

INS/GNSS 组合导航系统中高度阻尼问题的研究

张景伟, 任思聪, 谭敏琦

(西北工业大学 自动控制系, 陕西 西安 710072)

摘要:INS/GNSS 组合导航系统是目前组合导航中的主要系统之一,而高度阻尼是其中的一个重要问题。由于惯性系统的高度通道是不稳定的,必须引入气压高度表或大气数据中心等外部高度信息进行阻尼。本文通过对捷联惯性导航系统及 INS/GNSS 组合系统进行 Monte - carlo 仿真,研究在捷联系统如何设计高度阻尼网络及网络中参数的选取方法,以及该网络在组合系统的卡尔曼滤波中如何处理,并给出实际的仿真结果。

关键词:INS;GNSS;高度阻尼;卡尔曼滤波

中图分类号:TN967.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009 - 3516(2003)06 - 0037 - 03

在 INS/GNSS 组合导航系统中,处理高度通道的不稳定性是一个值得研究和探讨的问题,我们通过对捷联惯导系统和 INS/GNSS 组合导航系统的理论和算法进行研究,提出了一种新的思路,即在进行捷联解算时采用高度阻尼网络进行阻尼,同时将该阻尼网络的状态参量作为组合导航卡尔曼滤波的状态参量进行滤波,相当于在高度通道又进行了二次阻尼。尽管 INS/GNSS 组合卡尔曼滤波本身相当于对高度进行了阻尼,但是,考虑到系统容错性要求,上述方案是必要和可行的。

1 捷联惯导系统的高度阻尼网络设计及仿真

捷联惯导系统的高度通道原理如图 1 所示。

从图中可以看出高度通道为正反馈,所以通道不稳定,其特征方程为

$$(s^2 - \frac{2g_0}{R}) = (s + \sqrt{\frac{2g_0}{R}})(s - \frac{2g_0}{R}) = 0 \quad (1)$$

特征方程有一个正根 $s = \sqrt{\frac{2g_0}{R}}$,所以高度通道误差传

播具有成指数增长的误差分量,捷联解算时高度通道将迅速发散。如果不进行高度通道的阻尼,若初始高度误差为 1 m,1 h 后,高度通道误差将达到 10 000 m 的量级。

基于以上原因,可采用气压高度表和大气数据中心的高度信息 h_B 进行高度阻尼。设计以下 3 阶阻尼网络(原理见图 2),其状态方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{h} \\ \dot{h} \\ \dot{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -K_1 & 1 - K_1 K_4 & 0 \\ K_2 + 2\omega_s^2 & -K_2 K_4 & -1 \\ K_3 & K_3 K_3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \dot{h} \\ A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ -K_3 \end{pmatrix} h_B + \begin{pmatrix} 0 \\ f_i^e - a_{z,B} - g_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: ω_s 为舒勒频率, $\omega_s^2 = \frac{g}{R}$

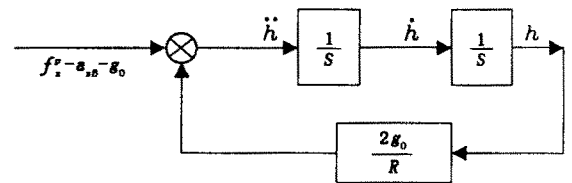


图 1 惯导系统高度通道原理框图

收稿日期:2003 - 06 - 17

基金项目:总装“十五”科研基金资助项目

作者简介:张景伟(1970 -),男,山东龙口人,讲师,博士生,主要从事多传感器组合导航理论及地理信息系统研究;
任思聪(1929 -),男,甘肃临洮人,教授,博士生导师,主要从事惯性导航技术研究。

f_z 为惯导输出比力在导航坐标系 Z 轴的分量

而 $a_{zB} = -(2\omega_{ie}C_{23} + \omega_{epz}^p)V_x^p + (2\omega_{ie}C_{13} + \omega_{epx}^p)V_y^p$, 式中 C_{23} 、 C_{13} 为位置矩阵的相应值。

对式(2)进行拉氏变换, 求出系统特征方程, 取 K_4 为 0.5 ~ 0.8, K_1, K_2, K_3 按等根条件设计, 得到:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{-2\omega_{ie}^2 K_4 \tau^3 + 3\tau^2 - 3K_4 \tau + K_4^2}{(1 - 2\omega_{ie}^2 K_4^2) \tau^3} \\ K_2 = \frac{2\omega_{ie}^2 (\tau^3 - 3K_4 \tau^2) + 3\tau - K_4}{(1 - 2\omega_{ie}^2 K_4^2) \tau^3} \\ K_3 = \frac{1}{\tau^3} \end{cases} \quad (3)$$

式中 τ 为特征方程的根。

适当选取 K_4, τ 即可确定网络的参数。参数选取的原则是使网络经过短时间的震荡即可使响应系统的变化达到稳态, 通过仿真可以确定 $K_4 = 0.5, \tau = 2.4$ 。

通过对捷联系统的仿真, 并在高度通道引入上述阻尼网络, 可以检验阻尼的效果。本文通过自行设计的飞行航迹产生器产生飞行轨迹, 给出惯性器件及气压高度表的标准输出, 并将实际测得的误差模型加到惯性器件及气压高度表的标准输出上作为实际输出值, 然后进行捷联解算。

本仿真的飞行轨迹为螺旋上升的曲线, 初始位置: 经度为 $108^\circ 54' 35.711''$, 纬度为 $34^\circ 14' 12.645''$, 高度为 388.0 m, 飞机横滚角为 2° , 飞行半径为 10 km, 上升螺距为 20 m。捷联解算频率为 128 Hz, 气压高度表的误差模型为一阶马尔可夫过程, 强度为 100, $\alpha = 0.002$ 。捷联解算中采用四元数对捷联矩阵进行即时修正, 微分方程的数值积分算法没有采用传统的欧拉法或龙格-库塔法, 而是采用毕卡法。

仿真时间为 3 600 s, 即进行捷联解算的次数为 $n = 3\ 600 \times 128 = 460\ 800$ 次, 高度通道的仿真结果如图 3、图 4 所示。

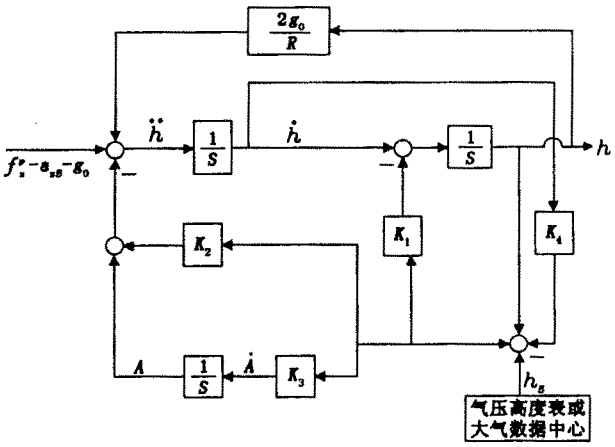


图 2 3 阶高度阻尼网络原理图

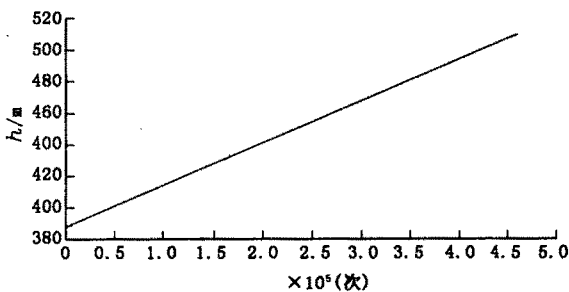


图 3 标准高度航迹

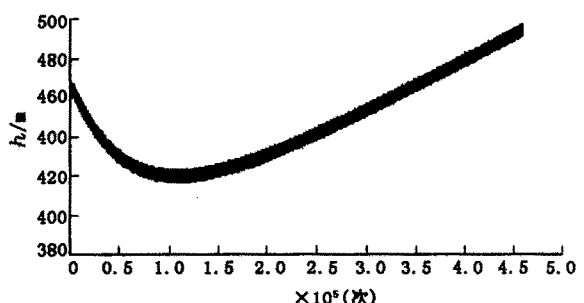


图 4 捷联解算高度通道仿真结果

2 INS/GNSS 中的高度通道方案设计及仿真

在 INS/GNSS 组合系统的卡尔曼滤波器设计中, 利用 GNSS 的高度信息, 并将上面捷联解算中 3 阶高度阻尼网络的状态参量作为滤波器的状态参量进行估计。INS/GNSS 组合系统原理及仿真框图如图 5 所示^[1-2]。

滤波器的状态参量为 26 维:

$$\delta X = (\delta\varphi \quad \delta\lambda \quad \delta h \quad \delta V_E \quad \delta V_N \quad \delta V_U \quad \delta A \quad \delta h_B \quad \phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad K_x \quad K_y \quad K_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \delta\varphi_\eta \quad \delta\lambda_\eta \quad \delta h_\eta \quad \delta V_{E\eta} \quad \delta V_{N\eta} \quad \delta V_{U\eta})^T$$

式中:下标 E, N, U 为东、北、天地理坐标系; x, y, z 为机体坐标系; $\delta\varphi, \delta\lambda, \delta h$ 为 INS 纬度、经度、高度误差; $\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U$ 为 INS 速度计算误差; $\delta A, \delta h_B$ 为捷联解算中 3 阶高度阻尼网络的相关项; ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为平台姿态角计算误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为陀螺漂移误差; K_x, K_y, K_z 为加速度计刻度因子误差; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加速度计零位误差; $\delta\varphi_\eta, \delta\lambda_\eta, \delta h_\eta, \delta V_{E\eta}, \delta V_{N\eta}, \delta V_{U\eta}$ 为 GNSS 实测 GNSS 误差模型中的一阶马尔可夫过程^[3], 作为状态参量进行扩维。

对上面组合系统进行仿真, 航迹同前面捷联解算相同, GNSS 输出频率为 1 Hz, 滤波周期为 1 Hz。卡尔曼滤波中采用自适应滤波技术、施密特 ε 技术、“虚拟白噪声”技术、滤波重启等技术综合控制滤波发散, 高度通道的仿真结果如图 6 所示。

从上面仿真结果可以看出, 捷联解算 3 阶阻尼网络的设计和参数的选取是合适的, 误差曲线很快即趋于稳定, 而在组合系统中高度阻尼的特性主要取决于该网络特性。

可见, 通过设计 3 阶高度阻尼网络和组合系统的卡尔曼滤波器状态参量中引入高度阻尼网络中的相关项进行最优估值, 可以很好的控制高度通道的发散, 阻尼系统很快趋于稳态。

参考文献:

[1] 申功勋, 孙建军. 信息融合理论在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
 [2] 秦永元, 张洪斌, 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, 1998.
 [3] 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

(编辑: 门向生)

A Study of Altitude - damp in INS / GNSS Integrated Navigation System

ZHANG Jing - wei, REN Si - cong, TAN Min - qi

(Automation Department of Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: In inertial navigation system, the error accumulation of altitude is unsteady, so the outside information sources such as barometric altimeter, etc. should be used to damp the accumulation. In this paper, how to design a net of altitude - damper, how to determine the parameters in the net and how to deal with the net in Kalman Filter of the integrated navigation system are discussed respectively by adopting the method of Monte - Carlo emulation to imitate the strapped - down navigation system and INS / GNSS integrated navigation system. And finally the actual result of the emulation is given.

Key words: INS; GNSS; altitude - damp; Kalman filter

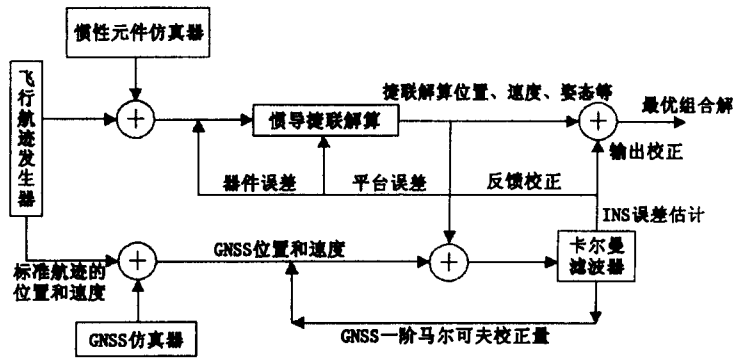


图 5 INS/GNSS 组合系统原理及仿真框图

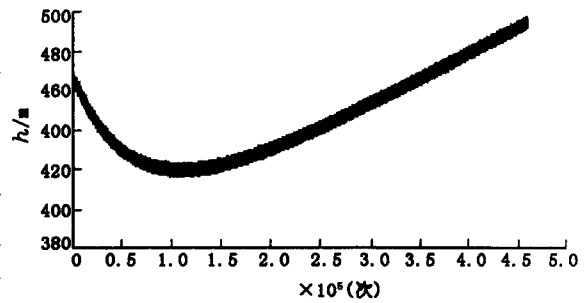


图 6 组合导航高度通道仿真结果