

干涉式光纤陀螺跨条纹工作误差研究

赵海波, 莫 馁, 李旭东

(中国电子科技集团公司 第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:在干涉式光纤陀螺中,当调制信号超出限制并进行 2π 复位时,调制信号输入的调制量与输入角速度间出现了 2π 的相位差,这使实际的干涉相位出现左移或右移 2π ,即跨条纹工作。在光纤陀螺闭环系统中,跨条纹工作产生的误差体现在随机游走系数和非线性度上。该文通过优化调制方案建立跨条纹误差抵消机制,可使跨条纹产生的误差互相抵消,从而提高光纤陀螺的非线性度和随机游走系数。经过仿真和实验表明该方法有效。

关键词:光纤陀螺;调制解调;非线性;跨条纹误差

中图分类号:TN65;V241.5 **文献标识码:**A

Research on the Cross-Fringe-Operation Error of FOGs

ZHAO Haibo, MO Nei, LI Xudong

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In interferometric fiber-optic gyroscopes (FOGs), when the modulation signal exceeds the limit and undergoes a 2π reset, a 2π phase difference appears between the modulation amount of the modulation-signal input and the input angular velocity. This causes the interference phase to shift left or right by 2π , i. e., a cross-fringe operation. In a FOG closed-loop system, the error caused by the cross-fringe operation is reflected in the random-walk coefficient and nonlinearity. In this study, a cross-fringe error-cancellation mechanism is established by optimizing the modulation scheme, which can cause the cross-fringe errors to cancel each other, thus greatly improving the nonlinearity and random-walk coefficient. After simulated and physical verification, the results show the effectiveness of this method.

Key words: fiber optic gyroscope; modulation; demodulation; nonlinearity; cross fringe error

0 引言

经过近20年的发展,国内干涉式光纤陀螺日渐成熟,在很多领域已完全取代机械陀螺,成为现代导航仪器中的关键部件。随着光纤陀螺的调制方式由模拟的三角波发展到数字方波,光纤陀螺的精度也逐步提高。

1 光纤陀螺调制方式

光纤陀螺的调制方式主要有二态调制、四态调制和随机调制^[1]。

1.1 二态调制方案

二态调制方案采用 $+\pi-\theta$ 、0的方波加上阶梯波的方式进行调制(θ 为偏置相位),典型的二态调制波形如图1所示。图中,相位方波的高低电平与前一个态干涉分别形成 $+\pi-\theta$ 和 $-\pi+\theta$ 两个干涉

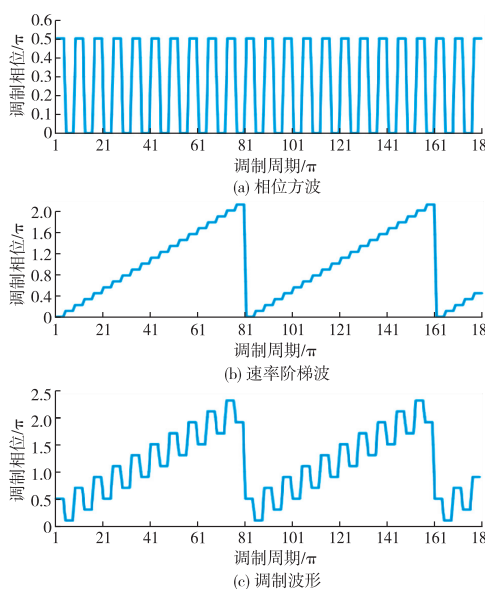


图1 二态调制下的典型波形

收稿日期:2023-09-22

作者简介:赵海波(1982-),男,重庆市人,工程师。

相位。速率阶梯波是为抵消输入角速率产生的相移而生成,其每个阶梯高度应该与输入角速率引起的相移相等,由此可将工作点稳定控制在 $+\pi-\theta$ 与 $-\pi+\theta$ 。当阶梯波累加超出范围 $0\sim 2\pi$ 时,只需要对速率阶梯波进行 2π 复位即可实现光纤陀螺的调制。

由于 $+\pi-\theta$ 与 $-\pi+\theta$ 两个工作点对角加速度的响应相反,由此可以通过两点的光强差解调角加速度。

1.2 四态调制方案

由于二态调制的两个工作点关于 y 轴对称,无法稳定解调半波电压增益。为解决该问题,可以在二态调制的基础上增加一组固定 $+\pi+\theta$ 、 0 的方波进行调制,从而产生稳定的 $+\pi+\theta$ 、 $+\pi-\theta$ 、 $-\pi+\theta$ 和 $-\pi-\theta$ 4个工作点(分别表示为A、B、C、D)。该调制方案称为四态调制(见图2、3)^[2]。图4为四态调制的半波电压增益响应。

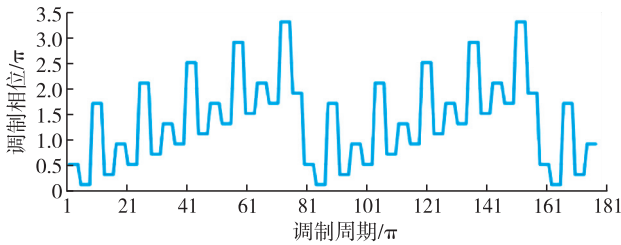


图2 四态调制的调制波形

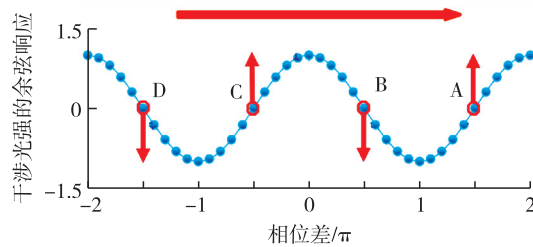


图3 四态调制的角加速度响应

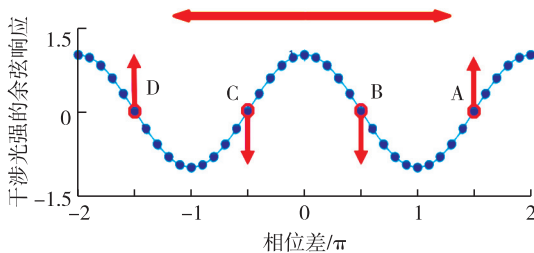


图4 四态调制的半波电压增益响应

由图3、4可看出,当角速率增大时,由于Sagnac效应,干涉相位右移,使得A、C两态的光强增大,B、D两态光强减小。当半波电压增益增大时,由于调制波形高度增大,使A、B两态右移,C、D两态左移。

通过对各工作点的光强变化分析可得出:

1) 通过解调A、D或B、C两态的光强差可抵消半波电压增益误差,从而精确分离出角加速度引起的相位差:

$$\alpha_{AD} = I_A - I_D \quad (1)$$

$$\alpha_{BC} = I_C - I_B \quad (2)$$

式中: I_A, I_B, I_C, I_D 分别为A、B、C、D4个干涉相位对应的光强; α_{AD} 为用关于 y 轴对称的A、D两个干涉状态解调的角加速度; α_{BC} 为用关于 y 轴对称的B、C两个干涉状态解调的角加速度。

2) 通过解调A、C或B、D两态的光强差可抵消角加速度变化,从而精确分离出半波电压增益误差:

$$\Delta\pi_{AC} = I_A - I_C \quad (3)$$

$$\Delta\pi_{BD} = I_D - I_B \quad (4)$$

式中: $\Delta\pi_{AC}$ 为用A、C两个干涉状态解调的半波电压幅度误差; $\Delta\pi_{BD}$ 为用B、D两个干涉状态解调的半波电压幅度误差。

由于二态调制和四态调制采用固定序列的调制相位,波形规律性太强,难以消除串扰导致的死区和零偏偏差问题。

1.3 随机调制方案

为解决串扰导致的死区和零偏偏差问题,本文采用随机调制方案^[3]。使用随机生成的四态调制信号取代原本固定序列的调制方波,可以使电子串扰引入的误差互相抵消,从而有效地抑制死区和零偏偏差问题。

由于随机调制的相位波形范围为 $-2\pi\sim +2\pi$,速率阶梯波范围为 $0\sim 2\pi$,最终形成调制波形范围为 $-2\pi\sim 4\pi$ 。在半波电压为4V时, 6π 的调制幅度需要6V的电压范围。因此,本文采用将阶梯波和调制相位叠加后再对其进行 2π 复位的方式。该复位方式与阶梯波复位方式有本质区别,称为“组合复位方式”,其调制波形如图5所示。

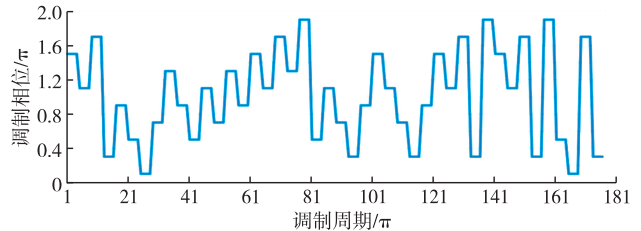


图5 随机调制的调制波形

2 跨条纹工作带来的误差源

理想状态下,二态调制、四态调制及随机调制

均可按图3、4的响应曲线进行精确解调。实验发现,当调制信号触发复位时,光强偶尔有异常变化。由于该光强变化与半波电压增益误差导致的现象高度相似,常被误认为是半波电压增益误差所致。

经实验证实,该异常光强变化是由光纤陀螺跨条纹工作所致。其根源是光纤陀螺所使用的宽谱光源波长范围大^[4-5],致使各级干涉条纹的光强不一致。图6为不同波长光产生的干涉示意图。

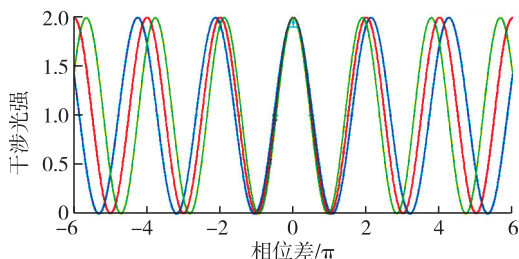


图6 波长不同的光线干涉光强示意图

图7为宽谱光源形成的干涉光强图。由图可看出,随着干涉相位增加,亮条纹光强逐渐减弱,暗条纹光强逐渐增强。图8为理想干涉光谱与宽谱光源干涉光谱间的误差图。由图8可看出,各级条纹间存在光强差异。

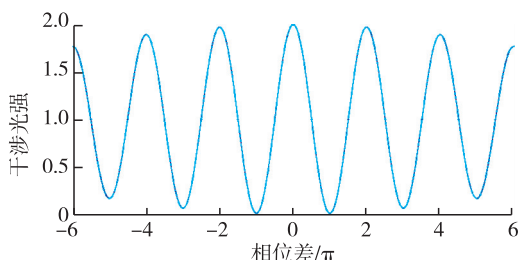


图7 宽谱光源干涉光强图

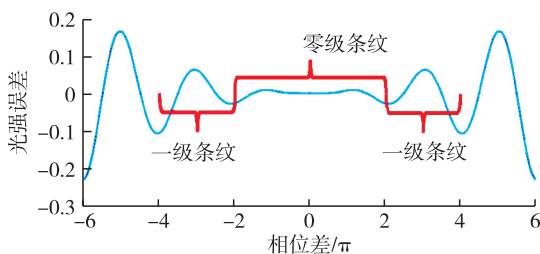


图8 宽谱光源干涉光强误差图

当调制信号触发复位时,调制信号向Y波导输入的调制量与输入角速度间出现了 2π 的相位差,这使实际干涉相位左移或右移 2π 。当A、B两态右移或C、D两态左移时,使实际干涉相位从零级条纹跨入一级条纹,即跨条纹工作。

如图9所示,当B态跨条纹进入一级条纹成为B1时,使用式(2)进行角加速度解调时将零级条纹与一级条纹的光强差异错误地解调为角加速度,从

而产生误差。

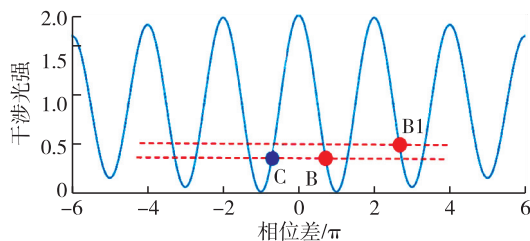


图9 跨条纹误差示意图

3 跨条纹工作的影响

3.1 高转速下的非线性恶化

由于二态调制和四态调制的调制波形复位仅发生在速率阶梯波超出范围 $0\sim 2\pi$ 时,只与阶梯波高度相关,而与调制相位无关。因此,A、B、C、D四态跨条纹工作的概率完全相等。

根据角加速度解调式(1)、(2)可知,A、B跨条纹引起的角速率误差极性相反(C、D同理)。因此,在解调角加速度时,跨条纹工作带来的大部分误差在统计学上可互相抵消(A与B抵消,C与D抵消)。这使高转速下频繁跨条纹的二态调制和四态调制的非线性误差可被抑制在较低的程度^[6]。

在使用“组合复位方式”的随机调制方案中,调制信号是将A、B、C、D四态的调制相位和角速率阶梯波叠加在一起后再判断是否复位。因此,这4个调制态的跨条纹概率与其自身相位密切相关,致使A、B、C、D四态跨条纹概率差异巨大,跨条纹误差互相难以抵消。由于跨条纹工作的概率与输入角速率是非线性关系,其误差无法被输入角速率拟合成线性,故而产生了 500×10^{-6} 的非线性误差。

3.2 零偏稳定性下降

在单个解调周期内,采用阶梯波 2π 复位或组合复位方式,跨条纹工作的光强误差都会被错误解调。该误差以噪声形式体现在光纤陀螺的角速率解调和半波电压增益解调中,使零偏稳定性恶化。

3.3 全温零偏漂移增大

由于存在跨条纹光强误差,半波电压增益闭环在跨条纹工作时无法使各工作点的光强保持一致。如果仅考虑零级条纹内A、B、C、D4个工作点来解调半波电压增益,那么得到的半波电压增益值和Y波导的物理参数间存在误差,该误差随着半波电压增益变化而变化,从而产生全温零偏漂移。

4 跨条纹工作误差解决方案

采用窄谱光源可大幅度改善干涉光谱,从而减

小跨条纹误差。但窄谱光源会使相干系数减小,从而产生寄生干涉,导致光纤陀螺精度下降。因此,使用窄谱光源解决跨条纹工作误差的方案不可行。

另一个方案是设置偏置相位 θ 为 0.5π ,该偏置相位的跨条纹光强差异最小,可以减小跨条纹误差。但偏置相位对陀螺噪声的影响较大, θ 设置为 0.5π 时,会使光纤陀螺无法工作在噪声最优的偏置相位,从而使陀螺精度下降。

如图 3、4 所示,通过关于 y 轴对称的两态光强相减来抵消误差的方式可以得到角加速度和半波电压增益误差噪声最小、精度最高的“精确解”,是最理想的解调结果。但随着角速率增大,“跨条纹”越来越频繁,“精确解”不稳定。因此,在调制解调时可以通过同级条纹的两个工作点光强相减来抵消跨条纹工作误差,这个解调结果被称为“同级解”,其精度仅次于“精确解”。由此可建立“成对调制方案”:在一个渡越时间 τ 内造成对的两个调制态 A、B 或 C、D 进行调制,如图 10 所示。

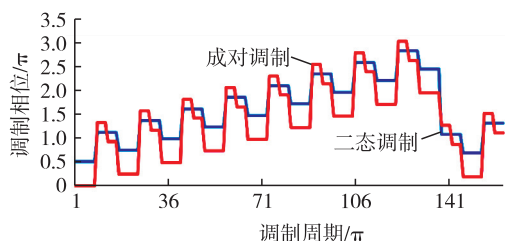


图 10 成对调制方案波形图

图 11 为跨条纹误差示意图。图中, A、B、C、D 为没跨条纹时的干涉相位, A1、B1、C1、D1 分别为 A、B、C、D 跨条纹时的干涉相位。由于在“成对调制方案”中,相同渡越时间 τ 内, A 和 B、C 和 D 成对出现,即使此时发生了阶梯波复位现象,成对的 A 和 B、C 和 D 也会同时右移或左移 2π ,始终保持在同一条纹中,从而使跨条纹工作引起的解调误差互相抵消。“成对调制方案”通过设计一种调制波形,使由跨条纹工作引入的误差被抵消,陀螺噪声和非线性度均显著降低。

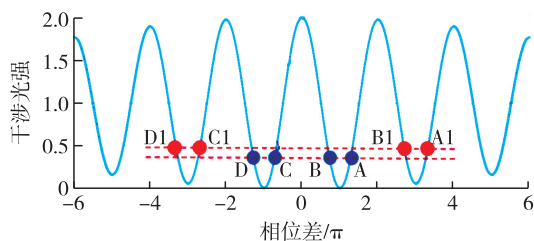


图 11 跨条纹误差示意图

5 实验情况

将“成对调制方案”应用于光纤环长为 450 m 的某型组合复位方式的 $\varnothing 70$ mm 光纤陀螺中,使其非线性度由 260×10^{-6} 降至 2×10^{-6} ,零偏稳定性由 $0.08 (^{\circ})/\text{h}$ 提高至 $0.05 (^{\circ})/\text{h}$,全温零偏漂移从 $0.5 (^{\circ})/\text{h}$ 降低至 $0.15 (^{\circ})/\text{h}$,具有较高的工程应用价值。

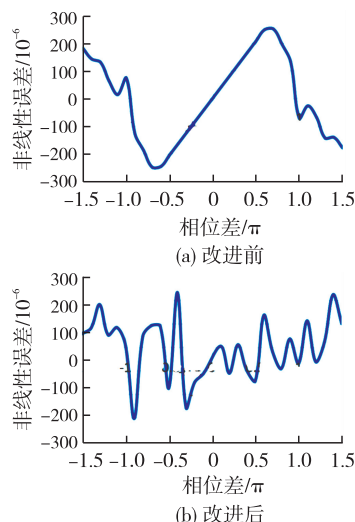


图 12 某 $\varnothing 70$ mm 陀螺改进前后非线性误差对比图

6 结束语

本文通过分析跨条纹工作机理,找到了导致光纤陀螺在跨条纹工作时非线性恶化的误差源。针对该误差源建立了一套有效的调制解调方案,将该误差源导致的误差抑制在极低的程度。但基于阶梯波复位方式的调制方案在抑制死区和串扰方面始终不如基于组合复位的随机调制方案,可以预见,若将成对调制方案和基于组合复位方式的随机调制方案相结合,则可以在有效抑制死区和串扰的基础上解决跨条纹误差问题。

参考文献:

- [1] 刘成阳. 光纤陀螺的数字闭环控制方案的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [2] 许文渊, 张春熹, 张晞, 等. 光纤陀螺双方波调制方法及其实验研究[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 63-67.
- [3] 吕嫣然, 马家君, 黄月锐涵, 等. 消除数字闭环光纤陀螺串扰的多态调制方法[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 103-112.
- [4] 魏晓璐, 李艳, 齐同斌. 光纤陀螺 SLD 光源的特性研究[J]. 仪表技术, 2013(10): 36-38.
- [5] 陈和宇, 郑月, 王夏霄, 等. 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 227-233.
- [6] 袁慧铮, 陆俊清, 李星善, 等. 大量程高精度光纤陀螺的设计与实现[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(3): 59-62.