

GPS 信号自适应抗干扰系统^①

杨富玉 南敬昌 (辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 针对 GPS 卫星信号易受干扰, 不稳定的问题, 提出 INS/GPS 组合导航抗干扰的方法并用硬件电路进行实现验证。给出了惯性器件的误差模型, 采用松散组合方式, 设计卡尔曼滤波器, 取姿态、速度、位置的误差作为状态变量。提出以 INS 与 GPS 输出的东北天向速度误差作为滤波器观测量的方案。通过计算机的仿真和实验验证, 对系统的精度进行了分析, 证明该方案是可行的, 实现实时滤波计算, 并能满足导航的精度要求。

关键词: 抗干扰 组合导航 卡尔曼滤波

Adaptive Anti-Interference of GPS

YANG Fu-Yu, NAN Jing-Chang

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In order to resolve the problems of easily interfered and unstable GPS signal, this paper puts forward the INS/GPS integrated navigation method and uses hardware circuit to verify the method. With given INS error model, it designs Kalman filter based on INS/GPS integrated navigation system, which takes posture, speed and position error as state variables. The paper takes east, north and vertical direction velocity error of INS and GPS outputs as the combination filter observation scheme. It uses simulation and experiments to analyze system precision and prove that this scheme is feasible. Then it can also realize the real-time filtering calculation, and meet the demand of navigation accuracy.

Keywords: anti-interference; INS; GPS; integrated navigation; kalman filter

1 引言

全球定位系统(GPS)以其全球性、全天候、低成本、高精度且误差随时间不积累等优点成为目前应用最广泛的一种导航系统,但是 GPS 存在信号容易受干扰、动态性能差、输出频率低等不足。惯性导航系统(INS)作为一种完全自主、不与外界发生光电联系的导航系统,具有良好的隐蔽性、强抗干扰性、高机动和完整的导航信息等优点。INS 的主要缺点是误差随时间积累增长和每次使用前需要进行初始对准。对比分析 GPS 和 INS 各自的优缺点,可知二者具有天然的、完美的互补性质,这使 INS/GPS 组合导航成为导航领域的一大热点。

INS/GPS 组合导航系统是以惯性导航系统为基础,并且惯性导航系统辅助 GPS 系统为目的的组合导航系统。用 GPS 接收机的高精度定位信息通过组合卡尔曼滤波器来标定和补偿惯性导航系统的积累误差,提高导航精度。同时,利用惯性导航系统的速度和加速度信息对 GPS 接收机进行速度辅助,以提高 GPS 接收机的抗干扰能力和动态性能。其性能、成本和体积均能满足各种运载器的导航精度要求。利用两种系统的冗余信息可以获得精度较高,同时鲁棒性好的组合导航系统^[1,2]。

常见的 INS 和 GPS 组合分为松散组合和紧密组

① 收稿时间:2009-04-23

合,松散组合比紧密组合精度低,但是较紧密组合易于实验验证和工程实现。本文给出了基于INS/GPS组合导航惯性器件的误差建模,设计以位置和速度为观测量的kalman滤波器,同时采用了松散组合方式的硬件电路进行实现验证。

2 组合导航的误差模型分析

2.1 GPS 误差模型

影响GPS定位精度的主要误差按其性质可分为系统误差和随机误差。对多个GPS接收机而言,许多相同或相关的系统误差已经被消除或减弱,如卫星钟差、电离层和对流层延迟、接收机钟差等。因此可以将GPS输出的速度、姿态和位置误差分量都模型化为独立的随机过程:随机常数、随机马尔柯夫过程和白噪声。一般来说,它们分别代表了安装误差、接收机噪声和多路径效应误差。

2.2 惯性导航系统误差模型

惯性系统误差包括安装误差和微惯性器件误差,安装误差可以通过标准规定采用硬件误差补偿来消除;微惯性器件的误差包括漂移误差、刻度因子误差和其他误差,其中以漂移误差为主,漂移误差又包括常值误差漂移和随机漂移^[2]。

惯性导航系统中,由于惯性测量元件(陀螺仪和加速度计)是直接安装在载体上的,所以 ε 和 ∇ 也是在INS载体坐标系下得到的物理量,而模型中的 ε 和 ∇ 是基于INS导航坐标系的物理量,应将其转换到INS导航坐标系下。故有: $\varepsilon^n = C_n^b \cdot \varepsilon^b$ 其中 b 是INS载体坐标系的标识, n 是INS导航坐标系的标识。根据大量统计规律,一般可以认为陀螺漂移误差主要由三部分组成:

$$\varepsilon^b = \omega_g + \varepsilon_c + \varepsilon_r \quad (1)$$

假定三个轴向的陀螺误差数学模型均相同,均为: $\varepsilon_c = 0$, $\varepsilon_r = -\frac{1}{T_r} \varepsilon_r + \omega_r$ 。其中 ω_g 为随机白噪声漂移; ε_c 为随机常值漂移; ε_r 为随机马尔柯夫过程漂移; T_r 为相关时间; ω_r 为白噪声。

同理,加速度计的误差模型和陀螺仪误差模型相似,但由于加速度计的随机常数和白噪声较小,通常只考虑其一阶马尔可夫过程为:

$$\nabla_a = -\frac{1}{T_a} \nabla_a + \omega_a \quad (2)$$

T_a 为相关时间; ω_a 为白噪声。

3 卡尔曼滤波器模型的建立

导航坐标系选取当地水平系为“东北天”,将惯性器件的各种误差看作系统导航参数误差,其误差状态方程^[3-5]为:

$$\dot{X}(t) = F(t) \cdot X_1(t) + G(t) \cdot W(t) \quad (3)$$

式中: $X_1(t) = [\delta v_e, \delta v_n, \delta v_v, \Phi_e, \Phi_n, \Phi_v, \delta L, \delta \lambda, \delta H, \varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T$; $\delta v_e, \delta v_n, \delta v_v$ 是速度误差沿东北天方向的投影; Φ_e, Φ_n, Φ_v 是平台误差角沿东、北、天3个轴的投影; $\delta L, \delta \lambda, \delta H$ 是纬度误差,经度误差,高度误差; $\varepsilon_e, \varepsilon_n, \varepsilon_v$ 是陀螺仪沿东、北、天三个方向的漂移误差; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 是加速度计沿东北地方向的零偏。 $W(t) = [\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz} \ \omega_{ax} \ \omega_{ay} \ \omega_{az} \ \omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz}]^T$, $W(t)$ 为系统得激励噪声, $G(t)$ 为系统的噪声阵。状态转移矩阵:

$$F(t) = \begin{bmatrix} C_b^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{9 \times 3} & 0_{9 \times 3} & 0_{9 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设 $W(t)$ 是均值为0,方差为 Q 的高斯白噪声。量测方程:

$$Z = HX + V \quad (5)$$

用INS的加速度计的水平输出误差作为测量值。所谓水平速度观测值就是把惯性导航系统输出的水平速度和GPS提供的速度的差值作为观测量。假设惯性导航系统的水平速度,则天向速度为 $v_v = 0$; $v_{ie} - v_{re} = \delta v_{ie}$, $v_{in} - v_{rn} = \delta v_{in}$; GPS输出的速度: $v_e - v_{re} = \delta v_e$; $v_n - v_{rn} = \delta v_n$ 。其中, v_{ie} 和 v_{in} 是惯性导航系统输出的东向和北向速度; v_{re} 和 v_{rn} 为真实的速度; δv_{ie} 和 δv_{in} 是系统沿坐标系东向和北向的速度误差; v_e 和 v_n 是GPS提供的东向和北向的速度; δv_e 和 δv_n 为GPS沿东向和北向的速度误差。则:

$$Z = [L_i - L_g \ \lambda_i - \lambda_g \ h_i - h_g \ v_{in} - v_{gn} \ v_{ie} - v_{ge}]^T = H(t)X_1(t) + V(t) \quad (6)$$

$$H_v(t) = [0_{3 \times 3} \ \text{diag}[1 \ 1 \ 1] \ 0_{3 \times 12}] \quad (7)$$

$$H_p(t) = [0_{3 \times 6} \ \text{diag}[1 \ 1 \ 1] \ 0_{3 \times 12}] \quad (8)$$

$$H(t) = [H_p(t) \ H_v(t)]^T \quad (9)$$

其中，下标 *i* 和 *g* 代表 INS 和 GPS；*V(t)* 是速度量测噪声，假设其均值为 0，方差为 *R* 的高斯白噪声，且与 *W(t)* 无关。完成 Kalman 滤波器的设计。

4 系统构成

系统的构成包括硬件构成和软件构成，INS/GPS 组合导航的硬件构成如图 1 所示：

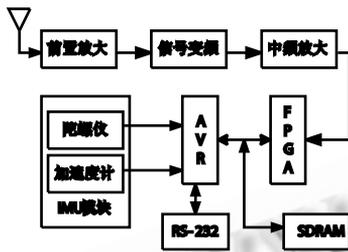


图 1 INS/GPS 组合导航系统硬件结构

INS/GPS 主要由四部分构成：惯性 (IMU) 测量模块，由三个陀螺仪、一个三轴的加速度计和模数转换电路构成；GPS 接收机模块，由前置放大、信号变频、中频解调组成；中央控制模块，采用 FPGA+AVR 单片机+SRAM 组合模式；传输模块，通过 RS-232 串口连接外扩设备。

系统的软件构成主要有：IMU 导航结算程序，由 IMU 惯性导航器件中加速度计和陀螺仪测量的比力和角速度信息来结算位置、速度和姿态；GPS 信号处理，即接收 GPS 信号，并对其进行降噪和变频处理；Kalman 滤波程序，对 IMU 和 GPS 的位置和速度进行滤波。

5 仿真分析

仿真过程中，IMU/GPS 组合导航系统在仿真时间为 12000s，陀螺随机常值漂移为 0.04°/h，加速度计的漂移误差为 ±0.001g，速度误差为 0.5m/s。初始姿态角误差为 3°，经度为 λ=120°38'，纬度为 L=40°56'。GPS 东北天向测量均方差均为 30m。INS/GPS 组合导航经过 kalman 滤波的条件下得到输出校正仿真结果如图 2 所示。

其位置误差统计结果：东向位置均方差 6.80m；北向位置误差均方差 6.75m；天向位置均方差 6.95m；速度误差统计结果：东向速度均方差 0.31m/s；北向速度误差均方差 0.39m/s；天向速

度均方差 0.20m/s。

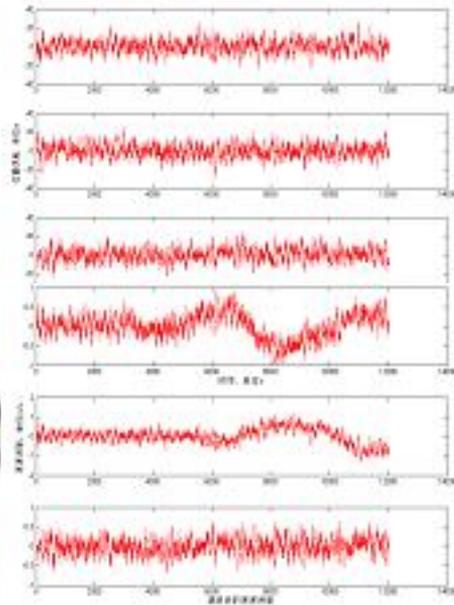


图 2 IMU/GPS 组合导航滤波后的位置、速度误差

6 结论

根据上述的仿真结果，得到如下结论：通过分析，在存在干扰的情况下，INS 和 GPS 能够取长补短，做到可靠性高，精度高；若在 GPS 受到干扰，信号失准的情况下，依然能够满足导航的要求；组合导航的精度与各子系统的精度有关；本文研究的组合导航算法，在 FPGA+AVR 为控制中心的硬件电路验证中可达到预期的效果，是一种低成本的、行之有效的抗干扰方案。

参考文献

- 1 秦永元,汪淑华.卡尔曼滤波与组合导航原理.西安:西北工业大学出版社,2004.4-9.
- 2 胡小平.自主导航理论与应用.长沙:国防科技大学出版社,2002.18-34.
- 3 许国珍,吴美平.低成本 MIMU/GPS 组合导航的研究.计算机仿真,2008,28(10):69-72.
- 4 Wendel J, Meister O, Schaile C, Trommer C. An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system. Aerospace Science and Technology, May, 2006.
- 5 Lim YC, Lyou J. An error compensation method for Transfer Alignment. Proc. of the IEEE Conference on Electrical and Electronic Technology. TENCON, 2001, 2:850-855.