

MEMS 陀螺仪的一种实用标定法

宋丽君, 秦永元

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 主要介绍了一种微机械系统(MEMS)陀螺仪的速率标定法, 根据MEMS陀螺仪的输出数学模型, 详细推导了如何得到MEMS陀螺仪的输出数学模型中的零漂、刻度因数和安装误差, 并在得到其标定系数后将其封装在C函数中进行验证实验。通过实验数据分析可知, MEMS陀螺仪速率标定法原理简单, 易于实现, 且精度较高。此标定法所得到的MEMS陀螺仪输出数学模型能较准确地反映其输出, 且MEMS陀螺仪的线性度有所改善。

关键词: 微机械系统(MEMS)陀螺仪; 误差模型; 速率标定; 刻度因数; 安装误差; 线性度

中图分类号: V241 **文献标识码:** A

A Practical Calibration Method on MEMS Gyroscope

SONG Lijun, QIN Yongyuan

(Automation College, North Western Poly Technical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A velocity calibration method of MEMS gyroscope has been introduced in this paper. The zero drift, scale factor and the installation error in the mathematic model of MEMS gyroscope has been derived based on the output model of MEMS gyroscope. After obtaining the calibration coefficient, it was encapsulated in the function of C to be verified experimentally. The experiment results showed that this velocity calibration method was simple in principle, easy to realize and high accuracy. The output model of MEMS gyroscope can reflect its output accurately. The linearity of MEMS gyroscope has been improved.

Key words: the gyroscope of MEMS; error model; calibration of velocity; scale factors; error of installation; nonlinearity

微机械系统(MEMS)陀螺仪是一种基于微机械电子系统的新型全固态陀螺仪, 与传统的机械陀螺相比, 它具有体积小, 质量轻, 成本低, 可靠性好, 测量范围大, 易于数字化和智能化等突出优点。用硅材料制作MEMS陀螺仪不仅使传统的陀螺仪实现微型化, 且因硅的微加工技术与集成工艺技术的相容性, 可将敏感器件与处理电路完全集成在一个硅片上, 从而实现了陀螺仪真正意义上的机电一体化。

惯性导航系统(INS, 简称惯导)是一种不依赖于任何外部信息, 也不向外辐射能量的自主式导航系统, 它不仅具有良好的隐蔽性, 且其工作环境包括空中、地球表面和水下。另外, 惯导所提供的导航数据十分安全, 具有数据更新率高, 短期精度和稳定性好的优点。这些使惯性导航系统在军事导航及民用导航领域中起着越来越大的作用。

惯性导航系统工作精度在很大程度上取决于陀螺仪的工作精度。但即使原理和结构都相当完善的

陀螺仪也存在着各种干扰因素引起的误差而影响陀螺仪的工作精度。陀螺仪误差与有关物理量之间关系的数学表达式称为陀螺仪的误差数学模型。通过误差数学模型可设计一些方法来补偿陀螺的各种误差以提高系统的工作精度。因此, 建立陀螺仪误差数学模型并设法在惯性系统中进行补偿, 是惯性技术领域中的一个重要课题^[1]。

1 MEMS 陀螺仪的数学模型

通过一系列专门实验方法来标定或估计陀螺仪的性能参数是使用陀螺仪的一项重要任务, 而所有测试问题的讨论都是以陀螺仪的误差数学模型为基础的。不同条件下的陀螺仪测试方法之间有许多共同点, 由此可总结出一些较普遍实用的原理方法^[2-3]。

MEMS陀螺仪对捷联惯导系统的姿态误差产生直接影响, 其主要表现是MEMS陀螺仪固定常值漂移、陀螺仪的安装误差对捷联惯导系统的姿态误差的影响。由于MEMS陀螺仪的精度相对较差, 达

收稿日期: 2008-11-10

作者简介: 宋丽君(1978), 女, 陕西省西安市人, 博士生, 主要从事导航技术的研究。秦永元(1946), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士生导师, 长期从事惯性导航和组合导航系统、最优估计理论、数字信号处理及GPS信号处理的研究。

到(70~ 80) (°)/h 的漂移, 因此可忽略交叉二次项后得到基于数字信号处理器(DSP) 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中 MEMS 陀螺仪输出数学模型^[4]

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{x0} \\ w_{y0} \\ w_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{kx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & S_{ky} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & S_{kz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 W_x 、 W_y 、 W_z 为 MEMS 陀螺仪的输出值;
 w_{x0} 、 w_{y0} 、 w_{z0} 为 MEMS 陀螺仪的漂移; w_x 、 w_y 、 w_z 为 MEMS 陀螺仪的输入值; S_{kx} 、 S_{ky} 、 S_{kz} 为 MEMS 陀螺仪的标度因数; K_{xy} 、 K_{xz} 、 K_{yx} 、 K_{yz} 、 K_{zx} 、 K_{zy} 为 MEMS 陀螺仪的安装误差系数。

2 MEMS 陀螺仪的速率标定^[5]

2.1 MEMS 陀螺仪的速率标定步骤

将基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统, 通过夹具固定安装在速率转台上, 标定轴与转台转轴平行。给转台一个固定的速率值, 测量 MEMS 陀螺仪的输出值。转台速率值的取法按照 GB 321 规定的 R5 系列选取, 其取值方法如表 1 所示。

表 1 MEMS 陀螺仪测试速率点选取表

测试点	量程/(°) · s ⁻¹					
	±75	±100	±150	±200	±250	±300
1	0	0	0	0	0	0
2	±1.0	±1.0	±1.0	±1.0	±1.0	±1.0
3	±1.6	±1.6	±1.6	±1.6	±1.6	±1.6
4	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5
5	±4.0	±4.0	±4.0	±4.0	±4.0	±4.0
6	±6.3	±6.3	±6.3	±6.3	±6.3	±6.3
7	±10.0	±10.0	±10.0	±10.0	±10.0	±10.0
8	±16.0	±16.0	±16.0	±16.0	±16.0	±16.0
9	±25.0	±25.0	±25.0	±25.0	±25.0	±25.0
10	±40.0	±40.0	±40.0	±40.0	±40.0	±40.0
11	±63.0	±63.0	±63.0	±63.0	±63.0	±63.0
12	±75.0	±100.0	±100.0	±100.0	±100.0	±100.0
13	-	-	±150.0	±160.0	±160.0	±160.0
14	-	-	-	±200.0	±250.0	±250.0
15	-	-	-	-	-	±300.0

在 MEMS 陀螺仪速率标定中, 只需取从满量程向下的 3 对点的速率值。速率标定步骤如下:

- (1) 接通基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的电源, 根据不同型号的 MEMS 陀螺仪的启动时间预热一定的时间。
- (2) 转台正转, 采集 x 、 y 、 z 轴的 MEMS 陀螺仪的输出值, 采集完成后转台停转; 转台反转, 采集 x 、 y 、 z 轴的 MEMS 陀螺仪的输出值, 采集完成后转台停转。
- (3) 设置一定采样间隔时间及采样次数, 求得

在某输入角速率下 MEMS 陀螺仪输出的平均值作为该输入角速率值下的 MEMS 陀螺仪输出值。

2.2 MEMS 陀螺仪的速率标定

当陀螺仪的输入精度高于 15. 04 (°)/h 时, 惯导系统的输出角速率值分别为

$$\omega_x = [\omega_k + \omega_e \sin \varphi \quad 0 \quad 0]$$

$$\omega_y = [0 \quad \omega_y + \omega_e \sin \varphi \quad 0]$$

$$\omega_z = [0 \quad 0 \quad \omega_z + \omega_e \sin \varphi]$$

式中 $\omega_e = 15. 04$ (°)/h 为当地地球自转角速率; $\varphi = 34^\circ$ 为当地纬度。

由于基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中的 MEMS 陀螺仪的精度达 100 (°)/h, 在速率标定中不再考虑 ω_e 对 MEMS 陀螺仪的影响, 由此可得 MEMS 陀螺仪速率标定中 x 、 y 、 z 轴输出的角速率值分别为

$$\omega_x = [\omega_x \quad 0 \quad 0]$$

$$\omega_y = [0 \quad \omega_y \quad 0]$$

$$\omega_z = [0 \quad 0 \quad \omega_z]$$

由式(1)可得 MEMS 陀螺仪的刻度因数和漂移分别为

$$\begin{cases} S_{kx} = (W_{x+} - W_{x-})/2\omega_x \\ S_{ky} = (W_{y+} - W_{y-})/2\omega_y \\ S_{kz} = (W_{z+} - W_{z-})/2\omega_z \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \omega_{x0} = (W_{x+} + W_{x-})/2 \\ \omega_{y0} = (W_{y+} + W_{y-})/2 \\ \omega_{z0} = (W_{z+} + W_{z-})/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 W_{x+} 、 W_{y+} 、 W_{z+} 为速率转台正转时 MEMS 陀螺仪的输出值; W_{x-} 、 W_{y-} 、 W_{z-} 为速率转台反转时 MEMS 陀螺仪的输出值。

在做 x 轴 MEMS 陀螺仪标定时, y 、 z 轴 MEMS 陀螺仪的输出可由式(1)得

$$\begin{cases} W_y = \omega_{y0} + K_{yx} \omega_x \\ W_z = \omega_{z0} + K_{zx} \omega_x \end{cases} \quad (10)$$

对两轴的正反转输出求差, 获得安装误差系数

$$\begin{cases} K_{yx} = \frac{W_{y+} - W_{y-}}{2\omega_x} \\ K_{zx} = \frac{W_{z+} - W_{z-}}{2\omega_x} \end{cases} \quad (11)$$

同理, 可获得安装误差系数

$$\begin{cases} K_{xy} = (W_{x+} - W_{x-})/2\omega_y \\ K_{zy} = (W_{z+} - W_{z-})/2\omega_y \\ K_{xz} = (W_{x+} - W_{x-})/2\omega_z \\ K_{yz} = (W_{y+} - W_{y-})/2\omega_z \end{cases} \quad (12)$$

2.3 MEMS 陀螺仪速率标定系数的计算

由 MEMS 陀螺仪的速率标定实验可将基于

DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中 MEMS 陀螺仪输出数学模型中的各项系数分离。表 2~ 4 为进行 x 、 y 、 z 轴向标定时 3 个 MEMS 陀螺仪的输出值。

表 2 x 轴向标定时 3 个 MEMS 陀螺仪的输出

速率 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	x 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	y 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	z 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$
40	39.763 10	- 1.412 346 0	- 0.642 288 0
- 40	- 40.219 80	- 0.389 694 0	0.132 034 9
63	62.844 20	- 0.210 091 0	- 1.226 385 0
- 63	- 62.986 70	0.665 655 7	0.252 766 8
100	100.255 50	- 0.303 763 0	- 0.868 847 0
- 100	- 99.820 96	0.196 821 8	1.050 193 1

表 3 y 轴向标定时 3 个 MEMS 陀螺仪的输出值

速率 $(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	x 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	y 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	z 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$
100	0.289 051 26	99.999 90	- 1.693 91
- 100	0.522 891 90	- 99.880 97	0.709 485 90
160	- 0.599 177 20	159.624 29	- 0.599 311 90
- 160	0.435 375 18	- 160.795 90	0.800 158 99
250	0.553 809 85	249.784 60	- 1.787 067 30
- 250	- 0.858 320 10	- 250.688 00	1.683 786 91

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.027\ 44 \\ -0.326\ 01 \\ 0.047 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.999\ 61 & 0.000\ 979\ 6 & -0.000\ 534\ 6 \\ -0.006\ 482 & 1.000\ 55 & 0.000\ 965\ 1 \\ -0.004\ 399\ 5 & -0.001\ 500\ 3 & 1.001\ 295\ 5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \tag{13}$$

3 标定实验数据分析

在得到基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的 MEMS 陀螺仪的输出数学模型后,将系统具体的数学模型的 C 语言代码封装在一个函数内,然后再进行 MEMS 陀螺仪数据采集,以便验证该数学模型是否可准确反映陀螺仪的输出特性。

图 1 为基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的 3 个轴向的 MEMS 陀螺仪的验证输出图。

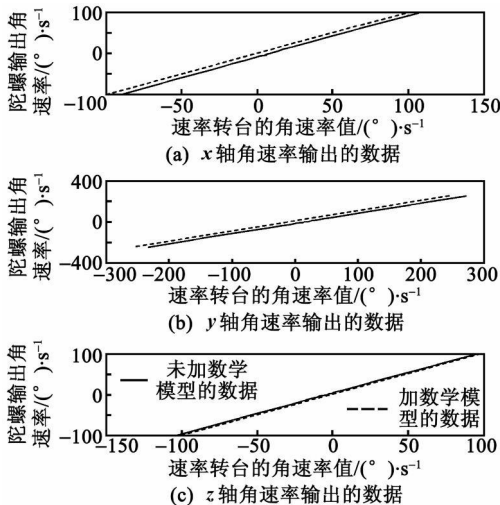


图 1 x 、 y 、 z 轴向的 MEMS 陀螺仪的验证输出图

表 4 z 轴向标定时 3 个 MEMS 陀螺仪的输出值

速率 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	x 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	y 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	z 轴速率值 $/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$
40	0.343 883 29	0.309 607 30	40.152 3
- 40	- 0.698 114 64	- 0.324 139 89	- 40.031 7
63	1.144 973 63	- 0.381 796 35	63.269 5
- 63	- 0.683 665 23	- 0.052 127 76	- 63.150 0
100	1.085 093 76	1.762 708 12	99.846 7
- 100	- 1.252 492 37	- 0.458 566 33	- 99.804 8

由式(8)、(9)可得基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中 x 、 y 、 z 的 MEMS 陀螺仪的刻度因数为: $S_{kx} = 0.999\ 61$, $S_{ky} = 1.000\ 55$, $S_{kz} = 1.001\ 295\ 5$; 常值漂移为: $\omega_{x0} = -0.027\ 44$, $\omega_{y0} = -0.326\ 01$, $\omega_{z0} = 0.047$ 。

由式(11)、(12)可得基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统 x 、 y 、 z 的 MEMS 陀螺仪的安装误差系数为 $K_{yx} = -0.006\ 482$, $K_{zx} = -0.004\ 399\ 5$, $K_{xy} = 0.000\ 979\ 6$, $K_{zy} = -0.001\ 500\ 3$, $K_{xz} = -0.000\ 534\ 6$, $K_{yz} = 0.000\ 965\ 1$ 。

由此可将基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的 MEMS 陀螺仪的输出数学模型写为

表 5 为 x 、 y 、 z 轴向的 MEMS 陀螺仪在没有加入数学模型和加入数学模型后的线性度比较。

表 5 3 个轴向的 MEMS 陀螺仪的线性度比较

	x 轴/%	y 轴/%	z 轴/%
没有加入数学模型的线性度	1.167 73	1.233 96	1.089 52
加入数学模型的线性度	0.734 11	0.935 14	0.673 74

实验结果表明,所得 MEMS 陀螺仪输出数学模型能较准确地反映其输出,且 MEMS 陀螺仪的线性度有所改善^[5]。

4 结束语

本文提出的 MEMS 陀螺仪的速率标定法能够标定出捷联惯导系统中 MEMS 陀螺仪零漂、静态刻度因子和安装误差。从工程应用角度考虑,只要准确建立 MEMS 陀螺仪的数学模型就可进行速率标定,这种方法原理简单,易于实现,且精度较高。但这种标定方法只对 MEMS 陀螺仪的常值漂移进行了补偿,没有考虑到 MEMS 陀螺仪的随机漂移。因此,如果要继续提高基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的精度,还需在 MEMS 陀螺仪的噪声处理上做进一步的工作。

(下转第 378 页)

为进一步验证信噪比对新方法的影响, 在信噪比 0~10 dB 之间, 每隔 1 dB 进行一次分选试验, 6 个雷达辐射源的分选结果如图 4 所示。

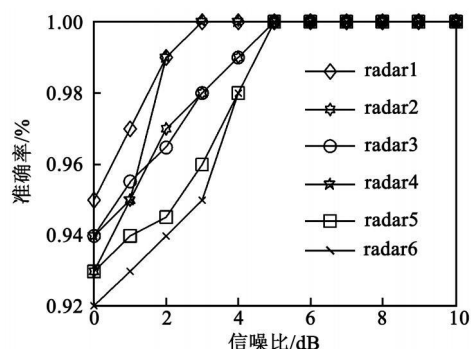


图 4 辐射源的分选准确率

由此可知, 利用本文所提新方法可准确实现各种未知雷达辐射源信号的分选, 充分发挥基于 WPT 分选和基于 PRI 分选的优点, 具有很强的适应性。

5 结束语

对大量未知雷达辐射源信号进行分选是当前较为棘手的一个难题。基于 WPT 可有效分选不同调制类型的信号, 但不适用于相同调制类型不同调制参数信号的分选。基于改进的 PRI 变换算法进行分选不受调制类型及调制参数的影响, 仅与 PRI 有关, 但当辐射源个数较多时算法性能骤降。本文在充分考虑两种算法优缺点的前提下, 提出一种新的分选方法, 并通过大量仿真试验验证了方法的有效性。

参考文献:

[1] HE Minghao, MAO Yan, HAN Jun. A method of extracting radar in pulse characteristics in low SNR[C]// Beijing: 8th International Conference on Signal Processing Proceedings, 2006: 2712-2715.

[2] MILOJEVIC D J, POPOVIC B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. IEEE Proc F, 1992, 139(1): 98-104.

[3] KENICHI Nishiguchi, MASAOKI Kobayashi. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. IEEE Trans on AES, 2000, 36(2): 407-421.

[4] 赵知劲, 周云水, 尚俊娜. 基于时频分析和 RBF 神经网络的调制识别[J]. 压电与声光, 2004, 26(4): 328-330.

ZHAO Zhijin, ZHOU Yunshui, SHANG Junna. Modulation recognition based on the time frequency analysis and RBF neural network[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2004, 26(4): 328-330.

[5] 柳征, 姜文利, 周一宇. 基于小波包变换的辐射源信号识别[J]. 信号处理, 2005, 21(5): 460-463.

LIU Zheng, JIANG Wenli, ZHOU Yiyu. Emitter signals recognition based on wavelet packet transform[J]. Signal Processing, 2005, 21(5): 460-463.

[6] ZHANG Gexiang, HU Laizhao, JIN Weidong. Complexity feature extraction of radar emitter signals[C]// Hangzhou: Proceedings of the third Asia Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2003: 495-498.

[7] 赵知劲, 周云水, 尚俊娜. 基于支持向量机的实际调制信号识别[J]. 压电与声光, 2005, 27(5): 569-571.

ZHAO Zhijin, ZHOU Yunshui, SHANG Junna. Modulation classification based on SVM[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(5): 569-571.

[8] WANG Liwei, ZHU Yuanqing, PAN Yingfeng. FCM algorithm and index CS for the signal sorting of radiant points[C]// Guangzhou: Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005: 4415-4419.

(上接第 374 页)

参考文献:

[1] 梅硕基. 惯性仪器测试与数据分析[M]. 西安: 西北工业大学, 1991.

[2] 王立冬, 张春熹, 鲁军. 车载捷联惯导系统粗对准中摆动误差补偿研究[J]. 压电与声光, 2007, 29(4): 405-407.

WANG Lidong, ZHANG Chunxi, LU Jun. Swing error compensation in coarse Alignment for land SINS[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(4): 405-407.

[3] 林玉荣, 邓正隆. 激光陀螺捷联惯导系统中惯性器件误差的系统级标定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001,

33(1): 112-115.

LIN Yurong, DENG Zhenglong. Systematic calibration for inertial instruments errors in laser gyro strap down inertial navigation system[J]. Journal of Harbin Institus of Technology, 2001, 33(1): 112-115.

[4] 杨金显, 袁赣南, 徐良臣, 等. 基于微机械陀螺的 MIMU 关键技术[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 151(1): 28-30.

YANG Jinxian, YUAN Gannan, XU Liangchen, et al. MIMU key technology based on micro mechanical gyro[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 151(1): 28-30.

[5] GJB 2426A-2004. 光纤陀螺仪测试方法[S].