MEMS和MOEMS技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022121301

基于最小均方和扩展卡尔曼滤波的IMU降噪方法

刘　宇*，梁钜阳，陈燕萍，彭　慧，贺光瑞

（重庆邮电大学 自主导航与微系统重庆市重点实验室，重庆 400065）

摘　要： 针对车体振动影响微机电系统惯性测量单元（MEMS IMU）航向精度问题，提出了一种能有效抑制振动噪声从而提升航向精度与稳定性的方法。首先，采用最小均方方法对数据进行前端预处理，以提升信噪比；然后，利用加速度计与陀螺仪的互补特性滤除陀螺仪的零偏噪声；最后，采用扩展卡尔曼滤波进一步滤波。总计4 h的现场实验结果表明：IMU受载体振动影响较小，航向的精度与稳定性得到提升；其中，在大角度机械运动后的相对航向误差为3.08°，静止时的航向方差为2.44×10^{-5}。

关键词： 微机电系统；惯性测量单元；航向；振动噪声

中图分类号： TN713；TB535　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1087－05

IMU De-Noising Method Based on Least Mean Square Algorithm and Extended Kalman Filter

LIU Yu, LIANG Juyang, CHEN Yanping, PENG Hui, HE Guangrui

(Chongqing Key Laboratory of Autonomous Navigation and Microsystems,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: Aiming at the problem that vehicle vibration affects the heading accuracy of MEMS IMU, a method that can effectively suppress vibration noise and improve heading accuracy and stability is proposed. Firstly, the minimum mean method was used to preprocess the data to improve the signal-to-noise ratio. Then, the bias noise of gyroscope was filtered by using the complementary characteristics of accelerometer and gyroscope. Finally, the extended Kalman filter was used for further filtering. A total of 4 hours of field experiment results show that IMU is less affected by carrier vibration, and the accuracy and stability of heading are improved. The relative heading error after large-angle mechanical motion is 3.08° and the heading variance at rest is 2.44×10^{-5}.

Key words: MEMS; IMU; heading; vibration noise

0　引言

随着制造工艺的发展进步，低成本微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System，MEMS）惯性器件的灵敏度、稳定性和精度逐渐得到提升。因此，基于微机电系统的惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，IMU）正在被广泛应用于手机、汽车、人体运动、机器人、自动驾驶车辆、交通工具导航、军事和航空等场景。在这些应用场景中，IMU往往用来测量载体的姿态角，在姿态角中，航向是最需关注的。但是，载体在运动过程中往往会产生各种冲击和振动，当载体振动频率较高、振幅较大时，会导致IMU产生零偏漂移和非线性、非高斯随机噪声，造成测量精度大幅下降。因此，在振动环境下保持精度与稳定是IMU应用在车辆上的一个重要问题。

目前，国内外研究机构和学者对于MEMS IMU在振动环境下如何保持测量精度和稳定性进行了各种研究。文献[1]通过分析MEMS IMU在

收稿日期：2022－12－13.
基金项目：国家自然科学基金项目（61901069）；重庆市教委基础研究项目（KJQN202000605）.
* **通信作者：**刘　宇　**E-mail：** liuyu@cqupt.edu.cn

高振动环境下的测试数据得出其误差产生的主要原因是 PCB(Printed Circuit Board)与传感器的共振。文献[2]提出了一种基于 MEMS IMU 在振动环境下的可靠性测试方法。文献[3]分析比较了不同滤波算法在振动环境下的效果。文献[4]提出了 MEMS IMU 在机翼上使用的抗振滤波方法。文献[5-11]分别提出了小波分析、最小二乘法、卡尔曼滤波等 MEMS IMU 去除振动噪声算法。虽然已经有很多学者对 MEMS IMU 在振动环境下的滤波算法做出大量研究,但是都只是对角速率数据的滤波效果进行了分析,没有进行在载体上的实际测试与姿态角分析,没有体现出具体的实用价值。

针对车载环境下存在载体振动影响航向精度问题,本文提出了一种基于最小均方(Least Mean Square,LMS)和扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter,EKF)的降噪算法。首先,引入了 LMS 算法对数据进行前端处理;然后,构建加速度与角速度的互补滤波器;最后,采用 EKF 进一步滤波从而提升整体去噪效果。总计 4 h 的现场实验结果表明,该算法有效提升了航向测量的稳定性和精度。

1 LMS 自适应滤波算法

LMS 算法的思想是采用梯度下降法,不断地自动调节权重,最后收敛至维纳解;其具有计算复杂度低、无需数据先验知识、鲁棒性强等优点。LMS 自适应滤波算法公式如下:

$$\begin{cases} y_n = X^{\mathrm{T}}(n)W(n) \\ e(n) = d(n) - y_n \\ W(n+1) = W(n) + 2\mu(n)e(n)X(n) \end{cases} \tag{1}$$

式中,$X(n)$表示 n 时刻的输入信号,$W(n)$表示 n 时刻滤波器的权重系数,$d(n)$表示 n 时刻滤波器的期望输出信号,$e(n)$表示 n 时刻的误差,$\mu(n)$表示自适应滤波器的迭代步长。算法的收敛条件为:$0 < \mu(n) < 1/\lambda_{\max}$,其中 $\lambda_{\max}$ 为输入信号 $X(n)$的自相关矩阵的最大特征值。

2 互补滤波

陀螺仪会因为零偏不稳定性和载体振动等原因产生零偏噪声。由于载体姿态角信息是通过角速度积分得到,因此陀螺仪零偏噪声对航向的影响会随着时间放大,从而造成精度的发散。加速度计在静止时相较于陀螺仪更加稳定,可以通过加速度信息去滤除角速度的零偏噪声。滤波算法公式如下:

$$\begin{cases} g_x = m_x + KP \cdot e_x + KI \cdot \int e_x \\ g_y = m_y + KP \cdot e_y + KI \cdot \int e_y \\ g_z = m_z + KP \cdot e_z + KI \cdot \int e_z \end{cases} \tag{2}$$

式中,g_x,g_y 和 g_z 分别为经过互补滤波后输出的三轴角速度值,m_x,m_y 和 m_z 分别为经过 LMS 滤波后的三轴角速度值,e_x,e_y 和 e_z 表示三个轴向的误差,KP 和 KI 为互补滤波器参数。

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ \boldsymbol{C}_n^b \times V_y \\ V_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{C}_n^b$ 为姿态转换矩阵,V_x,V_y 和 V_z 分别为归一化后的三轴加速度。

3 EKF 滤波算法

卡尔曼滤波利用状态方程和观测方程,进行一个不断预测、不断修正的计算过程,因为其不需存储不同时刻的数据,所以能够方便地处理实时数据。相较于经典卡尔曼滤波,EKF 的系统方程为非线性方程,因此应用更加广泛。

假设系统量测方程和状态方程模型如下:

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}) + B_{k-1}W_{k-1} \\ y_k = h(x_k) + v_k \end{cases} \tag{4}$$

$k-1$ 时刻状态 x_{k-1} 的一个参考值为 x_{k-1}^n,那么两者之间的差值为

$$\Delta x_{k-1} = x_{k-1} - x_{k-1}^n \tag{5}$$

则在忽略噪声的情况下,k 时刻的预测为

$$x_{k/k-1}^n = f(x_{k-1}^n) \tag{6}$$

记状态预测偏差 Δx_{k-1} 和量测预测误差 Δy_{k-1} 为

$$\begin{cases} \Delta x_{k-1} = x_k - x_{k/k-1}^n \\ \Delta y_{k-1} = y_k - y_{k/k-1}^n \end{cases} \tag{7}$$

将 $f(x_{k-1}^n)$在 x_{k-1}^n 邻域进行一阶泰勒展开,整理后表示为

$$x_k - f(x_{k-1}^n) \approx \frac{\partial f(x_{k-1})}{\partial x_{k-1}}\Big|_{x_{k-1}=x_{k-1}^n} \Delta x_{k-1} + B_{k-1}W_{k-1} \tag{8}$$

同理将 $h(x_k)$在 x_k 邻域进行一阶泰勒展开:

$$y_k - h(x_{k/k-1}^n) \approx \frac{\partial h(x_k)}{\partial x_k}\Big|_{x_k=x_{k/k-1}^n} \Delta x_k + v_k \tag{9}$$

令观测方程的雅可比矩阵为

$$\boldsymbol{H}_k^n=\left.\frac{\partial h(x_k)}{\partial x_k}\right|_{x_k=x_{k/k-1}^n} \tag{10}$$

则式(9)可以简写为

$$\Delta y_k=\boldsymbol{H}_k^n\Delta x_k+v_k \tag{11}$$

接下来可以直接用线性卡尔曼滤波方法进行偏差状态估计，完整的 EKF 滤波方程为

$$\begin{cases}K_k=P_{xy,k/k-1}P_{y,k/k-1}^{-1}\\ \hat{x}_k=\hat{x}_{k/k-1}+K_k(y_k-\hat{y}_{k/k-1})\\ P_{x,k}=P_{x,k/k-1}+K_kP_{y,k/k-1}K_k^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{12}$$

结合上述分析，我们设计的降噪算法的流程如图 1 所示。当加速度计与陀螺仪输出其原始数据后，首先利用 LMS 算法对其进行预处理；其次，采用互补滤波算法，利用加速度信号在静态静止条件下稳定性优于陀螺仪的特点，去除陀螺仪的零偏噪声；再次，利用 EKF 进一步滤波处理；最后，解算出实时姿态角。

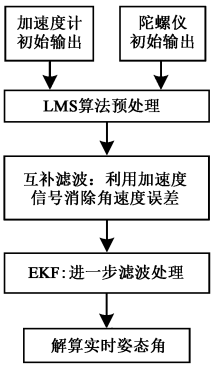


图 1　降噪流程图

4　测试系统

为验证滤波算法的有效性，我们采用了两款不同 IMU 进行同步实车对照试验，IMU 分别为：A)实验室自研 IMU，如图 2 所示。其拥有高精度三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计，加速度量程为±16 g，陀螺仪量程为±300 (°)/s。自研 IMU 的体积为 33 mm×47 mm×19 mm，重量小于等于 70 g，功耗小于等于 1 W，工作温度为－40～＋65 ℃，供电电压为 5 V，供电电流为 300 mA，输出频率 100 Hz，采样频率范围为 500～2 000 Hz；平均无故障工作时间大于等于 10 000 h。B)霍盛 HMS-MM-104，如图 3 所示。其加速度量程为±16 g，陀螺仪量程为±500 (°)/s，体积为 40 mm×40 mm×15 mm，体积小于等于 24 cm^3，重量为 31.5 g，功耗小于等于 0.5 W，供电电压为＋5 ～＋28 V_{DC}，输出频率 100 Hz。测试环境为常温常压环境，两款 IMU 均支持 RS422 和 CAN 协议传输。

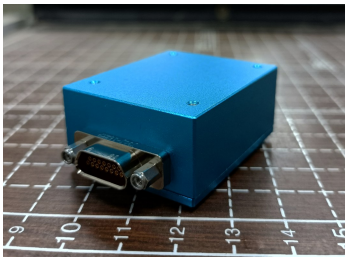


图 2　实验室自研 IMU

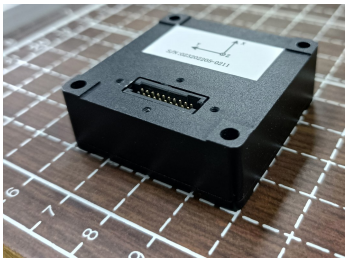


图 3　霍胜 IMU

图 4 为 IMU 数据采集系统，采用 RS422 协议将 IMU 数据传输至上位机，其能实时显示 IMU 加速度、角速度、姿态角等信息，显示精度为 0.001°。



图 4　IMU 数据采集系统

5　实验

实验步骤为：(1)将两款 IMU 一起安装固定在一辆中型挖掘机车顶(如图5)，通过移动电脑实时



图 5　现场测试场景

采集两款 IMU 的数据，然后启动挖掘机，整个实验过程中保持发动机处于启动状态；(2)进行三次挖掘机大臂满速旋转操作，并记录旋转前后的航向值；(3)三次旋转操作完成后，再保持静止 3 h，从而结束实验。

5.1 旋转实验数据对比

两款 IMU 在动态实验中航向角数据对比如图 6 所示。从图中可以看出两款 IMU 对于挖掘机的旋转均能做到实时的航向跟踪与测量；为了衡量航向的误差，定义相对航向误差为结束时刻航向值与初始航向值差值的绝对值。从表 1 可以看出，IMU-A 的相对航向误差为 3.08°，IMU-B 的相对航向误差为 4.91°。

表 1 旋转前后航向对比

型号	初始航向/(°)	结束航向/(°)	相对航向误差/(°)
IMU-A	8.67	11.75	3.08
IMU-B	8.98	13.9	4.91

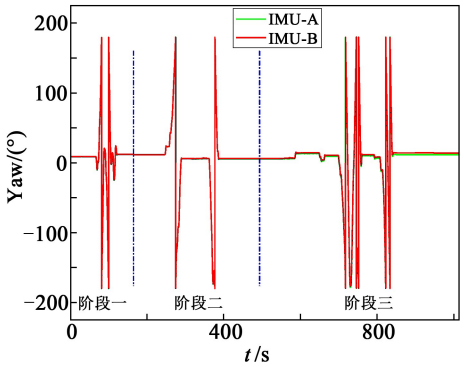


图 6 旋转航向对比

图 7、图 8 分别为挖掘机大臂旋转启动时刻和结束时刻的航向对比图。可以看出，IMU-B 的航向在启动时产生明显的航向漂移，在结束时刻其经过了小幅波动才趋于稳定。说明本文算法能有效滤除载体在运动与静止状态切换时的有害振动噪声，从而实现对载体航向的精准跟踪。

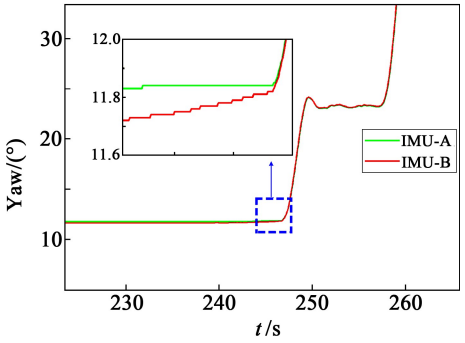


图 7 大臂旋转启动前航向

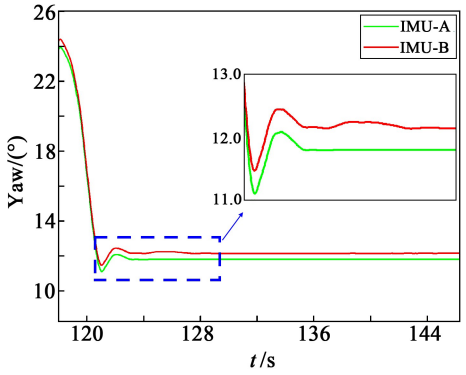


图 8 大臂旋转结束后航向

5.2 静止实验数据对比

图 9 为静止时刻航向对比图，图 10 为减去初始航向值后的对比图，从图中可以看出，IMU-B 在实验过程中航向波动较 IMU-A 更大。其中 IMU-B 的航向方差为 1.39×10^{-3}，IMU-A 的航向方差为 2.44×10^{-5}，说明本文算法有效地滤除了发动机怠速时的振动噪声，大幅提升了 IMU 航向解算的稳定性。

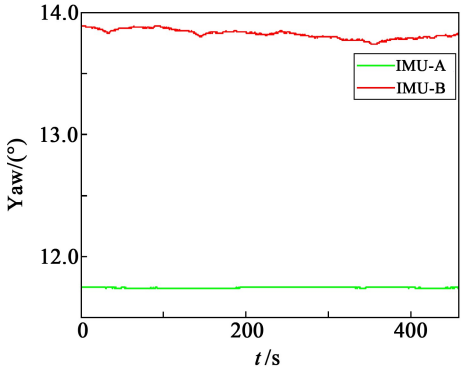


图 9 静止航向

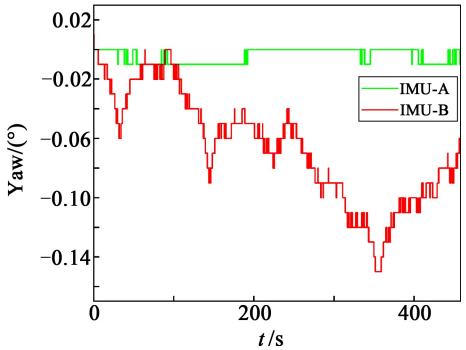


图 10 减去初始航向值

6 结论

载体振动是影响 MEMS IMU 测量精度的一个重要因素，基于最小均方和扩展卡尔曼滤波的降噪

算法是先将陀螺仪原始数据经过最小均方算法预处理、提升数据的信噪比；然后，利用互补滤波器滤除角速度零偏噪声；最后，采用扩展卡尔曼滤波进一步处理提升整体的去噪效果。实验结果证明，经过本文算法处理后航向精度与稳定性较霍胜该款商用 IMU 得到了明显的提升，其中，相对航向精度提升了 37%，静止时航向稳定性提高了 98%，说明本文算法具有实用价值。

参考文献：

[1] Shimane E, Matsumoto S, Moriguchi T, et al. The study on performance of MEMS IMU for launch vehicle under high vibration environment[J]. Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 2019, 17(4): 421-426.

[2] De Pasquale G, Somà A. Reliability testing procedure for MEMS IMUs applied to vibrating environments[J]. Sensors, 2010, 10(1): 456-474.

[3] Capriglione D, Carratu M, Catelani M, et al. Experimental analysis of filtering algorithms for IMU-based applications under vibrations[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.

[4] Maamo M S, Afonin A A, Sulakov A S. Aircraft wing vibration parameters measurement system using MEMS IMUs and closed-loop optimal correction[J]. Aerospace Systems, 2022, 5: 473-480.

[5] 刘　宇，司学迁，路永乐，等. 一种用于振动陀螺零偏抑制的复合融合算法[J]. 中国惯性技术学报，2018，26(5)：675-679.
Liu Yu, Si Xueqian, Lu Yongle, et al. A hybrid fusion algorithm in zero bias suppression of vibration gyroscope[J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2018, 26(5): 675-679.

[6] 符　强，陈孝倩，孙希延，等. 基于最小二乘法的改进卡尔曼滤波算法[J]. 桂林电子科技大学学报，2019，39(5)：345-350.
Fu Qiang, Chen Xiaoqian, Sun Xiyan, et al. An improved Kalman filter algorithm based on least square method[J]. J. of Guilin University of Electronic Technol., 2019, 39(5): 345-350.

[7] 刘孝博，陈光武，王　迪，等. MEMS 陀螺仪漂移和噪声的分析和补偿[J]. 传感技术学报，2018，31(3)：368-373.
Liu Xiaobo, Chen Guangwu, Wang Di, et al. Analysis and compensation of drift and noise in MEMS gyroscope[J]. Chinese J. of Sensors and Actuators, 2018, 31(3): 368-373.

[8] 杨　海，冯选璋，单代伟，等. 基于 UKF 与互补滤波的随钻 IMU 井斜动态测量方法[J]. 中国惯性技术学报，2022，30(2)：141-147.
Yang Hai, Feng Xuanzhang, Shan Daiwei, et al. A well deviation dynamic measurement method of while-drilling IMU based on UKF and complementary filtering[J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2022, 30(2): 141-147.

[9] 王晓初，周思杰，王　义，等. 重构小波阈值的微机电系统-惯性测量单元降噪处理[J]. 科学技术与工程，2021，21(20)：8509-8514.
Wang Xiaochu, Zhou Sijie, Wang Yi, et al. Denoising processing of micro electro mechanical system-inertial measurement unit based on reconstructed wavelet threshold[J]. Science Technol. and Engineering, 2021, 21(20): 8509-8514.

[10] 王晓初，郭帅良，刘玉县，等. 机械振动应力下 IMU 内 MEMS 传感器的抗振研究[J]. 传感器与微系统，2020，39(6)：33-36.
Wang Xiaochu, Guo Shuailiang, Liu Yuxian, et al. Research on anti-vibration of MEMS sensor in IMU under mechanical vibration stress [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6): 33-36.

[11] 李金奕，林嘉睿，杨凌辉，等. 基于小波和长短时记忆的 IMU 去噪方法[J]. 传感技术学报，2020，33(5)：677-681.
Li Jinyi, Lin Jiarui, Yang Linghui, et al. IMU de-noising method based on wavelet transform and long-short term memory[J]. Chinese J. of Sensors and Actuators, 2020, 33(5): 677-681.

[12] 任　剡，房建成，许　端. 直升机光纤陀螺 IMU 抗振设计及实时滤波方法[J]. 北京航空航天大学学报，2013，39(4)：437-441.
Ren Yan, Fang Jiancheng, Xu Duan. Anti-vibration design and real-time filter methods for FOG IMU used in helicopter[J]. J. of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(4): 437-441.

[13] 徐晓苏，吴　亮，刘义亭. 基于 LMS 与二代小波变换的光纤陀螺去噪算法[J]. 中国惯性技术学报，2014，22(6)：810-814.
Xu Xiaosu, Wu Liang, Liu Yiting. Denoising algorithm for FOG based on LMS and second-generation wavelet transform [J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2014, 22(6): 810-814.

[14] 杜建邦，何金阳，卓　超. 基于最小均方自适应算法的光纤陀螺信号实时滤波方法[J]. 中国惯性技术学报，2020，28(6)：814-818，828.
Du Jianbang, He Jinyang, Zhuo Chao. Real-time filtering method of FOG signal based on LMS adaptive algorithm[J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2020, 28(6): 814-818, 828.

作者简介：

刘　宇(1972—)，男，四川省宜宾市人，博士，教授，主要从事惯性传感器与自主定位研究。