文章编号:1674-7070(2010)02-0133-05

联邦卡尔曼滤波在水下航行器组合导航系统中的应用

王其[1]　杨常松[1]

摘要

为了提高水下航行器的导航定位精度,设计了以捷联式惯性导航系统、地形匹配、多普勒计程仪等构成的组合导航系统,建立了各子导航系统的误差模型,采用联邦滤波技术对水下组合导航进行信息融合,建立了水下组合导航系统的观测方程并进行了计算机仿真. 仿真结果表明:使用联邦卡尔曼滤波技术进行信息融合提高了组合导航系统定位精度和定位可靠性,能满足水下航行器高精度和高可靠性的要求.

关键词

捷联式惯性导航系统;地形匹配;组合导航系统;联邦卡尔曼滤波

中图分类号 U666.1

文献标志码 A

0　引言

Introduction

随着科学技术的发展,现代战争对武器装备提出了更新、更高的要求,由于受水域作战条件的限制,使得特种部队所使用的水下航行器不能精确定位,极大地影响了作战性能和效果. 导航系统必须提供航行器长时间的精确姿态、航向、速度和位置信息,而且精确的导航能力也是水下航行器有效应用和安全回收的一个关键技术[1-2]. 受到航行器自身体积、重量、能源使用条件的限制及水介质的特殊性、军事隐蔽性等因素的影响,实现 AUV(Autonomous Underwater Vehicle,自主式水下航行器)的精确导航是一项艰难的任务.

AUV 的导航通常包括 2 类导航方式:基于外部信号的非自主导航和基于传感器的自主导航. 非自主导航方式仅在接收机能够接收到信号时完成导航,由于无线电波在水中衰减很快,基于无线电的导航方式在 AUV 上使用受到很大的限制;基于传感器的自主式导航方式依靠 AUV 自身携带的捷联式惯性导航系统、声换能器、地形匹配等手段完成导航. 国内外许多科研院所正在积极开展水下航行器导航系统的研究. 考虑到工程实际应用过程中的可用性和精度性能,本文采用 SINS(Strapdown Inertial Navigation System,捷联式惯性导航系统)、DVL(Doppler Velocity Log,多普勒导航系统)、MCP(Magnetic Compass,电子磁罗经)和 TAN(Terrain-Aided Navigation,地形匹配模块)组成小型水下航行器用组合导航系统.

1　水下组合导航系统组成

Structure of underwater integrated navigation system

1.1　捷联式惯性导航系统

捷联式惯性导航系统是把惯性测量单元(3 个陀螺仪和 3 个加速度计)直接安装在云载体上,利用惯性测量单元基准方向及初始位置信息来确定载体的姿态、航向、速度及位置信息的自主式推算导航系统. 捷联式惯性导航系统原理如图 1 所示[3-4]. 捷联式惯性导航系统具有反应迅速、可靠性高、体积小、重量轻、价格便宜等优点,在许多应用方面正逐步取代平台式惯性导航系统. 本文所使用的捷联式惯性导航系统的主要传感器是由 3 个单自由度光纤陀螺仪和 3 个石英加速度计所构成的惯性测量单元.

收稿日期 2010-01-29

资助项目 南京信息工程大学科研基金(2009)

作者简介

王其,男,博士,讲师,主要研究精密气象仪器及导航、制导与控制. wangqi@nuist.edu.cn

1　南京信息工程大学　信息与控制学院,南京,210044

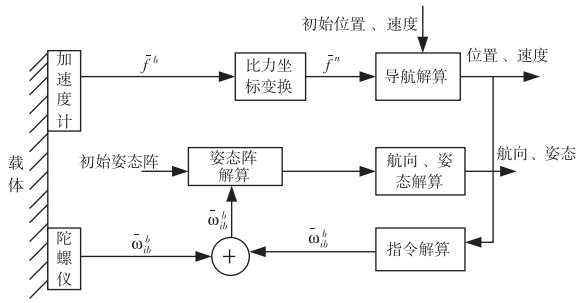


图 1　捷联式惯性导航系统原理

Fig. 1　Block diagram of strapdown inertial navigation system

1.2　电子磁罗经

由于导航算法中要求较高的航向角采样率,因此电子磁罗经的选用原则是精度高和数据更新率高;同时,作为水下工作的装置,必须具有较高的抗干扰性. 基于以上因素的考虑,本文选用美国 KVH 公司的 C100 型电子磁罗经,如图 2 所示[5].



图 2　KVH C100 电子磁罗经

Fig. 2　Magnetic compass of KVH C100

KVH C100 具有体积小、价格低、性能稳定可靠等优点,它内置自动校准软件,可以提供因磁场变化而引起的误差的修正. 电子磁罗经内部的三轴混合磁阻由 3 个相互独立的磁阻传感器组成,可以分别测量三维空间中 3 个相互垂直方向的磁场,探测范围为 $30\times10^{-6}\sim2\ g$(g 为重力加速度). 电子磁罗经内部的 CPU 经过对传感器测量信号进行 AD 采样,数据处理及误差补偿,最后通过 RS232 串口输出姿态航向数据. 内部的 CPU 控制传感器的测量时序和数据处理,所有控制 KVH C100 操作的参数存储在内部 EEPROM 内,可以保证下次启动时设置不变.

1.3　多普勒速度声纳

目前精度较高的水下多普勒测速仪普遍采用固定声波方向的四波束系统,发射的声波波束方向相对多普勒测速仪仪表坐标系的角度位置固定不变. 多普勒测速仪在航行器上安装时,测速仪的仪表坐标系与航行器载体坐标系各轴平行且方向一致,此时反映在测速仪表坐标系的速度就是航行器载体坐标系的速度. 固定发射方向的四波束多普勒速度声纳的原理如图 3 所示.

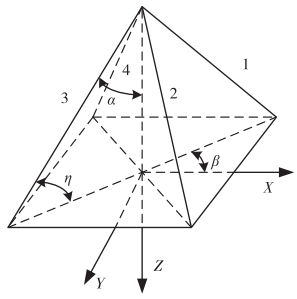


图 3　固定发射方向的四波束声纳测速原理

Fig. 3　Principle of fixed-direction four-beam sonar system

设 4 个波束对称分布且相对测速仪的仪表坐标系纵向对称面的水平偏角为 β,水平偏角为 η,$\alpha+\eta=90°$,则航行器的地速向量为:

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{V}_x i+\boldsymbol{V}_y j+\boldsymbol{V}_z k; \tag{1}$$

$$n_1=\sin\alpha\cos\beta i-\sin\alpha\sin\beta j+\cos\alpha k,$$

$$n_2=\sin\alpha\cos\beta i+\sin\alpha\sin\beta j+\cos\alpha k,$$

$$n_3=-\sin\alpha\cos\beta i+\sin\alpha\sin\beta j+\cos\alpha k,$$

$$n_4=-\sin\alpha\cos\beta i-\sin\alpha\sin\beta j+\cos\alpha k.$$

地速 $\boldsymbol{V}$ 在波束 1、2、3、4 方向上的投影为:

$$\boldsymbol{V}_1=\boldsymbol{V}\cdot n_1=\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta-\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha;$$

$$\boldsymbol{V}_2=\boldsymbol{V}\cdot n_2=\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta+\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha;$$

$$\boldsymbol{V}_3=\boldsymbol{V}\cdot n_3=-\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta+\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha;$$

$$\boldsymbol{V}_4=\boldsymbol{V}\cdot n_4=-\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta-\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha.$$

从而可以得到 4 个波束的多普勒频移分别为:

$$f_{d1}=\frac{2\boldsymbol{V}_0}{(\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta-\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha)-\boldsymbol{V}_0}f;$$

$$f_{d2}=\frac{2\boldsymbol{V}_0}{(\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta+\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha)-\boldsymbol{V}_0}f;$$

$$f_{d3}=\frac{2\boldsymbol{V}_0}{(-\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta+\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha)-\boldsymbol{V}_0}f;$$

$$f_{d4}=\frac{2\boldsymbol{V}_0}{(-\boldsymbol{V}_x\sin\alpha\cos\beta-\boldsymbol{V}_y\sin\alpha\sin\beta+\boldsymbol{V}_z\cos\alpha)-\boldsymbol{V}_0}f.$$

解上式就可以得到载体的速度.

1.4　海底地形辅助导航系统

由于水下航行器的特殊性,本文采用的地形匹配辅助导航系统如图 4 所示. 其基本构成包括 4 个部分:测深传感器、参考导航系统、数字地图数据库和数据解算装置. 高精度的海洋水深数据库、高精度的测深测潜仪和地形匹配算法是海底地形匹配的关键技术. 地形匹

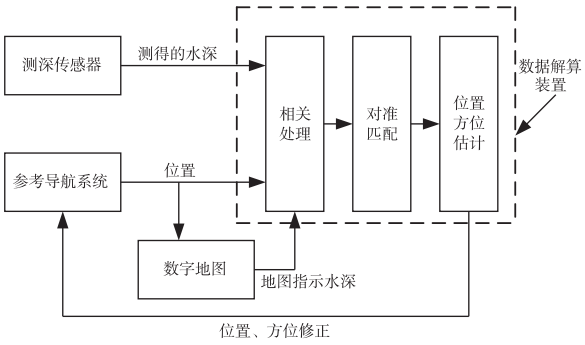


图 4　地形辅助导航系统位置匹配原理

Fig. 4　Block diagram of terrain-aided navigation system

配算法是地形辅助导航的技术核心,其本质是利用各种信息处理方法,将实时测量得到的海洋水深数据信息与海洋水深数据库中存储的水深信息进行比较,以一定的准则判断两者间的拟合度,确定最佳匹配点.

海底地形匹配主要是从电子海图中提取出来的水深数据经过插值后得到海底水深数据库,测深测潜仪实时获得水下航行器所经过区域的水深数据值,然后与存储在计算机中的水深数据库用 ICCP 算法进行匹配,得到的匹配位置信息传送给联邦滤波器进行信息融合.

2　导航系统联邦卡尔曼滤波器

Federated Kalman filter for navigation system

水下组合导航系统的联邦滤波器由捷联式惯性导航系统、地形辅助导航系统、多普勒测速仪和磁罗经构成,以捷联式惯性导航系统作为公共参考系统,共有 3 个子滤波器,分别为与地形辅助导航系统构成的位置子滤波器,与多普勒计程仪构成的速度子滤波器和与电子磁罗经构成的航向姿态子滤波器. 为了增强系统的容错性能,采用的联邦滤波器结构如图 5 所示[6-7].

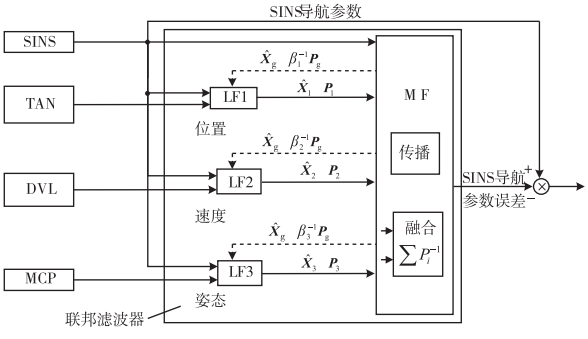


图 5　AUV 组合导航系统联邦滤波器结构

Fig. 5　Block Diagram of federated filtering for AUV integrated navigation

2.1　SINS/TAN 位置子滤波器

SINS/TAN 位置子滤波器进行位置融合,将两者位置量测量之差作为量测值.

以惯导误差状态变量和 TAN 误差状态变量合并而成 SINS/TAN 位置子滤波器的状态矢量,捷联式惯性导航系统状态为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} = \begin{bmatrix} \delta V_{\mathrm{E}} & \delta V_{\mathrm{N}} & \delta V_{\mathrm{U}} & \delta\phi & \delta\theta & \delta\gamma & \delta L & \delta\lambda \\ \delta h & \nabla_x & \nabla_y & \nabla_z & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \end{bmatrix}.$$

地形匹配模块状态为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \delta L & \delta\lambda \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{X}_{\mathrm{ST}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} & \boldsymbol{X}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

该子滤波器的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{S}} \\ \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\mathrm{S}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

即

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{ST}} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{ST}} \boldsymbol{X}_{\mathrm{ST}} + \boldsymbol{W}_{\mathrm{ST}}. \tag{3}$$

定义位置测量向量为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{p}} = \begin{bmatrix} L_{\mathrm{S}} - L_{\mathrm{T}} \\ \lambda_{\mathrm{S}} - \lambda_{\mathrm{T}} \\ h_{\mathrm{S}} - h_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta L - \delta L_{\mathrm{T}} + w_{\mathrm{IT1}} \\ \delta\lambda - \delta\lambda_{\mathrm{T}} + w_{\mathrm{IT2}} \\ \delta h - \delta h_{\mathrm{T}} + w_{\mathrm{IT3}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & -1 & 0 & 0 \\ \boldsymbol{0}_{3\times6} & 0 & 1 & 0 & \boldsymbol{0}_{3\times6} & 0 & -1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}_{3\times18} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{\mathrm{IT1}} \\ w_{\mathrm{IT2}} \\ w_{\mathrm{IT3}} \end{bmatrix} \triangleq$$

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} + \boldsymbol{V}_{\mathrm{p}}. \tag{4}$$

其中:

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & -1 & 0 & 0 \\ \boldsymbol{0}_{3\times6} & 0 & 1 & 0 & \boldsymbol{0}_{3\times6} & 0 & -1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}_{3\times18};$$

$\boldsymbol{V}_{\mathrm{p}} = \begin{bmatrix} w_{\mathrm{IT1}} \\ w_{\mathrm{IT2}} \\ w_{\mathrm{IT3}} \end{bmatrix}$, 为量测白噪声.

2.2　SINS/DVL 速度子滤波器

以惯导误差状态变量和 DVL 误差状态变量合并成 SINS/DVL 速度子滤波器的状态矢量,其中:

$\boldsymbol{X}_{\mathrm{S}}$同上; $\boldsymbol{X}_d = \begin{bmatrix} \delta v_{\mathrm{d},x} & \delta v_{\mathrm{d},y} & \delta K_x & \delta K_y \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$;

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{SD}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} & \boldsymbol{X}_{\mathrm{d}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

则该子滤波器的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{S}} \\ \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\mathrm{S}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F}_{\mathrm{d}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{d}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{d}} \end{bmatrix},$$

即

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{SD}} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{SD}} \boldsymbol{X}_{\mathrm{SD}} + \boldsymbol{W}_{\mathrm{SD}}. \tag{5}$$

SINS/DVL 子滤波器以 SINS 与 DVL 的所测量速度差值作为观测量.

定义速度量测矢量为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{SD}} = \begin{bmatrix} v_{\mathrm{DE}} - v_{\mathrm{SE}} \\ v_{\mathrm{DN}} - v_{\mathrm{SN}} \end{bmatrix} \triangleq \boldsymbol{H}_{\mathrm{SD}} \boldsymbol{X}_{\mathrm{SD}} + \boldsymbol{V}_{\mathrm{SD}}. \tag{6}$$

式(6)中,$\boldsymbol{V}_{\mathrm{ID}} = \begin{bmatrix} \eta_{\mathrm{E}} & \eta_{\mathrm{N}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$,为量测白噪声.

2.3 SINS/MCP 姿态子滤波器

MCP 测姿相关性较弱,可以认为 MCP 测姿误差为白噪声. 所以 SINS/MCP 姿态组合子滤波器状态方程为惯导误差状态方程.

定义姿态角测量向量为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{K}} = \begin{bmatrix} \psi_{\mathrm{E_S}} - \psi_{\mathrm{E_{MCP}}} \\ \psi_{\mathrm{N_S}} - \psi_{\mathrm{N_{MCP}}} \\ \psi_{\mathrm{U_S}} - \psi_{\mathrm{U_{MCP}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{\mathrm{E}} - m_{\psi_{\mathrm{E}}} \\ \varphi_{\mathrm{N}} - m_{\psi_{\mathrm{N}}} \\ \varphi_{\mathrm{U}} - m_{\psi_{\mathrm{U}}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} & 1 & 0 & 0 & \\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & 0 & 1 & 0 & \boldsymbol{0}_{3\times9} \\ & 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix}_{3\times15} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} + \begin{bmatrix} -m_{\psi_{\mathrm{E}}} \\ -m_{\psi_{\mathrm{N}}} \\ -m_{\psi_{\mathrm{U}}} \end{bmatrix} \triangleq$$

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{K}} \boldsymbol{X}_{\mathrm{S}} + \boldsymbol{V}_{\mathrm{K}} \tag{7}$$

式(7)中:$\boldsymbol{H}_{\mathrm{K}} = \begin{bmatrix} & 1 & 0 & 0 & \\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & 0 & 1 & 0 & \boldsymbol{0}_{3\times9} \\ & 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix}_{3\times15}$,为量测矩阵;$\boldsymbol{V}_{\mathrm{K}} = \begin{bmatrix} -m_{\psi_{\mathrm{E}}} \\ -m_{\psi_{\mathrm{N}}} \\ -m_{\psi_{\mathrm{U}}} \end{bmatrix}$,为 MCP 测姿白噪声.

式(7)即为 SINS 与 MCP 进行姿态组合时的量测方程.

3 仿真实验
Simulation experiments

对以上设计的组合导航联邦滤波器进行了 1 h 的计算机仿真实验. 仿真分析在一般海情下进行,模拟水下航行器以 45°做匀速直线运动,航速 4 kn,横摇幅度为 9°,周期为 8 s;航向幅度为 12°,周期为 10 s;纵摇幅度为 14°,周期为 6 s;初始相位均为零,姿态更新周期为 10 ms. 航行器初始位置为东经 165°,北纬 32°. 陀螺常值飘逸为 1°/h,陀螺随机漂移为 1°/h;加速度计常值偏置为 $50\times10^{-6}g$,加速度计随机偏置为 $50\times10^{-6}g$;多普勒速度计程仪误差 0.4 m/s,地形辅助导航系统导航定位经度优于 100 m,电子磁罗经航向经度 0.5°,横摇角和纵摇角误差为 0.2°. 仿真误差曲线见图 6.

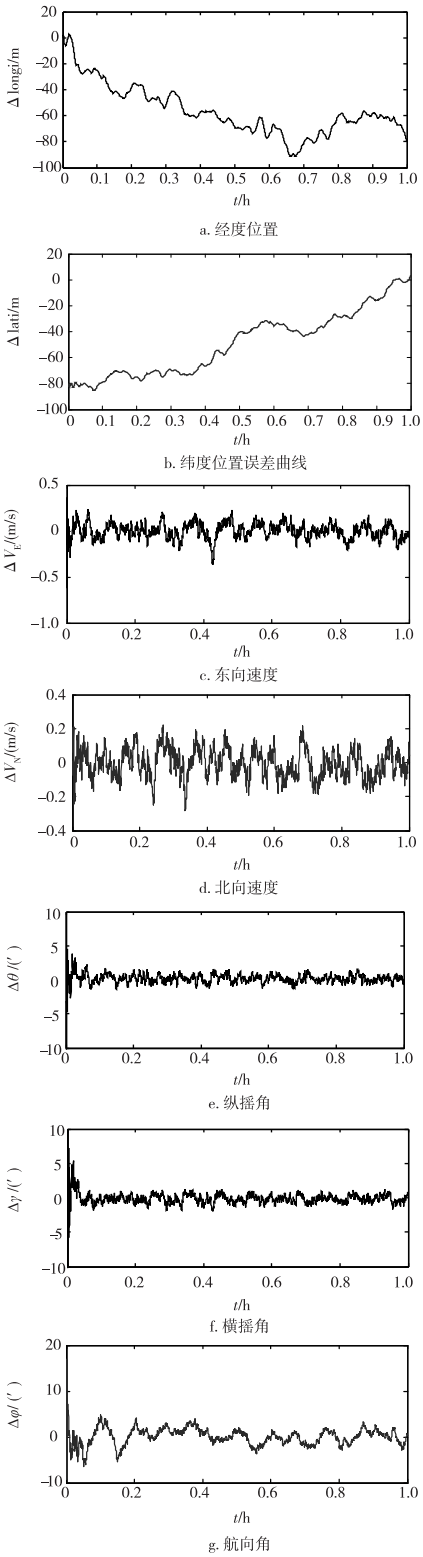


图 6 仿真误差曲线

Fig. 6 Error curve

由图 6 可以看出,联邦卡尔曼滤波器可以有效地融合各导航传感器的导航信息,可以使水下航行器的位置误差控制在 200 m 左右、速度误差不超过 0.5 m/s,提高了系统可靠性和可用性.

4 结论
Conclusion

采用捷联式惯性导航系统为水下航行器的参考导航系统,分别与地形辅助导航系统、多普勒计程仪和电子磁罗经组成子滤波器,采用联邦卡尔曼滤波进行信息融合,仿真实验表明:系统具有良好的滤波精度,同时具有更好的跟踪能力和误差纠正能力,抗干扰能力强,显著减少了噪声的干扰对滤波器误差特性的影响,提高了系统的可靠性和可用性,

参考文献
References

[1] 李佩娟,徐晓苏,张涛. 信息融合技术在水下组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(3):344-349
LI Peijuan, XU Xiaosu, ZHANG Tao. Application of information fusion to integrated navigation system of underwater vechile[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2009,17(3):344-349

[2] WANG Qi, XU Xiaosu. SINS/GPS integrated navigation for autonomous underwater vehicle with wavelet package analysis and neural networks[C]// Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing,2007:1028-1033

[3] DUAN Shimei, KANG Fengju, FU Yanfang, et al. An improved federated filtering method for integrated navigation system of autonomous underwater vehicle[C]//2008 Asia Simulation Conference-7th Intl Conf on Sys Simulation and Scientific Computing, IEEE,2008:748-751

[4] Carlson N A. Federated filter for fault-tolerant integrated navigation systems[J]. IEEE Position Location and Navigation Symposium,1988:110-119

[5] Carlson N A, Berarducci M P. Federated Kalman filter simulation results[J]. Navigation,1994,41(3):297-321

[6] Broatch S A, Henley A J. An integrated navigation system manager using federated Kalman filtering[C]// Proceedings of the IEEE 1991 National Aerospace and Electronics Conference, 1991: 422-426

[7] Hartman R, Hawkinson W, Sweeney K. Tactical underwater navigation system position[C]// IEEE Location and Navigation Symposium,2008:898-911

Application of federated Kalman filter to integrated navigation system of small autonomous underwater vehicle

WANG Qi[1] YANG Changsong[1]

1 School of Information and Control technologies, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract To improve the position precision of underwater vehicle, an integrated navigation system is proposed, which is composed of strapdown inertial navigation system, terrain-aided navigation system, Doppler navigation system. Error models of navigation systems are proposed and federated Kalman filter is adopted in the information fusion. Simulation experiments were carried out according to the measurement equations. Simulation experiments show that federated Kalman filter can improve the precision and stability of the navigation system, and satisfy the navigation requirements.

Key words strapdown inertial navigation system; terrain-aided navigation; integrated navigation system; federated Kalman filter