

单频激光宽频段频率和强度噪声测量技术

张骥^{1,2}, 魏珊珊^{1,2}, 刘昊炜², 刘元煌^{1,2}, 姚波², 毛庆和^{1,2*}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 报道了一种 mHz 至 MHz 宽频段激光噪声的规范测量技术。通过研制基于迈克耳孙光纤干涉仪的相关延时自外差频率噪声测量装置和具有定标功能的光外差拍频测量装置, 结合频谱分析仪和快速傅里叶变换分析仪等标准仪器, 规范地测量出了单频激光在 mHz 至 MHz 宽频段内的频率和强度噪声特性, 并验证了测量结果的准确性。该测量技术有望应用于引力波探测和精密测量等应用中的激光噪声评估。

关键词 激光器; 单频激光器; 噪声测量; 强度噪声; 频率噪声

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0301002

1 引言

随着单频激光在精密测量^[1]、相干通信^[2]、激光雷达^[3]和光学传感^[4]等领域越来越广泛的应用, 人们逐渐开始重视其噪声性能。在高灵敏光学测量中, 需要激光源具有极低的强度噪声, 以获取高信噪比^[5]; 在相干精密测量中, 激光频率噪声则直接决定了探测灵敏度^[6]。精确测量与评估激光噪声性能是噪声抑制的基础和前提, 迄今, 人们已发展出了多种噪声测量方案^[7-14]。对于强度噪声测量, 通过采用低噪声光电探测器、由电学频谱分析仪(ESA)直接分析探测到的电信号^[7-8]、由快速傅里叶变换(FFT)分析仪^[9]或数字万用表(DMM)记录电信号的时间变化^[10]等方法, 可获得相对强度噪声(RIN)的功率谱。对于频率噪声测量, 一般通过构建的高稳定光学干涉仪, 记录外差干涉信号的相位随时间的波动, 再由干涉仪测量系统的相位传递函数, 反推出待测激光的相位或频率噪声^[11]。为精确测量激光的相位波动, 人们一直在着力提升干涉仪的稳定度, 还发展出了多种相位解调技术, 以抑制环境扰动对干涉仪测量稳定性的影响。例如, 在相位载波解调^[12]技术中, 通过主动反馈控制压电陶瓷(PZT), 使干涉仪

工作在正交状态, 从而补偿环境扰动对干涉仪臂长差的影响; 也可将干涉仪中分光合束器件改成 3×3 耦合器^[13-14], 其三路耦合输出端口之间的相位差稳定在 120° 的特点, 使得无需利用主动反馈控制就可滤除环境扰动对干涉仪臂长差的影响; 还可采用所谓的相关延时自外差技术^[15], 通过在干涉仪中引入声光调制器(AOM), 将干涉信号的频率移动至射频(RF)波段, 以抑制低频环境扰动对干涉仪稳定性的影响。但是, 在 Hz 以下的分析频率段, 频率噪声测量要求干涉仪臂长差长达数千米。而随着干涉仪臂长的增加, 环境噪声对干涉仪稳定性的影响将难以被有效消除, 基于干涉仪的频率噪声测量方法只能评估出 Hz 以上频段的噪声水平^[16]。随着引力波探测和新型精密测量应用需求的发展^[17], 需要精确评估激光源低至 mHz 频段的频率噪声行为^[18], 为此, 人们将传统外差拍频方法应用到低频段激光频率噪声测量中^[15], 但是, 该方法要求被测激光源为两台特性几乎完全相同的激光器, 或者至少一台为已知低频率噪声的参考激光源, 这给采用该方案精确测量频率噪声带来了困难。不仅如此, 这种光外差拍频技术受测试仪器的采样速率的限制, 只适合评估 100 Hz 以下频段的频率噪声, 不能满足高频段噪声的

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-13; 录用日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100, 2017YFB0405200)、中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB21010300)、国家自然科学基金(61805258, 61377044)、先进激光技术安徽省实验室主任基金(20191001)

*E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

测量需求。因此,为准确测量出 mHz 至 MHz 宽频段的完整频率和强度噪声性能,必须综合运用多种噪声测量方案。但是,采用不同方案进行分段测量时所用仪器的性能存在差异,因此需要将由不同方法分段测量获得的强度和频率噪声谱进行拼接,以便高精度地评估出单频激光的完整强度和频率噪声谱特性。

本文将展示一种旨在获取 mHz 至 MHz 宽频段激光频率和强度噪声特性的分段噪声测量规范。在该测量规范下,将研制基于迈克耳孙光纤干涉仪的相关延时自外差频率噪声测量装置和能对噪声进行定标的光外差拍频测量装置,结合 ESA 和 FFT 分析仪等标准仪器,最终实现对单频激光的宽频段频率(mHz 至 MHz)和强度噪声的测量。此外,对该噪声测量规范的有效性和准确度也进行了讨论和验证。

2 测量方案与仪器研制

高精度频率噪声测量需要高度稳定的干涉仪。图 1(a)为研制的相关延时自外差频率噪声测量系统的光纤干涉仪结构示意图,为基于标准单模光纤的迈克耳孙光纤干涉仪。选取迈克耳孙干涉仪的原因是:在相同探测灵敏度下,迈克耳孙干涉仪所需延迟光纤的长度仅为马赫-曾德尔干涉仪的一半^[11],从而使得测量系统受外界环境扰动的影响更小。干涉仪一臂中加入了一只频移量为 200 MHz 的声光调制器(AOM),从而可在 400 MHz 射频波段检测外差干涉信号,以克服零频检测受环境扰动影响大的缺点。考虑到待测激光在不同长度光纤构成的干涉仪两臂中传输时会因双折射引起的相位延迟量不同导致外差干涉信号检测中的偏振衰落,干涉仪两臂的反射镜均采用了法拉第旋转镜(FRM),以补偿这种偏振衰落。干涉仪由 50 : 50 光纤耦合器分光,直通和延时臂光纤长度分别为 1 m 和 101 m,对应的臂长差为 100 m。由该臂长差决定的干涉仪测量

带宽可达 420 kHz^[13,19],该臂长差还确保待测噪声经干涉仪系统转换成的相位噪声幅度较大,这有利于提升鉴相精度。为此,专门选用了基于平绕环圈和阻尼减震且整体密封的盒装结构的光纤延时模块。将构成干涉仪的光纤及器件机械固定在壁厚为 8 mm 的 260 mm×260 mm×200 mm 密闭铝盒中,铝盒外表覆有隔音毛毡和隔热棉,并带有主动温度控制,实测盒内温度控制波动小于 10 mK,铝盒对外界声波的抑制达 40 dB。将封装后的干涉仪放置在被动隔振平台(100BM-4, Minus K)上,该平台对 2~100 Hz 内振动加速度的衰减达 30 dB 以上。待测激光经干涉仪产生的外差信号由光电探测器(PD, ET3000A, EOT)探测,再由频谱分析仪(ESA, N9030A, Keysight)记录分析。在该测量系统研制中,通过在干涉仪两臂中加入相同的 100 m 长光纤延时线模块,并将臂长差控制在 0.05 m 以内,可实现对测量系统的本底噪声的评估。这时,因干涉仪两臂臂长和所用光纤相同,激光频率抖动在两臂上累积的相位几乎一致,检测到的外差干涉信号的相位噪声将不再包含待测激光本身的相位噪声,仅为干涉仪探测系统的本底噪声。实测的频率噪声测量系统的本底噪声为 $10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}@10 \text{ Hz}$ 、 $10^{-3} \text{ Hz}^2/\text{Hz}@1 \text{ kHz}$ 和 $0.025 \text{ Hz}^2/\text{Hz}@1 \text{ MHz}$,均远低于迄今报道的单频激光器在相应频段的频率噪声水平^[11]。所采用的多种稳定措施使得干涉仪的附加相位噪声低,且测量系统所用频谱分析仪的相位测量灵敏度高,经实验测量发现,测量系统在接近干涉仪的理论测量带宽上限 1 MHz 处依然具有足够高的鉴相精度,从而使得该测量系统可实现对高达 1 MHz 频率噪声的测量。因此,该频率噪声测量系统可满足 [10 Hz, 1 MHz] 范围的频率噪声评估。基于该方案分别搭建了 $1 \mu\text{m}$ 与 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的干涉仪系统,以实现多波段的单频激光频率噪声评估。

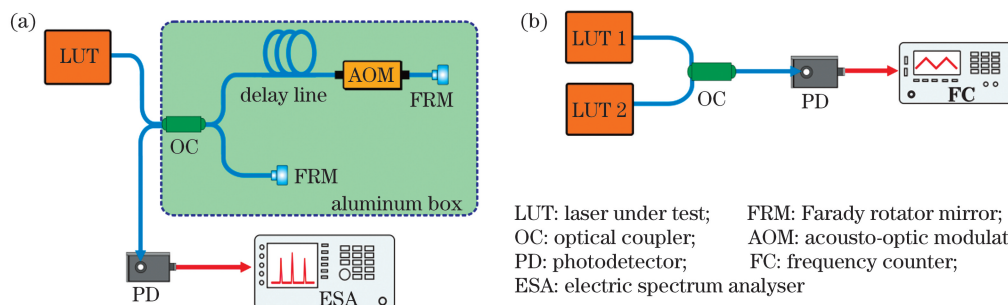


图 1 频率噪声测量系统示意图。(a) 基于迈克耳孙光纤干涉仪的相关延时自外差测量;(b) 外差拍频测量

Fig. 1 Schematic diagrams of frequency noise measurement system. (a) Correlation delay self-heterodyne measurement based on fiber-type Michelson interferometer; (b) heterodyne beat-frequency measurement

针对 10 Hz 以下频段的频率噪声测量,设计研制了两台性能几乎完全相同的分布 Bragg 反射 (DBR) 单纵模光纤激光器。这两台激光器的增益光纤、光纤光栅以及腔长几乎完全一致,其制作工艺和封装温控也完全相同,因此二者具有相似的噪声行为。利用图 1(b) 所示的外差拍频法测量系统,先测量出这两台 DBR 光纤激光器的低频段频率噪声谱。根据平方和噪声叠加原理^[20],每台激光器的噪声功率谱密度为实测噪声功率谱密度的 $1/\sqrt{2}$,从而得到标定了频率噪声的参考激光源。再将该参考激光与待测激光按照图 1(b) 所示方法进行外差拍频测量,同样根据平方和噪声叠加原理,获得待测激光的频率噪声谱。在图 1(b) 所示的外差拍频测量系统中,光纤耦合器的耦合比为 50 : 50,光电探测器 (PD, ET3000A, EOT) 的带宽为 1.5 GHz, 6 GHz 的频率计数器 (FC, 53220A, Agilent) 用于记录拍频信号频率随时间的变化,由 FFT 算法得到频率噪声功率谱。该测量系统的频率噪声谱测量范围由频率计数器的计数速率和总测量时间共同决定,所用频率计数器在外部存储模式下的最大频率计数速率约为 200 Hz,根据奈奎斯特定理,傅里叶变换决定的频率噪声功率谱测量的上限频率为 100 Hz,而通过增大总测量时间(如大于 1000 s)可实现对低至 1 mHz 处的频率噪声功率谱的测量。

在激光的 RIN 测量中,利用低噪声光电探测器 (PD, PDA-10CF-EC, Thorlabs) 将 RIN 转换成电信号后,由 ESA 直接测量 RIN 功率谱。所用的 ESA 在 GHz 高频段的噪声极低 (-171 dBm@1 GHz),但其在 10 kHz 以下频段的噪声相对较高,从而适用于 10 kHz 以上频段的 RIN 分析。所用探测器的带宽为 150 MHz,对于大多数单频激光,其 RIN 在 150 MHz 分析频率处时早已接近散粒噪声极限。10 kHz 以下频段的 RIN 谱由 FFT 分析仪或基于 DMM 的方法测量。所用 FFT 分析仪 (SR770, Stanford Research Systems) 带有高精度的 16 位模数转换器 (ADC) 和具有滤波、外差以及傅里叶变换等运算功能的数字信号处理器 (DSP),可方便地实现低至 mHz (最低约 476 μ Hz) 处的 RIN 测量,但受其 ADC 采样速率的限制,难以实现 100 kHz 以上频段的 RIN 评估;同样地, DMM 则通过记录电信号电压随时间的变化,再由 FFT 算法计算出 RIN 功率谱,这与频率计数器对低频频率噪声的测量相似,从而确保在较长的总测量时间内可评估低至 1 mHz 处的 RIN 功率谱,但受 DMM (GDM-9060,

Gwinstek) 电压计数速率的限制,可测量的最大 RIN 功率谱范围为 100 Hz。RIN 中的直流分量大小由 DMM 长期观测得到的电压均值确定。实际测得的 RIN 功率谱均已扣除测量系统本身的本底噪声。

在上述噪声测量方案中,频率和强度噪声均由不同测量方案的分段测量获得,因此,需对测得的不同频段噪声谱进行频谱拼接。基于干涉仪的相关延时自外差测量系统有效抑制了环境噪声,且利用性能几乎完全相同的两台激光器定标了光外差拍频测量所需的已知参考激光器,这使得这两套系统测得的高低频段噪声谱在重叠区域的幅度差异小,且无明显阶跃。因而,在频率噪声谱拼接中可采用直接平均法进行频谱拼接,即保留非重叠区域实测的各自频谱值,重叠区域频谱值由直接平均值替代。而对于强度噪声谱的拼接,所用仪器的测量精度不同,导致了测得的噪声谱在重叠区域存在一定的差值,频谱拼接时选用了渐入渐出拼接法^[21],这时可保留不同方法实测的非重叠区域频谱值,但在重叠区域,则由该区域对应的频率上下限 f_{\max} 和 f_{\min} 分别构造出对应低频段和高频段噪声谱 $RIN_{LO}(f)$ 和 $RIN_{HI}(f)$ 的加权因子 $\sigma_1(f) = (f_{\max} - f) / (f_{\max} - f_{\min})$ 和 $\sigma_2(f) = 1 - \sigma_1(f)$,再由 $RIN(f) = \sigma_1(f) \cdot RIN_{LO}(f) + \sigma_2(f) \cdot RIN_{HI}(f)$ 计算出重叠区域的频谱数据。

3 测试结果与讨论

选取 NP Photonics 公司商售的 1064 nm 单频 DBR 光纤激光器作为待测光源,厂家已给出该激光源在若干典型傅里叶频率处的噪声数据,从而便于通过比对来考查本文测量系统所测结果的可信度。首先,利用研制的基于迈克耳孙干涉仪的频率噪声测量系统,测量出 [10 Hz, 1 MHz] 频段内的频率噪声谱,结果如图 2 所示,该频率噪声谱已扣除了干涉仪系统本底相位噪声。由图可见,随着分析频率由 10 Hz 逐渐增大至 10^6 Hz,频率噪声呈现出接近于 $1/\sqrt{f}$ 的下降趋势,这与文献 [22] 报道的结果相吻合;频率噪声谱中 100 Hz~2 kHz 处的零乱尖峰源于残余声学噪声的影响^[23]。通过与厂家给出的 10 Hz、100 Hz、1 kHz、10 kHz 和 100 kHz 处的频率噪声值进行对比可见,本文测量系统的所得结果与厂家数据一致,表明在构建干涉仪系统时采取的隔声、隔振、温控等抑制环境扰动措施有效,这些措施确保了干涉仪受本底噪声的影响小、测量结果准确可信。

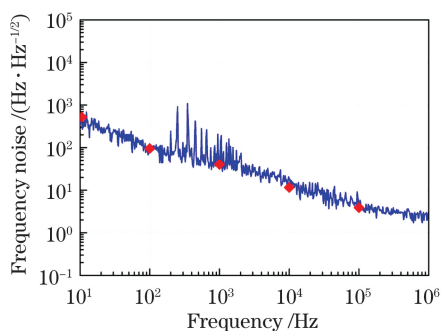


图 2 基于相关延时自外差法测得的频率噪声谱,其中菱形点为厂家提供的数据

Fig. 2 Frequency noise spectrum measured with correlation delay self-heterodyne method. Diamond points show data provided by supplier

图 3 中的虚线为采用外差拍频法测得的研制的两台 1064 nm 参考激光器在 [1 mHz, 100 Hz] 频段的频率噪声谱,可见,在 1 mHz~100 Hz 范围内,参考激光器的频率噪声水平由 $7 \times 10^6 \text{ Hz}^{-1/2}$ 缓慢下降至 $2 \times 10^2 \text{ Hz}^{-1/2}$ 。值得注意的是,因两台激光器的性能几乎完全相同,这种方法测得的参考激光器的频率噪声谱相当于已对其噪声进行了定标后的频率噪声谱。参考激光器的噪声水平与目前低噪声单频激光器的噪声水平相当(因确保这两台激光器性能几乎完全一致,故未对其噪声专门进行抑制),因此可用于外差拍频测量、获取待测激光的噪声。利用这两台参考激光源,再通过外差拍频法对待测激光的频率噪声谱进行测试,图 3 中的点线和实线分别为两台参考激光器测得的待测激光在 [1 mHz, 100 Hz] 范围内的频率噪声谱。可见,采用这两台参考激光器测得的待测激光频率噪声谱几乎完全一致,表明所研制的两台参考激光器的性能具有很好的一致性,这不仅确保了由外差拍频法对参考激光器的频率噪声谱进行定标的准确性,而且也保证了

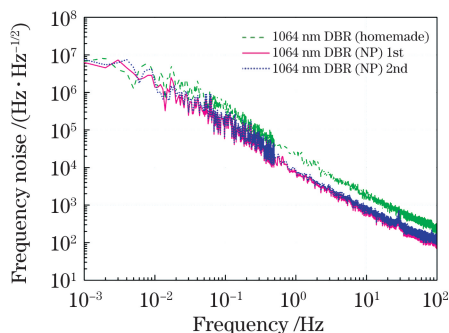


图 3 由光外差拍频法测得的低频段频率噪声谱

Fig. 3 Frequency noise spectra measured with optical heterodyne beat-frequency method

由它们作为参考激光测量待测激光频率噪声谱的准确性。由图 3 还可看出,在 [1 mHz, 100 Hz] 频段内,待测激光的频率噪声由 $7 \times 10^6 \text{ Hz}^{-1/2}$ 以 $1/f$ 趋势缓慢下降至 $10^2 \text{ Hz}^{-1/2}$,这与文献[10]报道的结果也相符,从而也表明了本文测量系统的低频段频率测量结果的可信性。

通过比较图 2 和图 3 所示的频率噪声谱,发现两种测量方法测得的频率噪声谱在 10 Hz~100 Hz 内基本一致,这既印证了高低频段测量系统本身的优良特性,也证实可以采用直接平均法进行频谱拼接。图 4 中实线为基于分段测量结果并由直接平均法进行频谱拼接后获得的待测激光器在 1 mHz~1 MHz 宽频段的频率噪声谱,可见,10~100 Hz 重叠区域的噪声谱展现了无拼接痕迹的光滑谱曲线。图 4 也给出了自主研制的 1064 nm (虚线) 和 1560 nm (点线) DBR 光纤激光器的全频段频率噪声功率谱,其中,自制的 1560 nm 激光器的输出功率低,为评估频率噪声,在自制激光器内嵌入一个光纤放大器,相较于商售的 1064 nm 激光器,所研制的 1064 nm 激光器在 0.05~200 Hz 中低频段的噪声水平略高,这可能是由未充分抑制振动、声波等技术噪声所致。但是,所研制的 1560 nm 激光器在全频段展现出了比商售和自研的 1064 nm 激光器更佳

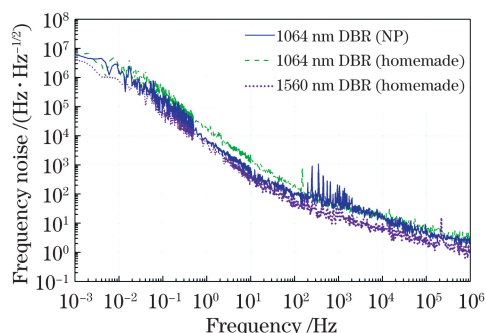


图 4 1 mHz~1 MHz 频率范围内的频率噪声谱

Fig. 4 Measured frequency noise spectrum in frequency range of 1 mHz-1 MHz

图 5(a)为采用 ESA 测得的已扣除测量系统本底噪声后的商用待测 1064 nm 激光器在 [10 kHz, 50 MHz] 内的 RIN 功率谱。可见,弛豫振荡峰出现在 1 MHz 附近;低于 1 MHz 时,RIN 处在 $1 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$ 水平;高于 1 MHz 时,RIN 随分析频率的增大而降低;频率增大至 20 MHz 时,RIN 接近散粒噪声极限 $2 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。图 5(a)中也给出了厂家提供的若干典型傅里叶频率处的 RIN 值(圆点),可见,本文测量结果与厂家提供的

RIN 数据一致,表明基于 ESA 的测量方法所得结果的准确性。图 5(b)为分别采用 FFT 分析仪和 DMM 方法测得的待测激光在低频段的 RIN 功率谱,图示结果同样也已扣除了测量系统的本底噪声。由图可见,采用 FFT 分析仪可以测得 [1 mHz, 100 kHz] 频段内的 RIN 谱,在 1 mHz~0.05 Hz 频段,受低频环境温度漂移等影响^[24],RIN 谱基本处在 $1.5 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ 水平;随着傅里叶频率由 0.05 Hz 增大至 1 kHz,RIN 同样以 $1/f$ 的趋势逐渐减小至 $10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$,且在 100 Hz~2 kHz 范围也出现了残余声学噪声引起的尖峰;而高于 1 kHz 后,测得的 RIN 处在 $1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$ 水平,

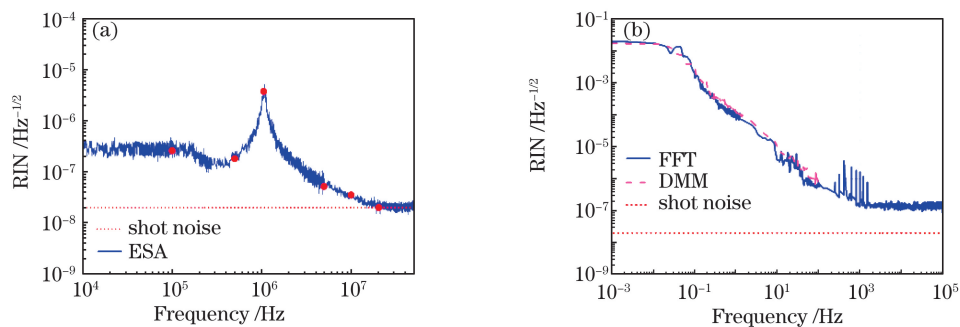


图 5 相对强度噪声谱。(a)基于 ESA 测得的 RIN 谱,其中圆点为厂家提供的数据;(b)基于 FFT 分析仪与 DMM 测得的 RIN 谱

Fig. 5 RIN spectra. (a) Measured RIN spectrum with ESA. Dots show data provided by supplier; (b) measured RIN spectra with FFT analyser and DMM

FFT 分析仪相较 DMM 方法所能测量的 RIN 谱的最大傅里叶频率更高,从而利于实现 FFT 分析仪测得的 RIN 谱与 ESA 方法测得的 RIN 谱之间的高精度频谱拼接。通过在 $10^4 \sim 10^5$ Hz 重叠区域应用前述渐入渐出的拼接算法,容易得到待测激光器在 1 mHz~50 MHz 宽频段内的相对强度噪声谱,如图 6 中实线所示。可见,在重叠区域,两端拼接处 RIN 谱过渡平滑,无拼接痕迹。实现无缝拼接的原因是本文测量已扣除了 ESA 和 FFT 测量系统本身的本底噪声,导致两种测量在重叠区域的 RIN 水平相差无几,且走势一致,但是两台测量设备的测量精度不同,使得采用渐入渐出的拼接法可以获取无拼接痕迹的全频段相对强度噪声功率谱。此外,图 6 中还给出了自主研发的 1064 nm(虚线)和 1560 nm(点线)DBR 光纤激光器在宽频段内的 RIN 功率谱,因商用 1064 nm 光纤激光器采用的是大增益磷酸盐增益光纤,弛豫振荡峰处在 1.1 MHz 处,低于所研制的 1064 nm 硅酸盐增益光纤激光器的弛豫振荡峰所处的频率(1.5 MHz),且前者的强度噪声

与图 5(a)中 ESA 方法在该频段测得的 RIN 水平接近。虽然无厂家数据用于与测得的待测激光低于 100 kHz 的低频段结果的比对,但 FFT 方法与 ESA 方法在 [10 kHz, 100 kHz] 频段内测得结果的一致性,也可间接地表明 FFT 分析仪所得结果的可信度。不仅如此,还可将 FFT 分析仪方法所得结果与 DMM 测量结果进行比对,以进一步验证所得结果的可信性。尽管 DMM 因受电压计数速率的限制,只能测得 [1 mHz, 100 Hz] 频段的 RIN 谱,但在该频段,采用 FFT 分析仪和采用 DMM 方法所得的测量结果完全一致,这也从侧面表明本文测得的待测激光在低频段的 RIN 的可信性。

低于后者;但是,得益于高 Q 值的腔结构设计,自研的 1560 nm 光纤激光器的总体噪声性能最优,弛豫振荡频率也最低^[25],并且放大后的噪声性能也未见明显变化。

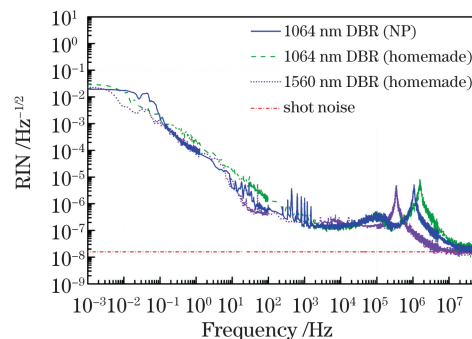


图 6 1 mHz~50 MHz 频段范围内的相对强度噪声谱
Fig. 6 Measured RIN spectra in frequency range of 1 mHz~50 MHz

4 结 论

宽频段激光频率和强度噪声难以由单一测量技术进行评估,必须运用不同测量方案的分段测量和

频段拼接来获取。一种有效的宽频段噪声测量规范是:采用基于参考激光的光外差拍频法和基于光纤干涉仪的相关延时自外差法分别测量出低频段和高频段频率噪声谱,再通过直接平均法进行频段拼接,从而获得 mHz 至 MHz 宽频段的频率噪声特性;通过采用 FFT 分析仪和 ESA 分别测量低频段和高频段 RIN 谱,再由渐入渐出拼接法获得 mHz 至 MHz 宽频段 RIN 谱。根据该测量规范,研制了一种基于迈克耳孙光纤干涉仪的高精度相关延时自外差频率噪声测量装置,并研制出两只性能相同的光纤激光器,经噪声定标后构建出了外差拍频测量装置,结合 ESA 和 FFT 分析仪等标准仪器,实现了对单频激光的[mHz, MHz]宽频段频率和强度噪声的测量。通过将测量结果与厂家数据进行对比,验证了该宽频段噪声测量规范的有效性和准确度,这为引力波探测和新型精密测量应用中的激光噪声评估提供了一种参考。

参 考 文 献

- [1] Yu A W, Krainak M A, Stephen M A, et al. Fiber lasers and amplifiers for space-based science and exploration [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8237: 823713.
- [2] Okoshi T. Recent advances in coherent optical fiber communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(1): 44-52.
- [3] Karlsson C J, Olsson F Å A, Letalick D, et al. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(21): 3716-3726.
- [4] Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(9): 1827-1829.
- [5] Buchler B C, Huntington E H, Harb C C, et al. Feedback control of laser intensity noise [J]. *Physical Review A*, 1998, 57(2): 1286-1294.
- [6] Dandridge A, Tveten A B. Phase noise of single-mode diode lasers in interferometer systems [J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(7): 530-532.
- [7] Harb C C, Gray M B, Bachor H A, et al. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped neodymium: YAG nonplanar ring laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(12): 2907-2913.
- [8] Shi S P, Yang W H, Zheng Y H, et al. Noise analysis of single-frequency laser source in preparation of squeezed-state light field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701009.
- [9] Scott R P, Langrock C, Kolner B H. High-dynamic-range laser amplitude and phase noise measurement techniques [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(4): 641-655.
- [10] Numata K, Yu A W, Camp J B, et al. Laser system development for gravitational-wave interferometry in space [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10511: 105111D.
- [11] Llopis O, Merrer P H, Brahim H, et al. Phase noise measurement of a narrow linewidth CW laser using delay line approaches [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2713-2715.
- [12] Zhao Q, Zhang Y, Lin W, et al. Frequency noise of distributed Bragg reflector single-frequency fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12601-12610.
- [13] Xu D, Lu B, Yang F, et al. Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a 3×3 fiber coupler [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0102004.
- [14] Zhang X, Feng Z T, Zhao J J, et al. Real-time dynamic phase-frequency noise characteristics of linear frequency-swept lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901004.
- [15] Camatel S, Ferrero V. Narrow linewidth CW laser phase noise characterization methods for coherent transmission system applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(17): 3048-3055.
- [16] Xu D, Yang F, Chen D, et al. Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a 3×3 optical fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22386-22393.
- [17] Sutton A, McKenzie K, Ware B, et al. Laser ranging and communications for LISA [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 20759-20773.
- [18] Bender P, Brillet A, Ciufolini I, et al. Lisa pre-phase a report [J]. *Max-Planck Institut für Quantenoptik*, 1998, 208: 57-61.
- [19] Dong J, Hu Y, Huang J, et al. Subhertz linewidth laser by locking to a fiber delay line [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 1152-1156.
- [20] Yariv A, Yeh P. *Optical electronics in modern*

- communications[M]. 6th ed. Chen H M, Shi W H, Wang J L, et al, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 15-28.
- 阿曼·亚里夫, 波奇·耶赫. 现代通信光电子学[M]. 6 版. 陈鹤鸣, 施伟华, 汪静丽, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014: 15-28.
- [21] Szeliski R. Video mosaics for virtual environments [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(2): 22-30.
- [22] Spiegelberg C, Geng J H, Hu Y D, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57-62.
- [23] Rønnekleiv E. Frequency and intensity noise of single frequency fiber Bragg grating lasers[J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(3): 206-235.
- [24] Peterseim M, Brozek O S, Danzmann K, et al. Laser development and laser stabilization for the spaceborne gravitational wave detector LISA [C]. AIP Conference Proceedings, 1998, 456(1): 148-155.
- [25] Yariv A. Quantum electronics [M]. 2nd ed. Liu S H, Wu C K, Wang M C, Transl. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1983: 282-284.
- 阿曼·亚里夫. 量子电子学[M]. 2 版. 刘颂豪, 吴存凯, 王明常, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 282-284.

Measurement Technique for Broadband Frequency and Intensity Noise of Single-Frequency Laser

Zhang Ji^{1,2}, Wei Shanshan^{1,2}, Liu Haowei², Liu Yuanhuang^{1,2}, Yao Bo², Mao Qinghe^{1,2*}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract

Objective In recent years, single-frequency lasers have been widely used in the fields of fiber communication, lidar, and fiber sensors due to their narrow linewidth and good stability. However, in high-precision applications, such as precise spectral measurement, gravitational-wave detection, and high-precision frequency transfer, noise characteristics are also important parameters and worth further optimization. High-precision measurement of single-frequency laser noise is the basis of laser noise analysis. So far, the current noise measurement method usually evaluates noise performance in a specific frequency band and hence it becomes difficult to cover the whole mHz to MHz frequency range. To realize broadband noise measurement, it is necessary to adopt segmented measurement schemes and use spectrum splicing techniques. However, there is still a lack of standard measurement schemes for obtaining the broadband noise spectrum. In this paper, a standard measurement technique for mHz to MHz broadband laser noise is reported.

Methods Among the various methods of frequency noise measurement, the optical heterodyne beat-frequency method is suitable for measuring low frequency noise, but the maximum measurement range is limited, and the correlation delay self-heterodyne measurement technique based on a fiber-type interferometer is quite suitable for high-frequency noise measurements above 1 Hz. Therefore, a correlation delay self-heterodyne measurement system based on a fiber-type Michelson interferometer [Fig. 1(a)] is designed and developed for measuring high-frequency noise by suppressing environmental noise through passive control techniques such as sound insulation, vibration isolation, and temperature control, where the 10 Hz–1 MHz spectral range can be successfully measured. The optical heterodyne beat-frequency method [Fig. 1(b)] is used to measure low frequency noise by the beating of two self-developed DBR fiber lasers with similar performance, where a reference laser with calibrated frequency noise can be obtained. The laser to be tested is beating against the reference laser to achieve frequency noise measurements in the low frequency range of 1 mHz–100 Hz. By using the direct average method, the spectra measured by these two methods can be spliced together smoothly, and the frequency noise measurement in the frequency range of 1 mHz–1 MHz can be ultimately realized.

For measuring relative intensity noise, the direct measurement method based on the electric spectrum analyzer is used in the high-frequency range, and the digital measurement method based on the digital multimeter and FFT analyzer is used for frequencies lower than 10 kHz. Combining these two noise measurement techniques and using the

gradual in and out spectrum splicing method, the relative intensity noise spectrum in the frequency range of 1 mHz–50 MHz is obtained.

Results and Discussions Using the measurement schemes mentioned above, we evaluate the noise spectral characteristics of a single-frequency DBR fiber laser from NP photonics. We measure the frequency noise spectra with the developed correlation delay self-heterodyne method (Fig. 2) and beat frequency method (Fig. 3), respectively. And we measure the RIN spectra by the ESA [Fig. 5(a)] and FFT analyzer [Fig. 5(b)]. The measurement results are compared with the data provided by the supplier and the results reported in the related literature. At the same time, through mutual verification between different schemes, the reliability and accuracy of our measurement systems are verified. The frequency noise spectra (Fig. 4) and RIN spectra (Fig. 6) in the frequency range of mHz to MHz after spectrum splicing are obtained. It can be seen that the overlapping area in the spectrum shows a smooth curve without splicing traces. In addition, we also evaluate the broadband noise characteristics of our self-developed 1064 nm and 1560 nm single-frequency DBR fiber lasers. Compared with a commercial NP laser, our self-developed 1560 nm single-frequency DBR fiber laser shows better noise performance over a wide frequency range.

Conclusions A standard technique for measuring single-frequency laser frequency and intensity noise in an ultra-wide Fourier-frequency range from mHz to MHz is presented in this paper. We successfully measure both the frequency noise and intensity noise spectral characteristics of single-frequency lasers in a Fourier-frequency range of mHz to MHz, using two established measurement systems in conjunction, namely, a correlation delay self-heterodyne frequency noise measurement system based on a fiber-type Michelson interferometer and an optical heterodyne beat-note measurement system with calibration function, combined with common analysis instrument. The accuracy of our measurement results has been verified. This presented method may be used for laser noise evaluation in various applications such as gravitational-wave detection and precision measurement.

Key words lasers; single-frequency laser; noise measurement; intensity noise; frequency noise

OCIS codes 140.3460; 300.6310; 300.6360