

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.001

# 模糊自适应 Kalman 滤波算法在 SINS/DR 组合导航的应用

许建国, 周源, 王少蕾

(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 针对里程仪测量误差导致组合导航精度降低的问题, 提出基于系统工作状态和滤波器新息状态相结合的模糊自适应算法。根据新息的变化确定模糊规则, 修正里程仪输出增益, 使新息始终保持在零均值附近, 利用修正后的新息修正观测噪声方差, 降低导航定位的偏差。仿真实验结果证明, 该算法能够很好地提高组合导航定位的精度。

**关键词:** SINS/DR 组合导航; 里程仪; 模糊自适应算法; Kalman 滤波

**中图分类号:** U666.1 **文献标志码:** A

## Application of Fuzzy Adaptive Kalman Filtering Algorithm in SINS/DR Integrated Navigation

Xu Jianguo, Zhou Yuan, Wang Shaolei

(College of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that odometer measurement error leads to the reduction of integrated navigation accuracy, a fuzzy adaptive algorithm based on the combination of system working state and filter innovation state is proposed. According to the change of the innovation, the fuzzy rules are determined, and the output gain of the odometer is corrected, so that the innovation is always kept near the zero mean value, and the observation noise variance is corrected by using the corrected innovation, so that the deviation of the navigation positioning is reduced. The simulation results show that this algorithm can improve the accuracy of integrated navigation and positioning.

**Keywords:** SINS/DR integrated navigation; odometer; fuzzy adaptive algorithm; Kalman filtering

### 0 引言

捷联惯性导航系统 (strapdown inertial navigation system, SINS)/ 航位推算 (dead-reckoning, DR) 组合导航采用速度组合方案, 选用高精度、高分辨率的里程仪辅助 SINS 导航, 和卫星导航/SINS 组合导航相比<sup>[1-2]</sup>, 是一种完全自主式的组合导航系统。此技术主要应用于武器装备车辆的导航定位, 考虑在复杂战场环境下, 卫星定位易受干扰的特性, 采取高精度的完全自主式导航定位手段, 为高科技武器装备的使用提供定位定向支撑, 具有重要的军事意义。组合导航系统利用里程仪测量速度值随时间增加误差变化较小的优点, 修正 SINS 测量输出值<sup>[3-4]</sup>, 可有效减小系统误差, 提高组合系统的导航精度。里程仪在工作过程中, 受路面状况及载车运动的影响, 会出现测量故障, 需要及时对故障进行隔离和修正, 提高组合导航的精度。

### 1 SINS/DR 组合导航原理

SINS/DR 组合导航原理如图 1 所示, SINS 和里

程仪固定安装在载体上, 利用 SINS 测量值进行姿态、速度和位移信息解算, 里程仪利用 SINS 解算的姿态信息, 推算导航坐标系下的速度和位置信息, 采用速度组合方式, 建立 Kalman 滤波器, 对 SINS 的测量解算值进行闭环反馈修正<sup>[5-6]</sup>。

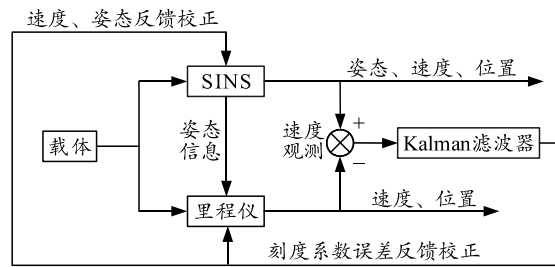


图 1 SINS/DR 组合导航原理

SINS 在短时间内解算精度高, 但导航误差随时间的增加变化很大, 严重影响了系统的导航精度; 因此, 如何控制 SINS 的误差累积是 SINS 精确工作的关键。高分辨率的里程仪可以精确测量车辆行驶速度 ( $10^{-4}$  m/s), 通过 SINS 获得姿态信息进行定位解算, 而且随时间积累的定位误差较小。SINS/DR 组合导航系统通过反馈修正 SINS 的速度和姿态误

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-06-20

第一作者: 许建国(1985—), 男, 山东人, 博士。

差, 有效地减小 SNIS 的误差积累, 实现高精度的导航定位。

### 2 里程仪常见测量故障与分析

SINS/DR 组合导航系统的分析设计和研究, 是以路况理想、里程仪工作正常为前提, 但是在实际行驶过程中, 由于路面状况及载车运动的影响, 里程仪会出现测量故障, 如果不及时对故障进行隔离和修正, 仍利用里程仪校正 SINS, 将会造成较大的定位误差, 影响组合导航系统的定位精度。里程仪的几种常见测量故障主要包括空转、滑行、连滚带滑和侧滑等。

#### 2.1 车轮空转和滑行

当车辆在行驶过程中遇到较滑结冰道路难以前行, 或者陷于泥泞道路中时, 车轮将出现空转的情况, 此时里程仪的测量速度将远远大于车辆实际行驶的速度。与此相反, 当车辆刹车时, 受惯性作用, 车体在较滑路面上向前滑行, 而车轮并没有转动, 此时里程仪测量的速度会远远小于载车的实际行驶速度。相应情况下 SINS 和里程仪测量速度对比如图 2 所示。

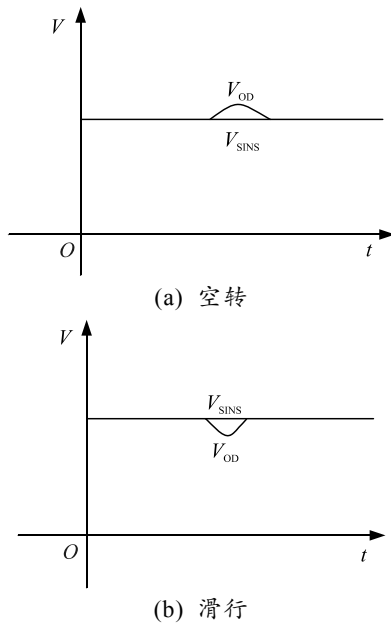


图 2 车辆空转与滑行故障

#### 2.2 车辆滚动带滑行、打滑行驶

这种情况主要体现在车辆行驶在较滑的长距离上坡、下坡、沙路或泥泞路面上, 此时车轮不是理想的滚动, 而是连滚带滑。如车辆在下坡时车轮出现滚动带滑行现象, 里程仪测量速度值将小于车辆的实际速度; 当车辆在上坡、沙路或泥泞道路上行

驶, 出现滚动带打滑的现象, 里程仪测量速度将大于车辆的实际速度。这 2 种情况下相应的 SINS 和里程仪测量速度对比如图 3 所示。

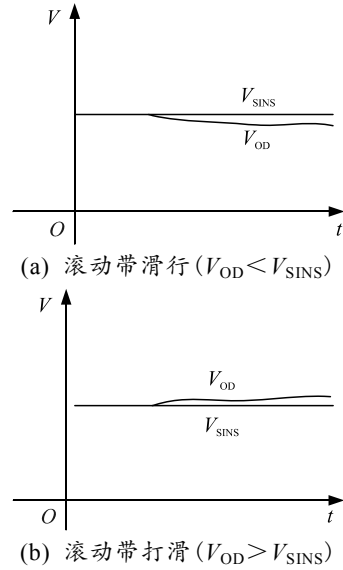


图 3 车辆连滚带滑故障

#### 2.3 车辆侧滑

当车辆在行驶速度较快情况下转弯时, 可能会引起车辆侧滑, 此时车辆横轴加速度计将会出现加速度, 而里程仪在此方向上却没有输出; 因此, 当 SINS 测量出车辆行驶方向出现大幅度变化时, 对载体横轴加速度计的输出生成数据进行处理后, 如果还存在一个稳态值, 就判定车辆此时存在侧滑现象。

一旦判断里程仪出现测量故障, 就需要及时对故障进行隔离分析和处理, 消除里程仪误差给导航带来的精度影响, 降低导航定位偏差。

#### 2.4 里程仪测量故障对组合导航结果影响

根据组合导航系统原理, 系统的观测值为 SINS 测量的速度值和里程仪的速度之差<sup>[7]</sup>, 正常工作中 SINS 都是比较稳定的, 不会出现大的故障, 但由于里程仪受到外界路况的干扰, 产生测量误差。对于建立的组合导航误差模型, 假设  $k-1$  时刻系统正常工作, 则此时状态最优估计值  $\hat{X}_{k-1}$ 、协方差矩阵  $P_{k-1}$  和增益矩阵  $K_{k-1}$  都是正确的。如果在下一时刻里程仪出现测量误差  $\Delta v_{OD}^n$ , 则里程仪测量值为:

$$\tilde{v}_{OD}^n = v + \delta v_{OD}^n + \Delta v_{OD}^n \quad (1)$$

此时实际中包含有里程仪测量误差的系统观测值为:

$$Z_k^e = \delta v^n - \delta v_{OD}^n - \Delta v_{OD}^n = Z_k^l - \Delta v_{OD}^n \quad (2)$$

根据 Kalman 滤波公式, 此时的状态估计为:

$$\begin{aligned}\hat{X}_k^e &= X_{k/k-1} + K_k \left[ Z_k^e - H_k \hat{X}_{k/k-1} \right] = \\ &X_{k/k-1} + K_k \left[ Z_k^t - \Delta v_{OD}^n - H_k \hat{X}_{k/k-1} \right] = \\ &\hat{X}_k^t - K_k \Delta v_{OD}^n;\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\hat{X}_{k+1}^e &= \Phi_{k+1/k} \hat{X}_k^e + K_k \left[ Z_{k+1} - H_{k+1} \Phi_{k+1/k} \hat{X}_k^e \right] = \\ &\hat{X}_{k+1}^t - (I - K_{k+1} H_{k+1}) \Phi_{k+1} K_k \Delta v_{OD}^n.\end{aligned}\quad (4)$$

从式(4)可以看出, 由于  $k$  时刻里程仪观测值出现偏差  $\Delta v_{OD}^n$ , 导致在后面的状态估计中, 即使  $k+1$  时刻没有观测值偏差出现, 也会给  $k+1$  时刻的状态估计值带来偏差<sup>[8]</sup>; 因此, 需要对里程仪测量结果进行分析隔离, 保证观测信号的有效性, 才能保证导航结果的精确性。

### 3 模糊自适应算法在组合导航的应用

#### 3.1 常见故障处理方法

对于里程仪测量故障的处理, 常见的方法是采用最大阈值法进行修正, 即当里程仪测量速度值和 SINS 测量速度值偏差过大超过某一阈值后, 判断里程仪测量值不可用, 应立即将其隔离<sup>[9-10]</sup>。此时认为惯导的测量值是正确的, 暂时停止系统组合滤波, 载体导航定位信息由惯导系统单独给出, 当里程仪恢复正常时, 组合系统重新开始工作阈值大小的设置很关键, 设置过大会造成故障信号的遗漏, 导致较大的定位误差; 设置过小, 会造成组合导航系统长时间工作在 SINS 单独导航定位的模式上, 也会导致一定的定位偏差。

#### 3.2 模糊自适应控制方法

要解决此问题, 需要通过观测值对里程仪故障进行隔离和修正, 使系统误差模型中的观测值始终保持在较小值。根据新息的定义, 它表示观测值与一步预报值之间的差, 当系统正常工作时, 95% 的新息序列将落在零均值附近  $2\sigma$  范围<sup>[11]</sup>; 当里程仪出现打滑或滑行故障时, 新息值会发生明显的变化, 超出这个范围。提出基于系统工作状态和滤波器新息状态相结合的模糊自适应控制方法<sup>[12]</sup>, 通过修正里程仪速度增益, 使新息保持在零均值附近; 同时, 利用修正后的观测值修正观测噪声方差, 进一步调整滤波增益, 促进滤波器的收敛, 降低导航定位的偏差<sup>[13-14]</sup>。

#### 3.3 模糊自适应控制器设计

根据对里程仪测量偏差的原因分析, 考虑从以下方面来进行模糊自适应控制器设计:

1) 对于在短时间内打滑和滑动 2 种情况下, 由于里程仪测量速度和 SINS 测量速度有明显的差别; 因此, 可以采用设定阈值法, 当 2 组测量值差值达到某一点时, 认为里程仪测量值不可信, 单独用 SINS 的输出来进行导航。该条件下的导航时间不会太长, 当里程仪恢复工作时, 再转回组合导航模式。

2) 侧滑情况: 与车辆的航行角变化有关, 当  $H$  发生大的变化时, 横向速度出现偏差, 认为发生了侧滑现象, 里程仪测量值不可信, 采用 SINS 单独导航的方式进行导航。

3) 连滚带滑情况: 该情况下 SINS 测量速度和里程仪测量速度出现偏差, 但是在数值上差别不大, 无法采用设定阈值法消除误差, 单纯采用新息检验模糊规则设计方法, 当故障很小时, 不仅不能被检测出来, 而且还将污染  $x_k$ , 使  $x_k$  跟踪故障, 降低新息值, 使检测效果变差。针对此问题, 结合 SINS 和里程仪信号输出情况, 采用基于系统工作状态和滤波器新息状态相结合的模糊自适应控制 Kalman 滤波算法综合处理, 研究重点就是车辆在这种故障下的误差隔离和修正。

根据新息的定义, 此组合导航滤波器新息表示为:

$$\begin{aligned}r_k &= Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1} = \\ &\tilde{v}_{SINS} - \alpha_1 \tilde{v}_{OD} - H_k \hat{X}_{k/k-1}.\end{aligned}\quad (5)$$

状态估计:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k r_k \quad (6)$$

定义式(5)中  $\alpha_1$  为里程仪速度增益调整因子, 当  $\alpha_1=1$  时, 里程仪处于正常工作状态。定义  $dm_1 = \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  为匹配因子,  $\tilde{v}_{SINS}$ 、 $\tilde{v}_{OD}$  分别为 SINS 和里程仪速度测量输出值。

模糊输入量有 3 个, 分别为匹配因子  $dm_1$ , 航向角变化量  $H$  和新息均值  $r$ , 输出量为里程仪速度增益调整因子  $\alpha_1$ 。根据分析可知,  $dm_1$  有 5 个模糊集:  $T$  为极小,  $S$  为小,  $Z$  为正常,  $B$  为大,  $L$  为极大, 其隶属度函数如图 4 所示;  $H$  有 3 个模糊集:  $S$  为小,  $M$  为中,  $B$  为大, 其隶属度函数如图 5 所示; 新息均值  $r$  有 3 个模糊集:  $S$  为小,  $M$  为中,  $B$  为大, 其隶属度函数如图 6 所示; 输出量  $\alpha_1$  有 5 个模糊集:  $T$  为极小,  $S$  为小,  $Z$  为正常,  $B$  为大,  $L$  为极大。其隶属度函数如图 7 所示。

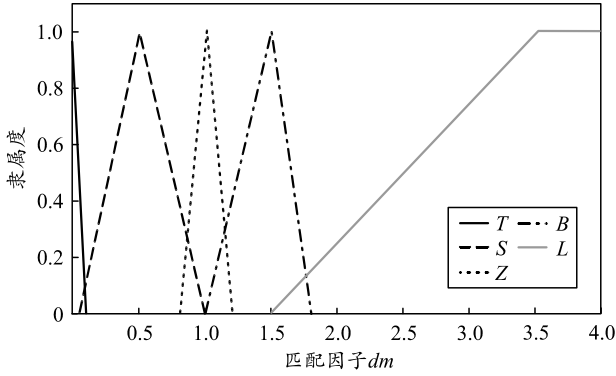


图 4  $dm_1$  隶属度函数

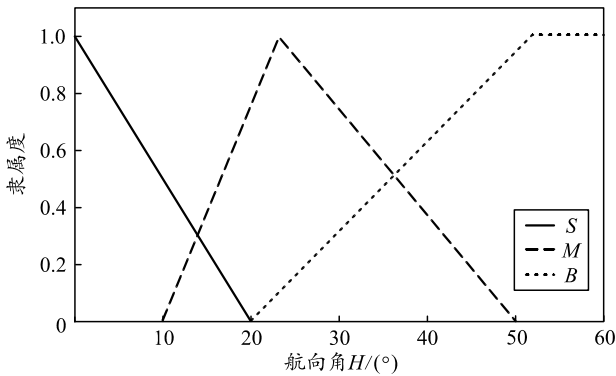


图 5  $H$  隶属度函数

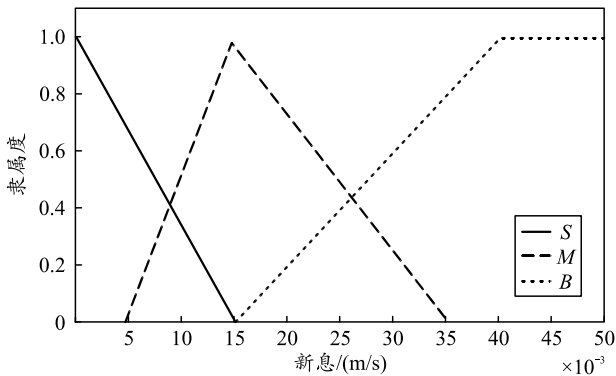


图 6  $r$  隶属度函数

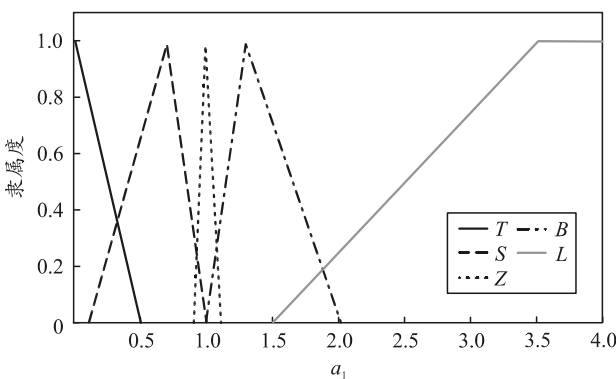


图 7  $\alpha_1$  隶属度函数

当速度比值出现极值偏差时，如果新息较小，说明车辆行驶速度很低，此时适当调整里程仪输出即可实现降低新息的目的。

如果新息较大，说明车辆行驶速度较大，此时令里程仪速度输出值等于 SINS 速度解算值，相当于最大阈值法中单独采用 SINS 进行导航定位。

当系统状态和新息处于其他状态时，通过对系统状态量和新息值的观测修正里程仪增益，进一步修正新息值，使新息始终保持在零均值附近，同时利用修正后的新息值更新系统观测噪声方差，保证了滤波器的收敛，系统状态估计不会出现大的偏差，可以有效地消除最大阈值法的缺点，提高组合导航定位的精度。

模糊控制主要规则如下：

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  较大 and  $\Delta H$  大  $\rangle$ , then 车辆侧滑，里程仪不可用；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  极小 and 新息小  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  精度一般， $\alpha_1$  取值较小；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  极小 and 新息中  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  不可用， $\alpha_1$  取值极小；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  极大 and 新息小  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  精度一般， $\alpha_1$  取值较大；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  极大 and 新息中  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  不可用， $\alpha_1$  取值极大；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  正常 and 新息小  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  精度高， $\alpha_1$  取值正常；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  正常 and 新息中  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  精度一般， $\alpha_1$  取值较小；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  较小 and 新息小  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  精度一般， $\alpha_1$  取值较小；

If  $\langle \tilde{v}_{SINS} / \tilde{v}_{OD}$  较大 and 新息小  $\rangle$ , then 里程仪输出  $v_{OD}$  精度一般， $\alpha_1$  取值较大。

采用模糊自适应控制方法得到里程仪速度增益  $\alpha_1$  后，通过式(5)对当前新息进行修正，同时利用修正后的新息值，对系统观测噪声方差进行更新：

$$\hat{C}_{rk} = \frac{1}{N} \sum_{j=j_0}^k r_j r_j^T ; \quad (7)$$

$$R_k = \hat{C}_{rk} - H_k P_{k/k-1} H_k^T . \quad (8)$$

## 4 仿真与分析

### 4.1 车辆理想行驶轨迹仿真

车辆仿真行驶轨迹初始参数设置如下：

行驶轨迹设定：首先东向行驶 500 s，然后左

转弯北向行驶 700 s 后, 右转 45°向东北方向行驶 700 s, 再右转 90°向东南方向行驶 1 000 s, 最后左转 45°直线向东行驶 700 s, 行驶时间总计为 1 h; 在车辆行驶过程中注入里程仪测量偏差, 600 s 处设置车辆打滑状态, 时间 3 s, 1 600 s 处设置车辆滑行状态, 2 000~2 100 s, 设置车辆行驶在较滑的上坡路上, 处于连滚动带打滑的状态, 里程仪测量的车速是实际车速的 1~1.3 倍。

初始出发位置(经纬度高程): 34 N, 120 E, 200 m;

初始东-北-天方向姿态角: 0、0、-90°;

行驶速度: 初始速度为 0, 在初始对准完成后, 以  $2 \text{ m/s}^2$  的加速度行驶 10 s 后达到 20 m/s 的稳定车速行驶状态并持续保持行驶在无里程仪测量故障阶段;

转弯过程: 车辆在转弯过程中转弯半径为 10 m, 转弯过程提前以  $-2 \text{ m/s}^2$  的加速度减速 8 s, 待转弯完成后继续加速至 20 m/s 的稳定车速行驶。

经过仿真, 车辆的行驶轨迹如图 8 所示。

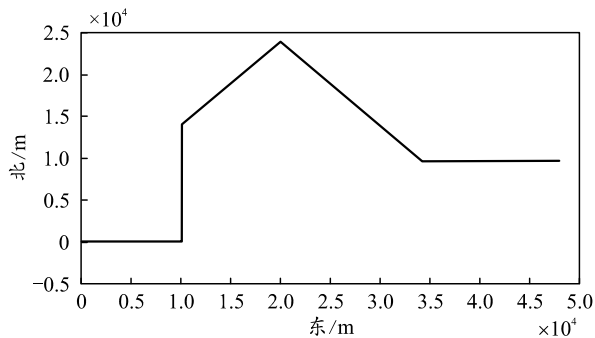


图 8 车辆仿真行驶轨迹

#### 4.2 车辆行驶仿真与分析

根据仿真的车辆行驶状态, 生成陀螺和加速度计输出信号后, 将信号经过噪声叠加后作为 SINS 导航计算时所用的采集数据。系统仿真初始值设置如下:

初始姿态失准角:  $1'$ 、 $1'$ 、 $10'$ ;

初始出发位置: 110 E、34 N、200 m, 出发点的位置已精确标定, 初始位置偏差为零;

3 个方向陀螺漂移均为: 常值漂移为  $0.01 (^\circ)/\text{h}$ , 随机漂移  $0.005 (^\circ)/\text{h}$ ;

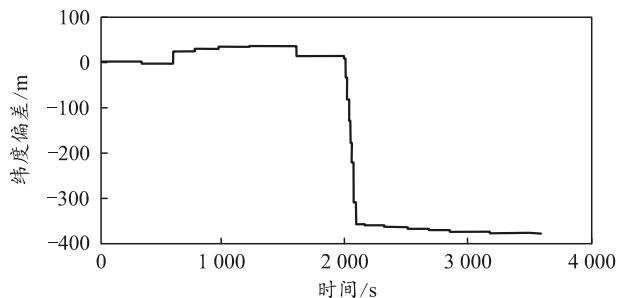
2 个方向加速度计零偏均为: 常值零偏  $100 \mu\text{g}$ , 随机零偏  $50 \mu\text{g}$ ;

里程仪刻度系数误差: 常值误差为 0.5%, 随机误差为 0.05%;

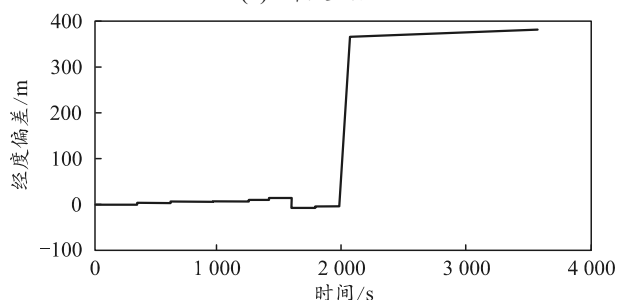
陀螺仪漂移、加速度计零偏和里程仪刻度误差

系数的一阶马尔可夫过程相关时间均设定为 3 600 s。

仿真结果中, 图 9 为未采用处理方法时的导航误差, 图 10 为模糊自适应算法修正里程仪速度增益后的导航误差。

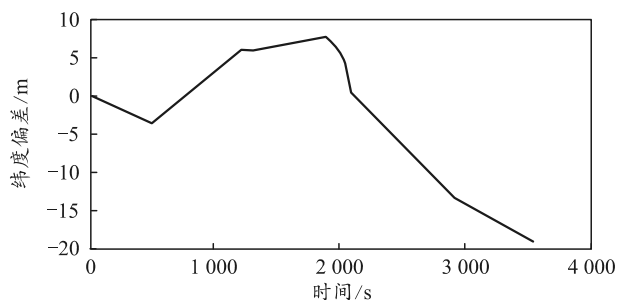


(a) 纬度偏差

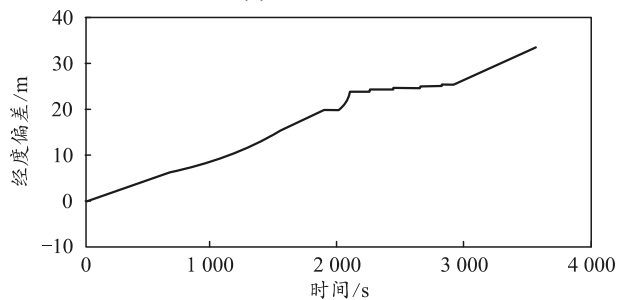


(b) 经度偏差

图 9 里程仪故障未处理时导航偏差



(a) 纬度偏差



(b) 经度偏差

图 10 模糊自适应修正里程仪故障导航偏差

对仿真结果进行分析, 从图 9 中可以看出, 没有采用模糊自适应修正的导航结果中, 在第 600 s 时车辆定位的纬度出现了较大的偏差, 增加了约 20 m, 而经度偏差很小。由于此时里程仪的速度远远大于 SINS 测量速度, 采用里程仪速度修正 SINS

的组合导航方法,使 SINS 解算速度大于车辆的真正行驶速度,600 s 之后的 3 s 时间内车辆仿真轨迹是直线北向行驶,纬度偏差受里程仪速度偏差影响,误差较大,经度偏差主要受方位失准角的影响,误差没有发生大的改变。在第 1 600 s 设置故障时,车辆向东北方向行驶,经纬度的偏差都受到里程仪速度偏差影响,定位误差均发生小的跳变现象。但是由于这 2 种故障时间较短,对导航结果造成的影响并不大。在 2 000~2 100 s 的时间段内,里程仪测量速度高于真正的车辆速度,继续采用此组合导航方案,造成 SINS 的速度保持在误差较大的范围内,导航结果误差也逐渐增大。

采用模糊自适应算法修正里程仪速度增益后,导航结果如图 10 所示,在 600 和 1 600 s 两处的定位偏差突变得到了有效的抑制;同时,在 2 000~2 100 s 的时间段内,导航误差也得到了很好的修正。定位误差远远小于里程仪测量故障未处理时的定位误差,很好地证明了模糊自适应算法在组合导航定位中应用的有效性。

## 5 结论

针对 SINS/DR 车载组合导航系统中,里程仪测量输出受路况影响,容易发生测量偏差的问题,采取基于系统工作状态和滤波器新息状态相结合的模糊自适应控制卡尔曼滤波算法。通过修正里程仪速度增益,使新息始终保持在零均值附近,同时利用修正后的新息修正观测噪声方差,进一步调整滤波增益,促进滤波器的收敛,降低导航定位的偏差。仿真过程中通过设定车辆行驶故障,对模糊自适应控制方法进行了验证。结果证明,与未使用模糊自适应修正的组合导航方案相比,该方法能够很好地提高车辆导航定位的精度。

## 参考文献:

- [1] 殷德全,熊智,施丽娟,等.发射系下 SINS/GPS 组合导航系统的算法研究[J].兵工自动化,2017,36(10): 6-10.
- [2] 张颖,王钤,兰光武,等.北斗/INS 组合导航在某型装备中的应用设计[J].兵工自动化,2014,33(12): 41-45.
- [3] 齐文刚.低速无人车导航定位算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [4] 刘鹏飞.里程计辅助的高精度车载 GNSS-INS 组合导航系统[J].光学精密工程,2020,28(4): 980-988.
- [5] DAVID R. Simplified Dead Reckoning on a Tortuous Path[J]. The Journal of Navigation, 2010, 63: 379-394.
- [6] 李兵.复杂环境下的车辆组合导航系统研究[D].上海:上海交通大学,2012.
- [7] 陈文学,倪志斌,陈鸿跃,等.基于激光测距法提高车载激光捷联惯导/里程仪组合导航系统导航精度的初步研究[J].光学与光电技术,2016,14(2): 46-50.
- [8] 柯敏.基于多传感信息的智能汽车组合定位策略研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [9] 崔笠杭,张英敏.位置修正技术在航位推算中的应用[J].火力与指挥控制,2012,37(8): 100-103.
- [10] 聂浩翔,关劲,卞鸿巍.模糊自适应 Kalman 滤波在 INS/GPS 组合导航系统中的应用[J].舰船电子工程,2011,31(1): 67-70.
- [11] 薛文婷,张波,李署坚.组合导航中一种新息自适应卡尔曼滤波算法[J].全球定位系统,2014,39(4): 8-12.
- [12] 徐定杰,贺瑞,沈锋,等.基于新息协方差的自适应渐消卡尔曼滤波器[J].系统工程与电子技术,2011,33(12): 2696-2699.
- [13] 周卫东,乔相伟,吉宇人,等.基于新息和残差的自适应 UKF 算法[J].宇航学报,2010,31(7): 1798-1804.
- [14] 高怡,高社生.抗差自适应 Sage 滤波及其在组合导航中的应用[J].测控技术,2015,34(4): 135-139.