

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209882

基于阵列技术的冗余陀螺仪数据融合方法*

张亦朴¹ 焦玉冰² 郭肖亭² 冯凯强² 李杰²

(1.北京宇航系统工程研究所 北京 100076; 2.中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

摘要: 目前限制 MEMS 陀螺仪在航空航天、汽车、武器制导等领域广泛应用的主要原因之一是单个 MEMS 陀螺仪测量精度低。而基于目前的工艺和技术水平,迅速提高单个陀螺仪的精度难度较大。本文研究如何利用低精度 MEMS 陀螺仪通过阵列技术及数据融合算法实现高精度导航信息获取。首先,利用阵列技术将多个关键参数一致性相匹配的同类陀螺仪组合在一起,形成一个虚拟陀螺仪。然后,将该多输入系统通过滤波方法进行融合给出一个最佳估计值,实现借助数量提升传感器精度的目的。最后,进行试验验证。仿真数据和实测数据验证结果表明,基于阵列技术的冗余陀螺仪通过设计的滤波方法进行数据融合后,可减少陀螺仪中的慢变漂移,提高角速度测量精度。

关键词: MEMS 陀螺;陀螺仪阵列;冗余陀螺仪;数据融合

中图分类号: V241.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.3

Data fusion method of redundant gyroscope based on array technology

Zhang Yipu¹ Jiao Yubing² Guo Xiaoting² Feng Kaiqiang² Li Jie²

(1. Beijing Institute of Astronautical systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: At present, the low measurement accuracy of a single MEMS gyroscope mainly restricts the wide application of MEMS gyroscopes in aerospace, automotive, weapon guidance and other fields. However, it is difficult to rapidly improve the accuracy of a single gyroscope based on the current process and technical level. This paper studies how to use low accuracy MEMS gyroscope to obtain high accuracy navigation information through array technology and data fusion algorithm. Firstly, several similar gyroscopes with matching key parameters are combined to form a virtual gyroscope by array technology. Then, the multi-input system is fused by filtering method to give an optimal estimation value, so as to achieve the purpose of improving the sensor accuracy with the help of quantity. Finally, experimental verification is carried out. The verification results of simulation data and measured data show that the redundant gyroscope based on array technology can reduce the slow drift in the gyroscope and improve the angular velocity measurement accuracy after data fusion through the designed filtering method.

Keywords: MEMS gyroscope; gyroscope array; redundant gyroscope; data fusion

0 引言

MEMS (micro-electro-mechanical system) 陀螺仪具有体积小、质量轻、功耗低、可靠性高、易于批量生产等一系列优点,在航空航天、汽车、电子设备以及武器制导等许多军民领域有着广阔的应用空间。从性能来说, MEMS 陀螺仪与其他陀螺仪相比还有较大的差距。如何在充分发挥 MEMS 陀螺仪优势的前提下,提高其测量精度一直是惯性导航系统研究的重要方向^[1-3]。

基于目前的工艺和技术水平,迅速提高单个 MEMS 陀螺仪的精度难度较大。而如何利用低精度陀螺仪通过算法

处理提高导航精度是 MEMS 导航相关技术发展的重要课题^[4-6]。在这种思路的引导下,通过融合多个陀螺仪信号来提高性能的方法越来越受到重视。冗余陀螺仪^[7-8]即为将多个 MEMS 陀螺仪以阵列形式组装,将多个陀螺仪的信息进行融合并得到一个最佳估计值,这样能够达到比单个器件更高的精度。冗余陀螺仪设计一方面可以提高导航系统可靠性,另一方面可利用同类陀螺有较强相关性,通过冗余配置的方法补偿陀螺仪的慢变漂移^[9-10]。

冗余陀螺仪的概念最早由美国喷气推进实验室于 2003 年提出,该实验室对所提理论进行了仿真分析。在此

收稿日期:2022-05-09

* 基金项目:国家自然科学基金(62003316)项目资助

基础上, Majed 等于 2009 年提出了这样一种理论, 即根据阵列中各个陀螺仪噪声的相关性, 进行组合滤波设计以提高输出角速率的精度。美国密西根大学于 2015 年使用开发板实物进行了冗余陀螺仪技术中相关性和数量的研究。随后, 印度 PES 理工学院也进行了实物设计并对阵列陀螺仪进行最优估计。而瑞典皇家理工学院^[11]则利用最大似然估计算法对设计的惯性测量单元阵列进行数据融合, 其中还分析了阵列结构对融合精度的影响。美国罗德岛大学^[12]则尝试使用最优线性组合方法进行数据融合以获取陀螺仪阵列的最佳输出。

国内学者也及早地意识到陀螺仪阵列技术的重要性并先后有大批的科研工作者对该问题进行了一系列研究。其中, 西北工业大学的微/纳米系统实验室于 2006 年前后最先开始关注该问题并进行了一系列仿真验证试验。随后, 哈工程的何昆鹏进行了陀螺仪阵列技术在惯性导航系统中应用的研究。而东南大学的吉训生等在 2009 年借助数据融合算法对阵列信息的动态信号和静态信号均进行了处理。哈工大的尹作刚也关注了阵列信息的动态信号处理问题。2015 年上交大的吕琦炜提出了一种基于方差估计的改进卡尔曼滤波器。2017 年, 华中科技大学的罗璋同样研究了冗余陀螺仪技术在惯性系统中的应用。此外, 昆明理工大学、南京工业大学、北京航空航天大学、西安理工大学等多家研究单位^[13-15]也对陀螺仪阵列技术进行了深入而广泛的研究。

以上研究从阵列配置、融合精度的提升、滤波器的设计、陀螺仪阵列的应用等不同角度不同程度地丰富和发展了冗余陀螺仪阵列技术。而目前陀螺仪阵列技术的主要研究点有如何提高冗余陀螺仪加工配置技术以制备满足设计要求的组合器件系统、陀螺仪误差模型与标定对融合输出的影响、各个陀螺仪的误差项对融合输出的影响等。基于此, 本文对基于阵列技术的冗余陀螺仪数据融合进行研究, 并对其中的陀螺仪误差模型、各个陀螺仪的误差项与融合输出之间的关系进行了研究。

1 基于阵列技术的冗余陀螺仪

1.1 陀螺仪随机误差模型

理论上陀螺仪随机误差模型, 考虑的因素越多设计出的陀螺仪就越精确。但选用何种误差模型取决于陀螺自身的精度水平以及应用系统的需求^[16-17]。最常用的陀螺随机误差模型为

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega_0(t) + b(t) + n_a(t) \\ \dot{b}(t) = n_b(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为陀螺实际输出角速率值; ω_0 为真实角速率值; b 为陀螺仪偏差漂移, n_a 为陀螺仪观测噪声。偏差漂移 b 可以表示为速率随机游走, 由速率随机游走白噪声 n_b 驱动; 观测噪声 n_a 可以表示为角度随机游走, 由角度随机游走白噪声 n_b 驱动。

模型参数 n_a 表现为慢变漂移, 对陀螺仪输出值的影响表现为使得陀螺仪测量值出现振荡且以缓慢形式偏离真实值, 降低陀螺仪数据的偏差稳定性。此项可由阵列方式消减。因此, 本论文着重关注阵列前后陀螺仪数据的偏差稳定性的变化, 以此为指标评价阵列效果。

使角度随机游走 N 的功率谱密度 $S_N(f)$ 与噪声项 n_a 的功率谱密度相等 $P_{n_a}(f)$, 速率随机游走 K 的功率谱密度 $S_K(f)$ 与偏差漂移项 b 的功率谱密度 $P_d(f)$ 相等, 则存在:

$$\mathbf{R} = N^2, \mathbf{Q} = K^2 \quad (2)$$

由此可知, 随机误差模型里角度随机游走的方差为 N^2 , 高斯白噪声的方差为 K^2 。

1.2 传感器数量对冗余陀螺仪精度的影响

设 n 个陀螺仪的测量值为 $x_i, i=1, \dots, n$, 各自的测量方差为 σ_i^2 。阵列式结构的融合算法将这些测量值通过最小方差 σ_{\min}^2 以一定的权重形式进行统计组合, 最终得到某轴对应输出量的最佳估计值 \hat{x} ^[18]。通常, 惯性器件输出的独立测量值会受到传感器内部误差影响, 比如偏差、高斯白噪声, 因此可建模为:

$$x_i = x + b_i + v_i \quad (3)$$

其中, x 为角速度的真值, b_i 为传感器测量偏差, v_i 为反映传感器测量噪声的量值。假定已经对传感器进行了偏差矫正, 则此时传感器输出模型可建模为:

$$x_i = x + v_i \quad (4)$$

如果每个传感器的输出值对应的权重为 w_i , 则阵列结构的估计值可表示为:

$$\hat{x} = w_1 \cdot v_1 + w_2 \cdot v_2 + \dots + w_n \cdot v_n = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i, \quad \left(\sum_{i=1}^n w_i = 1 \right) \quad (5)$$

设定所有独立测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 的方差相等, 计算使方差 σ^2 达到最小的权重为:

$$w_1 = w_2 = \dots = w_n = 1/n \quad (6)$$

此时, 估计值 \hat{x} 可表示为:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

估计值的方差可表示为:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 \cdot \sigma_i^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 = \frac{\sigma_i^2}{n} \quad (8)$$

因此, 与独立测量值的方差相比, 减少了 n 倍。若用标准差来表示, 则与独立测量值的标准差相比, 减少了 $1/\sqrt{n}$ 倍。

2 冗余陀螺仪数据融合方法

2.1 冗余陀螺仪数据融合流程

冗余陀螺仪阵列布局根据单个陀螺仪误差模型, 进行冗余陀螺仪数据融合滤波器的设计^[19-20]。冗余陀螺仪数据融合的流程结构和原理如图 1 所示。

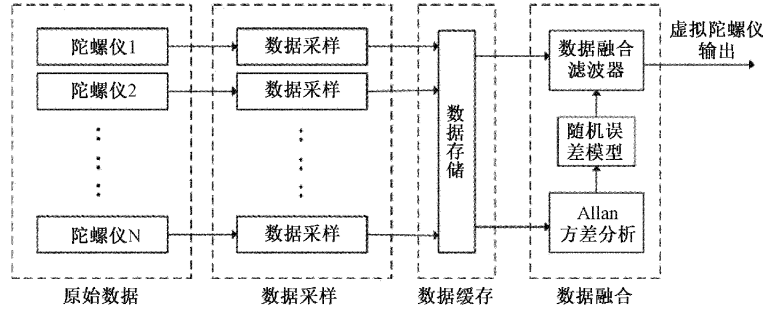


图 1 冗余陀螺仪数据融合的流程结构和原理

2.2 数据融合滤波器设计

卡尔曼滤波器计算量较小、数据存储量小、实时性好以及适合对非平稳随机信号进行处理的特点,并结合 MEMS 陀螺仪数据慢时变非平稳的特点。因此,采用卡尔曼滤波器作为冗余陀螺仪的数据融合算法。

冗余陀螺仪的离散状态方程和测量方程可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (9)$$

设构成冗余陀螺仪的阵列中有 4 个陀螺仪,则:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [b_1, b_2, b_3, b_4, \omega]^T \\ \mathbf{Y} = [y_1, y_2, y_3, y_4] \end{cases} \quad (10)$$

其中的参数为:

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} \text{var}(n_{b1}) & \rho_{12} \sqrt{\text{var}(n_{b1})\text{var}(n_{b2})} & \rho_{13} \sqrt{\text{var}(n_{b1})\text{var}(n_{b3})} & \rho_{14} \sqrt{\text{var}(n_{b1})\text{var}(n_{b4})} & 0 \\ \rho_{21} \sqrt{\text{var}(n_{b1})\text{var}(n_{b2})} & \text{var}(n_{b2}) & \rho_{23} \sqrt{\text{var}(n_{b2})\text{var}(n_{b3})} & \rho_{24} \sqrt{\text{var}(n_{b2})\text{var}(n_{b4})} & 0 \\ \rho_{31} \sqrt{\text{var}(n_{b1})\text{var}(n_{b3})} & \rho_{32} \sqrt{\text{var}(n_{b2})\text{var}(n_{b3})} & \text{var}(n_{b3}) & \rho_{34} \sqrt{\text{var}(n_{b2})\text{var}(n_{b3})} & 0 \\ \rho_{41} \sqrt{\text{var}(n_{b1})\text{var}(n_{b4})} & \rho_{42} \sqrt{\text{var}(n_{b2})\text{var}(n_{b4})} & \rho_{43} \sqrt{\text{var}(n_{b2})\text{var}(n_{b3})} & \text{var}(n_{b4}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{var}(n_w) \end{bmatrix} \text{deg}^2/s^3 \quad (13)$$

其中, ρ_{12} 为陀螺 1 和陀螺 2 的相关系数, ρ_{13} 为陀螺 1 和陀螺 3 的相关系数等。

建立冗余陀螺仪的模型误差,利用 Allan 方差法计算出相应误差参数后,利用上述式子完成对卡尔曼滤波器的计算,即可得到冗余陀螺仪的数据融合最佳估计值输出。

3 试验验证

3.1 Allan 方差法辨识随机误差参数

1) 仿真数据

由于 Allan 方差适合处理非平稳的随机过程,且 MEMS 惯性器件中的随机误差是由统计独立的噪声源引起的,具有慢时变,非平稳的特点,因此选用 Allan 方差方法对陀螺随机误差进行建模。

采用关键参数建模的方法,进行陀螺仪数据仿真,仿真参数具体设置如表 1 所示,生成的 16 组仿真数据如图 2 所示。

使用 Allan 方差法对仿真数据进行分析,生成的 Allan 标准差双对数图如图 3 所示。根据 Allan 标准差的双对数

$$\begin{cases} \Phi_{k,k-1} = I_5 \\ \Gamma_{k-1} = T \cdot I_5 \\ \mathbf{W}_{k-1} = [n_b^1, n_b^2, n_b^3, n_b^4, n_w]^T \\ \mathbf{V}_k = [n_a^1, n_a^2, n_a^3, n_a^4]^T \\ \mathbf{H}_k = [I_4 \ ; \ 1_4] \end{cases} \quad (11)$$

其中, T 为离散化周期。

\mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 与相关系数 ρ 的关系为:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \text{var}(n_{a1}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{var}(n_{a2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{var}(n_{a3}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{var}(n_{a4}) \end{bmatrix} \text{deg}^2/s \quad (12)$$

表 1 陀螺仪仿真参数

参数列	数值列
数据点数	360 000×4
采样周期	0.01 s
角度随机游走	0.36°/h0.5
零偏不稳定性	7.5°/h
速率随机游走	27°/h1.5
速率斜坡	34°/h2

图对各种噪声误差的特征曲线进行识别,计算出对应的误差系数如表 2 所示。该辨识参数可为冗余陀螺仪滤波器的设计提供初始参数设置值。

2) 实测数据

使用 Xsens 公司 4 个同型号的 Mtw-awinda 的 MEMS 陀螺仪静止 4 h 的数据(图 4),进行实测数据随机误差辨识。实测数据采样周期为 0.01 s。4 组实测数据的 Allan 方差曲线图如图 5 所示,误差项辨识结果如表 3 所示。

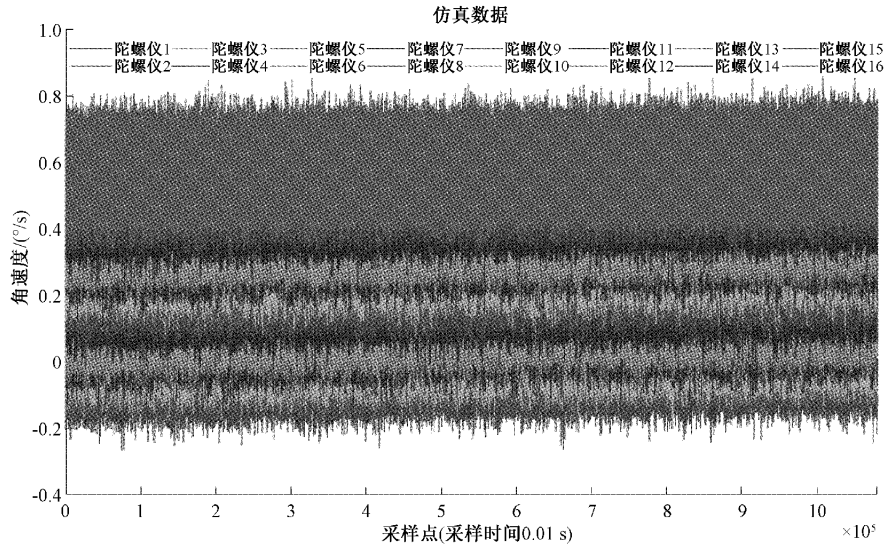


图 2 十六组陀螺仪仿真数据

表 2 陀螺仪仿真数据随机误差辨识结果

误差项	$N(^{\circ}/h^{0.5})$	$B(^{\circ}/h)$	$K(^{\circ}/h^{1.5})$	$R(^{\circ}/h^2)$	偏差稳定性($^{\circ}/h$)	
					0.01 s	1 s
陀螺仪 1	0.359 5	5.490 3	19.594 0	33.436 2	219.536 9	45.162 0
陀螺仪 2	0.359 9	4.783 2	18.318 2	33.747 2	219.618 4	45.254 6
陀螺仪 3	0.359 7	4.760 8	17.295 6	33.980 1	219.504 9	44.608 7
陀螺仪 4	0.360 0	5.301 7	18.299 5	33.425 3	219.601 4	44.885 8
陀螺仪 5	0.360 4	5.287 7	19.431 3	34.786 3	219.810 6	45.413 6
陀螺仪 6	0.359 7	5.444 3	18.513 5	34.185 8	219.557 7	45.292 2
陀螺仪 7	0.359 0	5.329 0	18.449 1	34.058 8	219.428 9	44.858 8
陀螺仪 8	0.359 7	6.030 7	20.722 8	33.384 8	219.580 7	45.537 8
陀螺仪 9	0.359 4	5.078 4	18.352 3	33.474 7	219.479 6	45.328 8
陀螺仪 10	0.360 2	5.020 4	18.115 4	33.284 0	219.706 3	45.040 4
陀螺仪 11	0.360 1	5.792 4	19.498 4	33.455 4	219.811 8	45.238 0
陀螺仪 12	0.358 0	5.548 8	19.358 9	33.048 0	219.498 3	44.911 2
陀螺仪 13	0.359 9	5.038 7	18.176 7	34.171 1	219.702 7	45.491 2
陀螺仪 14	0.359 8	5.300 0	17.940 6	33.820 5	219.517 5	44.986 2
陀螺仪 15	0.359 8	6.047 7	20.909 0	33.608 5	219.846 8	45.774 9
陀螺仪 16	0.360 0	5.034 8	18.440 1	33.596 2	219.482 7	44.254 9

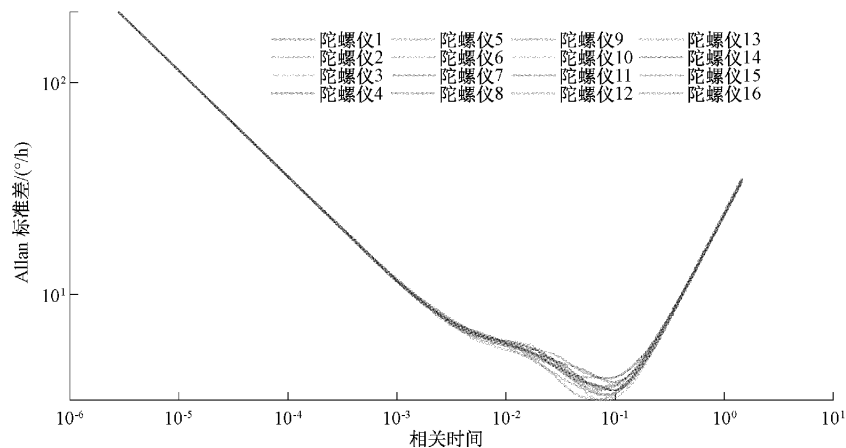


图 3 仿真数据的 Allan 标准差

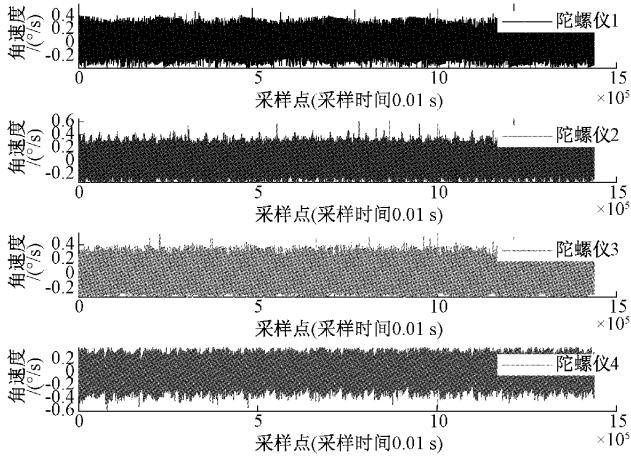


图 4 四组实测陀螺仪数据(Z 轴)

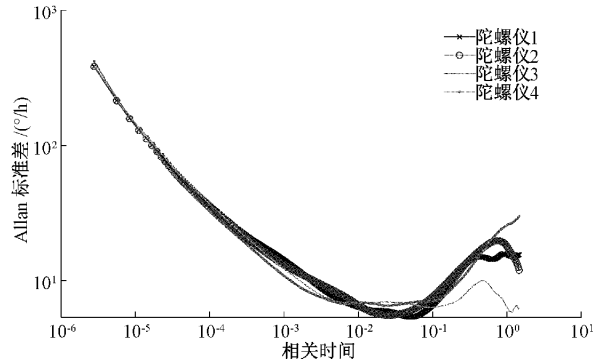


图 5 实测陀螺仪数据的 Allan 标准差

由图 5 及表 3、4 可知,4 组实测数据的 Allan 标准差曲线图及随机误差项一致程度比较高。因而可认为这 4 个

表 3 实测数据随机误差辨识结果

误差项	N(°/h ^{0.5})	B(°/h)	K(°/h ^{1.5})	偏差稳定性(°/h)	
				0.01 s	1 s
陀螺仪 1	0.357 0	8.841 0	35.992 0	336.958 8	44.651 4
陀螺仪 2	0.346 5	8.072 8	40.461 3	334.051 0	31.067 2
陀螺仪 3	0.367 4	10.224 0	30.312 7	342.996 0	33.809 4
陀螺仪 4	0.322 5	10.640 1	30.814 8	359.230 9	46.420 0

表 4 仿真数据滤波前后偏差稳定性对比

仿真数据	偏差稳定性(°/h)		仿真数据	偏差稳定性(°/h)	
	0.01 s	1 s		0.01 s	1 s
陀螺仪 1	216.004 5	22.483 7	陀螺仪 9	215.806 7	22.845 0
陀螺仪 2	216.695 8	23.010 1	陀螺仪 10	216.386 7	22.806 0
陀螺仪 3	216.073 1	22.742 0	陀螺仪 11	216.172 2	22.771 3
陀螺仪 4	216.160 7	22.440 7	陀螺仪 12	216.321 7	22.952 3
陀螺仪 5	216.151 8	22.768 5	陀螺仪 13	216.261 1	22.560 5
陀螺仪 6	216.379 5	22.460 0	陀螺仪 14	215.814 5	22.753 6
陀螺仪 7	216.260 6	22.951 2	陀螺仪 15	216.117 8	22.761 5
陀螺仪 8	215.806 7	22.557 0	陀螺仪 16	216.242 5	22.397 4
滤波后 0.01 s 偏差稳定性		17.561 0	滤波后 1 s 偏差稳定性		5.618 3

陀螺的关键性能指标基本一致。各陀螺仪的性能基本一致是其组成冗余陀螺的前提。

3.2 冗余陀螺仪数据融合试验验证

1) 静态仿真数据

$$Q_k = 10^{-6} \times \begin{bmatrix} 2.776 & \rho_{12}3.121 & \rho_{13}2.338 & \rho_{14}2.377 & 0 \\ \rho_{21}3.121 & 3.508 9 & \rho_{23}2.628 7 & \rho_{24}2.672 & 0 \\ \rho_{31}2.338 & \rho_{32}2.628 7 & 1.969 4 & \rho_{34}2.002 & 0 \\ \rho_{41}2.377 & \rho_{42}2.672 & \rho_{43}2.002 & 2.035 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^2 \end{bmatrix} \text{deg}^2/\text{s}^3$$

$$R_k = 10^{-3} \times \begin{bmatrix} 3.540 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.335 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.749 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.889 \end{bmatrix} \text{deg}^2/\text{s}$$

利用设计的陀螺仪滤波器方程,可以求得滤波后的陀螺仪输出,如图 6。以整体偏差稳定性来评价陀螺仪整体

通过表 2 的角度随机游走和角速率随机游走值,可计算得到离散系统噪声的协方差阵 Q_k 和离散系统量测噪声的协方差阵 R_k 。其中真实角速率驱动白噪声的方差设置为 $10^{-5} \text{deg}^2/\text{s}^3$ 。则 Q_k 和 R_k 的值为:

性能,则仿真数据滤波前后整体偏差稳定性对比,具体如表 4 所示。

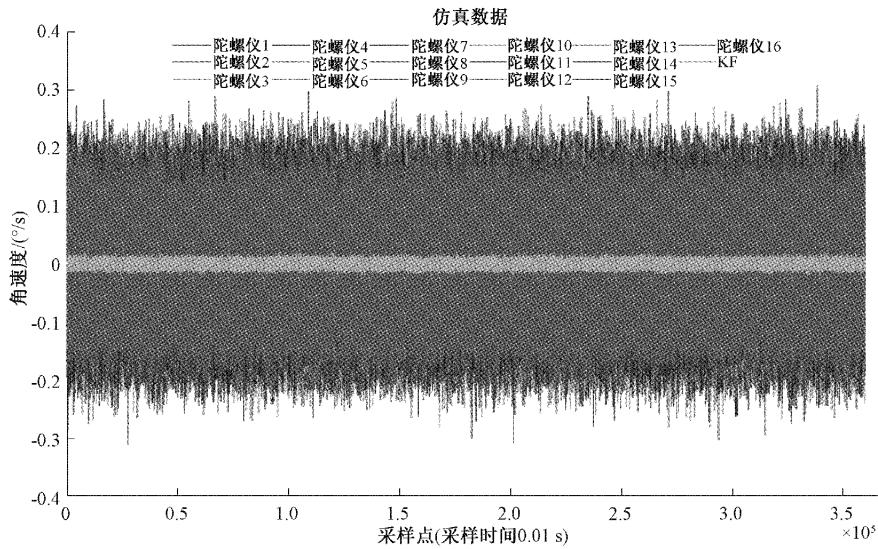


图 6 仿真数据滤波前后对比

2) 静态实测数据

使用 3.1 节所述的 4 组实测数据,进行冗余数据滤波

计算,滤波前后的对比,如图 7。相应的偏差稳定性对比,如表 5 所示。

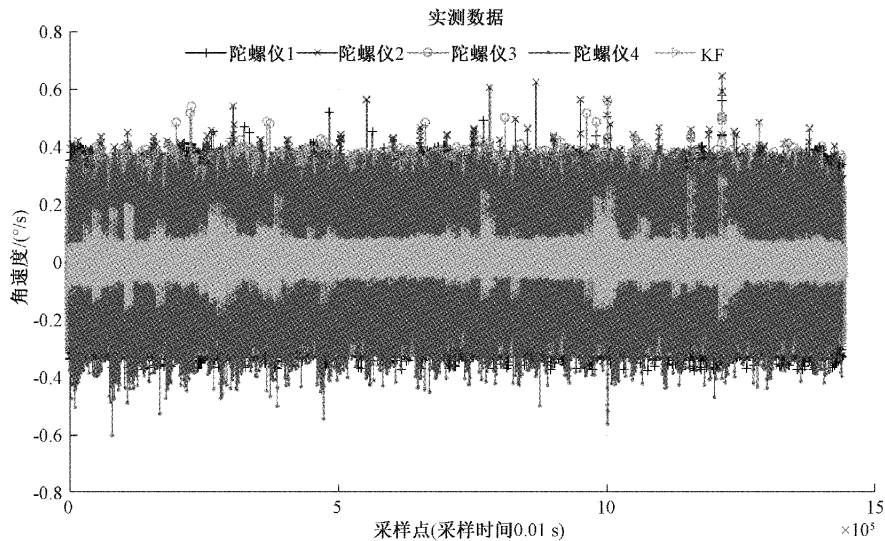


图 7 实测数据滤波前后对比

表 5 实测数据滤波前后偏差稳定性对比

误差项	陀螺仪 1	陀螺仪 2	陀螺仪 3	陀螺仪 4	滤波后
偏差稳定性 1 s (°/h)	44.651 4	31.067 2	33.809 4	46.420 0	21.608 0
偏差稳定性 0.01 s (°/h)	336.958 8	334.051 0	342.996 0	359.230 9	58.478 2

由表 4 可知,对于仿真数据滤波后的偏差(1 s)近似为滤波前单个陀螺仪偏差的 $1/4$ 即 $1/\sqrt{n}$, ($n = 16$), 与传感器数量对冗余传感器测量精度的影响中的分析一致。而滤波后的偏差(0.01 s)近似为滤波前单陀螺仪偏差的 $1/12$ 。仿真结果说明,阵列式冗余陀螺仪通过滤波进行数据融合,可降低随机误差中的慢变漂移。

由表 5 可知,对于实测数据滤波后的偏差(1 s)近似为滤波前单个陀螺仪偏差的 $1/2$ 即 $1/\sqrt{n}$, ($n = 4$), 与传感器数量对冗余传感器测量精度的影响中的分析一致。而滤波后的偏差(0.01 s)近似为滤波前单个陀螺仪偏差的 $1/5$ 。静态实测数据结果同样表明,阵列式冗余陀螺仪通过滤波进行数据融合,可降低随机误差中的慢变漂移。

3) 动态仿真数据

以上所采用的陀螺仪数据均为静态数据。为了研究动态情况下滤波器效果,现进行动态数据滤波验证。具体方法为将图 2 中 16 组仿真数据叠加到图 8 所示的动态角速度上,形成十六组带误差的动态仿真数据,再基于上述滤波器设计进行滤波输出,滤波前后误差对比如图 9 所示。

该组动态数据滤波后的 0.01 s 偏差稳定性为 54.121 2°/h,1 s 偏差稳定性为 5.941 9 deg/h,分别降低到滤波之前对应数值的 1/4 倍左右。动态仿真数据结果同样表明,阵列式冗余陀螺仪通过滤波进行数据融合,可降低随机误差中的慢变漂移。

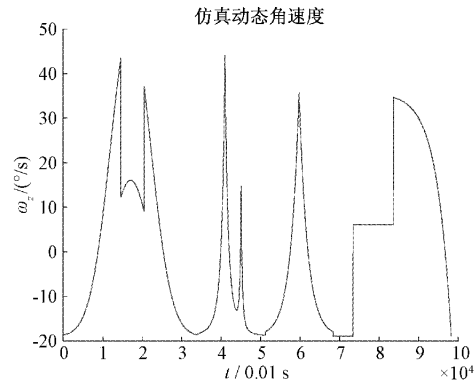


图 8 无误差动态角速度

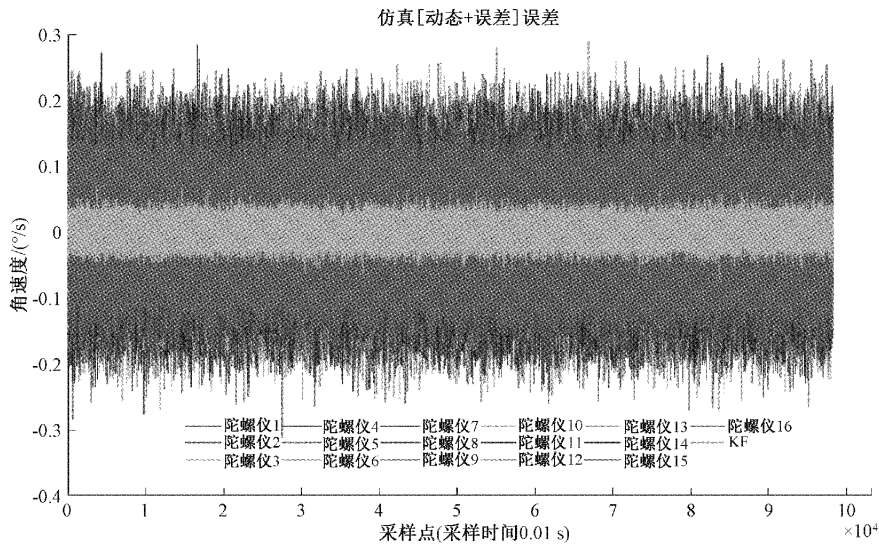


图 9 动态角速度误差滤波前后对比图

4 结 论

基于阵列技术进行同类型冗余陀螺仪设计时,N 个陀螺仪的数据滤波数据输出误差可降低为原有单个陀螺仪误差的 1/N (以方差为指标)或 1/√N (以标准差为指标),从而实现降低随机误差,有效提高陀螺的输出精度的目的。通过静态仿真数据、静态实测数据、动态仿真数据滤波前后对比图及数值定量对比,可知滤波器设计是有效的,通过阵列滤波方式可降低陀螺仪误差中的慢变漂移项。

参考文献

[1] 沈强,刘洁瑜,汪立新,等. MEMS 陀螺阵列技术研究进展[J]. 导航与控制,2017,16(5):97-103,46.
 [2] 李永,赵正平. MEMS 陀螺仪的研究现状与进展[J]. 微纳电子技术,2021,58(9-10):757-768,851-934.
 [3] 周虎,段然,凌震,等. 基于综合电子的某型运载器电气系统方案设计[J]. 宇航总体技术,2019,3(3):19-25.

[4] 荆通,赵鹤鸣. 阵列式 MEMS 惯性传感器及噪声抑制研究[J]. 传感技术学报,2020,33(6):779-784.
 [5] 马星河,毕文龙,朱行,等. 改进 SHAKF 算法消除 IMU 随机误差的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12):59-67.
 [6] 袁广民,李晓莹,常洪龙,等. MEMS 陀螺随机误差补偿在提高姿态参照系统精度中的应用[J]. 西北工业大学学报,2008,26(6):777-781.
 [7] 徐祥,朱琳,荆通,等. 基于阵列 MEMS 磁传感器的测量与标定方法[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(2):213-218.
 [8] 乔文超,王红雨,王鸿东. 基于 BP 神经网络的无人机 IMU 多传感器冗余的补偿算法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(10):19-28.
 [9] 王彬,申亮亮,邵会兵,等. 高精度多冗余捷联惯组配置优化设计与应用研究[J]. 导航定位与授时,2019,6(6):33-40.
 [10] 马龙,刘宇哲,代超璠,等. 组网冗余 MEMS 惯性传感器网络优化配置与融合处理方法[J]. 系统工程与电

- 子技术,2020,42(11):2591-2599.
- [11] SKOG I, NILSSON J O, HÄNDEL P, et al. Inertial sensor arrays, maximum likelihood, and cramer-rao bound[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(16): 4218-4227.
- [12] VACCARO R, ZAKI A. Reduced-drift virtual gyro from an array of low-cost gyros[J]. Sensors, 2017, 17(2): 352.
- [13] LUO Z, LIU C, YU S, et al. Design and analysis of a novel virtual gyroscope with multi-gyroscope and accelerometer array [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(8):085003.
- [14] 翟华,闫梦飞,吕庆洲,等. 组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7):50-57.
- [15] 韩晓微,岳高峰,崔建江,等. 四旋翼无人机陀螺阵列数据融合算法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(8): 213-221.
- [16] 胡付帅,柴艳菊,钟世明. 组合导航用 MEMS 陀螺随机误差特性分析的分段 Allan 方差法[J]. 城市勘测, 2021(2):5.
- [17] 严恭敏,李梓阳,朱宏堡. 基于 Allan 方差分析的陀螺仪漂移误差辨识与仿真复现[J/OL]. 导航定位学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1096.P.20220311.1802.002.html>.
- [18] GRIGORIE T L, BOTEZ R M. A new method to reduce the noise of the miniaturised inertial sensors disposed in redundant linear configurations [J]. Aeronautical Journal, 2013, 117: 111-132.
- [19] 李翔,石琦. 融合光流与惯性传感器的扩展卡尔曼姿态滤波[J]. 电子测量技术,2021,44(17):88-92.
- [20] 樊建彪,孙剑,樊欢欢,等. 基于磁力计、IMU 和单目视觉的自主定位方法[J]. 宇航总体技术,2019,3(6): 39-45.

作者简介

张亦朴,硕士,高级工程师,主要研究方向为运载火箭总体设计的研究。

郭肖亭(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为惯性基组合导航、视觉位置识别等。

E-mail:guoxiaoting@nuc.edu.cn