

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0636-03

实用型低精度开环光纤陀螺系统的试验研究

宋 俊 常胜利 宋章启 胡永明

(国防科技大学理学院, 长沙 410073)

摘要 全光纤的开环光纤陀螺系统直接从探测器的电信号算出光纤陀螺的 SAGNAC 相移, 具有结构简单、全光纤、成本低等优点。所以开环光纤陀螺是满足中低精度应用要求的比较理想的方式。实用型低精度开环光纤陀螺系统采用了全保偏的设计方案, 动态偏移调制采用正弦信号调制和压电陶瓷调制器(光纤在压电陶瓷上环绕数圈), 利用多次谐波分析的数据处理方法, 并且结合高阶契比雪夫 FIR 滤波器、自适应最佳采样速率设定、频谱分析技术、数字相关处理等数字信号处理技术, 实现了 2 deg/h 的较高精度。介绍了上述设计方法及陀螺工作点稳定和选择技术等方面的设计方法, 并且通过对实验结果的对比测试分析, 提出了进一步提高光纤陀螺精度和稳定度的途径和设想。

关键词 光纤陀螺, 开环结构, 数字信号处理

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A

Experimental Research in Practical Fiber Optic Gyroscope

SONG Jun CHANG Sheng-li SONG Zhang-qi HU Yong-ming

(The College of Science National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The practical low measurement precision open-loop FOG uses polarization-maintaining technology, modulated by sine signal added to a PZT. The harmonic components analysis method, Chebyshev filter, self-adapting sample frequency adjustment, FFT and digital correlation are used to process the gyroscope's signal, and finally reach 2 deg/h measurement precision. In this paper, the method to choose and stabilize the action spot of the gyroscope and the method to improve the precision of the gyroscope are mentioned.

Key words fiber optic gyroscope, open-loop, digital processing

1 引 言

光纤陀螺作为一种重要的角速度传感器具有很多其他类型的陀螺所没有的优点, 目前光纤陀螺的实用化研究中存在的最大问题就是如何解决大动态测量的问题, 在很多重要的应用场合, 一般要求测量动态范围是 0.1 deg/h~400 deg/s。

光纤陀螺采用开环的信号处理方案能满足中低精度应用中对结构简单、低成本的要求。在实用中, 光纤陀螺需在 -40~50 °C 范围内保持 500 ppm 以上的稳定性。而采用全数字化信号处理系统是满足这一要求的最理想方案。

2 实用型低精度开环光纤陀螺的设计

2.1 光纤陀螺的信噪特点

对一个基本的光纤陀螺系统, 由 SAGNAC 效应

有

$$\phi_s = \frac{2\pi LD}{c\lambda} \Omega$$

ϕ_s 和 Ω 的关系由 $k = 2\pi LD/(C\lambda)$ 决定, 光纤所用波长有 0.85 μm , 1.3 μm , 1.55 μm 三类。以一种典型情况为例说明, 设 $L = 500 \text{ m}$, $D = 0.08 \text{ m}$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, 若要求 FOG 检测的最小角度速度为 0.1 deg/h, 则对应的 ϕ_s 为 10^{-7} 弧度量级, 这是一个非常小的角度量。

从信号功率来考虑, 光学系统的损耗为 30~40 dB, 系统所用光源一般采用 SLD, 其出纤功率为几十至一百多微瓦, 所以当其到达输出端时的功率仅为 100 nW~1 μW 。一个开环的光纤陀螺系统, 其输出为

$$I(t) = I_0 [1 - J_1(\phi_e) \sin(\bar{\omega}_m t) \sin \phi_s + J_2(\phi_e) \sin(2\bar{\omega}_m t) \cos \phi_s - J_3(\phi_e) \sin(3\bar{\omega}_m t) \cos \phi_s + J_4(\phi_e) \sin(4\bar{\omega}_m t) \cos \phi_s - \dots] \quad (1)$$

其中, $J_n(\cdot)$ 为第 n 阶贝赛尔函数。

$$\phi_e = 2\phi_m \cdot \sin(\bar{\omega}_m \cdot \tau/2)$$

ϕ_m 为调制信号的幅度, $\bar{\omega}$ 为相位调制频率, τ 为激光在光纤环中的渡越时间。如果考虑光纤陀螺的相位调制非线性效应, 光纤陀螺信号的公式将会异常复杂。所以, 光纤陀螺系统的信号处理的设计及优化是整个光纤陀螺系统中非常重要的一部分。

而光学系统本身所包含的不可避免的噪声(如光源噪声、散射干扰等)将直接对光电转换后的信号检测构成影响。这一特点即说明了 FOG 信号检测不能用常规的方法来实现, 而应用微弱信号检测的理论与方法来实现。

2.2 光纤陀螺微弱信号检测的方法

光纤陀螺中的光学传输损耗约为 30 dB, 到检测端的信号微弱, 而光学系统不可避免的噪声, 如瑞利散射、法拉第效应、各熔接点的散射、温度效应及光源不稳定等因素都将严重影响信号的检测。光信号的转换及电信号的放大与滤波是系统检测的前提。

在实用型低精度开环光纤陀螺的光信号的转换与滤波部分的设计中, 在选用器件、屏蔽、接地等技术上进行了优化, 尽量采用数字信号处理技术, 简化模拟电路部分的设计, 特别是采用了数字滤波和数字锁相技术实现了信号处理的信噪分离, 对提高系统的抗干扰能力起了很好的作用。

3 实用型低精度开环光纤陀螺信号处理的设计

(1)式已给出开环光纤陀螺系统输出。可知陀螺信号的一次到四次谐波经过锁相放大器或者是通过数字信号相关处理后分别为

$$\begin{aligned} S_1 &= P_0 \gamma J_1(\phi_e) \sin(\phi_s) S_2 = \\ &P_0 \gamma J_2(\phi_e) \cos(\phi_s) S_3 = \\ &P_0 \gamma J_3(\phi_e) \sin(\phi_s) S_4 = \\ &P_0 \gamma J_4(\phi_e) \cos(\phi_s) \end{aligned} \quad (2)$$

根据 Bohm 的谐波细分法, 陀螺的转速 ϕ_s 根据下式得出

$$\phi_s = \arctan \left[\frac{J_2(\phi_e) S_1}{J_1(\phi_e) S_2} \right] \quad (3)$$

从上式可以看出, 根据 Bohm 的方法, 光纤陀螺系统的转速是与光源的功率以及探测器的增益无关的量。通过这种方法, 对提高全光纤的开环光纤陀螺系统的测量精度是非常有益的。

但是, Bohm 方法的最大缺点就是它本身还是一个不含反馈功能的信号处理方案, 本身算法对光纤陀螺和外部环境系统之间的相互联系考虑不够, 特别是, 该处理方法对光纤陀螺的工作点 ϕ_e 没有监控手段。为了对光纤陀螺系统的工作点 ϕ_e 进行监控, 我们对 Bohm 方案进行修订, 通过检测三次和四次谐波信号来实现对陀螺系统的工作点的监控。

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_2}{S_4} &= \frac{P_0 \gamma J_2(\phi_e) \cos(\phi_s)}{P_0 \gamma J_4(\phi_e) \cos(\phi_s)} = \frac{J_2(\phi_e)}{J_4(\phi_e)} \\ \frac{S_1}{S_3} &= \frac{P_0 \gamma J_1(\phi_e) \sin(\phi_s)}{P_0 \gamma J_3(\phi_e) \sin(\phi_s)} = \frac{J_1(\phi_e)}{J_3(\phi_e)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上面的表达式比值与光纤陀螺系统的转速以及光源的光功率无关, 仅仅是以光纤陀螺系统工作点为宗量的贝赛尔函数, 通过对上式的求解, 系统就可以对光纤陀螺系统的工作点进行实时监控。

在光纤陀螺的转速较低的情况下, 陀螺信号的一次和三次谐波分量的数值较小, 比较容易受到噪声的影响, 这时应该采用二次和四次谐波信号来监控工作点。在光纤陀螺转速较高的情况下, $\phi_s = \pi/2$ 时, 就应该采用一次和三次谐波信号来监控工作点 ($\pi/4 \leq \phi_s \pm n\pi \leq 3\pi/4$)。

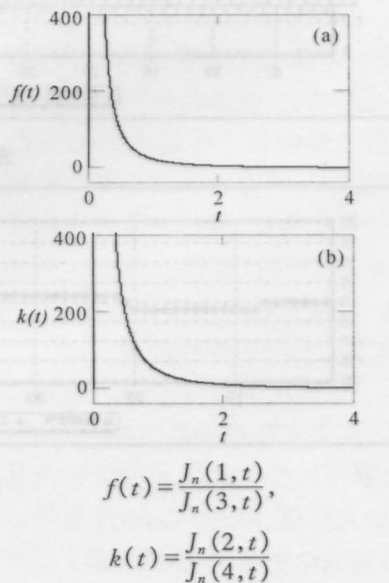


图 1 $t = \phi_s$ 变化时, 四次谐波信号处理方法中奇次谐波比值(a)和偶次谐波比值(b)的变化

Fig. 1 Variation of the odd harmonic ratio and even harmonic ratio vs the variation of t , which equals ϕ_s

4 陀螺工作点的选择

采用四次谐波信号处理方案面临的首要问题就是全光纤开环光纤陀螺系统的工作点的选择问题,下面对此作详细探讨。

图 1 显示当变量 $t = \phi_s$ 变化时贝赛尔函数的变化,以及四次谐波信号处理方法中偶次谐波比值和奇次谐波比值的变化。

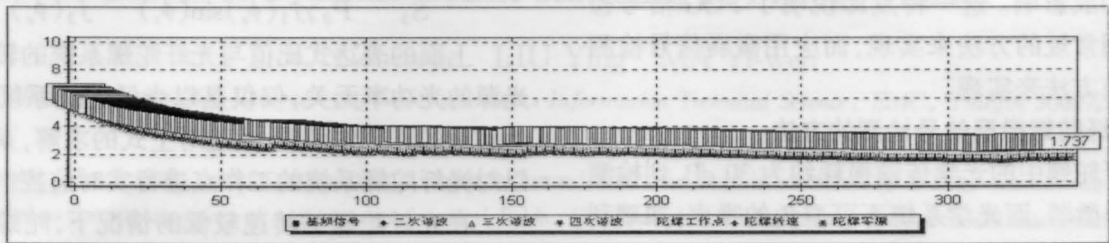
从图 1 可以看出,当光纤陀螺系统的工作点选在 3 附近时,各次谐波受贝赛尔函数的影响基本相当,并且,采用四次谐波信号处理方法时,工作点在 3 附近也会使计算较少受到外界的干扰。

如果只考虑一个非常有限的动态范围,只要保证 $e_1^2 \cos^2(\phi_s)$ 取得最小值,那么此时的工作点应该

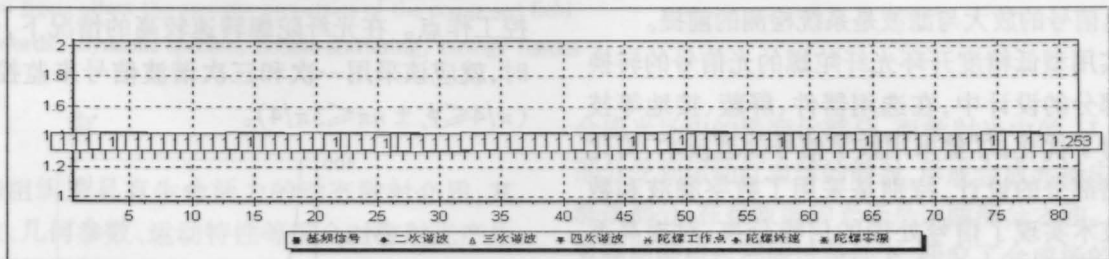
在 1.8 ~ 2.5 附近。但是,为了在一个比较大的动态范围内取得较好的测量效果,将光纤陀螺系统的工作点设在 3 附近更好。

5 实验结果和分析

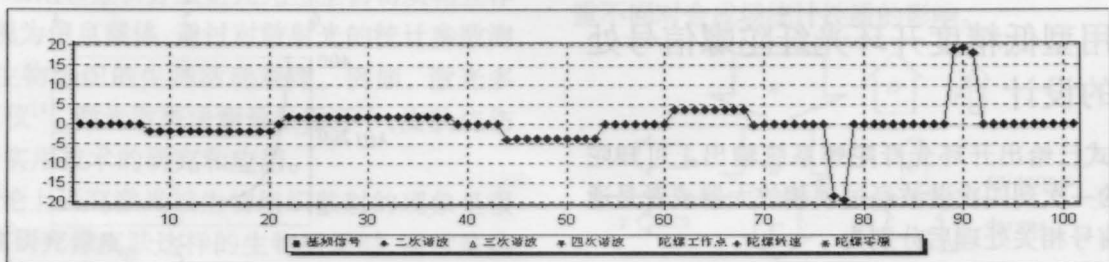
光纤陀螺系统预热 1~3 min 以后,陀螺系统的零漂基本稳定在 2 deg/h 以下,陀螺零偏基本稳定在 -68 deg/h。从实际测量中可以看出,光纤陀螺系统具有较高的稳定性,但存在零偏较大的问题,产生这个问题的原因很多,有地球磁场的影响,有光路本身的问题,有电路引起的相移,也有数据处理过程中产生的附加相移,具体的分析我们还在进行之中。



光纤陀螺零漂测量曲线 (deg/h)



光纤陀螺工作点测量曲线 (deg/h)



光纤陀螺转速测量曲线 (deg/h)