

基于双探测器的光源相对强度噪声抑制方案

黄怡¹, 王夏霄^{1*}, 徐宏杰¹, 孔令海²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 2. 北京控制与电子技术研究所, 北京 100038)

摘要: 针对传统和现有光路抑制方案在常温条件下表现良好但在全温度范围内性能却难以保证的问题, 提出了一种基于双探测器的光源相对强度噪声(RIN)抑制方案。该方案通过双探测器分别检测经不同路径的光信号, 并在电路中将这2路信号同步后相减, 以消除RIN, 从而提高光纤陀螺的精度。同时, 还探究了不同调制深度对陀螺输出的影响及未来对该方案的改进思路。实验结果表明: 在调制深度为 $3\pi/4$ 并且配合双探测器的RIN抑制措施的情况下, 该方案能有效提高光纤陀螺的精度, 并满足全温条件下的使用要求。

关键词: 相对强度噪声; 高精度光纤陀螺; 信噪比; 调制深度; 噪声抑制

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2024)06-0052-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Relative intensity noise suppression scheme based on dual detectors

HUANG Yi¹, WANG Xiaoxiao^{1*}, XU Hongjie¹, KONG Linghai²

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 100038, China)

Abstract: To address the issue where traditional and existing optical path suppression schemes perform well at room temperature but struggle to maintain performance across all temperature ranges, a relative intensity noise (RIN) suppression scheme based on dual detectors is proposed. This scheme uses dual detectors to separately detect optical signals passing through different paths and subtracts these signals in the circuit after synchronization to eliminate RIN, thereby improving the precision of fiber optic gyroscope. Additionally, the impact of different modulation depths on gyroscope output and potential improvements to the scheme are explored. The experimental results show that with a modulation depth of $3\pi/4$ and the use of RIN suppression measures employing dual detectors, the scheme effectively enhances the precision of fiber optic gyroscope and meets usage requirements across all temperatures.

Key words: relative intensity noise, high-precision fiber optic gyroscope, signal-to-noise ratio, modulation depth, noise suppression

0 引言

高精度光纤陀螺广泛应用于航空航天领域, 通常采用大功率宽谱光源, 例如放大自发辐射(ASE)光源^[1],

收稿日期: 2024-01-22。

作者简介: 黄怡(2000—), 女, 云南德宏人, 硕士研究生, 本科毕业于武汉理工大学光电信息技术与工程专业, 现就读于北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院电子信息专业, 主要研究方向为光纤陀螺、光纤传感。

***通信作者:** 王夏霄(1977—), 男, 山西太原人, 研究员, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院博士生导师, 主要从事光纤陀螺、光纤传感及信号检测等技术研究工作。



以提高检测信噪比。然而, 宽谱光源在发光过程中, 其各频率分量间的相互作用会引发光源相对强度噪声(RIN)^[2]。RIN的生成主要依赖于光谱特性, 与光功率的绝对值无直接关联。当探测器接收的光功率达到一定阈值时, 受RIN的限制, 即使继续增大光功率, 也无法有效提升信噪比。因此, 需要采取专门的RIN抑制措施来提高光纤陀螺的精度。

传统的RIN抑制方案主要包括电路消偏抑制方案^[3-5]、光路消偏抑制方案^[6]和光源处抑制方案^[7]等。电路消偏抑制方案^[8]利用耦合器空闲端口输出的光连接到另一个探测器上, 该探测器的输出作为参考信号。

通过对光路或电路施加适当的延迟,使得参考信号与陀螺仪信号同步,从而在电路实现模拟或数字相减。此方法虽然简单易行,但由于受到延时控制精度的限制,RIN抑制效果难以充分实现。光路消偏抑制方案^[9]通过消偏手段使到达探测器的光成为无偏光。由于无偏光的RIN低于偏振光,因此通过消偏降低了RIN,但此方案的RIN抑制效果有限。光源处抑制方案^[10]通过将光源发出的光部分反馈至其驱动单元,构建了一个光功率的负反馈机制。这种方法有效地减少了光功率源的波动,同时确保不对后续光路产生影响,但其设计与实现过程相对复杂。

目前,基于光路抵消的RIN抑制方案较为普遍。该方案原理为:光源发出的光经过起偏器后变为线偏振光,再经过50/50耦合器分为2束光,一束作为信号光,另一束作为参考光。这2束光在95/5耦合器处合光后进行强度叠加,合成的光已在本征频率及其奇倍频处实现了RIN抑制。将此抑制方案应用于光纤陀螺系统,可以显著提高抑制效果,并且陀螺电路和信号检测无需改动。然而,该方案也有一定的局限性:首先,要求到达探测器的信号光与参考光强度必须保持一致,以达到理想的强度噪声抑制效果,这对光路的设计提出了极高的要求。其次,由于光路在全温下的损耗会发生变化,且保偏耦合器的全温分光比也存在一定的变化,尤其是对于99/1耦合器,这种变化更为明显。因此,需要对光学器件在全温下的损耗进行严格限制。

综上所述,这些光路抑制方案在常温条件下表现良好,但在全温度范围内的性能却难以保证,这构成

了技术上的局限性。鉴于此,本文针对传统及现有抑制RIN方案存在的问题,提出一种用于提高光纤陀螺精度的基于双探测器的光源RIN抑制方案。

1 基于双探测器的光源RIN抑制方案

1.1 方案构成

本文提出的基于双探测器的光源RIN抑制方案原理框图如图1所示。该方案主要分为光路测试模块和电路调制解调模块两部分。光路测试模块包括ASE光源、50/50耦合器、99/1耦合器、隔离器、集成相位调制器、光纤环和探测器。ASE光源发出的光先经过50/50耦合器进行偏振分束,其中一路光正常进入光纤环进行干涉,并最终到达探测器1;另一路光则经过99/1耦合器并通过隔离器进入探测器2。这2路信号光具有相关性并且都包含RIN。为了便于后续信号处理,设计时需确保探测器1和探测器2的输入光强保持在一定范围内。电路调制解调模块包括滤波器、模/数转换器(ADC)、现场可编程门阵列(FPGA)和数/模转换器(DAC)等。探测器输出的信号通过参数一致的前置放大和滤波,并经ADC采样后转化为数字信号。由于信号光与参考光之间存在时间延迟 τ ,在时序控制中需要先将这两个信号同步,然后进行相减操作。接下来,依次进行转速误差解调、转速误差积分以及阶梯波生成等处理步骤。尽管该方案在原理上与现有的基于光路抵消的RIN抑制方法相似,但由于引入了信号数字化处理技术,使后端信号处理过程变得更加简化和高效,从而更有利于实现实时的数字化调节。

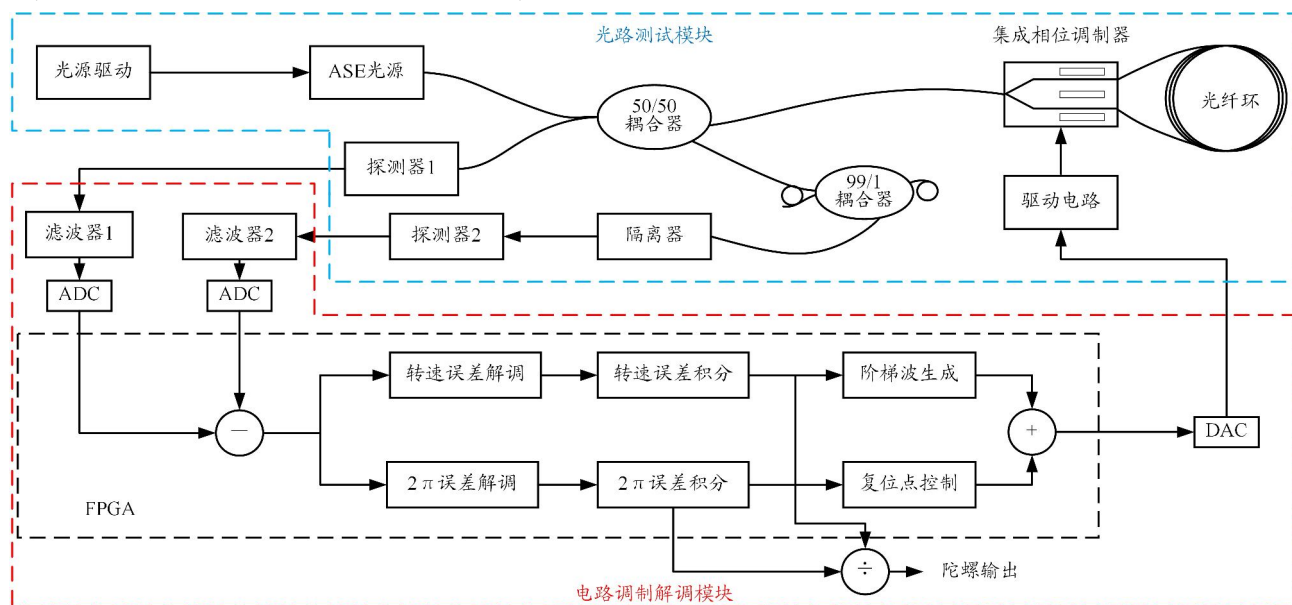


图1 基于双探测器的光源RIN抑制方案原理框图

1.2 试验过程及结果分析

本文依据图1构建了RIN抑制原理验证的光路系统。实验采用了具备双路处理能力的光纤陀螺主板,该主板的2路硬件配置一致,均使用ASE光源的峰值波段(中心波长为1530 nm),光纤长度约为1800 m,探测器的跨阻为20 k Ω 。RIN的抑制通过2个探测器输出信号的同步差分来实现。为了探究所提方案在抑制光源RIN方面的效果,本文进行了相关的实验,并得到了在3种技术状态下的测量精度,如图2所示。实验过程如下:

首先,在调制深度为 $7\pi/8$ 的情况下,使用双探测器噪声相减的方法来测试RIN抑制效果下的陀螺测量精度;

其次,将2路探测器的直流信号调整至基本相同的状态,并保证输入光功率的一致性,在调制深度为 $3\pi/4$ 的条件下测试输出精度;

最后,在调制深度约为 $3\pi/4$ 的情况下,仅对光电探测器1输入的干涉信号进行调制解调,即在关闭RIN抑制算法后测试输出。

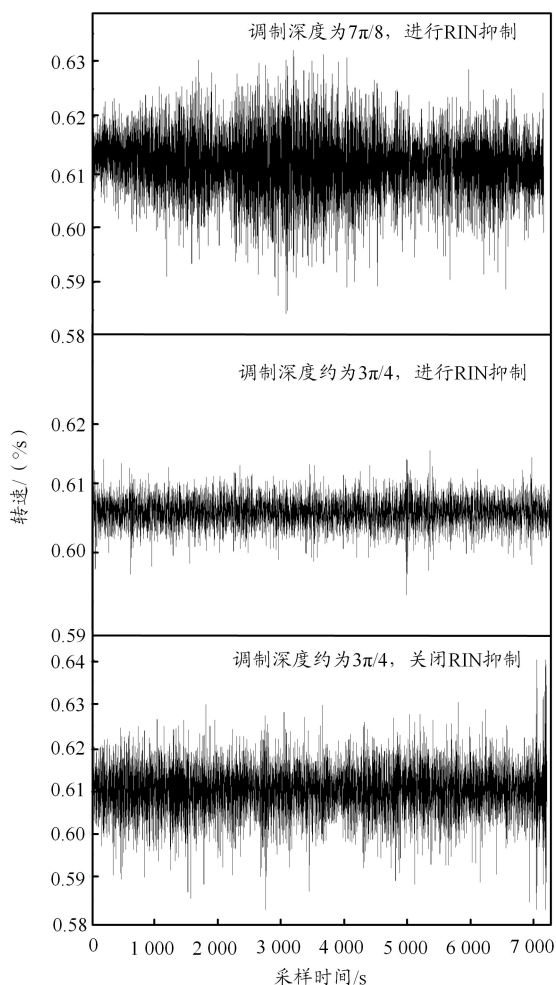


图2 3种技术状态下的测量精度

根据图2中的光纤陀螺转速计算输出的随机游走系数,得到3种技术状态下的测量精度如表1所示。可以看出,采用了基于双探测的光源RIN抑制方案后,光纤陀螺的测量精度较高,在调制深度为 $3\pi/4$ 时,测量精度达到0.003 237 7 °/h,证明该方案有效。然而,由于目前在试验系统中的条件限制,选用的各器件性能尚不完善,特别是探测器,选用了光迅和鹰谷2家公司的不同型号,可能导致对消效果受到一定影响。

表1 实验结果

技术状态	测量精度 / (°/h)	随机游走系数/ (°/ $\sqrt{h}$)
调制深度为 $7\pi/8$, 进行RIN抑制	0.003 994 7	0.001 229
调制深度约为 $3\pi/4$, 进行RIN抑制	0.003 237 7	0.000 846 7
调制深度约为 $3\pi/4$, 关闭RIN抑制	0.006 116 8	0.001 91

由于调制深度的准确性对陀螺性能有着显著影响,因此本文将调制深度设置为 $3\pi/4$,以确保2个探测器输入光功率一致。随后,对光纤陀螺进行了全温($-40\sim 70$ °C)测试,其输出标度因数如图3所示。可以看出,标度因数受温度影响引入的非线性误差较小。

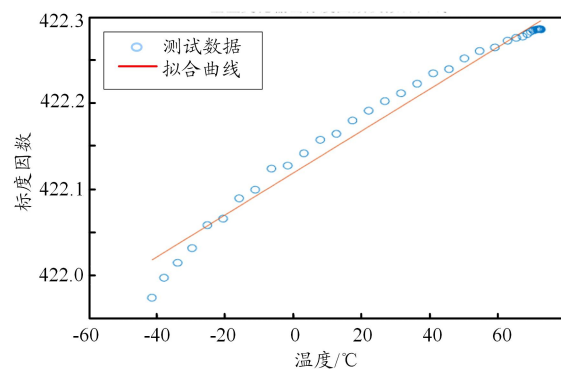


图3 全温变化下陀螺输出标度因数

相较于传统单探测器抑制RIN的方法,采用双探测器技术的光纤陀螺仪能够有效减少温度变化引起的光路损耗,避免输出信号功率的不一致,进而提高系统的温度稳定性和测量精度。

1.3 未来的方案改进思路

基于双探测器的光源RIN抑制方案目前仍存在问题,尤其是要求进入探测器1的信号光与进入探测器2的参考光在信号强度上保持一致。为此,本文提出了一种改进思路,改进后的方案原理框图如图4所示。具体措施如下:在探测器1和探测器2的输出端,

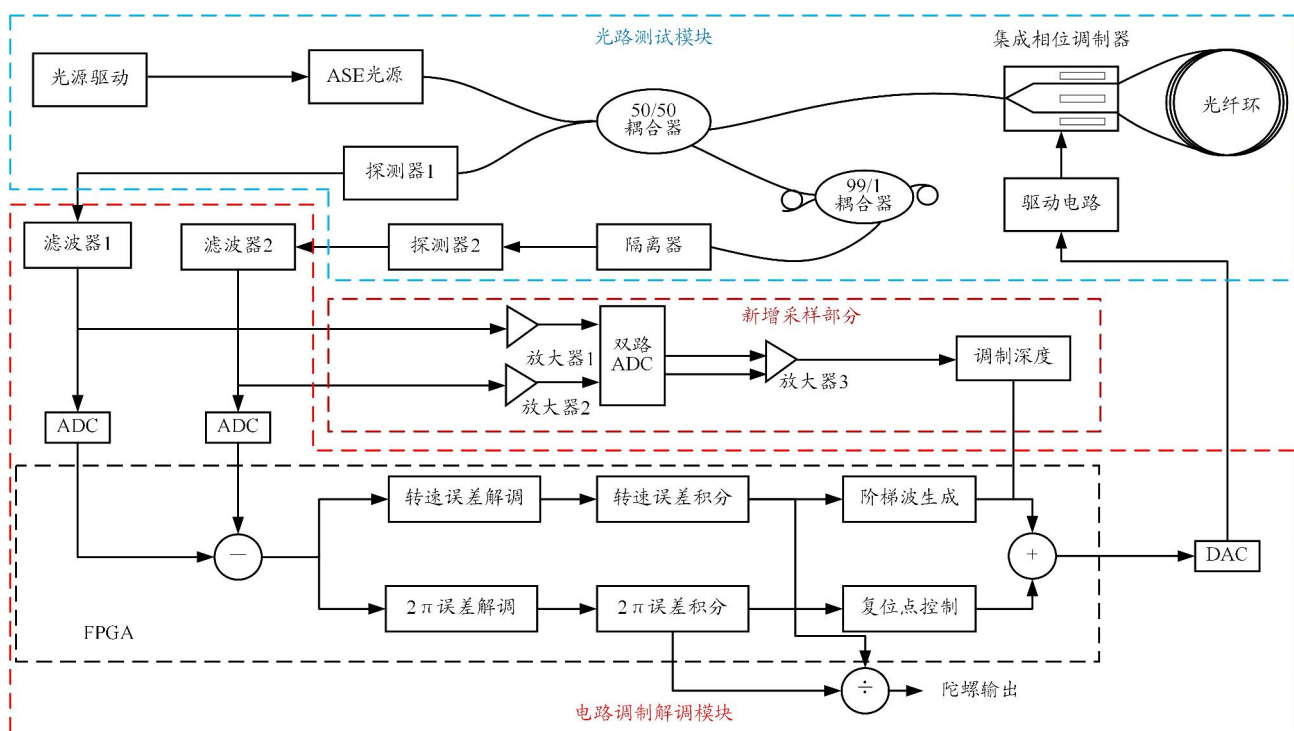


图4 改进后的方案原理框图

采用信号采样技术,利用一个双路ADC对信号进行同步采集。随后,通过精确对比信号光与参考光之间的强度差异,对光纤陀螺的调制深度进行实时在线调整,以确保信号通道的光强能够持续与参考信号强度相匹配。这一改进措施在理论上被预期为能够有效解决当前RIN抑制技术在不同温度环境下应用时所面临的难题。

2 结束语

本文提出了一种基于双探测器的光源RIN抑制方案。经过测试验证,该方案能够有效抑制光源强度噪声,显著提升光纤陀螺的测量精度。该方案不仅与高精度光纤陀螺的数字闭环处理技术相得益彰,更展现出卓越的稳定性。

高精度光纤陀螺的RIN抑制是提升其测量精度的关键环节之一,尤其在环境条件下,对RIN的变化及其有效抑制提出了更高的要求。尽管本文提出的方案在实际应用中展现出良好的效果,但仍存在一定的局限性,即要求信号光与参考光的信号强度保持一致。为此,本文进一步提出了一种改进措施,即通过实时采集信号光与参考光的强度信息,并动态调整调制深度,以实现2路信号的稳定匹配。这一创新技术理论上能够克服现有RIN抑制技术在温度变化环境下应用的难题。接下来,本文作者将致力于优化选用

器件的指标参数,完善具有信号功率自动调节功能的技术方案,并进行严格的验证测试,进一步提升高精度光纤陀螺的性能和稳定性。

参考文献:

- [1] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope[M]. London: Artech House, 1993.
- [2] HAKIMI F, MOORES J. RIN-reduced light source for ultra-low noise interferometric fibre optic gyroscopes[J]. Electronics Letters, 2013, 49(3): 205-207.
- [3] MOELLER R P, BURNS W K. 1.06 μm all-fiber gyroscope with noise subtraction[J]. Optics Letters, 1991, 16(23): 1902-1904.
- [4] KILLIAN K M. Pointing grade fiber optic gyroscope[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1994, 9(7): 6-10.
- [5] ALEKSEEV E I, BAZAROV E N. Compensation of excess noise in a fiber-optic gyroscope with a 3×3 directional coupler[J]. Technical Physics Letters, 1997, 3(8): 589-590.
- [6] HUANG S X, SARMA A V E N N. Optical signal noise reduction for fiber optic gyroscopes: EP0960319[P]. 1999-12-01.
- [7] STRANDJORD K, ADAMS W, ANG I C K D. System for suppression of relative intensity noise in a fiber optic gyroscope: DE69933942[P]. 2006-12-21.
- [8] 李子忠,李志宏,李果华. 消偏光纤陀螺偏振串扰误差分析及实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 46-54.
- [9] 王小宁,许家栋. 光纤陀螺的光路偏振噪声的理论分析[J]. 西北工业大学学报, 2000(3): 425-428.
- [10] LIU Y, LI Y, XU T J. A new de-noising arithmetic in the output signal of FOG[J]. Applied Mechanics and Materials, 2009, 875(16-19): 273-277.