

# 光学学报

## 超长光纤干涉仪甚低频段 $1/f$ 噪声影响研究

田帅飞<sup>1,3</sup>, 杨军<sup>2,3,4\*</sup>, 苑勇贵<sup>1,3</sup>, 张毅博<sup>1,3</sup>, 祝海波<sup>1,3</sup>, 安然<sup>1,3</sup>, 喻张俊<sup>2,4</sup>, 王云才<sup>2,4</sup>, 秦玉文<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工程大学物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup>广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006;

<sup>3</sup>纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>4</sup>广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006

**摘要** mHz~kHz 甚低频  $1/f$  噪声是限制超长光纤干涉仪测量精度的主要因素, 厘清干涉仪  $1/f$  噪声的产生来源和分布规律是抑制测量噪声、提升观测精度的重要前提。为此, 搭建了超百米臂长、全对称、差分探测的保偏光纤马赫-曾德尔干涉仪, 通过开展基于不同类型窄线宽激光器和不同长度敏感光纤的干涉仪噪声测量实验, 分别确定了光源频率噪声和光纤热噪声引起的干涉仪甚低频相位噪声谱分布特性; 在此基础上, 开展了超长光纤干涉仪  $1/f$  相位噪声谱分布规律研究。实验结果表明: 260 m 光纤马赫-曾德尔干涉仪的相位噪声幅值从  $\mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$  @ 1 kHz 量级快速上升到  $10 \text{ mrad}/\text{Hz}^{1/2}$  @ 1 mHz 量级, 它由光源频率漂移和光纤热噪声共同决定。从而证实了在 mHz~kHz 频段内, 超长光纤干涉仪相位噪声服从  $1/f^{1+\beta}$  的谱分布规律。

**关键词** 光纤光学; 光纤干涉仪; mHz~kHz 甚低频段;  $1/f$  噪声; 光源噪声; 光纤热噪声

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306007

## Research on the Influence of Ultralow Frequency Band $1/f$ Noise in Ultralong Fiber Interferometers

Tian Shuaifei<sup>1,3</sup>, Yang Jun<sup>2,3,4\*</sup>, Yuan Yonggui<sup>1,3</sup>, Zhang Yibo<sup>1,3</sup>, Zhu Haibo<sup>1,3</sup>,  
An Ran<sup>1,3</sup>, Yu Zhangjun<sup>2,4</sup>, Wang Yuncai<sup>2,4</sup>, Qin Yuwen<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>2</sup> School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

<sup>3</sup> Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>4</sup> Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** The measurement accuracy of ultralong fiber interferometers is mainly limited by the  $1/f$  noise in the ultralow frequency band from mHz to kHz. The sources and distribution principle of  $1/f$  noise need to be thoroughly studied to suppress measurement noise and improve measurement resolution. For this reason, a balanced polarization-maintaining fiber Mach-Zehnder (M-Z) interferometer was built for differential detection, in which the arm length is over 100 m. By testing optical fibers with different lengths as well as different types of narrow line-width laser utilizing this interferometer, we obtained the distribution characteristics of ultralow-frequency phase noises respectively induced by laser frequency drift and fiber thermal noise on the spectra. According to the experimental results above, the distribution principle of  $1/f$  noise in the ultralong fiber interferometer was also explained. The results show that the amplitude of phase noise increases rapidly from the order of  $1 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$  @ 1 kHz to the order of  $10 \text{ mrad}/\text{Hz}^{1/2}$  @ 1 mHz within a 260 m arm-length M-Z interferometer, which is due to the

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-05-08; 录用日期: 2021-05-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405502)、国家自然科学基金(61925501, 61775044, 61975040)、广东省“珠江人才计划”(2019ZT08X340, 2019CX01X010)

通信作者: \*yangj@gdut.edu.cn

laser frequency drift and fiber thermal noise. It can be concluded that for the frequency band from mHz to kHz, the phase noise of the ultralong fiber interferometer satisfies  $1/f^{1+\beta}$  spectral distribution.

**Key words** fiber optics; fiber interferometer; mHz-kHz ultralow frequency band;  $1/f$  noise; light source noise; fiber thermal noise

**OCIS codes** 060.2370; 260.3160; 060.2310

## 1 引言

干涉型光纤传感器是最灵敏的检测技术之一<sup>[1]</sup>,可广泛用于位移<sup>[2]</sup>、振动<sup>[3]</sup>、应变<sup>[4-5]</sup>、旋转<sup>[6]</sup>、电磁场<sup>[7-8]</sup>等各种物理量的高精度检测中。利用光纤小巧、柔韧的特点,高效便捷地通过增加或等效增加敏感光纤长度来提升测量灵敏度,成为光纤传感器的特色之一。例如,基于几十米、上百米敏感光纤的迈克耳孙干涉仪可完成高精度应变<sup>[9-10]</sup>、声压<sup>[11]</sup>的测量以及微弱地震的观测<sup>[12-13]</sup>,公里级及以上的超长臂光纤 Sagnac 干涉仪可测量极其微弱的旋转量<sup>[14]</sup>。当测量频段向 mHz~kHz 延伸时, $1/f$  噪声成为了光纤测量精度提升的主要瓶颈<sup>[15-17]</sup>。因此,厘清  $1/f$  噪声的产生来源和分布规律,对于高精度光纤测量技术与传感器的研发而言至关重要。

在高精度光纤传感器中, $1/f$  噪声的形成机制和表现特征一直是研究者的关注点。与电子器件类似,光纤传感器的自噪声也具有  $1/f$  噪声的谱分布特性。光纤热噪声被认为是产生  $1/f$  噪声的主要来源之一,早期认为它由光纤介质热力学扰动而导致的热传导相位噪声起伏所引起。1992 年 Wanser<sup>[18]</sup>首先在理论上描述了光纤热传导噪声的行为,2012 年 Bartolo 等<sup>[15]</sup>测量了 30 Hz~100 kHz 范围内光纤热传导噪声的分布。随着测量频段向 1 kHz 以下延伸,发现光纤热噪声呈  $1/f$  谱分布特性。2010 年 Duan<sup>[19]</sup>提出热机械耗散也是产生光纤热噪声的重要机制,并由 Dong 等<sup>[20-21]</sup>在实验中初步验证,在高于 0.2 Hz 的观测频段,光纤热噪声是超长光纤干涉仪  $1/f$  噪声的主要来源。但是,0.2 Hz 以下频段的光纤热噪声对  $1/f$  噪声贡献程度和分布特性还不清楚。

不仅如此,研究表明光源也是干涉仪  $1/f$  噪声的重要来源。2005 年 Tröbs 等<sup>[22]</sup>发现在太空引力波观测用超长空间干涉仪中,0.1~100 mHz 频段的光源频率漂移引起的光源频率-相位噪声是产生  $1/f$  噪声的主要原因,之后又被 Sheard 等<sup>[23]</sup>和 Eichholz 等<sup>[24]</sup>再次确认。在光纤干涉仪中,2005 年 Meng 等<sup>[25]</sup>在非平衡光纤干涉仪中发现 10 Hz~100 kHz 频段的光源频率-相位噪声是主要影响;

2015 年 Xu 等<sup>[26]</sup>测量了 0.3 Hz~1 MHz 频段内光源频率-相位噪声,发现低于 100 kHz 的频段有逐渐明显的  $1/f$  谱分布;2020 年 Liokumovich 等<sup>[27]</sup>在 200 Hz~10 kHz 频段内获得的光源频率-相位噪声也符合  $1/f$  谱分布特性。

综上所述,超长干涉仪  $1/f$  噪声研究主要集中在光纤热噪声和光源频率噪声方面,但当二者同时存在时,它们对  $1/f$  噪声谱的综合影响还不清楚,并且之前研究关注的测量频段也基本集中在 0.1 Hz 之上。为此,本文对超长光纤干涉仪甚低频  $1/f$  噪声分布规律展开研究,同时关注光源和光纤的本征光学噪声对干涉仪  $1/f$  噪声分布的贡献程度,并将观测频段延伸到 mHz 量级,目的是能够获得超长光纤干涉仪 mHz~kHz 频段  $1/f$  相位噪声的分布规律,为高精度光纤干涉仪和高性能光纤传感器的检测精度提升奠定基础。

## 2 基本原理

超长光纤干涉仪的基本结构如图 1 所示,它由窄线宽光源、超长光纤干涉光路以及光电探测与解调单元三部分组成。光源  $I_0$  经过分束器分为  $I_1$ 、 $I_2$  两束传输光并分别注入到马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪中,超长敏感光纤感受待测物理量后,干涉仪两臂的光程差(相位差)发生变化,光电探测器接收干涉信号后进行光电转换为电流,并由信号解调单元将干涉相位信息无失真地恢复为待测量。因此,光纤 M-Z 干涉仪输出的电流  $i$  表示为

$$i = i_0 + i_0 \cos(\varphi_{L1} + \varphi_{L2} + \varphi_{d1} - \varphi_{d2}), \quad (1)$$

式中: $i_0$  为探测器的平均光电流; $\varphi_{L1}$ 、 $\varphi_{L2}$  分别为干涉两臂对待测量的差模响应; $\varphi_{d1}$ 、 $\varphi_{d2}$  分别为干涉两臂对环境干扰的共模响应。

对于图 1 所示的干涉仪,其系统相位噪声功率谱密度  $S_\varphi$  (PSD, 单位:  $\text{rad}^2/\text{Hz}$ ) 由三部分组成: 1) 光源噪声,包括频率噪声  $S_f$  和相对强度噪声 (RIN) $S_{\text{RIN}}$ ; 2) 干涉仪光路噪声,包括光纤热噪声  $S_T$ 、偏振相关噪声  $S_P$  等; 3) 探测和解调采集噪声,包括散粒噪声  $S_{\text{shot}}$ 、电路热噪声  $S_C$ 、采集量化噪声  $S_Q$  等。即

$$S_\varphi = S_f + S_{\text{RIN}} + S_T + S_P + S_{\text{shot}} + S_C + S_Q. \quad (2)$$

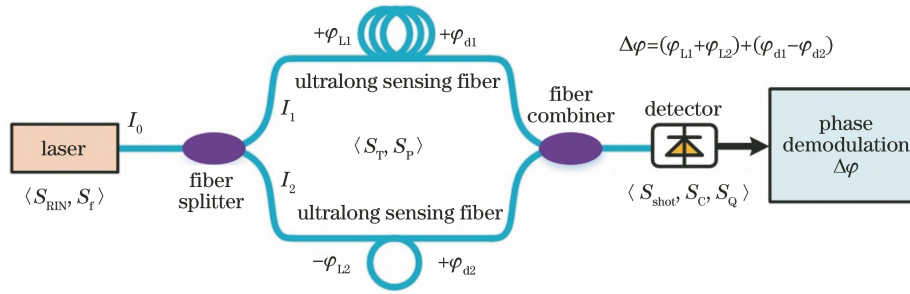


图 1 超长光纤 M-Z 干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ultra-long fiber M-Z interferometer

为减少系统噪声影响因素,在搭建干涉仪时采取了如下措施:1)采用透射式 M-Z 干涉仪以消除超长敏感光纤的背向瑞利散射噪声;2)干涉仪采用差分探测方式以抑制光源 RIN;3)采用全保偏光路设计以消除偏振相关噪声;4)采用低噪声光电探测和干涉相位解调电路,确保其影响低于干涉仪光路噪声。在此情况下,干涉仪相位噪声功率谱密度  $S_\varphi$  将简化为由光源频率噪声  $S_f$ 、光纤热噪声  $S_T$  两部分组成,即

$$S_\varphi = S_f + S_T. \quad (3)$$

### 3 实验及测试结果

为确定光源噪声和光纤热噪声对干涉仪  $1/f$  噪声的贡献和分布特性,搭建如图 2 所示的干涉仪相位噪声测量装置:光源采用 1550 nm 窄线宽激光器,干涉仪两臂的敏感光纤采用保偏光纤

(PM1310A-80/135),干涉仪两路输出光信号经差分探测放大电路转化为电信号并被解调采集电路采集,最后利用相位生成载波 (PGC) 解调法对干涉相位实现高精度解调。其中,差分探测放大电路采用 InGaAsPIN 探测器 (PDS153-OT-0123,世维通,北京);相位解调电路采用自主研发的信号处理板卡和数据采集板卡,信号处理板卡采用 Xilinx 高性能 ZYNQ 系列现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 作为核心处理器,数据采集板卡板载 16 bit 模数转换器 (ADC) 和 16 bit 数模转换器 (DAC)。光电探测和相位解调电路中散粒噪声、电路热噪声及采集量化噪声引起的相位噪声谱密度分别为  $-148.7$  dB、 $-162.9$  dB、 $-137.6$  dB<sup>[28-30]</sup>;PGC 调制载波信号频率为 20 kHz,调制深度  $C$  值为 2.63,并通过椭圆拟合算法对  $C$  值进行校正<sup>[31]</sup>,以避免  $C$  值扰动对解调结果产生影响。

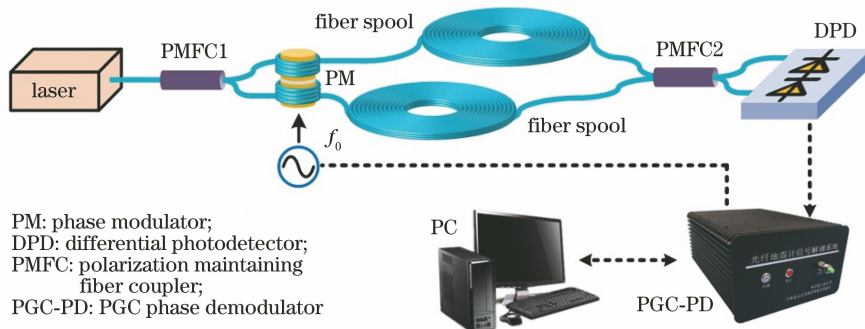


图 2 光纤干涉仪噪声测试实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the noise measurement of optical fiber interferometer

为最大限度地抑制环境中振动及温漂的影响,将干涉仪两臂敏感光纤以较小张力 ( $<0.1$  N) 共同缠绕在铝柱上,并置于密封舱中,整个实验装置放置于隔振光学气浮平台上,同时进行振动和声波的屏蔽;另外,实验装置也需要进行热屏蔽,确保环境温度漂移小于  $0.1$  °C/h。

#### 3.1 光源频率噪声影响

光源频率噪声表现为输出线宽和中心频率漂移,它通过干涉仪转化的相位噪声谱密度 (单位:  $\text{rad}^2/\text{Hz}$ ) 可表示为<sup>[32-33]</sup>

$$S_f = \frac{|F[\Delta\nu(t)]|^2}{B_s} \cdot \left(\frac{2\pi n \Delta l}{c}\right)^2, \quad (4)$$

式中： $B_s$  为光源带宽； $\Delta\nu(t)$  为光源频率波动； $n$  为光纤折射率； $c$  为真空光速； $\Delta l$  为臂长差。

由(4)式可知，若干涉仪测试噪声为光源频率噪声引起的相位噪声，则其噪声谱幅度会随  $\Delta l^2$  的增加而同比例增加，以此为依据可以对光源频率噪声影响下的  $1/f$  相位噪声功率谱分布进行测试。

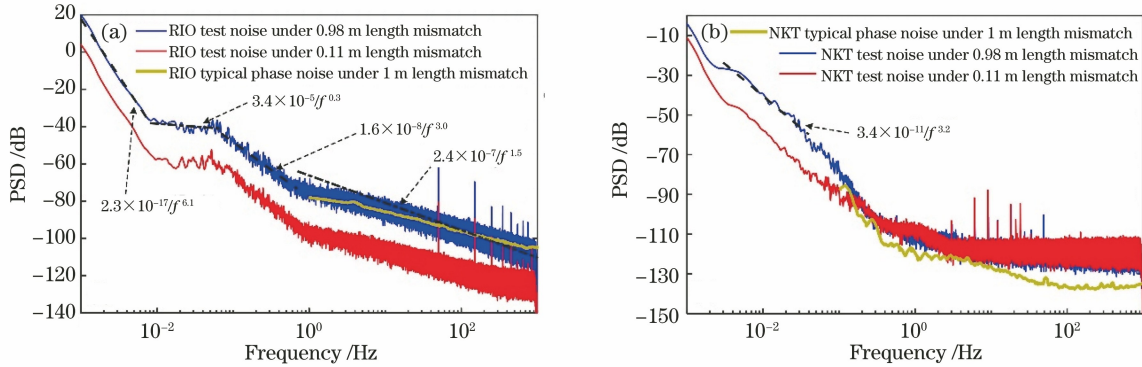


图 3 不同臂长差下的光源噪声谱。(a) 半导体激光器测试结果；(b) 光纤激光器测试结果

Fig. 3 Noise spectra of sources under different length differences. (a) Test results of semiconductor laser; (b) test results of fiber laser

图 3(a) 为半导体激光器测试结果，其中 0.98 m 臂长差的噪声水平与该光源 1 Hz 以上的典型相位噪声基本吻合；在 0.008 Hz~1 kHz 内，两不同臂长差引起的幅值差为 18.8 dB，与理论值(18.9 dB)基本一致；而在小于 0.008 Hz 频段两者噪声的差值为 16.70 dB，与理论值偏差较大，包含了隔离环境温度漂移后的残余影响。由此认为 0.98 m 臂长差

利用图 2 中装置，采用臂长差分别为 0.11 m 与 0.98 m 的保偏光纤 M-Z 干涉仪，分别对半导体激光器(RIO, 线宽 5 kHz)与光纤激光器(NKT-X15, 线宽 < 100 Hz)进行了测试，干涉仪臂长控制在 1.2 m 以抑制光路噪声，测试结果如图 3 所示。其中 0 dB=1 rad<sup>2</sup>/Hz。

下 0.008 Hz~1 kHz 内的测试噪声主要为光源频率噪声引起的相位噪声，其噪声谱在不同频段内具有不同的分布规律，通过对 0.98 m 臂长差下 0.008 Hz~1 kHz 内的测试噪声谱按  $1/f$  噪声进行分段拟合，得到半导体激光器频率噪声引起的相位噪声功率谱分布为

$$S_{f-RIO} = \begin{cases} (\Delta l/0.98)^2 \times 3.4 \times 10^{-5} / f^{0.3}, & 0.008 \text{ Hz} < f \leq 0.07 \text{ Hz} \\ (\Delta l/0.98)^2 \times 1.6 \times 10^{-8} / f^{3.0}, & 0.07 \text{ Hz} < f \leq 0.7 \text{ Hz} \\ (\Delta l/0.98)^2 \times 2.4 \times 10^{-7} / f^{1.5}, & 0.7 \text{ Hz} < f \leq 1 \text{ kHz} \end{cases} \quad (5)$$

图 3(b) 为光纤激光器测试结果，两种臂长差下的测试噪声在小于 0.1 Hz 内表现出差异，体现出光源频率噪声影响，其中在 0.0035~0.04 Hz 内，两不同臂长差引起的幅值差为 18.7 dB，与理论值基本一致；而小于 0.0035 Hz 频段两者噪声在受到光源频率噪声影响的同时叠加了环境影响，导致其差值与理论值误差较大。对于大于 0.1 Hz 频段，由于受到残余 RIN 影响而使两种臂长差下测量噪声基本一致。由此认为 0.98 m 臂长差下 0.0035~0.04 Hz 内的测试噪声主要为光源频率噪声引起的相位噪声，对其进行  $1/f$  噪声拟合，得到光纤激光器频率噪声引起的相位噪声功率谱分布为

$$S_{f-NKT} = (\Delta l/0.98)^2 \times 3.4 \times 10^{-11} / f^{3.2},$$

$$0.0035 \text{ Hz} \leq f \leq 0.04 \text{ Hz}. \quad (6)$$

### 3.2 光纤热噪声影响

光纤本征热噪声与敏感光纤长度呈正相关，是超长光纤干涉仪的主要噪声源，其功率谱密度(单位: rad<sup>2</sup>/Hz)计算公式为

$$S_T = \frac{2\pi k_B T L}{\lambda^2} \left[ \frac{T}{\kappa} \left( \frac{dn}{dT} + n\alpha_L \right)^2 F(f) + \frac{(2n)^2 \phi_0}{3E_0 A} \cdot \frac{1}{f} \right], \quad (7)$$

式中： $k_B$  为玻尔兹曼常数； $L$  为敏感光纤长度； $\lambda$  为波长； $T$  为温度； $dn/dT$  为热光系数； $\alpha_L$  为热膨胀系数； $\kappa$  为热导率； $E_0$  为杨氏模量； $A$  为光纤横截面积； $\phi_0$  为耗散角； $F(f)$  为频率的无单位函数。

由(7)式可知,若干涉仪测试噪声体现为光纤热噪声,则其噪声谱幅度会随  $L$  的增加而同比比例增加,以此为依据可对热噪声影响下的相位噪声功率谱分布进行判断。

利用图 2 中装置对不同臂长的保偏光纤 M-Z 干涉仪的相位噪声进行测试,其中干涉仪臂长差均  $\leq 5$  cm,(7)式中的  $L$  为臂长 2 倍;测试环境温度为室温(20 °C),温度漂移小于 0.1 °C/h。图 4(a)为不同臂长下光纤干涉仪的噪声水平,对 1 Hz~1 kHz 频段测试噪声进行分析以避免低频段其他噪声源对测量结果产生影响(见下文分析),在 1 Hz~1 kHz

范围内,32 m、260 m、520 m 臂长与 16 m 臂长的噪声水平差值分别为 2.73 dB、12.25 dB、15.40 dB,与理论值基本一致。为确认测试噪声是否符合(7)式描述的谱特征,对 4 种臂长的测试噪声分别进行拟合并获得其平均拟合参数,即为热噪声影响下的相位噪声功率谱分布拟合值:

$$S_T^f = L \times (2.8 \times 10^{-15} + 8.4 \times 10^{-13}/f) \quad (8)$$

将(7)式与(8)式进行对比,如图 4(b)所示,两者在大部分频段都吻合一致,仅在 kHz 附近存在差异,这是由于 4 种臂长的测试噪声在高频段存在装置结构引入的杂散峰,这些峰的存在使拟合值产生误差。

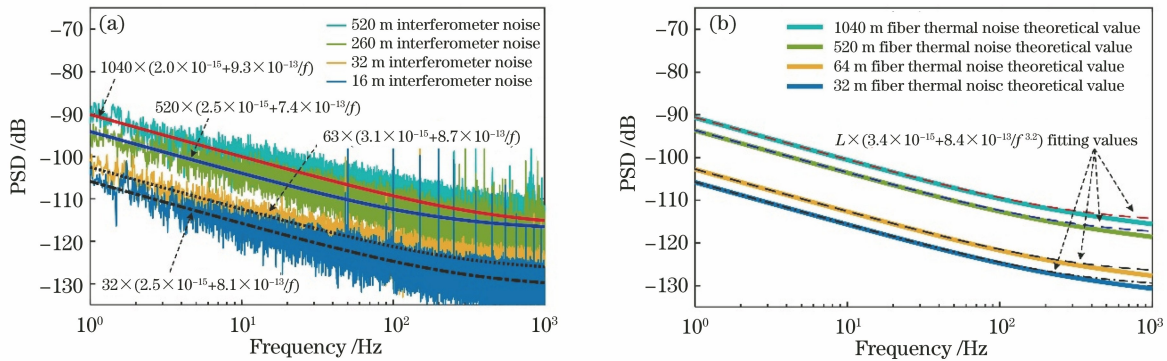


图 4 实验结果。(a)不同臂长下光纤干涉仪的噪声水平及其拟合值;(b)热噪声拟合谱与理论热噪声谱对比  
Fig. 4 Experimental results. (a) Noise level and fitting value of different length interferometers;  
(b) comparison of fitting spectrum and theoretical spectrum of thermal noise

### 3.3 超长光纤干涉仪 1/f 噪声综合影响

为研究百米级超长光纤干涉仪的甚低频段光源与光纤热噪声的影响及分布特性,我们构建了臂长 260 m 的保偏光纤 M-Z 平衡干涉仪(臂长差 0.05 m)并测试其噪声,由于超长光纤干涉仪对环境振动更为敏感,因此我们选择在更为安静的黑龙江省宾县地震台地震观测室中进行测试,其环境温度变化每 24 h 小于 0.1 °C。

图 5 为两种光源下超长光纤干涉仪的噪声测试结果,噪声幅值随频率  $f$  降低,由 1  $\mu$ rad/Hz<sup>1/2</sup> @ 1 kHz 量级快速上升到 10 mrad/Hz<sup>1/2</sup> @ 1 mHz 量级,将其与系统其他噪声因素进行对比分析。由图 5(a)可知,半导体激光器下,测试噪声功率谱在 0.4 Hz~1 kHz 内与理论光纤热噪声谱吻合,呈 1/f 谱分布,其拟合参数与前文基本一致;在 0.008~0.5 Hz 频段内与光源频率噪声影响基本吻

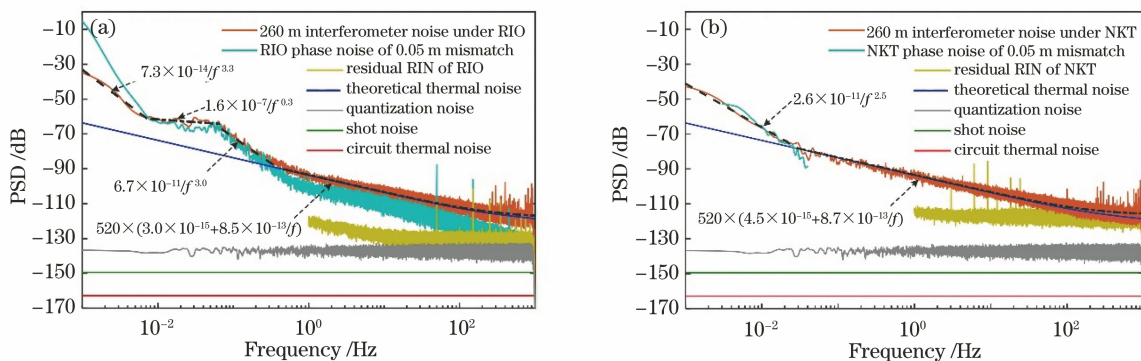


图 5 超长光纤干涉仪测试结果及分析。(a)半导体激光器下的噪声分析;(b)光纤激光器下的噪声分析  
Fig. 5 Test results and analysis of ultralong fiber interferometer. (a) Noise analysis of semiconductor laser;  
(b) noise analysis of fiber laser

合,呈 $1/f^{1+\beta}$ 谱分布,相应频段的拟合参数也与前文基本一致;而在更低频,则呈 $1/f^{3.3}$ 谱分布。由图5(b)可知,光纤激光器下,测试噪声功率谱在0.03 Hz~1 kHz内与理论光纤热噪声谱吻合,呈 $1/f$ 谱分布,其拟合参数与前文基本一致;而小于0.03 Hz内则体现出光源频率噪声影响,呈 $1/f^{2.5}$ 谱分布。半导体激光器下测试噪声在1 mHz~0.008 Hz内以及光纤激光器下测试噪声在1 mHz~0.03 Hz内的拟合参数与前文相应频段的拟合参数存在较大误差,这是由于两次实验环境温度漂移的差异对小于10 mHz频段甚至更低频段内的测试噪声产生不同影响导致。

由上述分析可知,光源频率噪声与光纤热噪声对超长光纤干涉仪的甚低频段 $1/f$ 噪声的分布特性有着决定性作用,结合(3)、(5)、(6)、(8)式,可以得到不同光源下超长光纤干涉仪的甚低频段 $1/f$ 相位噪声功率谱密度 $S_{\varphi}$ 的经验公式,

$$S_{\varphi} = \Delta l^2 \alpha / f^{1+\beta} + L(a + b/f), \quad (9)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 是与光源频率噪声相关的系数,对于半导体激光器,其相关参数取值见(5)式;对于光纤激光器,其相关参数取值见(6)式。 $a$ 、 $b$ 是与光纤热噪声相关的系数,其参数取值见(8)式。

## 4 结 论

本文通过构建窄线宽激光器驱动的超百米敏感臂长的M-Z保偏光纤干涉仪,研究了光源噪声与光纤热噪声共同引起干涉仪 $1/f$ 噪声的分布规律,即在mHz~kHz频段内,超长干涉仪的相位噪声幅值由 $1 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ @1 kHz快速上升到 $10 \text{ mrad}/\text{Hz}^{1/2}$ @1 mHz量级,其功率谱呈 $1/f^{1+\beta}$ 谱分布规律;其中,在1 Hz~1 kHz的较高频段,噪声功率谱主要由光纤热噪声决定,呈 $1/f$ 谱分布(即 $\beta=0$ ),其幅度与敏感光纤长度成正比;而在10 mHz~1 Hz的较低频段,主要由光源频率漂移噪声决定,呈 $1/f^{1+\beta}$ 谱分布,其幅度光源类型以及臂长差相关, $\beta$ 值由光源类型决定;上述不同频率区域的噪声之间存在幅值转换区和频率过渡点,它们由光纤热噪声和光源频率漂移噪声二者共同决定。

$1/f$ 噪声的来源及分布规律研究为超长干涉仪的检测精度提升奠定了基础,未来研究的重点之一是如何发展光源漂移噪声和光纤热噪声的抑制技术;此外,本文虽对环境干扰的影响进行了屏蔽和隔离,但在mHz量级处的 $1/f$ 噪声中仍能观察到温漂的残余影响,如何进一步分离环境干扰,获得光源

频率漂移噪声、光纤热噪声和环境因素干扰三者对 $1/f$ 噪声的综合影响也是进一步深入认识甚低频噪声并加以抑制的关键环节。

## 参 考 文 献

- [1] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(18): R197-R216.
- [2] Zhou X L, Yu Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(7): 1602-1606.
- [3] Gardner D, Hofler T, Baker S, et al. A fiber-optic interferometric seismometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(7): 953-960.
- [4] Zumberge M A, Wyatt F K, Yu D X, et al. Optical fibers for measurement of earth strain [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(19): 4131-4138.
- [5] Liang S J, Zhou C M, Fan D, et al. Experimental study on photonic crystal fiber sensing system based on optical-borne microwave interference [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050602. 梁斯靖, 周次明, 范典, 等. 光载微波干涉光子晶体光纤传感系统实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050602.
- [6] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(5): 1099-1100.
- [7] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, et al. Fiber-optic current sensor for electrowinning of metals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3602-3609.
- [8] Zu P, Chan C C, Lew W S, et al. Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3): 398-400.
- [9] Blum J A, Nooner S L, Zumberge M A. Recording earth strain with optical fibers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1152-1160.
- [10] Zumberge M A, Hatfield W, Wyatt F K. Measuring seafloor strain with an optical fiber interferometer [J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(8): 371-379.
- [11] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 19-30.
- [12] Marra G, Clivati C, Lockett R, et al. Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables [J]. *Science*, 2018, 361(6401): 486-490.

- [13] Peng F, Lü Y, Li H Y, et al. Sensitivity prediction of multiturn fiber coil-based fiber-optic flexural disk seismometer via finite element method analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(18): 3870-3876.
- [14] Li Y L, Cao Y W, He D, et al. Thermal phase noise in giant interferometric fiber optic gyroscopes [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14121-14132.
- [15] Bartolo R E, Tveten A B, Dandridge A. Thermal phase noise measurements in optical fiber interferometers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(5): 720-727.
- [16] Gagliardi G, Salza M, Avino S, et al. Probing the ultimate limit of fiber-optic strain sensing [J]. *Science*, 2010, 330(6007): 1081-1084.
- [17] Zhao S X, Liu Q W, Chen J G, et al. Resonant fiber-optic strain and temperature sensor achieving thermal-noise-limit resolution [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1870-1878.
- [18] Wanser K H. Fundamental phase noise limit in optical fibres due to temperature fluctuations [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(1): 53-54.
- [19] Duan L Z. Intrinsic thermal noise of optical fibres due to mechanical dissipation [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(22): 1515-1516.
- [20] Dong J, Huang J C, Li T, et al. Observation of fundamental thermal noise in optical fibers down to infrasonic frequencies [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(2): 021108.
- [21] Huang J C, Wang L K, Duan Y F, et al. Experimental study on 1/f intrinsic thermal noise in optical fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 054205.  
黄军超, 汪凌珂, 段怡菲, 等. 光纤 1/f 热噪声的实验研究 [J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 054205.
- [22] Tröbs M, Wessels P, Fallnich C. Phase-noise properties of an ytterbium-doped fiber amplifier for the Laser Interferometer Space Antenna [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 789-791.
- [23] Sheard B, Heinzel G, Danzmann K. LISA long-arm interferometry: an alternative frequency pre-stabilization system [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084011.
- [24] Eichholz J, Tanner D B, Mueller G. Heterodyne laser frequency stabilization for long baseline optical interferometry in space-based gravitational wave detectors [J]. *Physical Review D*, 2015, 92(2): 022004.
- [25] Meng Z, Hu Y M, Xiong S D, et al. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(17): 3425-3428.
- [26] Xu D, Yang F, Chen D J, et al. Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a  $3 \times 3$  optical fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22386-22393.
- [27] Liokumovich L B, Kostromitin A O, Ushakov N A, et al. Method for measuring laser frequency noise [J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2020, 86(6): 1106-1112.
- [28] Zhang W X. Fiber-optic gyroscope and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 22-24.  
张维叙. 光纤陀螺及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 22-24.
- [29] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Zhang G C, Wang W, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 18-20.  
Herve C. Lefevre. 光纤陀螺仪 [M]. 张桂才, 王巍, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 18-20.
- [30] Zhang G C. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 195-200.  
张桂才. 光纤陀螺原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 195-200.
- [31] Qu Z Y, Guo S, Hou C B, et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23593-23609.
- [32] Riehle F. Frequency standards: basics and applications [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003: 69.
- [33] Foster S B, Cranch G A, Harrison J, et al. Distributed feedback fiber laser strain sensor technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3514-3530.