

激光与光电子学进展

开环光纤陀螺大动态范围正交解调算法的影响因素

李佳^{1,2}, 孟晨^{1,2}, 苏亚^{1,2}, 吴胜保^{1,2}, 郝鹏^{1,2*}, 姚晓天^{1,2}¹河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;²河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002

摘要 研究了一种可实现开环光纤陀螺大动态范围测量的正交解调算法。对干涉信号每周期间隔 $\pi/6$ 进行直接采样, 得到 12 个离散点进行相位解调, 并利用条纹计数方法实现了开环光纤陀螺的大动态范围测量。详细分析了开环光纤陀螺系统相位调制器驱动信号、干涉信号采样相位误差与正交解调算法解调误差之间的关系。利用抽取的 12 个采样点构建调制深度误差 E_M 和调制初始相位误差 E_w 评价参数, 并对正弦调制信号参数进行反馈控制, 保证解调精度。结果表明, 为使开环光纤陀螺的相位解调误差在 $\pm 10^{-6}$ rad (标度因数为 1.134 s, 陀螺输出角速度误差为 ± 0.18 (°)/h) 内, 正弦调制信号的调制频率 f_c 误差需小于 $\pm 0.072\%$ (97.31 kHz), 电压峰峰值 V_π 误差需小于 $\pm 0.1\%$ (3.654 V), 调制初始相位误差需小于 ± 16.226 mV, 调制深度误差需小于 ± 12.483 mV, 数字采样相位误差需小于 5.625×10^{-4} rad。

关键词 光纤光学; 开环光纤陀螺; 调制解调; 动态范围; 解调误差

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1706004

Influencing Factors of Open-Loop Fiber Optic Gyroscope with Large Dynamic Range Quadrature Demodulation Algorithm

Li Jia^{1,2}, Meng Chen^{1,2}, Su Ya^{1,2}, Wu Shengbao^{1,2}, Hao Peng^{1,2*}, Yao X.Steve^{1,2}

¹Photonics Information Innovation Center, College of Physics and Technology, Hebei University,

Baoding 071002, Hebei, China;

²Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

Abstract A quadrature demodulation algorithm for large dynamic range measurement of open-loop fiber optic gyroscope is studied in this paper. The interference signal is directly sampled every $\pi/6$ every cycle, and 12 sampling points are obtained for phase demodulation. The large dynamic range measurement of open-loop fiber optic gyroscope is realized by using fringe counting method. The relationship between the sampling phase error of phase modulator driving signal and interference signal of open-loop fiber optic gyroscope system and the demodulation error of quadrature demodulation algorithm is analyzed in detail. The evaluation parameters of modulation depth error E_M and modulation initial phase error E_w are constructed by using the extracted 12 sampling points, and the sinusoidal modulation signal parameters are feedback controlled to ensure the demodulation accuracy. The results show that in order to make the phase demodulation error of open-loop fiber optic gyroscope within $\pm 10^{-6}$ rad (scale factor is 1.134 s, gyro output angular velocity error ± 0.18 (°)/h), the error of modulation frequency f_c of sinusoidal modulation signal should be less than $\pm 0.072\%$ (97.31 kHz), and the error of voltage peak to peak V_π should be less than $\pm 0.1\%$ (3.654 V), the modulation initial phase error should be less than ± 16.226 mV and the modulation depth error should be less than ± 12.483 mV, and the digital sampling phase error should be less than 5.625×10^{-4} rad.

Key words fiber optics; open-loop fiber optic gyroscope; modulation and demodulation; dynamic range; demodulation error

1 引言

干涉型光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应正反向

传输的双波束环形干涉仪, 旋转角速度的变化会通过光纤环这一敏感元件使光纤中传输光的相位发生变化, 进而测量惯性空间的转动角速度。近年来, 光纤陀

收稿日期: 2021-12-04; 修回日期: 2022-01-07; 录用日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(12004092)、河北省创新能力提升计划(20542201D)、河北省自然科学基金(F2020201041)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019035)、河北大学高层次人才科研启动项目(801260201243)

通信作者: haopeng@hbu.edu.cn

螺在导弹潜艇导航、卫星姿态测量及定位、高精度机器人控制等方面有着广泛的应用^[1-5],智能制造、智能驾驶领域的快速发展,使人们对制造高性能、低成本光纤陀螺的技术需求越来越急迫。开环光纤陀螺直接从 Sagnac 干涉仪输出信号中提取转速信号,不需要进行任何反馈,成本低廉,目前主要用于低精度光纤陀螺应用场景,在民用领域也有着广阔的市场前景。

对于开环光纤陀螺,干涉信号的相位解调方法包括相敏检测法、同步外差法、正交解调算法等^[6-10]。相敏检测法有模拟相敏检测法和数字相敏检测法两种,其中:模拟相敏检测法利用模拟电路相敏检测提取次谐波分量,电路简单且易于实现,但动态范围小^[11];数字相敏检测法通过锁相滤波方式提取干涉信号中的一、二、四次谐波分量进行解调,同时对调制深度进行监测并反馈,以保证调制深度不变,提高了信号的信噪比,但成本高、数字电路复杂^[12-16]。同步外差法是对干涉信号进行选通,将相位信息转化为低频信号的相位,进而得到相移量的大小,解调不受光强变化和电路增益的影响,动态范围大,标度因数线性度好,但电路复杂,实现较为困难^[17]。

本文提出了一种成本低、动态范围大的正交解调算法,可对光纤陀螺输出信号进行直接数字采样。首先,

等间隔($\pi/6$)得到 12 个采样点后进行相位解调^[18-19]。然后,用数字信号处理器(DSP)作为核心器件,基于条纹计数原理实现大动态范围相位解调。大动态范围正交解调算法先进行直接采样,得到开环光纤陀螺正弦调制时输出信号相位的正弦值和余弦值后再进行相位解调,相位解调精度与光纤陀螺中相位调制器调制信号的调制频率、初始相位以及信号电压峰峰值等参数密切相关。因此,仿真分析了相位调制器的输入调制信号频率、信号电压峰峰值以及数字采样相位误差对解调误差的影响。为实现调制初始相位和调制深度的精确控制,引入调制初始相位误差(E_w)和调制深度误差(E_M)这两个评价参数,通过负反馈对调制初始相位和调制深度的误差进行实时控制。该算法为低成本、大动态范围开环光纤陀螺提供了一个良好的数字解调方案。

2 基本原理

开环光纤陀螺的原理如图 1 所示。超辐射发光二极管(SLD)光源发出的光经过耦合器 1 进入起偏器选择偏振方向,再进入耦合器 2 分成两束传播方向相反的光,经过光纤环后在耦合器 2 处进行干涉。光纤环的一臂加入压电陶瓷(PZT)相位调制器产生正弦相位调制。

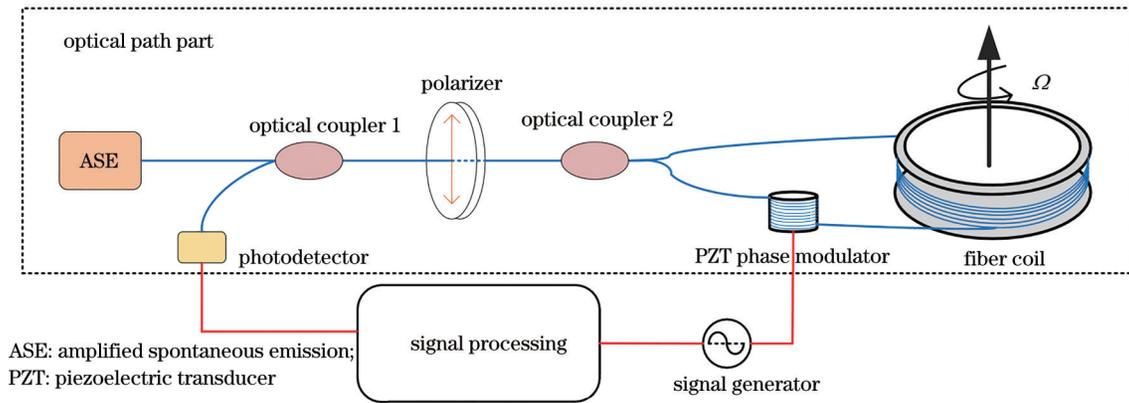


图 1 开环光纤陀螺仪的原理

Fig. 1 Principle of the open-loop fiber optic gyroscope

光强由光电探测器接收并转换为电信号,可表示为
$$V(t) = V_{dc} + V_{ac} \cos[\varphi_s + M \sin(\omega_m t + W)], \quad (1)$$
 式中: V_{dc} 为光电探测器输出的直流信号; V_{ac} 为光电探测器输出的干涉交流信号的幅度,与光强成正比; φ_s 为转动产生的 Sagnac 相移; M 为调制深度; ω_m 为正弦相位调制角频率; W 为调制初始相位。式(1)还可以表示为

$$V(t) = V_{dc} + V_{ac} [\cos \varphi_s E(t) - \sin \varphi_s O(t)], \quad (2)$$
 式中, $E(t) = \cos[M \sin(\omega_m t + W)]$, $O(t) = \sin[M \times \sin(\omega_m t + W)]$, 且 $E(t + \pi/\omega_m) = E(t)$, $O(t + \pi/\omega_m) = -O(t)$ 。光电探测器的输出电信号可分解成

直流分量和正交分量,即偶分量 $E(t)$ 和奇分量 $O(t)$ 。对于不同采样时刻的输出电信号:两个间隔 π/ω_m 的采样点相加可以消除奇分量,得到关于相移量 φ_s 的余弦项偶分量;两个间隔 π/ω_m 的采样点相减可以消除偶分量,得到关于相移量 φ_s 的正弦项奇分量,且这种正交特性与调制深度和调制初始相位无关。

基于上述特性,对开环光纤陀螺光电探测器的输出电信号进行数字离散采样,在每个正弦信号调制周期 (2π) 内抽取 12 个采样点,第一个采样点为 $\omega_m t = 2k\pi, k = 0, 1, \dots$, 对电信号进行等相位间隔($\pi/6$) 采样后,每个周期得到 12 个点,分别为 S_0, \dots, S_{11} 。利用点 S_0, S_3, S_6, S_9 计算出含有相移量 φ_s 的余弦项 R_c ^[17], 可表示为

$$R_c = (S_0 + S_6) - (S_3 + S_9) = 2V_{ac} \cos \varphi_s \left[E\left(\frac{0\pi}{6}\right) - E\left(\frac{3\pi}{6}\right) \right] =$$

$$2V_{ac} \cos \varphi_s [\cos(M \sin W) - \cos(M \cos W)], \quad (3)$$

利用点 S_1, S_5, S_7, S_{11} 计算出含有相移量 φ_s 的正弦项 $R_s^{[17]}$, 可表示为

$$R_s = (S_7 - S_1) + (S_{11} - S_5) = 2V_{ac} \sin \varphi_s \left[O\left(\frac{\pi}{6}\right) + O\left(\frac{5\pi}{6}\right) \right] = 2V_{ac} \sin \varphi_s \left\{ \sin \left[M \sin \left(\frac{\pi}{6} + W \right) \right] + \sin \left[M \sin \left(\frac{\pi}{6} - W \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

当调制深度 $M = \pi$ 、调制初始相位 $W = 0$ 时, $\cos(M \sin W) - \cos(M \cos W)$ 和 $\sin[M \sin(\pi/6 + W)] + \sin[M \sin(\pi/6 - W)]$ 可取得最大值, 均为 2, R_c 和 R_s 中相移量 φ_s 正弦项增益和余弦项增益相等且最大, 此时对应的 R_c 和 R_s 可表示为

$$R_c = 4V_{ac} \cos \varphi_s, \quad R_s = 4V_{ac} \sin \varphi_s. \quad (5)$$

通过 R_c 和 R_s 解调出转动产生的 Sagnac 相移 φ_s , 可表示为

$$\varphi_s = \arctan(R_s/R_c). \quad (6)$$

若直角坐标系中存在某一点 $A(R_c, R_s)$, 则相移 φ_s 可表示为原点 O 到点 $A(R_c, R_s)$ 的连线与 X 轴的夹角, 如图 2 所示。将直角坐标系分成 8 个象限, 通过判断 R_c, R_s 的正负 R_c 与 R_s 绝对值之差 ($D = |R_c| - |R_s|$) 的正负确定点 A 所在象限。如: 当 R_c, R_s, D 均为正值时, 相移 φ_s 位于第 1 象限 ($0 \sim \pi/4$) 内; R_c, R_s 为负值且 D 为正值时, 相移 φ_s 位于第 4 象限 ($\pi \sim 5\pi/4$) 内, 从而实现相移 φ_s 在 $0 \sim 2\pi$ 范围内的解调。

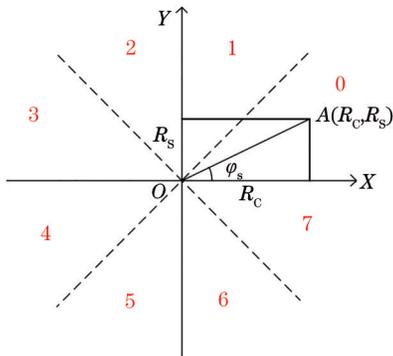


图 2 Sagnac 相移 φ_s 在 $0 \sim 2\pi$ 范围内的象限位置

Fig. 2 Quadrant position of Sagnac phase shift φ_s in the range of $0 \sim 2\pi$

当光纤陀螺仪输出角速度产生的 Sagnac 相移大于等于一个周期时, 无法进行准确判断和解调。为了

进一步扩大本算法的相位解调范围, 在光纤陀螺前后两次解调输出相移量的差小于 π 时, 采用条纹计数法进行相位解调。设置参量 F 为条纹计数器, 其初值为 0, 光纤陀螺仪在某一时刻输出的相移量为 P_i , 前一时刻陀螺仪输出的相移量为 $P_{i-1}, i=1, 2, \dots$, 两次输出相移量的差 $D_i = P_i - P_{i-1}$; 当 $D_i < 0, \pi + D_i < 0$ 时, $F = F + 1$; 当 $D_i \geq 0, \pi - D_i < 0$ 时, $F = F - 1$, 此时, 光纤陀螺的输出相位角度可表示为 $P'_i = P_i + F \times 2\pi$, 从而实现输入旋转角速度产生相位超过 2π 范围的解调范围。该算法有效的前提是前后两次解调输出的相移量差小于 π , 在输入旋转角速度较大时, 需提高调制频率。通过条纹计数方法可将 12 点正交解调算法的相位解调范围扩展至 2π 范围外, 且具有简单、易于实现的优点。

3 解调精度影响因素的仿真实验

3.1 调制信号参数对解调精度的影响

在开环光纤陀螺中, 用正弦信号驱动相位调制器, 相位调制器产生的调制相位 $\Delta\varphi_m(t)$ 可表示为

$$\Delta\varphi_m(t) = M \sin(\omega_m t + W) = \frac{\pi}{V_\pi} V_{pp} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_m}{f_e}\right) \sin\left(\omega_m t - \omega_m \frac{\tau}{2} + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (7)$$

式中: f_m 为调制频率; φ_0 为调制初始相位; V_π 为相位调制器半波电压; V_{pp} 为调制信号电压峰峰值; τ 为光纤陀螺光纤环的渡越时间; f_e 为光纤陀螺本征频率; $f_e = 1/(2\tau)$ 。由式(3)和式(4)可知, 对于 12 点直接采样正交解调算法, 只有在调制深度 M 为 π , 调制初始相位 W 为 0 时, 正弦项 R_s 和余弦项 R_c 才能获得最大值 2, 通过式(6)可直接获得相移量 φ_s , 解调得到的相移量与相位调制器输入调制信号的参数无关。调制深度 M 和调制初始相位 W 由相位调制器调制信号的频率、相位、电压峰峰值决定, 可表示为

$$W = \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{f_m}{f_e}\right), \quad M = \frac{\pi}{V_\pi} V_{pp} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_m}{f_e}\right). \quad (8)$$

当调制深度 M 不为 π , 调制初始相位 W 偏离 0 时, 解调得到的相移量受到相位调制器输入调制信号的影响。因此, 对于 12 点正交解调算法的大动态范围开环光纤陀螺, 需要精确配置相位调制器调制信号的调制频率、调制信号的初始相位以及调制信号电压峰峰值, 以保证调制深度 $M = \pi$ 和调制初始相位 $W = 0$ 。调制深度 M 由相位调制器调制信号电压峰峰值、相位调制器的调制频率决定。调制频率误差 Δf_m 、调制电压峰峰值误差 ΔV_{pp} 与调制深度误差之间的关系可表示为

$$\Delta M = \frac{\pi}{V_\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_m}{f_e}\right) \Delta V_{pp} + \frac{\pi}{V_\pi} \frac{V_{pp}}{2f_e} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_m}{f_e}\right) \Delta f_m. \quad (9)$$

调制初始相位 W 由相位调制器调制频率和调制初始相位决定, 调制初始相位误差 ΔW 、相位调制器调

制频率误差 Δf_m 与相位调制器调制信号的初始相位误差 $\Delta\varphi_0$ 之间的关系可表示为

$$\Delta W = \Delta\varphi_0 - \frac{\pi}{2f_c} \Delta f_m \quad (10)$$

可以发现,调制初始相位 W 由相位调制器调制信号的初始相位 φ_0 和相位调制器调制频率 f_m 决定。基于 12 点正交解调算法的开环光纤陀螺对输出信号进行离散数据采集,可通过同步触发控制方式调整触发延时使调制初始相位 $\varphi_0 = 0$,如调制频率 $f_m = 97.31 \text{ kHz}$ 、触发延时的时间控制精度为 100 ps 时,调制初始相位 W 的误差 $\Delta\varphi_0 \leq 6.11 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。在相位调制器的调制初始相位确定时,通过控制相位调制器调制信号的频率 f_m 也可以对调制信号的初始相位误差进行补偿。此外,通过控制相位调制器调制信号的频率 f_m 和调制电压峰值 V_{pp} ,可以实现对调制深度 M 的误差控制。

为了降低相位调制器调制信号对光纤陀螺相位解调测量结果的影响,引入调制初始相位误差 E_w 和调制深度误差 E_M 这两个评价参数,以实时监测调制初始相位和调制深度。其中,调制初始相位误差 E_w 分为偶调制初始相位误差 E_{CW} 和奇调制初始相位误差 E_{SW} ,调制深度误差 E_M 分为偶调制深度误差 E_{CM} 和奇调制深度误差 E_{SM} ,利用该误差信号对相位调制器输出的调制

信号进行反馈控制,将调制误差控制在某一范围内。调制误差^[17]可表示为

$$\begin{aligned} E_{CW} &= (S_7 + S_1) - (S_{11} + S_5) = 4V_{ac} \sqrt{\frac{3}{2}} MW \cos \varphi_s \\ E_{SW} &= -(S_6 - S_0) = 2V_{ac} MW \sin \varphi_s \\ E_{CM} &= (S_7 + S_1) - (S_6 + S_0) + (S_{11} + S_5) - (S_9 + S_3) = 2V_{ac} (\pi - M) \cos \varphi_s \\ E_{SM} &= (S_9 - S_3) = 2V_{ac} (\pi - M) \sin \varphi_s \end{aligned} \quad (11)$$

当光纤陀螺测量的角速度不同时,根据式(3)、式(4)计算的 R_C 和 R_S 也不同, $A(R_C, R_S)$ 坐标处于直角坐标系中的不同位置。根据点 A 在直角坐标系中的位置选择式(11)中对应的调制初始相位和调制深度误差公式进行计算,即在图 2 中:光纤陀螺输出相移量对应点 A 坐标在图 2 中的 0、3、4、7 位置处使用 E_{CM} 和 E_{CW} 分别计算调制深度误差 E_M 和调制初始相位误差 E_w ;光纤陀螺输出相移量对应点 A 坐标在图 2 中的 1、2、5、6 位置处使用 E_{SM} 和 E_{SW} 分别计算调制深度误差 E_M 和调制初始相位误差 E_w 。

利用调制初始相位误差 E_w 和调制深度误差 E_M 对相位调制器的输出调制频率 f_m 和电压峰值 V_{pp} 进行反馈控制,以保证 12 点正交解调算法开环光纤陀螺的解调精度,具体流程如图 3 所示。首先,相位调制器由

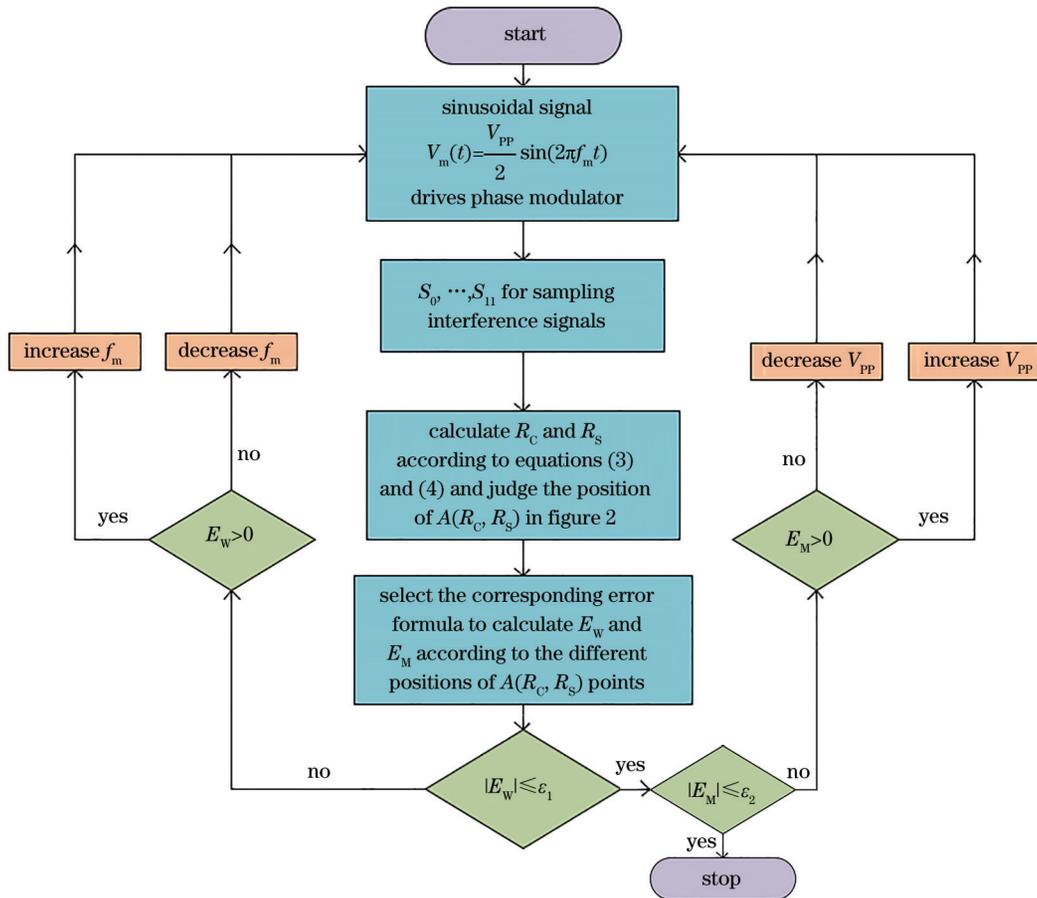


图 3 f_m 和 V_{pp} 的反馈控制流程图

Fig. 3 Feedback control flow chart of f_m and V_{pp}

初始正弦调制信号 $V_m(t) = \sin(2\pi f_m t) V_{PP}/2$ 驱动相位调制器, 光纤陀螺输出信号 12 点离散数字采样获得的每个调制周期的 S_0, \dots, S_{11} 数据, 根据式(3)、式(4)计算 R_C 和 R_S , 同时获得 $A(R_C, R_S)$ 在直角坐标系中的位置。然后, 根据式(11)计算调制初始相位误差 E_W (E_{CW} 或 E_{SW}) 和调制深度误差 E_M (E_{CM} 或 E_{SM})。其次, 将上述误差值与解调误差控制参数 ϵ_1 和 ϵ_2 进行对比, 先进行调制频率的反馈控制: 若调制初始相位误差 $E_W > \epsilon_1$, 增大调制频率 f_m ; 若调制初始相位误差 $E_W < -\epsilon_1$, 减小调制频率 f_m 。之后, 进行调制电压峰峰值 V_{PP} 的控制: 若调制深度误差 $E_M > \epsilon_2$, 增大调制电压峰峰值 V_{PP} ; 若调制初始相位误差 $E_M < -\epsilon_2$, 减小调制电压峰峰值 V_{PP} 。循环上述操作, 最终实现调制频率 f_m 和电压峰峰值 V_{PP} 的调控, 使调制初始相位误差的绝对值控制在 ϵ_1 内, 通过调制电压峰峰值 V_{PP} 使调制深度误差的绝对值控制在 ϵ_2 内。

为了准确给出解调误差控制参数 ϵ_1 和 ϵ_2 , 仿真分析了解调误差评价参数 E_W 和 E_M 与解调相位误差之间的关系。假设开环光纤陀螺的本征频率 $f_c = 97.31$ kHz, 相位调制器半波电压 $V_\pi = 3.654$ V, 被测量角速度通过光纤环引入光纤陀螺仪的相移量 φ_s , 对于某一调制初始相位误差 ϵ_{1i} 和调制深度误差 ϵ_{2i} , 根据式(11)计算出对应的正弦信号调制初始相位 W 和调制深度 M 范围, 将 W 和 M 代入式(1)得到光纤陀

螺输出的干涉信号, 对该干涉信号进行每周期 12 点离散采样, 得到 S_0, \dots, S_{11} 。然后由式(3)、式(4)计算出 R_C 和 R_S , 判断点 $A(R_C, R_S)$ 在图 2 中直角坐标系上的位置并选取对应的解调公式计算 φ'_s , 则解调相位误差可表示为 $\varphi'_s - \varphi_s$ 。当 Sagnac 相移量 φ_s 为 $0, \pi/4, 5\pi/3, 7\pi/6$ 时, 仿真了调制初始相位误差 E_W 和调制深度误差 E_M 对解调相位误差的影响, 结果如图 4 所示。其中, Z 轴为解调相位误差 $\varphi'_s - \varphi_s$, X 轴为调制初始相位误差 E_W , Y 轴为调制深度误差 E_M 。当调制初始相位误差 $E_W = 0$ 且调制深度误差 $E_M = 0$ 时, 调制初始相位 $W = 0$ 且调制深度 $M = \pi$, 解调相位误差为 0。可以发现, 当 $\varphi_s = 0$ 时, 调制初始相位误差 E_W 和调制深度误差 E_M 对解调相位误差的影响较小, 原因是解调相位 φ'_s 等于 R_S 与 R_C 比值的反正切值, 由式(4)可知, 引入陀螺仪的相移量趋近 0 时, R_S 趋近 0, E_W 和 E_M 在 φ_s 趋近于 0 时对解调相位误差的影响很小。由式(11)可知, E_W 和 E_M 与相移量 φ_s 和 V_{ac} 相关联, 当相移量 φ_s 趋近 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 时, 相移量 φ_s 的余弦项 $\cos \varphi_s$ 或正弦项 $\sin \varphi_s$ 趋近 0, E_W 和 E_M 对解调相位误差的影响较小。数值仿真结果表明, 当 $V_{ac} = 2.57$ V 时, 为将解调相位误差控制在 $\pm 10^{-6}$ rad 内, 调制初始相位误差 E_W 应控制在 ± 16.226 mV ($\epsilon_1 < 16.226$ mV) 内, 调制深度误差 E_M 应控制在 ± 12.483 mV ($\epsilon_2 < 12.483$ mV) 内。

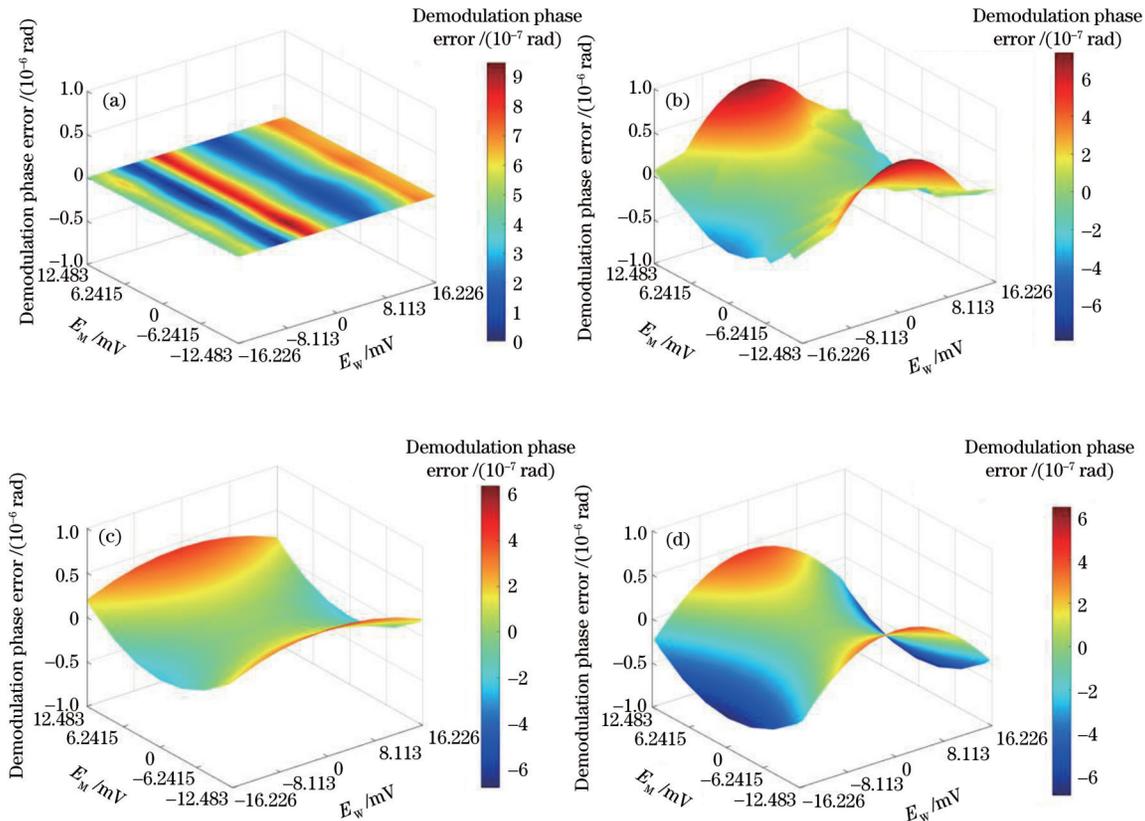


图 4 调制误差与解调误差的关系。(a) $\varphi_s = 0$; (b) $\varphi_s = \pi/4$; (c) $\varphi_s = 7\pi/6$; (d) $\varphi_s = 5\pi/3$

Fig. 4 Relationship between modulation error and demodulation error. (a) $\varphi_s = 0$; (b) $\varphi_s = \pi/4$; (c) $\varphi_s = 7\pi/6$; (d) $\varphi_s = 5\pi/3$

为了分析调制信号调制频率 f_m 和调制电压峰峰值 V_{pp} 对本算法解调误差的影响,对于某一调制信号调制频率 f_m 和调制电压峰峰值 V_{pp} ,根据式(8)计算得到对应的调制初始相位 W 和调制深度 M ,并将其代入式(1)得到对应的干涉信号,然后利用正交解调算法得到 φ'_s 。当 Sagnac 相移量 φ_s 为 $0, \pi/4, 5\pi/3, 7\pi/6$ 时仿真得到的解调相位误差如图 5 所示。其中, Z 轴为解调相位误差 $\varphi'_s - \varphi_s$, X 轴为调制频率偏移光纤环的本征频率 $\Delta f_m (\Delta f_m = f_m - f_e)$ 误差, Y 轴为电压峰峰值偏离半波电压 $\Delta V_{pp} (\Delta V_{pp} = V_{pp} - V_\pi)$ 误差。当相位调制器驱动频率等于光纤陀螺本征频率 ($f_m = f_e = 97.31 \text{ kHz}$)、电压峰峰值等于半波电压 ($V_{pp} = V_\pi =$

3.654 V) 时,调制初始相位 $W=0$,调制深度 $M=\pi$,解调相位误差为 0。可以发现,在 $\varphi_s=0$ 时,频率偏移 Δf_m 和电压峰峰值偏移 ΔV_{pp} 对解调相位误差的影响很小,原因是解调相位 φ'_s 等于 R_s 与 R_c 比值的反正切值,由式(4)可知,通过光纤环引入陀螺仪的相移量趋近 0 时,相移量的正弦值趋近 0, E_w 和 E_m 在 φ_s 趋近于 0 时对解调相位误差的影响很小。数值仿真结果表明,为了保证解调相位误差控制在 $\pm 10^{-6} \text{ rad}$ (标度因数为 1.134 s , 光纤陀螺角速度误差为 $\pm 0.1819 (^\circ)/\text{h}$) 内,频率偏移量 Δf_m 应控制在 $\pm 70 \text{ Hz}$, $f_e = 97.31 \text{ kHz}$, $\Delta f_m = \pm 0.0719\% f_e$, 电压峰峰值 ΔV_{pp} 应控制在 $\pm 4 \text{ mV}$ 内,即 $V_\pi = 3.654 \text{ V}$ 、 $\Delta V_{pp} = \pm 0.11\% V_\pi$ 。

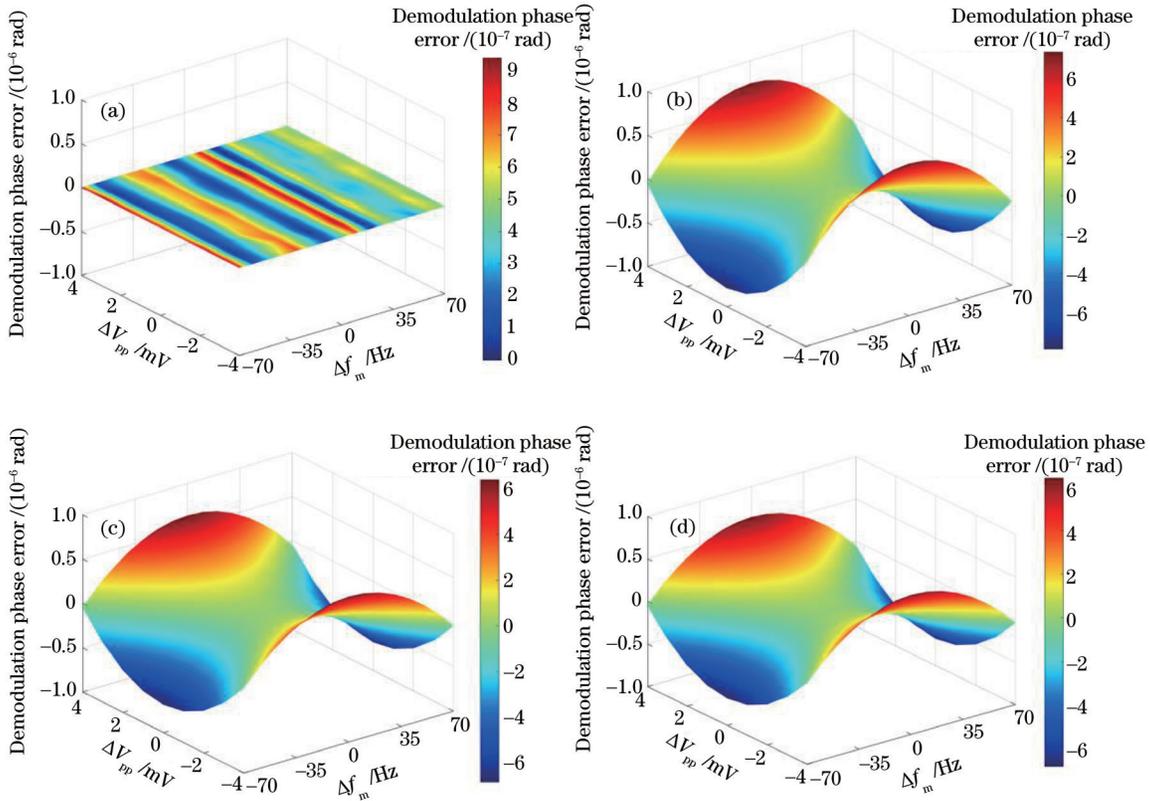


图 5 频率偏移 Δf_m 和电压峰峰值偏移 ΔV_{pp} 对解调精度的影响。(a) $\varphi_s = 0$; (b) $\varphi_s = \pi/4$; (c) $\varphi_s = 7\pi/6$; (d) $\varphi_s = 5\pi/3$
 Fig. 5 Effect of frequency offset Δf_m and voltage peak to peak offset ΔV_{pp} on demodulation accuracy. (a) $\varphi_s = 0$; (b) $\varphi_s = \pi/4$; (c) $\varphi_s = 7\pi/6$; (d) $\varphi_s = 5\pi/3$

3.2 采样相位误差对相位解调精度的影响

12 点正交解调算法基于对干涉信号数字离散采样获得间隔为 $\pi/6$ 的 12 点离散信号进行相位解调,采样时钟信号的时间抖动 Δt_{jitter} 产生的采样相位误差为 $\omega_m \Delta t_{\text{jitter}}$ 。正交解调算法进行相位解调时,含有相移量 φ_s 的余弦项 R_c 和正弦项 R_s 可表示为

$$R_c = 2V_{ac} \cos \varphi_s \left[E \left(\frac{0\pi}{6} + \omega_m \Delta t_{\text{jitter}} \right) - E \left(\frac{3\pi}{6} + \omega_m \Delta t_{\text{jitter}} \right) \right]$$

$$R_s = 2V_{ac} \sin \varphi_s \left[O \left(\frac{\pi}{6} + \omega_m \Delta t_{\text{jitter}} \right) + O \left(\frac{5\pi}{6} + \omega_m \Delta t_{\text{jitter}} \right) \right] \quad (12)$$

采样相位误差导致含有相移量 φ_s 的余弦项 R_c 和正弦项 R_s 产生误差,根据 R_c 和 R_s 解调时会产生相位解调误差,根据误差传递公式推导的解调相位标准差 S 可表示为

$$S = \frac{1}{\overline{R_s}^2 + \overline{R_c}^2} \sqrt{\overline{R_c}^2 \sigma_{R_s}^2 + \overline{R_s}^2 \sigma_{R_c}^2}, \quad (13)$$

式中: $\overline{R_s}$ 为 R_s 的平均值; $\overline{R_c}$ 为 R_c 的平均值; σ_{R_s} 为 R_s 的标准差; σ_{R_c} 为 R_c 的标准差。根据式(3)、式(4)和式(11)可知,采样相位误差导致的解调相位误差与干涉信号的交流项幅值 V_{ac} 和相移量 φ_s 有关,在 $V_{ac} = 2.57 \text{ V}$

时,仿真得到的采样相位误差在相移量 φ_s 为 $0\sim 2\pi$ 范围内产生的解调相位误差如图 6 所示。其中, X 轴为相移量 φ_s , Y 轴为采样相位误差的标准差, Z 轴为解调相位误差的标准差。可以发现,当输入陀螺仪的旋转角速度产生的相位为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 时,采样相位误差对解调相位的标准差影响较小。采样相位误差一定的情况下,当相移量为 $0\sim 2\pi$ 时,解调相位误差的标准差为周期性变化;当相移量为 $0\sim \pi/2$ 时,解调相位误差的标准差先增加后减小。结果表明,为了使解调相位的标准差控制在 10^{-6} rad 内,需将采样相位误差控制在 5.625×10^{-4} rad 内。

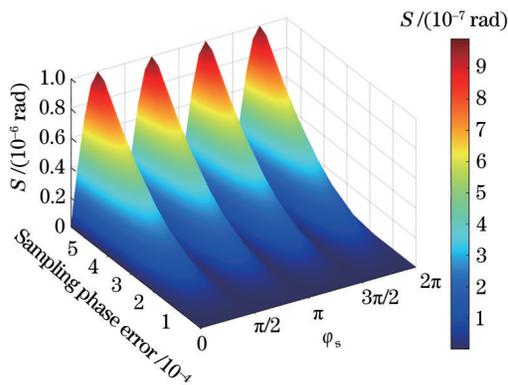


图 6 采样相位误差对解调相位标准差 S 的影响

Fig. 6 Effects of sampling phase error on demodulation phase standard deviation S

4 结 论

研究了一种实现开环光纤陀螺大动态范围解调的正交解调算法。利用该解调算法,对光纤陀螺输出的干涉信号每周期内间隔 $\pi/6$ 进行 12 点直接采样,通过条纹计数可实现相位超过 2π 范围的相位测量。解调算法实现过程中,光纤陀螺中相位调制器的调制参数将直接影响算法的解调精度,为了使开环光纤陀螺的相位解调误差在 10^{-6} rad (标度因数为 1.134 s, 光纤陀螺输出角速度误差 $\pm 0.1819(^{\circ})/h$) 内,正弦调制信号调制频率误差应小于 $\pm 0.072\%$, 调制信号峰峰值电压应小于 $\pm 0.1\%$ (± 4 mV, 相位调制器半波电压 $V_{\pi} = 3.654$ V), 数字采样相位误差应控制在 5.625×10^{-4} rad (采样时钟抖动的标准差 920 ps) 内。在光纤陀螺输出干涉信号交流部分幅值 $V_{ac} = 2.57$ V 时,调制相位反馈误差 E_w 应小于 ± 16.226 mV, 调制深度反馈误差 E_M 应小于 ± 12.483 mV 就能将解调相位的标准差控制在 10^{-6} rad 以内。

参 考 文 献

[1] 尚克军, 雷明, 李豪伟, 等. 集成化光纤陀螺设计、制造及未来发展[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(4): 502-509.
Shang K J, Lei M, Li H W, et al. Design,

manufacturing and future development of the integrated fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(4): 502-509.

- [2] Yao X S, Xuan H F, Chen X J, et al. Polarimetry fiber optic gyroscope[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19984-19995.
- [3] 冯小勇, 王前学, 李辉芬, 等. 基于光纤陀螺捷联惯导的载体位姿精密测量[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1012001.
Feng X Y, Wang Q X, Li H F, et al. Precise measurement of carrier position and attitude based on fiber optic gyroscope strap-down inertial navigation system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1012001.
- [4] 杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328004.
Yang Y H, Yang F L, Lu L, et al. Research on interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328004.
- [5] Cao Y W, Chen Y J, Zhou T, et al. The development of a new IFOG-based 3C rotational seismometer[J]. Sensors, 2021, 21(11): 3899.
- [6] Bhattacharyya S, Ahmed R N, Purkayastha B B, et al. Implementation of digital lock-in amplifier[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 759: 012096.
- [7] 吕呈辉. 低成本开环光纤陀螺仪解调电路研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 25-30.
Lü C H. Research of low-cost open-loop fiber optic gyro demodulation circuit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 25-30.
- [8] Babu G H, Anuhya A V, Venkatram N. Digital signal processing scheme for open loop and closed loop IFOG using Matlab/Simulink[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2016, 9(11): 09745645.
- [9] 江毅, 张树桓. 光纤激光干涉测量技术在 EFPI 传感器信号解调中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306017.
Jiang Y, Zhang S H. Research progress on fiber optical laser interferometry in signal demodulation of EFPI sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306017.
- [10] 梅泽, 吕海飞, 文晓艳, 等. 改进的椭圆拟合算法及振动传感相位解调[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2412001.
Mei Z, Lü H F, Wen X Y, et al. Modified ellipse fitting algorithm and phase demodulation of vibration sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2412001.
- [11] 周柯江, 阮晔锋, 张大茂, 等. 光纤陀螺仪开环信号调制解调电路: CN101696882A[P]. 2010-04-21.
Zhou K J, Ruan Y F, Zhang D M, et al. Open loop signal modulation and demodulation circuit of fiber optic gyroscope: CN101696882A[P]. 2010-04-21.
- [12] Wang Q, Yang C C, Wang X Y, et al. All-digital signal-processing open-loop fiber-optic gyroscope with enlarged dynamic range[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5422-5425.
- [13] 黄蔚. 光纤陀螺数字解调技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 32-38.
Huang W. Research about digital demodulation of fiber optic gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University,

- 2009: 32-38.
- [14] 张敏杰, 周柯江, 王磊. 采用数字相位跟踪的光纤陀螺解调方案设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1536-1540.
Zhang M J, Zhou K J, Wang L. Demodulation scheme for fiber-optic gyroscope based on digital phase tracking [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1536-1540.
- [15] 周柯江, 胡科可, 王涛. 双折射波导偏振耦合的短相干干涉测量[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2992-2995.
Zhou K J, Hu K K, Wang T. Short coherent interferometry of polarize coupling in birefringent waveguide [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 2992-2995.
- [16] 严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的 PGC 解调非线性误差补偿方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904002.
- Yan L P, Zhou C Y, Xie J D, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filtering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904002.
- [17] 张敏杰. 开环 Sagnac 干涉仪的数字信号处理[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 16-20.
Zhang M J. Digital signal processing for open-loop Sagnac interferometer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 16-20.
- [18] Bush I J, Cekorich A C. Demodulator and method useful for multiplexed optical sensors: US5903350[P]. 1999-05-11.
- [19] Cekorich A. Demodulator for interferometric sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3860: 338-347.