

文章编号: 0253-2239(2001)03-0352-05

光纤陀螺中一种光相位差跟踪方法*

盛钟延 周柯江

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 对光纤陀螺中光相位差的检测是得到所需角速度的基础。简要分析了陀螺输出信号的特点: 噪声大、非线性、周期性, 以及这些特点对检测有效信号的影响。提出了一种单通道光相位差跟踪的方法。这种方法采用正弦调制, 通过对信号(包括输出信号和跟踪信号)的三角和乘法运算, 并在必要的环节进行滤波得到光相位差。它能够解决光纤陀螺动态范围和刻度因子线性度问题, 并具有简明、成本低、易实现的特点。最后进行了相位跟踪的计算机模拟和电路的实现, 并给出了实验结果。

关键词: 光纤陀螺; 萨尼亚克效应; 信号检测

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引言

光纤陀螺是最重要的光纤传感器之一, 它可以精确测量相对惯性系的绝对转动角增量。光纤陀螺应用在飞机导航、航天器制导、卫星定位、汽车导向、智能机器人、天文望远镜等诸多方面以确定运动体的空间运动姿态。

光学陀螺(包括激光陀螺和光纤陀螺)的基本原理都是基于萨尼亚克(Sagnac)效应^[1,2]: 在一个环形干涉仪中, 由光源发出的光被分束器一分为二, 两束光将分别沿顺、逆时针方向运动, 并回到分束器处。当该环形光路相对于惯性空间静止时, 顺、逆时针的光程是相等的。当整个干涉仪(连同光源和观察者)以角速度 Ω 相对于惯性参考系作旋转运动时, 顺、逆时针的光程不等, 产生光程差。两束光的相位差 ϕ_s (一级效应) 为

$$\phi_s = \frac{8\pi NA \Omega}{\lambda c}, \quad (1)$$

λ, c 分别为光在真空中的波长和光速; A 为光束围成干涉仪的面积; Ω 为干涉仪旋转角速度; N 为光纤环匝数。通过 ϕ_s 求出 Ω 后积分可得转过的角度。

干涉光强是可以检测的^[3-6], 它具有如下形式

$$I = I_0(1 + k \cos \phi_s). \quad (2)$$

其中 k 为调制系数, 信号检测的目标就是精确得到这个相位差。显然这样的输出与相位差的关系是非线性的, 它具有周期性, 同时微弱的相移信号伴随着

大量的噪声。光纤陀螺可检测的角速度低至 $0.1^\circ/h$ 甚至更低; 而最高角速度可达上千度每秒。要在这样大的动态范围中实现输入输出的线性化是很困难的。

闭环光纤陀螺能够较好地解决这一问题, 通常用相位调制器(如 LiNbO_3 波导)在光路中加入补偿相移, 使输出恒定。但这使陀螺成本提高, 产生较大的光损耗; 另外, LiNbO_3 波导受温度影响较大。开环陀螺没有在光路中加调制器, 与闭环陀螺相比成本较低, 光损耗小。最简单的方法是直接求反函数来检测相位, 但其动态范围很小, 难以满足要求。另外, 在不同相位处, 输出灵敏度相差很大, 影响到刻度因子的线性度。开环陀螺通过相位跟踪^[7,8]可以解决动态范围和刻度因子线性度的问题, 比较常用的相位方法是基于锁相放大器的双通道相位跟踪, 但双通道方法中两路信号受环境影响产生波动后, 会引入新的误差。

本文提出的单通道相位跟踪方法简明、易行、能避免这些影响。根据这种方法用计算机进行模拟, 得到了与理论吻合的结论, 最后进行了电路实现。

2 单通道光相位差跟踪

萨尼亚克效应非常微弱, 在陀螺光探测器输出中, 常常淹没在噪声中。因此需要对光学信号进行调制, 并用相关解调滤除大部分噪声才能得到光相位差。相位跟踪原理图如图 1。假设 SLD 光输入为 $E_0 e^{i\omega t}$, 经分束器 C_1 、起偏器 P 、分束器 C_2 分为顺时针波 CW 和逆时针波 CCW, 两束光在敏感环中相向

* 国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1999-07-05; 收到修改稿日期: 1999-11-22

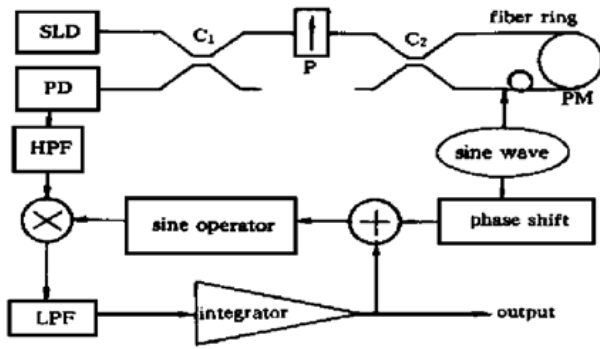


Fig. 1 The scheme of phase tracing. SLD: source; PD: photo detector; LPF: lowpass filter; C₁, C₂: couplers; PM: phase modulator; P: polarizer

传输后发生干涉,经探测器 PD 接收转化成电信号。探测器输出信号为:

$$v(t) = v_0\{1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos[u(t) - u(t - T_f) + \phi_s(t)]\}, \quad (3)$$

式中 v_0 正比于 $|E_0|^2$, α 为 C₂ 的振幅分光比。 $u(t)$ 为在 t 时刻加在相调制器上的相移, T_f 为光纤环传输延迟。当 $u(t)$ 为正弦形式时,令其周期 $T = 2T_f$, 则 $u(t) - u(t - T_f)$ 可写成 $A\sin\omega t$ 的形式。(3) 式改写为:

$$v(t) = v_0\{1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos[A\sin\omega t + \phi_s(t)]\}. \quad (4)$$

从正弦驱动引出另一路信号并对幅度进行调整: $u'(t) = B\sin\omega t$ 。叠加一补偿信号 $\phi_c(t)$ 后进行正弦运算得:

$$w(t) = w_0\sin[B\sin\omega t + \phi_c(t)]. \quad (5)$$

把 $v(t)$, $w(t)$ 相乘, 令 $k_0 = w_0v_0$, 有:

$$k(t) = k_0\{1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos[A\sin\omega t + \phi_s(t)]\} \times \sin[B\sin\omega t + \phi_c(t)], \quad (6)$$

将(6)式按贝塞尔函数展开, 取出其直流分量(通过低通滤波器), 可得:

$$S(t) = k_0\{(1 + \alpha^2)J_0(B)\sin\phi_c + \alpha J_0(A + B)\sin[\phi_s(t) + \phi_c(t)] - \alpha J_0(A - B)\sin[\phi_s(t) - \phi_c(t)]\}. \quad (7)$$

这时,利用零阶贝塞尔函数的 0 点,构造可供反馈给偏置 $\phi_c(t)$ 进行相位跟踪的信号。零阶贝塞尔函数最小的两个 0 点是 2.405 和 5.520, 令

$$B = 2.405, A + B = 5.520,$$

有:

$$S(t) = -\alpha J_0(0.710)\sin[\phi_s(t) - \phi_c(t)]. \quad (8)$$

对它进行反相和积分后输入给 $\phi_c(t)$, $\phi_c(t)$ 一直向 $\phi_s(t)$ 趋近直到 $S(t) = 0$, 这时 $\phi_c(t) = \phi_s(t)$, 即光相位差得到跟踪补偿。

3 相位跟踪仿真和实验

根据上述理论,用美国 Math Works 公司的 MATLAB 软件中的 SIMULINK 进行了仿真,并制作了相位跟踪电路,如图 2 所示。

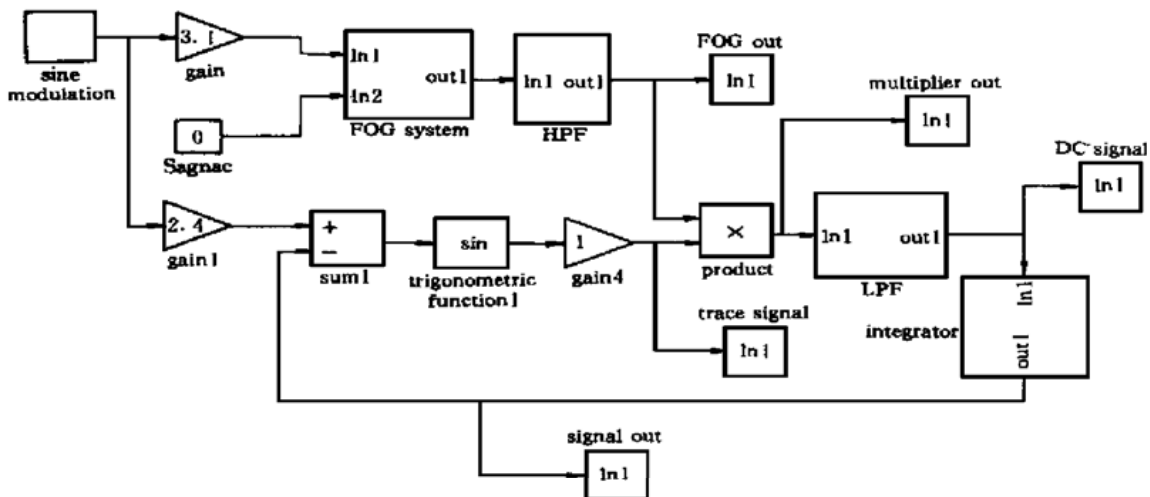


Fig. 2 The simulation scheme of phase tracing with MATLAB

当萨尼亚克效应引起的相移为 0 时,陀螺输出(信号大小与时间关系)曲线如图 3。其中仅有调制信号的偶次成份,不含奇次成份。转动时产生奇次成份,如图 4。此时乘法器输出如图 5。

乘法器输出滤波后信号及跟踪信号输出的稳态建立过程如图 6 和图 7。

图 8 为陀螺输入(相位)与输出(补偿)关系曲线。可以看出二者是线性的,输入输出线性度斜率为负。

根据仿真设计的单通道相位跟踪方案划分模块框图,如图 9。每一个模块都可由相应的电路实现,各模块的组合就可以得到相位跟踪的整体电路。

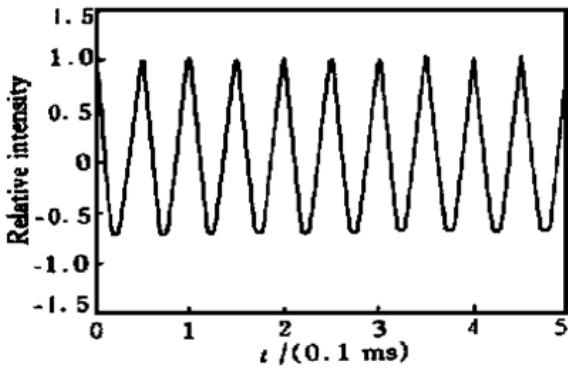


Fig. 3 Output of FOG (without rotation)

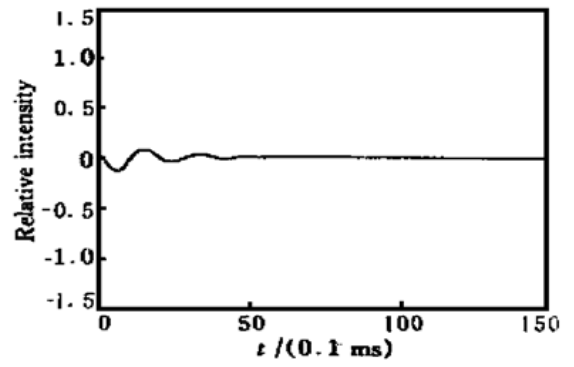


Fig. 6 Filtered signal of multiplier output

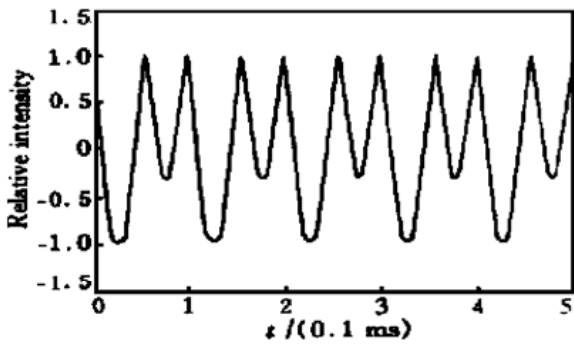


Fig. 4 Output of FOG (with rotation)

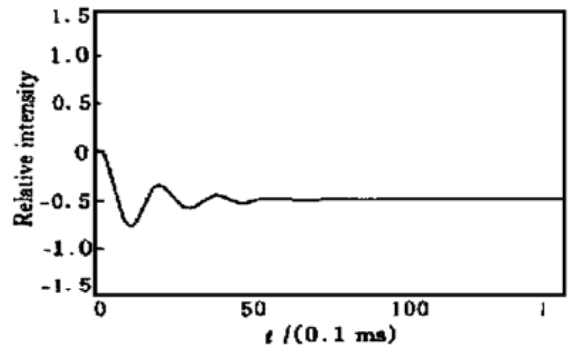


Fig. 7 Tracing signal

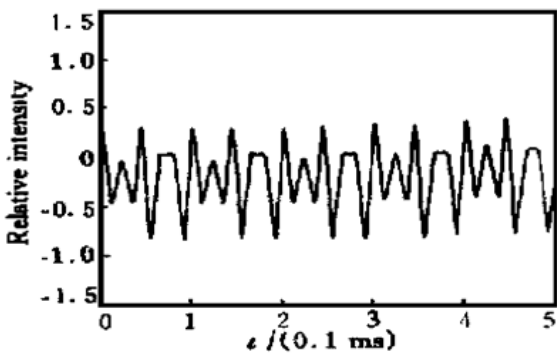


Fig. 5 The output of multiplier (with rotation)

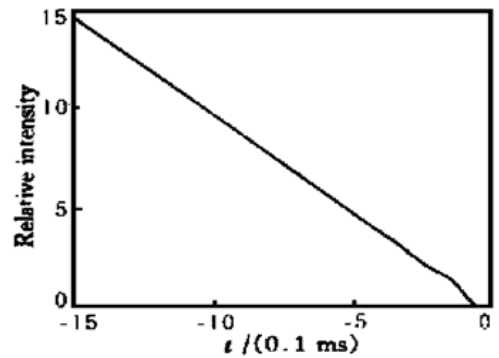


Fig. 8 Input and output of FOG

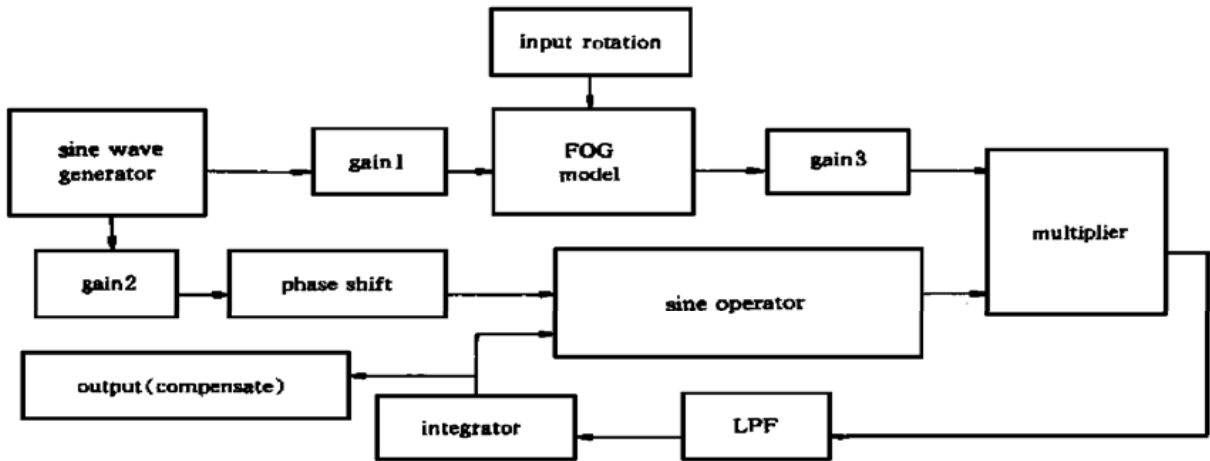


Fig. 9 The circuit blocks of phasetracing

根据模块框图制作实际电路,实验结果如下:

相对应。

1) 输出波形: 实验结果示于图 10、图 11、图 12 和图 13。它们分别与仿真结果图 3、图 4、图 5 和图 7

2) 测量范围: 可检测输入偏置约 $-5\text{ V} \sim +5\text{ V}$ 的电压范围, 相当于相移 $-250^\circ \sim +250^\circ$ 。

3) 线性度: 根据测量得到的数据, 拟合出线性度曲线分别示于图 14、图 15。

对零转速附近的测量点计算与最小二乘法拟合曲线的偏差得平均误差为 1.7530 mV。大范围平均误差为 18.8467 mV。

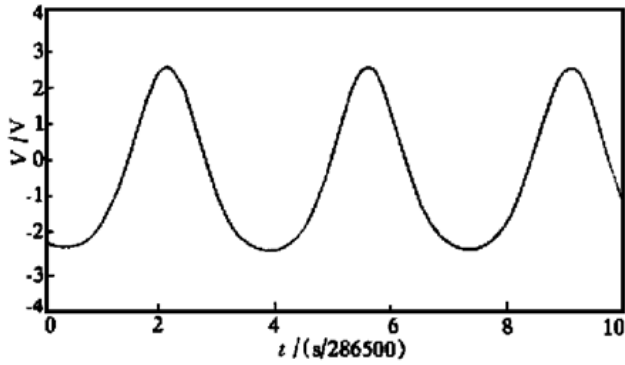


Fig. 10 Output of FOG (without rotation)

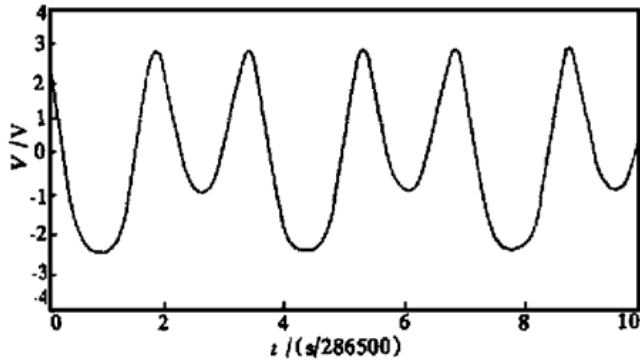


Fig. 11 Output of FOG (with rotation)

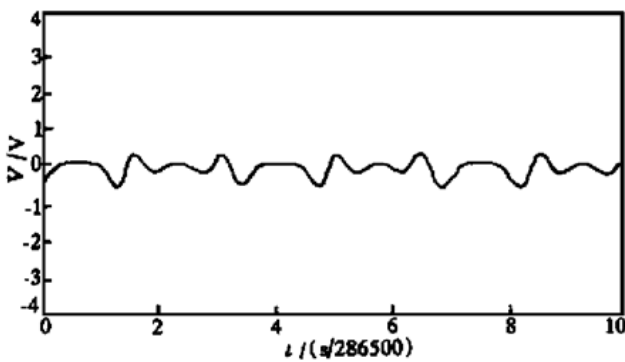


Fig. 12 Output of multiplier (with rotation)

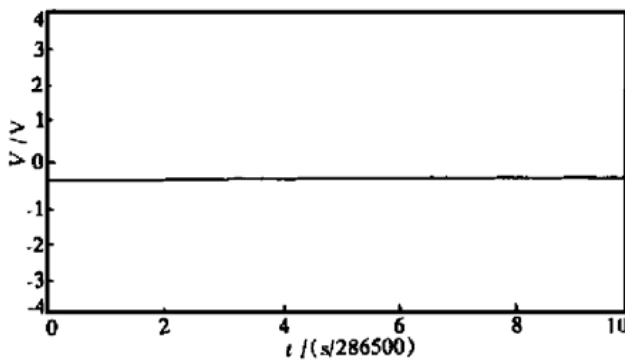


Fig. 13 Tracing signal (with rotation)

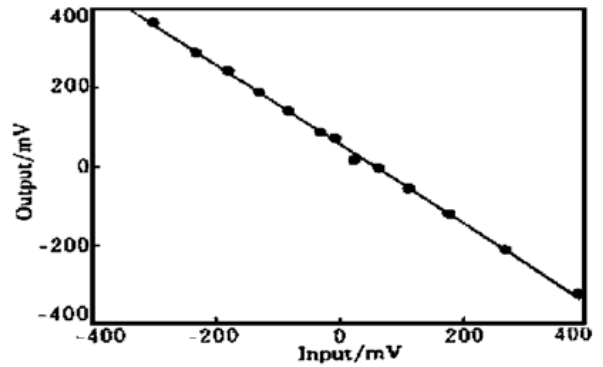


Fig. 14 The linearity of low rotation. Slope: - 1.0103; Bias: 59.9925 mV

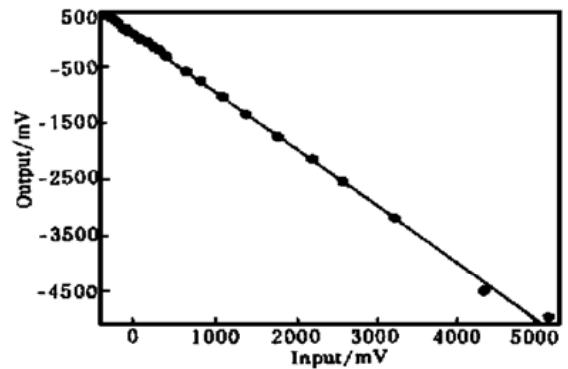


Fig. 15 The linearity of large range. Slope: - 1.0148; Bias: 49.4729 mV

结论 以上讨论的单通道光相位差跟踪的方法, 在陀螺开环信号检测电路中构造电闭环, 引入一信号只跟踪输出信号中的相位, 解决了动态范围和刻度因子线性度的问题。

作者曾采用计算反三角函数来求相位差, 为消除光强影响, 必须采用反正切运算。这样带来的问题除了需二个锁相放大器(它们受环境因素影响不一致)以外, 还需作除法运算, 存在奇点。另一种使用过的方法是双通道相位跟踪法, 仍需二个锁相放大器, 还须产生调制频率的倍频信号, 且双路移相等, 实现起来仍不方便。本文介绍的解调方法简明可靠地实现了大动态范围的线性化, 也适用于所有输出如(4)式的光纤干涉仪的解调。图 15 中出现了 18.8 mV 的平均误差, 它来源于大转速, 其原因是调试中设置(7)式的 A、B 值不够准确, 是在低转速条件下设置的(因为高转速下调节需要高精度的转台)。

构造反馈回路的方法还有多种, 可进一步进行计算机优化设计。设计关键是要获得 $\sin(\phi_s - \phi_c)$ 或 $\tan(\phi_s - \phi_c)$ 形式来反馈控制的 ϕ_c 值。目前正在使用数字信号处理芯片实现本方法。

参 考 文 献

- [1] Post E J. Sagnac effect. *Rev. Mod. Phys.*, 1967, **39**(2): 475~ 494
- [2] Vali V, Shorthill D N. Fiber ring interferometer. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(5): 1099~ 1100
- [3] Kersey A D, Moeller R P, Berkoff T A *et al.*. Single channel phase tracker for the open loop fiber optic gyroscope. *Proc. SPIE*, 1991, **1585**: 198~ 202
- [4] Oho S, Sonobe H, Sasayama T. Signal processing schemes for open loop optical fiber gyroscopes. *Proc. SPIE*, 1991, **1585**: 226~ 238
- [5] Kim B Y, Shaw H J. Phase reading, all-fiber optic gyroscope. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(8): 378~ 380
- [6] Spammer S J, Swart P L. Open loop fiber optic gyroscope with wide range and source variation insensitivity. *Proc. SPIE*, 1991, **1585**: 215~ 225
- [7] Kersey A D, Moeller R P. Open loop fiber optic gyroscope with phase shift nulling signal processing. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(16): 1251~ 1252
- [8] Oho S, Sonobe H, Sasayama T. Signal processing schemes for open loop optical fiber gyroscopes. *Proc. SPIE*, 1991, **1585**: 226~ 238

A Differential Optic Phase Tracing Method in Fiber Optic Gyro

Sheng Zhongyan Zhou Kejiang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 5 July 1999; revised 22 November 1999)

Abstract: The fundamental step to acquire the rotation rate of fiber optic gyro (FOG) is to detect the differential optic phase. The characters of FOG's output signal which are with large noise, nonlinear, periodic and their consequences to the detection of the effective signal are analyzed briefly. Here a tracing of differential optic phase is presented and sin modulation is adopted in the method, triangular operator is applied and finally the rotation signal is gotten after multiplying on FOG output and the tracing signal, and adding filters to where they are needed. With this method the dynamic range and the linear of scale factor of FOG are improved. It also has the advantages of simple, low cost and easy to accomplished. The phase tracing simulation and the test circuit are made and the results are given.

Key words: fiber-optic gyro; Sagnac effect; signal detection