

SINS/GPS 组合导航系统 Kalman 滤波仿真研究

Simulation of Integrated SINS/GPS Navigation System with Kalman Filtering

员丽琼 景占荣

(西北工业大学电子信息学院,陕西 西安 710082)

摘要: 为提高捷联惯导系统 SINS 和全球定位系统 GPS 的精度和可靠性,研究了 SINS 和 GPS 的原理,建立了 SINS/GPS 系统的状态方程和位置速度误差量测方程;并采用卡尔曼滤波算法实现了 SINS/GPS 的组合导航。Matlab 仿真结果证明,采用 Kalman 滤波实现 SINS/GPS 组合导航,其精度得到大大提高;且采用 SINS/GPS 组合导航系统,克服了 SINS 惯性导航难以长时间独立工作的缺点,解决了 GPS 易失锁、难以实时控制的不足,保证了导航系统的实时性及较高的精度和可靠性。

关键词: 捷联惯导系统 全球定位系统 卡尔曼滤波 Matlab SINS/GPS 组合导航

中图分类号: V249.32+8 **文献标志码:** A

Abstract: In order to enhance the accuracy and reliability of the strap-down inertial navigation system (SINS) and global positioning system (GPS), the principles of SINS and GPS are researched. The state equation of SINS/GPS and the measurement equation of the position velocity error are established; and the SINS/GPS integrated navigation is implemented by adopting Kalman filtering algorithm. The Matlab simulation result proves that this integrated navigation realized by Kalman filtering greatly enhances the accuracy. In addition, the integrated navigation system overcomes the disadvantage of SINS, i. e., hard to operate independently in long period; and solves the problems of GPS, i. e., easily unlock, and poor real-time control performance; thus the high accuracy and reliability and real-time performance of the navigation system are guaranteed.

Keywords: Strap-down inertial navigation system Global positioning system Kalman filtering Matlab SINS/GPS integrated navigation

0 引言

惯性导航定位系统 SINS(strap-down inertial navigation system)是一种不依赖任何外部信息、设施或基准,也不向外部辐射能量的自主式导航定位系统,具有很强的抗干扰能力,隐蔽性好,可以提供完备、连续且高数据更新率的导航信息,其主要缺点是存在导航定位误差,难以长时间独立工作。

全球定位系统 GPS(global positioning system),定位精度高且速度快,具有全球性和全天候的优点。但 GPS 载体在做高速动态运动时,常使 GPS 接收机不易捕获和跟踪卫星载波信号;当载体做较高机动动作时,接收机会因失锁而不能正常工作;且 GPS 接收机数据更新频率低,难以满足实时控制的要求。

SINS/GPS 组合导航既可以提高惯导系统的性能和精度,又可以提高接收机的动态特性和抗干扰性。因此,SINS/GPS 组合导航成为导航界研究的热点之一。

1 捷联惯导原理

陀螺仪和加速度计是惯性导航系统中的关键传感

器^[1],它们分别用来测量运动载体的比力和加速度。

惯性导航定位系统由加速度计、陀螺仪与惯导平台(物理的或数学的)、导航计算机、导航算法和补偿算法、控制显示器以及供电系统等组成。其基本原理是:根据相对惯性空间的力学定律,利用陀螺仪、加速度计等惯性元件记录运动体在运动过程中的加速度,然后通过计算机积分,得到运动体的位置、速度和方位等导航参数。

捷联惯导原理框图如图 1 所示。

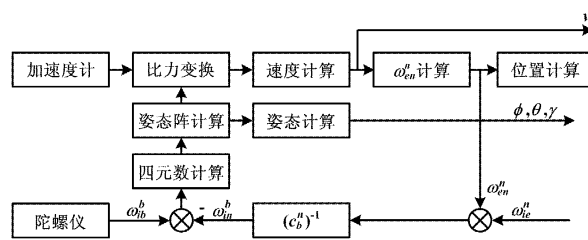


图 1 SINS 原理框图

Fig. 1 Principle of SINS

陀螺仪的输出仿真公式为:

$$\tilde{\omega}_{ib}^b = \omega_{ib}^b + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$ 为陀螺仪的测量误差。

加速度计的输出仿真公式为:

$$\tilde{a}_{ib}^b = a_{ib}^b + \nabla \quad (2)$$

式中: $\nabla = [\nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T$ 为加速度计的测量误差。

修改稿收到日期:2010-05-11。

第一作者员丽琼,女,1985年生,现为西北工业大学信号与信息处理专业在读硕士研究生;主要从事 FPGA/SINS/GPS/组合导航方面的研究。

2 GPS 导航定位基本原理

GPS 采用多星、高轨和测距体制,以距离作为基本观测量,通过对四颗卫星同时进行距离测量即可算出接收机的位置^[2-3]。GPS 观测数据的仿真根据由卫星星历计算得到的卫星位置、速度以及由各种轨迹仿真得到的接收机的位置和速度,计算出理想的星地距离和距离的变化率,加上各种 GPS 误差,得到近似真实的 GPS 原始观测数据;对观测数据进行导航求解计算,仿真出 GPS 导航输出结果。在实际仿真中,GPS 原始观测数据所含的误差将影响 GPS 定位参数的精度,其中主要考虑的误差有 GPS 接收机钟差、接收机噪声、星钟等效距离误差和星历等效距离误差等。

3 SINS/GPS 组合导航原理

3.1 组合导航原理

SINS/GPS 组合导航系统结合了 GPS 和 SINS 的优点^[4-5]。为了保证系统的实时性及较高的精度和可靠性,本文采用间接估计的组合导航 Kalman 滤波方法,即以导航参数误差作为卡尔曼滤波器的状态输入量,对捷联惯导系统进行速度和位置反馈校正。卡尔曼组合导航原理图如图 2 所示。

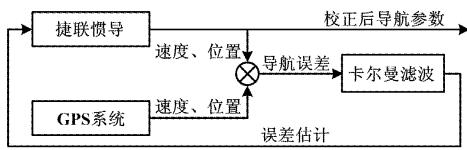


图 2 卡尔曼组合导航原理图

Fig. 2 Principle of the Kalman integrated navigation

3.2 组合导航系统模型

组合导航系统的状态方程^[6-7]和量测方程:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (3)$$

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \quad (4)$$

式中: $X(t)$ 为系统的 n 阶状态向量; $F(t)$ 为系统的 $n \times n$ 阶状态矩阵; $G(t)$ 为系统的 $n \times r$ 阶动态噪声矩阵; $W(t)$ 为系统的 r 维过程白噪声矢量; $Z(t)$ 为系统的 m 维量测矢量; $H(t)$ 为系统的 $m \times n$ 阶量测矩阵; $V(t)$ 为系统的 m 维量测噪声矢量。其中,卡尔曼滤波要求系统的白噪声矢量 $W(t)$ 和量测噪声矢量 $V(t)$ 都必须互不相关的零均值白噪声过程。状态矢量:

$$X(t) = [\varphi_e, \varphi_n, \varphi_u, \delta v_n, \delta v_e, \delta v_u, \delta \lambda, \delta L, \delta h, \varepsilon_{cx}, \varepsilon_{cy}, \varepsilon_{cz}, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T$$

式中: $\varphi_e, \varphi_n, \varphi_u, \delta v_n, \delta v_e, \delta v_u, \delta \lambda, \delta L, \delta h$ 分别为 t 时刻东、北、天方向的平台误差角、速度误差、经度误差、纬度误差和高度误差; $\varepsilon_{cx}, \varepsilon_{cy}, \varepsilon_{cz}$ 为陀螺三轴方向上的随机常值漂移; $\varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ 为陀螺一阶马尔柯夫过程漂移; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加速度误差。通过卡尔曼滤波算法对 $X(t)$

进行估计,可以校正捷联惯导的输出,提高导航精度。

由捷联惯导和 GPS 系统的速度、位置误差组合模式可得系统的量测方程为:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} \delta V_E + M_E \\ \delta V_N + M_N \\ \delta V_U + M_U \\ R_N \cos L \delta \lambda + N_E \\ R_M \delta L + N_N \\ \delta h + N_U \end{bmatrix} = H(t)X(t) + V(t) \quad (5)$$

式中: R_M 为地球参考椭圆子午圈上各点的曲率半径, $R_M = R_e(1 - 2f + 3f \sin^2 L)$; R_N 为地球参考椭圆卯酉圈上各点的曲率半径, $R_N = R_e(1 + f \sin^2 L)$,其中 $R_e = 6378137 \text{ m}$, $f = 1/298.257$; M_E, M_N, M_U 为 GPS 在东、北、天三个方向的速度误差分量; N_E, N_N, N_U 为 GPS 东、北、天三个方向的位置误差。

4 SINS/GPS 组合 Matlab 仿真结果

4.1 GPS 位置、速度误差仿真结果

由式(3)~(4)建立的组合导航状态方程和量测方程^[8],经 Matlab 仿真所得曲线如图 3~4 所示。

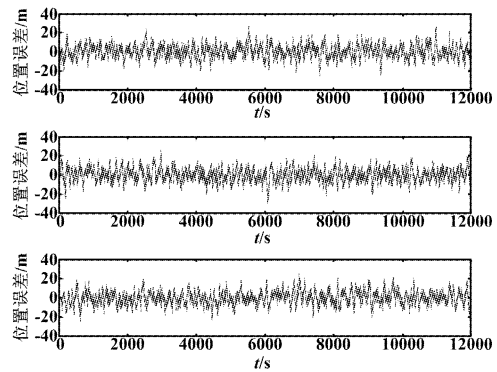


图 3 GPS 东、北、天方向位置误差曲线

Fig. 3 GPS position error curves

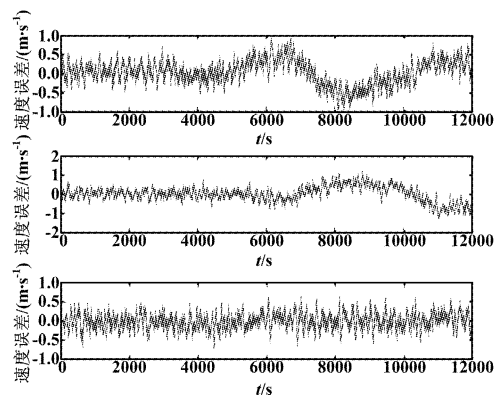


图 4 GPS 东、北、天方向速度误差曲线

Fig. 4 GPS speed error curves

(下转第 72 页)

数据采集系统,对等离子体进行等离子体特性测量采集,所得数据经计算机处理后如图6所示。

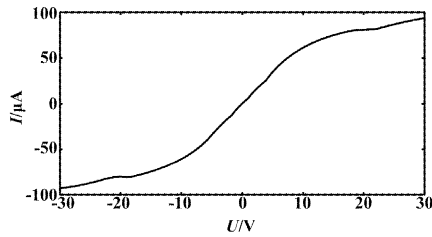


图6 等离子体 I-V 特性测量结果

Fig.6 Result of measurement for plasma I-V characteristics

由图6可以直接获得饱和离子电流 I_{i01} 和 I_{i02} 以及探针电流为零时的 I-V 曲线斜率。利用测得数据,再根据式(1)和式(2),即可进一步得到相应的等离子体的电子温度及离子密度,即:

$$T_e = \frac{e}{2k} \frac{I_{i0}}{\left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_{I_D=0}} \quad (1)$$

$$N_i = \frac{I_{i0}}{\alpha e Z \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i} A_s}} \quad (2)$$

式中: e 为电子电量; k 为玻尔兹曼常数; α 为介于0.4~1的常数; Z 为放电气体的核电荷数; m_i 为放电气体的质量; A_s 为探针表面积; I_{i0} 为双探针的饱和离子电流; I_D 为探针电流; V_D 为探针电压。

(上接第68页)

由图3、图4可知,GPS东、北、天方向量测误差均方差均为30m,仿真时间为12000s。

4.2 SINS/GPS 组合导航仿真结果

SINS/GPS 组合导航滤波并进行位置、速度误差仿真。由仿真结果可知,采用SINS和GPS单独进行导航时,其位置误差随时间积累不断增大;组合校正后的位置误差精度明显提高,且比较稳定,充分证明了该仿真方法的有效性、正确性和合理性。

5 结束语

本文采用Kalman滤波技术确定了组合导航系统的基本模型,并利用Matlab对SINS/GPS组合导航系统位置、速度误差进行了仿真分析,结果表明,基于卡尔曼滤波的组合导航系统可以有效地削减捷联惯导系统的误差累积,提高导航精度,系统的稳定性较好。

5 结束语

以ARM和FPGA为核心,设计了一个双通道高速同步数据采集系统,实现了双通道数据的同步采集传输。利用此系统,可以方便地测量等离子体的I-V特性,消除了因手动测量时间因素而造成测量结果的误差,并减少了大量测量数据带来的工作量,提高了实验效率。该系统已初步在介质管等离子体物理特性测量中得到应用;且此平台设计经过移植,完全可以成为其他领域可靠的数据采集平台。

参考文献

- [1] 项志遵,俞昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982:27-36.
- [2] 李亚磊,邓新绿,徐军,等. 高信噪比Langmuir探针系统[J]. 核聚变与等离子体物理,2006,26(4):306-309.
- [3] 黄新财,佃松宜,汪道辉. 基于FPGA的高速连续数据采集系统的设计[J]. 微计算机信息(测控自动化),2005,21(2):58-59.
- [4] 张健,刘光斌. 多通道测试数据采集处理系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2005,13(10):1143-1145.
- [5] 曹建军,陈小勤,吴超,等. 基于USB2.0的数据采集卡的设计与实现[J]. 仪器仪表用户,2006,13(1):37-38.
- [6] 渠海青,孙艳萍,朱正伟. 数字示波器中超高速度数据采集系统的设计[J]. 自动化仪表,2009,30(11):67-69.
- [7] 周立功. ARM嵌入式系统基础教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.

参考文献

- [1] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004:2-21.
- [2] 赵林,捷联惯导及其组合导航研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.
- [3] 吴太旗,孙付平,易维勇,等. GPS/INS组合导航系统的Matlab/Simulink仿真[J]. 测绘学院学报,2004,21(3):1-3.
- [4] 张帅勇. 基于MIMU的捷联惯导/GPS组合导航系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [5] 常明飞. GPS/SINS组合导航系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [6] 张浩. SINS/GPS组合导航系统滤波算法研究及工程实现[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [7] 於二军. 简易SINS/GPS组合导航系统应用技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [8] 付梦印,邓志红,张继. Kalman滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社,2003:51-126.
- [9] Shin E H,Sheimy N E. Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications [C] // Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, 2002:146-157.