

# 基于 SIMS/GPS 的汽车运动状态组合测量系统<sup>\*</sup>

张小龙 冯能莲 宋健 王继先

**【摘要】** 建立了汽车基本坐标系并推导捷联惯性位置姿态测量基本算法,从工程易实现角度给出了中低精度 SIMS 和载波相位模式差分 GPS 在位置/速度/航向角间接反馈松散组合模式下的误差状态方程和量测方程,基于改进自适应 Kalman 滤波器对测量模型进行了仿真,并对组建系统进行了实车试验验证。分析表明,仿真结果和实车试验结果一致性好,测量模型满足实际汽车主动安全性试验要求。

**关键词:** 汽车 位置姿态 SIMS/GPS 组合测量 Kalman 滤波器 道路试验

**中图分类号:** U467.1<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

## Measurement System for Vehicle Motion State Based on SIMS/GPS Integrated Technologies

Zhang Xiaolong<sup>1,3</sup> Feng Nenglian<sup>2</sup> Song Jian<sup>1</sup> Wang Jixian<sup>3</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China 2. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China 3. Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

### Abstract

The strapdown inertial measurement algorithm was firstly derived on the basis of the set coordinate systems. Secondly, both the state and the measure equations of errors were established based on the indirect feedback and non-tight integrated position/velocity/course angle measuring model between the middle-and-low precision IMU (inertial measurement unit) and the high precision CP-DGPS (carrier-phase-differential GPS). Then the improved self-adapting Kalman filter was employed to simulate the measurement model. Finally, the measurement system was developed for the model certification and the roadway tests were conducted. The comparative study on the simulation and the roadway tests showed that the simulation results are in good agreement with the experimental result, which further justified the effectiveness of the developed integrated system for the vehicle active safety roadway test.

**Key words** Vehicles, Path and attitude, SIMS/GPS integrated measurement, Kalman filter, Roadway test

### 引言

目前实现精确控制汽车状态信息(尤其是道路信息)的不完全性已制约了汽车控制系统的发展。实际上很多关键性的汽车状态参数(如路面附着系数、车速、质心侧偏角等)都是基于易于直接低成本

测量的运动学参数信息和参数模型通过软测量方法获得,实现对不可测变量的推断控制。由于车载传感器的测试水平、测试成本以及软测量模型精度等都直接影响控制效果,从而对实现汽车的精确实时控制及其产品的产业化带来了极大的困难。

本文从工程易实现角度探讨中低精度 SIMS 和

收稿日期: 2007-07-27

<sup>\*</sup> 清华大学-中大集团博士后科学基金资助项目(项目编号:20283600147)、安徽农业大学稳定与引进人才基金项目(项目编号:2007-01-01)和北京市人才强教计划资助项目(项目编号:05005015200701)

张小龙 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 博士后 讲师(安徽农业大学), 100084 北京市

冯能莲 北京工业大学环境与能源工程学院 教授 通讯作者, 100022 北京市

宋健 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 教授 博士生导师

王继先 安徽农业大学工学院院长 教授, 230036 合肥市

载波相位模式差分 GPS 在位置/速度/航向角间接反馈松散组合模式下汽车运动状态参数的测量方法,可为汽车稳定性控制系统算法优化及整车匹配性能评价提供试验手段,为进一步对汽车运动学参数软测量模型的深入研究提供量化分析依据。

### 1 基本坐标系和汽车位置姿态表示

汽车位置姿态表示依赖的相关坐标系定义<sup>[1]</sup>

如表 1 所示。汽车姿态是汽车坐标系相对于地理坐标系的方位关系,即航向角  $h$ 、侧倾角  $\phi$  和纵倾角  $\theta$ ,统称为车体姿态角,按以下坐标系旋转顺序得到

$$O_V X_t Y_t Z_t \xrightarrow{-h} O_V X_{b1} Y_{b1} Z_{b1} \xrightarrow{\phi} O_1 X_{b1} \quad (1)$$

$$O_V X_{b2} Y_{b2} Z_{b2} \xrightarrow{\theta} O_V X_b Y_b Z_b$$

表 1 坐标系及其定义

Tab.1 Coordinate systems and their definitions

坐标系名称	定义	备注
地心惯性坐标系, $i$ 系 $O_i X_i Y_i Z_i$	原点 $O_i$ 选在地球质心, $Z_i$ 轴沿地轴指向北极为正, $X_i$ 、 $Y_i$ 轴位于赤道平面内且 $X_i$ 轴指向春分点,并构成右手直角坐标系	不随地球自转
地球坐标系, $e$ 系 $O_e X_e Y_e Z_e$	采用美国国防部研制确定的 WGS-84 协议坐标系,以大地纬度 $L$ 、大地经度 $B$ 和大地高度 $H$ 表示	与地球固连,并相对 $i$ 系以地球自转角速率 $\omega_e$ 旋转
地理坐标系, $t$ 系 $O_V X_t Y_t Z_t$	原点 $O_V$ 位于汽车簧上质心处,本文选取 $O_V X_t$ 指东, $O_V Y_t$ 指北, $O_V Z_t$ 沿垂直方向指天,即东北天坐标系	随汽车平移,但不随汽车旋转,表示质心运动轨迹
高斯平面坐标系, $G$ 系 $O_G X_G Y_G Z_G$	由 $e$ 系经纬度 Gauss-Krhdgger 投影正算得到,文中计算舍去了 7 次以上高阶项,其计算精度已达 0.001 m	汽车相对于地球位置直观表示的一种方法
汽车坐标系, $b$ 系 $O_V X_b Y_b Z_b$	原点 $O_V$ 选在汽车簧上质心处, $O_V X_b$ 沿汽车纵轴指向汽车前方, $O_V Y_b$ 沿汽车横轴指向汽车左侧, $O_V Z_b$ 垂直 $X_b O_V Y_b$ 平面向上	与车体固联
平台坐标系, $p$ 系 $O_V X_p Y_p Z_p$	原点 $O_V$ 位于汽车簧上质心处,为数学解析平台,通过存储在计算机内的方向余弦矩阵来实现,理想的平台坐标系即 $t$ 系	实际由于初始对准误差、计算误差等与 $t$ 系不重合

为了表达直观方便,汽车簧上质心轨迹在高斯平面坐标系中表示,汽车速度矢量和角速度矢量均在东北天坐标系中表示,通过由姿态角组成的姿态矩阵经变换可得到汽车坐标系中的对应值。

### 2 捷联惯性位置姿态解算实现

如图 1 所示,IMU 是六测量自由度惯性测量单元。实现捷联惯性位置姿态测量需要完成 IMU 补偿输出、捷联解算和初始对准 3 部分工作。设 IMU

与车体在簧上质心处固联,其测量坐标系与车体坐标系相同,则 IMU 直接输出车体相对于  $i$  系的线加速度矢量和角速度矢量在汽车坐标系中的投影值,即  $\omega_{ib}^b$  和  $f_{ib}^b$ 。捷联算法对三角速度进行姿态解算,并利用姿态矩阵将三线加速度值投影到当地地理坐标系中,完成车体的速度和位置解算,其中姿态矩阵的计算是算法中最重要的部分,通常采用四元数数值方法。另外,实现捷联解算前需提供载体的初始位置速度姿态信息,即初始对准。

#### 2.1 基于四元数法车体姿态矩阵更新算法

##### 2.1.1 姿态矩阵四元数法递推求解

汽车运动时,与其固联的陀螺仪会敏感车体的角运动,姿态矩阵变化规律为

$$\dot{C}_b^t = C_b^t [\omega_{ib}^b \times] \quad (2)$$

式中  $[\omega_{ib}^b \times]$  为由  $\omega_{ib}^b = [\omega_{ib}^{bx} \ \omega_{ib}^{by} \ \omega_{ib}^{bz}]^T$  构成的反对称矩阵(下同);  $\omega_{ib}^b$  为  $b$  系相对  $t$  系旋转角速度矢量在  $b$  系中的投影矢量(下同);  $C_b^t$  为姿态矩阵。

设  $i_b$ 、 $j_b$ 、 $k_b$  为系中正交单位基矢量,角速度  $\omega_{ib}^b$  四元数表达式为  $Q(\Omega_{ib}^b) = 0 + \omega_{ib}^{bx} i_b + \omega_{ib}^{by} j_b + \omega_{ib}^{bz} k_b$ ,姿态四元数为  $Q(t) = q_0 + q_1 i_b + q_2 j_b + q_3 k_b$ ,则式(2)可表示为<sup>[1]</sup>

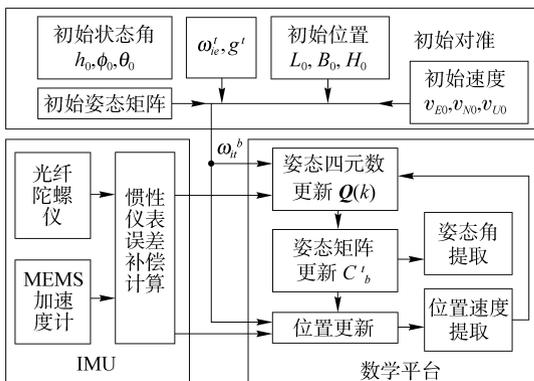


图 1 捷联惯性位置姿态测量原理图

Fig.1 Measurement scheme of SIMS for vehicle path and attitude

$$\dot{\mathbf{Q}}(t) = \frac{1}{2} \mathbf{Q}(t) \otimes \mathbf{Q}(\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b) \quad (3)$$

其中符号 $\otimes$ 表示四元数乘法,写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ib}^{bx} & -\omega_{ib}^{by} & -\omega_{ib}^{bz} \\ \omega_{ib}^{bx} & 0 & \omega_{ib}^{bz} & -\omega_{ib}^{by} \\ \omega_{ib}^{by} & -\omega_{ib}^{bz} & 0 & \omega_{ib}^{bx} \\ \omega_{ib}^{bz} & \omega_{ib}^{by} & -\omega_{ib}^{bx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

可等价表示为

$$\dot{\mathbf{Q}}(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \mathbf{M}^* \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \mathbf{Q}(\mathbf{q}) \quad (5)$$

其数值求解递推公式为

$$\mathbf{Q}(k+1) = \mathbf{M}^* (\Delta \mathbf{q}) \mathbf{Q}(k) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{Q}(k)$ 、 $\mathbf{Q}(k+1)$ 分别表示 $t_k$ 时刻和 $t_{k+1}$ 时刻姿态四元数的值,更新周期为 $T$ (s);更新四元数为 $\Delta \mathbf{q} = [C \quad S\Delta\theta_x \quad S\Delta\theta_y \quad S\Delta\theta_z]^T$ ;旋转矢量在 $b$ 系中投影为 $\Delta \boldsymbol{\theta} = [\Delta\theta_x \quad \Delta\theta_y \quad \Delta\theta_z]^T$ ,单位 rad,它表征了汽车姿态角的变化;令 $\Delta\theta_0 = \|\Delta \boldsymbol{\theta}\|$ ,则 $C = \cos \frac{\Delta\theta_0}{2}$ , $S = \frac{\sin(\Delta\theta_0/2)}{\Delta\theta_0}$ 。

另外,为了减少计算过程中各种误差对四元数规范性影响,在若干次迭代之后对四元数归一化。

### 2.1.2 车体速度位置姿态信息提取

设 $\mathbf{v}^t = [v_E \quad v_N \quad v_U]^T$ 表示汽车质心处速度矢量在 $t$ 系中的投影矢量,则有

$$\dot{\mathbf{v}}^t = \mathbf{f}_{ib}^t - (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^t + \boldsymbol{\omega}_{et}^t) \times \mathbf{v}^t + \mathbf{g}^t \quad (7)$$

式中 $\mathbf{f}_{ib}^t$ ——汽车质心处比力矢量在 $t$ 系中的投影矢量

$\mathbf{g}$ ——重力加速度

对 $\mathbf{v}^t$ 进行数值积分,可得到车体位置信息。

姿态角信息提取由姿态四元数更新值计算姿态矩阵,并根据姿态矩阵和姿态角的一一对应关系求取姿态角。

## 2.2 捷联惯性测量系统误差模型

本文研究汽车位置姿态捷联惯性测量,主要误差为光纤陀螺随机漂移 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ 和MEMS加速度计的随机偏置 $\mathbf{V}^b$ ,它们均为“随机常值+1阶Markov过程”形式<sup>[2]</sup>,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}^b = \boldsymbol{\varepsilon}_b + \boldsymbol{\varepsilon}_r + \mathbf{w}_g \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_b = \mathbf{0} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_r = -\boldsymbol{\beta}_\varepsilon \boldsymbol{\varepsilon}_r + \mathbf{w}_\varepsilon \end{cases} \begin{cases} \mathbf{V}^b = \mathbf{V}_b + \mathbf{V}_r + \mathbf{w}_a \\ \dot{\mathbf{V}}_b = \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{V}}_r = -\boldsymbol{\beta}_\nabla \mathbf{V}_r + \mathbf{w}_\nabla \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{\beta}_\varepsilon$ 、 $\boldsymbol{\beta}_\nabla$ 分别为陀螺漂移、加速度计误差一阶Markov过程相关时间的倒数,在实践中可认为3个陀螺和3个加速度计的Markov过程相关时间相同; $\mathbf{w}_\varepsilon$ 、 $\mathbf{w}_\nabla$ 为驱动白噪声。

### 2.2.1 平台误差角方程

捷联惯性测量数据解算是基于“数学平台”完成的,其与 $t$ 系由于多种误差的存在不重合,存在平台误差角 $\boldsymbol{\Phi}^t \triangleq [\Phi_E \quad \Phi_N \quad \Phi_U]^T$ ,其方程为

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}^t = \delta \boldsymbol{\omega}_{ie}^t + \delta \boldsymbol{\omega}_{et}^t - [(\boldsymbol{\omega}_{ie}^t + \boldsymbol{\omega}_{et}^t) \times] \boldsymbol{\Phi}^t - \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (9)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ ——等效到 $p$ 系中的陀螺漂移值

### 2.2.2 速度误差方程

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^t = [\mathbf{f}^t \times] \boldsymbol{\Phi}^t - [(2\delta \boldsymbol{\omega}_{ie}^t + \delta \boldsymbol{\omega}_{et}^t) \times] \mathbf{v}^t - [(2\boldsymbol{\omega}_{ie}^t + \boldsymbol{\omega}_{et}^t) \times] \delta \mathbf{v}^t + \mathbf{V}^p \quad (10)$$

式中 $\mathbf{V}^p$ ——等效到 $p$ 系中的加速度计误差

### 2.2.3 位置误差方程

$$\begin{cases} \delta \dot{L} = \frac{\delta v_E \sec B}{R_E + H} + \frac{\delta L v_E \sec B \tan B}{R_E + H} - \frac{\delta H v_E \sec B}{(R_E + H)^2} \\ \delta \dot{B} = \frac{\delta v_N}{R_N + H} + \frac{\delta B v_N}{(R_N + H)^2} \\ \delta \dot{H} = \delta v_U \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2.4 捷联惯性测量系统误差方程

综合式(8)~(11)得到SIMS误差状态方程和量测方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{W} \\ \mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\mathbf{V}$ ——观测噪声矢量

其中状态矢量 $\mathbf{X}$ 为21维,即

$$\mathbf{X} = [\Phi_E \quad \Phi_N \quad \Phi_U \quad \delta v_E \quad \delta v_N \quad \delta v_U \quad \delta L \quad \delta B \quad \delta H \quad \varepsilon_{bx} \quad \varepsilon_{by} \quad \varepsilon_{bz} \quad \varepsilon_{rx} \quad \varepsilon_{ry} \quad \varepsilon_{rz} \quad \nabla_{bx} \quad \nabla_{by} \quad \nabla_{bz} \quad \nabla_{rx} \quad \nabla_{ry} \quad \nabla_{rz}]^T$$

系统状态转移阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{13} & \mathbf{C}_b^t & \mathbf{C}_b^t & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^t & \mathbf{C}_b^t \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{A}_{33} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \cdots & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 21} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_{bb}^t \boldsymbol{\beta}_\varepsilon & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \cdots & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 21} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_{bb}^t \boldsymbol{\beta}_\nabla \end{bmatrix}$$

其中

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin B + \frac{v_E \tan B}{R_E + H} & -\left[ \frac{\omega_{ie} \cos B + v_E}{R_E + H} \right] \\ -\left[ \frac{\omega_{ie} \sin B + v_E \tan B}{R_E + H} \right] & 0 & -\frac{v_N}{R_N + H} \\ \omega_{ie} \cos B + \frac{v_E}{R_E + H} & \frac{v_N}{R_N + H} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & -f_U & f_N \\ f_U & 0 & -f_E \\ -f_N & f_E & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_N + H} & 0 \\ \frac{1}{R_E + H} & 0 & 0 \\ \frac{\tan B}{R_E + H} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{v_N}{(R_N + H)^2} \\ -\omega_{ie} \sin B & 0 & -\frac{v_E}{(R_E + H)^2} \\ \omega_{ie} \cos B + \frac{v_E \sec^2 B}{R_E + H} & 0 & -\frac{v_E \tan B}{(R_E + H)^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{33} = \begin{bmatrix} \frac{v_E \sec B \tan B}{R_E + H} & 0 & -\frac{v_E \sec B}{(R_E + H)^2} \\ 0 & 0 & \frac{v_N}{(R_N + H)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{32} = \text{diag} \left[ \frac{\sec B}{R_E + H} \quad \frac{1}{R_N + H} \quad 1 \right]$$

$$\mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} \frac{v_N \tan B - v_U}{R_E + H} & 2\omega_{ie} \sin B + \frac{v_E \tan B}{R_E + H} & -\left( \frac{2\omega_{ie} \cos B + v_E}{R_E + H} \right) \\ -2 \left( \frac{v_E \tan B}{R_E + H} + \omega_{ie} \sin B \right) & -\frac{v_U}{R_N + H} & -\frac{v_N}{R_N + H} \\ 2 \left( \frac{v_E}{R_E + H} + \omega_{ie} \cos B \right) & \frac{2v_N}{R_N + H} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{23} = \begin{bmatrix} 2v_N \omega_{ie} \cos B + 2v_U \omega_{ie} \sin B + \frac{v_E v_N \sec^2 B}{R_E + H} & 0 & \frac{v_E (v_U - v_N \tan B)}{(R_E + H)^2} \\ -v_E \left( 2\omega_{ie} \cos B + \frac{v_E \sec^2 B}{R_E + H} \right) & 0 & \frac{v_E^2 \tan B}{(R_E + H)^2} + \frac{v_U v_N}{(R_N + H)^2} \\ -2v_E \omega_{ie} \sin B & 0 & -\left( \frac{v_E^2}{(R_E + H)^2} + \frac{v_N^2}{(R_N + H)^2} \right) \end{bmatrix}$$

观测矩阵为

$$\mathbf{H} = [\text{diag}([1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]) \mathbf{0}_{9 \times 12}]$$

系统白噪声矢量  $\mathbf{W}$  均值为  $\mathbf{0}$ , 方差阵为  $\mathbf{Q}_w$ 。

$$\mathbf{W} = [\omega_{gx} \quad \omega_{gy} \quad \omega_{gz} \quad \omega_{ax} \quad \omega_{ay} \quad \omega_{az} \quad \mathbf{0}_{1 \times 6} \cdots \omega_{\epsilon_x} \quad \omega_{\epsilon_y} \quad \omega_{\epsilon_z} \quad \mathbf{0}_{1 \times 3} \quad \omega_{\nabla_x} \quad \omega_{\nabla_y} \quad \omega_{\nabla_z}]^T$$

### 3 SIMS/GPS 融合位置姿态测量方案与实现

#### 3.1 滤波器的结构和 SIMS/GPS 组合方式

汽车位置姿态测量中 SIMS/GPS 组合方式很多, 本文采用 SIMS/GPS 速度、位置浅组间间接反馈式组合方式。考虑到滤波状态向量中姿态信息, 特别是航向角可观测度较低, 加入 GPS 量测的航向角作为观测值, 最后形成如图 2 所示的组合方案。其主要特点是 SIMS、GPS 相互独立工作, 综合作用仅表现在 GPS 辅助 SIMS 完成高频率的位置、速度和姿态信息输出, 易于工程实现。

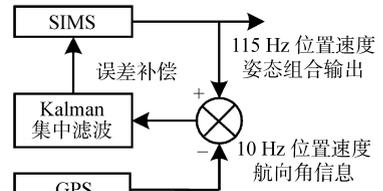


图 2 SIMS/GPS/航向角浅组方案

Fig. 2 Non-tight integrated measurement scheme of SIMS/GPS/course angle

#### 3.2 状态变量实时补偿

设  $p$  系下的姿态矩阵为  $\mathbf{C}_p^b$ , 有

$$\mathbf{C}_t^i \approx \mathbf{C}_p^b (\mathbf{I} - [\hat{\phi} \times]) \quad (13)$$

式中  $\hat{\phi}$  为滤波器估计出的失准角。姿态角应从校正后的姿态矩阵  $\mathbf{C}_t^i$  中提取。

对滤波方程状态向量中的速度、位置、陀螺随机常值漂移和加表随机零偏都需根据滤波估计值进行补偿。补偿方法为当前捷联解算值和 IMU 输出值减去对应估计值。

#### 3.3 改进自适应 Kalman 滤波实现

在实际应用中卡尔曼滤波器会出现精度降低或发散现象, 其主要原因是滤波发散和计算发散<sup>[3]</sup>。平方根滤波算法是克服计算发散的主要方法之一。对于由于系统及测量噪声与实际值之间存在差异而导致的滤波发散, Sage-Husa 等提出了一种在线实时估计系统及测量噪声的算法<sup>[4~6]</sup>。论文综合了这两种算法有效克服了滤波发散现象。实现由  $k-1$  步到  $k$  步的迭代流程如图 3 所示。

### 4 仿真分析

进行了两项仿真试验: 纯捷联算法仿真以验证算法的正确性; 基于 SIMS/GPS/航向角间接反馈组合方式在设定轨迹下进行仿真试验。

后者试验设计时依据项目购置六测量自由度的中低精度 IMU XW-7100。在模拟产生 IMU 输出信号时, 假设 3 个陀螺、3 个加速度计的误差特性一

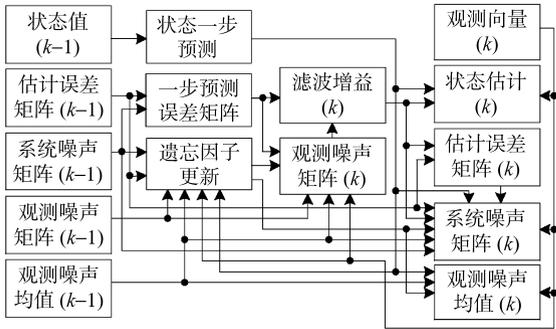


图3 改进自适应Kalman滤波程序流程图

Fig.3 Improved adapted Kalman filter programming diagram

致;陀螺常值漂移为 $5^\circ/\text{h}$ ,随机漂移为 $2.5^\circ/\text{h}$ ;加速度计初始偏差为 $1\text{ mg}$ ,随机偏差为 $0.5\text{ mg}$ ;陀螺和加速度计一阶Markov过程成分相关时间常数均取为 $2\ 000\text{ h}$ ;GPS经度、纬度和高度精度分别为 $0.000\ 001\text{ rad}$ 、 $0.000\ 001\text{ rad}$ 和 $0.5\text{ m}$ ,速度精度为 $0.01\text{ m/s}$ ;航向角精度为 $0.01^\circ$ 。3个初始对准姿态失准角均为 $0.05^\circ$ ,初始姿态失准角为 $0.05^\circ$ ,初始位置为东经 $118^\circ$ ,北纬 $32^\circ$ ,高度 $15\text{ m}$ 。速度和位置对准精度同GPS速度位置精度。IMU数据更新速率为 $100\text{ Hz}$ ,GPS数据更新速率为 $10\text{ Hz}$ ,Kalman滤波周期为 $0.1\text{ s}$ 。

假设汽车沿半径 $20\text{ m}$ 的正圆轨迹以 $1\text{ m/s}$ 速度匀速行驶一周,仿真时间约 $125.64\text{ s}$ 。实际融合时假设系统噪声信息未知。图4是设定轨迹与解算轨迹高斯平面坐标系表示,表2是位置、姿态、速度误差统计特性,位置姿态速度仿真结果曲线省略。

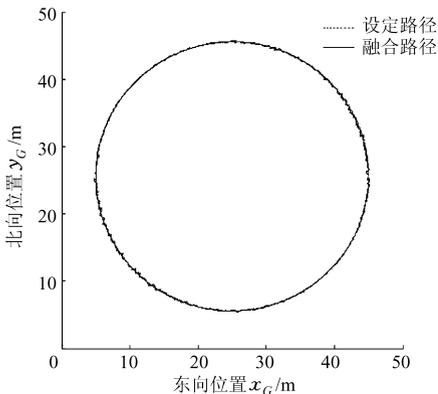


图4 高斯平面坐标系设定轨迹与解算轨迹

Fig.4 Path presentation of both set and resolved in the Gauss coordinate system

总结曲线特征及其统计数据,初步得到以下几点:①间接反馈松散型组合方式融合位置、速度和姿态值收敛。构建的Kalman滤波器工作可靠。②设定条件下的组合测量速度精度为 $0.05\text{ m/s}$ ,位置精度为 $0.3\text{ m}$ 。姿态角均值均在 $0.15^\circ$ 以内,其中航向角均值稍高,但均方差较其他2个水平姿态角小,可以认为其中包含有一定的系统误差,可以进行补偿。

位置姿态测量精度满足了系统对汽车主动安全性测试的要求。③仿真中汽车机动性较低,提高机动性可以提高量测精度。提高GPS数据更新速度和在融合前对GPS数据误差补偿可以提高组合测量精度。

表2 仿真结果参数误差统计特性

Tab.2 Statistic parameters errors of simulation

参数	均值	均方差	最大值	最小值
航向角/ $^\circ$	0.146 4	0.089 8	0.648 6	-0.274 3
侧倾角/ $^\circ$	-0.000 9	0.136 3	0.473 9	-0.448 9
俯仰角/ $^\circ$	-0.021 0	0.106 4	0.316 8	-0.395 5
东向速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.000 5	0.008 9	0.032 6	-0.032 2
北向速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.000 4	0.009 8	0.031 4	-0.037 0
天向速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.000 8	0.008 6	0.025 9	-0.032 1
经度/ $\text{m}$	0.016 8	0.078 7	0.349 2	-0.274 4
纬度/ $\text{m}$	-0.002 3	0.087 3	0.261 0	-0.324 9
高度/ $\text{m}$	-0.000 9	0.041 9	0.128 6	-0.145 9

## 5 道路试验验证

### 5.1 试验装置及试验设计

实车试验装置参见文献[7],其中车体方位角信息采用Crescent Vector双天线系统。先后进行了单独载波相位模式差分GPS、单独SIMS及其组合实车性能试验。其中SIMS实车试验在定远总装备部试车场综合性能路上进行,汽车沿半径为 $15\text{ m}$ 的圆弧变速行使;GPS及SIMS/GPS组合性能试验在南京市江宁区一空旷广场进行,具体跑车路线由两条直角边和一段弯道(约 $1/4$ 圆弧)组成的封闭曲线。该路线包括了弯道和直道,具有一定的代表性。

### 5.2 GPS静基座试验和直线运动观察试验

为检验工作在载波相位差分模式下DL-4-RT2 GPS接收机的实际性能,对该接收机在试验现场进行了 $160\text{ s}$ 的静态观测和直线行驶动态观测试验。从静态观测统计数据来看,位置精度达到分米级,速度精度在 $0.1\text{ m/s}$ 以内。

动态观测时,汽车严格沿一条直线公路标志线行驶(所选公路试验路段非绝对水平)。选取来回两条直线段的数据进行最小二乘直线拟合,拟合误差和均方值分别为 $-1.715 \times 10^{-14}$ 、 $7.720 \times 10^{-2}$ 和 $4.900 \times 10^{-15}$ 、 $3.913 \times 10^{-2}$ ,该接收机直线动态定位性能优越。

### 5.3 IMU静基座试验

将IMU放置在一稳定的室内平台上进行静基座试验。待系统稳定后连续采集数据约 $10\text{ min}$ ,从曲线和统计数据来看,角速率输出信号和天向加速

度信号较为稳定,其他信号存在小增量的漂移,但对于短时测量可忽略不计。

#### 5.4 SIMS/GPS 组合试验

对组合测量实车试验 IMU 直接输出数据进行小波降噪和最小二乘支持向量回归机拟合,之后进行融合。图 5 是试验轨迹曲线,图 6 是相关速度曲线(姿态、位置、航向角等曲线省略)。从数据统计特性来看,论文采用的 SIMS/GPS 组合测量方案,可以得到高频率的汽车位置、姿态信息,滤波器工作稳定,满足了试验要求。

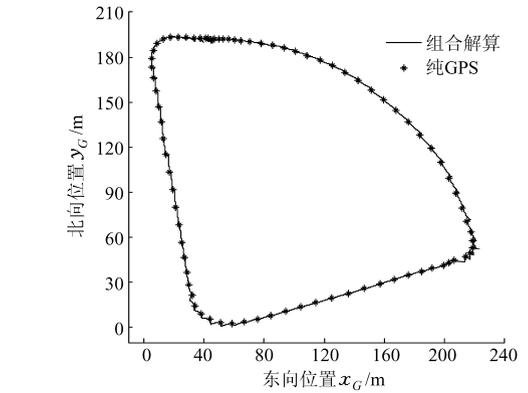
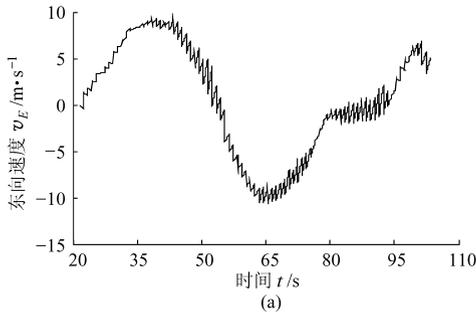


图 5 SIMS/GPS 组合测量路径曲线

Fig. 5 Path curve of Integrated SIMS/GPS test

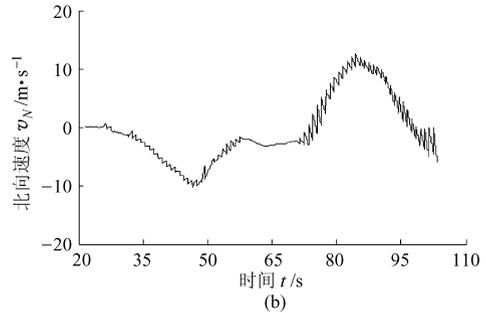


图 6 SIMS/GPS 组合测量速度曲线

Fig. 6 Velocity curves of integrated SIMS/GPS test

## 6 结束语

将 SIMS/GPS 组合测量技术应用于汽车主动安全性能道路试验系统中,并基于中低精度 SIMS 和载波相位模式差分 GPS 在位置/速度/航向角间

接反馈松散组合模式设计了线性 Kalman 滤波器,仿真和实车试验验证了该方案的可行性和可靠性。

对惯性测量单元误差模型及其参数进行整定可以进一步提高系统的测量精度。

### 参 考 文 献

- 1 张树侠,孙静. 捷联式惯性导航系统[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
- 2 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.
- 3 Hide C D, Moore T, Smith M J. Adaptive Kalman filtering algorithms for integrating GPS and low cost INS[C] // Proceedings of the IEEE Position Location and Navigation Symposium, Monterey, California, 2004:227~233.
- 4 Sage A P, Husa G W. Adaptive filtering with unknown prior statistics[C] // Proceedings of Joint Automatic Control Conference, Boulder:CO, 1969:760~769.
- 5 Mohamed A H, Schwarz K P. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS[J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(4):193~203.
- 6 Yang Yuanxi, Gao Weiguang. Comparison of adaptive factors in Kalman filters on navigation results[J]. Journal of Navigation, 2005, 58:471~478.
- 7 张小龙,张为公,周木子. 汽车 ABS 侧向稳定性道路试验评价系统研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10):1 091~1 095.  
Zhang Xiaolong, Zhang Weigong, Zhou Muzi. Research on the lateral stability evaluation system for the motor vehicle equipped with ABS by roadway test[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(10):1 091~1 095. (in Chinese)