过程描述 GPS 的定位误差,即有如下等式:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{e}(t) &= \bar{a}_e(t) + a_e(t), \quad \dot{a}_e(t) = -\tau_{ae}a_e(t) + \omega_{ae}(t) \\ \ddot{n}(t) &= \bar{a}_n(t) + a_n(t), \quad \dot{a}_n(t) = -\tau_{an}a_n(t) + \omega_{an}(t) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

则系统的状态方程可写为:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U + W(t). \quad (7)$$

将 GPS 接收机输出的位置信息 e_o, n_o , 作为外部观测测量, 则可取系统的观测矢量如下式:

$$Z = [e_o, n_o]^T, \quad (8)$$

外部观测测量与状态变量之间具有如下的关系:

$$\left. \begin{aligned} e_o &= e + \varepsilon_e + v_1, \\ n_o &= n + \varepsilon_n + v_2, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

v_1, v_2 分别是 GPS 接收机输出的位置观测测量 e_o, n_o 的观测噪声, 是均值为零方差为 σ_1^2, σ_2^2 的高斯白噪声. 于是观测方程可写为:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} e_o(k) \\ n_o(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(k) + \varepsilon_e(k) \\ n(k) + \varepsilon_n(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix},$$

即:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k), \quad (10)$$

其中

$$Z = [e_o(k) \quad n_o(k)]^T, \\ H(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2.2 局部滤波器 2 的状态方程和量测方程

采用 DR 系统进行车辆定位, 取车辆在东向和北向的位置、速度和加速度分量为状态变量, 即有:

$$X = [e, \dot{e}, \ddot{e}, n, \dot{n}, \ddot{n}, \delta_\theta, \delta_s]^T, \quad (11)$$

其中 δ_θ 及 δ_s 分别是陀螺仪输出的车辆转角误差以及里程仪输出的行驶距离误差. 采用一阶马尔可夫过程来表示陀螺仪和里程表的测量误差模型, 仍然采用机动载体的“当前”统计模型描述车辆的运动状态, 可以建立车辆运动的系统状态方程如下:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U + W(t). \quad (12)$$

将陀螺仪输出的车辆转角 θ 和行驶距离信息 s 作为外部观测测量, 则可取系统的观测矢量如下式:

$$Z = [\theta, s]^T. \quad (13)$$

外部观测测量与状态变量之间具有如下的关系:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \alpha_t - \beta_{(t-1)} + \delta_\theta + v_1, \\ s &= T \sqrt{\dot{e}^2 + \dot{n}^2} + \delta_s + v_2, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中, v_1 是速率陀螺仪漂移误差中的均值为零方差为 σ_θ^2 的高斯白噪声; v_2 是里程表输出量的观测噪声, 是均值为零方差为 σ_s^2 的高斯白噪声.

对上式进行离散化处理得观测方程如下式:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \theta(k) \\ s(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctg \frac{\dot{e}(k)}{\dot{n}(k)} + \gamma - \beta(k-1) + \delta_\theta(k) \\ T \sqrt{\dot{e}^2(k) + \dot{n}^2(k)} + \delta_s(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix},$$

即:

$$Z(k) = h[k, X(k)] + V(k). \quad (15)$$

观测方程(15)是一非线性方程, 用最优估计方法对系统状态变量进行估计时, 先要进行线性化处理. 由于进行模型的线性化处理时作了一些近似处理, 因此, 这时的状态估计也就不再是最优估计^[4], 而成为状态的次优估计了.

2.3 组合导航系统的联合卡尔曼滤波算法

图 1 中的两个局部滤波器的公共状态变量为:

$$X = [e, \dot{e}, \ddot{e}, n, \dot{n}, \ddot{n}]^T, \quad (16)$$

这样上述两个局部滤波器的状态变量分别是:

$$X_1 = \begin{bmatrix} X_{C1} \\ X_{B1} \end{bmatrix}, \quad X_{B1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_e \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} X_{C2} \\ X_{B2} \end{bmatrix}, \quad X_{B2} = \begin{bmatrix} \delta_\theta \\ \delta_s \end{bmatrix}, \quad (18)$$

上述两式中, X_{C1}, X_{C2} 等于两个局部滤波器的公共状态变量 X_C, X_{B1}, X_{B2} 是两个局部滤波器的专有状态估计. 下标 1 和 2 用来区分两个局部滤波器. 设局部滤波器 i 的状态估计矢量、噪声协方差阵、状态协方差阵分别是 $X_i, Q_i, P_i, i=1, 2$. 相应的组合导航系统联合滤波器的计算过程如下^[5]:

1) 给定初始值: 假设在起始时刻组合系统的初始估计值为 $X_g(0) = X_C(0)$, 其初始估计协方差阵为 $P_g(0)$, 噪声协方差阵为 $Q_g(0)$.

2) 设定局部滤波器的初始状态:

$$X_i(0) = \begin{bmatrix} X_{Ci}(0) \\ X_{Bi}(0) \end{bmatrix}, \quad P_i(0) = \begin{bmatrix} \beta_i^{-1} P_g(0) & 0_{6 \times 2} \\ 0_{2 \times 6} & P_{Bi}(0) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中 P_{Bi} 是局部滤波器 $i(i=1, 2)$ 的专有状态初始估计协方差阵, $\beta_i(i=1, 2)$ 是信息分配系数. 将这一信息通过信息分配因子按以下规则分配到各局部滤波和全局滤波器, 以获取组合系统公共状态的全局最优估计 \hat{X}_g 和协方差阵 P_g .

$$\left. \begin{aligned} Q_g^{-1} &= Q_1^{-1} + Q_2^{-1}, \quad Q_i^{-1} = \beta_i Q_g^{-1}, \quad i=1, 2, \\ P_g^{-1} &= P_1^{-1} + P_2^{-1}, \quad P_i^{-1} = \beta_i P_g^{-1}, \quad i=1, 2, \\ P_g^{-1} \hat{X}_g &= P_{C1}^{-1} \hat{X}_{C1} + P_{C2}^{-1} \hat{X}_{C2}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, $P_{Ci} = [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 2}] P_i [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 2}]^T$ 是局部滤波器 i 的公共状态估计协方差阵. 而其中的 β_i 必须满足信息分配原则, 即: $\beta_1 + \beta_2 = 1, 0 \leq \beta_i \leq 1, i=1, 2$.

3) 信息的量测更新: 第 i 个局部滤波器的量测更新为:

$$\left. \begin{aligned} P_i^{-1}(k+1, k+1) \hat{X}_i(k+1, k+1) = \\ P_i^{-1}(k+1, k) \hat{X}_i(k+1, k) + \\ H_i^T(k+1) R_i^{-1}(k+1) Z_i(k+1), \\ P_i^{-1}(k+1, k+1) = P_i^{-1}(k+1, k) + \\ H_i^T(k+1) R_i^{-1}(k+1) H_i(k+1), \quad i = 1, 2. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

4) 信息的时间更新:

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_i(k+1, k) = \Phi(k+1, k) \hat{X}_i(k), \\ P_i(k+1, k) = \Phi(k+1, k) P_i(k, k) \Phi^T(k+1, k) + \\ \Gamma(k+1, k) Q_i(k) \Gamma^T(k+1, k), \\ i = 1, 2. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

5) 利用全局最优信息融合结果进行反馈:

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_g(k) = P_g(k) \sum_{i=1}^2 P_{Ci}^{-1}(k) \hat{X}_{Ci}(k), \\ P_g(k) = \left(\sum_{i=1}^2 P_{Ci}^{-1}(k) \right)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

上式中的全局最优估计 $\hat{X}_g(k)$ 将局部滤波器 i 的状态估计重新设置为:

$$\hat{X}_i(k) = \begin{bmatrix} \hat{X}_g(k) \\ P_{Bi}(k) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

再利用全局估计协方差阵将局部滤波器 i 的估计协方差阵重新设置为:

$$P_i(k) = \begin{bmatrix} \beta_i^{-1} P_g(k) & 0_{6 \times 2} \\ 0_{2 \times 6} & P_{Bi}(k) \end{bmatrix}. \quad (25)$$

上式中的 $P_{Bi}(k)$ 是当前时刻局部滤波器 i 的状态估计协方差阵:

$$P_{Bi} = [0_{2 \times 6} \quad I_{2 \times 2}] P_i(k) [0_{2 \times 6} \quad I_{2 \times 2}]^T.$$

对于上述的 GPS/DR 组合导航系统的联合卡尔曼滤波器, β_1, β_2 的取值将影响联合卡尔曼滤波器的性能^[6]. 通过选择不同的信息分配系数, 可以改变滤波器的性能, 以满足不同的需要. 根据信息分配原理, 有 $\beta_1 + \beta_2 = 1$. 如果取 β_1 的值近似于 0, 则对于局部滤波器 1 来说, 它的输出状态的估计值 $\hat{X}_{C1}(k)$ 对整体状态输出 $\hat{X}_g(k)$ 的影响最小. 同样的如果取 β_2 的值近似于 0, 那么对于局部滤波器 2 来说, 它的输出状态的估计值 $\hat{X}_{C2}(k)$ 对整体状态输出 $\hat{X}_g(k)$ 的影响最小. 在实际滤波中, β_1, β_2 的值不能够取为零, 但可以根据需要将其取尽可能小的值. 对于城市中的 GPS/DR 车辆导航系统而言, 由于浓密的树荫、高楼以及隧道等造成 GPS 信号丢失, 使得 GPS 定位系统不能正常定位或者定位精度差时, 可以选取 $\beta_1 < 1, \beta_2 \approx 1$ (其中 β_1, β_2 的值需

满足信息分配原理, 即满足等式 $\beta_1 + \beta_2 = 1$). 使得滤波器的整体状态输出由局部滤波器 2 确定, 即航位推算系统决定系统的性能. 而当 GPS 系统能够正常工作、定位精度较高时, 联合滤波器的信息分配系数取 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$, 即在两个局部滤波器间平均分配信息时, 滤波器的整体输出 \hat{X}_g 有最好的估计精度和较好的容错能力.

3 GPS/DR 系统的信息综合跑车实验结果

为了验证前面提出算法的有效性, 于 2003 年 8 月 04 日进行跑车试验, 跑车路线为南京航空航天大学校内沿 4 号楼北侧 - 体育馆 - 西东干道 - 花园东侧 - 逸夫馆 - 10 号楼北侧 - 逸夫馆西侧 - 4 号楼北侧, 是一段封闭路段, 跑车速度包括匀加速、匀速、转弯、匀减速等多种行车方式, 平均行驶速度大约 6.7 m/s. 组合跑车路线两圈多一些, 起点、终点都在 8 号楼西侧的道路上. 系统采用 Magellan GPS - OEM 接收机, ENV - 05A 低精度、低成本压电晶体陀螺和 CGQ 型里程表. 传感器采集的数据送入计算机中实时处理. 联合滤波器的信息分配系数 β_1, β_2 的取值根据 GPS 系统的工作情况在线确定, 需满足 $\beta_1 + \beta_2 = 1$. 图 2 为单独使用 GPS 情况下车辆行驶轨迹, 从图中可以看出, GPS 的定位曲线与实际路线基本相同, 但在 4 号楼西面到学校西门口的路段上, 由于道路两旁的高楼及浓密的树荫, 出现了 GPS 信号异常的情况, 实际车辆并没有走到图中所示点. 为了便于比较结果, 图 3 为纯 DR 跑车路线以及采用联合滤波算法的 GPS/DR 组合跑车路线. 从图中可以看出, DR 系统的测量曲线随着时间的推移, 误差逐渐积累, 出现定位漂移. 而采用联合滤波算法的组合系统定位曲线与实际路线相同而且平滑效果显著, 充分说明了该联合滤波算法的有效性.

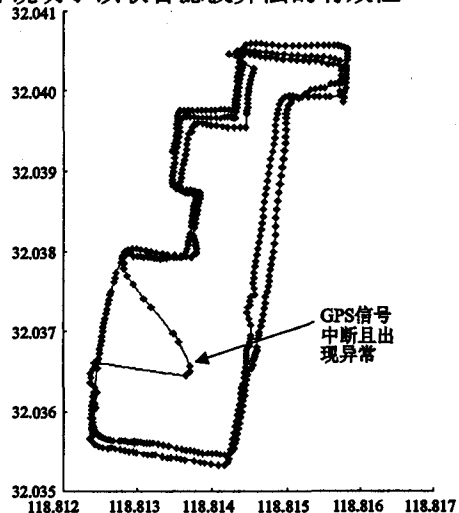


图 2 单独 GPS 定位结果

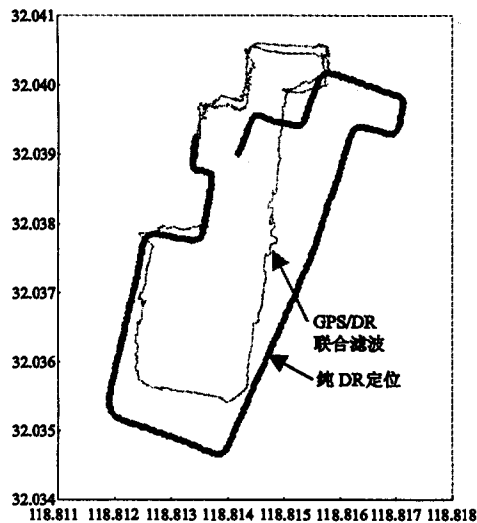


图3 纯 DR 与 GPS/DR 联合滤波定位曲线比较

4 结束语

笔者将卡尔曼滤波方法应用于车辆 GPS/DR 组合导航系统中,设计了车辆组合导航系统的联合卡尔曼滤波器,给出了基于联合滤波的信息融合算法.理论分析与试验结果表明,联合卡尔曼滤波器是处理车辆组

合导航系统信息融合的有效方法.为了能够满足车辆行驶的动态特性,优化滤波器结构和信息分配系数,以确保滤波效果仍是有待进一步解决的问题.

参考文献:

- [1] GAO Y, KRAKISWSKY E J, ABOUSALEM M A, et al. Comparison and Analysis of Centralized, Decentralized and Federated Filters[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1993, 40(1): 69-86.
- [2] CARLSON N A. Federated Kalman Filter Simulation Results[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1994, 41(3): 297-321.
- [3] 袁冬莉, 席庆彪, 阎建国, 等. 联邦卡尔曼滤波器在无人机导航系统中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(2): 310-314.
- [4] 万德均, 房建成, 王庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2000.
- [5] 张其善, 吴今培, 杨东凯. 智能车量定位导航系统及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] 顾启泰, 王颂. 联邦滤波器信息分配系数的优选算法[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6): 1-6.

Federated Kalman Filter for GPS/DR Integrated Navigation Systems in Land Vehicle

CHEN Ze-wang, YUAN Xin

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: GPS/DR is a low-cost and high-reliability navigation facility. A federated Kalman filter was designed to realize the optimal synthesis of GPS/DR integrated land vehicle navigation system, and its algorithm is presented. A field test was performed. The theoretical analysis and the experiment results both show that, by using this federated Kalman filter, the positioning accuracy and fault tolerance capability of the GPS/DR integrated navigation system can be greatly improved.

Key words: federated Kalman filter; vehicle-integrated navigation; GPS; DR

(编辑 吕赛英)