

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.014

基于三分量地磁滤波技术的微型 AHRS 算法研究

赵彦明,常洪龙*,袁广民,孙雄飞

(西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对常规的微型姿态参照系统(AHRS)算法存在过载干扰和滤波发散的问题,设计了一种基于三分量地磁滤波技术的微型 AHRS 算法。采用一种简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法进行了 AHRS 的信息融合;采用姿态误差角和陀螺漂移作为状态变量,进行了自适应滤波的时间更新,采用三分量地磁矢量作为观测量,进行了自适应滤波的量测更新;最后,对该算法进行了半物理仿真实验。实验结果表明,该算法能够有效地减小高过载造成的姿态测量误差,在 2 g 线振动测试条件下,该算法的俯仰角和横滚角的测量精度优于 0.75°,航向角精度优于 1.87°;与常规的算法相比,系统的抗过载能力提高了近 3.2 倍。该算法测量精度高、抗过载性好,具有很强的自适应能力,尤其适用于低铁磁干扰、高过载的工作环境。

关键词: 微型 AHRS; 三分量地磁矢量; Sage-Husa 自适应滤波; 抗过载性; 自适应性

中图分类号: TH39; TP216; U666.1; V249.32

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0745-04

Micro AHRS algorithm based on three-component geomagnetic filtering technology

ZHAO Yan-ming, CHANG Hong-long, YUAN Guang-min, SUN Xiong-fei

(Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at overload interference and filtering divergence of common micro attitude heading reference system (AHRS) algorithms, a micro AHRS algorithm based on three-component geomagnetic filtering was proposed, which adopted a simplified Sage-Husa adaptive filter. Then, attitude errors and gyros' drifts were chosen as the states of the AHRS system, and the three-component geomagnetic vector from three-axis magnetometer was taken to construct the measurements. The adaptive filtering was used to estimate errors of AHRS. Finally, AHRS semi-physical simulation was done. Simulation results show that, this algorithm can reduce the overload interference effectively. Under the testing condition of 2 g random vibration, attitude errors are less than 0.75°, heading error is less than 1.87°, the system measurement precision is improved almost by 3.2 times. The new algorithm improves the accuracy, anti-overload property and adaptability. This algorithm is particularly suitable for the work environment with low ferromagnetic interference and high overload.

Key words: micro attitude heading reference system (AHRS); three-component geomagnetic vector; Sage-Husa adaptive filtering; anti-overload property; adaptability

0 引 言

随着机电系统(MEMS)的发展,采用微惯性传感器、微型磁传感器和处理器一体化集成设计的微型航向姿态参照系统(Micro Attitude Heading Reference System, AHRS)成为现实。由于微型航向姿态参照系统具

有集成度高、体积小、重量轻、成本低、功耗低、结构简单、可靠性高等优点,近年来 AHRS 系统正在逐渐得到广泛的应用,并且受到军事及民用领域的普遍关注^[1]。

微型航向姿态参照系统(AHRS)由三轴 MEMS 陀螺、三轴 MEMS 加速度计、三轴 MEMS 磁强计和信息处理电路组成^[2]。其中, MEMS 陀螺敏感载体运动角速

收稿日期: 2014-02-24

作者简介: 赵彦明(1986-),男,河北邢台人,主要从事微型 AHRS 系统、组合导航方面的研究。E-mail: shaman2008@163.com

通信联系人: 常洪龙,男,教授,博士生导师。E-mail: changhl@nwpu.edu.cn

度,通过求解四元数微分方程来更新姿态角,但是 MEMS 陀螺存在严重的零点漂移和随机误差,在四元数姿态解算中会产生积累误差,难以满足应用的精度要求^[3-4]。为了实时补偿陀螺漂移和累积误差造成的姿态误差,微型姿态测量系统常用的算法是:同时采用三轴 MEMS 陀螺和加速度计以及微型磁传感器的测量值,运用 Kalman 滤波算法,进行传感器信息融合,构建组合姿态测量系统,抑制姿态角误差的发散。文献[5-7]采用重力信息作为量测,设计离散型卡尔曼滤波器,进行数据融合,达到姿态误差补偿目的。文献[8]根据加速度值计算出俯仰角和横滚角,再联合磁场信息解算出航向角;利用陀螺输出的角速率信息计算捷联姿态矩阵;然后通过离散型 Kalman 滤波进行传感器数据融合,补偿累积误差。这两种方案均可以获得较好的长期稳定性和较高稳态精度。但是,由于以上研究方法均采用了加速度计输出的重力信息作为卡尔曼滤波的量测信息,系统长时间机动工作的时候,加速度计敏感到的过载加速度会给系统引入较大的系统误差;并且所采用的是常规 EKF 滤波,算法的自适应性差,存在滤波发散现象。

针对上述方法中的问题,本研究设计一种基于三分量地磁滤波技术的微型 AHRS 算法,用 AHRS 系统的姿态误差角和陀螺漂移作为待估计的状态变量,利用以三分量地磁矢量的差值信息作为量测,设计基于三分量地磁矢量的自适应滤波器,采用一种简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法进行信息融合,以消除系统的陀螺漂移,累积误差和过载干扰误差。

1 简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法

设线性离散系统的状态空间模型为^[9]:

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \quad (1)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (2)$$

式中: X_k —系统的状态向量; Z_k —系统量测向量; $\Phi_{k,k-1}$ — t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻系统状态的一步转移矩阵; H_k —系统的量测矩阵; Γ_{k-1} —系统噪声驱动矩阵; W_k —系统的激励噪声序列; V_k —量测噪声序列; W_k, V_k — n 维和 m 维的高斯白噪声向量序; Q_k, R_k —高斯白噪声向量序列的方差矩阵。

简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法如下^[10]:

$$\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (3)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k V_k \quad (4)$$

$$v_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1} \quad (5)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (6)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (7)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (8)$$

$$R_k = (1 - d_k) R_{k-1} + d_k [(I - H_k K_{k-1}) v_k \cdot v_k^T (I - H_k K_{k-1})^T + H_k P_{k-1} H_k^T] \quad (9)$$

其中: $d_k = (1 - b)/(1 - b^{k+1})$; $b \in (0.95 \sim 0.99)$ 。

简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法,在已知 Q 的情况下,对 R 进行估计。该算法结构简单,计算量小,实时性强,易于工程实现,可以明显提高滤波精度与稳定性,具有良好的自适应性。

2 AHRS 自适应滤波器设计

2.1 基于 AHRS 误差模型的系统方程

本研究选择微型 AHRS 系统的 3 个姿态误差角和 3 个陀螺漂移误差为状态构成六维的状态方程:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t) \quad (10)$$

其中: $X = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}]^T$ 。

式中: E, N, U —当地的东北天坐标系; ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U —系统的姿态误差角; $\varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ —MIMU 3 个轴向的陀螺相关漂移; $W(t)$ —系统噪声。

MEMS 陀螺漂移的相关时间很长,一般当作随机游走处理,微分方程为:

$$\dot{\varepsilon}_r = \xi_w \quad (11)$$

式中: ξ_w —随机游走系数。

2.2 基于三分量地磁场矢量的量测方程

基于地磁滤波技术的微型 AHRS 算法直接利用三轴磁强计测得的三分量地磁场矢量进行组合,建立系统的量测方程。设:四元数姿态解算得到的姿态矩阵 C_b^n , 无误差理想姿态矩阵为 C_b^n , 磁场强度矢量在实际导航坐标系 n 的坐标 B^n , 地磁场强度矢量在理想导航坐标系 n 中的坐标 B_{igf}^n , 地磁场强度矢量测量值在载体坐标系 (b) 中的坐标矢量为 B_m^b 。定义量测向量为 $Z \triangleq B_{igf}^n - B^n$ 。

根据惯性导航的知识,姿态矩阵 C_b^n 与 C_b^n 之间存在下式关系^[11]:

$$C_b^n = [I_{3 \times 3} + (\phi \times)] C_b^{n*} \quad (12)$$

式中: $(\phi \times)$ —姿态误差角 $\phi = [\phi_E, \phi_N, \phi_U]^T$ 构成的矢量叉乘矩阵。根据坐标变换关系可得:

$$B_{igf}^n = C_b^n B_m^b + V_1 \quad (13)$$

$$B^n = C_b^n B_m^b + V_2 \quad (14)$$

结合式(12~14)可推导系统的量测方程,推导过程如下:

$$\begin{aligned}
 Z \triangleq B_{igrf}^n - B^n = & \\
 C_b^n B_m^b + V_1 - (C_b^n B_m^b + V_2) = & \\
 [I_{3 \times 3} + (\Phi \times)] C_b^n B_m^b - I_{3 \times 3} C_b^n B_m^b + (V_1 - V_2) = & \\
 [I_{3 \times 3} + (\Phi \times) - I_{3 \times 3}] C_b^n B_m^b + (V_1 - V_2) = & \\
 (\Phi \times) C_b^n B_m^b + (V_1 - V_2) = & \quad (15) \\
 \Phi \times (C_b^n B_m^b) + (V_1 - V_2) = & \\
 (-C_b^n B_m^b) \times \Phi + (V_1 - V_2) = & \\
 ((-C_b^n B_m^b) \times) \Phi + (V_1 - V_2) = & \\
 [((-C_b^n B_m^b) \times) \quad 0_{3 \times 3}] [\Phi^T \quad \varepsilon_r^T]^T + (V_1 - V_2)
 \end{aligned}$$

在上式中,量测量为 $Z \triangleq B_{igrf}^n - B^n$,量测矩阵记为 $H \triangleq [((-C_b^n B_m^b) \times) \quad 0_{3 \times 3}]$;状态向量记为 $X \triangleq [\Phi^T \quad \varepsilon_r^T]^T$;系统的等效量测噪声记为 $V \triangleq V_1 - V_2$,包含磁强计本身的测量误差、罗差、地磁异常等随机误差。因此,系统的量测方程记为:

$$Z \triangleq B_{igrf}^n - B^n = HX + V \quad (16)$$

2.3 系统数学模型离散化

系统数学模型离散化,即综合考虑滤波精度和计算量,选择合适阶数的 $\Phi_{k, k-1}$ 和 H_k 的近似值。设滤波周期为 $T = t_k - t_{k-1}$,由线性系统理论^[12-13]可得:

$$\Phi_{k, k-1} = e^{TF(t_{k-1})} \quad (17)$$

将式(17)作麦克劳林展开,取二阶近似,可得:

$$\Phi_{k, k-1} \approx I + TF(t_{k-1}) + \frac{T^2}{2!} F^2(t_{k-1}) \quad (18)$$

$$H_k = [((-C_b^n B_m^b) \times) \quad 0_{3 \times 3}]_{t=t_k} \quad (19)$$

3 半物理仿真试验及仿真结果分析

3.1 仿真条件

本研究利用PC机在Matlab 7.0环境下进行仿真。仿真中所用的数据是在线振动台上采集的MIMU传感器数据。实验选用的MIMU型号为ADIS16405,陀螺的偏置稳定性为0.007 %/s,角随机游走误差为2 °/√hr;加

速度计的随机偏置为±50 mg,偏置稳定性为0.2 mg;磁强计的偏置误差为±4 mguass。滤波周期选为50 ms,仿真时间为80 min。

3.2 随机振动实验条件

随机振动试验设备选用电动垂直振动台。振动试验台运动形式设置为随机振动,振动方向为Z轴单方向。随机振动加速度的均方根值为 $Arms = 2 \text{ g}$ 。随机振动试验实物图如图1所示,随机振动实验的加速度功率谱如图2所示。

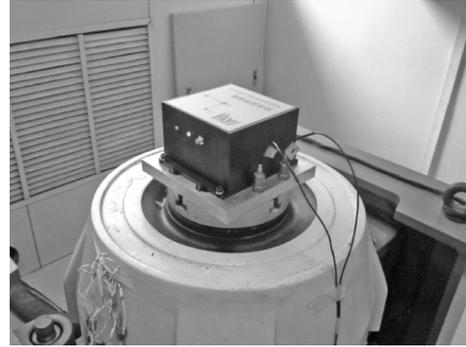


图1 随机振动试验实物图

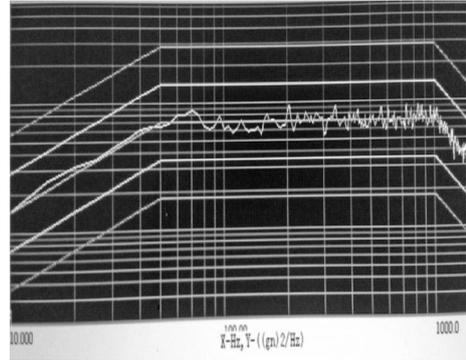


图2 振动试验功率谱谱形图

3.3 半物理仿真实验结果及分析

根据设定的仿真条件,本研究利用2 g振动实验获得的MIMU传感器数据,分别采用常规微型AHRS算法和基于三分量地磁滤波技术的微型AHRS算法进行仿真,仿真结果如图3、图4所示。常规微型AHRS

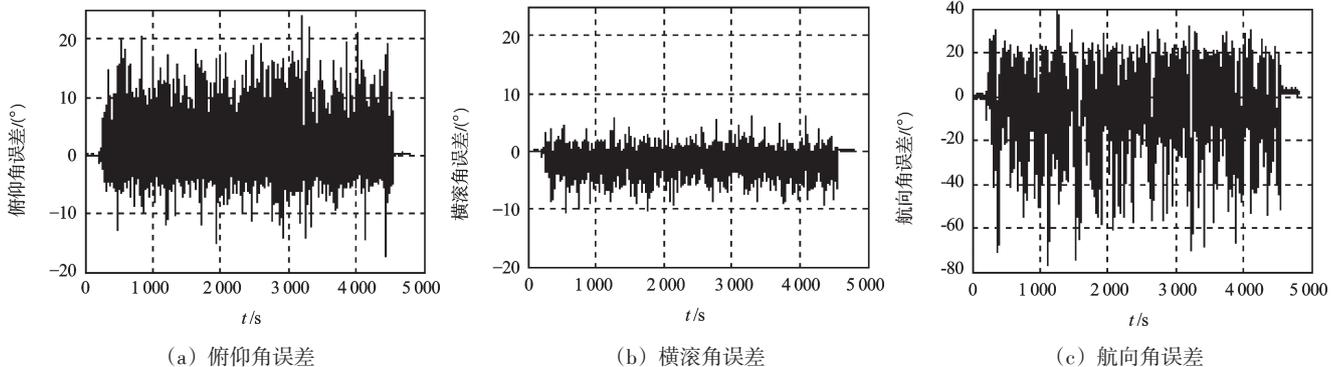


图3 常规的微型 AHRS 算法误差

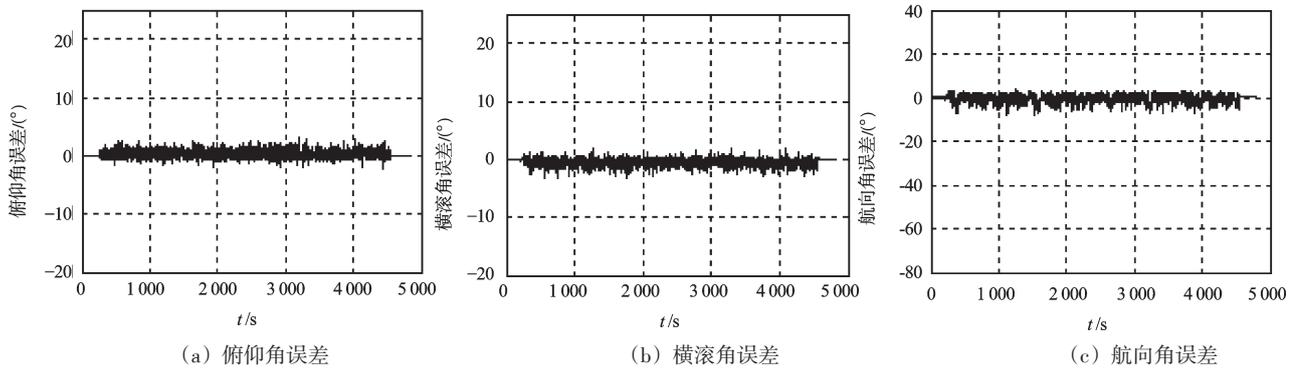


图4 基于地磁滤波技术的微型 AHRS算法误差

算法误差如图3(a~c)所示;基于三分量地磁滤波技术的微型 AHRS算法误差如图4(a~c)所示。

从图3中可以看出,在2 g随机线振动的工作条件下,常规微型 AHRS算法的误差很大,俯仰角误差有效值为 $4.329\ 3^\circ$ 、横滚角误差有效值为 $2.331\ 9^\circ$ 、航向角误差有效值为 $17.303\ 6^\circ$,姿态角误差的波动带宽很大,系统不能够稳定工作,不满足工程应用的精度要求。从图4中可知,基于地磁滤波技术的微型 AHRS算法能够有效地减小高过载线振动造成的姿态测量误差,其俯仰角误差有效值为 $0.562\ 3^\circ$ 、横滚角误差有效值为 $0.728\ 7^\circ$ 、航向角误差有效值为 $1.860\ 6^\circ$,姿态角误差的波动带宽比较小,与常规算法相比,俯仰角、横滚角、航向角的精度分别提高了7.7倍、3.2倍、9.3倍,系统的综合抗过载能力提高了近3.2倍。相对常规的微型 AHRS算法,基于三分量地磁滤波技术的微型 AHRS算法具有抗过载、精度高、自适应性强的优点。

4 结束语

为了给高动态的载体提供准确、稳定的姿态信息,提高 AHRS系统的抗过载能力,本研究采用三分量地磁矢量作为观测量,设计了一种较为实用的 AHRS高动态算法。该算法利用三分量地磁量测差值对陀螺姿态解算的结果进行自适应滤波修正,进而实现高动态载体姿态的实时测量。半物理仿真实验结果表明:该算法具有很好的长期稳定性、动态精度和自适应能力,可以有效地消除高动态过载干扰。

本研究给出的三分量地磁滤波方法为高动态载

体的导航系统和微型 AHRS系统设计提供了理论工具,对于航姿系统工程化具有一定的借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 杜亚玲,刘建业,李荣冰,等. 基于DSP的小型捷联惯性航姿系统研究[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8):365-366.
- [2] 魏萍. 基于ARM的嵌入式航向姿态参考系统的研究[D]. 杭州:浙江大学信息科学与工程学院,2006:23-45.
- [3] 王正兰,时雷,王峰,等. 基于MEMS三维角度测量系统[J]. 机电工程技术,2014,43(1):17-20.
- [4] 潘晓琳,张亚,李波. MEMS开关悬臂梁建模及有限元分析[J]. 机械,2013,40(11):57-59.
- [5] 黎永键,赵祚喜,高俊文. MEMS惯性传感器ADIS16355在姿态测量中的应用[J]. 数据采集与处理,2012,27(4):501-507.
- [6] 梁建宏,田伟程,王田苗. 基于ARM与低成本MEMS器件的AHRS设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2012(5):1-4.
- [7] 李泽民,段凤阳,李赞平. 基于MEMS传感器的数字式航姿系统设计[J]. 传感器与微系统,2012,31(6):94-96.
- [8] 魏萍,韩波,李平. 基于S3C44B0X的航姿测量系统的设计与实现[J]. 机电工程,2006,23(4):17-20.
- [9] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 2版. 西安:西北工业大学出版社,2012.
- [10] 鲁平,赵龙,陈哲. 改进的Sage-Husa自适应滤波及其应用[J]. 系统仿真学报,2007,19(15):3503-3505.
- [11] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [12] CALLIER F M, DESOER C A. Linear System Theory [M]. New York:Springer-Verlag,1991.
- [13] NGO T B, LE H L, NGUYEN T H. Survey of Kalman Filters and Their Application in Signal Processing [C]//2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Shanghai:[s.n.],2009:335-339.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

赵彦明,常洪龙,袁广民,等. 基于三分量地磁滤波技术的微型 AHRS算法研究[J]. 机电工程,2014,31(6):745-748.

ZHAO Yan-ming, CHANG Hong-long, YUAN Guang-min, et al. Research on micro AHRS algorithm based on three-component geomagnetic filtering technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(6):745-748.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>