

# 基于 ADIS16375 的误差补偿在姿态解算中的研究

尚婷婷,黄丽琼,喻娜,周洪涛

(西安北方光电科技防务有限公司,西安 710043)

**摘要** 在捷联惯性导航系统姿态解算的过程中,陀螺仪器件自身测量精度起到了重要作用。在 ADIS16375 器件进行了工厂级校准和提供可选择滤波器库的基础上,针对影响姿态解算精度的最主要的两类误差:固定零偏和随机噪声,建立一种简单实用的特性模型。分别对固定零偏进行校正和采用小波滤波对陀螺仪误差进行补偿。试验结果表明陀螺仪误差补偿在静止状态零偏稳定性和角度漂移抑制方面有显著提高,而运动过程中在对角度漂移抑制的同时也提高了姿态解算精度。

**关键词** 姿态解算 ADIS16375 陀螺仪 误差补偿 小波变换滤波

**中图分类号** :V19

**文献标识码** :A

## Research on Error Compensation in Attitude Calculating Based on ADIS16375

SHANG Ting-ting, HUANG Li-qiong, YU Na, ZHOU Hong-tao

(Xi'an North Electro-Optic Science & Technology Defense Co., Ltd Xi'an 710043, China)

**Abstract** In the attitude calculating process of strapdown inertial navigation system, the measuring accuracy of gyroscope device itself plays an important role. Based on the factory calibration and providing optional filter bank of ADIS16375 isensor, a simple and practical characteristic model has been established aiming at two kinds of error which have main influence of attitude calculating accuracy: fixed zero bias and random noise. The fixed zero bias has been calibrated and wavelet filter has been used to compensate the gyro random error. Test results show that it is significant to improve the gyro error compensation to zero bias stability and angle drift suppression in the quiescent state. It can also inhibit angle drift, then improve the attitude algorithm accuracy at the same time in the movement process.

**Key words** attitude calculating, ADIS16375, error compensation, wavelet filter

## 0 引言

对捷联惯导系统来讲,姿态矩阵起到了数学平台的作用,其计算精度与导航精度密切相关,因而是完成导航任务需要首先解决的问题。近年来,基于 MEMS(微机电系统)技术的微机械惯性器件日渐成熟,具有体积小、功能强、功耗低等特性,用 MEMS 惯性器件构成惯性系统已成为目前惯性领域的一个研究热点<sup>[1]</sup>。MEMS 陀螺仪采用硅结构微机械系统,支持将运动转换为电信号的传感器功能。本文

选择 ADIS16375 作为惯性测量单元,模块尺寸为 44 mm\*47 mm\*14 mm,更容易集成到电子系统中,但应用于姿态解算存在精度不高的问题,陀螺仪误差补偿可以弥补这一缺陷。本文采用零偏校正和小波滤波变换等方法对 ADIS16375 进行校准,以提高姿态计算精度。

## 1 姿态算法模型

$C_B^N$  是方向余弦矩阵,它表示载体坐标系  $B$  系与导航坐标系  $N$  系的位置关系,可由此推导在导航

收稿日期 2015-06-08

修回日期 2015-07-11

作者简介:尚婷婷(1986-)女,河南商丘人,硕士研究生,工程师。研究方向:惯性导航与制导。



部分而保留低频部分,而去噪是不管信号的频率范围如何,都要试图去除所有噪声,保留所有信号。

小波滤波的过程为式(5),首先将离散函数即数字数列  $f(n)$  进行小波级数展开:

$$f(n)=\frac{1}{\sqrt{M}}\sum_k W_\varphi(j_0,k)\varphi_{j_0,k}(n)+\frac{1}{\sqrt{M}}\sum_{j=j_0}^\infty \sum_k W_\psi(j,k)\psi_{j,k}(n)$$
 (5)

$n=0,1,2,\cdots,M-1$ ,  $\varphi_{j_0,k}(n)$  为尺度函数,  $\psi_{j,k}(n)$  为小波函数。 $W_\varphi(j_0,k)$  和  $W_\psi(j,k)$  分别为小波级数展开的近似系数和细节系数,其计算如下:

$$W_\varphi(j_0,k)=\frac{1}{\sqrt{M}}\sum_n f(n)\varphi_{j_0,k}(n)$$
$$W_\psi(j,k)=\frac{1}{\sqrt{M}}\sum_n f(n)\psi_{j,k}(n)$$
 (6)

其次对分解得到的各层系数选择一个阈值,对细节系数进行阈值处理。使用基于 Stein 无偏似然估计的软阈值估计,它是一种自适应阈值选择的均方差准则的无偏估计<sup>[7]</sup>。阈值  $\lambda=\sigma\sqrt{d_m}$ ,  $\sigma$  为噪声标准差,  $d_m$  为某个小波系数的平方值。软阈值则在硬阈值的基础上将较大的小波系数向零收缩,这样使重建信号避免间断。

$$\hat{W}_\psi=\begin{cases} \text{sgn}(|W_\psi|-\lambda) & |W_\psi|\geq\lambda \\ 0 & |W_\psi|<\lambda \end{cases}$$
 (7)

最后将处理后的小波系数  $\hat{W}_\psi$  代入式(5)进行信号重建。

选择各具优点的 3 种小波 Db4、Sym4 和 Bior1.5 进行试验比较。其中 Db4 小波是一个紧支撑正交小波,不具有对称性。Sym4 是近似对称的紧支撑小波,是 Daubechies 小波的改进。而 Bior1.5 小波,其尺度函数和小波基函数都不是正交的,但具有紧支撑和对称性。在滤波信噪比和实时性的权衡下小波分解层数选为 4 层。陀螺在静止状态下,采样周期为 20 ms,采样 4 000 组数,分别使用上述 3 种小波对陀螺信号处理,结果如图 2 所示:

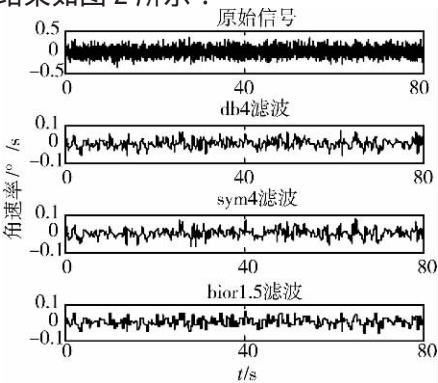


图 2 小波滤波对陀螺数据的处理

从图 2 中可以直观看出小波滤波数据与原始数据相比,其离散程度明显降低。定量分析三种小波变换的均方根,因为均方根直接对应陀螺信号的零偏稳定性这一性能。db4 小波、sym4 小波及 bior1.5 小波滤波的均方根依次为 0.007 050 3、0.006 086 3 和 0.007 453 9,因此 sym4 小波的滤波效果较好,后续试验中也将使用 sym4 小波。

3 试验及性能分析

试验中设定惯性坐标系 I 系(x、y、z)分别对应(东经 0°、东经 90°、天),导航坐标系 N 系(x、y、z)分别对应(北、东、地)。测试地点经纬度为北纬 34° 16′ 32.9″,东经 109° 0′ 29.2″。将安装有 ADIS16375 的电路板安装在六轴台上,使初始位置轴(x、y、z)指向(西、北、地)。采样周期为 20 ms,使用小波为 sym4,分别在静止状态和运动状态下,达到稳定状态后采样 4 000 组数据,测试系统在标定前后的性能。

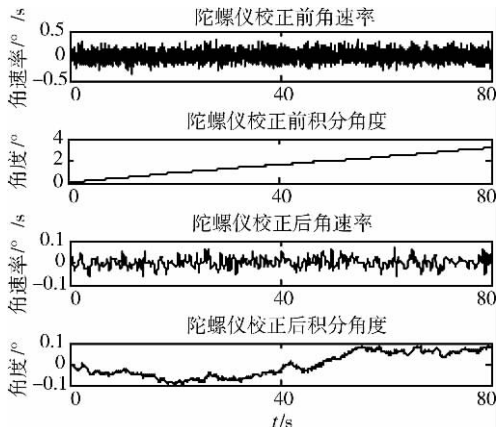


图 3 静止状态陀螺仪校正前后 x 轴输出角速率及积分角度

图 3 是静止状态下陀螺仪校正前后角速率及积分角度的示意图,可以看出陀螺仪误差补偿后姿态计算得到了显著提高。从定量角度分析校正前后各误差项如表 1 所示,80 s 的静止过程中角度漂移从 3.2° 左右降到了 0.2° 以下,性能提高了 16 倍。

表 1 静止状态陀螺仪校正前后误差项分析

	零偏(°/s)	零偏稳定性(°/s)	80 s 积分角度漂移(°)
标定前	0.033 69	0.034	3.2°
标定后	0.001 08	0.007	< 0.2°

下页图 4 是运动状态下陀螺仪校正前后角速率及积分角度的示意图。表 2 则从定量角度分析校正前后各误差项,在运动停止后静止的 80 s 过程中角度漂移从 1.36° 下降到 0.16° 以下,性能提高了 8.5 倍。并且解算精度也有所提高。



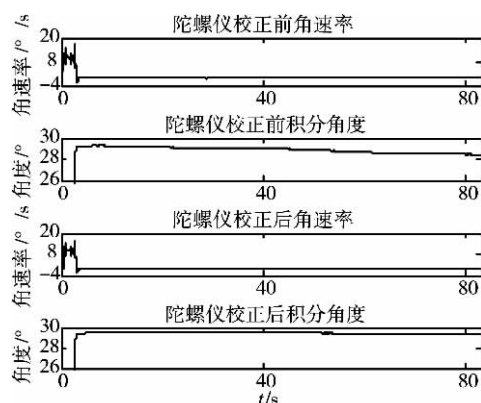
图 4 运动状态下陀螺仪校正前后  $x$  轴输出角速率及积分角度

表 2 运动状态下陀螺仪校正前后性能分析

	30° 积分角度(°)	80 s 角度漂移(°)
校正前	29.250 19	1.359 61
校正后	29.563 96	0.160 58

## 4 结论

针对 MEMS 传感器精度低的固有缺点,对 MEMS 陀螺仪进行特性分析并建立误差补偿模型,在此基础上对 ADIS16375 陀螺仪的固有零偏和随

机噪声进行了零偏校正和小波滤波。试验结果验证了这些措施的有效性,在静止状态零偏稳定性和角度漂移抑制方面有显著提高,而运动过程中在对角度漂移抑制的同时也提高了姿态解算精度。

参考文献:

- [1] 肖昌怡. 基于 MEMS 的导航系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] NEMRA A, AOUF N. Robust INS/GPS sensor fusion for UVA localization using SDRE nonlinear filtering[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(4): 789-798.
- [3] 何鲲鹏. MEMS 惯性器件参数辨识及系统误差补偿技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [4] 禹玮, 朱洪涛. 光纤陀螺信号的数字处理方法[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(2): 17-22.
- [5] 刘天亮, 高胜利. 硅微陀螺仪随机漂移建模及滤波[J]. 电子测量技术, 2010, 33(9): 33-34, 59.
- [6] 蒋庆仙, 吴富梅. 基于小波阈值消噪的光纤陀螺信号的抗差估计[J]. 惯性技术学报, 2009, 22(11): 1596-1601.
- [7] 张通, 张骏, 张怡. 基于改进小波阈值的激光陀螺漂移信号降噪[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 258-263.

(上接第 120 页)

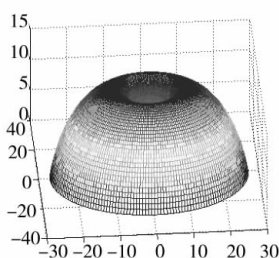


图 11 干扰机仰角为 90° 时 雷达探测区正视图

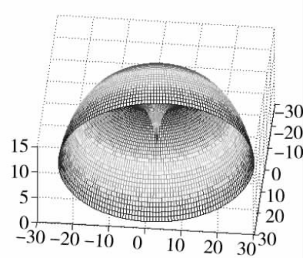


图 12 干扰机仰角为 90° 时 雷达探测区仰视图

天线正对雷达天线主瓣时, 雷达探测距离最小, 为固定值, 随着干扰机天线和雷达主瓣方向夹角变大, 雷达探测距离逐步变大, 当夹角大于 90° 时, 探测距离不再变化同样为固定值。当采用分布式干扰时, 每个干扰机天线方向都会形成一个圆锥状的凹陷。当干扰机相对于雷达仰角为 90° 时, 在雷达探测区顶部只会形成一个圆锥形凹陷, 此时改变干扰机数量和方位角不会对探测区形状有影响。

## 4 结论

本文建立了分布式干扰条件下雷达探测区三维模型, 并对模型进行了仿真计算, 根据仿真结果可知, 采用分布式干扰时可以有效压缩雷达探测区

范围, 此外, 在不同位置, 采用不同干扰机数量进行干扰时, 雷达探测区范围也会有相应的变化。仿真结果可以为战场指挥员实施雷达干扰提供决策支持。本文只是基于一种简化的雷达天线方向图进行了建模仿真, 对于复杂的雷达空间干扰模型, 还需要结合具体的天线方向图, 并考虑雷达盲区、大气衰减以及地形等因素的影响, 才能较为准确地给出受干扰时的空间探测区, 而这也是本文下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] DARREN J B, ROBIN J E, MORAN B. Game theoretic analysis of adaptive radar jamming [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1081-1100.
- [2] 张阳, 何俊. 干扰下雷达三维威力范围可视化研究[J]. 电子信息对抗技术, 2011(6): 73-77.
- [3] 李天顺, 李修和, 冉金和. 复杂电磁环境下雷达探测区域空间建模及仿真 [J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 75-79.
- [4] 齐峰, 刘雅奇, 姜宁. 一种简化的雷达三维数据生成方法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 12(3): 47-48.