

文章编号: 1672-8785(2010)01-0012-05

中高精度光纤陀螺的误差分析及抑制措施

党淑雯 孙作雷 钱 峰 田蔚风

(上海交通大学电子信息与电气工程学院仪器系导航与控制研究所, 上海 200240)

摘 要: 光纤陀螺 (FOG) 是惯性导航系统中新发展起来的一代惯性测量元件, 其性能深受光源、多功能光电集成芯片及光电探测器等光电器件的影响。文章阐述了中高精度光纤陀螺的主要噪声机理, 对两个不同精度等级的陀螺进行了 Allan 方差分析。根据 FOG 噪声参数估计值判断出 FOG 中白噪声和分形噪声的含量, 从而验证了 FOG 的精度级别, 并给出了不同精度 FOG 的改进方案, 为提高 FOG 精度提供了理论指导。

关键词: 光学器件; 光纤陀螺; 高精度; 分形噪声; 噪声机理

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.01.003

Analysis of Noise in High Precision Fiber Optic Gyros

DANG Shu-wen, SUN Zuo-lei, QIAN Feng, TIAN Wei-feng

(Department of Instrumentation Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Fiber optical gyro (FOG) is a new developed inertial measurement unit for inertial navigation systems. Its performance greatly depends on the photoelectric devices such as optical sources, integrated chips and photoelectric detectors used. The main noise mechanisms of high precision fiber optic gyros are presented and the Allan variance analysis of two gyros with different precision is made. The content of white noise and fractal noise in a FOG is judged according to the estimated noise parameters of the FOG. Thus, the precision of the FOG is verified and the improved schemes for FOGs with different precision are given so as to provide theoretical guidance for the improvement of the precision of FOGs.

Key words: optical device; fiber optic gyro; high precision; fractal noise; noise mechanism

1 引言

基于 Sagnac 效应^[1]的干涉型光纤陀螺作为重要的角速度传感器, 在航空航天领域已开始进入实用化阶段。由于 Sagnac 效应产生的相位差在经过光纤环放大并被检测的同时, 光电系统的微小干扰都将影响光纤陀螺的性能, 因此这不利于研制中、高精度的实用化光纤陀螺。低

精度光纤陀螺的噪声主要表现为白噪声, 而在中、高精度光纤陀螺的输出噪声中, 除高斯白噪声外, 还包含了具有自相似特性的 $1/f^\gamma$ 的分形类噪声。分形噪声是一种具有长程相关性、自相似性及 $1/f^\gamma$ 类型谱密度特点的非平稳噪声^[2]。该类噪声首先是由 Johnson 在电子管里发现的, 当时被看作是一种超低频噪声。后来, 人们在实践中发现, 它不仅作为一种噪声存在于电子管、

收稿日期: 2009-08-25

基金项目: 航天科技创新项目基金资助项目 (2006)

作者简介: 党淑雯 (1980-), 女, 内蒙古人, 博士研究生, 研究方向为惯性导航技术和非线性滤波技术, E-mail: guoguo17606@hotmail.com

晶体管等电子器件和装置中, 而且作为一种随机波动形式(或随机过程)广泛存在于音乐、气象、交通、水文和经济等领域中。因此, 它已成为信息处理领域中的一个重点研究内容。

光纤陀螺发展至今, 根据其应用精度的不同, 大致可分为速率级、战术级、惯性级三个类型^[3], 其技术指标如表 1 所列。影响光纤陀螺精度的因素很多, 主要因素是光源噪声及集成光学芯片的本征噪声。目前国内外光纤陀螺的商品化是在上世纪 90 年代初才陆续展开的, 中低精度的光纤陀螺(特别是干涉式光纤陀螺)已经商品化, 并已在多个领域内得到应用; 高精度光纤陀螺仪的开发和研制正走向成熟阶段。自 1990 年以来, 随着光通信领域掺铒光纤放大器技术的发展, 采用宽带超荧光掺铒光纤光源的中高精度光纤陀螺技术取得了重大突破。可以看出, 在不远的未来, 光纤陀螺将逐渐取代机电陀螺和激光陀螺, 并从中低精度应用领域向中高精度的应用领域发展, 成为惯性导航和战略应用领域的主要仪表。

表 1 干涉式光纤陀螺的精度级别

级别	随机游走	零偏稳定性
惯性级	$< 0.001^\circ/\sqrt{h}$	$< 0.01^\circ/h$
战术级	$0.5^\circ \sim 0.05^\circ/\sqrt{h}$	$0.1^\circ \sim 10^\circ/h$
速率级	$> 0.5^\circ/\sqrt{h}$	$10^\circ \sim 1000^\circ/h$

2 数字闭环光纤陀螺的组成原理

干涉式光纤陀螺的原理基于 Sagnac 效应: 当陀螺旋转时, 光纤线圈内沿顺时针和逆时针方向传播的两束光波之间产生一个与旋转角速率 Ω 成正比的相位差 Φ_s :

$$\phi_s = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

式中, R 为光纤线圈的半径, L 为光纤长度, λ 为光源的平均波长, c 为真空中的光速。由于 Φ_s 与光纤线圈的半径和光纤的长度成正比, 半径越大, 光纤越长, 陀螺精度就越高, 因此, 在

总体方案不变的情况下, 可以通过采用不同结构和不同水平的器件来满足不同用户的各种应用要求。这种设计上的灵活性是光纤陀螺区别于其他机电陀螺的优势所在。

目前, 本项目组在研的典型数字闭环光纤陀螺的基本结构框架如图 1 所示。整个系统分为光路和电路两部分。光路部分的光学器件包括光源、光纤环圈、光纤耦合器、Y 波导和光电探测器。电路部分包括前置放大器、滤波电路、A/D 转换器、以 DSP 和 FPGA 为核心的数字信号处理电路、D/A 转换器和其他驱动电路。图 1 中的 1 为超发光二极管; 2 为 Layout 消偏器; 3 为光纤耦合器; 4 为偏振器; 5 为相位调制器; 6 为光纤线圈 FOC; 7 为 PIN-光电探测器; 8 为 PINFET。

3 中高精度光纤陀螺的噪声机理分析

FOG 性能在很大程度上受光源、多功能光电集成芯片及光电探测器等光电器件的影响^[4,5]。针对光纤陀螺噪声源的分析研究对于系统的结构改进具有重要意义。通过分析噪声的相关参数, 可以在测试过程中对光纤陀螺的性能进行评估计算, 并且能够为今后的改进设计进行性能预测, 同时它还可以为基于光纤陀螺的惯性导航系统的设计提供理论上的定性分析和定量计算。

FOG 中的噪声从产生机理上主要可以分为两大类: 光源噪声和光纤与集成芯片的本征噪声(见图 2)。FOG 使用的光源按其频谱带宽可大致分为三类: 相干光源(LD、固体、气体激光器、光纤掺杂激光器), 此类光源噪声中不可忽视的原因即为 Kerr 效应; 部分相干光源(超发光二极管 SLD、SLS), 此类光源可以避免 Kerr 效应; 非相干光源(发光二极管 LED), 此类光源的主要噪声是由温度漂移所引起的。光学陀螺的测量精度反比于光源的谱线宽度, 相干光源提供了一种高精度测量用的窄线宽光源, 但相干性又增加了噪声的数量, 而部分相干或非相干光源的发光机理受热辐射的荧光的影响, 其

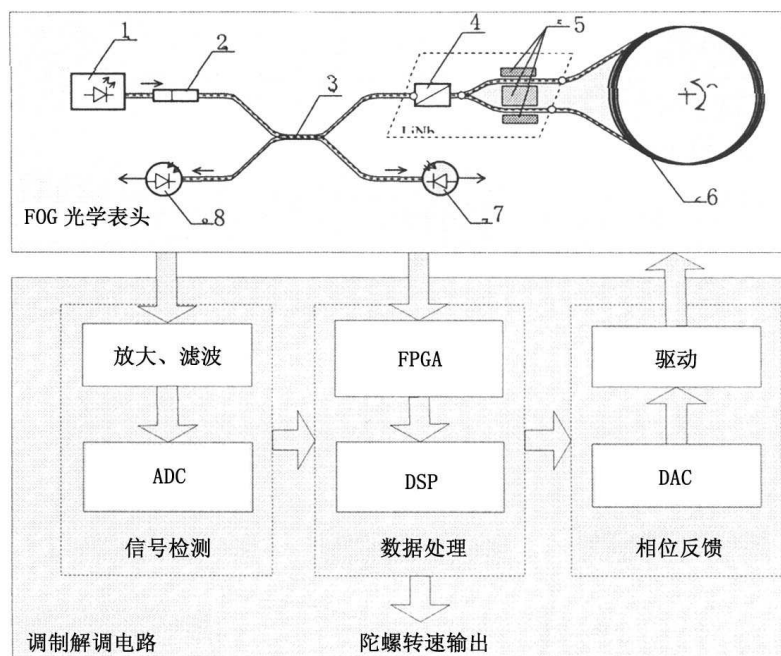


图 1 数字闭环光纤陀螺的结构框图

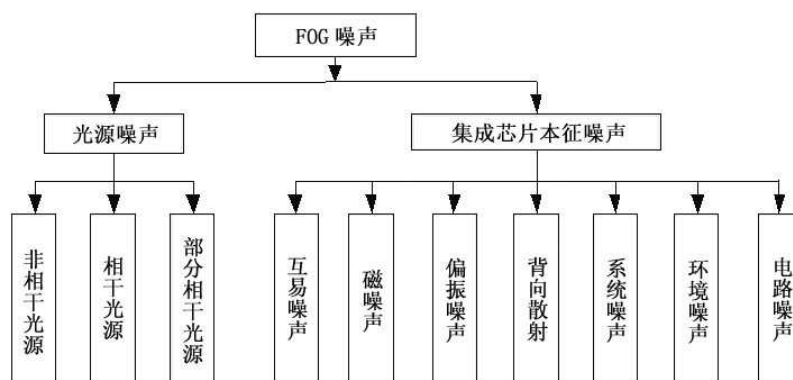


图 2 光纤陀螺噪声来源机理

特点为宽带、多模和非偏振光。用于光纤环和传输的光纤可分为三类：多模光纤、单模光纤、保偏光纤，集成光学芯片也相应地被制成多模、单模和保偏型。多模波导器件的主要问题是模间耦合导致精度下降，而零漂却相对减少；保偏光纤有效地消除了法拉第效应和偏振噪声。光纤与集成芯片的本征噪声主要包括：在集成光路与光纤环中，由分束比偏差、法拉第效应、Kerr效应等造成的非互易噪声；当光纤环中存在非对称点使光产生延迟时，法拉第效应引起的非互易传输就会产生相位差，导致零漂；随机分布的

小的双折射、扭曲、内应力及材料缺陷的存在，会导致产生相位差甚至相互耦合，产生零漂；背向散射、系统噪声、环境噪声以及电路噪声也是不容忽视的噪声源。

从误差特性的角度来分析，光纤陀螺的噪声主要包括量化噪声、随机游走、偏置不稳定性、角速率斜坡以及速率随机游走。其中，随机游走系数的主要来源是光源的相对强度噪声、探测器的电噪声和散粒噪声以及相关时间比采样时间短的其他高频噪声项和光纤陀螺中的二阶背向散射，这些噪声均可用白噪声描述。零偏

不稳定性源于法拉第磁场效应、温度波动引起的漂移或其他低频环境噪声以及光纤陀螺中的偏振演变和探测器的闪烁噪声。由于其低频特性, 在数据中表现为零偏值的波动。这类噪声的功率谱密度在一定范围内与频率成反比, 故可视为 $1/f^\gamma$ 分形类噪声, 尤其在高精度 FOG 中, 与白噪声相比, 分形噪声占主要成分^[6,7]。

4 中高精度光纤陀螺的误差特性测试

我们采用了 I 型和 II 型两种不同精度的光纤陀螺, 其中 I 型 FOG 属于速率级, 而 II 型 FOG 属于战术级。在常温下对它们分别进行静态零偏、随机游走测试^[8], 采样频率均为 10Hz, 采样时间为 1min, 两个型号的陀螺测试数据分别见

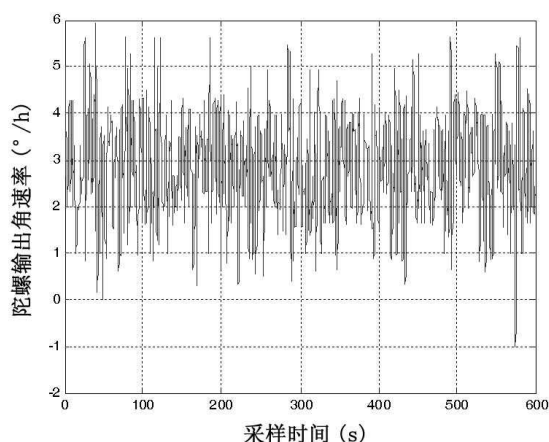


图 3 I 型光纤陀螺的测试数据

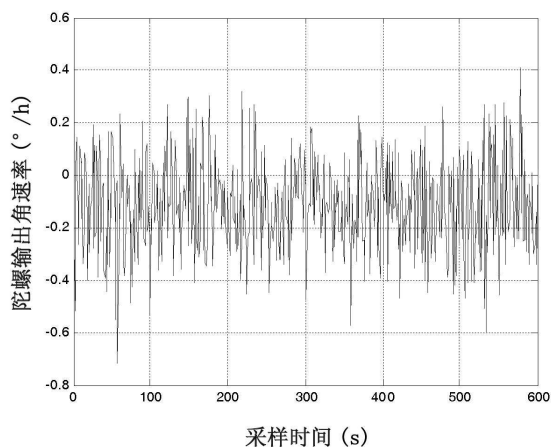


图 5 II 型光纤陀螺的测试数据

图 3 和图 5。对两种型号的陀螺分别进行了 Allan 分析 (见图 4 和图 6), 并将两种陀螺的 Allan 方差曲线进行了比较, 且计算得出了它们的零偏不稳定性及随机游走噪声 (见表 2)。对 Allan 方差曲线以及 FOG 性能评估指标进行比较后得出: 在 I 型光纤陀螺输出信号中, 偏置不稳定性为 $0.0018^\circ/h$, 角随机游走为 $0.0009^\circ/\sqrt{h}$; 在 II 型光纤陀螺中, 偏置不稳定性为 $0.0009^\circ/h$, 角随机游走为 $0.0002^\circ/\sqrt{h}$ 。

此外, 采用小波变换域极大似然估计算法估计出: 随机噪声参数^[9,10] $\Theta = \{\beta, \sigma^2, \sigma_w^2\}$, 由 $\beta = 2\gamma$ 及 $\gamma = 2H + 1$ 可以获得自相似参量 H 的估计值。其中 σ_w 代表白噪声的噪声强度, 而 σ_x 和 γ 代表分形噪声的参数。由估计出来的 σ^2 和

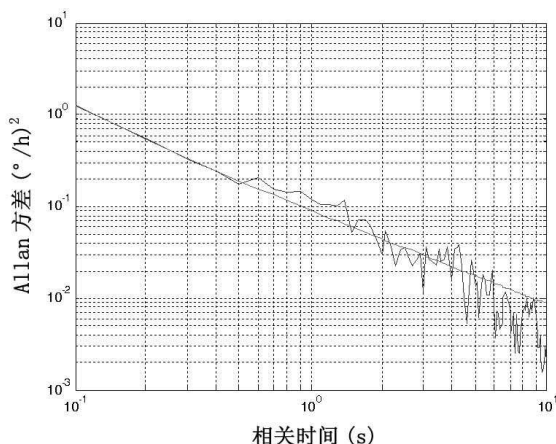


图 4 I 型光纤陀螺的 Allan 方差分析曲线

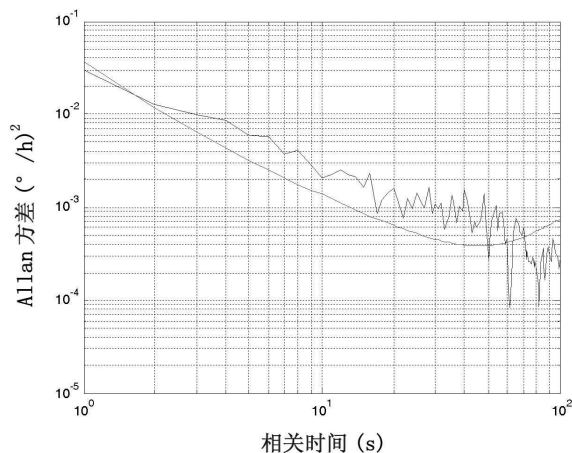


图 6 II 型光纤陀螺的 Allan 方差分析曲线

σ_w^2 ，可以判断 FOG 中白噪声和分形噪声的含量，从而可大致上判断 FOG 的精度级别，并对其相应的精度级别给出相应的 FOG 的改进方案，从而提高其精度。

表 2 FOG 输出的信号噪声对比

陀螺型号	偏置不稳定性 ($^{\circ}/h$)	角随机游走 ($^{\circ}/\sqrt{h}$)
FOG I	0.0018	0.0009
FOG II	0.0009	0.0002

表 3 光纤陀螺的随机噪声的估计结果

陀螺型号	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\sigma}_w^2$	$\hat{\gamma}$	$\hat{H}$
FOG I	0.0000291	0.003962	1.9271	0.4636
FOG II	0.000427	0.0000231	1.9792	0.4896

通过比较表 3 中的噪声参数估计结果，可以看出，在 I 型光纤陀螺中，白噪声是主要成分，分形噪声是次要成分，故 I 型光纤陀螺为低精度的光纤陀螺；在 II 型光纤陀螺中，分形噪声是主要成分，白噪声是次要成分，故 II 型光纤陀螺为高精度的光纤陀螺。以上结论与技术手册的性能指标是相符的。基于以上分析，根据分形噪声及白噪声是否占主导地位，可判断出 FOG 的具体性能，从而可以有针对性地改善 FOG 的物理器件或结构，进一步提高 FOG 的精度。比如，对于 II 型光纤陀螺，分形噪声含量相对较高，FOG 精度的提高主要是在分析分形噪声源的基础上消除分形噪声。分形噪声主要由光路波动导致的偏置不稳定引起，瑞利后向散射带来的相位误差、法拉第效应引起的误差、偏振器不理想引起的误差也是产生分形噪声的主要原因。故具体的措施如下：

(1) 减小集成光路器件中的插入损耗。

(2) 改变分光比，使其接近于 1，消除由于瑞利后向散射所产生的分形噪声；

(3) 采用保偏光纤或消偏器以抑制 FOG 中的法拉第效应。

(4) 波导和光纤采用 10° 和 15° 的端面斜抛，减小端面的背向反射。

5 结论

目前，国外光纤陀螺的研究工作出现了一些新的研究动向，主要体现在以下两个方面：一、深入开发中低精度光纤陀螺的应用，特别是在民用惯性导航系统中的应用；二、加强精密级光纤陀螺的技术与应用研究，以满足战略、战术和速率级惯性系统的需要。而在中高精度光纤陀螺的输出噪声中，分形噪声的抑制已成为不可忽视的关键技术。通过分析光学陀螺的噪声产生机理及特性，可判断出白噪声及分形噪声在随机噪声中所占的比重。这对光学陀螺性能的评估以及系统设计具有重要的指导意义，同时也为从硬件上改进光学陀螺的结构，进而提高其精度提供了理论基础。

参考文献

- [1] V Vali, R W Shorthill. Fiber ring interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **1**(15): 1099-1100.
- [2] M S Keshner. 1/f Noise, *Proceedings of the IEEE* [J]. 1982, **70**(3): 213-218.
- [3] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 4-5.
- [4] 米剑, 张春熹, 李铮, 等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1140-1144.
- [5] 韩军良, 葛升民, 沈毅. 数字闭环光纤陀螺建模与仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2008, **20**(4): 833-836.
- [6] 叶炜, 周柯江. 中高精度光纤陀螺的分形噪声研究 [J]. *光子学报*, 2000, **29**(6): 517-520.
- [7] 张传斌, 王学孝, 邓正隆. 基于小波分析的 FOG 中 1/f 噪声的去除方法研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2002, **24**(4): 64-66.
- [8] 杨亭鹏, 高亚楠, 陈家斌. 光纤陀螺仪零漂信号的 Allan 方差分析 [J]. *光学技术*, 2005, **31**(1): 87-89.
- [9] S M Bielas. Stochastic and dynamic modeling of fiber gyros [J]. *SPIE*, 1994, **2292**: 240-253.
- [10] B Ninness. Estimation of 1/f Noise [J]. *IEEE Trans. on IT*, 1998, **44**(1): 32-46.