



电子测量与仪器学报
Journal of Electronic Measurement and Instrumentation
ISSN 1000-7105, CN 11-2488/TN

《电子测量与仪器学报》网络首发论文

题目: 小波变换法在姿态解算中的应用
作者: 刘春, 刘滔, 张海燕, 卫吉祥, 汪志宁
网络首发日期: 2020-12-30
引用格式: 刘春, 刘滔, 张海燕, 卫吉祥, 汪志宁. 小波变换法在姿态解算中的应用. 电子测量与仪器学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2488.tn.20201229.1703.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

小波变换法在姿态解算中的应用

刘春 刘滔 张海燕 卫吉祥 汪志宁

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要：在惯性导航系统中，为提高陀螺仪的姿态测量精度，抑制低频噪声的影响，提出采用小波变换法融合陀螺仪、加速度计数据解算姿态角。本文首先将陀螺仪采集的数据进行 2 层小波分解，剔除低频分量和不稳定的信号，并和低频分量重构，得到滤波后的陀螺仪数据。然后利用加速度计采集的数据解算姿态角，用来不断迭代初始四元数，由初始四元数求出重力向量，再由重力向量叉积求出误差，并作 PID 控制来修正陀螺仪的角度。最后把修正和滤波后的陀螺仪数据用龙格库塔法计算新的四元数，用该四元数进行负增益调节，最终解算出精确的姿态角。仿真结果表明，解算姿态角的精度提高了 80% 左右，可以有效地抑制低频噪声，更加精确地计算姿态角，从而进一步提高导航系统的定位精度。

关键词：惯性导航系统；小波变换法；姿态角；龙格库塔法；四元数法

中图分类号：TN967.1 文献标识码：A 国家标准学科分类代码：420.1010

Application of wavelet transform method in attitude calculation

Liu Chun Liu Tao Zhang Haiyan Wei Jixiang Wang Zhining

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the inertial navigation system, in order to improve the attitude measurement accuracy of the gyroscope and suppress the influence of low-frequency noise, the wavelet transform method is used to fuse the gyroscope and accelerometer data to solve the attitude angle. In this paper, the data collected by the gyroscope is firstly decomposed into two layers of wavelets to remove low-frequency components and unstable signals, and reconstructed with high-frequency components to obtain filtered gyroscope data. Then use the data collected by the accelerometer to calculate the attitude angle, which is used to continuously iterate the initial quaternion, find the gravity vector from the initial quaternion, and then find the error from the cross product of the gravity vector, and perform PID control to correct the gyroscope's angle. Finally, the corrected and filtered gyro data are used to calculate the new quaternion using the Runge-Kutta method, and the quaternion is used to adjust the negative gain, and finally the accurate attitude angle is calculated. The simulation results show that the accuracy of calculating the attitude angle is increased by 80%, which can effectively suppress low-frequency noise and calculate the attitude angle more accurately, thereby further improving the positioning accuracy of the navigation system.

Keywords: Inertial navigation system; wavelet transform; attitude angle; runge kuta; quaternion method

0 引言

惯性导航 (Inertial Navigation) 是 20 世纪中期发展起来的完自主式的导航技术^[1]，也是一门涉及精密机械、计算机技术、微电子、光学、自动控制等多种学科和领域的综合技术^[2]。它以其自主性强、隐蔽性好及抗干扰等优点，广泛应用在航空、航天、航海和车辆导航等领域^[3-4]。姿态解算是惯性导航系统及其他姿态监测控制系统的重要组成部分，其解算精度会直接影响惯性导航系统和其他姿态控制系统

的控制精度^[5]。惯性导航系统通过惯性测量组件 (加速度计和陀螺仪) 测量载体相对惯性空间的角速率和加速度信息来推算位置与姿态角^[6-8]，但陀螺仪易受低频噪声影响，且漂移误差比较大，导致姿态角解算不够准确，影响导航系统的精度。因此，在高精度的惯性导航系统中，解算姿态角时，必须有效地抑制低频噪声，并修正陀螺仪漂移。

针对如何更加准确地解算姿态角，许多学

者已取得重大成果。如孙蔚蓝等人^[9]提出对陀螺仪、加速度计和磁力计结合解算出两组姿态角,再将两组姿态角进行融合可以得到高精度的姿态值,但该方法必须需要磁力计的辅助。时琦^[10]提出对 IMU 数据融合补偿修正来解算姿态角,只能应用于精度比较低的导航系统,无法满足高精度要求。黎永键等人^[11]提出利用陀螺仪测得的角速度更新前一步的姿态角,结合加速度计对重力矢量的观测修正陀螺仪的姿态信息,可以准确地得到实时水平姿态角,但没有消除陀螺仪的噪声影响。权等人^[12]将 Runge-Kuta 算法应用到姿态角解算中,只降低了姿态角算法结构的复杂度,并没有解决陀螺仪和加速度计的误差问题。

基于以上研究,本文提出采用小波变换法融合陀螺仪、加速度计数据解算姿态角,可以有效地抑制低频噪声,修正陀螺仪的角度,进一步提高导航系统的精度。该方法首先将陀螺仪采集的数据进行 2 层小波分解,剔除低频分量和不稳定的信号,并和低频分量重构,得到滤波后的陀螺仪数据。然后利用加速度计采集的数据解算姿态角,用来不断迭代初始四元数,由初始四元数求出重力向量,再由重力向量叉积求出误差,并作 PID 控制来修正陀螺仪的角度。最后把修正和滤波后的陀螺仪数据用龙格库塔法计算新的四元数,用该四元数进行负增益调节,最终解算出精确的姿态角。

1 姿态解算原理

载体相对于空间某个参考系的方向或者指向称为姿态,此姿态也可以理解为两个坐标系间的旋转变换关系^[13]。通常用航向角、俯仰角以及横滚角来描述载体的姿态。

1.1 四元数法解算姿态角

解算姿态角的方法通常有三种:欧拉角法、四元数法和方向余弦法,而欧拉角法和方向余弦法都有缺点,欧拉角法存在奇异点,方向余弦法计算量太大,因此四元数法更常用于解算姿态角。

四元数的数学公式如式 (1) 所示

$$\vec{q} = q_0 + q_1\vec{i} + q_2\vec{j} + q_3\vec{k} \quad (1)$$

式中, q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 是常数, \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 是互相正交的单位向量。

根据四元数定义,得到变换矩阵 R 如式 (2)

所示。

$$R =$$

$$\begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_2 - q_1q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

坐标轴 x 、 y 、 z 可以有 12 种欧拉转动顺序,本文用的是 z - x - y 非对称旋转,即 x 轴的旋转的欧拉角为滚动角,绕 z 轴旋转的欧拉角为俯仰角,绕 y 轴旋转的欧拉角为航向角。由欧拉角表示的四元数如式 (3) 所示。

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \\ q_1 &= \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \\ q_2 &= \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \\ q_3 &= \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, ψ 表示航向角, θ 表示俯仰角, φ 表示横滚角。

根据式 (3) 可以得到四元数表示的欧拉角如式 (4) 所示。

$$\begin{aligned} \psi &= \arctan\left(\frac{2q_1q_2 + 2q_0q_3}{1 - (q_2^2 + q_3^2)}\right) \\ \theta &= -\arcsin(2q_1q_3 - 2q_0q_2) \\ \varphi &= \arctan\left(\frac{2q_1q_0 + 2q_2q_3}{1 - (q_1^2 + q_2^2)}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 龙格库塔法求解四元数

龙格库塔法是常用解微分方程的方法,可以应用于解算四元数四个参数。文中使用一阶龙格库塔法解算 q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 , 计算公式如式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} q_0 &= q_0 - (q_1w_x + q_2w_y + q_3w_z) * \frac{T}{2} \\ q_1 &= q_1 - (q_3w_y - q_2w_z - q_0w_x) * \frac{T}{2} \\ q_2 &= q_2 - (q_1w_z - q_0w_y - q_3w_x) * \frac{T}{2} \\ q_3 &= q_3 - (q_2w_x - q_1w_y - q_0w_z) * \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, w_x 表示陀螺仪 x 轴的角速度, w_y 表示陀螺仪 y 轴的角速度, w_z 表示陀螺仪 z 轴的角

速度，T 表示测量周期。

1.3 由加速度计解算姿态角

在运动不剧烈的情况下，假设世界坐标系下重力加速度为 $g = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ，使用定则，大拇指分别指向陀螺仪 X、Y、Z，可以得出姿态角如式（6）、（7）、（8）。

$$\psi = \arctan \left(\frac{\frac{y}{g}}{\sqrt{\left(\frac{x}{g}\right)^2 + \left(\frac{z}{g}\right)^2}} \right) \quad (6)$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\frac{x}{g}}{\sqrt{\left(\frac{x}{g}\right)^2 + \left(\frac{z}{g}\right)^2}} \right) \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\frac{y}{g}}{\sqrt{\left(\frac{x}{g}\right)^2 + \left(\frac{z}{g}\right)^2}} \right) \quad (8)$$

式中 x、y、z 分别为加速度计的三轴加速度。

1.4 由加速度计和陀螺仪互补解算姿态角

在运动不剧烈的情况下，可认为加速度计测出的加速度表示重力加速度 g，根据这一特性可以解算出姿态角。将姿态角代入式（3），求得初始四元数，从四元数中获取重力向量如式（9）所示。

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中， v_x 、 v_y 、 v_z 分别表示三轴的重力向量。由重力向量叉积求出误差如式（10）所示。

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_y * v_z - a_z * v_y \\ a_z * v_x - a_x * v_z \\ a_x * v_y - a_y * v_x \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， e_x 、 e_y 、 e_z 分别表示三轴的误差， a_x 、 a_y 、 a_z 分别表示三轴的加速度。

用上述求出的误差来修正陀螺仪，再利用修正后的陀螺仪角度更新四元数，最后将四元数转换为姿态角。

2 小波变换理论

小波分析法是数据处理领域中常用的时频分析方法，能够将信号用不同特性的小波基函数表示，进而获取信号的多分辨率特性，在时频域都有表征信号局部特征的能力^[14]。在低频部分，具有较高的频率分辨率和较低的时间；

在高频部分，具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率^[15]。因此，小波变换法是一种频域分析和时域分析的理想数学工具。

2.1 小波变换原理

对于任意的 $\psi(t) \in L^2(R)$ ，其傅里叶变换为 $\psi(w)$ ， $\psi(t)$ 满足式（11）条件时，称为一个基本小波或者母小波。

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (11)$$

还需满足普通函数的约束条件如式（12）所示。

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (12)$$

用函数经过平移和伸缩得到式（13）所示。

$$\bar{\psi}_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (13)$$

式中，a 称为伸缩因子，b 称为平移因子。

对于任意的函数 $f(t)$ 的小波变换如式（14）所示。

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}_{(a,b)}(t) dt = \frac{1}{|a|} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (14)$$

小波方差如式（15）所示。

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (15)$$

式中， $W_f(a)$ 为小波方差， $W_f(a, b)$ 为小波系数。

小波变换重构表达式如式（16）所示。

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (16)$$

2.2 常用的小波基函数

Daubechies 小波世界著名的小波分析学者 Inrid · Daubechies 在尺度为 2 的整数幂条件下经过深层次探究小波变换中提出的^[16]。

Daubechies 系列小波简称为 dbN，N 为小波的阶数。小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 中的支撑区为 $2N-1$ ， $\psi(t)$ 的消失矩为 N ^[17]，随着阶数增大，消失矩阶数越大，频带划分效果越好。当 N=1 就是 haar 小波，是小波分析中最早的简单正交小波基函数之一，具有紧支撑和正交性^[18]，除了 haar 小波，dbN 不具有对称性，db 系列小波不具有解析形式的表达式，但转换函数 h 的平方模是明确的。

$$p(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k \quad (17)$$

式中 C_k^{N-1+k} 为二项式系数，则有：

$$|m_0(w)| = (\cos^2 \frac{w}{2}) p(\sin^2 \frac{w}{2}) \quad (18)$$

$$\text{其中: } m_0(w) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-jkw} \quad (19)$$

db3 如图 1 所示。

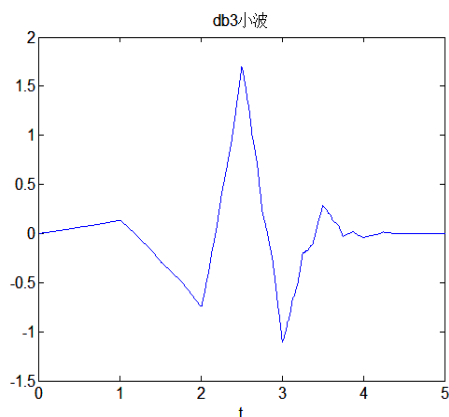


图 1 db3 小波图

Fig.1 db3 wavelet chart

2.3 小波去噪原理

小波去噪是将传感器的原始信号通过高通和低通滤波器，使信号分解为高频和低频分量，接着对低频分量继续分解，实现小波的多尺度变换^[19]。借助小波的分解和重构技术，可以有效地滤除观测信号中的噪声，提高数据的可靠性^[20]。本文对陀螺仪的原始数据用 db3 小波进行 2 层分解，剔除低频噪声，之后再信号重构得到新的陀螺仪数据。小波分解的原理图如图 2 所示，陀螺仪的原始角速度数据如图 3 所示，新的角速度数据如图 4 所示。

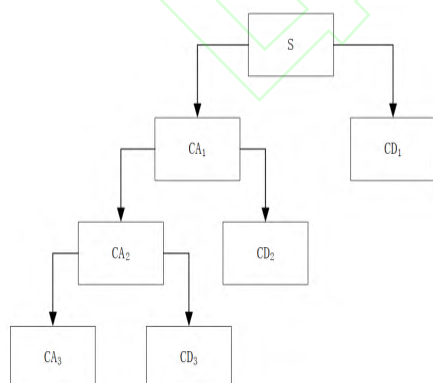


图 2 小波分解原理图

Fig.2 Schematic diagram of wavelet decomposition

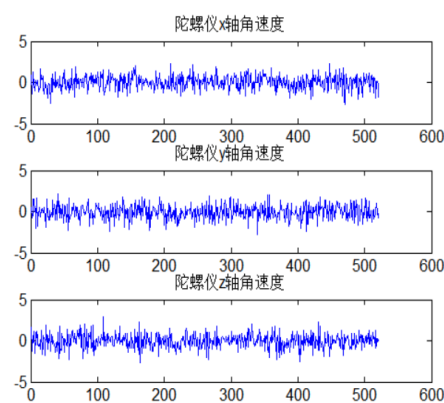


图 3 陀螺仪原始角速度图

Fig.3 Gyro original angular velocity diagram

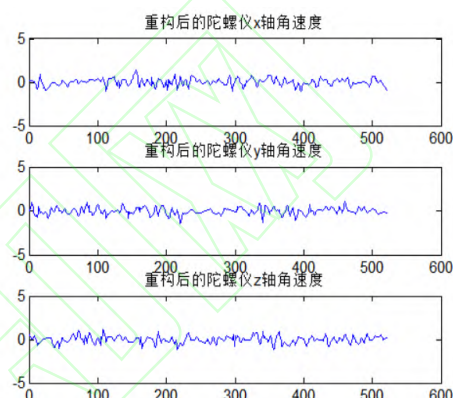


图 4 重构后陀螺仪角速度图

Fig.4 Angular velocity diagram of gyro after reconstruction

3 基于小波变换与 PID 控制的互补滤波结构

3.1 常规的互补滤波结构

常规的互补滤波如图 5 所示，利用加速度计数据和四元数求出的重力向量进行向量叉积求出误差修正陀螺仪角度，进而解算姿态角，并且利用姿态角计算的四元数进行负增益调节。

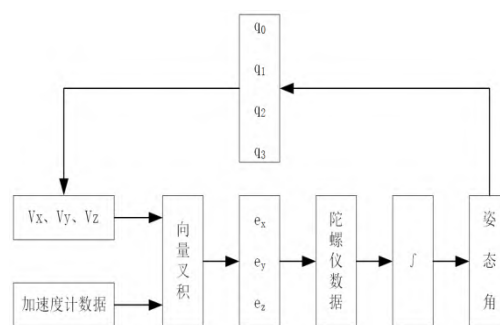


图 5 常规互补滤波结构框图

Fig.5 Block diagram of conventional complementary filtering

3.2 改进的互补滤波结构

在常规的互补滤波中,陀螺仪采集的数据没有滤去噪声以及漂移的误差,在这些因素影响下,陀螺仪的角速度始终出现误差,导致解算出来的姿态角精度低。因此,文中使用改进的互补滤波结构如图 6 所示。

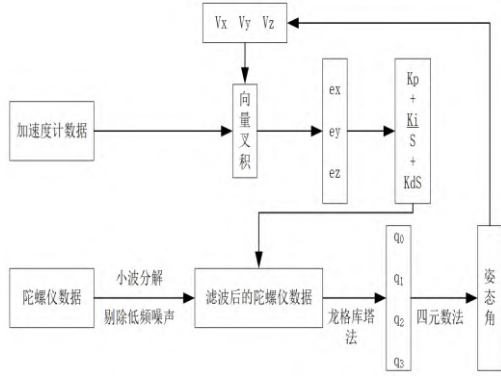


图 6 改进的互补滤波结构框图

Fig.6 Improved complementary filter structure block diagram

3.3 基于小波变换的姿态解算方法

该方法首先将陀螺仪采集的数据进行 2 层小波分解,剔除低频分量和不稳定的信号,并和低频分量重构,得到滤波后的陀螺仪数据。然后利用加速度计采集的数据解算姿态角,用来不断迭代初始四元数,由初始四元数求出重力向量,再由重力向量叉积求出误差,并作 PID 控制来修正陀螺仪的角度。最后把修正和滤波后的陀螺仪数据用龙格库塔法计算新的四元数,用该四元数进行负增益调节,最终解算出精确的姿态角。程序流程图如图 7 所示。

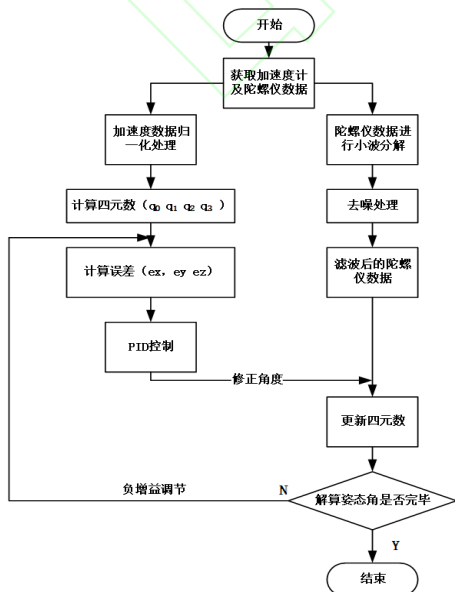


图 7 程序流程图

Fig.7 program flow chart

4 实验仿真分析

本文采用 6 轴的惯性传感器 MPU6050 获得加速度计和陀螺仪数据,并用 Matlab 软件对测得数据进行仿真分析。实验用 5 种方法解算姿态角,图 8 单独用加速度计解算姿态角称为方法 1,图 9 单独用陀螺仪解算姿态角称为方法 2,图 10 用加速度计辅助陀螺仪解算姿态角称为方法 3,图 11 用加速度计结合 PID 控制辅助陀螺仪解算姿态角称为方法 4,文中将 PID 控制的参数设置为 $K_p = 1$, $K_i = 0.02$, $K_d = 0.5$,图 12 用加速度计结合 PID 控制辅助滤波后的陀螺仪解算姿态角称为方法 5,分析这 5 种方法解算的姿态角情况,得到不同方法下的解算效果。

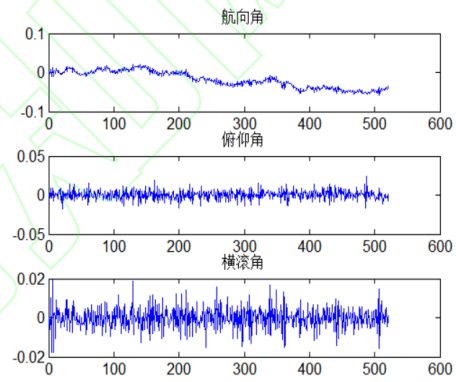


图 8 方法 1 解算姿态角

Fig.8 Method 1 solve the attitude angle

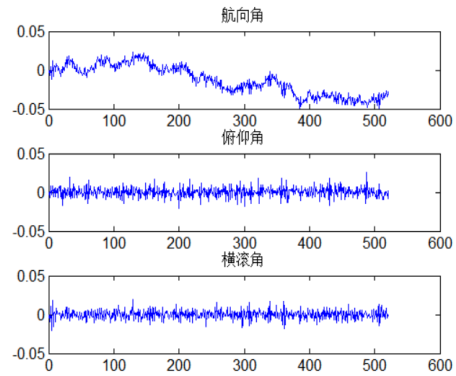


图 9 方法 2 解算姿态角

Fig.9 Method 2 solve the attitude angle

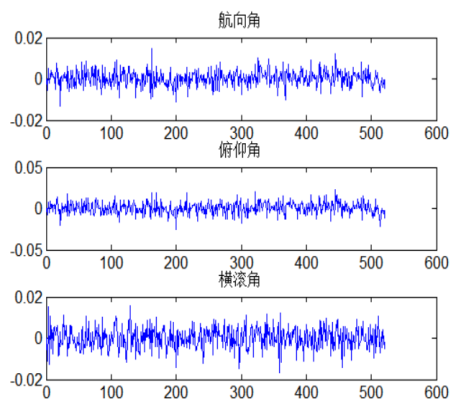


图 10 方法 3 解算姿态角

Fig.10 Method 3 solve the attitude angle

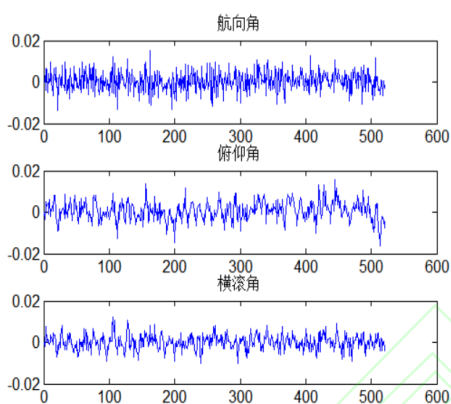


图 11 方法 4 解算姿态角

Fig.11 Method 4 solve the attitude angle

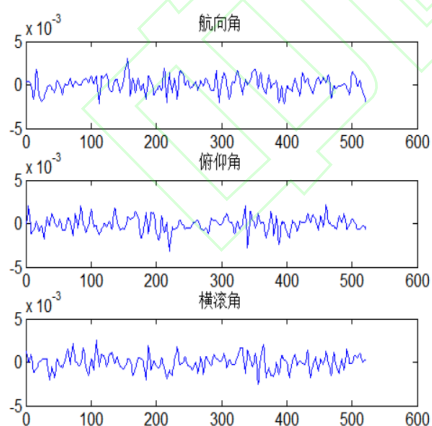


图 12 方法 5 解算姿态角

Fig.12 Method 5 solve the attitude angle

4.1 方法对比

表 1 航向角分析

Table 1 Heading angle analysis

方法	波动范围/度	最大角度误差 / 度
方法 1	-0.1~0.1	0.0802
方法 2	-0.05~0.05	0.0728
方法 3	-0.02~0.02	0.0291
方法 4	-0.02~0.02	0.0202
方法 5	-0.0005~0.0005	0.0052

从表 1 中可以看出,单独使用加速度计和陀螺仪解算航向角波动范围比较大,用加速度计辅助陀螺仪解算航向角波动范围会变小,融合 PID 控制和滤波算法之后,解算航向角波动范围会更小,最大角度误差也会越来越小,渐渐趋于稳定,提高了航向角的解算精度。

表 2 俯仰角分析

Table 2 Pitch angle analysis

方法	波动范围/度	最大角度误差 / 度
方法 1	-0.05~0.05	0.0412
方法 2	-0.05~0.05	0.0359
方法 3	-0.05~0.05	0.0441
方法 4	-0.02~0.02	0.0317
方法 5	-0.0005~0.0005	0.0054

表 3 横滚角分析

Table 3 Roll angle analysis

方法	波动范围/度	最大角度误差 / 度
方法 1	-0.02~0.02	0.0373
方法 2	-0.05~0.05	0.0394
方法 3	-0.02~0.02	0.0285
方法 4	-0.02~0.02	0.0223
方法 5	-0.0005~0.0005	0.0051

从表 2 和表 3 可以看出,俯仰角与横滚角分析同航向角一样,融合 PID 控制和滤波算法后,解算姿态角波动范围会更小,最大角度误差也会越来越小,进一步提高解算的精度。

5 结论

在惯性导航系统中,陀螺仪常常会受低频噪声和漂移误差的影响,导致解算的姿态角精度变低。因此本文首先将陀螺仪采集的数据进行 2 层小波分解,剔除低频分量和不稳定的信号,得到滤波后的陀螺仪数据。然后利用加速度计解算姿态角,不断迭代初始四元数,由四元数求出重力向量,再由重力向量叉积求出误差

差, 并作 PID 控制来修正陀螺仪的角度。最后把修正和滤波后的陀螺仪数据用龙格库塔法计算新的四元数, 用该四元数进行负增益调节, 最终解算出精确的姿态角。通过仿真研究发现, 融合 PID 控制和滤波算法之后, 用加速度计辅助陀螺仪解算姿态角的误差会更小, 明显提高了导航系统的精度。

参考文献

- [1] 周徐昌, 沈建森. 惯性导航技术的发展及其应用[J]. 兵工自动化, 2006(9):55-56+59.
ZHOU X CH, SHEN J S. Development and application of inertial navigation technology [J]. Ordnance Industry Automation, 2006 (9): 55-56 + 59.
- [2] 董进武. 惯性导航技术浅析[J]. 仪表技术, 2017(1):41-43.
DONG J W. Analysis of inertial navigation technology [J]. Instrument Technology, 2017 (1): 41-43.
- [3] 贾勇, 秦永元, 李岁劳, 侯震. 用于短时定位的 MEMS 旋转调制惯性导航系统[J]. 传感技术学报, 2018,31(6):963-968.
JIA Y, QIN Y Y, LI S L, HOU ZH. MEMS rotation modulation inertial navigation system for short-term positioning [J]. Journal of Sensor Technology, 2018,31 (6): 963-968.
- [4] 叶松. 惯性技术在航空航天领域中的应用[J]. 决策探索(中), 2018(7):74-75.
YE S. Application of inertial technology in the field of aerospace [J]. Exploration of Decision (Middle), 2018 (7): 74-75.
- [5] 李庆党, 张义龙. 基于卡尔曼滤波和互补滤波的改进型姿态解算方法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2019,40(6):85-89+98.
LI Q D, ZHANG Y L. Improved attitude solution method based on Kalman filtering and complementary filtering [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,40 (6): 85-89 + 98.
- [6] 温泉. 浅析惯性导航技术的应用和发展[J]. 中国设备工程, 2019(20):153-154.
WEN Q. Analysis of the application and development of inertial navigation technology [J]. China Equipment Engineering, 2019 (20): 153-154.
- [7] 李光耀. 捷联式惯性导航误差标定和补偿技术研究[D]. 西安工业大学, 2019.
LI G Y. Research on strapdown inertial navigation error calibration and compensation technology [D]. Xi'an Technological University, 2019.
- [8] 侯亮. 惯导旋转调制姿态误差模型研究[D]. 中国地质大学(北京), 2019.
HOU L. Research on inertial navigation rotation modulation attitude error model [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [9] 孙蔚蓝, 钱莉. 基于 MEMS 和卡尔曼滤波的姿态解算研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(1):1-3.
SUN W L, QIAN L. Research on attitude calculation based on MEMS and Kalman Filter [J]. Automation and Instrumentation, 2018 (1): 1-3.
- [10] 时琦. 基于 MPU6050 的四轴飞行器姿态角解算[J]. 科学技术创新, 2019(4):38-39.
SHI Q. Solution of attitude angle of four-axis aircraft based on MPU6050 [J]. Science and Technology Innovation, 2019 (4): 38-39.
- [11] 黎永键, 赵祚喜, 高俊文. MEMS 惯性传感器融合的水平姿态解算方法[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2015,15(2):20-26.
Li Yongjian, Zuo Zuoxi, Gao Junwen. Horizontal attitude solution method for MEMS inertial sensor fusion [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering Technology Edition), 2015,15 (2): 20-26.
- [12] 黄权, 李立欣, 高昂, 张会生. 基于 Runge-Kutta 法的小型无人机姿态角算法研究[J]. 电子设计工程, 2017,25(11):133-136.
HUANG Q, LI L X, GAO A, ZHANG H SH. Research on the attitude angle algorithm of small UAV based on Runge-Kutta method [J]. Electronic Design Engineering, 2017,25 (11): 133-136.
- [13] 王冰. 基于 GNSS 的实时姿态确定算法研究[D]. 解放军信息工程大学, 2013.
WANG B. Research on real-time attitude determination algorithm based on GNSS [D].

- PLA Information Engineering University, 2013.
- [14] 倪培德. GPS 动态观测中的小波分析[J]. 甘肃科学学报, 2020,32(2):69-73+90.
- NI P D. Wavelet analysis in GPS dynamic observation [J].Journal of Gansu Sciences, 2020,32 (2): 69-73 + 90.
- [15] 方俊杰, 鲍陈辰, 方喆伟, 施利涛. 小波分析在 GPS 动态观测中的应用研究[J]. 工程勘察, 2019,47(11):66-70.
- FANG J J, BAO CH CH, FANG ZH W, SHI L T. Application research of wavelet analysis in GPS dynamic observation [J].Engineering Survey, 2019,47 (11): 66-70.
- [16] 曲俊海, 夏元清, 李静, 王海稳. 一种基于 Haar 小波的光纤陀螺信号实时滤波方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019,27(5):677-683.
- QU J H, XIA Y Q, LI J, WANG H W. A real-time filtering method of optical fiber gyro signal based on Haar wavelet [J].Chinese Journal of Inertial Technology, 2019,27 (5): 677-683.
- [17] 辛元明, 谭峰, 田芳明. 基于小波变换的植物电信号降噪方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(12):190-196.
- XIN Y M, TAN F, TIAN F M. Research on noise reduction method of plant electrical signal based on wavelet transform [J] .Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019,33 (12): 190-196.
- [18] 谭曦光. 基于小波变换的北斗周跳修复方法[D]. 西南交通大学, 2017.
- TAN X G. A method of repairing Beidou cycle slip based on wavelet transform [D]. Southwest Jiaotong University, 2017.
- [19] 杨勇, 方针, 方海斌, 李星海. 基于小波去噪的 MEMS 陀螺仪随机误差校准算法[J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2020,32(1):99-104.
- YANG Y, FANG ZH, FANG H B, LI X H.A Random error calibration algorithm of MEMS gyroscope based on wavelet denoising [J] .Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020,32 (1): 99-104.

- [20] 王超超, 彭勇, 廖毅, 赵涤凡. ECG 信号改进阈值函数小波去噪算法研究[J]. 电子技术与软件工程, 2020(1):74-75.

WANG CH CH, PENG Y, LIAO Y, ZTAO D F. Research on ECG signal improved threshold function wavelet denoising algorithm [J].Electronic Technology and Software Engineering, 2020 (1): 74-75.

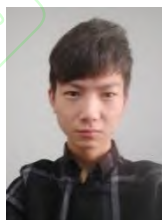
作者简介



刘春 (通讯作者), 1988 年于哈尔滨理工大学获工学学士学位, 1996 年于浙江大学硕士学位, 现为合肥工业大学副教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、电工理论与新技术。

E-mail:hfliuchun@126.com.

Liu Chun (corresponding author) received a bachelor's degree in engineering from Harbin University of Science and Technology in 1988 and a master's degree from Zhejiang University in 1996. He is currently an associate professor at Hefei University of Technology. His research interests include testing technology and automation equipment, electrical theory and new technology.



刘滔, 2014 年于安徽工程大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail:1067850675@qq.com.

Liu Tao received his bachelor's degree from Anhui University of Engineering in 2014. He is currently a graduate student at Hefei University of Technology. His research interests include testing technology and automation equipment.



张海燕 (通讯作者), 2012 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学讲师, 研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:zhyzhy-000@189.cn

Zhang Haiyan (corresponding author), obtained a Ph.D. from Hefei University of Technology in 2012, and is currently a lecturer at Hefei University of Technology, with research interests in power electronics and power transmission.

