

激光器频率噪声功率谱密度测试技术及在谐振式光纤陀螺中的应用

刘霜, 李汉钊, 刘路, 钱伟文, 林伊, 马慧莲*

浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310027

摘要 谐振式光纤陀螺(RFOG)是基于 Sagnac 效应产生的顺时针光路与逆时针光路的谐振频率差来测量旋转角速率的光学传感器,中心频率连续可调的窄线宽激光器是研制 RFOG 的关键元件,激光器频率噪声特性直接影响此种陀螺的性能。采用基于 3×3 耦合器的非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪系统,对不同类型的激光器及激光频率锁定前后的频率噪声功率谱密度(PSD)进行测试,得到了不同类型激光器及激光频率锁定前后的 $1/f$ 噪声和白噪声表征系数。研究结果能够为不同精度 RFOG 光源的选取及谐振频率伺服回路的优化提供重要的参考。

关键词 光纤光学; 谐振式光纤陀螺; 激光器频率噪声; 功率谱密度; 谐振频率伺服回路

中图分类号 TN249; TN29; O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306010

Laser Frequency Noise Power Spectral Density Measurement Technology and Its Application to Resonant Optical Fiber Gyroscope

Liu Shuang, Li Hanzhao, Liu Lu, Qian Weiwen, Lin Yi, Ma Huilian*

School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A resonant optical fiber gyroscope (RFOG) is an optical sensor that measures the angular rate of rotation proportional to the difference between the resonant frequency of the clockwise and counterclockwise optical paths generated by the Sagnac effect. A narrow linewidth laser with a continuously adjustable center frequency is a key element for developing RFOG, and the frequency noise characteristics of the laser directly affect the performance of this gyroscope. In this study, the frequency noise power spectral density of different types of lasers and the lasers before and after frequency locking was measured using an unbalanced Mach-Zehnder interferometer system based on a 3×3 coupler. The $1/f$ and white noise characterization coefficients of different types of lasers and the lasers before and after frequency locking were obtained. The study results can provide an important reference for selecting RFOGs with different accuracies and optimizing resonant frequency servo loops.

Key words fiber optics; resonant optical fiber gyroscope; laser frequency noise; power spectral density; resonant frequency servo loop

OCIS codes 060.2370; 060.3510; 300.6360

1 引言

谐振式光纤陀螺(RFOG)是一种基于光学 Sagnac 效应^[1]测量载体旋转角速度的惯性传感器

件。它利用多光束干涉的原理,使光在谐振腔内进行多圈传输,从而增强了旋转引起的 Sagnac 效应,因此它具有理论精度高、体积小、可靠性高等特点,在惯性系统高精度、集成小型化等方面具有广阔的

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-03-17; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(61675181, 61377101)

通信作者: * mahl@zju.edu.cn

发展前景^[2-7]。

中心频率连续可调的窄线宽激光器是研制高性能 RFOG 的关键元件,激光功率和频率特性直接影响着此陀螺的检测精度。其中关于激光功率特性制约 RFOG 理论灵敏度的理论和研究已较为成熟^[8-9]。激光器频率噪声一般指激光在产生过程中,相位的随机波动引起的频率不稳定,这会导致激光器线宽展宽,影响激光的相干性。在 RFOG 的应用中,低频处的激光器频率噪声可通过激光器锁频回路得到大幅度抑制,而大于调制频率的频率噪声则通过调制解调被折叠入低频端,影响 RFOG 的检测精度^[10]。

激光器的频率噪声通常可以用线宽^[11]或者功率谱密度(PSD)来表征。对于不同类型的激光器,由于其谐振腔结构、增益物质性质、工作模式等诸多特性均不相同,所表现出来的激光频率噪声的分布特征也会存在差异,因此无法简单地用激光器线宽来描述不同类型激光器的频率噪声差异。为了更好地对比分析不同类型激光器的频率噪声对 RFOG 检测精度的影响大小,需要对激光器频率噪声 PSD 曲线进行实际测试。本文在对激光器的频率噪声特性进行研究的基础上,搭建了一套基于 3×3 非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)的激光器频率噪声测试系统,测试出实验室内不同类型激光器和激光器中心频率锁定前后的频率噪声 PSD 曲线,并对测试结果及其在 RFOG 系统中的应用进行了分析与介绍。

2 激光器频率噪声功率谱密度测试技术

2.1 激光器频率噪声 PSD 模型

单频激光器频率噪声 PSD 曲线 $S_v(f)$ (单位为 Hz^2/Hz)可以用图 1 所示的数学模型来表示,小于转折频率 f_c 处用 K/f 表示 $1/f$ 噪声, K 的单位为 Hz^3/Hz ,大于转折频率 f_c 处则用常数 S_0 来表示白噪声大小,单位为 Hz^2/Hz 。转折频率 f_c 的位置与两种噪声的相对大小有关,取决于具体的激光器类型和结构。为了获得较高的检测灵敏度,在基于相位调制方式的 RFOG 中,信号调制频率(用 f_1 表示)常常会大于 f_c ,因此激光器频率噪声对 RFOG 检测精度的影响主要来自于白噪声分量。

这里需要注意的是,图 1 中的零点实际代表激光器输出的中心频率。由图 1 可知,单频激光器的单边频率噪声谱 $S_v(f)$ ^[12]可表示为

$$S_v(f) = S_0 + K/f, f \geq 0. \quad (1)$$

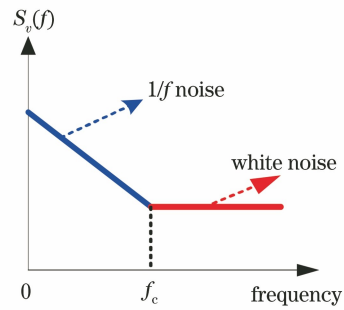


图 1 激光器频率噪声 PSD 模型

Fig. 1 Laser frequency noise PSD model

当激光器的频率噪声中仅存在白噪声时,输出谱线的线型为洛伦兹线型,线宽 Δf_L 与功率密度谱中白噪声大小 S_0 的关系^[12]为

$$\Delta f_L = \pi \cdot S_0 = \pi \cdot \Delta v_{\text{RMS}}^2, \quad (2)$$

式中: Δv_{RMS} 为功率密度谱中白噪声的有效值幅度,单位为 $\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 。而当激光器中仅存在 $1/f$ 噪声时,输出谱线为高斯线型,则线宽 Δf_G ^[12]可以表示为

$$\Delta f_G = 2\sqrt{\ln 2 \cdot 2K[1 + \ln(T_{\text{obs}}\sqrt{2K})]}, \quad (3)$$

$$T_{\text{obs}}\sqrt{2K} \gg 1,$$

式中: T_{obs} 为观测时间。

实际的激光器一般同时存在白噪声和 $1/f$ 噪声,所以输出谱线是白噪声和 $1/f$ 噪声综合作用的结果。

2.2 基于 3×3 耦合器的 MZI

课题组早期采用基于两个 2×2 耦合器的 MZI 正交锁定方案实现激光器频率噪声的测试^[13],该方法需要主动反馈控制环路,使干涉仪处于正交工作状态,测试结果易受到检测装置锁定精度的干扰。为提高检测范围和检测灵敏度,简化反馈控制环路,将其中一个 2×2 耦合器改成了 3×3 耦合器,由 3×3 耦合器和前面的 1×2 耦合器构成一个非对称 MZI,系统框图如图 2 所示。此方案的基本原理是利用一段延时光纤将被测激光器的频率波动转换为相位波动。基于 3×3 耦合器的连接方式具有不需要稳定工作点、抗干扰等特点,从而实现激光相位的高灵敏解调。由于 3×3 耦合器的附加特性,经过耦合器的三路光信号之间有恒定的 120° 相位差,该特性为后续相干解调的基础。具体的测试原理如图 2 所示,整个系统主要由一个 3 dB 的 1×2 光纤耦合器、一个 3×3 光纤耦合器、一段延时光纤所构成,均采用单模器件和单模光纤,并利用延时光纤实现激光器输出光的频率波动到相位波动的转换。

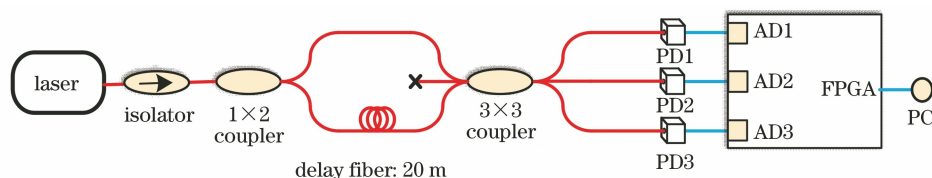


图 2 基于 3×3 非平衡 MZI 的测试原理

Fig. 2 Testing principle based on 3×3 unbalanced MZI

该系统在工作前要对三路待检测光的增益和偏置进行补偿,使其尽可能保持一致。用一个功率稳定的连续光源作为测试光源,在其频率调谐端加一个锯齿波电压信号,对激光器输出激光的中心频率进行线性扫频,使得 MZI 的两个干涉臂间的激光相位差也发生线性变化。当 3×3 耦合器具有理想的分光比时,通过示波器观察光电探测器(PD)输出的三路信号,应该为幅度大小一致、相位差依次相差 120°的正弦信号。因此,通过对实际系统进行扫频测试,可以得到三路探测信号的幅度和偏置差异,并在后续的解调过程中进行补偿。

测试时,激光器的频率调谐端不加扫频信号,输

入光信号经过 1×2 光纤耦合器后被分成相同功率的两束光,其中一路光经过 20 m 的延时光纤,并在 3×3 光纤耦合器处进行干涉。干涉后的光信号通过 3 个 PD 分别转换为电信号,并通过模/数(AD)转换器被实时采集到可编程逻辑门阵列(FPGA)中。在 FPGA 中对采集到的信号进行解调,原理如图 3 所示,即可得到由延时光纤所引入的相位差 $\Delta\varphi(t)$ 。根据 $\Delta\varphi(t) = 2\pi v(t)\tau_0$, τ_0 是延时光纤所对应的延迟时间,可以得到激光器输出光场频率的随机波动 $v(t)$ 。对解调出的频率随机波动进行傅里叶变换和自相关运算,即可得到激光器频率噪声 PSD 曲线。

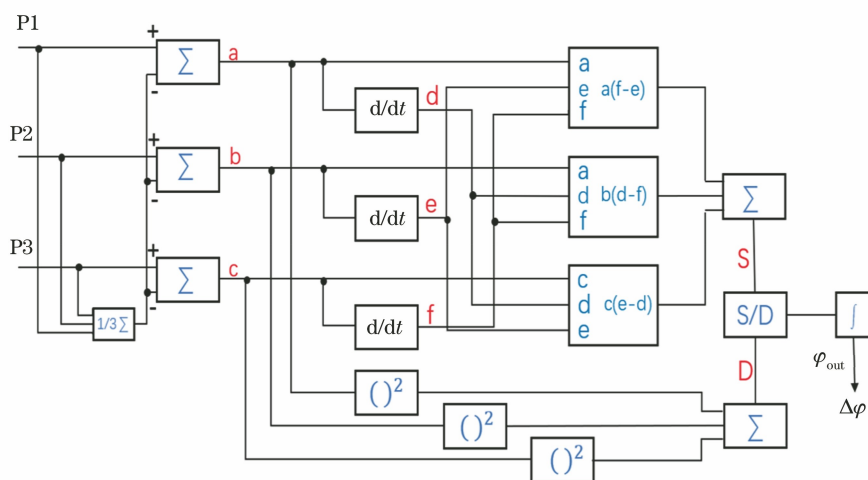


图 3 相位解调原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of phase demodulation

2.3 激光器的频率噪声 PSD 测试结果

利用所搭建的测试系统对实验室内的三种不同类型的激光器的频率噪声进行测试,并对测试结果进行分析,从而验证了所提测试方案的正确性。

1) 标称线宽为 3.1 kHz 的半导体激光器

图 4 是线宽为 3.1 kHz 的半导体激光器频率噪声 PSD 的测试结果。由于半导体激光器谱线展宽主要来自白噪声分量,由图 4 的测试结果可知,其平坦部分的白噪声大小为 28.77 Hz/Hz^{1/2},代入(2)式计算,可得白噪声导致的线宽展宽为 2.6 kHz,该测

试结果与厂家线宽的标称值较为吻合。

2) 标称线宽为 42 kHz 的半导体激光器

测试结果如图 5 所示。平坦部分白噪声分量约为 76.23 Hz/Hz^{1/2},对应的线宽值为 18.3 kHz。通常半导体激光器的线宽主要受限于白噪声的大小,但由于该激光器的频率噪声较大,且 1/f 噪声与白噪声的转折频率较高,所以 1/f 噪声对线宽的影响也较为明显。因此对于该激光器,按照白噪声为主导的频谱特性进行计算得到的线宽值与频谱仪测试得到的线宽值略有差异。

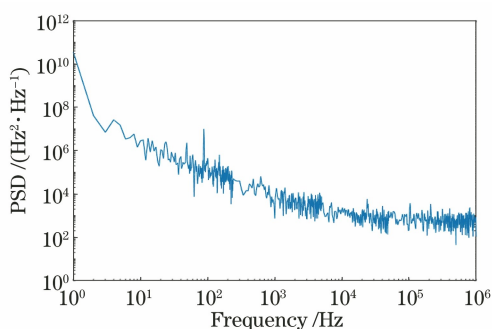


图 4 线宽为 3.1 kHz 的半导体激光器的频率噪声 PSD 曲线
Fig. 4 PSD curve of frequency noise of semiconductor laser with linewidth of 3.1 kHz

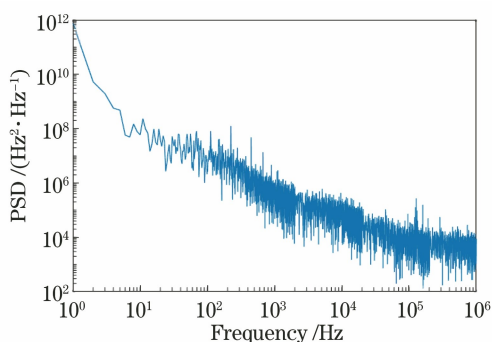


图 5 线宽为 42 kHz 的半导体激光器的频率噪声 PSD 曲线
Fig. 5 PSD curve of frequency noise of semiconductor laser with linewidth of 42 kHz

3) 线宽为 0.1 kHz 的 NKT 光纤激光器

测试结果如图 6 所示, 实线为实测数据, 与厂商所给出的测试数据(虚线)进行对比, 两者基本吻合。表明建立的基于 3×3 耦合器的非平衡 MZI 激光器频率噪声测试系统具有较高的检测精度。

由于 NKT 激光器为光纤激光器, 其频率噪声以 $1/f$ 噪声为主导, 因此从测试结果上看, 激光器频率噪声 PSD 在 $0 \sim 10$ MHz 测试带宽内呈现随噪

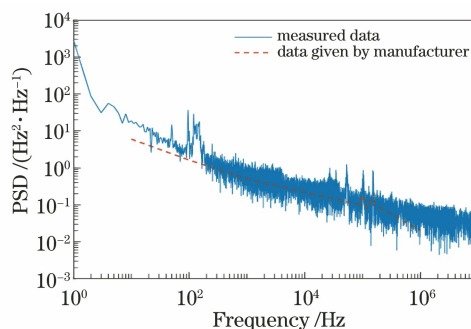


图 6 NKT 激光器频率噪声 PSD 曲线
Fig. 6 PSD curve of frequency noise of NKT laser

声频率升高而衰减的特性, 无明显的白噪声区域。测试结果中, 50 Hz 和 100 Hz 等特定频点处的毛刺是系统环境中电信号的工频干扰导致的。

3 激光器频率噪声功率谱密度测试技术在 RFOG 中的应用

RFOG 是一种通过检测谐振腔谐振频率变化来得到角速度大小的光学惯性传感器。对于传统方案下的 RFOG, 通常需要将窄线宽激光器的中心频率跟踪锁定在光纤环形谐振腔(FRR)某一方向的谐振频率上, 再实时检测与 FRR 另一方向上的谐振频率差, 从而换算得到角速度大小^[14]。因此, 谐振频率伺服回路是 RFOG 系统中的重要组成部分, 激光器本身的频率噪声会对该回路的稳定工作产生影响。同理, 当谐振频率伺服回路稳定工作时, 在伺服回路带宽内的频率噪声会得到一定程度的抑制, 进而实现对激光器线宽的压窄。

图 7 为激光器频率锁定于 FRR 谐振频率前后的频率噪声在线测试系统框图。激光器发出的光依次经过光纤隔离器(ISO)、相位调制器(PM)和 1×2 光纤耦合器后被分为两路, 再经环形器后分别进入 FRR 形成顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向绕腔

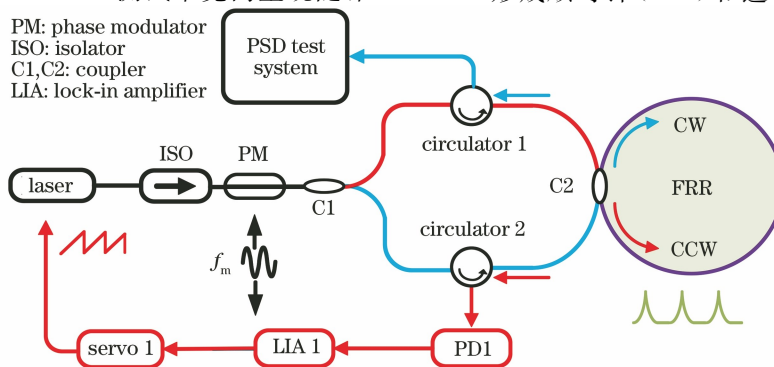


图 7 锁定前后激光器频率噪声在线测试系统

Fig. 7 On-line measurement system of laser frequency noise before and after locking

传输的光波,光电探测器 PD1 和 PD2 分别用于探测 CCW 和 CW 方向的光波,其中 PD1 输出的信号经锁相放大器 LIA1 解调后作为伺服控制器(servo)的误差信号输入,伺服控制器的输出端反馈到激光器频率调谐端,用于调整激光器中心频率,使其跟踪锁定 FRR 顺时针方向光波的谐振频率上。FRR 顺时针方向的光经环形器 1 耦合出后,输入到激光器频率噪声 PSD 测试系统。以线宽为 3.1 kHz 的半导体激光器作为该系统的光源,对比测试了锁定前后激光器频率噪声 PSD 曲线,如图 8 所示。

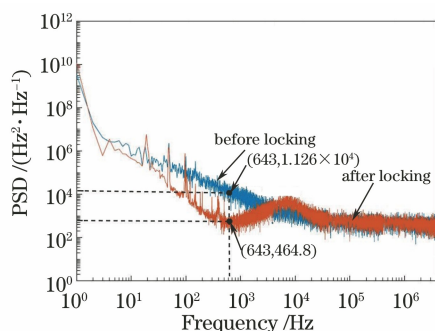


图 8 线宽为 3.1 kHz 的半导体激光器锁定前后噪声 PSD 测试结果

Fig. 8 Noise PSD test results of a 3.1-kHz linewidth semiconductor laser before and after locking

从测试的结果可以看出,经过锁定后,激光器的低频噪声有了明显的降低,PSD 约降低了 2 个数量级。对于高频部分的噪声,受限于伺服回路有限带宽和系统的调制器频率,没有明显的抑制效果,测试结果与理论分析基本一致。对比测试证明,RFOG 的谐振频率伺服回路能够实现对激光器频率噪声的抑制,且基于 3×3 非平衡 MZI 的 PSD 测试系统能够较为准确地反映激光器锁定前后的频率噪声变化,为进一步提高伺服回路的锁定精度提供参考。

同时,可以依据激光器频率噪声 PSD 曲线来确定激光器频率噪声在不同频率处的分布情况,从而为 RFOG 调制频率的选择提供参考,以减小交调效应所致激光器频率噪声对 RFOG 检测精度的影响^[15]。

4 结 论

激光器的频率噪声是制约 RFOG 检测精度的一项重要因素。搭建了一套基于 3×3 非平衡 MZI 的激光器频率噪声测试系统,测试得到了不同类型激光器及激光器中心频率锁定前后的频率噪声 PSD 曲线。频率噪声 PSD 曲线的测试结果可以为

不同精度 RFOG 光源的选取及谐振频率伺服回路的优化提供参考,从而对陀螺检测精度的提高具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Ezekiel S, Balsamo S R. Passive ring resonator laser gyroscope[J]. Applied Physics Letters, 1977, 30(9): 478-480.
- [2] Ma H L, Zhang J J, Wang L L, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3546-3554.
- [3] Lei M, Yu H Y, Fang Y, et al. Out-of-lock frequency-tracking control of resonant fiber-optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0106002.
雷明, 于怀勇, 方圆, 等. 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0106002.
- [4] Li H Z, Lin Y, Liu L, et al. Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 18103-18111.
- [5] Sanders G A, Taranta A A, Narayanan C, et al. Hollow-core resonator fiber optic gyroscope using nodeless anti-resonant fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(1): 46-49.
- [6] Zhang Y G, Feng L S, Li H, et al. Resonant fiber optic gyroscope with three-frequency differential detection by sideband locking[J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8423-8435.
- [7] Qian W W, Wu C B, Lin Y, et al. Resonant micro-optical gyroscope based on optical switch to suppress backscattering noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1010003.
钱伟文, 吴传斌, 林伊, 等. 基于光开关抑制背向散射噪声的谐振式微光学陀螺[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1010003.
- [8] Jiang Z G, Hu Z F. Analysis on sensitivity of resonant fiber optic gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0706001.
蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0706001.
- [9] Li H Z, Qian W W, Liu L, et al. Analysis and optimization of angle random walk of resonant fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0901002.
李汉钊, 钱伟文, 刘路, 等. 谐振式光纤陀螺角度随机游走的分析与优化[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0901002.

- [10] Ma H L, Chang X, Mao H, et al. Laser frequency noise limited sensitivity in a resonator optic gyroscope [C] // Optoelectronics and Communications Conference (OECC), July 5-9, 2010, Sapporo, Japan. New York: IEEE Press, 2010.
- [11] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. Electronics Letters, 1980, 16(16): 630-631.
- [12] Mercer L B. $1/f$ frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(4): 485-493.
- [13] Zhang G H, Ma H L, Jin Z H. Frequency noise characteristics of a narrow-linewidth DFB semiconductor laser in resonator fiber optic gyro[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 84218P.
- [14] Ma H L, Lu X, Yao L Z, et al. Full investigation of the resonant frequency servo loop for resonator fiber-optic gyro[J]. Applied Optics, 2012, 51(21): 5178-5185.
- [15] Ma H L, Yan Y C, Wang L L, et al. Laser frequency noise induced error in resonant fiber optic gyro due to an intermodulation effect [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25474-25486.