

基于改进小波降噪的 MEMS 间接粗对准方法研究

陈光武^{*1,2}, 程鉴皓^{1,2}, 李少远³, 李文元^{1,2}, 张琳婧^{1,2}

1. 兰州交通大学自动控制研究所, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃省高原交通信息工程及控制重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

摘要: 当前 MEMS 惯性传感器陀螺仪精度较低导致输出信噪比较小, 使得 MEMS 捷联惯导系统初始对准误差较大, 初始偏移明显, 影响后续的解算精度, 定位信息不准确. 为此提出了一种利用改进阈值函数的小波对原始数据降噪处理后再采用磁强计辅助的 MEMS 间接粗对准的方法, 通过引入调节系数使阈值函数同时具备软阈值和硬阈值两种特性, 使得改进后的小波函数在远离阈值处有明显的边缘特性, 而在靠近阈值的地方具有较好的连续性, 避免信号重构时产生突变, 有效减少了使用单一软阈值或硬阈值的局限性. 为了避免陀螺仪精度对初始对准结果的影响而采用磁强计辅助对准, 利用小波阈值降噪来对加速度计与磁强计的原始数据进行降噪处理后再进行姿态解算, 提高了初始对准精度.

关键词: MEMS; 初始对准; 小波降噪; 小波阈值函数; 姿态解

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201903015

0 引言

惯性导航系统是一种不依赖外部输入信息也不向外辐射能量的高自主式导航系统, 因其不受工作环境限制, 且成本低、体积小、功耗低、动态范围宽, 因而在民用和军用方面都有广泛的应用^[1]. 作为导航数据解算的基础, 初始对准的精度和速度将直接影响后续位置解算的准确性. 一般来说捷联惯导系统主要依靠陀螺仪提供的地球自转角速度与加速度计提供的重力加速度来进行自对准, 但由于国外对该类器件实行出口限制, 而国内基于 MEMS 的陀螺仪存在信噪比低、漂移大等问题, 直接影响了捷联惯导系统初始对准的准确性和可行性^[1].

捷联惯导系统具有重要的实用价值, 因而国内外有许多专家学者也在研究其初始对准方式以期提高精度和对准速度. 文献[1]提出了一种基于小波降噪的 MEMS 惯导系统对准方法, 通过对磁强计和加速度计进行小波去噪, 减小了数据误差, 但计算航向角的过程较为复杂; 文献[2]提出了一

种磁强计辅助基于 MEMS 惯性器件 SINS 的初始对准方法, 通过构造 3 个相互正交的向量间接对准, 减小了计算量; 文献[3]提出了一种捷联惯导系统双矢量定姿的方法; 文献[4]提出了一种基于线性最优控制的捷联惯导对准方法; 文献[5]提出一种介于软硬阈值间的阈值函数, 但其在接近阈值处连续但不平滑过渡, 所以存在高阶不可导的问题; 文献[6]提出一种模糊小波技术降噪方法, 通过对模糊小波分解后的调节系数进行阈值调整以获得对信噪比较小信号的去噪处理.

基于以上研究, 本文设计一种基于改进阈值小波降噪的 MEMS 间接粗对准方法, 通过引入调节系数对阈值进行调整, 使得改进后的小波函数在远离阈值处有明显的边缘特性, 而在靠近阈值的地方具有较好的连续性, 避免信号重构时产生突变. 对加速度计和磁强计数据进行去噪处理后通过合理构造正交矢量减小初始对准时的姿态角计算量, 以提高对准精度和对准速度, 并对该方法进行仿真实验和半实物仿真实验验证.

收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2019-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61863024); 甘肃省高等学校科研项目(2018C-11); 甘肃省自然科学基金资助项目(18JR3RA107, 1610RJYA034); 甘肃省科技计划资助项目(18CX3ZA004); 甘肃省重点研发计划资助项目(17YF1WA158).

作者简介: 陈光武*(1976-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, E-mail: cgwyjh1976@126.com; 程鉴皓(1995-), 男, 硕士生, E-mail: cjhwww2005@163.com.

1 惯导系统间接粗对准

惯导系统的对准分为粗对准和精对准两个阶段.粗对准方式主要参考地球重力加速度、自转角速度等地球自身的固有属性通过解析的方法进行初始对准,这样能够在较短的时间内进入到对准状态,并且粗对准方式具有较强的自主性,不依赖外部数据输入,但其精度相较于精对准较低;精对准方式是在粗对准的基础上引入外部参考信号来提高对准精度,常用的外部信号有光学对准信号或 GPS 信号,大大提高了初始对准的精确性.粗对准方法又包括解析粗对准和间接粗对准两种方法,解析粗对准是利用这一时刻地球自身的重力矢量和自转角速度矢量直接求解这一时刻的姿态角;而间接粗对准则是利用两个时刻的测量值通

$$\mathbf{C}_b^n = (\mathbf{C}_n^b)^T = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

该方向余弦矩阵是正交矩阵,可求出

$$\mathbf{C}_b^n = (\mathbf{C}_n^b)^T = \begin{pmatrix} \cos \gamma \cos \varphi - \sin \gamma \sin \varphi \sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi & \sin \gamma \cos \varphi + \cos \gamma \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \gamma \sin \varphi + \sin \gamma \cos \varphi \sin \theta & \cos \theta \cos \varphi & \sin \gamma \sin \varphi - \cos \gamma \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \gamma \cos \theta & \sin \theta & \cos \gamma \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: φ 为航向角, θ 为俯仰角, γ 为滚转角.在捷联惯导系统中加速度计的各敏感轴沿载体各坐标系轴向安装^[2].在进行初始准时,加速度计输出的加速度值到东北天导航坐标系中的变换关系为

$$\mathbf{f}^b = \mathbf{C}_n^b \mathbf{g}^n \quad (3)$$

式中: $\mathbf{f}^b = (f_x \quad f_y \quad f_z)^T$,是加速度计测量出的三轴加速度的分量; $\mathbf{g}^n = (0 \quad 0 \quad g)^T$,为当地重力矢量, g 为当地重力加速度.

由上述两式只能得到俯仰角 θ 和滚转角 γ ,要想求出航向角 φ 还需要引入其他传感器的数据辅助解算.本文中引入磁强计辅助解算.

三轴磁强计的 3 个敏感轴沿载体坐标系各个轴向进行安装,利用不同方向上的磁场强度分量就可以确定载体坐标系与导航坐标系之间的转换关系^[8]:

$$\mathbf{M}^b = \mathbf{C}_n^b \mathbf{M}^n \quad (4)$$

$$\mathbf{M}^n = \begin{pmatrix} m_x^n \\ m_y^n \\ m_z^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_0 \sin \alpha \\ H_0 \cos \alpha \\ -H_0 \tan \beta \end{pmatrix} \quad (5)$$

过双矢量定姿算法先求解出姿态矩阵,再利用姿态矩阵来求解姿态角.相较于解析粗对准,间接粗对准具有很好的抗角晃动干扰的能力,但是在短时间内抗线晃动的能力较弱,所以一般需适当延长其初始粗对准时间以获得更好的对准效果^[7].本文采用的方式是间接粗对准,与一般的粗对准方式不同,本文用于构建正交矢量求解姿态矩阵的是重力矢量和磁场强度矢量,这样从数据来源上以较为稳定且较易测量的磁场强度矢量代替了因器件精度而导致误差较大的角速度矢量,提高了初始对准的精度.

惯导系统在进入导航状态前首先要建立初始时刻载体坐标系(b系)转换到导航坐标系(n系)的初始姿态矩阵 \mathbf{C}_b^n .由文献[2]可知从b系到n系的方向余弦矩阵为

式中: $\mathbf{M}^b = (m_x^b \quad m_y^b \quad m_z^b)^T$,为载体坐标系下的三维磁场强度; \mathbf{M}^n 为导航坐标系下的三维磁场强度; H_0 为当地水平磁场强度, α 为地磁偏角, β 为磁倾角^[2],可查询当地地理信息得知.为了计算方向余弦矩阵需再构造两个正交向量: $\mathbf{f}^b \times \mathbf{M}^b$ 和 $(\mathbf{f}^b \times \mathbf{M}^b) \times \mathbf{f}^b$.根据 $Ox_b y_b z_b$ 到 $Ox_n y_n z_n$ 的转换关系可以得出

$$\begin{pmatrix} \mathbf{f}^n & \mathbf{f}^n \times \mathbf{M}^n & (\mathbf{f}^n \times \mathbf{M}^n) \times \mathbf{f}^n \\ \mathbf{C}_b^n (\mathbf{f}^b & \mathbf{f}^b \times \mathbf{M}^b & (\mathbf{f}^b \times \mathbf{M}^b) \times \mathbf{f}^b) \end{pmatrix} = \quad (6)$$

将上式变换后可得

$$\mathbf{C}_b^n = ((\mathbf{f}^b \quad \mathbf{f}^b \times \mathbf{M}^b \quad (\mathbf{f}^b \times \mathbf{M}^b) \times \mathbf{f}^b) \times (\mathbf{f}^n \quad \mathbf{f}^n \times \mathbf{M}^n \quad (\mathbf{f}^n \times \mathbf{M}^n) \times \mathbf{f}^n)^{-1})^T \quad (7)$$

将式(7)与式(2)联立即可得出初始对准的航向角、俯仰角和滚转角.其中俯仰角 θ 与滚转角 γ 可直接由下式得出:

$$\theta = \arcsin(f_x/g) \quad (8)$$

$$\gamma = \arccos(-f_z/g \cos \theta)$$

将求出的俯仰角与滚转角代入式(2)与(7)的联立式中即可得航向角 φ .

2 小波阈值降噪

2.1 小波变换原理

小波变换是在傅里叶变换的基础上,继承了短时傅里叶变换(STFT)的思想而发展起来的一种新的数学分析方法.相对于傅里叶变换乃至短时傅里叶变换来说小波变换可以对信号进行不同尺度的多分辨率分解,有效分辨出有效信号与无效噪声,在工程实践上有着广泛的应用.

假设 $f(t) = \{x_t, t=0, 1, \dots, N-1\}$ 是一组离散信号序列,对 $f(t)$ 进行离散小波变换.采用母小波 $\psi(t)$ 进行尺度变换及平移处理,设 a 为尺度参数, b 为平移参数,则 a 与 b 的离散化公式可写为 $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$, 其中 $j \in \mathbf{Z}^{[9]}$. 则离散小波函数可写作:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j} \right) = a_0^{-\frac{j}{2}} (ta_0^{-j} - kb_0) \quad (9)$$

而 $\{x_t\}$ 的离散化小波系数为

$$C_{j,k} = \int_R a_0^{-\frac{j}{2}} f(t) \psi^*(ta_0^{-j} - kb_0) = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (10)$$

由此可以发现小波变换其实是一种积分变换,通过改变参数可以调节小波基函数的频率分辨率和时间分辨率.一般噪声信号表现为高频短时间,而有效信号表现为低频长时间,因此小波变换可以利用时间和频率上不同的特性有效地将噪声信号和有效信号分辨出来.

为了能够还原原始信号,在对信号进行小波变换处理后还要进行逆变换,也称之为小波重构,重构公式为

$$X(t) = C \sum_{-\infty}^{+\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (11)$$

其中 C 是一个与信号无关的常数.

在实际应用当中,由于每次小波变换后会产生一个高频分量和低频分量,一般认为噪声信号主要分布在高频段,有效信号分布在低频段,所以从第 2 层开始每次的小波变换仅针对低频分量以减小计算量^[1],在对数据处理完成后再进行小波重构以获得原始信号.

2.2 阈值的选取原理

小波阈值降噪的原理就是通过设置一个临界阈值 T 与小波系数进行比较,小波系数大于 T 的部分认为是由有效信号产生的,将其保留,小于 T 则认为是由噪声信号产生的,将其强制置零,然后将小波系数重构形成去噪后的信号输出.因此阈值 T 的设置决定了小波重构后的信号是否能够

有效地滤除噪声并保留有效信号^[10-12].

2.2.1 新阈值函数的构造 阈值函数分为软阈值函数和硬阈值函数,如图 1、2 所示.软硬阈值函数表达式如下:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - T); & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0; & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k}; & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0; & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (13)$$

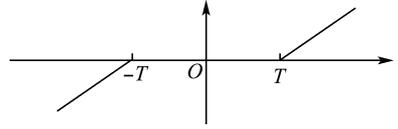


图 1 软阈值函数

Fig. 1 Soft threshold function

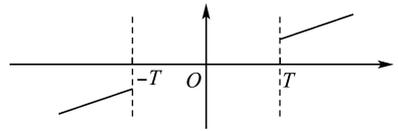


图 2 硬阈值函数

Fig. 2 Hard threshold function

硬阈值函数边缘特征明显,但其处理后的小波系数在阈值附近是不连续的,局部易产生剧烈抖动,在信号重构时容易发生突变,产生吉布斯现象,导致重构信号的光滑性变差;而软阈值函数处理后的小波系数平滑性和整体连续性较好,但重构信号与原始信号之间会存在恒定的偏差,边缘模糊失真^[13-14].

为了解决传统阈值函数不能兼顾边缘特性和抑制信号振荡的缺陷,参考文献[11]和[12]得到一个新的阈值函数:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \left[|\omega_{j,k}| - \frac{2k}{2k+1} \left(2T - \frac{2T}{e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - T)^2} + 1} \right) \right]; & |\omega_{j,k}| \geq T \\ \frac{\omega_{j,k}^{2k+1}}{(2k+1)T^{2k}}; & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (14)$$

式中: k 和 α 为调节系数,且两者恒为正; $\omega_{j,k}$ 为小波分解时得到的阈值.新的阈值函数图像如图 3 所示.

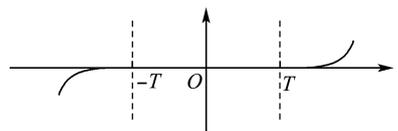


图 3 改进阈值函数

Fig. 3 Improved threshold function

所得到的新阈值函数具有如下几个特点:

(1)新阈值函数在整个定义域 $(-\infty, +\infty)$ 内是连续的,因而保证了处理后的小波系数在整个定义域上也是连续的,避免因信号突变而导致的吉布斯现象出现;

(2)在 $(-\infty, -T]$ 和 $[T, +\infty)$ 两个区间内阈值函数的渐近线可近似为硬阈值函数,随着 $\omega_{j,k}$ 增加 $\hat{\omega}_{j,k}$ 会逐渐接近 $\omega_{j,k}$,确保处理后的小波系数边缘特征明显,减小信号失真;

(3)新阈值函数在整个定义域内分段高阶可导,可以消除重构过程中的振荡现象,平滑重构信号。

通过改变调节系数 k 和 α 可以使新阈值函数的曲线在软阈值和硬阈值函数曲线之间变化:当 $\alpha \rightarrow 0$ 时新阈值函数为硬阈值函数,当 $\alpha \rightarrow +\infty$ 时则成为软阈值函数;且当函数在软硬阈值之间相互切换时调节系数 k 必须大于或等于1,因为 k 影响阈值的逼近程度,可以在阈值处理时保留一部分有效的高频信号,从而减小阈值处理时的过扼杀而产生的信号振荡现象,其中当 $k \rightarrow +\infty$ 时阈值函数变为单位阈值函数。

与文献[11]和[12]提出的阈值函数相比新的阈值函数可以通过调整系数来实现软硬阈值的变换,同时在整个定义域内是连续的,避免信号重构时产生振荡。

2.2.2 自适应阈值 一般小波的自适应阈值选取规则包括以下几种:(1)基于无偏似然估计的软阈值估计,最佳阈值选择风险最小的阈值;(2)长度对数阈值,其阈值为 $\sqrt{2\ln N}$;(3)使用启发式阈值选择,通过启发函数在上述两种阈值选择方法中进行选取;(4)采用极大极小值原理选择等^[15]。

常用的长度对数阈值 $T = \sqrt{2\ln N}$ 属于固定阈值,其在各个尺度上是固定不变的,所以一般的长度对数阈值应用在多尺度噪声抑制上是不够合理的,因此参考文献[11]得出自适应阈值:

$$\hat{T} = \frac{\sigma \sqrt{2\ln N}}{\ln(e+j-1)} \quad (15)$$

式中: σ 是噪声标准差, N 为信号长度, j 为分解层数。

2.3 小波基的选取

小波降噪可以根据信号的特点和去噪要求选择合适的小波基。通常小波基选取时需要考虑以下几种特性:(1)正则性;(2)紧支集;(3)对称性;(4)消失矩阶数^[14,16]。常见的几种小波基的特性如表1所示。

表1 常用小波基特性表

Tab.1 Commonly used wavelet effects table

小波基	正交性	紧支撑性	离散变换	支撑长度	对称性	消失矩阶数
Haar	有	有	可以	1	对称	1
coifN	有	有	可以	$6N-1$	近似对称	$2N$
symN	有	有	可以	$2N-1$	近似对称	N
dmey	无	无	可以	—	对称	—

在实际应用中不同的传感器信号需要选择不同的的小波基函数进行处理。

3 仿真与半实物仿真实验

3.1 仿真实验

为验证改进小波阈值降噪的优化效果,本文以传统的软阈值函数的固定阈值法为例和改进阈值函数的动态阈值法同时进行降噪实验,然后对比其降噪结果。

利用 MATLAB 工具箱中的 blocks 信号作为参考信号,附加高斯白噪声后得到染噪信号。用 Haar 小波基对染噪信号进行分解,分解层数设为4,其中改进后的小波阈值函数中 k 取1, α 取10。实验结果如图4所示。

降噪对比结果如表2所示。

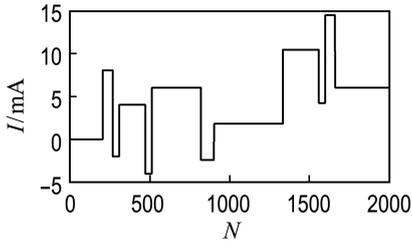
由此可见,与传统的小波软阈值降噪相比虽然改进后的降噪结果和改进前的均值是相等的,但改进后的均方根误差要小于传统的小波软阈值函数的降噪结果,且改进阈值后的信噪比较软阈值降噪方式增加了25%以上,说明改进后的方法在信号不失真的前提下提高了图像的平滑度并保留了绝大部分原始信号,降噪效果更优。

3.2 半实物仿真实验

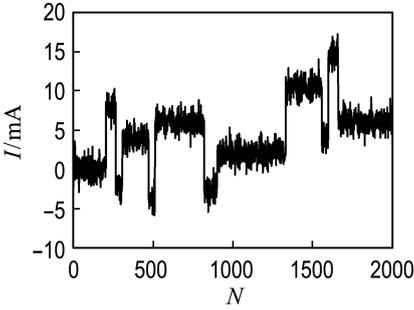
3.2.1 原始数据降噪处理 为进一步验证该粗对准方法的可行性,本文采用惯性导航实验系统(MIS-3DM-GD10)来进行半实物仿真实验。实验设备如图5所示。

其中的惯性测量单元(3DM-E10A)由三轴 MEMS 陀螺、三轴 MEMS 加速度计和三轴磁阻型磁强计3种传感器构成,其主要误差参数如表3所示,测量范围如下:加速度计, $\pm 2g$;速率陀螺, $\pm 300^\circ/s$;磁强计, $\pm 1.3 \times 10^{-4} T$ 。

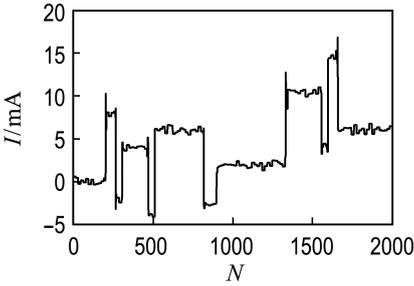
查询过当地的地磁信息后为简化计算设水平磁场强度 $H_0 = 0.3 \times 10^{-4} T$,地磁偏角 $\alpha = 0^\circ$,水平磁倾角 90° 。



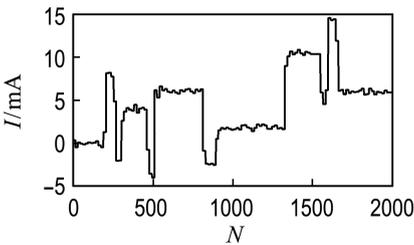
(a) 参考信号



(b) 染噪信号



(c) 小波软阈值降噪



(d) 改进小波阈值降噪

图4 仿真实验结果

Fig. 4 Simulation experiment results

表2 仿真实验对比结果

Tab. 2 Simulation experiment comparison results

	平均值	均方根误差	信噪比
染噪信号	4.457 595	0.989 6	12.095 3
小波软阈值降噪	4.423 117	0.533 7	16.995 8
改进小波阈值降噪	4.423 117	0.296 7	21.810 7

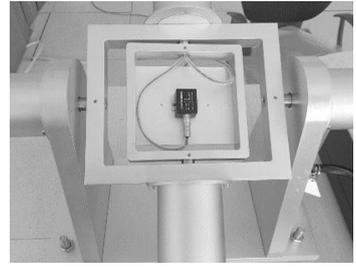


图5 MIS-3DM-GD10

Fig. 5 MIS-3DM-GD10

表3 误差参数

Tab. 3 Error parameters

参数	误差	
	静态	动态
俯仰滚动	$\pm 0.1^\circ$	$\pm 0.5^\circ$
航向	$\pm 2.0^\circ$	$\pm 2^\circ$
航向角分辨率	$< 0.1^\circ$	

经过多次测试实验后基函数和分解层数的选取如表4所示。

表4 惯性器件最佳小波基函数和分解层数

Tab. 4 The best wavelet functions and decomposition layers of inertial devices

惯性器件	小波基	分解层数
X轴磁强计	sym6	4
Y轴磁强计	coif4	4
Z轴磁强计	coif4	4
X轴加速度计	dmey	4
Y轴加速度计	dmey	4
Z轴加速度计	sym6	4

小波降噪的阈值选取采用2.2得到的新阈值函数和阈值. 经过多次测试对比后确定 k 和 α 的取值如表5所示。

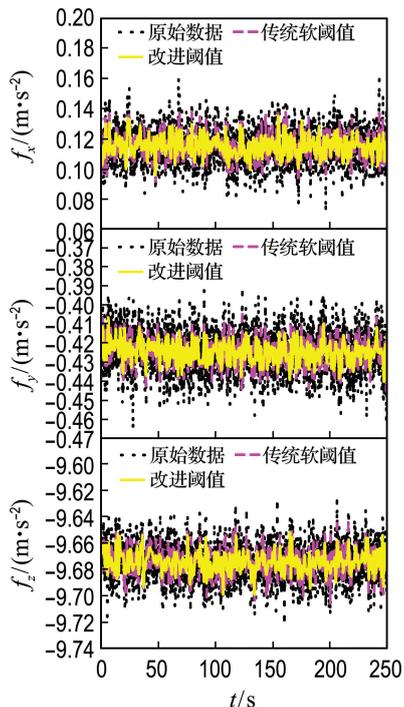
表5 惯性器件 α 和 k 的最佳取值

Tab. 5 The best values of α and k of inertial devices

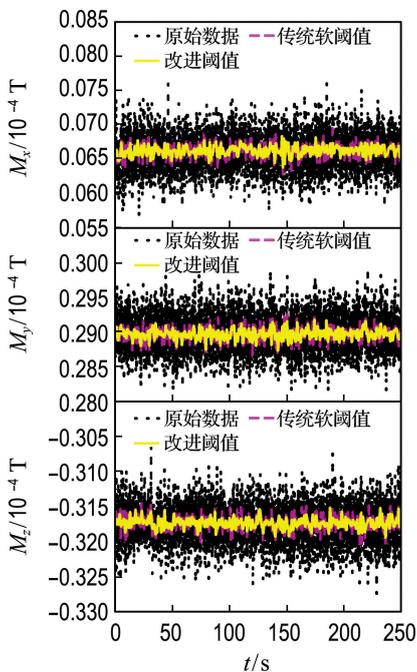
惯性器件	α	k
X轴磁强计	16	1
Y轴磁强计	20	1
Z轴磁强计	20	1
X轴加速度计	9	1
Y轴加速度计	9	1
Z轴加速度计	16	1

设备启动后先设置水平置位, 然后保持通电状态预热 30 min 后开始采集三轴加速度值与三轴磁感应值. 获取到初始数据后再进行初始数据的降噪处理, 在小波基的选取上参考文献[1,15],

在提高曲线平滑性的同时确保重构后的信号不失真. 将其用于原始数据处理后得到的结果如图6所示。



(a) 加速度计输出



(b) 磁强计输出

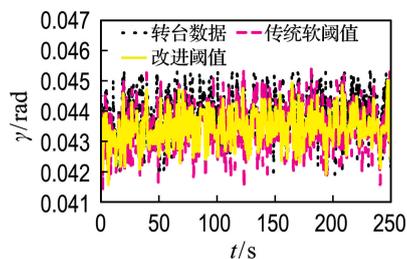
图 6 测量数据降噪处理对比图

Fig. 6 Comparison chart of measurement data of noise reduction

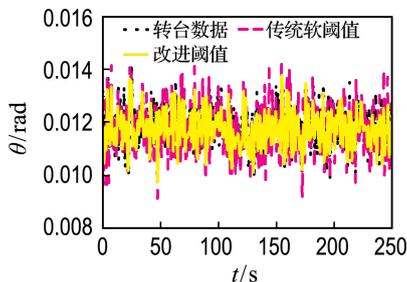
由图 6 可知改进阈值小波降噪处理能够显著抑制附加的噪声信号,尤其是磁强计的降噪优化效果尤为明显.说明该降噪方法对加速度计降噪有一定的效果,而对磁强计的降噪效果非常显著.表明该滤波方法能够在一定程度上抑制环境噪声

的干扰,减少信号振荡,又能实时跟踪原始数据的变化情况,确保滤波后结果不失真,证明其是切实有效的.

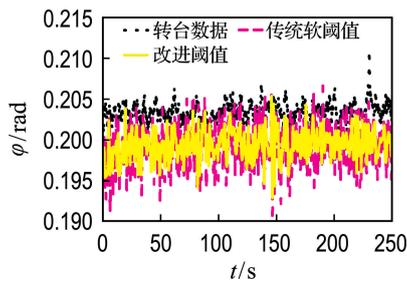
3.2.2 惯导粗对准验证 为验证降噪处理后的数据对粗对准精度的影响,将降噪处理过的数据导入姿态角求解矩阵解算得到 3 个姿态角:航向角 φ 、俯仰角 θ 、滚转角 γ ,以惯导测量平台输出的姿态角为参考值,分别对比传统软阈值小波辅助磁强计间接粗对准和改进阈值小波辅助磁强计间接粗对准两种方法得到的结果,如图 7 所示.



(a) 滚转角



(b) 俯仰角



(c) 航向角

图 7 姿态角对比图

Fig. 7 Attitude angle comparison chart

可以看出在采用传统软阈值小波辅助磁强计对准的情况下解算结果波动明显,且与参考数据间存在较大误差,这是因为磁强计会受周围铁磁材料和地磁场以外的磁场影响从而产生偏差.采用改进阈值小波辅助磁强计对准解算出的滚转角与俯仰角也存在一定程度上的波动,但基本与参考数据的波动状态一致,且其振荡范围也远小于

传统软阈值小波辅助磁强计方式的数据。航向角的解算结果明显优于传统软阈值小波辅助磁强计的结果,这是因为滚转角和俯仰角的解算过程只使用了加速度计的数据,而航向角的解算需要用到磁强计的数据,而改进阈值小波辅助的方法对磁强计去噪的优化效果远优于加速度计的优化效果,因此解算后的航向角相比传统软阈值小波辅助的结果更加平滑,说明该方法同样对于磁强计因环境因素导致的误差有明显的抑制作用。

两种方法与参考数据的误差分析如表6所示。

表6 粗对准结果误差分析

Tab.6 Initial alignment error analysis rad

方法	参数	均值	方差
传统软阈值	滚转角	-0.000 39	0.000 919
	俯仰角	-0.000 11	0.000 923
	航向角	-0.004 05	0.006 557
改进阈值	滚转角	-0.000 39	0.000 600
	俯仰角	-0.000 11	0.000 573
	航向角	-0.004 05	0.001 237

由表6可以看出使用传统软阈值小波辅助粗对准与改进阈值小波辅助粗对准相对于参考数据的差值的均值是一样的,且滚转角误差为 0.023° ,俯仰角误差为 0.006° ,航向角误差为 0.232° ,其均在实验设备的误差范围内,因此可以认为两种方法得到的航向角均为真实值。但采用改进阈值小波降噪处理后获得的姿态角相对于参考数据偏差更小,且曲线更为平滑,可以认为其解算结果要优于传统软阈值小波辅助磁强计粗对准方法。

4 结 语

本文提出了一种改进阈值小波降噪辅助磁强计的组合捷联惯导系统粗对准方法,通过引入一种改进的小波阈值函数,使其能在远离阈值的地方具有明显的边缘特性,在接近阈值时又能够抑制信号的振荡,避免了传统软阈值和硬阈值在保留边缘特性和降低信号波动程度之间无法平衡的缺陷,另一方面利用磁强计来代替陀螺仪能够提供更加稳定的参考输入以降低系统误差。通过对惯导测试平台输出的磁强计和加速度计数据进行降噪处理后用于初始粗对准,得到滚转角误差为 0.023° ,俯仰角误差为 0.006° ,航向角误差为 0.232° ,均在实验设备的误差范围内,满足粗对准的精度要求,且相较于传统的去噪方法信号振荡得到了很好的抑制。

参 考 文 献:

- [1] 孙伟,丁伟,李瑞豹,等.基于小波降噪的MEMS惯导系统对准方法研究[J].传感技术学报,2015,28(6):814-818.
SUN Wei, DING Wei, LI Ruibao, et al. Research on the initial alignment of MEMS INS based on wavelet de-noising [J]. **Chinese Journal of Sensors and Actuators**, 2015, 28(6):814-818. (in Chinese)
- [2] 高勇,曹娟娟,唐海红,等.磁强计辅助基于MEMS惯性器件SINS的初始对准方法研究[J].航天控制,2013,31(3):50-54.
GAO Yong, CAO Juanjuan, TANG Haihong, et al. Study on MEMS-SINS in initial alignment with magnetometer assistance [J]. **Aerospace Control**, 2013, 31(3):50-54. (in Chinese)
- [3] 张剑慧,秦永元,龙瑞.捷联惯导系统双矢量定姿方法研究[J].计算机测量与控制,2010,18(11):2634-2637.
ZHANG Jianhui, QIN Yongyuan, LONG Rui. Studying on algorithm of double-vector attitude determination in SINS [J]. **Computer Measurement & Control**, 2010, 18(11):2634-2637. (in Chinese)
- [4] 李兵军,高伟,王慧,等.基于线性最优控制的捷联惯导初始对准方法研究[J].弹箭与制导学报,2008(2):8-12.
LI Bingjun, GAO Wei, WANG Hui, et al. Study on initial alignment of strapdown inertial navigation system based on linear optimum control [J]. **Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance**, 2008(2):8-12. (in Chinese)
- [5] ZHANG Xun, LI Juelong, XING Jianchun, et al. A particle swarm optimization technique-based parametric wavelet thresholding function for signal denoising [J]. **Circuits, Systems, and Signal Processing**, 2017, 36(1):247-269.
- [6] DAVOUDABADI M J, AMINGHAFARI M. A fuzzy-wavelet denoising technique with applications to noise reduction in audio signals [J]. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, 2017, 33(4):2159-2169.
- [7] 袁群哲,郑振宇,韩云东.基于QUEST算法的捷联惯导惯性系对准精度分析[J].电子测量技术,2017,40(7):67-70,89.
YUAN Qunzhe, ZHENG Zhenyu, HAN Yundong. Error analysis of SINS alignment in inertial frame based on QUEST attitude determination algorithm [J]. **Electronic Measurement Technology**, 2017, 40(7):67-70,89. (in Chinese)
- [8] CHOE Namchol, 赵红宇,仇森,等.低成本MEMS磁力计校正方法研究[J].大连理工大学学报,2018,58(1):105-110.
CHOE Namchol, ZHAO Hongyu, QIU Sen, et al. Study of calibration method of low-cost MEMS

- magnetometer [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2018, **58**(1):105-110. (in Chinese)
- [9] 周伟. 基于 MATLAB 的小波分析应用 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010. ZHOU Wei. **Application of Wavelet Analysis Based on MATLAB** [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 陈晓曦, 王延杰, 刘恋. 小波阈值去噪法的深入研究 [J]. 激光与红外, 2012, **42**(1):105-110. CHEN Xiaoxi, WANG Yanjie, LIU Lian. Deep study on wavelet threshold method for image noise removing [J]. **Laser & Infrared**, 2012, **42**(1):105-110. (in Chinese)
- [11] 单锐, 齐越, 刘文. 一种改进的小波阈值去噪算法 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, **40**(4):101-104. SHAN Rui, QI Yue, LIU Wen. An improved algorithm for denoising of wavelet threshold value [J]. **Journal of Lanzhou University of Technology**, 2014, **40**(4):101-104. (in Chinese)
- [12] 卢广森, 黎英, 毛敏. 基于新阈值函数的小波阈值去噪算法 [J]. 传感器与微系统, 2017, **36**(12):141-144, 148. LU Guangsen, LI Ying, MAO Min. Wavelet threshold de-noising algorithm based on new threshold function [J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2017, **36**(12):141-144, 148. (in Chinese)
- [13] 马晓红, 宋辉, 殷福亮. 自适应小波阈值语音增强新方法 [J]. 大连理工大学学报, 2006, **46**(4):561-566. MA Xiaohong, SONG Hui, YIN Fuliang. A new approach for adaptive wavelet threshold speech enhancement [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2006, **46**(4):561-566. (in Chinese)
- [14] 王芳, 鲁顺昌. 小波软硬阈值去噪算法的研究及改进 [J]. 信息技术, 2008(6):124-127, 131. WANG Fang, LU Shunchang. Research and improved algorithm for soft-hard threshold denoising [J]. **Information Technology**, 2008(6):124-127, 131. (in Chinese)
- [15] 王维, 张英堂, 任国全. 小波阈值降噪算法中最优分解层数的自适应确定及仿真 [J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(3):526-530. WANG Wei, ZHANG Yingtang, REN Guoquan. Adaptive selection and simulation of optimal decomposition level in threshold de-noising algorithm based on wavelet transform [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2009, **30**(3):526-530. (in Chinese)
- [16] LE T P. Use of the Morlet mother wavelet in the frequency-scale domain decomposition technique for the modal identification of ambient vibration responses [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2017, **95**:488-505.

Research on indirect coarse alignment method of MEMS based on improved wavelet denoising

CHEN Guangwu^{*1,2}, CHENG Jianhao^{1,2}, LI Shaoyuan³, LI Wenyuan^{1,2}, ZHANG Linjing^{1,2}

(1. Automatic Control Research Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Traffic Information Engineering and Control, Lanzhou 730070, China;

3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to the low accuracy of the MEMS inertial sensor gyroscope and the initial signal-to-noise ratio of the MEMS strapdown inertial navigation system is small, the error of the initial alignment is large, the initial offset is obvious, and the subsequent solution accuracy is affected. To improve the accuracy of positioning information a method based on an improved threshold function in wavelet denoising and using the magnetometer to assist the MEMS indirect coarse alignment is proposed. By introducing the adjustment coefficient, the threshold function has both soft threshold and hard threshold, so that the improved wavelet function has obvious edge characteristics away from the threshold and good continuity near the threshold to avoid mutations in signal reconstruction, then effectively avoid the limitation of using a single soft threshold or hard threshold. In order to avoid the influence of the accuracy of the gyroscope on the initial alignment result, the magnetometer is used to assist the alignment, and the wavelet threshold denoising is used to denoise the original data of the accelerometer and the magnetometer, and then the attitude calculation is performed to improve the initial alignment accuracy.

Key words: MEMS; initial alignment; wavelet denoising; wavelet threshold function; attitude solution