

一种车载组合导航系统航向修正方法研究

王万征, 李洪, 郭玉胜

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 针对车载组合导航系统航向误差难以修正的问题, 对航向角误差可观测性进行分析, 并提出一种基于加速度变化的航向误差可观测性分析的误差修正方法。首先利用分段线性定常系统 (PWCS) 可观测性分析法和奇异值 (SVD) 分析法对不同加速度变化情况下的组合导航系统航向角误差进行可观测性分析, 得出航向角误差的可观测度与加速度变化的剧烈程度正相关的结论。在不同加速度变化情况下, 对航向角误差的滤波估计进行仿真, 总结出加速度变化过程中的收敛规律, 从而提出根据加速度变化情况对航向误差进行修正的方法。最后实验结果表明, 通过该方法能够有效地减小航向角误差导致的位置误差, 提高导航精度。

关键词: 车载组合导航系统; 可观测性; 加速度; 航向角误差

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2015)06-0032-06

Research on Heading Error Correction of Vehicle Intergrated Navigation System

WANG Wan-zheng, LI Hong, GUO Yu-sheng

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Due to heading error on vehicle integrated navigation system can not be corrected, a method is proposed to judge the observability of the heading error by acceleration and correct the heading error when the error is observable. Firstly the observability of heading error is analyzed by the analysis method of piece-wise constant systems (PWCS) and method of singular value decomposition (SVD). Positive correlation is found between the observabilities of heading error and the changing amplitude of acceleration. Carry out simulation test upon Kalman filter on different acceleration standards, the correct method is proposed. Finally the results of experiment indicate that the method can correct heading error and improve the precision of position effectively.

Key words: Vehicle integrated navigation system; Observability; Acceleration; Heading error

0 引言

捷联惯性导航系统 (SINS) 是一种自主式导航系统, 能够自主提供姿态、速度和位置信息, 在导航领域得到了广泛应用, 但是其误差会随着时间不断积累。由于里程计误差不会随时间发散, 航位推算系统 (DR) 导航误差随时间变化相对 SINS 较小, 所以在车载导航系统中, 常用航位推算更新系统的位置信息。如果载车上已经装有捷

联惯导系统, 利用 SINS/DR 组合导航系统将具有较高的精度和容错性能^[1-2]。但由于 SINS 和 DR 共用姿态矩阵, 所以 SINS/DR 组合导航系统难以对系统的航向做出有效估计。SINS/GPS 组合导航系统可以有效抑制位置发散, 但是系统的速度或者位置会发生跳变, 在需要精确路线时无法满足要求。在 SINS/DR 组合导航系统中, 可以通过卡尔曼滤波对水平姿态误差角进行精确估计从而减小

收稿日期: 2015 - 08 - 22; 修订日期: 2015 - 09 - 23。

作者简介: 王万征 (1991 -), 男, 硕士, 主要从事惯性导航及组合导航方面的研究。

E-mail: MyForverKaKa@163.com

水平姿态角引起的航位推算误差，而航向角误差引起的位置误差无法消除。SINS/GPS 组合导航系统由于其航向角误差在很多情况下具有不可观测性，故而难以实时估计，而传统的通过判断滤波收敛的方式对航向误差进行估计和修正的方法，在闭环系统中由于速度实时修正，航向误差引起的速度误差信息难以积累，难以准确估计航向角误差。本文在不同加速度变化情况下对系统的航向角误差进行可观测性分析，得出加速度变化与航向角误差可观测度的联系，利用 GPS 量测信息对航向角进行修正，降低了航向角误差误判率，提高了航位推算系统导航精度。

1 车载组合导航系统

选取北—天—东 (NUE) 地理坐标系为导航坐标系，记为 n 系；IMU 与载车固联，认为 IMU 坐标系与载车坐标系重合，记为 b 系；里程计坐标系记为 m 系，其 O_x 轴在和载车车轮相接触地平面内并指向行驶方向， O_z 向右， O_y 向上。

组合导航系统以 1s 为周期，用卡尔曼滤波对各项误差进行估计，并对速度误差和水平姿态角误差进行闭环修正。其结构示意图如图 1 所示。

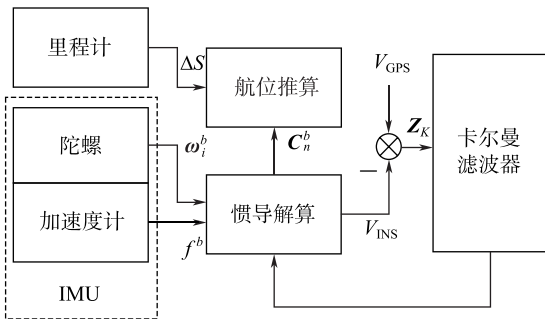


图 1 车载组合导航系统结构示意图

Fig. 1 Structure of vehicle integrated navigation system

组合导航系统状态量为

$$\mathbf{X} = [\delta V_N \quad \delta V_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U \quad \varphi_E \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]$$

组合导航系统的状态矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{f} \times & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{C}_n^b \\ \mathbf{M}_2 & \mathbf{M}_3 & -\mathbf{C}_n^b & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & & \mathbf{0}_{6 \times 11} & \end{bmatrix}$$

其中，

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -2(\omega_{ie} \sin L + V_E \tan L / (RN + H)) \\ 2\omega_{ie} \sin L + V_E \tan L / (RN + H) & V_N \tan L / (RM + H) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f} \times = \begin{bmatrix} 0 & -f_E & f_U \\ -f_U & f_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 / (RN + H) \\ 0 & \tan L / (RN + H) \\ -1 / (RM + H) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -V_N / (RM + H) & -\omega_e \sin L - V_E \tan L / (RN + H) \\ V_N / (RM + H) & 0 & \omega_e \cos L + V_E / (RN + H) \\ \omega_e \sin L + V_E \tan L / (RN + H) & -\omega_e \cos L - V_E / (RN + H) & 0 \end{bmatrix}$$

以航位推算解算的速度与捷联惯导系统解算的速度做差，将该差值作为系统的量测量。

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} V_{N-INS} - V_{N-GPS} \\ V_{E-INS} - V_{E-GPS} \end{bmatrix}$$

观测矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbf{0}_{2 \times 9} \\ 0 & 1 & \end{bmatrix}$$

2 可观测性分析

2.1 加速度恒定时航向角误差可观测性分析

组合导航系统滤波模型为时变系统，时变系统可以应用 PWCS 可观测性分析方法对其可观测性进行定性分析^[3-4]。要知道航向的可观测程度，则需要对系统状态变量可观测度概念进行定量分析，可用基于系统可观测性矩阵奇异值分解的可观测度分析的奇异值方法，即 SVD 法。

用离散 PWCS 的 SOM 代替 TOM 研究离散系统的可观测性可以大大简化分析，降低状态量^[5]。离散 PWC 提取的可观测性矩阵 (SOM) 为

$$\mathbf{Q}_s(r) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q}_j = \begin{bmatrix} H_j \\ H_j A_j \\ \vdots \\ H_j A_j^{n-1} \end{bmatrix}$$

在研究加速度对捷联惯导系统状态变量可观测度之前，首先研究加速度为零即匀速运动时捷联惯导系统状态变量的可观测度。匀速运动时，系统在导航坐标系三个方向上的加速度分别为 $f_N = 0$ 、 $f_U = g$ 、 $f_E = 0$ 。用 PWCS 法进行可观测性分析可知，在匀速运动时，系统可观测性矩阵的秩为 7，与静止时一样，这是因为在纬度变化可以忽略不计的情况下，系统的状态矩阵并未发生变化。

匀加速运动时，假设系统在导航坐标系三个方向上的加速度分别为 $f_N = 1$ 、 $f_U = g$ 、 $f_E = 1$ 。进行可观测性分析可知，在匀加速运动时，系统可观测性矩阵的秩提升为8，但是航向角误差的可观测度很小，原因在于速度不大时，速度变化对状态矩阵的影响很小。例如： $V_N = 10\text{m/s}$ ，系统状态矩阵中， $V_N / (RM + H) = 1.7291 \times 10^{-6}\text{rad/s}$ ，比地球的自转角速度 ω_{ie} 小一个数量级以上，所以并不能显著提升航向角误差的可观测性。

2.2 分段恒定加速运动时航向角误差可观测性分析

用分段恒定加速运动来代替系统连续的线性机动进行可观测性分析^[6]。假设四种不同的匀加速运动，在地理坐标系下各方向上加速度如表1所示。

表1 分段恒定加速度

Tab. 1 Piecewise constant acceleration

序号	加速度情况	$f_N / (\text{m/s}^2)$	$f_U / (\text{m/s}^2)$	$f_E / (\text{m/s}^2)$
1	匀速运动	0	g	0
2	北向匀加速运动	1	g	0
3	东向匀加速运动	0	g	1
4	东北向匀加速运动	$\sqrt{0.5}$	g	$\sqrt{0.5}$

航向角误差可观测度定义为：航向角误差对应的奇异值与外观测量（速度误差）对应的奇异值之比 $\eta = \frac{\sigma_u}{\sigma_0}$ ，通过计算每一个奇异值 σ_i 对应的初始状态向量 $X_{0,i}$ 找出航向角误差对应的奇异值^[5]。假设有两个时间段，对表1中的恒定加速度两两组合，进行可观测度分析得到航向角误差的可观测度如表2所示（行对应第一时间段加速度情况在表1的序号，列对应第二时间段加速度情况在表1的序号）。

表2 航向角误差可观测度

Tab. 2 Observability of heading error

时间段	1	2	3	4
1	0	0.4993	0.4993	0.4993
2	0.4993	$7.7431\text{e-}7$	0.7053	0.3810
3	0.4993	0.7053	$7.7675\text{e-}7$	0.3810
4	0.4993	0.3810	0.3810	$7.7565\text{e-}7$

从表2中可以看出，在匀速运动或匀加速运动时，可以认为航向角误差不可观测；只有当加速度变化时，航向角误差才可观测。而且可以看出航向角误差的可观测度与加速度变化向量的大小有关。由于在车载组合导航系统中，系统在线运动时只有前向速度，所以航向角误差的可观测度与组合导航系统的前向加速度变化有关，而且可以较为容易地判定载车加速度变化情况。

本文只对加速度方向不变而大小发生变化时的情况进行分析。假设只存在北向加速度，在不同的加速度变化情况下航向角误差的可观测度如表3所示。

表3 航向角误差可观测度分析

Tab. 3 Observability analysis of heading error

时间段1 加速度 / (m/s^2)	时间段2 加速度 / (m/s^2)	时间段3 加速度 / (m/s^2)	可观测度
0	0	1	0.4711
0	0	2	0.9406
0	2	0	0.9406
1	0	2	0.8123
0	1	2	0.8123
0.5	1.5	2.5	0.8070
1	2	3	0.7999

从表3中可以看出，在一段时间内，航向角误差可观测度与加速度变化的剧烈程度正相关，而与加速度本身的大小关系不大。在加速度变化趋势一致时，变化幅度越大，航向角误差可观测度越高；在加速度变化的幅度一样时，变化越剧烈，则航向角误差可观测度越高，所以可通过加速度的变化情况来间接判断组合导航系统航向角误差的可观测度。

2.3 航向角误差修正方法

在已知航向角误差与加速度变化剧烈程度相关的情况下，对分段恒定加速运动时航向角误差的收敛情况进行分析。假设航向角存在 0.2° 的误差，在不同的加速度变化情况下其航向误差估计如图2所示（滤波周期为1s）。

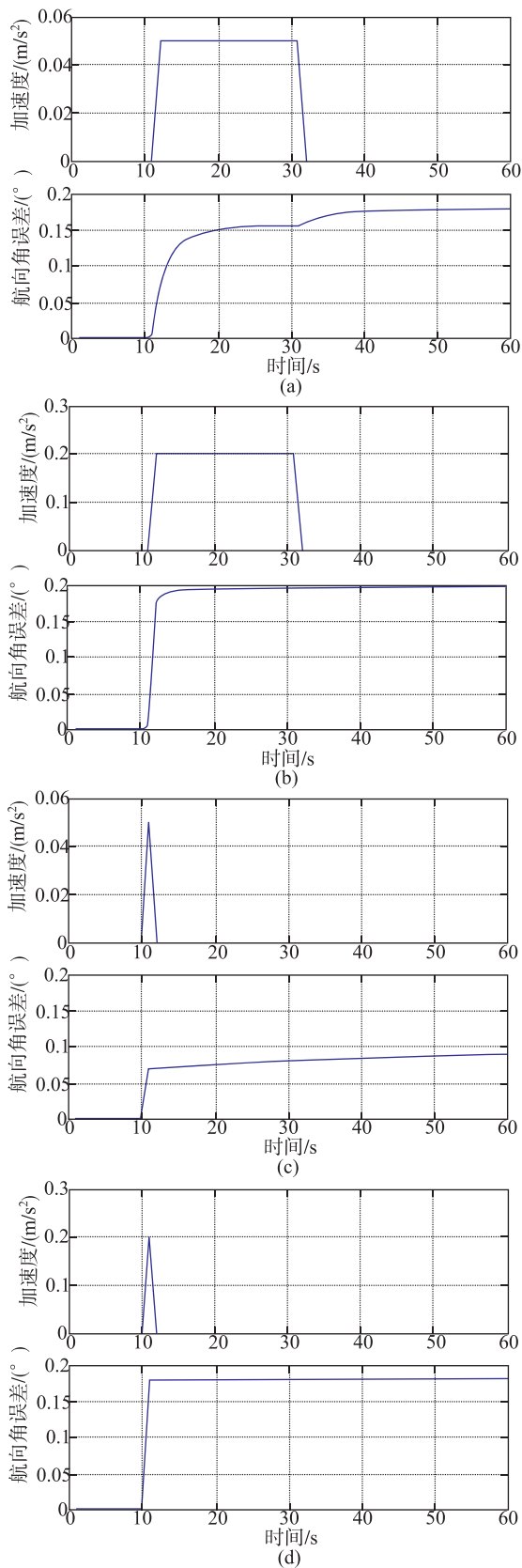


图2 航向角误差的卡尔曼滤波估计

Fig. 2 Kalman filtering estimation of heading error

在惯导系统载体运动过程中,一定存在一个加速度从无到有和从有到无的变化过程,这个过程中,航向角误差具有可观测性。从图2可以得出以下结论:

1) 在系统产生加速度即系统由静止或匀速运动变为加速运动时,航向角误差迅速收敛逼近真实值,如果加速度不发生变化,其估计精度不会进一步提高。当加速度再变为0即由加速运动再变化为静止或匀速运动时,航向角误差继续收敛,此时收敛速度较慢,在加速度变为0后航向角误差估计值逐渐稳定。

2) 在同样的加速度变化幅度下,相对于加速度在某个值保持一段时间,如果加速度只发生一个扰动,则航向角误差的估计精度较低。前面分析航向角误差可观测度与加速度变化剧烈程度正相关,这是在分段恒定加速运动情况下分析的,如果加速度只是发生一个扰动,由于短时间内在该加速度下航向角误差引起的速度误差较小,所以滤波器不能精确估计航向角误差。

3) 在同样的变化趋势下,加速度变化幅度越大,则航向角误差估计精度越高。这与前面加速度变化时航向角误差的可观测度分析结果相吻合。

由上面的分析,可以得出在组合导航系统工作过程中判断航向角误差可观测性并修正误差的方法,按照以下步骤进行:

1) 在加速度发生明显变化时,停止水平姿态和惯导速度的闭环修正。因为短时间的导航过程中,闭环修正不利于速度输出中关于姿态误差的信息浓度的积累^[7],影响航向角误差的估计精度。

2) 监测加速度值的变化,如果加速度变化值在一定时间内超过临界值,且没有立即恢复到0,则准备修正航向误差,否则继续闭环修正。前面分析已知,航向角误差的可观测性与加速度变化剧烈程度有关,由此可以间接判断航向角误差的可观测性,而且要排除加速度只是发生一个扰动的情况。

3) 系统加速度值再次稳定,并且滤波收敛后,对航向角进行修正,此后继续系统对水平姿态角和惯导速度的闭环修正。由前面分析已知,加速度稳定时,航向角误差仍在收敛过程中,在一段时间后才达到稳定值。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

惯导系统陀螺常值漂移为 $0.1 (^{\circ})/h$ ，随机游走为 $0.01 (^{\circ})/\sqrt{h}$ ，加速度计常值零偏为 $100\mu g$ ，随机零偏为 $10\mu g$ ，航向失准角 0.2° ，俯仰失准角 0.06° ，滚转失准角 0.06° ，参考速度噪声 $0.02m/s$ 。载车行进路线及速度变化情况如图3所示。

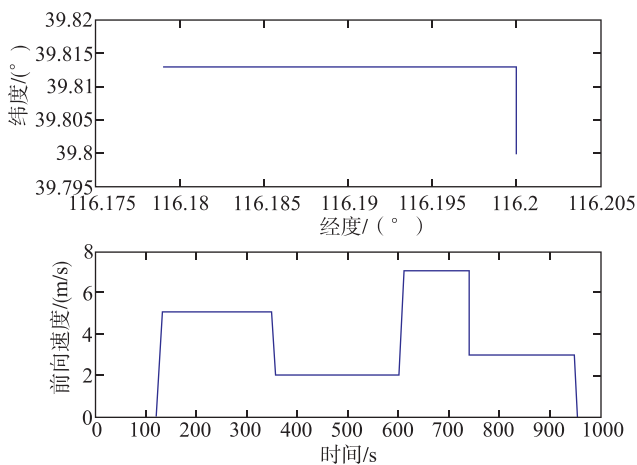


图3 仿真轨迹及速度

Fig. 3 Experimental trajectory and speed

3.2 仿真结果

如果在载车行进过程中只对水平姿态误差做闭环修正，其航向角误差和位置误差如图4所示。

从图4中可以看出，如果不对航向角进行修正，航向失准角和陀螺漂移带来的误差会使导航系统的位置误差发散，尤其在与载车行进速度相垂直的方向上，影响更为明显。按前文所述方法对航向做修正后，其航向角误差和位置误差如图5所示。

从图5中可以看出，在有加速度变化的情况下，组合导航系统估计出航向角误差，对航向进行修正，不但消除了航向失准角的影响，而且有效抑制了陀螺漂移引起的航向角误差，位置精度明显提高。

4 结论

实验数据分析表明，通过该方法使车载组合

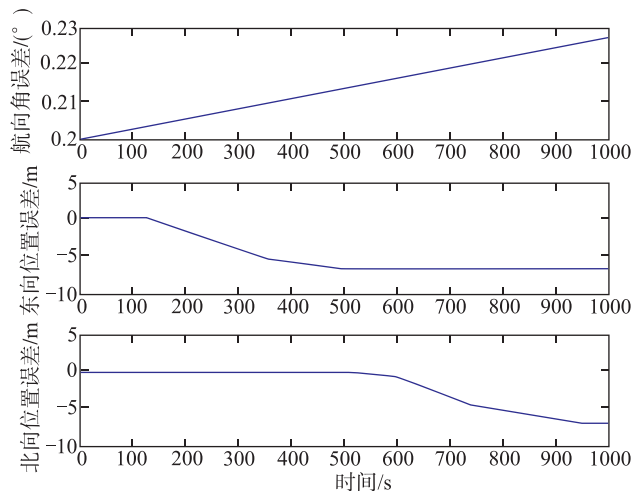


图4 航向角及位置误差

Fig. 4 Heading error and position error

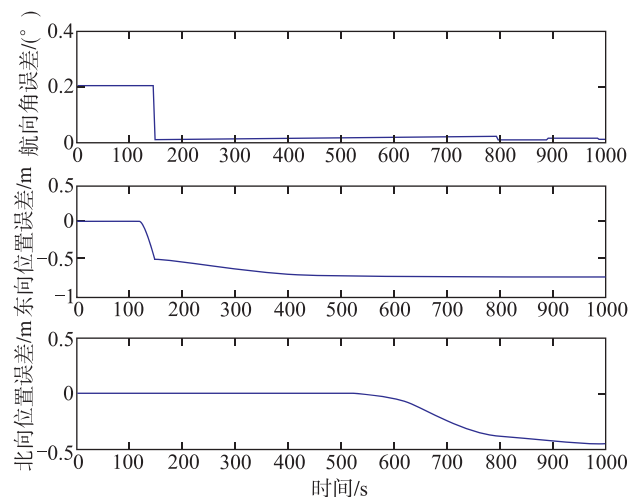


图5 航向角及位置误差

Fig. 5 Heading error and position error

导航系统的航向角误差能够在其可观测度较好时得到有效估计，从而提高组合导航系统的精度。而且该方法是通过加速度变化间接判定航向角误差可观测性，增加的计算量小。该方法适用于载体有加速度变化的情况，运动平稳的载体航向误差估计可通过罗经回路实现。

参考文献

- [1] 李旦, 秦永元, 张金亮. 车载惯导航位推算组合导航系统误差补偿研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(2): 389-391.
- [2] 严恭敏, 秦永元, 杨波. 车载航位推算系统误差补偿技术

- 研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24 (2): 26-30.
- [3] 严涛, 王跃钢, 杨波, 等. SINS/DR 组合导航系统可观测性研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40 (3): 83-87.
- [4] 孔星炜, 董景新, 吉庆昌, 等. 一种基于 PWCS 的惯导系统可观测度分析方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19 (6): 631-636.
- [5] 付梦印, 郑辛, 邓志红, 等. 传递对准理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [6] 赵睿. 捷联惯性系统初始对准研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [7] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.