

# 面向空间引力波探测的激光低频段相对强度噪声测试技术

胡海林<sup>1</sup>, 虞逸航<sup>2</sup>, 陈迪俊<sup>2</sup>, 孙广伟<sup>2</sup>, 杨康文<sup>1</sup>, 魏芳<sup>2\*</sup>, 杨飞<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所中科院空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

**摘要** 面向空间引力波探测对激光光源相对强度噪声的严苛需求,开展了极低相对强度噪声在低频段的测试表征技术研究。构建了基于低噪声光电探测器、高精度数字万用表以及快速傅里叶(FFT)频谱分析仪在低频段 0.1 mHz~100 kHz 的相对强度噪声测试系统。利用高精度数字万用表及 FFT 分段 Smooth 窗函数平滑算法实现对 0.1 mHz~0.5 Hz 的极低频段内相对强度噪声测试,本底噪声低于 -99 dBc/Hz,同时利用低噪声放大器及 FFT 频谱分析仪测试在 1 mHz~100 kHz 的相对强度噪声,本底噪声低于 -105 dBc/Hz。两种测试手段在 1 mHz~0.5 Hz 重叠频段内噪声测试结果的一致性验证了所构建测试系统在低频段测试结果的准确性。利用所构建的相对强度噪声测试系统对自研空间引力波探测用平面波导环形腔(NPRO)激光器、商用光纤激光器、商用外腔半导体激光器等多种激光器进行测试评估,并对其噪声成分及来源进行分析。所构建的低频段相对强度噪声测试系统可满足空间引力波探测对激光强度噪声评估的需求,同时也适用于其他低频段精密测量应用的激光光源噪声评估。

**关键词** 单频激光器; 噪声测试; 相对强度噪声; 快速傅里叶变换; 空间引力波探测

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230701

## 1 引言

引力波是爱因斯坦广义相对论的预言之一,是由质量加速引起并以光速传播的时空曲率的扰动<sup>[1]</sup>。引力波探测作为一种天文观测的全新手段,是 21 世纪物理学领域重要的科学探索,为人类研究致密天体以及星系和宇宙演化打开了全新窗口。以激光干涉引力波天文台(LIGO)为代表的地基引力波探测器采用百米到千米尺度的激光干涉仪已经完成地面探测<sup>[2]</sup>,但由于地面振动、重力梯度噪声等影响,地基引力波探测器对 10 Hz 以下的引力波基本没有探测能力,而在地基引力波探测器不能覆盖的 0.1 mHz~1 Hz 频段分布着种类丰富的引力波源,在如此低的频段地面探测存在很大难度,需要发展空间百万公里量级的长基线激光干涉引力波探测系统。激光干涉仪空间天线(LISA)项目计划发射三颗相同卫星并形成等边三角形结构,以构建空间激光干涉引力波探测装置<sup>[3]</sup>,我国也针对引力波探测也开展一系列的研究,如“天琴计划”“太极计划”等,并已成功发射了相关科学卫星<sup>[4-5]</sup>。由于引

力波信号非常微弱,空间激光干涉仪测量的应变灵敏度要求在  $10^{-21} \sim 10^{-20} / \sqrt{\text{Hz}}$  量级<sup>[6]</sup>,国内外设计的激光干涉仪系统性能也在逐渐提升<sup>[7-11]</sup>,故对激光光源的各项特性,特别是对相对强度噪声(RIN)特性提出严苛要求,如表 1<sup>[12]</sup>所示。

由表 1 可知,空间引力波探测对激光光源在 0.1 mHz~5 GHz 范围内的 RIN 提出明确要求,故近来随着我国空间引力波计划的实施,多家科研单位对引

表 1 空间引力波探测对激光光源 RIN 的需求<sup>[12]</sup>

Table 1 Requirements of space-based gravitational wave detection on RIN of laser<sup>[12]</sup>

Frequency	RIN / (dBc·Hz <sup>-1</sup> )
0.1 mHz-10 kHz	-80
10 kHz-100 kHz	-100
100 kHz-700 kHz	-80
700 kHz-5 MHz	-130.4
5 MHz-50 MHz	-80
50 MHz-5 GHz	-86

收稿日期: 2023-03-11; 修回日期: 2023-04-13; 录用日期: 2023-04-25; 网络首发日期: 2023-05-05

基金项目: 科技部重点研发计划(2020YFC2200302, 2022YFB3902503)、国家自然科学基金(12293033, 62275253)、中国科学院先导项目(XDB43030401)、中国科学院青年创新促进会(YIPA2019251)、上海市自然科学基金(21ZR1472100)、中科院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20210017)

通信作者: \*weifang@siom.ac.cn; \*\*fyang@siom.ac.cn

力波探测用光源的 RIN 测试技术展开大量研究<sup>[12-17]</sup>。张骥等<sup>[18]</sup>结合频谱分析仪和快速傅里叶变换(FFT)频谱分析仪等标准仪器测试了在 1 mHz~50 MHz 频段内的 RIN,本底噪声为 -80 dBc/Hz@1 mHz, -120 dBc/Hz@1 Hz。李番等<sup>[19]</sup>基于高精度数字万用表(DMM)及对数频率轴功率谱密度估计算法(LPSP)编程实现了一种测试 0.1 mHz~1 Hz 极低频段 RIN 的系统,本底噪声低于 -86 dBc/Hz。虞逸航等<sup>[20]</sup>提出了基于增大光电流并结合低热噪声频谱探测的方式降低测量极限的方法,实现了 50 kHz~40 GHz 频段内极低本底的单频激光 RIN 测试,散粒噪声测试极限达到 -171 dBc/Hz。结合目前测试技术和引力波探测的需求,RIN 的测试需求需要覆盖 0.1 mHz~5 GHz 频率范围,目前对 50 kHz~5 GHz 较高频段内的 RIN 测试通常采用低噪声的频谱分析仪进行测试,相关理论和测试方法都较为成熟,美国 OEwaves、日本 SYCATUS、中国科学院上海光学精密机械研究所均推出相应的标准测试仪器<sup>[21-23]</sup>。在低频段,当前测试手段存在测试频段受限或本底噪声较高等问题,尚不能完全满足引力波探测对激光光源 RIN 低频段测试评估需求,需发展全低频段的低本底噪声强度噪声测试技术及完整准确的评估标准。

本文将对 0.1 mHz~100 kHz 内的低频段 RIN 进行完整的测试表征并降低测试系统的本底噪声,形成规范的测试系统和测试算法。首先基于低噪声光电探测器(PD)、DMM,Labview 控制数据采集以及数据处理算法编程,实现对激光在 0.1 mHz~0.5 Hz 频段内 RIN 的测试表征,在时域上利用 Labview 软件控制 DMM 进行高精度采集。利用 FFT 算法分析所采集数据在频域上的噪声特性,计算 RIN 时使用不同分辨率 Smooth 平滑函数分频段处理方法,在保证低频段测试结果不失真的同时防止高频段出现严重的“拖尾”现象,且在时域采集完成时可随即进行频域分析,并实时储存数据,结合不同采样时间的数据验证了极低频测试结果的准确性。其次使用 FFT 频谱分析仪(SR770, Stanford Research Systems)测试了激光器在 1 mHz~100 kHz 频段内的 RIN,在测试系统中加入低噪声放大器有效降低了 1 mHz~1 Hz 频段内的本底噪声,将测试能力提升了 18 dB。最后将两种测试方式在重叠频段内的测试结果进行一致性比对,验证了两种测试结果的统一性和准确性,最终将低本底噪声的 RIN 测试频段拓展为 0.1 mHz~100 kHz。所提 RIN 测试系统具有低频段、宽覆盖、高精度、高准确性等优点,可为空间引力波探测中的激光器 RIN 提供规范化测试手段,同时也适用于其他低频段精密测量应用的激光光源噪声评估。

## 2 测试技术与系统

### 2.1 测试原理与方法

RIN 被定义为归一化的单边带功率波动密度谱或

均方根密度谱<sup>[24]</sup>,即

$$S_{\text{RIN}}(f) = \frac{S_{\Delta P}(f)}{\bar{P}}, \quad (1)$$

$$S_{\text{RIN}}(f) = \sqrt{\frac{S_{\Delta P}(f)}{2\bar{P}^2}}, \quad (2)$$

$$S_{\text{RIN}}(f) = 10 \lg \left[ \frac{S_{\Delta P}(f)}{\bar{P}} \right] = 10 \lg [S_{\Delta P}(f)] - 10 \lg \bar{P}, \quad (3)$$

式中: $S_{\Delta P}(f)$ 为功率波动密度谱; $\bar{P}$ 为平均功率。测量强度噪声时,PD 输出的电压信号与输出光功率成正比,所以可以直接利用电压波动计算强度噪声,具体的计算方法是:将电压波动密度谱进行平均电压归一化计算后得到激光的 RIN。

具体测试方法为:首先激光通过 PD 将光信号转化为电信号,DMM 采集 PD 的时域直流量后,通过 FFT 算法计算频域噪声信息从而得到激光器的 RIN。增大测试时间(大于 10000 s)可测试到 0.1 mHz,根据 Nyquist-Shannon 采样定理,频谱中最大分析频率为采样率的一半。为避免数据量大影响数据处理速率,且采样率和采样精度成反比,所以实验中测试采样率为 1 Sa/s,可实现激光器在 0.1 mHz~0.5 Hz 内的噪声分析;使用频谱仪 SR770 测试分析频段在 1 mHz~100 kHz 激光的 RIN,SR770 带有高精度的 16 位模数转换器(ADC)和具有滤波功能以及傅里叶运算能力的数字信号处理器(DSP),其谱密度单位为  $V/\sqrt{\text{Hz}}$ ,再除以 DMM1 记录的电压均值  $V$ ,可得到激光器在 1 mHz~100 kHz 内的 RIN。且重叠频段可验证极低频测试的准确性,可获得宽频段 0.1 mHz~100 kHz 的测试技术。

### 2.2 低频段 RIN 测试系统及数据处理

低频段激光 RIN 测试系统如图 1 所示。子系统(a)可实现 0.1 mHz~0.5 Hz 范围内极低频段 RIN 的测试,子系统(b)可实现 1 mHz~100 kHz 频段内 RIN 的测试,实现对频段的拓展,并验证测试结果的准确性,两种测试方式同时进行,避免外界环境带来的影响,从而获得激光在 1 mHz~100 kHz 频段内的 RIN 特征。系统中主要硬件包括低噪声 PD、DMM 以及 SR770 频谱分析仪。PD 作为光电转换的主要器件,其噪声性能直接影响低频段噪声测试的准确性,所选用的 PD 是 GD3553Y 型 InGaAs 探测器二极管,暗电流为 0.03 nA,响应灵敏度为 0.9 A/W@1550 nm,可有效降低暗噪声引起的误差和减少电子学噪声,避免其成为限制低频段测试本底噪声的主要因素;六位半的单通道 DMM (Agilent: 34410A) 的性能参数如表 2 所示,当积分时间为 10 s 时,可实现 5 Sa/s 的采样速率,分辨率为  $0.1 \times 10^{-6}$ ,满足本文实验 1 Sa/s 的采样速率,可分析 0.1 mHz~0.5 Hz 频段内噪声性能;选择使用 FFT 频谱分析仪 SR770 分析 1 mHz~100 kHz 频段内的噪声,

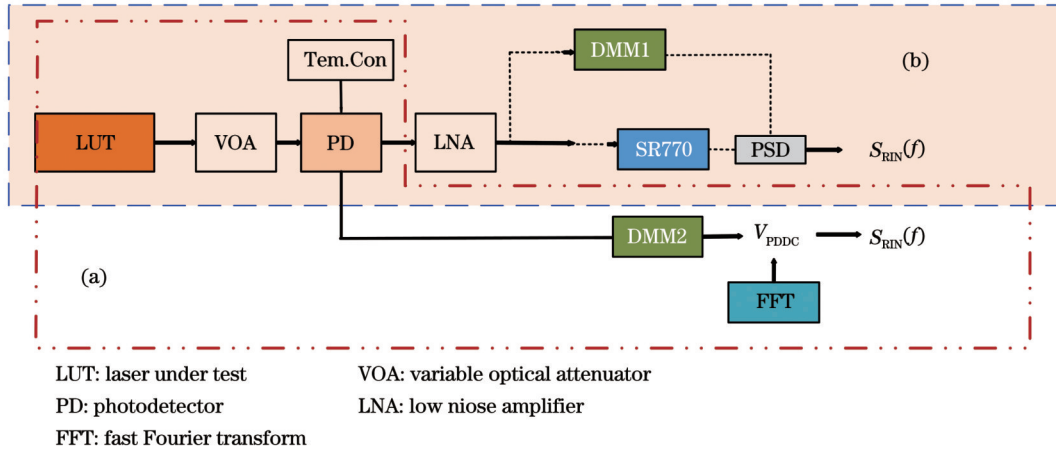


图 1 低频段激光 RIN 测试系统

Fig. 1 Laser RIN evaluation system at low frequency

表 2 DMM 噪声性能

Table 2 Noise performance of DMM

Integration time / s	Resolution / 10 <sup>-6</sup>	Sampling rate / (Sa·s <sup>-1</sup> )
1	0.30	50
2	0.20	25
10	0.10	5
100	0.03	0.5

完成 RIN 测试向百 kHz 频段的扩展,并将两种方法在 1 mHz~0.5 Hz 范围内的测试结果进行对比,验证测试结果的准确性。

数据处理在极低频段测试子系统(a)中具有决定性影响,其数据处理程序包括两个模块:1)基于 Labview 编程控制 DMM 的采样速率,并对所采集时域电压波动数据进行实时存储,同时展示电压波动图;2)RIN 计算程序模块,直接对 Labview 储存的数据进行计算分析,获得极低频段的 RIN 噪声曲线,避免数据的导入导出。常规 RIN 计算算法中采用窗口重叠分段平均法(Windowed overlapped segmented average, WOSA)进行数据处理,在频域上对所有频段上的数据进行相同的分辨率处理,若选用的分辨率过大会导致极低频数据失真,而分辨率过小会在高频段产生严重“拖尾”现象<sup>[25]</sup>,无法准确获得极低频段 RIN 的噪声特性。因此在 RIN 计算程序中使用不同分辨率 Smooth 平滑函数进行分频段处理,算法原理如图 2 所示,在数据量大的较高频段增加平滑处理次数,数据量少的极低频减少平滑处理次数。但相邻频段数据处理的灵敏度不同,个别数据在实际计算时可能会在 10<sup>-2</sup> Hz、10<sup>-1</sup> Hz 处发生 1~2 dB 的误差跳变,所以在 10<sup>-2</sup> Hz、10<sup>-1</sup> Hz 频段小频段内增加一次平滑处理,这可以很好地解决 FFT 算法高频段的严重“拖尾”现象和 WOSA 数据失真等问题,得到更加精确的 RIN 谱线。

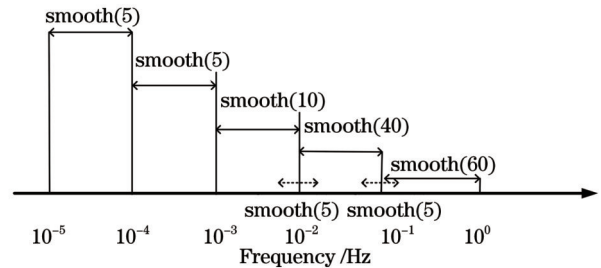


图 2 Smooth 算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Smooth algorithm

### 2.3 测试系统的本底噪声分析

测试得到的  $S_{RIN}(f)$  除含有激光 RIN 外,还含有决定测试系统本底极限的测量噪声,测量噪声越低,本底越小,  $S_{RIN}(f)$  就越能正确反映激光 RIN,反之,  $S_{RIN}(f)$  可能以测量本底为主,不能反映真实的激光 RIN 大小。系统器件中的测量噪声主要来源是热噪声和散粒噪声。散粒噪声是 PD 在光辐射作用或热激发等条件下,随机产生光生载流子或光电子导致的,其在激光 RIN 测试结果中的大小  $f_{RIN\_shot}$ <sup>[26]</sup> 可表示为

$$f_{RIN\_shot} = 10 \lg \frac{2e}{I_{dc}} = -155 - 10 \lg I_{dc}, \quad (4)$$

式中:  $e$  为电子电荷量常数;  $I_{dc}$  为光电流。所以激光 RIN 中的 PD 散粒噪声分量与光电流有关。本实验中探测器的光电流为 2 mA, 直流电压为 1 V, 散粒噪声理论极限值为 -158.6 dBc/Hz。

热噪声由电荷载流子的随机热运动导致,光电流流经的器件都会产生热噪声,在 RIN 测试结果中整个系统的热噪声大小  $f_{RIN\_th}$ <sup>[26]</sup> 可表示为

$$f_{RIN\_th} = -156.8 - 10 \lg I_{dc}. \quad (5)$$

通过式(2)计算出 PD 的热噪声为 -159.8 dBc/Hz, FFT 频谱分析仪热噪声水平为 -155 dBm/Hz, 频谱仪的热噪声是测试系统中本底噪声的主要来源。对系统中关键器件和测试设备的本底噪声进行测试(在直流电压为 1 V 下计算)。



1) DMM 本底噪声测试

DMM 的本底噪声可以定义为在测试过程采集电压信号时其自身波动, DMM 短接负载电阻, 设置采样率为 2 Sa/s。图 3(a) 为采集时长为 7.8 h 情况下时域上的电压波动信号, 峰值为  $3.2 \times 10^{-5}$  V, 波动均值为  $2.2 \times 10^{-6}$  V; 图 3(b) 为经过 FFT 算法和添加平滑算法后本底噪声的计算结果, 可以看出 FFT 在高频处有严重的“拖尾”现象; 而 WOSA 算法相较于所提方法在噪声计算时会导致低频数据发生失真, 如图 3(c) 所示,

不能准确地测试 RIN 在极低频段的特征, 故在后续的数据处理中均采用 Smooth 分段平滑; 在 0.1 mHz~1 Hz 频段内 DMM 本底噪声最大为  $-100$  dBc/Hz@0.1 mHz, 10 mHz 以上本底噪声低于  $-120$  dBc/Hz, 满足引力波探测在该频段的需求。由图 3(a) 可知, 在 DMM 刚开机 1~2 h 内直接采集数据时电压波动幅度较大, 由图 3(d) 可知, 经过计算稳定后的 DMM 有更低的本底噪声, 所以在测试极低频段噪声时需将测试系统预热 1~2 h。

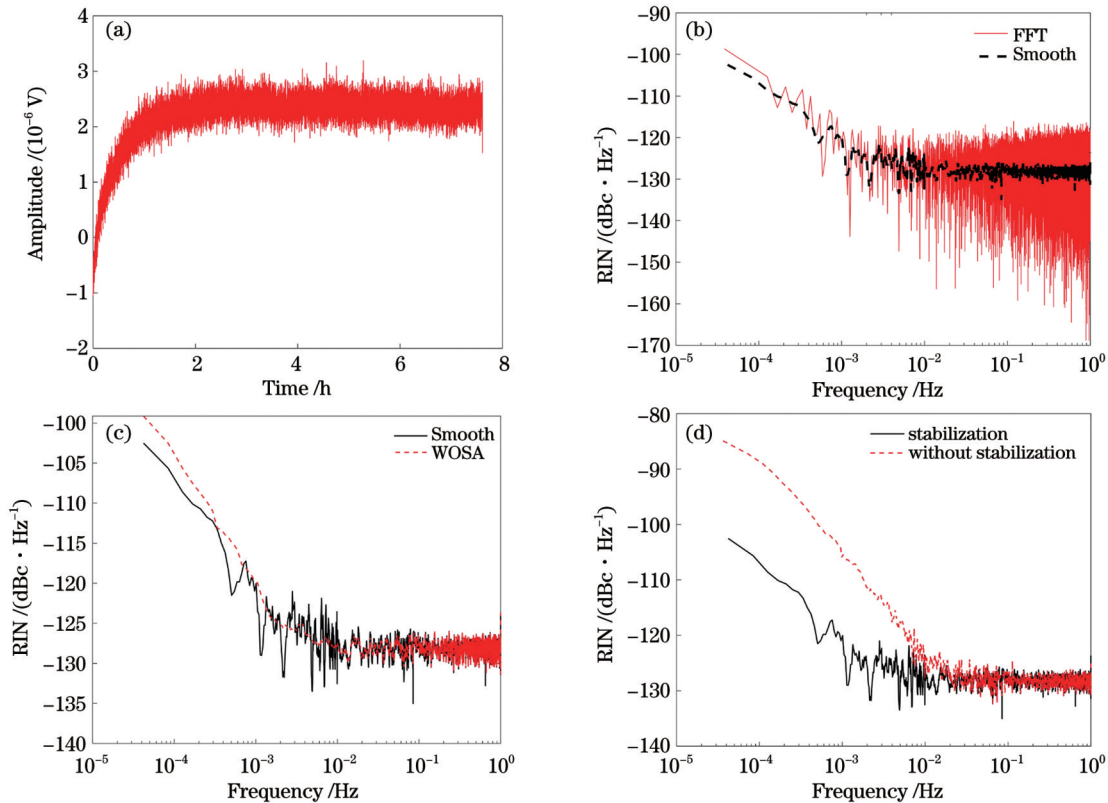


图 3 DMM 本底噪声测试。(a)DMM 时域上电压波动;(b)利用 FFT 和 Smooth 处理后的本底噪声;(c)利用 WOSA 和 Smooth 处理后的本底噪声;(d)DMM 在稳定前后测试结果的对比

Fig. 3 DMM background noise test. (a) Voltage fluctuation in the time domain of DMM; (b) background noise after FFT and Smooth processing; (c) background noise after WOSA and Smooth processing; (d) comparison of test results with DMM stabilization and without stabilization

2) PD 本底噪声测试

外界环境温度的变化会影响探测器的响应度<sup>[27]</sup>, 从而在 RIN 测试中引入额外噪声, 引起 PD 本底噪声

的劣化, 所以需将 PD 进行隔温隔振封装, 尽可能避免外界环境的影响, 同时为了消除开关电源引入的电源噪声, 采用干电池 (12 V-23 A) 对探测器供电。

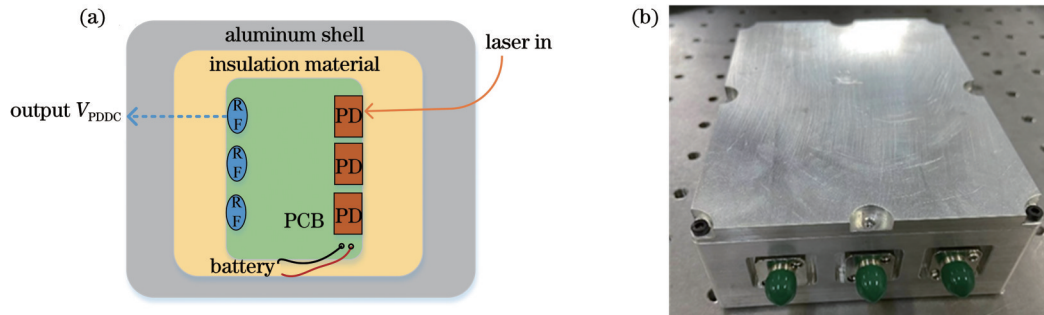
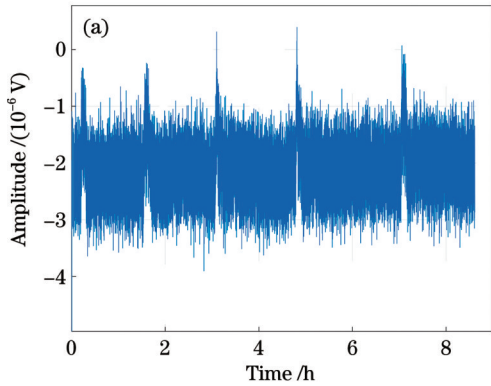


图 4 光电探测器。(a)内部结构;(b)隔温隔振封装

Fig. 4 Photodetector. (a) Internal structure; (b) temperature and vibration isolation package

测试子系统(a)未接光时,DMM2先预热2h,然后开始记录测试系统中DMM2时域上的电压波动情况,如图5(a)所示。根据数据统计,在8.5h内电压波动的峰值为 $-3.9 \times 10^{-6}$  V,均值为 $-2.21 \times 10^{-6}$  V,经



过程序计算可得到PD的本底噪声特性,如图5(b)所示,在0.1 mHz~1 Hz频段内PD本底噪声最大为 $-100$  dBc/Hz@0.1 mHz,10 mHz以上本底噪声低于 $-130$  dBc/Hz,这满足引力波探测在该频段的需求。

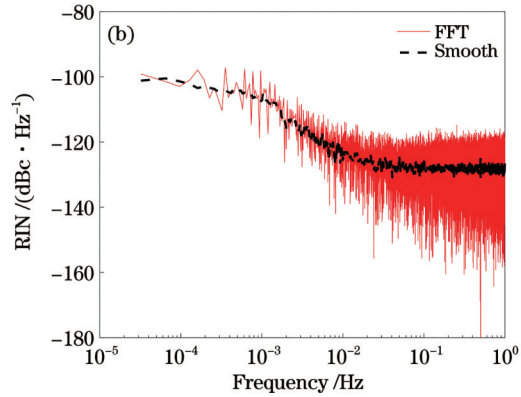


图5 PD本底噪声测试。(a)PD电压在时域上波动;(b)PD本底噪声

Fig. 5 PD background noise test. (a) PD voltage fluctuations in the time domain; (b) PD background noise

### 3) 子系统(b)本底噪声测试

在未通光时测试子系统(b)的本底噪声为 $-83$  dBc/Hz,接近引力波探测要求的极限值 $-80$  dBc/Hz,为了进一步降低测试系统的本底噪声,测试系统中加入增益为20 dB的低噪声放大器(LNA: DCA-50M-20),归算放大倍率后的本底噪声如图6所示,虽然在1~100 Hz频段内本底噪声发生劣化,但能有效降低在1 mHz~1 Hz频段内的本底噪声,系统的测试能力提高18 dB。

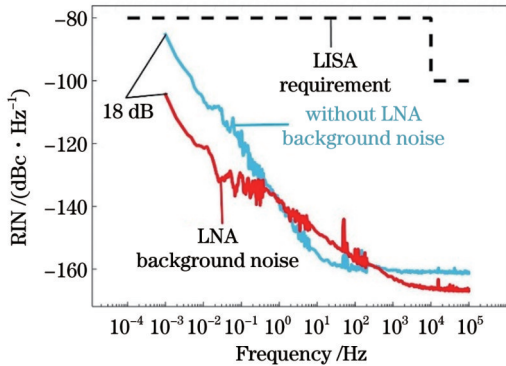


图6 测试系统(b)中加入LNA前后本底噪声对比

Fig. 6 Comparison of background noise before and after the addition of LNA in the test system (b)

## 3 低频段激光器 RIN 测试

结合测试系统和数据处理算法,测试了激光器0.1 mHz~0.5 Hz频段内的RIN,并分析了不同时长的采样数据对极低频测试的误差。假设数据的采样率为 $\tau_0$ ,采样点数为 $N$ ,总采样时间为 $T=N\tau_0$ ,计算噪声的平均时间为 $\tau(\tau=10000$  s),平均数组的长度为 $M=\tau/\tau_0$ ,噪声估计的百分比误差<sup>[28]</sup>可表示为

$$E_{\text{error}} = \frac{1}{\sqrt{2(N/M-1)}} \times 100 = \frac{1}{\sqrt{2(T/\tau-1)}} \times 100. \quad (6)$$

根据式(6)计算不同采样时间下0.1 mHz~0.5 Hz频段内RIN的误差,如表3所示。由表3可知,增加采样时间才能增加计算结果的可信度,要使误差小于 $1\sigma$ (31.73%),所需采样时间大于60000 s。

表3 不同采样时间测试RIN的误差率

Table 3 Error rate of RIN test with different sampling time

Sampling time / s	Error rate / %
10000	uncalculable
20000	70.72
30000	50.00
40000	40.82
50000	35.35
60000	31.73
70000	28.87
80000	26.73

长时间的测试对环境稳定的控制以及测试系统的工作状况提出严苛的要求,在保证测试环境和测试系统的稳定后,采集了80000 s的数据,并根据表3中所列出的采样时间,截取了10000~80000 s的数据段分别计算了激光极低频的RIN,结果如图7所示。由图7可知,经过Smooth分段平滑算法处理之后高频“拖尾”只有2 dB;在0.04~0.5 Hz频段内,不同的数据长度对RIN结果影响很小。但在0.1 mHz~0.04 Hz的频段范围,采样时间为80000 s的结果与10000 s的结果具有显著不同,采样时间为80000 s下可测试出更多的噪声

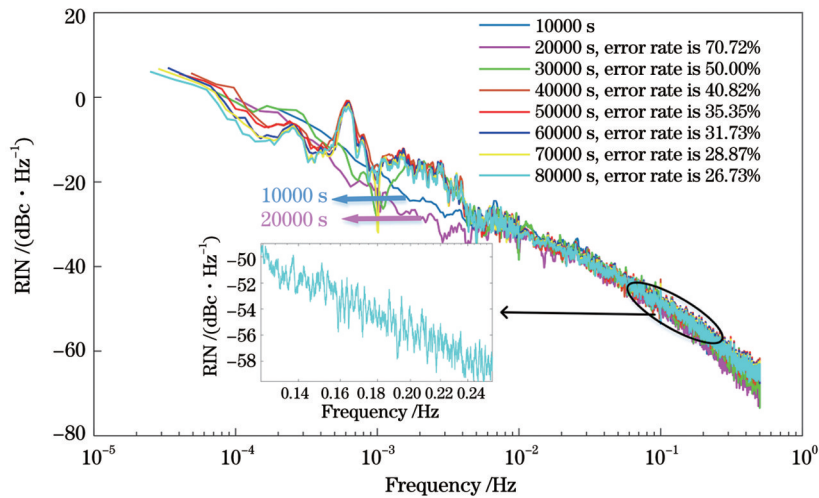


图 7 不同采样时间下激光的 RIN 及误差率

Fig. 7 RIN and error rate of the laser at different sampling time

信息;由图 7 可知,采样时间为 10000 s 和 20000 s 时的曲线较其他长时间的重合情况较差,原因是测试时间短导致在 0.1 mHz~0.04 Hz 频段内数据点较少,这使得准确率下降。结合理论分析可知,采样时间越长,测试结果越准确。

图 8(a)为高精度 DMM 和 FFT 频谱分析仪两种仪器同时时间下的 RIN 测试结果,其测试频段分别覆盖

0.1 mHz~0.5 Hz 和 1 mHz~100 kHz。由图 8(a)可知,二者在重叠频段内 1 mHz~0.5 Hz 内保持较好的一致性,这一方面验证了测试结果的正确性,另一方面可以通过对两种测试结果进行噪声谱的拼接完成 0.1 mHz~100 kHz 频段内 RIN 特性的完整测试。图 8(b)为拼接后所得到的 0.1 mHz~100 kHz 低频段的完整 RIN 谱。

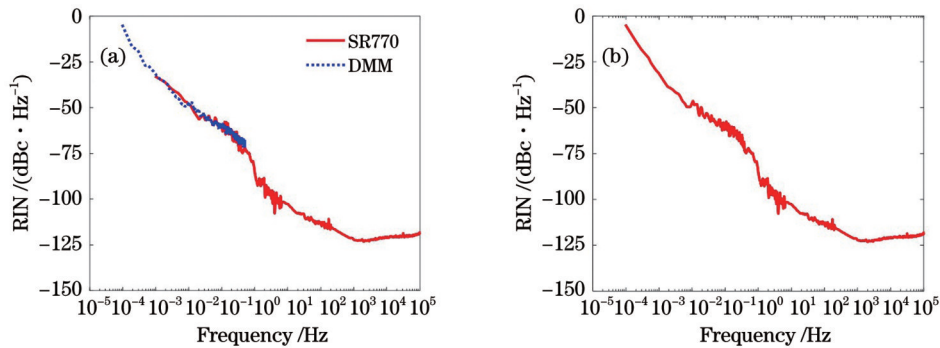


图 8 RIN 的测试结果。(a)DMM 和 SR770 两种测试仪器测得的不同频段的 RIN;(b)激光在 0.1 mHz~100 kHz 频段内的 RIN  
Fig. 8 RIN test results. (a) RIN of different frequency bands measured by DMM and SR770; (b) RIN of laser in 0.1 mHz~100 kHz frequency band

应用上述的测试技术可以对不同类型激光器的 RIN 进行测试,获得激光器 RIN 在低频段的特征,从而指导激光器的研发和优化设计以及提升应用系统的参数性能。测试了 4 种不同类型的单频激光器,如图 9 所示。图 9 分别为分布式 Bragg 反馈光纤激光器 (DFB-FL)、平面波导外腔半导体激光器 (PW-ECL)、法布里-珀罗谐振 (FP) 腔稳频激光器以及自研的引力波探测用 NPRO 种子激光器。测试结果如下:1) 由于泵浦功率的波动 DFB-FL 的 RIN 噪声水平在整个频段内相对较高<sup>[29]</sup>, 光纤激光器在低频段主要为  $1/f$  噪声,其腔内局部熵波动,引起随机自发辐射是光纤激光  $1/f$  噪声的主要来源<sup>[30-31]</sup>, 可以使用可饱和吸收的掺铒光纤放大器 (EDFA) 或进行功率稳定反馈控制抑

制光纤激光器在低频段的  $1/f$  噪声,以便获得更低 RIN 的激光输出<sup>[32]</sup>;2) PW-ECL 激光器在 1 Hz~100 kHz 以上的噪声水平最小,在 1 kHz 以上达到散粒噪声极限 ( $-158$  dBc/Hz),且在 kHz 量级和厂家的数据吻合,其中厂家给出的平面波导外腔激光器 (PWECL) 激光器 RIN 最小值为  $-145$  dBc/Hz,并同时注明测试结果受限于测试系统性能,显示所提方法能测试出比厂家数据更好的性能参数,证明所提方法的准确性;3) 分别测试了基于超稳 FP 腔 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频技术的稳频激光器在稳频前和稳频后的强度噪声特性,稳频后的 RIN 在 100 Hz~100 kHz 频段内对 RIN 有很好的压制效果,但在 0.01 Hz~1 Hz 范围内的 RIN 出现劣化现象。稳频激光器所采用的种子源为光纤激



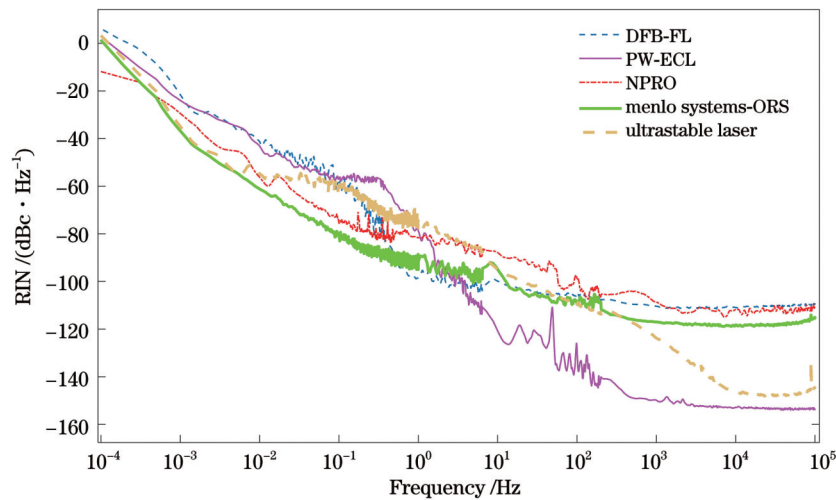


图9 不同类型的激光器低频段的RIN

Fig. 9 RIN of different types of lasers at low frequency

光器,已知该激光器在 300 kHz 附近存在弛豫振荡峰,故所测试的噪声谱线在 100 kHz 附近出现上升趋势; 4)测试了自研的 NPRO 种子激光器,NPRO 激光器的 RIN 达到  $-11 \text{ dBc/Hz}@0.1 \text{ mHz}$ ,  $0.1 \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$  频段上出现尖峰,频率在 1 kHz 以上时的 RIN 趋于稳定,数值优于  $-100 \text{ dBc/Hz}$ 。在  $0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$  频段内还未达到引力波探测需求噪声水平,故需在后续的放大过程中抑制强度噪声。

## 4 结 论

基于空间引力波探测对激光器噪声的严苛需求,在低频段完成低本底 RIN 测试表征系统的建立,本底噪声达到  $-99 \text{ dBc/Hz}@0.1 \text{ mHz}$ 、 $-165 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ kHz}$ 。该技术基于低噪声 PD 将激光器的光信号转化为电信号,通过高精度 DMM、FFT 频谱分析仪等多测试手段联合的方式完成在  $0.1 \text{ mHz} \sim 100 \text{ kHz}$  范围内强度噪声的完整准确表征,并对 4 种典型激光器的 RIN 进行测试分析,获得各激光器的主要噪声特征及后续可用的强度噪声抑制技术,并根据自研 NPRO 激光器的噪声性能,提出后续在极低频段 RIN 的改进方向。该相对激光强度噪声表征测试可为空间引力波探测中激光光源噪声水平提供精准、统一的评估方法,为激光光源的噪声抑制提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Taylor J H, Weisberg J M. Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1989, 345: 434.
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
- [3] Armano M, Audley H, Auger G, et al. Charge-induced force noise on free-falling test masses: results from LISA pathfinder[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(17): 171101.
- [4] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.
- [5] Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese spaceborne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 3-10.
- [6] 罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(S1): 1-19.
- [7] Luo J, Ai L H, Ai Y L, et al. A brief introduction to the TianQin project[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(S1): 1-19.
- [8] Danzmann K, diger AR. LISA technology: concept, status, prospects[J]. Classical and Quantum Gravity, 2003, 20(10): S1-S9.
- [9] 王智, 沙巍, 陈哲, 等. 空间引力波探测望远镜初步设计与分析[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 131-151.
- [10] Wang Z, Sha W, Chen Z, et al. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection[J]. Chinese Optics, 2018, 11(1): 131-151.
- [11] Tröbs M, Barke S, Möbius J, et al. Lasers for LISA: overview and phase characteristics[C]//7th International LISA Symposium, June 16-20, 2008, Barcelona, Spain. Vancouver: Journal of Physics, 2009, 154: 012016.
- [12] Gong X, Xu S, Bai S, et al. A scientific case study of an advanced LISA mission[J]. Classical and Quantum Gravity, 2011, 28(9): 094012.
- [13] Numata K, Camp J, Krainak M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements[J]. Optics Express, 2010, 18(22): 22781-22788.
- [14] 刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 等. 空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 486-492.
- [15] Liu H S, Gao R H, Luo Z R, et al. Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 486-492.
- [16] Numata K, Alalusi M, Stolpner L, et al. Characteristics of the single-longitudinal-mode planar-waveguide external cavity diode laser at 1064 nm[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2101-2104.
- [17] 方荣. 激光器相对强度噪声测量研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018: 2-10.
- [18] Fang R. Study on measurement of relative intensity noise of laser [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018: 2-10.
- [19] Tröbs M, D’Arcio L, Heinzel G, et al. Frequency stabilization and actuator characterization of an ytterbium-doped distributed-feedback fiber laser for LISA[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(5): 1137-1140.
- [20] Abadie J, Abbott B P, Abbott R, et al. A gravitational wave

- observatory operating beyond the quantum shot-noise limit[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(12): 962-965.
- [16] Bing H, Shi S D, Yang L, et al. Cascaded random Raman fiber laser with low RIN and wide wavelength tunability[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 12(4): 36-44.
- [17] 段会宗, 骆颖欣, 张静怡, 等. 星间激光干涉测量技术[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(S1): 162-177.  
Duan H Z, Luo Y X, Zhang J Y, et al. Inter-satellite laser interferometry[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(S1): 162-177.
- [18] 张骥, 魏珊珊, 刘昊炜, 等. 单频激光宽频段频率和强度噪声测量技术[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0301002.  
Zhang J, Wei S S, Liu H W, et al. Measurement technique for broadband frequency and intensity noise of single-frequency laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0301002.
- [19] 李番, 王嘉伟, 高子超, 等. 面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统[J]. *物理学报*, 2022, 71(20): 209501.  
Li F, Wang J W, Gao Z C, et al. Laser intensity noise evaluation system for space gravitational wave detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(20): 209501.
- [20] 虞逸航, 胡海林, 陈迪俊, 等. 极低本底单频激光相对强度噪声测试方法研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(22): 2201003.  
Yu Y H, Hu H L, Chen D J, et al. Research intensity noise of a single-frequency laser with ultralow background[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(22): 2201003.
- [21] OEwaves. OE4000 HI-Q<sup>®</sup> laser linewidth/phase noise analyzer [EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.oewaves.com/opnts>.
- [22] SYCATUS. SYCATUS exhibited at OFC 2018[EB/OL]. [2023-02-03]. <http://www.sycatus.com/en/>.
- [23] Focusing Optics[EB/OL]. [2023-02-03]. <http://www.focusingoptics.com>.
- [24] Hashemi S E. Relative intensity noise (RIN) in high-speed VCSELs for short reach communication[D]. Chalmers: Chalmers University of Technology, 2012: 9-12.
- [25] Welch P. A fixed-point fast Fourier transform error analysis[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1969, 17(2): 151-157.
- [26] Urick V J, Devgan P S, McKinney J D, et al. Laser noise and its impact on the performance of intensity-modulation with direct-detection analog photonic links[R]. Washington, D.C.: Naval Research Laboratory, 2007.
- [27] 邹萌, 肖何, 宋青果, 等. 超窄线宽低噪声光纤激光技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(15): 1500002.  
Zhou M, Xiao H, Song Q G, et al. Review of ultra-narrow linewidth low-noise fiber laser technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 1500002.
- [28] 杨飞. 单频光纤激光器及光纤时频传递技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2013: 42-43.  
Yang F. Research on single-frequency fiber laser and fiber time-frequency transfer technology[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, 2013: 42-43.
- [29] Ronnekleiv E. Frequency and intensity noise of single frequency fiber Bragg grating lasers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, 7(3): 206-235.
- [30] Foster S, Cranch G A, Tikhomirov A. Experimental evidence for the thermal origin of  $1/f$  frequency noise in erbium-doped fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053802.
- [31] Foster S. Fundamental limits on  $1/f$  frequency noise in rare-earth-metal-doped fiber lasers due to spontaneous emission[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(1): 013820.
- [32] Pan Z Q, Zhou J, Yang F, et al. Low-frequency noise suppression of a fiber laser based on a round-trip EDFA power stabilizer[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(3): 035105.

## Measurement Technology of Laser Relative Intensity Noise at Low Frequency for Space-Based Gravitational Wave Detection

Hu Hailin<sup>1</sup>, Yu Yihang<sup>2</sup>, Chen Dijun<sup>2</sup>, Sun Guangwei<sup>2</sup>, Yang Kangwen<sup>1</sup>, Wei Fang<sup>2\*</sup>, Yang Fei<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Optical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

### Abstract

**Objective** Combined with current testing technology and space-based gravitational wave detection requirements, relative intensity noise (RIN) testing must cover the frequency range of 0.1 mHz–5 GHz. Currently, low-noise spectrum analyzer is used for RIN testing in the higher frequency band of 50 kHz–5 GHz, and relevant theories and testing methods are relatively mature. OEwaves of the USA SYCATUS of Japan and Shanghai Institute of Optical Machinery have launched corresponding standard test instruments. However, the current test methods in the low-frequency band are limited in the test band or have high background noise, which cannot fully meet the requirements of RIN low frequency band test and evaluation of laser light source for space-based gravitational wave detection. It is necessary to develop the low background noise measurement technology and complete and accurate evaluation standard of all low frequency band.

**Methods** In this study, the low-frequency RIN within 0.1 mHz–100 kHz is completely tested and characterized, and the background noise of the test system is reduced to form a standardized test system and test algorithm. First, based on low-noise photodetector, high-precision digital multimeter, Labview control data acquisition, and data processing algorithm programming, the test characterization of laser RIN in the frequency band of 0.1 mHz–0.5 Hz was realized. In the time domain, the high-precision acquisition was conducted using the Labview software to control DMM. The fast Fourier transform (FFT) algorithm was used to analyze the noise characteristics of the collected data in the frequency domain. The smoothing function of different resolutions was used in the calculation of RIN to ensure that the test results in the low-frequency band are not true, while the serious “trailing” phenomenon in the high-frequency band was reduced. Besides, frequency domain analysis can be performed immediately upon the



completion of the time domain collection, and the data can be stored in real time. Combined with the data of different sampling time, the accuracy of the very-low-frequency test results was verified. Second, FFT spectrum analyzer (SR770, Stanford Research Systems) was used to test the RIN of laser in the frequency band of 1 mHz–100 kHz. By adding low noise amplifier (LNA) into the test system, the background noise in the frequency band of 1 mHz–1 Hz was effectively reduced. The testing capacity was reduced by 18 dB. Finally, the consistency of the test results of the two test methods in the overlapping frequency band was compared to verify the uniformity and accuracy of the two test results. Finally, the low-background-noise RIN test band was expanded to 0.1 mHz–100 kHz. The RIN noise measurement system has the advantages of wide coverage of low-frequency band, high precision, and high accuracy. It can provide a standardized measurement means for the relative intensity noise of laser in space gravitational wave detection and can also be applied to other low-frequency precision measurement applications of laser light source noise assessment.

**Results and Discussions** According to the sampling time listed in Table 3, data segments ranging from 10000 s to 8000 s are captured to calculate the laser very-low-frequency RIN, respectively, and the results are shown in Fig. 7. It can be seen that the high-frequency “tail” after Smooth piecewise smoothing algorithm is only 2 dB; in the range of 0.04 Hz to 0.5 Hz, different data lengths have little influence on RIN results. However, in the frequency range of 0.1 mHz–0.04 Hz, the sampling time of 8000 s is significantly different from that of 10000 s, and more noise information can be detected at 80000 s. Moreover, Fig. 7 shows that the curves with the sampling time of 10000 s and 2000 s have poor coincidence compared with other long periods. This is because the short test time leads to fewer data points in the frequency band of 0.1 mHz–0.04 Hz, resulting in decreased accuracy. In combination with the abovementioned and theoretical analysis, it can be seen that the longer the sampling time, the more accurate the test results.

Figure 8(a) shows the RIN test results of two kinds of high-precision DMM and FFT spectrum analyzer simultaneously. Their test frequency bands cover 0.1 mHz–0.5 Hz and 1 mHz–100 kHz, respectively. As can be seen from Fig. 8(a), the two maintain a good consistency within 1 mHz–0.5 Hz in the overlapping frequency band, which on the one hand verifies the correctness of the test results. On the other hand, a complete test of RIN characteristics in the frequency band of 0.1 mHz–100 kHz can be completed by splicing the noise spectrum of the two test results. Figure 8(b) shows the complete relative intensity noise spectrum of the low-frequency band of 0.1 mHz–100 kHz obtained after splicing.

The test technique in this paper is applied to test the RIN of different types of lasers, and the characteristics of laser RIN in the low-frequency band are obtained to guide the development and optimization design of the laser and the parameter performance of the application system.

**Conclusions** Based on the strict demand for laser noise in space-based gravitational wave detection, we complete the establishment of low-background relative intensity noise test characterization system in the low-frequency band, background noise up to  $-99$  dBc/Hz@0.1 mHz,  $-165$  dBc/Hz@100 kHz. This technology converts the optical signal of the laser into an electrical signal based on low-noise photodetector and performs the complete and accurate characterization of intensity noise in the range of 0.1 mHz–100 kHz through the combination of high-precision DMM, FFT spectrum analyzer, and other test means. The RIN of four typical lasers is tested and analyzed. The main noise characteristics of each laser and the subsequent available intensity noise suppression technology are obtained, and according to the noise performance of the self-developed NPRO laser, the direction of improving the relative intensity noise in the very-low-frequency band is proposed in the next stage. The relative laser intensity noise characterization test can provide accurate and unified evaluation method for laser source noise level in space gravitational wave detection and provide reference for laser source noise suppression.

**Key words** single frequency laser; noise test; relative intensity noise; fast Fourier transform; space gravitational wave detection