

基于离散平稳小波变换的 EKF 数据融合算法*

李红连, 黄丁发, 熊永良

(西南交通大学 土木工程学院, 四川成都 610031)

摘要:针对车辆 GPS/DR 组合导航系统中广泛采用的扩展卡尔曼滤波器进行数据融合难以建立精确的数学模型的问题,提出了基于离散平稳小波变换的扩展卡尔曼滤波器数据融合算法。仿真表明,该算法优于扩展卡尔曼滤波器,对车辆组合导航系统的数据融合是有效的。

关键词:GPS/DR; 扩展卡尔曼滤波器(EKF); 离散平稳小波变换(DSWT); 数据融合

中图分类号:P228.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)03-0043-03

The Extended Kalman Filter Data Fusion Algorithm Based on Discrete Stationary Wavelet Transformation

LI Hong - lian, HUANG Ding - fa, XIONG Yong - liang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: It is difficult to establish precise mathematical model in extended Kalman filter data fusion algorithm for GPS/DR integrated vehicle navigation system, an improved extended Kalman filter data fusion algorithm is put forward based on Discrete stationary wavelet transformation. The simulation results show that the algorithm is better than the extended Kalman filter data fusion algorithm, and is available for GPS/DR integrated vehicle navigation system.

Keywords: GPS/DR; Extended Kalman Filter (EKF); discrete stationary wavelet transformation (DSWT); data fusion

GPS 能够迅速、准确、全天候地为车辆导航系统提供导航定位信号,但在城市高楼区、林荫道、隧道以及高山峡谷等特殊地理环境下,存在信号遮挡问题,造成车辆导航定位误差增大甚至失败事故。低成本的航位推算系统 DR 具有短时间内定位精度高,但定位误差随时间积累的特点,因而不能单独、长时间地为车辆提供导航定位服务。将 GPS 与 DR 系统组合起来,一方面当 GPS 失效时,利用 DR 系统的短时间内定位精度高的特点独立自主推算车辆所在的位置提供导航定位服务;另一方面当 GPS 有效时,为车辆提供导航定位服务,同时利用 GPS 信号进行 DR 系统的初始化以及实时校正、标定 DR 系统,减小其误差积累。通过 GPS/DR 组合的车辆导航系统,其精度和可靠性得到明显提高。由于 DR(陀螺仪、里程表)和 GPS 接收机的传感器存在较大误差和物理性质的差异,为了良好地提供车辆导航定位服务需对这些信号进行数据融合^[1,2,3]。目前车辆 GPS/DR 组合导航系统中广泛采用的数据融合方法是扩展卡尔曼滤波器及其改进算法

(如引入渐消因子、强跟踪、带有速度观测量等),但需要建立精确的数学模型,对于车辆 GPS/DR 组合导航的高动态性,有时是难以建立的^[4]。小波分析方法不需建立数学模型,直接对信号进行去噪处理。常用的离散二进小波变换阈值去噪方法虽然对信号去噪能力强,但在信号的畸变点附近的失真比较大并且其重构误差随尺度的增加而增大。针对这些不足,本文尝试应用在这些方面比离散二进小波变换性能优越的离散平稳小波变换的阈值去噪方法对组合导航信号进行去噪,再通过扩展卡尔曼滤波器对已去噪的组合导航信号进行数据融合推算车辆实时位置的研究^[5,6],得出了一些有用的结论。

1 GPS/DR 扩展卡尔曼滤波数据融合算法

设 GPS/DR 组合导航的扩展卡尔曼滤波器的状态变量为 $X(t) = [e, v_e, a_e, \varepsilon_e, nv_n, a_n, \varepsilon_n]^T$, 分别表示车辆在东向和北向的位置、速度、加速度分量以及各种误差源在坐标轴上造成的总位置误差。采用机动载体的

* 收稿日期:2005-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40271091);高等学校博士学科点专项科研基金(20040613025)

作者简介:李红连(1973-),男,重庆市忠县人,博士生,主要从事 GPS 卫星导航及智能交通研究。

“当前”统计模型,则可得到系统状态方程:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U(t) + W(t) \quad (1)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} A_e & 0 \\ 0 & A_n \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\tau_{ae} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_e \end{bmatrix},$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\tau_{an} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_n \end{bmatrix}, U(t) = [0, 0, \frac{1}{\tau_{ae}} \bar{a}_e, 0]^T,$$

$W(t) = [0, 0, w_{ae}, \omega_e, 0, 0, w_{an}, w_n]^T$; w_e, ω_e, w_n 和 w_{an} 分别为 $(0, \sigma_e^2)$ 、 $(0, \sigma_{\omega}^2)$ 、 $(0, \sigma_n^2)$ 和 $(0, \sigma_{an}^2)$ 的高斯白噪声; τ_e, τ_n 分别为车辆在东向和北向总位置误差的等效马尔柯夫过程的相关时间常数; τ_{ae}, τ_{an} 分别为车辆在东向和北向机动加速度的相关时间常数; \bar{a}_e, \bar{a}_n 分别为车辆当前东向和北向机动加速度均值,在每一采样周期内为常数。

将 GPS 接收机输出的位置 e', n' 以及陀螺仪输出的角速率 ω 和里程表在一个采样周期 T 内输出的距离 s 作为外部观测量,可得到系统观测方程:

$$Z(t) = h[t, X(t)] + V(t) \quad (2)$$

$$\text{式中: } Z(t) = \begin{bmatrix} e' \\ n' \\ \omega \\ s \end{bmatrix}, h[t, X(t)] = \begin{bmatrix} e \\ n \\ \frac{v_n a_e - v_e^n a_n}{v_e^2 + v_n^2 a_n} \\ \psi T \sqrt{v_e^2 + v_n^2} \end{bmatrix},$$

$V(t) = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \varepsilon_\omega \\ \varepsilon_s \end{bmatrix}$; $\mu_1, \mu_2, \varepsilon_\omega$ 和 ε_s 分别为 $(0, \sigma_1^2)$ 、 $(0, \sigma_2^2)$ 、 $(0, \sigma_\omega^2)$ 和 $(0, \sigma_s^2)$ 的高斯白噪声; ψ 为里程表的标定系数^[1,4]。

将系统方程进行离散化和观测方程进行线性化、离散化,可建立离散化的扩展卡尔曼滤波方程,具体方程见文献[7]所示。

2 离散平稳小波变换去除 GPS/DR 组合导航信号噪声的算法

常用的离散二进小波变换在尺度间的正交小波基是非一致降样取样的,随着尺度的增大,取样间隔以2的指数变大,因而不能从多尺度的角度很好地匹配信号的局部特征,故该算法在信号的奇异点容易产生振荡效应。针对以上缺点,本文使用了离散平稳小波变换。此算法使用冗余离散小波基,具有平移不变性,因

而信号在冗余离散小波基上的表示可看成是信号在一系列离散小波基上表示的平均,小波系数和尺度系数与原始信号等长,可以很好地削弱离散二进小波变换中的振荡效应。其分解公式如下:

$$\begin{aligned} c_{j,k} &= \sum_n h_0^{j2j}(n-2k)c_{j-1,n}, d_{j,k} \\ &= \sum_n h_1^{j2j}(n-2k)c_{j-1,n} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $c_{j,k}$ 是尺度系数(近似部分的系数), $d_{j,k}$ 是小波系数(细节部分的系数); h_0^{j2j}, h_1^{j2j} 分别表示在 h_0, h_1 两点间插入的 $2^j - 1$ 个零; $h_0 = \langle \varphi_{1,0}, \varphi_{0,k} \rangle, h_1 = \langle \psi_{1,0}, \psi_{0,k} \rangle$; ψ 是小波函数, φ 是尺度函数; $n = 0, 1, \dots, N-1$ (N 是信号长度)。相应的重构公式为:

$$\begin{aligned} c_{j-1,k} &= \frac{1}{2} \sum_k [g_0(n-2k) + g_0(n-2k-1)]c_{j,k} + \\ &\frac{1}{2} \sum_k [g_1(n-2k) + g_1(n-2k-1)]d_{j,k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $g_0(k), g_1(k)$ 分别为 $h_0(k), h_1(k)$ 的对偶基^[6]。

Mallat 等人^[8]建立了小波变换与刻画信号奇异性的 Lipschitz 指数之间的密切关系,从而可以通过小波变换来确定信号的奇异点位置。函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有一致 Lipschitz 指数 α 的充要条件是存在一个常数 $m > 0$, 使得 $\forall x \in [a, b]$, 小波变换满足:

$$|d_{j,k}| \leq m(2^j)^\alpha \quad (5)$$

对上式两边取对数,得

$$\log_2 |d_{j,k}| \leq \log_2 m + \alpha j \quad (6)$$

GPS/DR 组合导航信号的 Lipschitz 指数 $\alpha > 0$, 其干扰噪声的 Lipschitz 指数 $\alpha < 0$; 根据式(6)可知道随着小波变换尺度的增大,信号和噪声所对应的小波系数分别是增大和减小,连续做若干次小波变换之后,噪声的小波系数基本去除或幅值很小;因此可用离散平稳小波变换对含噪的车辆 GPS/DR 组合导航信号进行去噪。其具体去噪算法如下^[9]:

1) 对原始组合导航信号利用式(3)进行离散平稳小波变换,得到小波系数 $d_{j,k}$;

2) 利用经验公式 $\sigma_1 = \text{median}(|d_{1,k}|)/0.6745$ 计算第1尺度小波系数的均方根误差,再利用经验公式 $\lambda_j = \sigma_1 \sqrt{2 \log_2 N / \ln(j+1)}$ 计算每尺度小波系数的阈值,通过阈值去噪算法估计每尺度新的小波系数 $\hat{d}_{j,k}$:

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \sqrt{d_{j,k}^2 - \lambda_j^2}, & |d_{j,k}| \geq \lambda_j \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda_j \end{cases} \quad (7)$$

3) 对 $\hat{d}_{j,k}$ 利用式(4)进行重构,便可得到离散平稳小波去噪后的组合导航信号。

3 仿真实验

根据地面车辆实际行驶的情况,假定车辆以 $10\sqrt{2}$

m/s 的速度沿 45°航向角从坐标原点匀速向前直线行驶,共行驶 480 s,采样周期 $T = 1 \text{ s}$ ^[7]。陀螺仪的随机漂移包括常值分量、周期分量等趋势量和随机噪声,在惯导系统的初始对准过程中对于趋势量予以标定并且在工作过程中进行补偿,因此可以认为陀螺仪的随机漂移主要是随机噪声^[10,11];GPS 接收机输出的位置信号以及里程表输出的信号的噪声也主要是随机噪声^[4,7]。为了考察基于离散平稳小波变换的扩展卡尔曼滤波器数据融合算法的有效性,整个导航信号过程加入干扰噪声,分别是在 GPS 接收机输出的东向和北向位置信号以及陀螺仪、里程表输出的信号上叠加 $N[0, 16.21 \text{ m}^2]$ 、 $N[0, 14.25 \text{ m}^2]$ 、 $N[0, 0.002 \text{ rad}^2]$ 、 $N[0, 0.5 \text{ m}^2]$ 的高斯白噪声;未经数据处理直接进行简单计算的定位结果如图 1~图 4 所示。

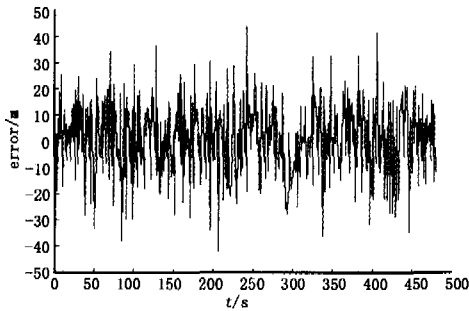


图 1 GPS 东向定位误差曲线

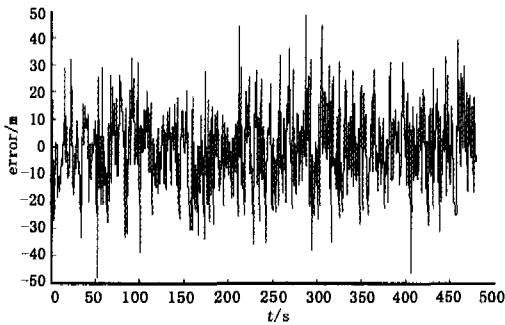


图 2 GPS 北向定位误差曲线

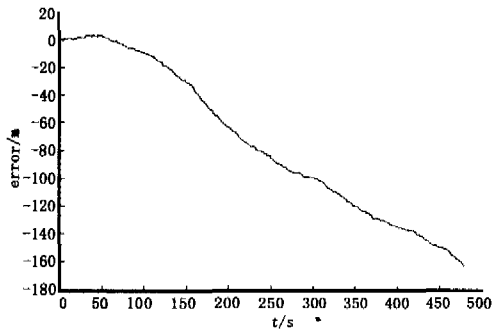


图 3 DR 东向定位误差曲线

对仿真的 GPS/DR 组合导航信号首先经过离散平稳小波变换去噪,然后送入扩展卡尔曼滤波器进行数据融合得到车辆实时位置;并与只对信号进行扩展卡

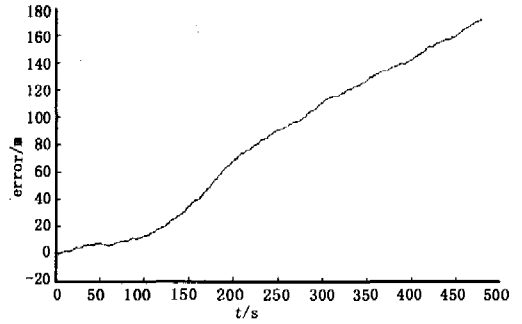


图 4 DR 北向定位误差曲线

尔曼滤波器进行数据融合得到的实时位置进行比较,其结果如图 5、图 6 和表 1 所示。显然,扩展卡尔曼滤波器和基于离散平稳小波变换的扩展卡尔曼滤波器都能有效对 GPS/DR 组合导航信号进行去噪和数据融合,但后者比前者的精度和性能更加优越。

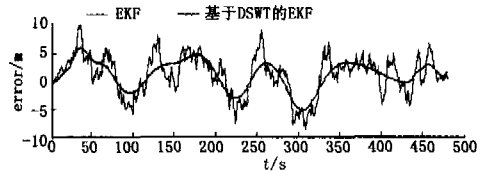


图 5 GPS/DR 东向定位误差曲线

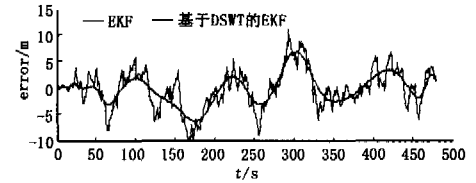


图 6 GPS/DR 北向定位误差曲线

表 1 误差比较

项目	DR	GPS	EKF	基于 DSWT 的 EKF
北向均方根误差/m	91.45	14.25	3.85	2.78
东向均方根误差/m	97.99	16.21	3.85	2.79

4 结论

基于离散平稳小波变换的扩展卡尔曼滤波器数据融合算法是对车辆 GPS/DR 导航信号进行动态数据处理的初步探索。该算法首先用离散平稳小波变换的阈值去噪方法对 GPS/DR 组合导航信号进行去噪,然后通过扩展卡尔曼滤波器对已去噪的 GPS/DR 组合导航信号进行数据融合推算车辆的实时位置。仿真实验表明,该算法克服了扩展卡尔曼滤波需建立精确的数学模型的问题,其整体精度水平比扩展卡尔曼滤波高。由此可见,基于离散平稳小波变换的扩展卡尔曼滤波器数据融合算法在车辆 GPS/DR 组合导航信号处理领域有着广泛的应用前景。

(下转第 55 页)

3) 应用统一强度理论时,对于不同强度的材料,只需要改变 b 值,就可以将不同材料用同一强度理论描述,更便于编程和数值计算,避免了对不同材料选择纷繁复杂的强度理论。

参考文献:

- [1] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学,2002,4(10):57-61.
- [2] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅,等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报,2003,(1):21-27.
- [3] Griffiths V and Lane P A. Slope Stability analysis by finite element[J]. Geotechnique,1999,39(3):387-403.
- [4] 任青文,余天堂,马良筠. 三峡大坝左厂3号坝段稳定性的数值分析和试验研究[J]. 中国工程科学,1999,1(3):41-45.
- [5] 任青文. 岩体破坏分析方法的研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2001;20(增刊2):1303-1309.
- [6] 赵引,任青文. 三峡永久船闸高边坡的稳定分析[J]. 河海大学学报,1998,26(2):60-64.
- [7] 张建勋,陈福全. 用强度折减有限元法分析土坡稳定问题[J]. 山东科技大学学报,2004,23(1):115-1171(3):207-210.
- [8] 任青文,钱向东,赵引,等. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报,2002,(1)1:1-7.
- [9] 张培文,陈祖煜. 糯扎渡大坝设计边坡稳定的有限元分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):207-210.
- [10] 俞茂宏. 强度理论新体系[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992.
- [11] 胡小荣,俞茂宏. 岩土类介质强度准则新探[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(18):3037-3043.
- [12] 俞茂宏, M. Yoshimine, 强洪夫, 等. 强度理论的发展和展望[J]. 工程力学,2004,21(6):1-20.
- [13] 俞茂宏. 强度理论百年总结[J]. 力学进展,2004,34(4):529-560.
- [14] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [15] 赵均海,杨岩松,俞茂宏. 西安东门城墙的弹塑性有限元分析[J]. 西北建筑工程学院学报,1998,(3):1-7.
- [16] Owen D R J, Hinton E. Finite Element in Plasticity: Theory and Practice[M]. Pineridge Press Limited. Swansea, U. K, 1980.
- [17] 栾茂田,武亚军,年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
- [18] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理. 方法. 程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [19] 赵少飞,栾茂田,吕爱钟. 土工极限平衡问题的非线性有限元数值分析[J]. 岩土力学,2004,25(S0):121-125.

(上接第45页)

参考文献:

- [1] 彭飞,柳重堪,张其善. 基于代价函数的组合导航系统地图匹配算法[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(3):261-264.
- [2] 吴秋平,万德钧,房建成,徐晓苏. 车载GPS/DR组合导航系统的研究及其滤波算法[J]. 东南大学学报,1997,27(2):55-59.
- [3] 黄丁发. GPS卫星导航定位的理论研究及自主车辆定位系统分析[D]. 成都:西南交通大学,1996.
- [4] 万德钧,房建成,王庆. GPS动态滤波的理论及其应用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2000.
- [5] 马攀,孟令奎,文鸿雁. 基于小波分析的Kalman滤波动态变形模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(4):349-353.
- [6] 胡军,李嘉,王勇,等. 动态触觉传感器检出信号的小波消噪新方法[J]. 传感技术学报,2003,4:433-437.
- [7] 付梦印,邓志红,张继伟. Kalman滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [8] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on IT,1992,38(2):617-643.
- [9] 赵瑞珍,宋国乡. 一种基于小波变换的白噪声消噪方法的改进[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2002,27(2):619-622.
- [10] 万德钧,房建成. 惯性导航初始对准[M]. 南京:东南大学出版社,1998.
- [11] 付强文,张英敏. 光纤陀螺信号处理的实用方法[J]. 传感技术学报,2005,18(1):101-104.