



基于 Allan 方差的 MEMS 陀螺仪性能评价方法

邹学锋, 卢新艳

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 介绍了 Allan 方差的基本定义, 以及采用 Allan 方差对陀螺零偏数据进行处理所需的测试系统构成及测试要点。详细推导了采用 Allan 方差法对陀螺仪噪声进行估算的过程, 描述了应用 MATLAB 进行数据处理平台建设的主要流程。最后运用 Allan 方差理论对 MEMS 陀螺信号进行了定量分析, 得到了 MEMS 陀螺仪的量化噪声系数、角度随机游走系数、偏差不稳定性系数、速率随机游走系数和速率斜坡系数 5 个误差源系数, 实验表明该方法能有效地辨识微机械陀螺的各项随机误差成分, 可以正确评价陀螺仪的性能指标, 为陀螺仪的设计改进提供了依据。

关键词: MEMS; 陀螺仪; Allan 方差; MATLAB; 随机误差

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2010) 08-0490-04

Estimate Method of MEMS Gyroscope Performance Based on Allan Variance

Zou Xuefeng, Lu Xinyan

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The basic definition of Allan variance, the structure of test system and test main points for gyroscope bias data process using Allan variance were introduced. The estimate process of gyroscope noise with Allan variance method was presented in detail and the main procedure of data processing platform construction by MATLAB was given. The MEMS gyroscope signal was quantitative analyzed with the theory of Allan variance and five error coefficients of the gyroscope were obtained, including quantization noise coefficient, angle random walk coefficient, bias instability coefficient, rate random walk coefficient and rate ramp coefficient. The experiment result shows that the method can distinguish each random error of the MEMS gyroscope effectively, evaluate the performance of the gyroscope correctly, and provide a reference for the improvement of the gyroscope design.

Key words: MEMS; gyroscope; Allan variance; MATLAB; random error

DOI: 10.3969/j.issn.1671-4776.2010.08.006 **EEACC:** 2575D

0 引言

近年来, 作为当代 MEMS 领域和惯性领域新兴的重要分支, MEMS 陀螺仪获得了长足发展。

由于其具有成本低、尺寸小、质量轻以及可靠性高等优点, 在低成本系统中的应用越来越广泛。

陀螺漂移是衡量 MEMS 陀螺仪性能好坏的重要指标, 目前 MEMS 陀螺仪漂移的估算方法主要包

收稿日期: 2010-05-17

E-mail: zouxf999@sina.com

括 1σ 和 Allan 方差两种方法, 1σ 方法得到的是陀螺仪漂移各噪声项构成的总体指标, 无法对各噪声项进行有效分离。而 Allan 方差可以对陀螺噪声进行有效分析, 20 世纪 60 年代由美国国家标准局的 D. W. Allan^[1-2] 为研究振荡稳定性而建立。该方法的特点是能够比较容易地对各种误差源统计特性进行细致的表征和辨识, 由于陀螺仪等惯性传感器本身也具有振荡器的特征, 因此该方法随后被广泛应用于各种惯性传感器的随机误差辨识中^[3-4]。

本文采用 Allan 方差法对陀螺仪噪声进行估算, 得到了 MEMS 陀螺仪的量化噪声系数、角度随机游走系数、偏差稳定性系数、速率随机游走系数和速率斜坡系数 5 个误差源系数, 研究了微机械陀螺的各项随机误差成分, 并探讨了基于 Allan 方差的 MEMS 陀螺仪性能评价方法。

1 Allan 方差基本定义

陀螺仪输出速率 Ω_k 可表示为

$$\Omega_k(\tau) = \frac{\theta_{k+m} - \theta_k}{\tau} \quad (1)$$

式中: θ_{k+m} , θ_k 分别为 T_{k+m} , T_k 时刻的定位角; τ 为 T_{k+m} , T_k 时刻的时间间隔, 可以表示为 $\tau = T_{k+m} - T_k = mT_0$, 其中 T_0 为采样时间。

Allan 方差可按式估算

$$\sigma^2(\tau_M) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} [\Omega_{k+1}(M) - \Omega_k(M)]^2 \quad (2)$$

式中 $\tau_M = M/f_s$, 其中 f_s 为采样频率。首先把数据 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$ (N 为样本的个数) 分成指定长度 M 的串, 计算出每串的均值 $\Omega_k(M)$, $k=1, 2, 3, \dots, K$, 其中 $K=N/M$, 然后由式 (2) 计算 Allan 方差。

用 Allan 方差分析陀螺仪数据, 首先需要根据 Allan 方差要求搭建测试平台 and 数据处理平台, 然后利用数据处理平台分析、处理测试数据, 得到陀螺仪噪声特性指标。

2 MEMS 陀螺仪零偏测试

测试的目的是测量 MEMS 陀螺仪静态工作条件下零漂误差数据, 用于后期 Allan 方差的分析处理。

2.1 测试系统

主要测试设备包括测试夹具、位置速率转台、数据采集系统、计算机以及直流稳压电源。系统搭建示意图如图 1 所示, 陀螺仪通过测试夹具固定在位置速率转台上, 位置速率转台经调平后安装在隔振地基上, 直流稳压电源为陀螺仪供电, 数据采集系统对陀螺仪输出信号进行采集并实时送入计算机存储。整个测试系统搭建在超净测试厂房中, 厂房温度和湿度恒定。

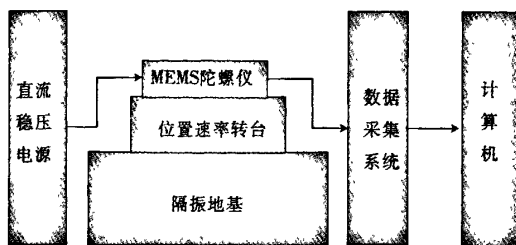


图 1 MEMS 陀螺仪测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the MEMS gyroscope test system

数据采集系统框图如图 2 所示。ADS1252 是美国 TI 公司推出的 Delta-Sigma 型高性能 24 位 AD 转换芯片, 采用差动输入方式抑制共模噪声, 特有的三阶数字滤波器可滤除电源纹波干扰和其他干扰。FPGA 采用 ALTERA 公司的 EP1K3T144I7 芯片, 在系统工作中实现的主要功能包括: 与 AD 芯片的数字通信、数据提取、数字滤波处理以及将数字信号通过串口传送到计算机。

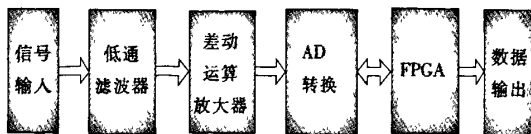


图 2 数据采集系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of the data acquisition system

在上位计算机中, 接收软件提取 24 位二进制数字信号, 并转换为十进制数据, 再将转换后的数据存储到计算机硬盘中。

2.2 测试要点

根据 Nyquist 采样定律, 采样率至少是传感器带宽的 2 倍才能保证采集到的信号不失真。对于 Allan 方差的处理, 大量实验证明采样率取陀螺仪带宽的 3~6 倍才能保证处理数据的准确性^[5-6]。

将陀螺仪按图 1 所示安装在具有隔振效果的位置速率转台上，静态漂移数据连续采集 1.5 h。由于陀螺仪带宽约为 80 Hz，所以采样率设为 400 Hz，满足 3~6 倍要求。MEMS 陀螺仪的分辨率约为 0.04 °/s，远小于地球自转角速率，陀螺仪无法分辨地球自转角速率，因此无需考虑陀螺仪安装方位误差。

3 MEMS 陀螺仪随机误差分析

MEMS 陀螺仪噪声可分为 5 个独立部

分^[7]，即量化噪声 QN 、角度随机游走 ARW 、偏差不稳定性 BI 、速率随机游走 RRW 和速率斜坡 RR 。5 个独立噪声的大小分别由量化噪声系数 Q 、角度随机游走系数 N 、偏差不稳定性系数 B 、速率随机游走系数 K 及速率斜坡系数 R 表征。表 1 为 MEMS 陀螺仪常用误差因素、对应的 Allan 方差以及噪声系数之间的关系。虽然还存在其他类型的噪声，如指数互相关噪声和正弦噪声等，但一般都归结到这 5 种噪声中来。

表 1 MEMS 陀螺仪常用误差因素和对应的 Allan 方差

Table 1 Common error factors of the MEMS gyroscope and related Allan variance

| 误差因素 | 功率谱密度 $S_n(f)$ | Allan 方差 σ^2 | 参数说明 |
|--------|--|--------------------------------------|--|
| | $(2\pi f)^2 Q^2 \tau$ | | |
| 量化噪声 | $f \ll \frac{1}{2\tau}$ | $\sigma_Q^2 = 3Q^2 \frac{1}{\tau^2}$ | 量化噪声系数 $Q/(\text{s}^{-1})$ |
| 角度随机游走 | N^2 | $\sigma_N^2 = N^2 \frac{1}{\tau}$ | 角度随机游走系数 $N/(\text{°} \cdot \text{h}^{-\frac{1}{2}})$ |
| 零偏不稳定性 | $\begin{cases} \frac{B^2}{2\pi f}, & f \leq f_0 \\ 0, & f > f_0 \end{cases}$ | $\sigma_B^2 \approx (0.6648B)^2$ | 零偏不稳定性系数 $B/(\text{°} \cdot \text{h}^{-1})$ |
| 速率随机游走 | $\frac{K}{2\pi f^2}$ | $\sigma_K^2 = \frac{K^2}{3} \tau$ | 速率随机游走系数 $K/(\text{°} \cdot \text{h}^{-\frac{3}{2}})$ |
| 速率斜坡 | | $\sigma_R^2 = \frac{R^2}{2} \tau^2$ | 速率斜坡系数 $R/(\text{°} \cdot \text{h}^{-2})$ |

由于各部分噪声相互独立，所以存在以下关系 $\sigma^2(\tau) = \sigma_Q^2(\tau) + \sigma_N^2(\tau) + \sigma_B^2(\tau) + \sigma_K^2(\tau) + \sigma_R^2(\tau)$ (3) 式中： $\sigma^2(\tau)$ 为陀螺仪总噪声； $\sigma_Q^2(\tau)$ 为量化噪声； $\sigma_N^2(\tau)$ 为角度随机游走； $\sigma_B^2(\tau)$ 为零偏不稳定性； $\sigma_K^2(\tau)$ 为速率随机游走； $\sigma_R^2(\tau)$ 为速率斜坡。定义 Allan 均方差 $\sigma(\tau) = \sqrt{\sigma^2(\tau)}$ ， $\sigma(\tau)$ 双对数曲线可以清楚地描述出陀螺仪的各种误差成分，不同误差项通常表现在不同的族时间区间，并且双对数曲线的斜率不同，量化噪声、角度随机游走、零偏不稳定性、速率随机游走、速率斜坡的斜率分别为 -1，-1/2，0 和 1，MEMS 陀螺仪随机误差的 Allan 均方差典型分布如图 3 所示。将表 1 中的 Allan 方差 σ^2 代入式 (3) 可得

$$\sigma^2(\tau) = 3Q^2 \frac{1}{\tau^2} + N^2 \frac{1}{\tau} + (0.6648B)^2 + \frac{K^2}{3} \tau + \frac{R^2}{2} \tau^2 = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n \tag{4}$$

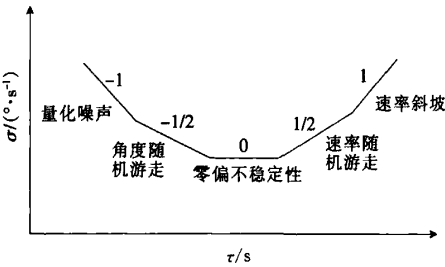


图 3 MEMS 陀螺仪随机误差 Allan 均方差典型分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the Allan mean square deviation for the MEMS gyroscope random error

用式(4)对 $\sigma^2(\tau)$ 进行最小二乘法拟合，可得各项系数 A_n 。 σ 的单位为 °/h， τ 的单位为 s，可得各误差系数与 A_n 之间关系为 $K = 60\sqrt{3}A_1$ ， $R = 3\ 600\sqrt{2}A_2$ ， $Q = \frac{A_{-2}}{\sqrt{3}}$ ， $N = \frac{A_{-1}}{60}$ ， $B = \frac{A_0}{0.6648}$ 。

数据采集完成后，为了提高后期运算速度可将数据进行 1 s 平均化处理，随后数据由 Allan 方差数据处理平台计算各随机误差系数，处理平台在 MATLAB 中实现^[8]，软件流程如图 4 所示。

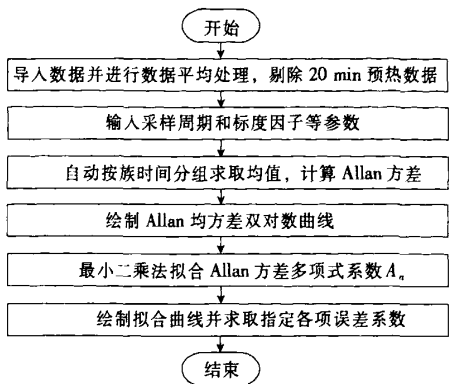
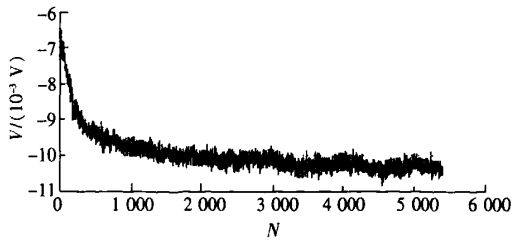
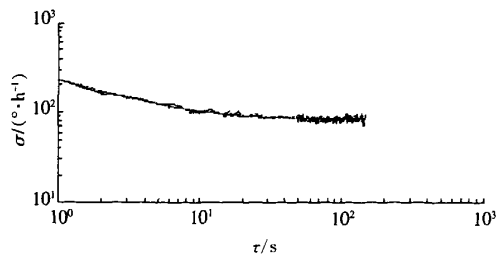


图 4 Allan 方差数据处理流程图
Fig. 4 Flow chart of the Allan variance data process

数据处理结果如图 5 所示，图 5 (a) 为数据平均后的陀螺仪漂移原始曲线，其中 N 为采样点，图 5 (b) 为 Allan 均方差双对数曲线。



(a) 陀螺仪原始数据



(b) Allan 方差双对数曲线

图 5 陀螺仪原始数据与 Allan 方差双对数曲线

Fig. 5 Original data of the gyroscope and the double-logarithm graph of the Allan variance

Allan 数据处理求得的各噪声系数如表 2 所示，量化噪声系数非常小，表明数据采集系统精度较高，角度随机游走系数和零偏不稳定性系数较小，表明驱动和检测模态稳定性较好，速率斜坡系数较大，可能由稳压源引起，速率随机游走系数对系统性能也有一定影响，但不能确定其来源。

表 2 MEMS 陀螺仪噪声系数

| Table 2 Noise factors of the MEMS gyroscope | |
|--|----------------------|
| 参数 | 结果 |
| 量化噪声系数 Q/s^{-1} | 1.5×10^{-7} |
| 角度随机游走系数 $N/(^{\circ} \cdot h^{-\frac{1}{2}})$ | 3.6 |
| 零偏不稳定性系数 $B/(^{\circ} \cdot h^{-1})$ | 76 |
| 速率随机游走系数 $K/(^{\circ} \cdot h^{-\frac{3}{2}})$ | 230.8 |
| 速率斜坡系数 $R/(^{\circ} \cdot h^{-2})$ | 775.6 |

4 结 语

本文采用 Allan 方差法对 MEMS 陀螺仪进行数据处理，简单有效地辨识出 MEMS 陀螺仪的随机误差成分。测试数据的准确性验证可分为直接验证与间接验证两种。直接验证方法是在被测陀螺仪应用的工程中，实践验证测试数据的准确性。间接验证法是将该测试方法测试的数据与陀螺仪商品的标称值进行对比，通过对 AD 公司 ADXRS610 测试分析发现分析数据与标称结果相同，从而间接证明了该分析方法的准确性。

该方法不仅可为 MEMS 陀螺仪的改进提供具有指导意义的数据，还可作为导航算法中惯性器件随机误差建模的基本工具。

参考文献：

[1] HOWE D A, ALLAN D W, BARNES J A. Properties of signal sources and measurement methods [C] // Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium. Philadelphia, USA, 1981; TN14 - TN60.
[2] ALLAN D W. Statistics of atomic frequency standards [C] // Proceedings of IEEE Precision Measurement and Calibration. Washington DC, USA, 1966, 54 (2) : 221 - 230.
[3] 傅建国, 王孝通, 李博, 等. MEMS 陀螺随机误差模型研究 [J]. 传感器技术, 2005, 24 (3) : 75 - 77.
[4] TEHRANI M M. Ring laser gyro data analysis with cluster sampling technique [C] // Proceedings of Fibre Optic and Laser Sensors SPIE. Geneva, Switzerland, 1983, 412: 207 - 220.

(下转第 498 页)

独立运行的两个工件台调平调焦性能相近，且均优于单工件台系统。

表 1 调平实验数据

Table 1 Data of the leveling qualification test

| 标准差 $1\sigma/\text{nm}$ | | |
|-------------------------|-------|-------|
| 单工件台 | 双工件台 | |
| 参考系统 | 工件台 1 | 工件台 2 |
| 68.4 | 17.5 | 22.2 |

5 结 语

本文对主流步进扫描光刻机和双工件台光刻机的调平调焦技术进行了介绍，通过对比两种系统聚焦测量原理、把硅片高度信息转化为调平数据的算法以及曝光位置实现调平调焦的伺服控制系统等方面的差异，从理论上论述了双工件台系统调平调焦的优越性，并通过单工件台系统与双工件台系统的调平实验数据比较，证实了理论分析的正确性。综上所述，相比步进扫描光刻机，双工件台光刻机不仅显著提高了生产率，而且极大地提高了调平调焦精度，更能适应未来高产率、高分辨力的需求。

参考文献：

[1] 姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 61~67.

[2] 袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44 (1): 57~64.

[3] 佟军民, 胡松, 余国彬. 下一代光刻技术 [J]. 电子工业专用设备, 2005, 34 (11): 27~33.

[4] 张强, 胡松, 姚汉民, 等. ASML 公司光学光刻技术最新进展 [J]. 微细加工技术, 2002, 9 (3): 8~11.

[5] 曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41 (7): 24~30.

[6] LI X P, CHEN F B, LI Z D. Simulation on signal processing of focusing and leveling measurement system [C] // Proceedings of SPIE. Chengdu, China, 2007: 101~109.

[7] GUAN J. Solution to improving certain kinds of focusing and leveling measurement system [C] // Proceedings of SPIE. Chengdu, China, 2007: 356~366.

[8] la FONTAINE B M, JAN H, DUSA H, et al. Study of the influence of substrate topography on the focusing performance of advanced lithography scanners [C] // Proceedings of SPIE. San Diego, USA, 2003, 5040: 570~581.

[9] MARC B, COEN V D V, SJEF T, et al. The performance advantages of a dual stage system [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham, WA, 2004: 742~757.

[10] BOUDEWIJN S, TOM C, du CROO de JONGH R, et al. Performance results of a new generation of 300 mm lithography systems [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham, USA, 2001: 544~557.

[11] JAN M, BOB S, MARTIN H, et al. ArF immersion lithography using TWINSCAN technology [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham, USA, 2005: 196~207.

[12] RIAN R, MARCO M, MANFRED S, et al. Lithographic performance of a dual-stage, 0.93 NA ArF step and scan system [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham, USA, 2005: 681~692.

[13] KURT R. Optical lithography—a historical perspective [J]. Comptes Rendus—Physique, 2006, 7 (8): 844~857.



作者简介：
李金龙 (1984—)，男，河北保定人，
硕士研究生，主要研究方向为机械仿真；

赵立新 (1971—)，男，内蒙古赤峰人，副研究员，主要研究方向为微电子装备。

(上接第 493 页)

[5] HOU H, EI-SHEMY N. Inertial sensor errors modeling using Allan variance [C] // Proceedings of ION GPS/GNSS. Protland, USA, 2003: 2860~2867.

[6] HOU H Y. Modeling inertial sensors errors using Allan variance [D]. Calgary, Canada: Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2004.

[7] EI-SHEIMY N, HOU H Y, NIU X J. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57 (1): 140~149.

[8] 唐家德. MATLAB 在非线性曲线拟合中的应用研究 [J]. 电脑学习, 2008 (1): 57~59.



作者简介：
邹学锋 (1977—)，男，江苏沛县人，
工程师，主要从事 MEMS 的研究和管理工
作。