

文章编号: 2095-2163(2020)06-0300-04

中图分类号: TP393

文献标志码: A

卡尔曼滤波在组合导航中的仿真与分析

朱楠, 方伟

(扬州海通电子科技有限公司, 江苏扬州 225000)

摘要: 本文针对船舶在航行过程中的精确控制与自主导航问题, 结合单一导航系统的优缺点, 选择北斗/惯性组合导航方式, 以误差作为变量的卡尔曼滤波作为核心算法, 弥补惯性导航长时间工作积分误差变大, 以及北斗遇到复杂地形信号易失锁且易受电子欺骗的不足。利用卡尔曼滤波算法, 将惯性传感器和磁力计的输出数据进行融合, 将北斗提供的导航数据补偿惯性导航的参数。对北斗/惯性组合导航建立数学模型并进行仿真分析, 通过仿真实验说明卡尔曼滤波在组合导航系统中的可靠性。

关键词: 船舶; 组合导航; 卡尔曼滤波

Simulation and analysis of Kalman filter in integrated navigation system

ZHU Nan, FANG Wei

(Yangzhou Haitong Electronic Technology Co., Ltd, Yangzhou Jiangsu 225000, China)

[Abstract] In order to solve the problem of precise control and autonomous navigation of ships in the navigation process, combined with the advantages and disadvantages of a single navigation system, this paper selects the navigation mode of Beidou / inertial integrated navigation, and takes the Kalman filter with error as the variable as the core algorithm to make up for the larger integral error of inertial navigation for a long time and the Beidou is easy to lose lock and be easily cheated by electronic devices when encountering complex terrain signals The lack of. Firstly, the output data of inertial sensor and magnetometer are fused by Kalman filter algorithm. Secondly, the navigation data provided by Beidou is compensated by Kalman filter algorithm. This paper first introduces the Kalman filter algorithm, establishes the mathematical model of Beidou / inertial integrated navigation system and carries out simulation analysis. Finally, the reliability of Kalman filter in integrated navigation system is illustrated by simulation experiment.

[Key words] shipping; integrated navigation; Kalman filtering

0 引言

目前我国船舶领域多使用单一的导航方式^[1], 而单一导航模式都有其不足的地方, 惯性导航的误差会随着时间的累计而增大^[2], 北斗导航系统使用定位服务时易暴露自身定位, 且同一时间段内用户人数会受限制^[3]。本文选择以惯性导航为主, 北斗系统作为辅助系统的模式。根据卡尔曼滤波算法设计滤波器, 估计位置和速度的最小误差, 并利用该误差对惯性导航进行校正, 从而得出运动体实时的导航信息^[4]。本文首先介绍卡尔曼滤波算法及其作为组合导航算法的优势, 对组合导航建立数学模型, 最后设置滤波初始值。通过 MATLAB 进行仿真实验, 实验数据表明, 以卡尔曼滤波作为核心算法的组合导航提供的导航参数, 在精度上高于单个导航系统, 且不受导航时间的限制。

1 卡尔曼滤波器在组合导航中的应用

数据滤波是去除噪声, 还原真实数据的一种数

据处理技术, 卡尔曼滤波在方差已知的情况下能够从一系列存在噪声的数据中, 估计动态系统的状态, 且便于计算机编程实现。

设被估值系统的离散状态方程式为

$$\begin{cases} X_{k+1} = A X_k + B U_k + G W_k, \\ Z_k = H X_k + V_k. \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_k 为系统的状态变量, U_k 为系统的控制变量, W_k 为系统的随机干扰输入, Z_k 为系统的测量值, V_k 为测量值的随机干扰变量。状态转移阵均为已知的同时, 需求验前统计量

$X_0 \sim N(X_0, P_{X_0}), W_k \sim N(0, Q_k), V_k \sim N(0, R_k)$, 式中, P 表示状态估计协方差, Q 表示系统噪声协方差, R 表示测量噪声协方差。假定 $\{W_k\}$ 和 $\{V_k\}$ 是高斯白噪声序列, 它们之间以及和 X_0 之间均互不相关, 并要求 R_k 大于 0。(滤波过程详见参考文献 [2])

在卡尔曼滤波算法的迭代过程中, 噪声协方差

作者简介: 朱楠(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息技术及智能装置; 方伟(1981-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 信息技术及智能装置。

收稿日期: 2020-03-19

阵 Q, R 反映了状态方程和测量方程的相信程度。 Q 值增大, 说明对状态递推越来越不相信; R 值增大, 说明对测量越来越不相信^[5]。

标准的卡尔曼滤波常用于估计线性系统在随机噪声干扰下的状态变量, 但在组合导航系统中, 系统的量测方程是非线性方程, 需要对其求偏导以实现线性化, 这种滤波方法被称之为扩展卡尔曼滤波 (EKF)。由于卡尔曼滤波算法将误差作为变量, 因此可以作为组合导航的核心算法。

对惯性导航和其他导航系统提供的速度、位置信息之差进行最优估计后, 校正惯性导航系统。校正方式分为输出校正和反馈校正。输出校正就是将经过卡尔曼滤波后得到的导航参数误差最优估计, 直接补偿惯性导航输出的导航参数; 反馈校正就是将导航参数误差最优估计, 反馈到惯性导航系统的内部, 对误差状态进行校正, 得到导航参数的最优估计值。两种校正原理分别如图 1、图 2 所示。



图 1 输出校正

Fig. 1 Output correction

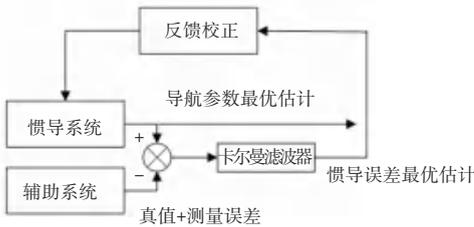


图 2 反馈校正

Fig. 2 Feedback correction

输出校正与反馈各自都有优缺点。输出校正常用于惯导系统中的惯性元件精度较高, 且工作时间较短的场合。反馈校正正常应用于惯性元件精度较低, 且需要长时间工作的场合。

2 北斗/惯性组合导航的数学模型

选择导航算法的状态方程为惯导系统误差方程^[6], 这里选择状态变量为:

$$\begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \delta & V_E & \delta V_N & \delta V_E & \delta \varphi & \delta \lambda & \delta h \\ \varepsilon_E & \varepsilon_N & \varepsilon_E & \Delta A_E & \Delta A_N & \Delta A_E \end{bmatrix}.$$

其中, 从左到右依次为三个姿态角、速度误差在

3 个方向上的分量、位置误差在 3 个方向上的分量、陀螺漂移以及加速度计的零偏。其中, 加速度计的零偏同样可用一阶马尔科夫过程描述, 即

$$\dot{\Delta A_E}(t) = -\frac{1}{T_{aE}} \Delta A_E(t) + \sqrt{\frac{2\sigma_{aE}^2}{T_{aE}}} a_E(t). \quad (2)$$

令系统状态方程为

$$\dot{X}(t) = A(t) X(t) + B(t) W(t), \quad (3)$$

$$W(t) = [q_E \quad q_N \quad q_E \quad a_E \quad a_N \quad a_E]. \quad (4)$$

式中, $q_E, q_N, q_E, a_E, a_N, a_E$ 均为白噪声过程。

$$B(t) = \begin{bmatrix} \hat{C}_b^n & 0_{3 \times 3} \\ \hat{C}_b^n & C_b^n \\ \hat{C}_b^n & C_b^n \\ \hat{C}_b^n & 0_{9 \times 3} \end{bmatrix} \dot{u}, \quad (5)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} \hat{C}_b^n & F_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} & T_{3 \times 6} \\ \hat{C}_b^n & F_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} & T_{3 \times 6} \\ \hat{C}_b^n & F_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ \hat{C}_b^n & 0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3} & E_{6 \times 6} \end{bmatrix} \dot{u}. \quad (6)$$

式中各元素具体的表达式见参考文献 6。

量测方程的观测量选择北斗和惯性导航分别输出的位置、速度信息之差, 令量测方程为

$$Z = H(t) X(t) + w(t). \quad (7)$$

式中 $Z = [V_{ie} - V_{ge} \quad V_{in} - V_{gn} \quad \lambda_i - \lambda_g \quad \varphi_i - \varphi_g]^T$, V_{ie}, V_{in} 为惯导系统输出速度信息。 V_{ge}, V_{gn} 为北斗输出速度信息。 λ_i, φ_i 为惯导系统输出的经纬度。 λ_g, φ_g 为北斗输出的经纬度。

$$H(t) = [H_{vel}(t) \quad H_{pos}(t)]^T. \quad (8)$$

式中

$$H_{vel}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 15}, \quad (9)$$

$$H_{pos}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 15}. \quad (10)$$

量测噪声为:

$$w(t) = \begin{bmatrix} \hat{C}_b^n w_{vel}(t) \\ \hat{C}_b^n w_{pos}(t) \end{bmatrix} \dot{u}. \quad (11)$$

3 仿真结果分析

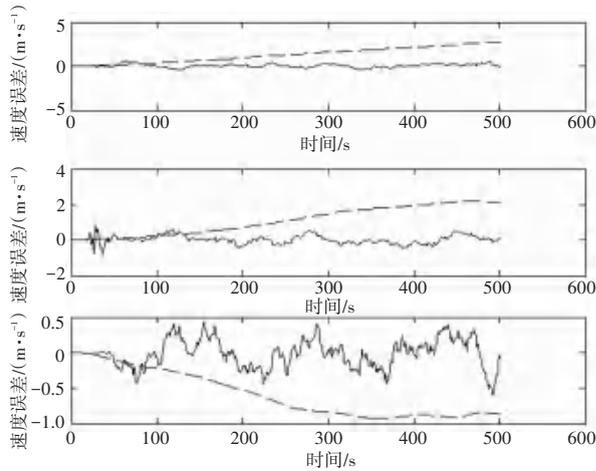
通过 MATLAB 进行仿真, 验证算法的可靠性。滤波器选择输出校正方式, 滤波初始值如表 1 所示。

表1 滤波初始值设置

Tab. 4 Filter initial value setting

参数	数值	参数	数值
初始平台失准角误差/(°)	$1/(36 * 57), 1/(36 * 57), 1/57$	白噪声激励时间/s	$T_g = 300, T_a = 1\ 000$
初始速度误差/($m \cdot s^{-1}$)	0.0001, 0.0001, 0.0001	迭代步长	1
初始位置误差/(°)	0, 0, 1	北斗量测误差均方差/m	30
陀螺常值漂移/($(^\circ) \cdot h^{-1}$)	$0.9/(57 * 3600)$	地球扁率	$1/298.257$
陀螺随机漂移/($(^\circ) \cdot h^{-1}$)	$0.04/(57 * 3600)$	地球长半径/m	6378245
加速度计偏置/g	$1e-4, 1e-4, 1e-4$	地球自转角速度/($rad \cdot s^{-1}$)	$7.292e-5$

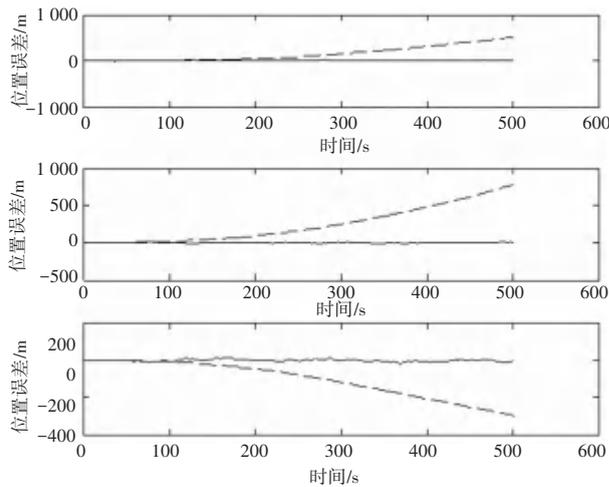
表中, T_g 、 T_a 分别表示加速度计和陀螺仪的白噪声激励时间。仿真时间为 500 s, 仿真结果如图 3 和图 4 所示^[7]。



虚线-滤波前的INS误差 实线-滤波后的误差

图3 滤波前后速度误差对比图

Fig. 3 Velocity error contrast diagram before and after filtering



虚线-滤波前的INS误差 实线-滤波后的误差

图4 滤波前后位置误差对比图

Fig. 4 Position error contrast diagram before and after filtering

由图可知, 北斗/惯性组合导航算法输出的位置、速度信息能够很好地跟踪运动体的真实轨迹, 滤波后的误差随着时间的推移始终趋向于零。

当北斗失效时, 仅由惯性导航输出的速度、位置误差会越来越大。因此, 为了进行验证, 本文在仿真中人为设置 3 次北斗失效的情况, 得到的仿真效果

如图 5、图 6 所示。

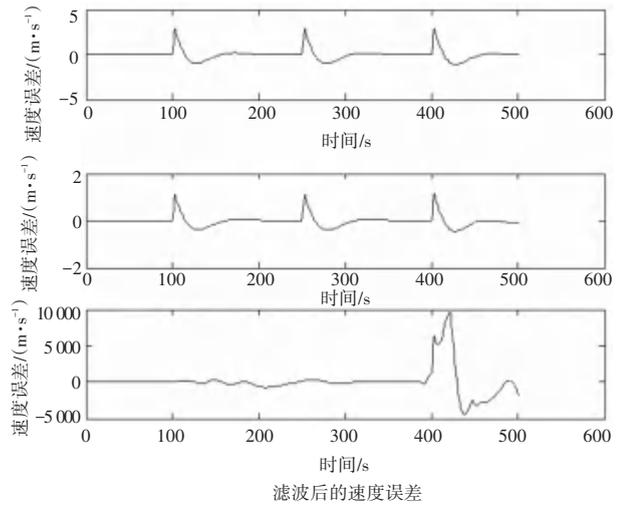


图5 北斗失效后的速度误差仿真图

Fig. 5 Simulation chart of speed error after Beidou failure

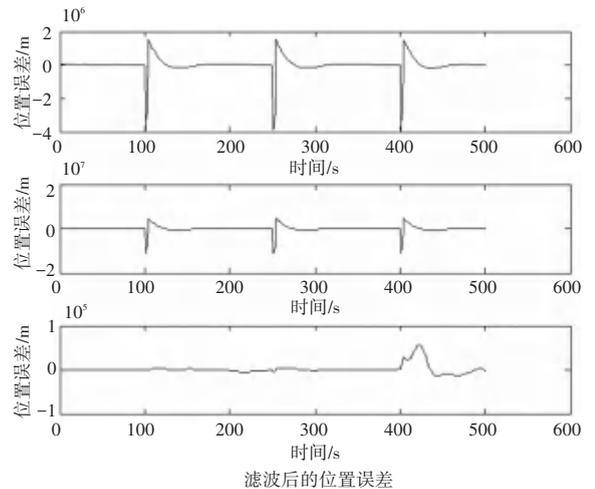


图6 北斗失效后的位置误差仿真图

Fig. 6 Simulation chart of position error after Beidou failure

由图可知, 当北斗失效时, 无法利用北斗输出的速度、位置信息对惯性导航进行校正, 速度误差和位置误差在三个方向上的分量从零刻度线处迅速上升或下降。而当北斗正常工作时, 惯性导航经过北斗校正后提供的导航信息的误差逐渐回到零刻度线处。因此, 通过误差仿真实验说明, 单一的惯性导航系统无法满足运动体长时间运动状态下的定位要求, 组合导航的优点得到体现。(下转封三)