

高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性研究

左文龙, 惠菲, 于浩, 陈馨, 张书颖
(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要: 光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性表征陀螺 $1/f$ 噪声或环境引起的其他低频漂移, 并影响陀螺在系统中的应用性能。因此, 分析 Allan 方差零偏不稳定性就具有重要意义, 对 Allan 方差零偏不稳定性进行理论分析和试验验证, 在理论分析的基础上采用了提高 Allan 方差零偏不稳定性技术措施, 测试结果表明, 技术措施明显提高了高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性。

关键词: 光纤陀螺; SHUPE 误差; Allan 方差

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2015)06-0055-04

Research on Fiber Optic Gyroscope Allan Variance Bias Instability

ZUO Wen-long, HUI Fei, YU Hao, CHEN Xin, ZHANG Shu-ying
(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: Fiber optic gyro Allan variance bias instability characterizes $1/f$ noise and low frequency drift caused by environment, also affect the application performance of gyroscope when it used in system. Therefore, the analysis of Allan variance bias instability has great significance. This article has carried on the theoretical analysis and experimental verification of Allan variance bias instability, based on the analysis of the theory put forward the technical measures to improve the bias stability of the Allan variance bias instability. The fog which used the technical measures is tested, the test results show that the technical measures significantly improve the Fiber optic gyro Allan variance bias instability.

Key words: Fiber optic gyro; SHUPE bias errors; Allan variance

0 引言

高精度光纤陀螺由于其本身相对于传统机械陀螺所具有的全固态、耐冲击、高精度等一系列优点, 可广泛应用于空间定位、战略导弹制导、潜艇导航等领域。然而作为惯性导航系统的核心部件, 由于高精度光纤陀螺为获得较高的精度性能, 表头尺寸比普通光纤陀螺要大, 光纤长度变的更长, 使其更易受到外界环境变化带来的影响, 降低了陀螺性能^[1]。

目前, 评价陀螺性能的一个关键指标是陀螺

的零偏稳定性, 即陀螺零偏平均值随平均时间的变化。平均时间短时, 由于角速率白噪声的存在, 会淹没零偏稳定性, 也就是说, 测量的零偏平均值变化较大; 平均时间长时, 一些低频漂移、趋势项漂移或其他附加漂移也会增加零偏测量的变数。在这种情形下, 评价陀螺零偏稳定性比较科学的是 Allan 方差零偏不稳定性, 指的是 Allan 方差曲线在斜率为零时所对应的群平均时间下计算的数据的标准偏差 (如图 1)。更重要的是, Allan 方差零偏不稳定性是一种可以识别的、独立的噪声类别, 其噪声系数与系统角误差有明确的关系。

收稿日期: 2015 - 05 - 23; 修订日期: 2015 - 07 - 31。

作者简介: 左文龙 (1984 -), 男, 工程师, 主要从事舰船导航研究。

E-mail: zuowenlong@163.com

另外, 必须指出, 在用零偏不稳定性评价陀螺长期性能时, 趋势项漂移不能超过零偏不稳定性, 否则应选取趋势项漂移数据。

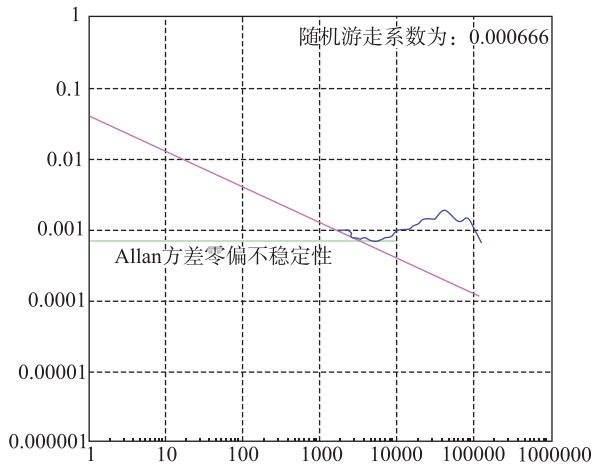


图1 Allan方差零偏不稳定性图

Fig. 1 Allan variance bias instability

1 高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性影响机理分析

1.1 高精度光纤陀螺评价指标分析及意义

通常可以用噪声指标来表征高精度光纤陀螺的精度指标(其标度因数性能也应与其精度指标相对应)。普遍采用的精度指标有: 1) $T=100\text{s}$ 平滑零偏稳定性 $\sigma_{100\text{s}}(^{\circ})/\text{h}$; 2) 角随机游走 $\text{ARW}(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$; 3) Allan 方差意义的零偏不稳定性 $\sigma_{\text{BI}}(^{\circ})/\text{h}$ 。

实际上陀螺的输出常常以白噪声为主, 在这种情况下 $\sigma_{100\text{s}}$ 和 ARW 之间的关系可近似表示为

$$\text{ARW}(^{\circ})/\sqrt{\text{h}} \approx \sigma_{100\text{s}}\sqrt{T} \quad (1)$$

比如, $T=100\text{s}$ 平滑零偏稳定性为 $\sigma_{100\text{s}}=0.001(^{\circ})/\text{h}$ 的高精度光纤陀螺, ARW 约为 $0.00017(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$ 。但是, 角随机游走和 Allan 方差意义的零偏不稳定性是两个独立的表征光纤陀螺中不同噪声分量的指标。简单来说, 角随机游走表征白噪声, 而 Allan 方差意义的零偏不稳定性表征 $\frac{1}{f}$ 噪声或环境引起的其他低频漂移, 这也是光纤陀螺中两类最主要的噪声。

由于 Allan 方差零偏不稳定性可表征陀螺的低

频漂移, 所以提高高精度光纤陀螺 Allan 零偏不稳定性可以显著改善其在系统应用中的性能。图 2 的仿真曲线指出, 对于 $T=100\text{s}$ 平滑零偏稳定性均为 $0.0012(^{\circ})/\text{h}$ 的两只光纤陀螺, 红色曲线陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性为 $0.00004(^{\circ})/\text{h}$, 工作 100h 对应的角误差为 $500''$, 绿色曲线陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性为 $0.00035(^{\circ})/\text{h}$, 工作 100h 对应的角误差为 $1400''$, 对于 $T=100\text{s}$ 平滑零偏稳定性同样精度的两只陀螺, 具有较好的 Allan 方差零偏不稳定性的陀螺长期工作产生的角误差要小的多。

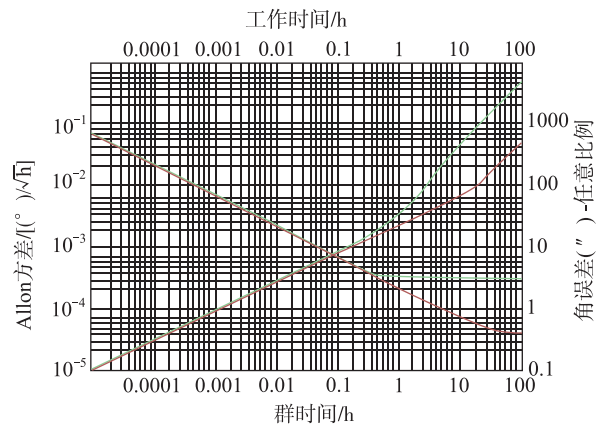


图2 不同的 Allan 方差曲线对角误差的影响图

Fig. 2 The effect of different allan variance curve

1.2 高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性与光纤环性能关系

增加光纤长度和环圈直径或采用进一步降噪措施可以改善角随机游走 ARW , 但 Allan 方差意义的零偏不稳定性与光纤环圈的质量密切相关。高精度光纤陀螺相对于普通光纤陀螺由于采用大的敏感头尺寸及长的光纤, 其光纤环圈更易到受外界环境影响。

温度扰动对陀螺的影响包括两个方面, 一是陀螺工作的环境温度变化对陀螺工作状态的影响; 二是陀螺器件本身材料特性对温度的敏感性。当外界环境发生变化时, 引起了陀螺输出信号的偏移。温度扰动对陀螺环圈的影响可以用 shupe 误差来表征, Shupe 误差是指当光纤陀螺线圈中一段光纤存在时变的温度扰动时, 除非这段光纤位于线圈中部, 否则由于两束反向传播光波在不同时间经过这段光纤, 因温度扰动而经历不同的相移,

这种温度引起的非互异性相移^[2]。

Allan 方差零偏不稳定性与 Shupe 系数两者之间的关系可表示为

$$\sigma_{\text{BI}}(^{\circ})/\text{h} = K_{\text{shupe}} [(^{\circ})/\text{h}] / (^{\circ}/\text{h}) \times \Delta T (^{\circ}/\text{h}) \quad (2)$$

式中, σ_{BI} 为 Allan 方差零偏不稳定性 ($^{\circ}$)/h, K_{shupe} 为 Shupe 系数, ΔT 为温度变化率。

对某型陀螺进行高低温试验, 测试出其 Shupe 单峰为 $1 [(^{\circ})/\text{h}] / (^{\circ}/\text{min})$ 。随后进行 Allan 方差零偏不稳定性测试, 并监测测试过程中的温度变化, 在测试的过程中温度变化率 ΔT 为 $0.5^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ 。

利用上述参数计算该陀螺 Allan 方差零偏不稳定性

$$\begin{aligned} & \frac{1}{60} [(^{\circ})/\text{h}] / (^{\circ}/\text{h}) \times (0.5^{\circ}\text{C}/24\text{h}) \\ &= \frac{1}{60} \times \frac{0.5}{24} = 0.00035 [(^{\circ})/\text{h}] \end{aligned}$$

该型陀螺实际测试时, Allan 方差零偏不稳定性为 $0.0004 (^{\circ})/\text{h}$ 。理论分析结果和实际测试结果表明, 实际测试 Allan 方差零偏不稳定性与理论分析 Allan 方差零偏不稳定性一致。

1.3 高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性与信号处理相关

高精度光纤陀螺信号处理采用方波调制技术^[3], 当调制方波为非理想方波时, 如图 3 所示。其中方波上沿斜率为 r 、下沿斜率为 f , $t_c \neq T/2$ 说明占空比不为 $50:50$, $H \neq L$ 说明正、负偏置相位幅值不同。

将图 3 中的波形进行傅里叶变换

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{j2n\pi \frac{t}{T}} dt \quad (3)$$

经推导, 可得到

$$c_n = \frac{1}{4n^2 \pi^2} \times \left\{ \begin{aligned} & Tr \cdot e^{jn\pi \frac{H-L}{Tr}} \left[2j \sin \left(n\pi \frac{H+L}{Tr} \right) \right] \\ & - Tf \cdot e^{j2n\pi \frac{t_c}{T}} e^{-jn\pi \frac{H-L}{Tf}} \left[2j \sin \left(n\pi \frac{H+L}{Tf} \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

令

$$\frac{t_c}{T} = \frac{1}{2} + \gamma, \quad Tr = \frac{H}{\varepsilon_1}, \quad Tf = \frac{H}{\varepsilon_2} \quad (4)$$

其中, γ 是相对 $50:50$ 的占空比误差, ε_1 、 ε_2 是上、下沿时间与方波周期之比。因而

$$c_n = \frac{j}{2n^2 \pi^2} \times \left\{ \begin{aligned} & \frac{H}{\varepsilon_1} e^{jn\pi \varepsilon_1 \frac{H-L}{H}} \left[\sin \left(n\pi \varepsilon_1 \frac{H+L}{H} \right) \right] - \\ & \left(-1 \right)^n \frac{H}{\varepsilon_2} e^{j2n\pi \gamma} e^{-jn\pi \varepsilon_2 \frac{H-L}{H}} \left[\sin \left(n\pi \varepsilon_2 \frac{H+L}{H} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

考虑式 (5) 中的偶次余弦谐波, 当 γ 、 ε_1 、 $\varepsilon_2 \ll 1$ 时, 式 (5) 近似为

$$\text{Re}[c_{n=2k}] \approx \frac{H+L}{2} \left\{ 2\gamma - \frac{H-L}{H} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right\} \quad (6)$$

考虑到光纤折射率或本征频率的温度相关性 ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$), 相位误差为

$$\phi = \frac{H+L}{2} \left\{ 2\gamma \cdot 10^{-5} - \frac{H-L}{H} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right\} \quad (\text{rad}/^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

相应的角速率误差或漂移为

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{\lambda c}{2\pi LD} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3600 \cdot \frac{H+L}{2} \\ & \left\{ 2\gamma \cdot 10^{-5} - \frac{H-L}{H} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right\} [(^{\circ})/\text{h}] / ^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 取 $H=L=3\pi/4$, $\gamma=10^{-3}$, 当温度跨度为 0.1°C , $L=1200\text{m}$, $D=0.1\text{m}$, 得到: $\Omega=0.0006 (^{\circ})/\text{h}$ 。由上式可知, 方波占空比误差 γ 越大, 漂移误差 Ω 越大。该漂移误差会使得陀螺 Allan 方差零偏不稳定性变差, 影响陀螺长期性能。

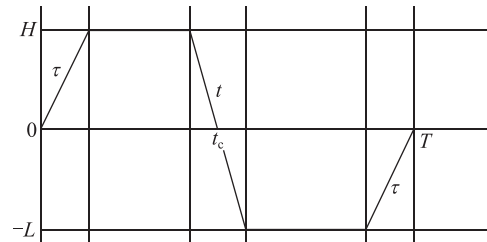


图 3 光纤陀螺调制波形的非理想性示意图

Fig. 3 The sketch for non-ideal modulation wave in FOG

2 高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性性能改进

上述分析可知,提升高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性可以从如下三个方面入手。

1) 降低光纤环圈的 Shupe 系数。式(2)表明 Allan 方差零偏不稳定性与 Shupe 系数两者之间成正比例关系,提高光纤陀螺 Allan 方差不稳定性可以通过降低光纤环圈的 Shupe 系数来实现。

通过合理设计光纤环圈的外形尺寸,优化环圈外径和高度等窗口信息,选择合适的绕制方法、绕制层数,并在环圈绕制时选择合适的胶体并控制绕制张力,可进一步降低光纤环圈的 Shupe 峰值,从而提升高精度光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性。

2) 提高数字处理电路的性能。高精度光纤陀螺数字处理电路作为光纤陀螺闭环处理以及数字输出的功能模块,其电磁兼容性能也会对 Allan 方差零偏不稳定性产生影响^[4]。从前述分析可以看出,调制方波的不对称性导致光纤陀螺 Allan 方差零偏不稳定性变差。通过精心的电路设计和合理的布局布线可以提升数字处理电路的性能,提高陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性。

3) 对光纤陀螺进行隔热设计,隔热缓冲设计可以降低外界环境变化对陀螺带来的影响,降低 Allan 方差意义的零偏不稳定性。根据前述分析,如果隔热缓冲设计降低了陀螺敏感的环境温度变化率,则相应的陀螺 Allan 方差意义的零偏不稳定性将得到明显的改善。

3 测试结果及其讨论

对实验室某型陀螺采用小的 Shupe 系数的环圈,并对外罩进行隔热缓冲设计,采用改进型电路板进行 Allan 方差意义的零偏不稳定性测试,与未采取上述措施的同型陀螺进行对比实验。试验结果如图4所示。

图4中,点划线代表未采取上述措施的高精度陀螺 Allan 方差零偏不稳定性;平滑曲线代表采取上述措施后的高精度陀螺 Allan 方差零偏不稳定性。横轴代表测试组别,纵坐标表示高精度陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性。

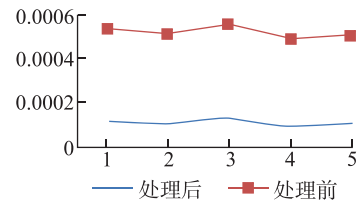


图4 陀螺 Allan 方差零偏不稳定性对比图

Fig. 4 The contrast figure for allan variance bias instability

可以明显地看出,采用上述技术措施的高精度光纤陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性提升了将近2倍。

4 结论

本文结合高精度光纤陀螺高低温等相关试验,对 Allan 方差零偏不稳定性进行了理论分析,指出了 Allan 方差零偏不稳定性对高精度光纤陀螺在系统应用时的影响,并提出了提高 Allan 方差零偏不稳定性技术措施,最后针对改进措施进行了相关试验,试验结果表明该措施明显改善了高精度光纤陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性。

参考文献

- [1] 冯卡力,李安,覃方君.基于多模型分段拟合的光纤陀螺温度误差补偿方法[J].中国惯性技术学报,2014,22(6):825-828.
- [2] 张桂才.光纤陀螺原理与技术[M],北京:国防工业出版社,2008.
- [3] M K Scruggs. Apparatus and method using digitally controlled integration for signal detection with improved noise characteristics (Honeywell). U. S. Patent, No. 6538882, 2003.
- [4] D E Auerbach. Fiber optic gyro with optical intensity spike suppression (Litton). U. S. Patent, No. 5850286, 1998.