

# GPS/罗兰C/SINS/AHRS组合导航系统及试验

林雪原, 何友

(海军航空工程学院信息融合技术研究所 山东 烟台 264001)

**【摘要】**组合导航系统已成为现代船用导航系统的重要配套设备,并已向着多组合导航系统方向发展。针对导航精度及可靠性,设计了GPS/罗兰C/SINS/AHRS组合导航系统,该组合导航采用了自适应联邦卡尔曼滤波(Kalman)的方法,通过闭环形式校正SINS,并用姿态航向参考系统(AHRS)代替捷联惯性导航系统(SINS)输出的航向角以保证航向角的收敛,同时对罗兰C的测量值进行坐标变换以消除由于坐标系不同而带来的常值误差。实际的静态与动态试验结果表明,该组合导航系统是可行的,能满足任务要求,并且易于工程实现。

**关键词** AHRS; 闭环校正; 自适应联邦卡尔曼滤波; SINS  
**中图分类号** TN971; P228.1 **文献标识码** A

## Integrated Navigation System and Experiment of GPS /LoranC /SIINS /AHRS

LIN Xue-yuan, HE You

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai Shandong 264001)

**Abstract** The integrated navigation system has become an important accessorial equipment in modern ship's navigation system, and is developing in the direction of multi-integrated navigation system. In order to ensure the precision and reliability, this paper designs the GPS/ Loran C/ SINS/ AHRS integrated system. In this integrated system, the self-adaptive federated Kalman filter is introduced to revise strap-down inertial navigation system (SINS); the heading angle attitude and heading reference system (AHRS) is used to ensure the convergence of heading angle; and the coordination transformation for Loran C is applied to eliminate the constant error of Loran C. The results of practical static and dynamic experiment show that this system is feasible and can meet the need of mission and engineer realization.

**Key words** attitude and heading reference system; close-loop correction; self-adaptive federated Kalman filter; strap-down inertial navigation system

以惯性导航系统为中心的舰船组合导航系统适用于定位精度要求极高的特种舰船,已成为21世纪初舰船组合导航系统的发展方向<sup>[1]</sup>。为保证船用导航系统的定位精度及可靠性,文献[2-3]从理论上研究了惯导/GPS/罗兰C/AHRS的组合导航系统方案,并把组合导航系统中各导航系统的组合方式及优先权限进行了分级,但没有有效利用所有的导航信息,不能算是一个真正的多传感器组合导航系统。

因为捷联惯性导航系统(strap-down inertial navigation system, SINS)、姿态航向参考系统(attitude and heading reference system, AHRS)为自主式的,而我国拥有自己的罗兰C系统,美国军方控制全球定位系统(global position system, GPS),因此本文从工

程应用以及系统可靠性的角度出发,设计了GPS/罗兰C/SINS/AHRS组合导航系统。该系统的特点:用AHRS实时代替SINS输出的航向角,从而克服了位置、速度组合模式中SINS航向角发散的趋势,这对于低精度的SINS尤为重要;设计了GPS与罗兰C容错检测方案,罗兰C采用WGS-72坐标系,而GPS与组合系统模型是以WGS-84坐标系为基础的,因此对罗兰C的测量值进行坐标系变换,从而大大降低罗兰C的常值定位误差。通过实际的静态与动态试验证明,该方案可行。

### 1 组合导航系统设计

组合方案如图1所示,自主导航采用SINS、AHRS系统、GPS和罗兰C作为组合导航系统的辅助

收稿日期: 2006-03-06; 修回日期: 2006-09-12

基金项目: 全国优秀博士论文作者专项基金(No.2000036)

作者简介: 林雪原(1970-),男,博士后,副教授,主要从事惯性技术与组合导航系统、数据融合方面的研究;何友(1956-),男,教授,博士生导师,主要从事信息融合、模式识别方面的研究。

设备。组合导航系统采用GPS或罗兰C的导航参数作为外部观测量,通过自适应联邦卡尔曼滤波器得到系统的输出导航参数误差的估值,采用闭环方式对SINS的输出误差进行修正<sup>[4]</sup>。

罗兰C是一种远程无线电导航系统。它提供载体所处的经、纬度信息,并采用WGS-72坐标系,但其所提供的导航信息的误差较大。测量值经过WGS-72

坐标系到WGS-84坐标系的转换后,可大大降低因坐标系不同而带来的常值误差。

本文用到的低精度SINS的型号为YH-5000,其内部嵌有一套AHRS,航向的误差采取了偏差角、平面角和磁罗盘姿态加以修正<sup>[5]</sup>,经过适当增益的六状态Kalman滤波器,估计的航向角精度较高,本文采用AHRS的航向角信息实时代替SINS的航向角。

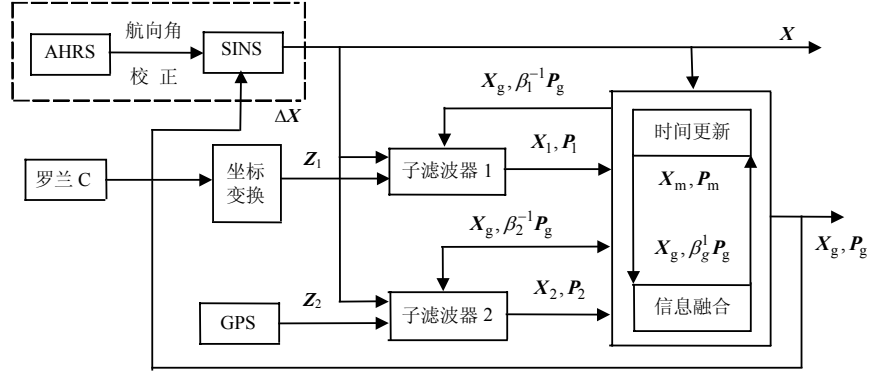


图1 GPS/罗兰C/SINS/AHRS组合导航系统设计方案

图1中:  $X_g$ 、 $P_g$  为全局状态估计、协方差矩阵;  $\beta_i$ 、 $Z_i$ 、 $X_i$ 、 $P_i$  ( $i=1,2$ ) 分别为各子滤波器的信息分配因子、量测输入、状态估计和协方差矩阵;  $\beta_i$  为主滤波器的信息分配因子;  $X_m$ 、 $P_m$  为主滤波器输出的状态估计和协方差矩阵;  $\Delta X$  为滤波器对SINS的校正量;  $X$  为SINS的输出量。

## 2 组合系统模型的建立

### 2.1 SINS误差模型

取系统的状态方程为SINS的误差模型,由于系统是针对舰船导航,在不考虑高度通道时共有七维(三维姿态误差、二维速度误差、二维位置误差)。采用北东地坐标系,将陀螺和加速度计的随机误差进行数学化处理,陀螺误差考虑为有色随机噪声和白噪声误差之和,因此对应三维陀螺需要扩展为三个随机误差状态量;而加速度计误差仅考虑为随机白噪声,则系统的状态矢量为:

$$\mathbf{X} = [\phi_N, \phi_E, \phi_D, \delta V_N, \delta V_E, \delta L, \delta \lambda, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}]^T \quad (1)$$

式中  $\phi_N$ 、 $\phi_E$ 、 $\phi_D$  为平台误差角;  $\delta V_N$ 、 $\delta V_E$  为速度误差;  $\delta L$ 、 $\delta \lambda$  为纬度、经度误差; 下标N、E、U代表北、东、地;  $\varepsilon_{rx}$ 、 $\varepsilon_{ry}$ 、 $\varepsilon_{rz}$  为陀螺的一阶马尔可夫过程误差,则系统的状态矢量为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t)_{10 \times 1} = \mathbf{A}(t)_{10 \times 10} \mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)_{10 \times 9} \mathbf{W}(t)_{9 \times 1} \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = [\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}, \omega_{rx}, \omega_{ry}, \omega_{rz}, \omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}]^T$$

$\omega_{gx}$ 、 $\omega_{gy}$ 、 $\omega_{gz}$  为陀螺误差的白噪声;  $\omega_{rx}$ 、 $\omega_{ry}$ 、 $\omega_{rz}$  为陀螺一阶马尔可夫过程的驱动白噪声;  $\omega_{ax}$ 、 $\omega_{ay}$ 、 $\omega_{az}$  为加速度计误差的白噪声。GPS/SINS与罗兰C/SINS组合系统的状态方程与式(2)一致,量测方程与  $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{G}(t)$  的表达式参见文献[6]。

### 2.2 子滤波器的容错检测方案

在保证系统实时性的前提下,应该降低各种计算的计算量,因此对GPS/SINS子滤波器采取航迹起始<sup>[7-8]</sup>的方法以检测GPS信息。航迹算法的中心思想为设置一滑窗检测函数:

$$\{[L(j) - L(i)]R_M\}^2 + \{[\lambda(j) - \lambda(i)]R \cos L\}^2 \leq R_{\max}^2 \quad (j > i) \quad (3)$$

式中  $L$ 、 $\lambda$  分别为纬度、经度;  $R$ 、 $R_M$  分别为地球赤道平面半径、子午圈曲率半径;  $R_{\max}^2 = [v_{\max} T_{i,j}]^2 + (\sigma_{ew}^2 + \sigma_{ns}^2)$ ,  $v_{\max}$  为最大运动速度;  $T_{i,j}$  表示第  $i$ 、第  $j$  次定位的时间间隔;  $\sigma_{ew}$ 、 $\sigma_{ns}$  为GPS正常工作时的东西向与南北向定位误差方差。实际检测时可取3/4检测方法,即取GPS当前定位信息以及最近的前四次正常定位信息,代入式(3)。若满足式(3),则取  $Z_j = 1$ ; 否则  $Z_j = 0$ 。这样可得四个  $Z_j$  的值,若四个  $Z_j$  的和大于或等于3,则表明当前GPS定位信息有效,否则无效<sup>[7-9]</sup>。

罗兰C/SINS系统的容错算法采用参差  $\chi^2$  检验法<sup>[5,10]</sup>,该算法的故障检测函数:

$$\varepsilon(k) = \mathbf{v}^T(k) \mathbf{S}^{-1}(k) \mathbf{v}(k) \quad (4)$$

式中  $\mathbf{v}(k) = \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)$ ;  $\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)$ ;  $\mathbf{Z}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\hat{\mathbf{X}}$ 、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{R}$ 分别为量测向量、观测矩阵、状态估计向量、状态估计协方差矩阵、量测噪声矩阵;  $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 是服从自由度为2的 $\chi^2$ 分布, 即 $\boldsymbol{\varepsilon}(k) \sim \chi^2(2)$ 。故障判定准则为: 有故障时,  $\boldsymbol{\varepsilon}(k) > T_D$ ; 无故障时,  $\boldsymbol{\varepsilon}(k) \leq T_D$ 。其中, 预先设置的 $T_D$ 可由误警率 $P_{fa}$ 确定, 如果 $P_{fa} = 0.05$ , 则 $T_D = 5.991$ 。

### 2.3 罗兰C的坐标系转换模型

WGS-72和WGS84之间简化的大地坐标变换公式<sup>[11-12]</sup>:  $\Delta H = 4.5 \sin \phi + \partial \Delta f \sin^2 \phi - \Delta \partial + \Delta r$ ;  $\Delta \phi'' = (4.5 \cos \phi / \partial \sin 1'') + (\Delta f \sin 2\phi / \sin 1'')$ ;  $\Delta \lambda'' = 0.554$ , 其中,  $\Delta f = 0.312\ 105\ 7 \times 10^{-7}$ 、 $\partial = 6\ 378\ 135\ \text{m}$ 、 $\Delta \partial = 2\ \text{m}$ 、 $\Delta r = 1.4\ \text{m}$ , 得到改正值 $\Delta \phi$ 、 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta H$ 后, 可按下式求得新坐标系坐标:

$$\begin{cases} \phi_{\text{WGS-84}} = \phi_{\text{WGS-72}} + \Delta \phi \\ \lambda_{\text{WGS-84}} = \lambda_{\text{WGS-72}} + \Delta \lambda \\ H_{\text{WGS-84}} = H_{\text{WGS-72}} + \Delta H \end{cases} \quad (5)$$

## 3 系统试验结果及分析

为了验证本文方案, 在某地进行了一组静态与动态试验。试验所采用的SINS型号为YH5000, 其陀螺的精度为 $0.6^\circ/\text{s}$ , 加速度计精度为 $5 \times 10^{-3}\ \text{g}$ , 内部含有一套AHRS可用以实时地代替SINS输出的航向角。GPS的定位精度为 $20\ \text{m}$ ; 罗兰C的定位精度取为 $600\ \text{m}$ , 经过坐标变换后的定位精度取为 $100\ \text{m}$ 。试验中陀螺与加速度计的数据采集周期为 $0.01\ \text{s}$ , GPS与罗兰C的数据采集周期均为 $5\ \text{s}$ , 组合的周期也为 $5\ \text{s}$ 。

静态试验的各导航参数误差曲线如图2a~2e, 图2a为没有采取AHRS时系统输出的航向角信息, 发散趋势非常明显; 图2b为采取AHRS时系统输出的航向角信息, 收敛于一定范围内, 误差的均方差约为 $2^\circ$ ; 从图2c~2e可以看出姿态角、速度、位置均收敛, 且其误差的均方差分别为 $0.5^\circ$ 、 $0.02\ \text{m/s}$ 、 $10\ \text{m}$ ; 由于试验采用了低精度陀螺, 可以预见: 如果采用的陀螺精度进一步提高, 则姿态角的精度也将进一步提高。

某次动态试验时间约为 $100\ \text{min}$ , 各导航参数曲线如图3a~3e所示。

图3a代表由组合系统、GPS、罗兰C确定的航迹曲线, 受图幅大小的限制, 它们是重合的; 图3b是对图3a的局部区域放大后的效果图, 图中由于GPS/SINS子滤波器得到的信息分配因子较大, 因此组合轨迹与GPS轨迹基本重合; 通过对比罗兰C的经

纬度测量值经过坐标变换前后相对于GPS的误差, 可以看出罗兰C的经纬度信息的常值误差大大降低, 从航向角、姿态角、速度、位置曲线可以看出, 它们都反应了系统运动的动态效果。

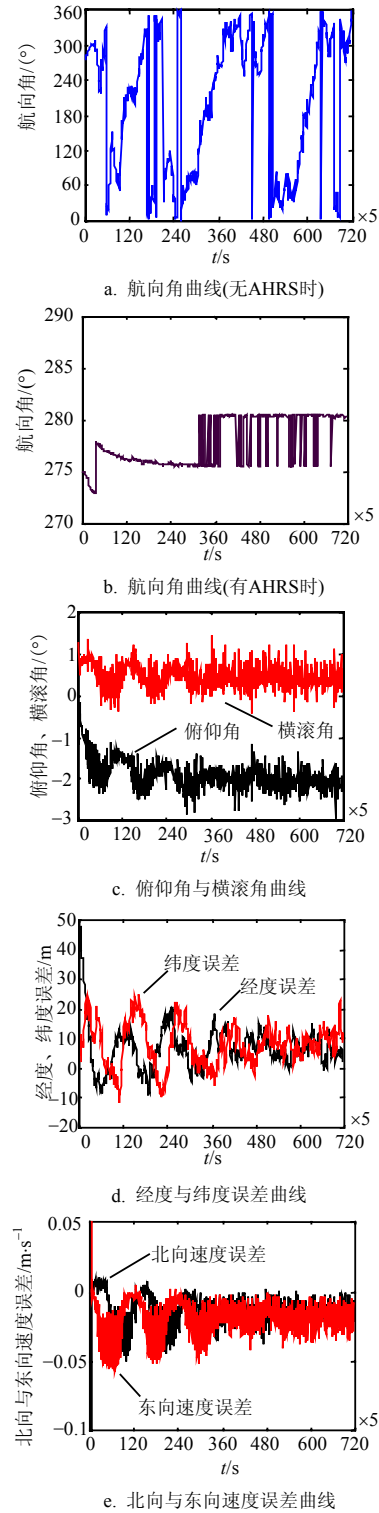
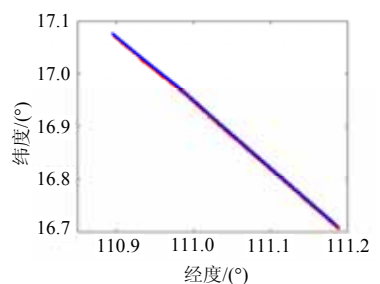
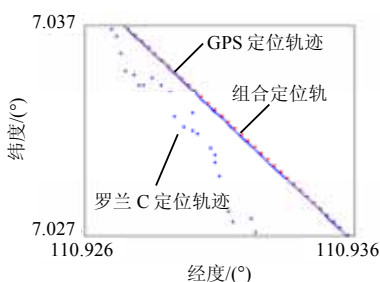


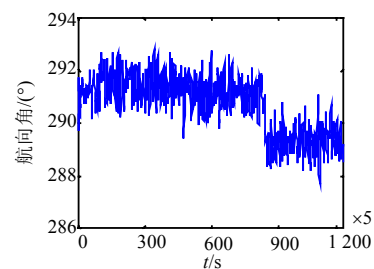
图2 静态试验结果曲线



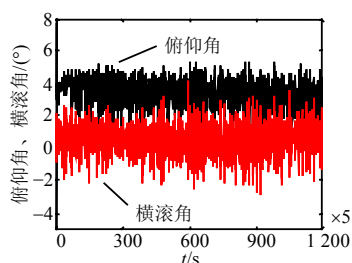
a. 系统航迹曲线



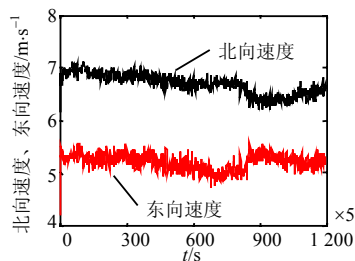
b. 航迹曲线局部放大图



c. 航向角变化曲线



d. 俯仰角与横滚角变化曲线



e. 北向与东向速度变化曲线

图3 动态试验结果曲线

## 4 结论

本文主要根据舰船组合导航系统要求定位精度极高的特点,设计了一套基于AHRS辅助的多组合导航系统。该系统采用自适应联邦卡尔曼滤波的方法并通过闭环形式校正SINS, AHRS代替SINS输出的航向角以保证航向角的收敛。同时对罗兰C的测量值进行坐标变换以消除由于坐标系不同而带来的常值误差,并设计系统的滤波模型与系统容错故障诊断模型。最后,根据实测数据对上述模型进行了验证,试验结果表明该理论模型方案可行,各项导航参数精度可靠。由于本文采集的实测数据是基于低精度SINS,可以预测假如实测数据来自高精度SINS,则试验结果的导航参数的精度将会进一步提高。

## 参考文献

- [1] 周永余, 陈永冰, 文 魁. 舰船组合导航系统发展评述[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(1): 67-72.
- [2] 徐力平. 组合导航系统故障检测技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- [3] 吴美平, 胡小平. 惯导/GNSS/罗兰C/航姿系统组合导航方案[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 12-16.
- [4] 刘瑞华, 刘建业. 联邦滤波信息分配新方法[J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(2): 28-32.
- [5] 刘建业, 袁 信, 肖纪立. HJL-1捷联惯性航姿系统的工程实现[J]. 中国惯性技术学报, 1997, 1(5): 1-5.
- [6] 袁 信, 俞济祥, 陈 哲. 导航系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994.
- [7] BAR-SHALOM Y, FORTMANN T E. Tracking and data association[M]. Newyork: Academic press, 1988.
- [8] 修建娟. 多站无源定位与跟踪算法[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2004.
- [9] 林雪原, 何 友. 双星定位/SINS组合系统中双星定位的故障检测研究[J]. 测绘学报, 2006, 35(11): 332-336.
- [10] ZHU Sheng-yuan, REIGBER C, KONGIG R. Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data[J]. Journal of Geodesy, 2004, 78(1): 103-108.
- [11] KONGIG R, REIGBER C, ZHU Sheng-yuan. Dynamic model orbits and earth system parameters from combined GPS and LEO data[J]. Advances in Space Research, 2005, 36(3): 431-437.
- [12] JOSE A R, ELECIA W. Low cost solid state GPS/INS package[C]//ION GPS-2000. Utah: [s.n.], 2000: 2593-2602.

编辑 张俊