

文章编号: 1007-5461(2007)04-0495-05

基于 3×3 耦合器的光纤陀螺信号解调算法

李颖, 陈兴林

(哈尔滨工业大学控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 采用 3×3 耦合器构成非互易结构的开环光纤陀螺, 具有灵敏度高、测量范围大等优点。信号检测在光纤陀螺系统中占有非常重要的地位, 其解调精度的大小直接影响光纤陀螺的分辨率。根据使用 3×3 耦合器的开环光纤陀螺输出信号模型的特点, 采用一种新的信号解调算法, 可以准确解调任意动态范围的输入, 克服在工作点附近灵敏度低的缺点, 改善被测信号的精度。实验结果表明, 算法能快速、准确解调被测物理量。

关键词: 光电子学; 光纤陀螺; 信号解调; 3×3 耦合器

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

1 引言

光纤陀螺 (FOG) 是基于 Sagnac 效应的一种无运动部件的新型角度传感器, 由于它具有耐冲击、使用寿命长、结构简单、重量轻、体积小、功耗低等特点, 在军用和民用领域获得十分广泛的应用。光纤陀螺普遍采用最小互易结构, 以 2×2 耦合器作为分束器, 但是这种结构需要采用偏置调制, 以提高陀螺零转速附近的灵敏度。在光路中增加一个互易偏置相位调制器, 既增加了系统的复杂度, 又不可避免的引入了噪声, 采用 3×3 耦合器取代 2×2 耦合器构成一种非互易结构的开环光纤陀螺, 利用 3×3 耦合器固有的 120° 耦合相移, 使陀螺在零转速时不需要偏置相位调制, 就可以自动工作在灵敏度最大的工作点附近^[1]。

采用 3×3 耦合器的光纤陀螺信号解调算法最早是在 1980 年由 Sheem 提出的^[2], 由于 3×3 耦合器具有特殊的输入、输出特性, 使得这种结构的光纤陀螺具有以下优势: 成本低, 结构中不需要集成光学芯片与高速光电信号相位调制电路相连; 由于损耗低可以使用价格较便宜的 ELED 光源代替 SLED 光源; 可以实现对干涉信号的可逆判向, 从而获得高灵敏度和大动态范围的测量值; 传感器结构简单, 可实现全光纤化^[3-7]。但是采用 3×3 耦合器的光纤陀螺一般使用差动解调方法计算相位差, 由于实际器件受到自身性能、光源波动和环境条件的影响, 使用差动信号检测方案不可能精确求出陀螺的转速, 并且在 $\pm\pi/2$ 工作点处灵敏度低, 使用本文介绍的算法可以解决这个问题, 该算法具有较高的稳定性并且在整个测量范围内具有相同的测量精度。

2 算法原理

基于 3×3 耦合器的光纤陀螺的结构如图 1 所示。从光源 ELED 发出的光从端口 2 进入到耦合器中, 分别从耦合器的端口 4、5、6 出射, 从端口 4、6 出射的光进入光纤线圈, 分别沿顺时针 (CW) 和逆时针 (CCW) 方向在光纤线圈中传输, 然后返回耦合器并发生干涉, 干涉光信号分别被两个探测器 S_1 和 S_2 检测得到。对于理想的耦合器, 耦合率是整个端口的 $1/3$, S_1 和 S_2 端口将产生 120° 相位差。假设采用无损耗完全对称的理想耦合器, 两只探测器的响应度一致, 光路无损耗, 并采用理想光纤环, 则探测器 S_1 输出为^[8,9]

基金项目: 教育部留学归国人员科研启动基金 (BAQQ24403001)

收稿日期: 2006-08-08; 修改日期: 2006-11-15

$$P_1 = \frac{2}{9}VI_0[1 + \cos(\Phi_s + 2\pi/3)]. \tag{1}$$

探测器 S₂ 输出为

$$P_2 = \frac{2}{9}VI_0[1 + \cos(\Phi_s - 2\pi/3)], \tag{2}$$

其中 Φ_s 为 Sagnac 相位差, 单位是 $^\circ$, V 是探测器的响应度, I_0 为光源强度, 理想的 3×3 耦合器端口 S₁ 和 S₂ 输出信号如图 2 所示, 两信号响应度一致, 相位差为 120° 。一般在光纤陀螺信号解调中采用差动信号检测方案, 两个探测器的输出信号相减

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{4}{9}VI_0 \sin \frac{2\pi}{3} \sin \Phi_s. \tag{3}$$

可以看出, 两探测器输出信号差是 Φ_s 的正弦函数, 在零转速时可以获得最大灵敏度。

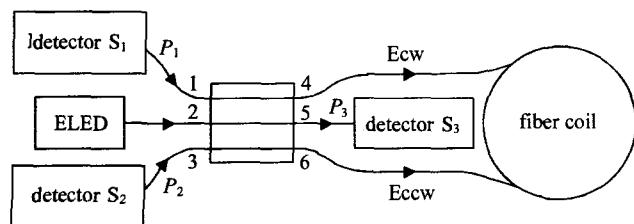


Fig.1 Structure of FOG which adopts 3×3 coupler

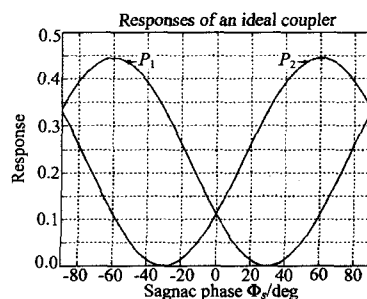


Fig.2 Output signal of ideal 3×3 coupler

然而在实际应用中, 对于一个采用 3×3 耦合器的光纤陀螺来说, 各种器件不可能都工作在理想状态, 耦合器输出模型将偏离理想的模型, 并且受到光源强度和耦合率的影响。实际耦合器的耦合率将偏离理想值的 10% 或者取决于光的波长和偏振态, 耦合器不完全对称, 耦合相移也不是始终稳定在 120° , 耦合相移的变化将以陀螺零偏的形式表现出来。这种偏离与耦合器本身的特性、光纤的偏振、耦合到光纤环中的光源偏振度以及传播常数有关。探测器响应度不一致, 环境引起的光纤线圈状态的改变、光源的波动等都将影响系统的精度, 特别是系统的干涉对比度, 对温度、压力等环境因素相当敏感, 其波动将直接影响陀螺的标度因数, 因此上述差动信号检测方案不可能精确求解陀螺的转速^[8]。为了消除光源波动以及干涉对比度系数变化对陀螺的影响, 可以利用第三只探测器检测另外一路信号, 也即图 1 中的 P_3 , 来消除干涉对比度系数变化对陀螺的影响。

通过对输出信号的精确分析, 并充分考虑耦合器、探测器、光纤线圈的特性以后, 给出实际探测器的输出如下^[10]

$$P_1 = V_1[\alpha_1 + k\beta_1 \cos(\Phi_s - \gamma_1 + \phi_F)]\delta_1 I_0, \tag{4}$$

$$P_2 = V_2[\alpha_2 + k\beta_2 \cos(\Phi_s + \gamma_2 + \phi_F)]\delta_2 I_0, \tag{5}$$

$$P_3 = V_3\delta_3 I_0, \tag{6}$$

其中, $\alpha_i, \beta_i (i = 1, 2), \delta_i (i = 1, 2, 3)$ 是耦合系数, $\gamma_i (i = 1, 2)$ 是 3×3 耦合器的耦合相移, 约等于 120° , I_0 是光源强度, k 是干涉信号的对比度, $V_i (i = 1, 2, 3)$ 探测器的响应度, ϕ_F 是由光纤线圈双折射引入的相位偏置, 是 Sagnac 相位差。观察式 (4), (5), (6) 的特点做以下处理

$$P_{13} = \frac{P_1}{P_3} = A + B \cos \Phi_s + C \sin \Phi_s, \tag{7}$$

$$P_{23} = \frac{P_2}{P_3} = X + Y \cos \Phi_s + Z \sin \Phi_s, \tag{8}$$

其中, $A = m\alpha_1$, $B = mk\beta_1 \cos(\gamma_1 - \phi_F)$, $C = mk\beta_1 \sin(\gamma_1 - \phi_F)$, $m = V_1\delta_1/V_3\delta_3$; $X = n\alpha_2$, $Y = nk\beta_2 \cos(\gamma_2 + \phi_F)$, $Z = -nk\beta_2 \sin(\gamma_2 + \phi_F)$, $n = V_2\delta_2/V_3\delta_3$ 。式 (7), (8) 中的 6 个系数描述了光纤线圈的耦合与偏振特性。如果测得 P_{13} 或 P_{23} 中任一个, 都可以解算出 Φ_s , 但是如果按照这种方法进行信号解调, 一旦 Φ_s 超过 $\pm\pi/2$ 被测值将变得不明确, 并且在正弦函数的最大和最小值附近灵敏度为零。为了克服这些限制因素采用一个新的方法, 依靠一个参数 α , 把两个函数合成一个归一化的正弦函数

$$P(\Phi_s) = \frac{A + X + (A - X)\alpha - (P_{13} + P_{23}) + (P_{23} - P_{13})\alpha}{M}, \tag{9}$$

$$M = \sqrt{(B + Y + (B - Y)\alpha)^2 + (C + Z + (C - Z)\alpha)^2}. \tag{10}$$

这个归一化的正弦函数依靠测量值 P_1, P_2, P_3 和 6 个已知的系数, 如果把 (7)、(8) 式代入 (9) 式中, 显然 $P(\Phi_s)$ 是一个归一化的正弦函数, 其值域为 $[-1, 1]$

$$P(\Phi_s) = \frac{-[B + Y + (B - Y)\alpha] \cos \Phi_s - [C + Z + (C - Z)\alpha] \sin \Phi_s}{M} = \sin(\Phi_s - \theta). \tag{11}$$

这里 $\theta = -\arctan \frac{(B + Y) + (B - Y)\alpha}{C + Z + (C - Z)\alpha}$ 。如果已知 Sagnac 相位差 $\Phi_s, P(\Phi_s)$ 等于 0, 得到

$$\alpha = -\frac{(B + Y) \cos \Phi_s + (C + Z) \sin \Phi_s}{(B - Y) \cos \Phi_s + (C - Z) \sin \Phi_s}. \tag{12}$$

参数 α 与待测相移量 Φ_s 有关, 它的作用是使归一化函数 $P(\Phi_s)$ 在 θ 点为零。由于正弦函数是连续的周期函数, 在一个周期 $[0, 2\pi]$ 内, 当函数 $P(\Phi_s) = \sin(\Phi_s - \theta) = 0$ 时, $\Phi_s = \theta$ 或 $\Phi_s = \pi + \theta$, 所以在 θ 点邻域内, 函数 $P(\Phi_s)$ 或者等于 $+\sin(\Phi_s - \theta)$ 或者等于 $-\sin(\Phi_s - \theta)$ 。为了区别这两种情况, 需要知道函数 $P(\Phi_s)$ 在 θ 点的导数, 可以通过 (11) 式来计算

$$\frac{\partial P}{\partial \Phi_s} = \frac{[B + Y + (B - Y)\alpha] \sin \Phi_s - [C + Z + (C - Z)\alpha] \cos \Phi_s}{M}. \tag{13}$$

现在这个 Sagnac 相位差可以用图 3 和图 4 描述的算法迭代得到。

在步骤 ⑦ 中, Φ'_s 是待测量的下一时刻 Sagnac 相位差, 是由初始相位差 Φ_s 和角速度的增量迭代得到的。在使用光纤陀螺测量角速度时, 已知被测对象初始角速度, 即已知初始相位差 Φ_s , 通过参数 $\alpha(\Phi_s)$ 使归一化的正弦函数 $P(\Phi_s)$ 在 θ 点为零, 那么在一个周期内

$$\theta = \Phi_s \text{ 或 } \theta = \Phi_s + \pi. \tag{14}$$

为了得到下一时刻待测量 Φ'_s , 根据式 (9)、(11) 和 (12) 得到

$$P(\Phi'_s) = \sin(\Phi'_s - \theta) = P[P_{13}(\Phi'_s), P_{23}(\Phi'_s), \alpha(\Phi'_s)]. \tag{15}$$

将 (14) 式代入 (15) 中, 得到 $\sin(\Phi'_s - \Phi_s) = P[P_{13}(\Phi'_s), P_{23}(\Phi'_s), \alpha(\Phi_s)]$ 或者 $\sin(\Phi'_s - \Phi_s + \pi) = -\sin(\Phi'_s - \Phi_s) = P[P_{13}(\Phi'_s), P_{23}(\Phi'_s), \alpha(\Phi_s)]$, 通过函数 $P(\Phi_s)$ 在 θ 点的导数区别这两种情况从而得到

$$\Phi'_s = \text{sign} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \Phi_s}(\alpha, \Phi_s) \arcsin[P(P_{13}(\Phi'_s), P_{23}(\Phi'_s), \alpha(\Phi_s))] \right\} + \Phi_s. \tag{16}$$

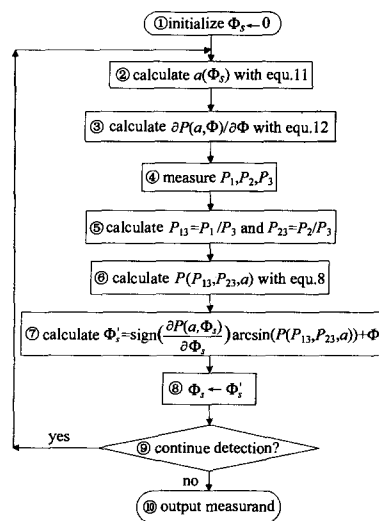


Fig.3 Flowchart of algorithm

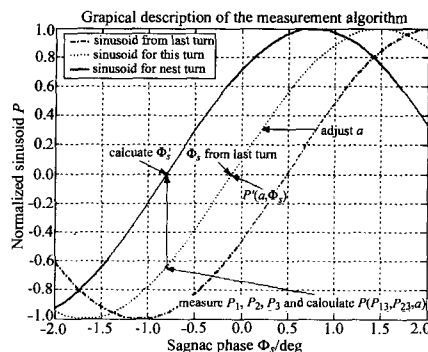


Fig.4 Graphical description of the algorithm

如图 3 算法流程中的步骤①, 该算法速度快, 能够时时计算被测量的变化, 与差动解调算法的区别在于, 差动解调算法在正弦曲线最大和最小值附近得到的被测量不稳定, 这些点附近正弦曲线的斜率为零, 灵敏度低。而本文描述的算法在整个测量范围内都是稳定和准确的, 该算法的实质是通过与待测量 Φ_s 有关的参数 α , 把 2 个一般正弦函数进行归一化得到函数 $P(\Phi_s)$, 计算 $P(\Phi_s)$ 在函数值为 0 处的角度和前后两次相位差的变化量 $\Delta\Phi_s = \Phi'_s - \Phi_s$, 利用已知初始相位差迭代计算下一时刻相位差 Φ'_s , 只要光纤陀螺各器件参数稳定, 耦合器输出值测量准确, 使用该算法可以无误差的解调被测 Sagnac 相位差, 从而得到陀螺转速。观察 (16) 式, 由于反正弦函数的值域是 $[-\pi/2, \pi/2]$, 因此该算法唯一的局限性在于两次测量得到 Φ_s 的差值不能超过 $\pm\pi/2$ 。

3 实验结果分析

将该算法应用到基于 3×3 耦合器的光纤陀螺中, 实验中光纤陀螺的光纤线圈长度 $L=1000$ m, 线圈直径 $D=10$ cm, 采用 ELED 光源波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, 根据光纤陀螺相位差与陀螺转速的关系得到

$$\Phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega = 0.028\Omega \quad (17)$$

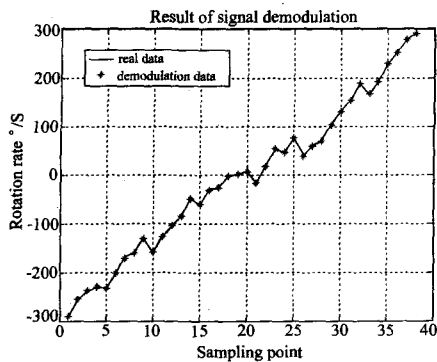


Fig.5 Result of signal demodulation

这里 Ω 的单位是 $^\circ/\text{s}$, 当相位偏差达到 $\pm\pi/2$ 时旋转角速度为 $\pm 56^\circ/\text{s}$ 。根据耦合器的特性给定 (4)~(6) 式中的参数, 响应度 $V_1 = 0.83, V_2 = 0.81, V_3 = 0.82$, 耦合系数 $\delta_1 = 0.24, \delta_2 = 0.22, \delta_3 = 0.30; \alpha_1 = 0.89, \alpha_2 = 0.90; \beta_1 = 0.81, \beta_2 = 0.82$, 耦合相移 $\gamma_1 = 2.0\text{rad}, \gamma_2 = 1.99\text{rad}$, 并取 $k = 0.99, \phi_F = 0$, 光源强度 $I_0 = 100 \mu\text{W}$, 这样可以得到系数 $A = 0.72, B = -0.27, C = 0.59, X = 0.65, Y = -0.24, Z = -0.54$ 。在恒温条件下, 光学器件的特性比较稳定, 求得的系数基本上代表器件的实际特性, 使用本文

描述的算法在常温条件下使用陀螺转台试验系统进行测试, 转台主轴以不同的角速度进行正反转, 它的速率范围是 $-300^\circ/\text{s} \sim 300^\circ/\text{s}$, 记录转台旋转角速度和耦合器输出值, 按算法解调得到相位差 Φ_s , 再根据 (17) 式计算光纤陀螺测量输出的角速度, 与转台转动角速度比较, 结果如图 5 所示, 可见根据光纤陀螺 3×3 耦合器输出信号解调得到的角速度与转台旋转角速度一致。由于实验中会受到环境、陀螺器件性能、转台稳定性等条件的影响, 陀螺的标度因数会出现波动, 产生较大的弯曲, 而采用新的算法解调得到的角度仍然能够与实际角速度吻合, 实验表明该算法在整个被测对象旋转角速度范围内都能精确的解算出角速度。

4 结论

基于 3×3 耦合器的光纤陀螺信号解调算法, 可以准确解算出任意范围角速率值, 克服在 $\pm\pi/2$ 工作点附近灵敏度低的缺点, 能够方便的在数字信号处理器上实现。实验结果表明, 该算法快速、准确, 有着广泛的适用性。

参考文献:

- [1] Jiang Yi, Chen Shufen. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on 3×3 coupler [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, 24(11): 1487-1490 (in Chinese).
- [2] Sheem S K. Fiber optic gyroscope with 3×3 -directional coupler [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, 37: 869-871.
- [3] Trommer G F, Poisel H, Buhler W. Passive fiber optic gyroscope [J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(36): 5360-5365.

- [4] Vines L, Wang G. Sagnac interferometer design for differential rotation measurement [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, 1: 395-398.
- [5] Bechtle J, Trommer G F. A new measurement algorithm for the 3×3 fiber optic Sagnac interferometer [C]. *SPIE*, 2005, 5855: 944-947.
- [6] Lin Xiaoli, Wang Ping, Wang Qiang. Study on different splitting ratio characteristic of wavelength-flattened fused-taper fiber couplers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2004, 24(1): 68-72 (in Chinese).
- [7] Wang Xueren. Analysis of optical switching in the nonlinear two-guide coupler [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2000, 17 (3): 215-218 (in Chinese).
- [8] Li Jing, Wang Wei. Development on open loop FOG with 3×3 coupler [J]. *Opto-Electronic Engineering* (中国惯性技术学报), 2004, 12(6): 65-69 (in Chinese).
- [9] Rochford K B. Polarization dependence of response functions in 3×3 sagnac optical fiber current sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(8): 1504-1509.
- [10] Harti E N, Trommer G F, Muller R. Low cost passive fiber optic gyroscope [C]. *SPIE*, 1992, 1585: 405-416.

Signal demodulation algorithm of fiber optic gyroscope based on 3×3 coupler

LI Ying, CHEN Xing-lin

(Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Nonreciprocal structure open-loop fiber optic gyroscope (FOG) composed of 3×3 coupler has the advantages of high-sensitivity and wide-gauging range. The signal detection plays important role in the FOG system. The demodulation precision influences the maximum resolution of the gyro directly. According to characteristics of output signal model of FOG which uses 3×3 coupler, new signal demodulation algorithm is adopted. It can accurately demodulation arbitrary input of dynamic range. It overcomes disadvantage which is low-sensitivity round $\pm\pi/2$ work point, and improves precision of measured signal. Experimental results indicate that algorithm demodulate the measured physical variable quickly and exactly.

Key words: optoelectronics; fiber optic gyroscope; signal demodulation; 3×3 coupler

作者简介: 李 颖 (1979 -), 女, 黑龙江呼玛人, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系博士生, 研究方向为光纤陀螺的信号处理。
E-mail: liying0429@163.com

导师简介: 陈兴林 (1963 -), 教授, 博导, 研究院方向为飞行器控制与仿真、智能机器人、计算机控制。
E-mail: chenxl@hit.edu.cn