

李栋¹ 王其² 刘成淦² 朱哲夫²

捷联/天文/多普勒组合导航技术在舰船导航中的应用

摘要

为了提高舰船组合导航精度与可靠性,针对其特殊应用场合,将天文导航系统提供的位置和姿态信息、多普勒速度声纳提供的舰船速度信息与捷联导航系统进行信息融合,分析了捷联惯性导航系统、天文导航系统和多普勒导航系统的原理,分别建立了组合导航系统信息融合状态方程和量测方程,并对组合导航系统进行了系统仿真实验,实验结果表明,模糊自适应 Kalman 滤波器收敛速度快,具有一定的容错能力,在天文辅助捷联组合导航系统中可以有效地提高水面舰船组合导航系统的精度。

关键词

天文导航;捷联惯导;组合导航;信息融合

中图分类号 U666.11

文献标志码 A

收稿日期 2014-04-05

资助项目 2013 年国家级大学生创新创业训练计划项目(201310300048, N1885013311);江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放课题(KDXS1304);江苏省中小企业气象传感器产业公共技术服务平台开放课题(KXKS1302);南京信息工程大学教改项目(N1885013180);南京信息工程大学实验室开放项目(N1081005108);滨江学院优秀本科毕业论文(设计)支持计划

作者简介

李栋,男,主要从事光电测量与精密仪器研究工作。

王其(通信作者),男,博士,主要从事飞行器导航、制导与控制技术的研究工作。

wangqiseu@163.com

1 常熟理工学院 物理与电子工程学院,苏州,215500

2 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

0 引言

导航定位技术是水面舰船所面临的技术挑战之一。导航系统必须提供远距离及长时间的高精度位置、速度和姿态信息。精确导航技术是水面舰船有效作业和安全利用的关键,但是受海洋环境的复杂性,舰船自身体积、质量、能源以及隐蔽性等因素的影响,实现高精度的水面舰船导航仍然是一项艰巨的任务。由于电磁波容易被监测到,不能满足隐蔽性,因而陆地上一些成熟的导航方法在舰船隐蔽航行中并不适用。现有的水面舰船导航通常借助于船位航迹推算、惯性导航系统、地形匹配、地磁匹配和重力导航方法和视觉导航等^[1-3]。本文针对舰船在靠近浅水区域导航的隐蔽性和高精度的特点,提出一种捷联/天文/多普勒自主组合导航系统,可为水面舰船提供长时间远距离高精度的无源导航。

1 系统总体设计

惯性导航系统隐蔽性高,短时精度高,导航信息全面,可以输出加速度、速度、位置以及角速度信息,但是其导航误差随时间积累,不能独立完成长时间远距离高精度的导航任务。天文导航方法定位精度不受时间和距离长短的影响,能够提供姿态与位置信息,其短时精度受测量仪器精度的限制,不能提供速度信息。多普勒速度声纳可以提供连续的速度信息^[4-6]。针对上述导航系统特点,结合浅水海域隐蔽性和高精度导航的要求,本文提出一种 SINS(Strapdown Inertial Navigation System,捷联惯性导航系统)/CNS(Celestial Navigation System,天文导航系统)/DNS(Doppler Navigation System,多普勒导航系统)的组合导航方法。由于天文导航系统只能输出水平位置导航信息,捷联惯性导航系统在垂直方向可观测度低,垂直方向高度信息输出不稳定,所以增加测深测潜仪提供航行器垂直方向的高度信息。该方法利用各自导航系统的特点进行互补,通过天文导航不断校正捷联系统的位置和姿态航向,多普勒速度声纳系统校正捷联系统的速度信息,测深测潜仪提供高度方向的信息,提高了导航系统的长时间导航精度和可靠性。

组合导航系统原理如图 1 所示。

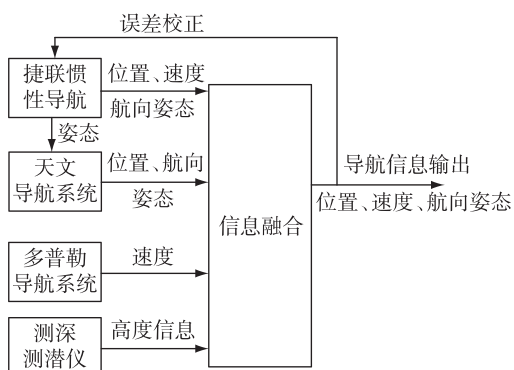


图1 组合导航系统原理

Fig. 1 Schematic of integrated navigation system

1.1 捷联惯性导航系统

惯性导航系统可以分为平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统.考虑体积、能耗等方面因素,捷联式惯性导航系统更加适合小型水面舰船.捷联式惯性导航系统是把惯性测量元件(陀螺仪和加速度计)直接安装在运载体上,利用惯性测量单元基准方向及最初的位置信息来确定载体的姿态航向、速度和位置的自主式推算导航系统.捷联式导航系统具有反应时间短、可靠性高、体积小、质量轻、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.本系统中所使用的惯性测量单元由3个单自由度光纤陀螺和3个石英加速度计构成.捷联导航系统原理框图如图2所示.

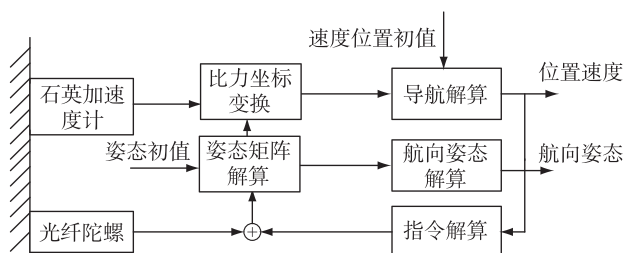


图2 捷联式惯性导航系统原理框图

Fig. 2 Schematic of strapdown inertial navigation system

捷联惯性导航系统失准角误差方程、速度误差方程以及位置误差方程为

$$\dot{f}^n = \delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n - (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times f^n - \varepsilon^p, \quad (1)$$

$$\delta\dot{V}^n = f^n \times \varphi^n + \nabla^p - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times \dot{V}^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n, \quad (2)$$

$$\delta\dot{L} = \frac{\delta V_N}{R_N}, \quad (3)$$

$$\delta\dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{R_E} \sec L + \frac{V_E}{R_E} \sec L \tan L \delta L. \quad (4)$$

其中, φ 为捷联惯导系统失准角矢量, ε^p 和 ∇^p 为等效到平台坐标系上的陀螺漂移和加速度漂移, λ 、 L 分别为坐标系中的经度和纬度, V_E 为舰船东向速度, V_N 为舰船北向速度.

1.2 天文导航系统

在舰船航行过程中,天文观测设备固连在载体上,在水面航行的时候可以直接观测星空.载体在不断调整姿态的过程中,天文敏感器观测的信息不能直接为高度差法求解所需高度角、方位角使用.针对这一应用特殊性,通常将捷联系统的姿态信息引入到天文导航中,为天文导航提供姿态信息.

天文导航中,通常选取地球固连坐标系 $OXYZ$ 为参考系.该坐标系原点为地心, OX 轴通过格林尼治经度线与赤道的交点, OZ 轴指向地球自转方向.定位时坐标系中的位置以经纬度表示,则位置圆在该坐标系中的方程^[8]为

$$\begin{cases} \sin h = \sin L \sin \delta_A + \cos L \cos \delta_A \cos \omega, \\ \omega = \lambda + t_G^A. \end{cases} \quad (5)$$

其中, λ 、 L 分别为坐标系中的经度和纬度, δ_A 、 ω 分别代表恒星的赤纬、地方时角(恒星的格林时角 t_G^A 与载体所在位置经度 λ 之和). δ_A 、 t_G^A 可通过观测时间从星历表中获得,由 δ_A 、 ω 即可确定恒星投影点的位置. h 为星敏感器观测得到的恒星的高度角,当有多个恒星的观测值时,可以根据式(5)建立一个方程组,求解该方程组即可获得舰船的经纬度位置信息.

1.3 多普勒速度声纳输出数学模型

多普勒速度声纳的测速精度较高,其精确度为测量速度的0.2%.多普勒速度声纳主要考虑测速误差和刻度系数误差^[7-9],数学模型如下:

$$\dot{X}_D = F_D X_D + W_D \quad (6)$$

其中

$$X_D = [\delta v_{dx}, \delta v_{dy}, \delta K_x, \delta K_y]^T,$$

$$F_D = \text{diag}[-1/\tau_{dx}, -1/\tau_{dy}, 0, 0],$$

$$W_D = [\omega_{dx}, \omega_{dy}, 0, 0]^T.$$

δv_{dx} 和 δv_{dy} 分别是 x 方向和 y 方向速度测量误差, δK_x 和 δK_y 分别是 x 方向和 y 方向刻度系数误差, τ_{dx} 、 τ_{dy} 和 ω_{dx} 、 ω_{dy} 分别为一阶马尔可夫过程的相关时间和驱动白噪声.

2 滤波器设计

SINS/CNS/DVS组合导航算法采用Kalman滤波算法.

2.1 状态方程

将 SINS 的数学平台误差角方程、速度误差方程和位置误差方程以及陀螺仪和加速度计数学模型综合可以得到组合导航系统状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{W}_k, \quad (7)$$

系统状态参数为

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \phi & \theta & \gamma & \delta V_x & \delta V_y & \delta V_z & \delta L & \delta \lambda & \delta h \\ \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \nabla_x & \nabla_y & \nabla_z \end{bmatrix}^T,$$

其中, $[\phi, \theta, \gamma]$ 为数学平台失准角, $[\delta V_x, \delta V_y, \delta V_z]$ 为速度误差, $[\delta L, \delta \lambda, \delta h]$ 为 3 个位置误差, $[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]$ 为 3 个陀螺常值漂移, $[\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]$ 为 3 个加速度计常值漂移.

2.2 量测方程

以天文导航确定的位置姿态信息与捷联惯性导航系统输出的位置姿态信息作差,将多普勒速度声纳的速度信息与惯性导航系统输出的速度信息作差,作为组合导航系统的量测值.构造量测方程,有

$\mathbf{Z}_k = [Z_{k1}, Z_{k2}, Z_{k3}]$. 误差方程为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{V}_k, \quad (8)$$

其中 \mathbf{H}_k 为量测矩阵, \mathbf{V}_k 为残差向量, $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为状态参数向量估计值.

2.3 模糊自适应 Kalman 滤波方程^[10]

常规 Kalman 滤波假定系统噪声 \mathbf{W}_k 和量测噪声 \mathbf{V}_k 为零均值高斯白噪声,且已知方差阵为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} . 对于水面舰船组合导航系统,经过对惯性导航系统的大量反复试验,也可以获得系统噪声的统计特性,但是量测噪声的统计特性是未知的,它随着应用环境的改变而改变.利用量测信息重新调整量测噪声的统计特性,以实现系统状态的精确估计.

如果数学模型足够精确,则残差序列应为零均值白噪声,残差方差实测值与经 Kalman 滤波得到的残差的理论值的比值应在 1 附近;如果此比值长期偏离 1,则说明量测噪声的水平变化已经发生了变化,需要对量测噪声协方差阵 \mathbf{R} 进行调整.调整的准则是使此比值回到 1 附近.设计自适应 Kalman 滤波如下:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \\ \mathbf{P}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T, \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1}, \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}], \\ \mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1}, \\ \hat{\mathbf{R}}_k = \alpha_k^b \hat{\mathbf{R}}_{k-1}. \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, $\hat{\mathbf{R}}_k$ 表示第 k 步量测噪声矩阵估计值, α_k 为对量测噪声阵 $\hat{\mathbf{R}}_{k-1}$ 的调整系数, b 是一个正值常数,表示对量测噪声矩阵调整系数的放大程度. $b > 1$ 表示放大 α_k 对 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 的调整作用,这样在量测噪声变化的情况下, $\hat{\mathbf{R}}_k$ 可以在较少的步数内迅速逼近真实的量测噪声值; $b < 1$ 表示缩小 α_k 对 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 的调整作用,这样可以使自适应调整 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 非常精确地稳定在真实量测噪声值上; $b = 0$ 表示放弃 α_k 对 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 的调整作用. α_k 的取值由模糊推理系统(简称 FIS)得到,此时 FIS 的输入为每一步残差实测方差与理论方差的比值.

3 仿真分析

舰船在水面航行时,会受到海流冲击振荡,因此舰船的水平角和航向角均以一定的振幅和周期作简谐振动,并按照一定的航向作等速航行.这种运动条件能较真实地反映舰船的运动状态.

设理想的姿态角为

$$\begin{cases} S\theta = A_\theta \sin(\omega_\theta t + \beta_\theta), \\ S\gamma = A_\gamma \sin(\omega_\gamma t + \beta_\gamma), \\ S\phi = \varphi_{\phi 0} + A_\phi \sin(\omega_\phi t + \beta_\phi), \end{cases} \quad (10)$$

速度为

$$\begin{cases} SV_E = SV \sin(S\varphi_u), \\ SV_N = SV \cos(S\varphi_u), \\ SV_U = 0. \end{cases} \quad (11)$$

其中, $A_\gamma, A_\phi, A_\theta$ 为摇摆幅度,此处分别取 $14^\circ, 9^\circ, 12^\circ$, 摇摆周期 $T_\phi, T_\theta, T_\gamma$ 分别取 6, 8 和 10 s, 初始相位均为零, 初始航向角为 45° , 常值航速为 15 m/s, 姿态更新周期为 10 ms.

舰船运动模型为 3 轴正弦波组合的摇摆运动,其幅值、周期和相位的选取应尽量接近实际系统的摇摆试验.这里加大惯性仪表的误差,仿真初始条件如下:

天文导航系统中,导航星历采用 JPL405 恒星行星星历.捷联惯导中,3 个方向陀螺仪随机漂移均为 $0.05(^\circ)/h$, 常值漂移为 $0.1(^\circ)/h$, 加速度计的随机偏置为 $50 \mu g$, 常值偏置为 $50 \mu g$; 在初始时准角中, 航向角为 0.15° , 纵摇角为 0.15° , 横摇角为 0.15° ; 多普勒速度声纳 $\delta V_{dx}(0) = \delta V_{dy}(0) = 0.4 \text{ m/s}$, $\delta K_x = \delta K_y = 0.01$.

利用天文导航系统和多普勒导航系统辅助捷联惯性导航系统可使惯导位置和航向收敛,满足自主导航要求.从仿真实验图 3 可以看出,在动态条件下, 导航定位精度较高, 姿态精度 $3'$ 以内, 定向精度 $3'$ 左

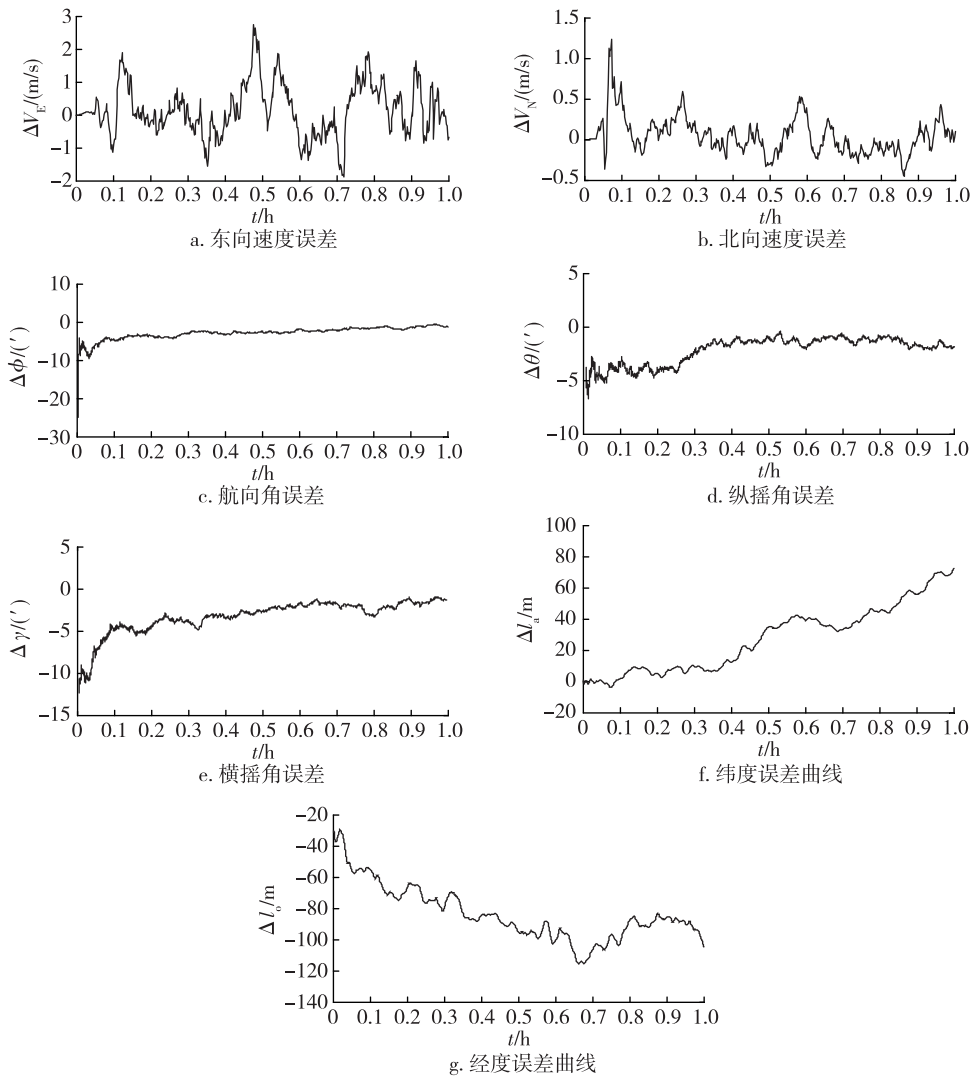


图3 组合导航系统误差

Fig. 3 Error curve of integrated SINS/CNS/DNS navigation system, with (a) for east velocity, (b) for north velocity, (c) for heading angle, (d) for pitching angle, (e) for rolling angle, (f) for latitude, and (g) for longitude

右,速度精度大概 5 m/s,位置精度在 100 m 以内.

4 结论

针对小型水面舰船高精度自主导航的特点,由于捷联惯导短时精度高,误差随时间积累但不能提供速度信息,天文导航精度不受时间长短影响,惯导系统高度方向可观测度差等特点,提出了基于模糊自适应 Kalman 滤波的捷联组合导航系统方法,将测深测潜仪提供的高度信息、多普勒速度声纳提供的航行器速度信息、天文导航系统提供的航向和位置信息与捷联系统进行信息融合,各导航系统可以取长补短,优化配置,得到最优值输出,在增强隐蔽性的同时提高了长时间远距离导航的精度.

参考文献

References

- [1] 穆华,吴志添,吴美平.水下地磁/惯性组合导航试验分析[J].中国惯性技术学报,2013,21(3):386-391
MU Hua, WU Zhitian, WU Meiping. Experimental analysis of underwater geomagnetic field/inertial integrated navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(3): 386-391
- [2] 王冲,曾庆军.自适应滤波算法在 AUV 组合导航中的方法[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(增刊 2):155-159
WANG Chong, ZENG Qingjun. Methods of adaptive filter to integrated navigation system of autonomous underwater vehicle [J]. Journal of Zhongnan University: Science Edition, 2013, 44(sup2): 155-159
- [3] Kato N, Shigetomi T. Underwater navigation for long-range

- autonomous underwater vehicles using geomagnetic and bathymetric information[J]. *Advanced Robotics*, 2009, 23(7/8): 787-803
- [4] 屈蕃,刘建业,熊智,等.机载天文/惯性位置组合导航[J].*南京理工大学学报:自然科学版*,2010,34(6):729-732
 QU Qiang, LIU Jianye, XIONG Zhi, et al. Airborne SINS/CNS location integrated system [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 2010, 34(6): 729-732
- [5] 郁丰,熊智,屈蕃.基于多圆交会的天文定位的组合导航方法[J].*宇航学报*,2011,32(1):88-92
 YU Feng, XIONG Zhi, QU Qiang. Multiple circle intersection-based celestial positioning and integrated navigation algorithm [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(1): 88-92
- [6] 宁晓琳,房建成.一种基于UPF的月球车自主天文导航方法[J].*宇航学报*,2006,27(4):648-653
 NING Xiaolin, FANG Jiancheng. A new method of autonomous celestial navigation for lunar rover and analysis of precision [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(4): 648-653
- [7] Mourikis A I, Trawny N, Roumeliotis S I. Vision-aided inertial navigation for spacecraft entry, descent, and landing [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(2): 264-280
- [8] 宁晓琳,蔡洪炜,吴伟仁,等.月球车的惯性/天文组合导航新方法[J].*系统工程与电子技术*,2011,33(8):1837-1844
 NING Xiaolin, CAI Hongwei, WU Weiren, et al. INS/CNS integrated navigation method for lunar rover [J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1837-1844
- [9] 王其,徐晓苏.多传感器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*,2007,15(6):667-672
 WANG Qi, XU Xiaosu. Application of multi-sensor information fusion to underwater integrated navigation system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(6): 667-672
- [10] 王其,徐小苏,张涛,等.模糊自适应滤波在水下航行器组合导航系统中的应用[J].*中国惯性技术学报*,2008,16(3):320-325
 WANG Qi, XU Xiaosu, ZHANG Tao, et al. Application of fuzzy adaptive filter to integrated navigation system of underwater vehicle [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(3): 320-325

Application of SINS/CNS/DNS integrated navigation in ship navigation system

LI Dong¹ WANG Qi² LIU Chenggan² ZHU Zhefu²

1 College of Physics & Electronic Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 215500

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

Abstract Precise navigation & positioning is a key issue for ship navigation. The principles of strapdown inertial navigation system (SINS), celestial navigation system (CNS), and Doppler navigation system (DNS) are given, and the state equation and measurement equation of information fusion are given in detail. Data including the position and attitude information provided by the CNS, and ship velocity information acquired by Doppler velocity sonar, are integrated with the SINS to improve the accuracy and reliability of ship navigation. Simulation experiment is carried out for the integrated navigation system, and the simulation results show that the fuzzy adaptive Kalman filter has high convergence speed and certain fault tolerance, which can improve the accuracy of the integrated ship navigation system.

Key words celestial navigation; strapdown inertial navigation system; integrated navigation; information fusion