

光纤陀螺零偏误差特性及噪声分析方法研究

杨远洪^{1,2} 孟晨雪¹

(¹ 北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)
(² 北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘要 光纤陀螺为典型的光纤干涉仪,非互易误差主要是由各类寄生干涉引起,零偏误差具有明显的周期性特征。结合 Allan 方差分析方法,发现由寄生干涉引入的正弦噪声为其零偏误差的主要来源。通过加入正弦噪声进行仿真计算和分析,发现光纤陀螺 Allan 方差曲线中“速率斜坡和速率随机游走”部分实际是由正弦噪声引起。基于小波分析和傅里叶变换实现了陀螺中正弦噪声的辨识,并在此基础上,提出了结合小波分析法和 Allan 方差法计算零偏不稳定性、随机游走和量化噪声的方法,并进行了实际计算验证。

关键词 光纤光学;光纤陀螺;正弦噪声;Allan 方差;零偏误差;噪声分析

中图分类号 TN965 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1206006

Research on the Characteristic of Bias Error and Noise Analysis Method of Fiber Optic Gyroscope

Yang Yuanhong^{1,2} Meng Chenxue¹

(¹ Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)
(² National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Fiber optic gyroscope (FOG) is a typical optical fiber interferometer. The nonreciprocal errors in its output are mainly induced by parasitic interferences and its zero bias error demonstrates a periodical characteristic. The sinusoidal noise induced by the parasitic interferences is found to be the main impact factor of bias error by using the Allan variance analysis method. By adding the sinusoidal noise to the original FOG output, we find that the “rate ramp and rate random walk” sections in the Allan variance curve are due to the sinusoidal noise. The sinusoidal noise identification method is implemented by using wavelet analysis and Fourier analysis. Based on this, the calculation methods for bias instability coefficient, angle random walk coefficient and quantization noise coefficient are proposed with wavelet analysis and Allan variance analysis and validated in experiment.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; sinusoidal noise; Allan variance; bias error; noise analysis

OCIS codes 060.2800; 070.2465; 070.2615; 350.2460

1 引言

噪声分析是研制高精度光纤陀螺(FOG)过程中需要突破的主要技术之一^[1]。在 FOG 噪声分析技术中,噪声系数估计方法有小波方差法^[2]、功率谱密度法^[3]、Allan 方差法等^[4]。在使用上述方法估计噪声系数时,多数文献都没有考虑 FOG 本身特性及其输出信号的特征,在进行随机建模或使用

Allan 方差法对其进行噪声分析时,只分析五项基本的噪声,忽略了正弦项噪声^[5-6]。目前普遍认为,在 Allan 方差曲线中引起尾端上翘的原因是速率随机游走和速率斜坡。但是,引起速率随机游走的噪声源尚不清楚。对于速率斜坡噪声,大都认为其来源于光源强度缓慢的单调变化、测试平台在同一方向上长时间持续的一个极小的加速度或环境温度的

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2014-08-04

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT 1203)

作者简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn (中国光学学会会员号: S040420656S)

缓慢变化等^[7]。但是,对于本质上是干涉仪的 FOG 来说,上述解释比较勉强,需要寻找更合理的解释。

针对以上问题,本文从 FOG 的干涉特性和寄生干涉出发,结合 Allan 方差分析,对零偏误差、速率斜坡等噪声的来源进行了全面深入的分析,研究正弦误差与 Allan 方差分析曲线尾段“上翘”的相关性。提出了基于小波分析法和 Allan 方差法计算零偏不稳定性、随机游走和量化噪声的方法,为 FOG 的诊断和参数测试提供了实用可信的方法。

2 FOG 噪声特点及其 Allan 方差特性

FOG 本质上是一种干涉仪,其自身结构缺陷、性能退化等都会在其光路中产生寄生干涉。例如,背向反射、背向散射引起的干涉以及非理想偏振器引起的偏光干涉等。这些寄生干涉信号叠加在主干涉信号上,导致其最终输出中除了包含 Sagnac 相移外,还存在着误差相位,该误差相位是零偏误差的主要原因。总的噪声信号可描述为

$$I_e = \sum_{i=1}^n I_{e_i} (1 + \cos \phi_{e_i}), \quad (1)$$

式中 I_{e_i} 、 ϕ_{e_i} 分别为第 i 个寄生干涉仪的强度和相位, n 为寄生干涉数目。由于寄生干涉引入的零偏误差呈现周期性,在使用 Allan 方差法研究 FOG 噪声时,它表现为正弦噪声形式。单一频率的正弦噪声的 Allan 方差如下式所示^[8]:

$$\sigma_s^2(\tau) = \Omega_0^2 \left(\frac{\sin^2 \pi f_0 \tau}{\pi f_0 \tau} \right)^2, \quad (2)$$

式中 Ω_0 、 f_0 分别为正弦噪声的幅值和频率, τ 为计算时数组的时间长度。

陀螺输出中总噪声的 Allan 方差可以表示为各项噪声 Allan 方差的和^[8],在考虑正弦噪声的情况下,将(2)式用泰勒公式展开,并简化公式,可以得到

$$\sigma^2(\tau) = \frac{A_{-2} + a_1}{\tau^2} + \frac{A_{-1}}{\tau} + (A_0 + a_2) +$$

$$A_1 \tau + (A_2 + a_3) \tau^2 + a_4 \tau^4 + \dots + a_k \tau^{2k-4}, \quad (3)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, \infty$, A_i ($i = -2, -1, 0, 1, 2$) 分别为与量化噪声、随机游走、零偏不稳定性、随机游走和速率斜坡噪声有关的拟合系数, a_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 为(2)式的泰勒展开式的系数。(3)式表明,正弦噪声的存在,对各项噪声均会产生影响,寄生干涉引入的正弦噪声为 FOG 零偏误差的主要来源。

为直观显示正弦项噪声对 Allan 方差曲线的影响,选取了一组高精度 FOG 实测零偏数据进行验证计算,原始数据如图 1(a)所示,其采样间隔为 1 s,

测试时间为 2 h。为了进行对比,在图 1(a)所示的试验数据中分别加入两个振幅均为 $0.02^\circ/\text{h}$,周期分别为 600 s 和 3600 s 的正弦信号,分别记为 y_1 和 y_2 。加入正弦信号后的零偏曲线分别如图 1(b)和 1(c)所示。对图 1 中三组数据进行 Allan 方差分析,结果如图 2 所示。可以看出,原始数据 Allan 方差曲线(图 2 中曲线 a)尾端没有明显上翘,但存在振荡,呈现出较弱的正弦噪声特性。当加入短周期信号 y_1 时,该信号对 Allan 方差分析结果产生明显影响,如图 2 曲线 b 所示,不仅零偏不稳定值增大,且在尾端还出现了明显的上翘和振荡特征。当加入长周期信号 y_2 时,如图 2 曲线 c 所示,零偏不稳定值几乎不变,但曲线尾端呈现明显上翘特征。值得注意的是,在 Allan 方差曲线左段($\tau < 33$ s),三条曲线完全重合。表明正弦误差对 FOG 的零偏误差影响很大、对由白噪声引起的随机游走影响很小,且 Allan 方差曲线中所谓的“速率斜坡和速率随机游走”噪声本身不存在,曲线尾端上翘是由寄生干涉引起的正弦误差导致的。

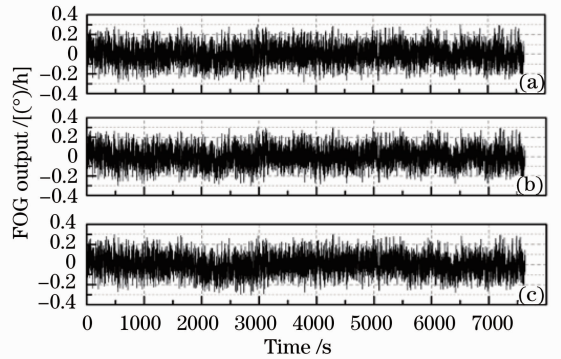


图 1 零偏曲线。(a)原始数据;(b)原始数据+ y_1 ;
(c)原始数据+ y_2

Fig. 1 Bias curves of (a) origin signal, (b) origin signal + y_1 ; (c) origin signal + y_2

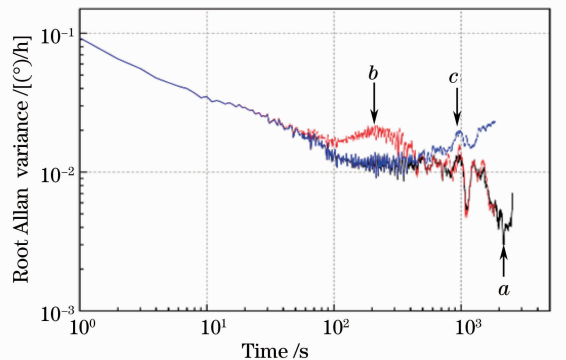


图 2 Allan 方差分析对比

Fig. 2 Comparisons of Allan variance curves

3 周期性噪声的辨识和提取

FOG 漂移中主要包含常值漂移、线性趋势项和周期分量。本文基于小波分析法^[9-10]实现周期性噪声的提取。首先,利用小波分析提取 FOG 输出中含有的漂移信号,然后对该信号进行傅里叶分析,得到正弦噪声的特征参数。在进行傅里叶分析时,常值分量和线性趋势项的存在会对周期分量辨识产生影响。因此,为准确提取正弦信号的特征,需首先对数据预处理,即去除原始数据中的常值分量和线性趋势项。其中,常值分量可以通过计算数据均值来提取,线性趋势项可通过对数据进行线性拟合得到。

对图 1 中 3 组数据预处理后的结果如图 3 所示。选取 db5 小波对其进行小波去噪,分解层数为 7 层,去噪信号如图 3 白色曲线所示。从时域分析结果可以看出,该 FOG 输出中存在低频周期性波动。对去噪信号进行傅里叶分析,结果如图 4 所示。其中图 4(a)存在两个幅值较大的尖峰,说明原始信号中存在两个较为明显的正弦信号,频率分别为 0.00037 Hz、0.00061 Hz,对应的幅值分别为

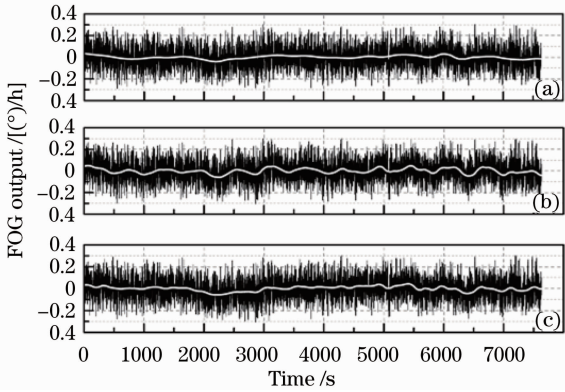


图 3 图 1 原始数据预处理后信号(黑色)和去噪信号(白色)
Fig. 3 Preprocessed signals(black) and de-noised signals(white) of original data in Fig. 1

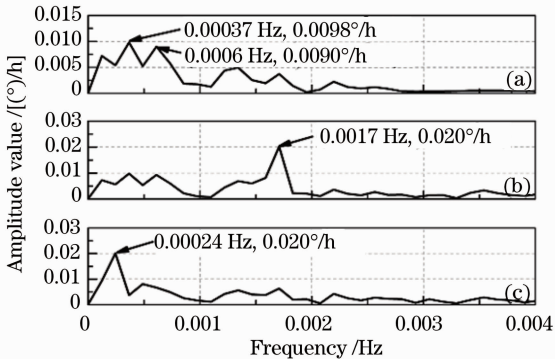


图 4 图 1 原始数据傅里叶分析结果
Fig. 4 Fourier analysis results of original data in Fig. 1

0.0098°/h 和 0.0090°/h;图 4(b)中含有频率为 0.0017 Hz,幅值为 0.020°/h 的正弦信号,与信号 y_1 (频率 1/600=0.0017 Hz,幅值 0.02°/h)一致。图 4(c)中含有频率为 0.00024 Hz,幅值为 0.020°/h 的正弦信号,与信号 y_2 (频率 1/3600=0.00027 Hz,幅值 0.02°/h)一致。

以上计算结果表明,使用傅里叶分析方法来处理小波分析后的信号,能够很好地辨识出原始数据中所含有的正弦信号。

4 零偏不稳定性和噪声系数的计算方法

目前,基于 Allan 方差计算 FOG 噪声系数的主要方法是对 Allan 方差曲线拟合,得到(3)式中各拟合系数,进而确定各噪声值^[8]。在未考虑正弦误差的情况下,拟合误差较大,有时还会出现拟合系数为负值的情况,通常的处理方法是对该负值取绝对值后再计算^[11]。针对以上问题,提出结合小波分析和 Allan 方差法计算零偏不稳定性、随机游走系数和量化噪声系数的方法。

由于零偏不稳定性具有低频特性,在数据中表现为零偏值的波动。采用小波分析法提取信号中低频漂移的特性,通过对去噪信号计算标准差可定量计算零偏不稳定性值。

FOG 中的噪声按频率高低可分为高频噪声和低频噪声。其中,高频噪声包括量化噪声和随机游走。小波分析技术能够很好地实现高、低频噪声的分离,因此,为了准确估计 FOG 的噪声系数,先从测量数据中去除低频噪声,再对处理后的数据进行 Allan 方差分析,对量化噪声和随机游走对应的 Allan 方差 $\sigma_Q^2(\tau)$ 、 $\sigma_N^2(\tau)$ 以(4)式为目标函数进行拟合:

$$\sigma^2(\tau) = \sigma_Q^2(\tau) + \sigma_N^2(\tau) = \frac{A_{-2}}{\tau^2} + \frac{A_{-1}}{\tau} \quad (4)$$

拟合后可得到准确的随机游走系数和量化噪声系数。这种方法避免了对所有噪声项系数进行拟合时,低频噪声对高频噪声的影响。同时,由于拟合所用的数据点数大大减少,在提高计算速度方面具有优势。

5 实验验证

在室温条件下(23 °C左右),将 FOG 固定安装在转台上,通电工作直至输出稳定后,对其进行了 2 h 的零偏测试(采样间隔 1 s),原始数据如图 5 所示。去趋势项后信号如图 6 所示,按照第 4 节中所述的计算方法,选取 db5 小波对预处理后的数据进

行处理,分解层数为7层,去噪信号如图6中白色曲线所示,其傅里叶分析结果如图7所示。图中存在两个峰值较大的点,可以推断 FOG 原始信号中含有两个正弦分量,频率分别为 2.9×10^{-4} Hz、 7.2×10^{-4} Hz,相应的幅值分别为 $0.0089^\circ/\text{h}$ 、 $0.0062^\circ/\text{h}$ 。

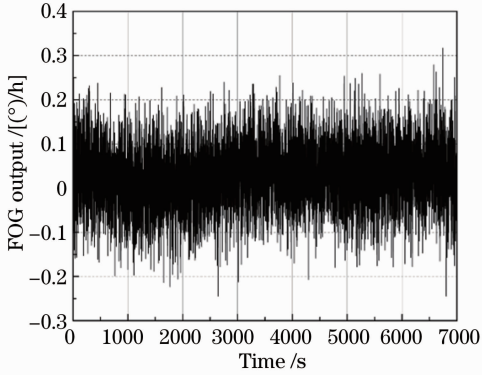


图5 FOG 输出曲线
Fig. 5 FOG output

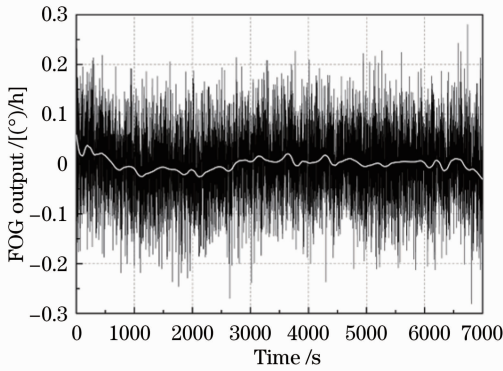


图6 图5原始数据预处理后信号(黑色)及去噪信号(白色)

Fig. 6 Preprocessed signal (black) and de-noised signal (white) of original data in Fig. 5

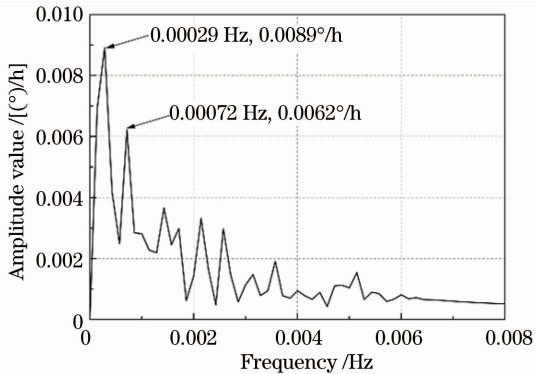


图7 图5原始数据傅里叶分析结果

Fig. 7 Fourier analysis results of original data in Fig. 5

原始数据 Allan 方差分析结果如图8曲线a所示,由 Allan 方差曲线直接估读得到零偏不稳定性

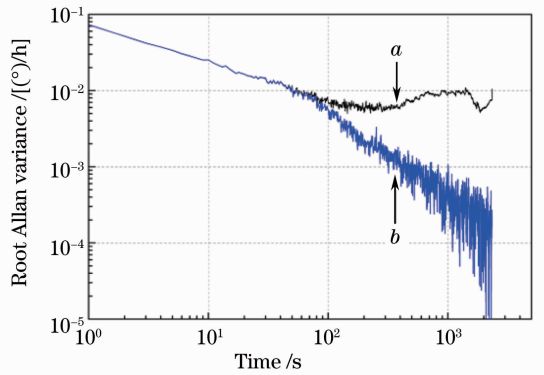


图8 Allan 方差分析

Fig. 8 Allan standard deviation curve

$B' = 0.006/0.664 = 0.0090^\circ/\text{h}$ 。在不考虑正弦误差的情况下对曲线进行拟合,拟合系数 $A_0 = -9.9 \times 10^{-6}$ 为负值,对该负值取绝对值后计算得到 $B'' = 0.0047^\circ/\text{h}$,与 B' 相比小很多,这一现象说明这种处理方式掩盖了 FOG 真实的误差特性。计算图6中去噪信号的标准偏差可得到零偏不稳定性值 $B = 0.012^\circ/\text{h}$,与 B' 近似相等,说明对去噪信号求标准偏差可以定量计算 FOG 的零偏不稳定性,其准确性优于拟合所得的结果。

由 Allan 方差曲线可得到随机游走系数 $N' = 0.0012^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。由于没有明显的斜率为-1的曲线段,所以无法从 Allan 方差曲线直接估计量化噪声系数。通过对 Allan 方差曲线整体拟合,得到量化噪声系数 $Q'' = 0.0045 \mu\text{rad}$ 和随机游走系数 $N'' = 0.0013^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。对小波分析分离出的高频噪声进行 Allan 方差分析,结果如图8曲线b所示。从图中可知在 $\tau < 70$ s 时,曲线a和b重合,以重合段曲线为样本,以(4)式为拟合目标函数,得到量化噪声系数和随机游走系数分别为 $Q = 0.0040 \mu\text{rad}$, $N = 0.0012^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。与传统计算方法所得结果基本一致。但这种计算方法消除了(3)式中其他项的干扰,且拟合方程(4)式与(3)式相比更为简单,得到的结果更加准确可信。采用传统的拟合方法计算时,使用的样本点数为2300,计算时间为2s,而本方法使用的样本点数为70,计算时间约为1s。因此,在对 FOG 进行长期测试及大数据量的分析时,本方法在改善计算速度方面的优势将明显体现。

6 结 论

FOG 作为典型的光纤干涉仪,其光路中存在的寄生干涉会导致其输出信号中含有干涉误差,基于该干涉误差信号的特点并结合 Allan 方差分析法,

明确了由寄生干涉引入的正弦噪声为 FOG 零偏误差的主要来源。通过加入正弦噪声的方法进行了仿真计算和分析,发现 FOG 的 Allan 方差分析曲线中“速率斜坡和速率随机游走”段实际是由正弦噪声引起。基于小波分析和傅里叶分析方法实现了 FOG 中正弦噪声的辨识,在此基础上提出了结合小波分析法和 Allan 方差分析法的 FOG 零偏不稳定性、随机游走和量化噪声的计算方法,并进行了实验验证,为 FOG 的诊断和参数测试提供了一种实用可信的方法。

参 考 文 献

- 1 Zha Feng, Gao Jingdong, Xu Jiangning, *et al.*. Overview on strapdown inertial system consisted by optical gyros [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2011, 48(7): 072301.
查 峰, 高敬东, 许江宁, 等. 光学陀螺捷联惯导系统发展与展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 072301.
- 2 Gao Yukai, Deng Zhenglong. Investigation on random error properties of optic gyro based on wavelet variance [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, 12(5): 66-70.
高玉凯, 邓正隆. 基于小波方差的光学陀螺随机误差特性研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2004, 12(5): 66-70.
- 3 Q M Lam, N Stamatakos, C Woodruff, *et al.*. Gyro modeling and estimation of its random noise sources [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2003. 1111-1114.
- 4 Lai Jizhou, Liu Jianye, Lin Xueyuan, *et al.*. Performance evaluation on IFOG [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(9): 31-34.
赖际舟, 刘建业, 林雪原, 等. 干涉式光纤陀螺的性能评价[J]. *传感器技术*, 2004, 23(9): 31-34.
- 5 N El-Sheimy, H Hou, X Niu. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(1): 140-149.
- 6 S J Sanders, L K Strandjord, D Mead. Fiber optic gyro technology trends-a Honeywell perspective [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002. 5-8.
- 7 Lü Xiaoqin, Zhang Guicai. Estimation of various noise factors from Allan variance by subsection method [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2009, 31(2): 166-168.
闻晓琴, 张桂才. 采用分段法估算 Allan 方差中的各噪声系数[J]. *压电与声光*, 2009, 31(2): 166-168.
- 8 IEEE Std 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros [S]. USA, 1998.
- 9 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Research and improvement of denoising method of fiber optic gyroscope based on wavelet packet analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2224-2228.
李家奎, 许化龙, 何 婧. 光纤陀螺信号的小波包去噪及改进[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2224-2228.
- 10 Tang Xiaqing, Cheng Xuwei, Guo Libing, *et al.*. Error modeling and compensating of fiber optic gyro based on wavelet analysis and grey neural network [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1008003.
汤霞清, 程旭维, 郭理斌, 等. 小波分析和灰色神经网络融合的光纤陀螺误差建模与补偿[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1008003.
- 11 Ma Jing, Zhou Xiaohong, Chao Daihong. Noise estimation methods of laser gyroscope based on Allan variance [J]. *Navigation and Control*, 2013, 12(1): 38-44.
马 静, 周小红, 晁代宏. 基于 Allan 方差的激光陀螺噪声估计方法研究[J]. *导航与控制*, 2013, 12(1): 38-44.

栏目编辑: 何卓铭