

极低本底单频激光相对强度噪声测试方法研究

虞逸航¹, 胡海林^{1,2}, 陈迪俊¹, 魏芳¹, 杨飞^{1*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所中科院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;²上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对高速光通信和微波光子系统对单频激光源极低相对强度噪声(RIN)的需求,开展了极低本底相对强度噪声测试方法的研究。首先分析了相对强度噪声测试中激光相对强度噪声、系统散粒噪声和热噪声等主要要素的影响,然后提出了基于增大光电流并结合低热噪声的频谱探测的方式降低测量极限的方法,实现了极低本底单频激光相对强度噪声测试,频谱分析频段可达到 40 GHz,测量本底达 -171 dBc/Hz。基于该方法和系统,更加精细地研究、表征了光通信中的光放大和强度调制过程的相对强度噪声特征,清晰地展示了极低本底下典型激光光源的噪声滚降和多个弛豫振荡峰、强度调制谐波失真等特性,证实了极低本底噪声测量方法的有效性。研究结果在激光器性能的设计优化和应用系统的选型评估等方面具有重要的应用前景。

关键词 激光器; 单频激光器; 噪声测试; 相对强度噪声; 高速光通信; 微波光子

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230592

1 引言

窄线宽单频激光器在相干光通信、相干激光雷达、微波光子、光纤传感等领域有着十分重要的地位^[1-7]。单频激光器的强度噪声是评价其性能的重要指标,比如:在高速光通信系统中,最大传输速率决定于信道带宽和信噪比,而激光强度噪声直接影响系统的信噪比,从而影响通信速率的提升^[8];在微波光子系统中,激光强度噪声直接影响系统的噪声系数^[9]。因此,对单频激光器进行强度噪声的精确评估具有重要意义,是改进和优化激光器的基础和前提,也是促进和改善应用系统设计的重要依据。同时,应进一步降低强度噪声测试系统的测量本底,以满足先进单频激光器的测试需求。

通常使用相对强度噪声(RIN)来表征激光器的强度噪声,而对于单频激光相对强度噪声的测试,目前已有许多研究^[10-12]。2009年,Rubiola等^[13]利用交叉谱法对激光强度噪声进行了测量,该方法可使测量系统不受单通道噪声的限制,并在 10 Hz~100 kHz 频段内达到了 -147 dBc/Hz 的测量本底。2011年,Singley等^[14]对应用于模拟光子链路的典型激光器进行了噪声测试,结果显示:强度噪声测试系统达到了 10 kHz~40 GHz 测量频段和 -165 dBc/Hz 测量本底的指标,展现了不同类型典型激光器的强度噪声特性。2021年,张骥

等^[15]报道了一种 mHz 至 MHz 宽频段的强度噪声测试技术,对比了数字万用表、频谱分析仪、FFT 频谱分析仪等多种测试仪器的强度噪声测试频段并进行了曲线的平滑拼接,实现了 1 mHz~50 MHz 范围内 -155 dBc/Hz 测量本底的相对强度噪声测试。这些研究报道针对不同性能水平的单频激光器搭建了相对强度噪声测试系统,可以测量单频激光器的噪声特性,但是测量频段和本底噪声性能不足,难以完整准确地表征极低噪声单频激光器的相对强度噪声特性。

为了进一步将单频激光相对强度噪声测量本底降低到 -165 dBc/Hz 以下,笔者对极低本底噪声测量方法和测量系统展开研究。首先分析测试方法的噪声产生机理和来源,提出了由光电探测器产生高光电流,同时结合低噪声频谱分析仪来降低系统散粒噪声极限和热噪声极限的解决方法,并搭建了 40 kHz~40 GHz 的测量系统,其本底噪声为 -171 dBc/Hz;然后基于该方法和系统,对极低相对强度噪声激光器的强度噪声性能进行了测量和表征,具体包括光纤和空间光通信常用的三类典型激光器的激光相对强度噪声特征以及强度调制过程中的谐波特征。

2 测量原理与实验验证

2.1 方法与系统

激光相对强度噪声定义为激光功率波动的功率谱

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-03-19; 录用日期: 2023-03-23; 网络首发日期: 2023-04-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902503, 2020YFC2200302)、国家自然科学基金(12293033)、中国科学院先导项目(XDB43030401)、中国科学院青年创新促进会项目(YIPA2019251)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20210017)

通信作者: *fyang@siom.ac.cn

密度与平均功率之比,其线性坐标和对数坐标形式^[16]分别表示为

$$S_{\text{RIN}}(f) = \frac{S_{\Delta P}(f)}{\bar{P}} = \frac{S_{\Delta P}(f)}{I_{\text{dc}}^2 Z_{\text{out}}}, \quad (1)$$

$$S_{\text{RIN}}(f) = 10 \lg \left[\frac{S_{\Delta P}(f)}{I_{\text{dc}}^2 Z_{\text{out}}} \right] =$$

$$10 \lg [S_{\Delta P}(f)] - 10 \lg (I_{\text{dc}}^2 Z_{\text{out}}), \quad (\text{dBc/Hz}), \quad (2)$$

式中: f 表示频谱分析的偏置频率; $S_{\Delta P}(f)$ 表示光功率波动的功率谱密度,即某频率 f 处 1 Hz 带宽内的光功

率波动; \bar{P} 表示光平均功率; I_{dc} 为光电探测器产生的光电流; Z_{out} 为光电探测器的负载阻抗。

通过对 I_{dc} 、 Z_{out} 、 $S_{\Delta P}(f)$ 三个物理量进行测试,可以得到激光相对强度噪声,测试系统基本结构如图 1 所示。待测激光经过光电探测器后产生光电流,光电流经偏置器(Marki BTN-0040)分离出交流量与直流量,其中:直流量用高精度数字万用表(keysight 34410A)采集,得到 I_{dc} ;交流量用频谱分析仪进行频谱分析,得到 $S_{\Delta P}(f)$ 。光电探测器负载阻抗 Z_{out} 须事先标定,最后由计算机完成激光相对强度噪声 $S_{\text{RIN}}(f)$ 的计算。

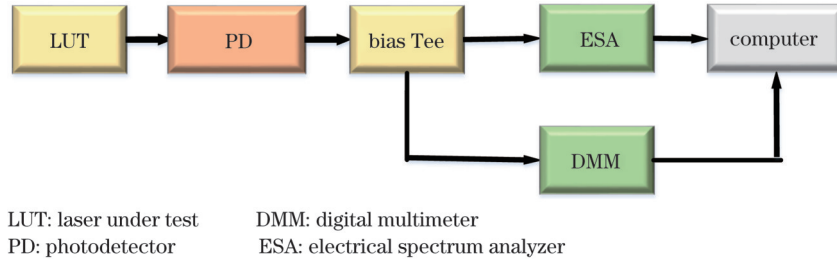


图 1 极低本底单频激光相对强度噪声测试系统

Fig. 1 Ultra-low background single-frequency laser relative intensity noise measurement system

但是测试得到的 $S_{\text{RIN}}(f)$ 除了含有激光相对强度噪声之外,还含有各物理量的测量噪声,包括光电探测器光电流 I_{dc} 产生过程中的散粒噪声、测试系统中元器件产生的热噪声、 $S_{\Delta P}(f)$ 分析过程中的热噪声、 I_{dc} 的测量误差和 Z_{out} 的标定误差等,这些测量噪声决定了测试系统的本底噪声极限。测量噪声越小,本底噪声极限就越小, $S_{\text{RIN}}(f)$ 就越能正确地反映激光的相对强度噪声。若 $S_{\text{RIN}}(f)$ 中的测量噪声大于激光强度噪声,测量结果就不能反映真实的激光相对强度噪声的大小。

首先分析光电探测器产生光电流过程中的散粒噪声。散粒噪声是探测器在光辐射作用或热激发等条件下随机产生的光生载流子或光电子导致的,从随机涨落的均方偏差中可以求出散粒噪声的电流谱密度为 $i_{\text{shot}}^2 = 2eI_{\text{dc}}$,其中 e 是电荷常数, I_{dc} 是探测器产生的平均光电流。结合式(1)、(2)所示的相对强度噪声的定义公式,可以得出散粒噪声(RIN_{shot} ,在公式中记为“ N_{shot} ”)在激光相对强度噪声测试结果中的大小^[17],表示为

$$N_{\text{shot}} = \frac{i_{\text{shot}}^2 Z_{\text{out}}}{I_{\text{dc}}^2 Z_{\text{out}}} = \frac{2e}{I_{\text{dc}}}, \quad (1/\text{Hz}), \quad (3)$$

$$N_{\text{shot}} = 10 \lg \left(\frac{2e}{I_{\text{dc}}} \right) = -155 - 10 \lg (I_{\text{dc}}), \quad (\text{dBc/Hz}). \quad (4)$$

可以看出,激光相对强度噪声中的光电探测器散粒噪声分量只与光电流 I_{dc} (单位为 mA)有关,光电流越大,测试系统的散粒噪声越低。光电流与入射光功率成正比,为了增加光电流,需要增大入射光功率和光电转换效率。表 1 列出了 Discovery、Thorlabs、中国电子科技集团公司第四十四研究所(以下简称“中电科四十四所”)生产的 3 款典型高带宽 InGaAs 光电探测器的输出光电流及其对应的散粒噪声极限。目前,商用光电探测器的输出光电流一般在 10 mA 以下,限制了散粒噪声的测量极限。为此,笔者向中电科四十四所定制了一款大电流 InGaAs 光电探测器,其响应波长为 800~1700 nm,暗电流为 20 nA,光电响应度在 0~50 mW 光功率下为 0.8 A/W@1550 nm,并保持良好的线性度;当输入光功率为 50 mW 时,该光电探测器的输出光电流可达到 40 mA,对应的散粒噪声测量极限为 -171 dBc/Hz。

表 1 高带宽 InGaAs 光电探测器的散粒噪声极限

Table 1 Shot noise limit of high bandwidth InGaAs photodetectors

Manufacturer	Model	Max photocurrent* $I_{\text{dc}} / \text{mA}$	Shot noise limit $\text{RIN}_{\text{shot}} / (\text{dBc} \cdot \text{Hz}^{-1})$
Discovery	DSC10H	10	-165.0
Thorlabs	DX20AF	9	-164.5
CETC	PD-18G-V	6	-162.7
	Custom one of this work	40	-171.0

Notes: the symbol * represents that the maximum photocurrent is obtained from datasheets.

接着分析测试系统(包括所有的元器件以及频谱分析系统)的热噪声。热噪声主要是由耗散元件中电荷载流子的随机热运动引起的。光电探测器和偏置器的热噪声功率谱密度为 $S_{th} = K_B T$, 其中 K_B 为玻尔兹曼常数, T 为光电探测器和偏置器的绝对温度。同样, 结合相对强度噪声的定义方式, 用 RIN_{th} (在公式中简称为“ N_{th} ”) 表示光电探测器和偏置器的热噪声总和在相对强度噪声测试结果中的大小, 即

$$N_{th} = \frac{2K_B T}{I_{dc}^2 Z_{out}}, (1/Hz)。 \quad (5)$$

在常温环境下, 取 $T=293 \text{ K}$, $Z_{out}=50 \Omega$, 于是

$$N_{th} = -157.8 - 20\lg(I_{dc}), (dBc/Hz)。 \quad (6)$$

表 2 列出了不同光电流 I_{dc} 下的热噪声大小, 可以看出: 在 10 mA 或以上的光电流下, 光电探测器和偏置器热噪声总和小于 -177.8 dBc/Hz , 对测试结果的

表 3 常用频谱分析仪的热噪声水平

Table 3 Thermal noise level of common spectrum analyzers

Model	Manufacturer	Thermal noise floor / (dBm·Hz ⁻¹)
SR770	Stanford Research Systems	-155
RTSA-R5550	ThinkRF	-145
FPL1000	Rohde & Schwarz	-156
N9040B	Keysight	-160

表 4 列出了不同光电流 I_{dc} 下 N9040B 频谱分析仪的热噪声在相对强度噪声测试结果中的大小, 可以看出频谱仪的热噪声比元器件的热噪声更大, 主导了测试系统的热噪声测量极限。

表 4 各光电流下的频谱仪热噪声在相对强度噪声测试结果中的大小

Table 4 Thermal noise of spectrum analyzer in the results of relative intensity noise under each photocurrent

I_{dc} / mA	$RIN_{ESA} / (\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1})$
1	-141
5	-155
10	-161
40	-173

最后分析负载阻抗 Z_{out} 的标定误差和光电流 I_{dc} 的测量误差。本文实验中选用阻抗为 50Ω 的光电探测器, 选用 1% 精度的贴片电阻使阻抗标定误差控制在 1% 以内。同时采用 6 位半的高精度数字万用表对光电流 I_{dc} 进行测试, 测试误差小于 0.0015%。20 nA 的暗电流对于 40 mA 光电流的测试来说, 影响小于 0.000005%, 可以忽略不计。最终导致的 $S_{RIN}(f)$ 的测试误差最大约为 0.086 dBc/Hz。

同时, 测量结果还会受其他噪声和干扰的影响, 包括 $1/f$ 噪声、电源噪声、环境噪声等。 $1/f$ 噪声主要分布

影响可以忽略不计。

表 2 各光电流下的热噪声在相对强度噪声测试结果中的大小
Table 2 Thermal noise in the results of relative intensity noise under each photocurrent

I_{dc} / mA	$RIN_{th} / (\text{dBc} \cdot \text{Hz}^{-1})$
1	-157.8
5	-171.8
10	-177.8
40	-189.8

热噪声的另一个主要来源是频谱分析仪的热噪声, 表 3 列出了常用的几款频谱分析仪的热噪声水平。为了同时满足高带宽和低噪声的要求, 笔者选用 Keysight 公司的 N9040B 作为分析仪器。

在 kHz 以下的低频段, 不在本文讨论的主要范围内。电源噪声主要来自电压变换等过程, 选用直接电流输出的低噪声锂电池对光电探测器进行供电, 避开开关电路和保护电路的影响。环境噪声来源于环境温度变化、平台振动、电磁干扰等, 将待测激光器放置于气浮光学平台上以减小振动, 并维持室温在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 同时将测试电路放置于机箱内进行电磁屏蔽, 以避免环境噪声的影响。

从上述分析可以看出测试系统的主要噪声来源为光电探测器散粒噪声和频谱仪热噪声。进一步对散粒噪声和热噪声进行数值模拟, 结果如图 2 所示, 可以看出散粒噪声和热噪声的测量极限随着光电流的增大而降低。在 1 mA 光电流下, 热噪声为主要噪声源, 测试系统的本底噪声功率谱密度 (PSD) 和相对强度噪声的测量极限分别为 -160 dBm/Hz 和 -141 dBc/Hz ; 在 40 mA 光电流下, 散粒噪声为主要噪声源, 测试系统的本底噪声功率谱密度和相对强度噪声的测量极限分别为 -157 dBm/Hz 和 -171 dBc/Hz 。可见, 虽然噪声功率谱密度增加了, 但是由于光电流增加的倍数更大, 相对强度噪声反而更小了。

另外, 在 40 GHz 宽频段测量过程中, 由于带宽的限制, 如果一次测量包含整个频段, 就会导致低频曲线失真, 因此需要采用多段采集的方式实现宽频段测量。用计算机程序控制频谱仪分别在 $40 \text{ kHz} \sim 2 \text{ MHz}$ 、 $2 \sim 100 \text{ MHz}$ 、 $100 \text{ MHz} \sim 18 \text{ GHz}$ 、 $18 \sim 40 \text{ GHz}$

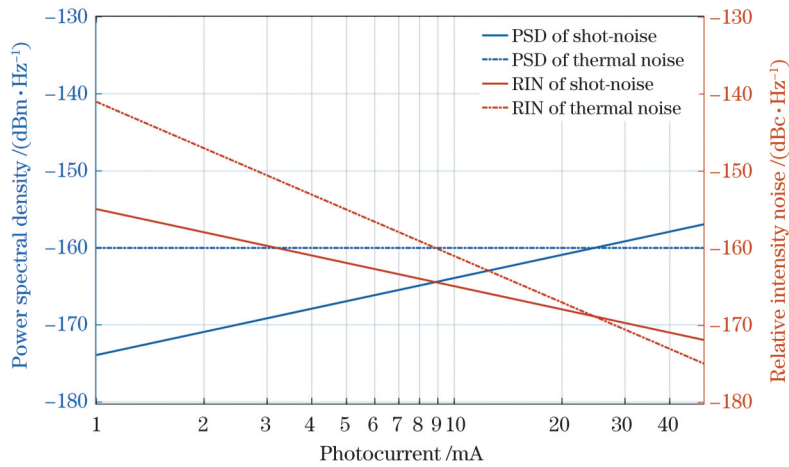


图2 测量极限随光电流的变化

Fig. 2 Measurement limits change with photocurrent

分段采集数据,分辨率带宽分别设置为 5 kHz、100 kHz、1 MHz、8 MHz,视频带宽与分辨率带宽保持 1:1 进行数据采集,并在计算机上对数据进行平滑和拼接处理。

2.2 实验验证

根据上述分析,针对噪声的两项主要来源,分别使用大电流光电探测器和低噪声频谱仪实现散粒噪声和热噪声的优化,通过实际测试验证了测试系统的本底噪声功率谱密度小于 -160 dBm/Hz。如果在 40 mA 光电流下进行相对强度噪声计算,则对应的实测本底噪声为 -171 dBc/Hz,如图 3 所示。图 3 所示曲线展示了不同光电流下的相对强度噪声实测结果,验证了增大光电流对本底噪声极限的降低效果。具体实验过程为:利用 Emcore 1782 分布式反馈半导体激光器(DFB LD)输出固定光功率为 63 mW 的激光,然后利用光衰减器控制注入光电探测器的激光的光功率大小,从而产生不同的光电

流,测试对应的功率谱密度和相对强度噪声。从图 3 中可以看出,当光电流小于 10 mA 时,测量到的噪声功率谱密度基本维持不变,测量结果主要由测试系统的本底噪声主导,无法反映出激光器真实强度噪声的大小。随着光电流增大到 10 mA 以上,所测试噪声功率谱密度逐渐高于本底噪声功率谱密度,此时的曲线才开始部分反映激光器噪声,比如 4 MHz 频率处的尖峰。但是直到光电流达到 20 mA,仍然无法准确判断激光器的噪声水平以及完整的噪声特征,比如此时无法看到 10 GHz 旁存在弛豫振荡峰,而该弛豫振荡峰在 40 mA 光电流下可以清晰分辨。同样,在 40 mA 光电流下,100 MHz 以下的 $1/f$ 噪声等特征清晰可见,并且 100 MHz~1 GHz 频段的测量结果达到了散粒噪声极限 -171 dBc/Hz。不同光电流下功率谱密度噪声和相对强度噪声与理论分析结果一致,表明了测试方法和测试系统的正确性和可行性。

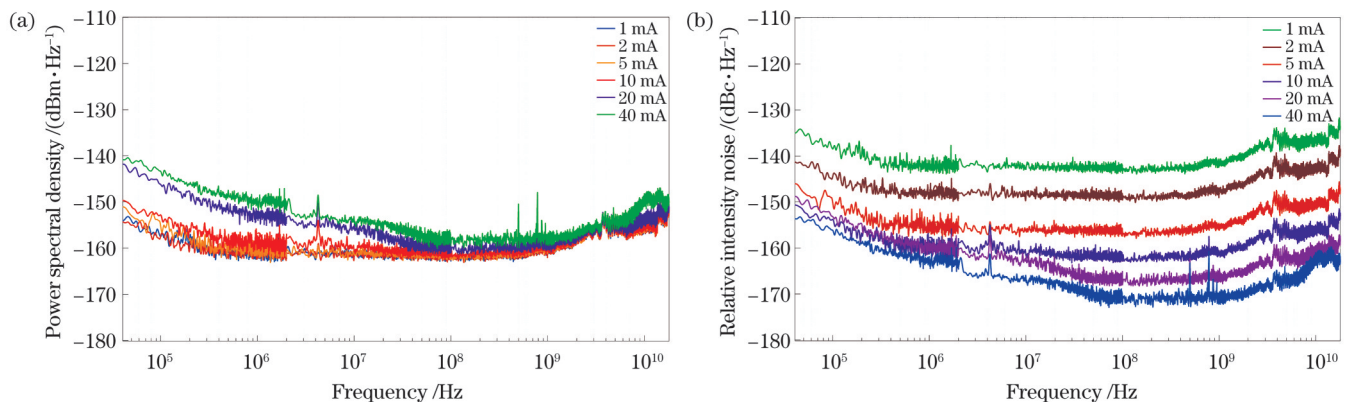


图3 DFB-1782激光器在不同光电流下的测量结果。(a)功率谱密度;(b)相对强度噪声

Fig. 3 Measurement results of DFB-1782 laser under different photocurrents. (a) Power spectral density; (b) relative intensity noise

在通过提高光电探测器光电流降低本底噪声过程中,需要光源本身具有较大的输出光功率。如果光源本身的光功率不足,通常的做法是用掺铒光纤放大器(EDFA)对功率进行放大之后再测试。EDFA是光通

信系统中常用的光放大器件,通常用来放大系统中的信号光功率以提高光通信系统的信噪比。那么这样的方法在测试相对强度噪声过程中是否可行呢?下面通过实验对此进行测试,其中EDFA采用的是Keopsys

公司的 B130(增益为 23 dB, 噪声系数为 5 dB), 测试结果如图 4 所示。激光器的输出功率固定为 8 mW, 图中对应的相对强度噪声为 $-161 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ GHz}$ 。通过光衰减器将激光的功率衰减到 1 mW 之后注入光电探测器, 测试得到相对强度噪声为 $-143 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ GHz}$, 受限于此时的噪声极限, 该值并不是激光器真实的相对强度噪声水平。然后, 将功率为 1 mW 的激光通过 EDFA 放大到 100 mW 后通过光衰减器衰减到 8 mW 再注入光电探测器, 测试得到相对强度噪声为 $-150 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ GHz}$, 该值比 1 mW 激光未经 EDFA 放大时降低了 7 dB。该值虽然仍不是激光器真实的噪声水平, 但是比 1 mW 直接测试的结果更加接近真实的噪声水平。接着将 8 mW 功率的激光经过 EDFA 放大到 100 mW, 再通过光衰减器衰减到 8 mW 后注入光电探测器, 测试得到相对强度噪声为 $-156 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ GHz}$, 该值比 8 mW 光未经 EDFA 放大也就是激光的真实噪声水平增大了 5 dB, 这可能是由 EDFA 放大过程引入的附加噪声导致的。该实验结果说明在光功率不足时可以通过 EDFA 放大光功率, 增加光电探测器的光电流、降低本底噪声, 从而使测试值更接近激光器的真实噪声水平, 但是该过程会引入附加噪声, 导致测量值比真实值偏大。

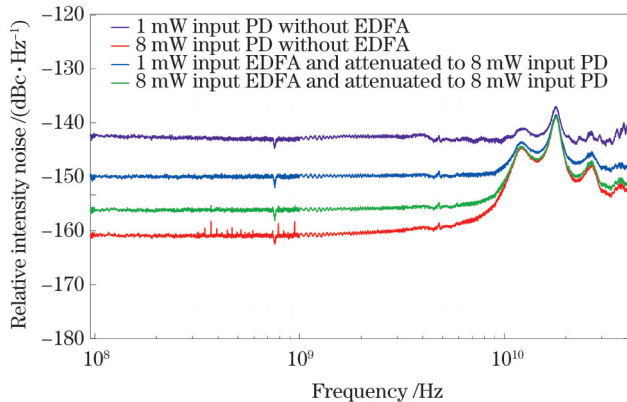


图 4 EDFA 放大前后的相对强度噪声

Fig. 4 Relative intensity noise before and after EDFA amplification

3 极低相对强度噪声激光器强度噪声性能的测量与表征

通过提高光电探测器的光电流和采用低噪声频谱分析仪降低了测量系统的本底噪声, 从而能够测量出一些原本无法测量到的激光强度噪声水平以及该噪声水平下的一些噪声现象, 为激光器研制和激光器性能优化提供更多表征参数。下面通过“典型激光器的相对强度噪声”和“强度调制过程的谐波特征”两个涉及激光器和应用系统的典型实验, 展示极低本底相对强度噪声测试系统的测试能力和应用潜力。

3.1 典型激光器的相对强度噪声

不同激光器的噪声不同, 参数测量越准确, 越能促进应用系统的选型优化。分别选择在光通信、微波光子等领域常用的几款不同类型的商用激光器进行测试, 包括美国 RIO 公司生产的 PLANEX 系列平面波导光栅外腔半导体激光器 (PWECL)、Emcore 公司生产的 1782 分布式反馈半导体激光器 (DFB LD) 以及自研非平面环形腔固体激光器 (NPRO)。通过极低本底相对强度噪声测试系统对上述激光器进行测试, 测量结果如图 5 所示。

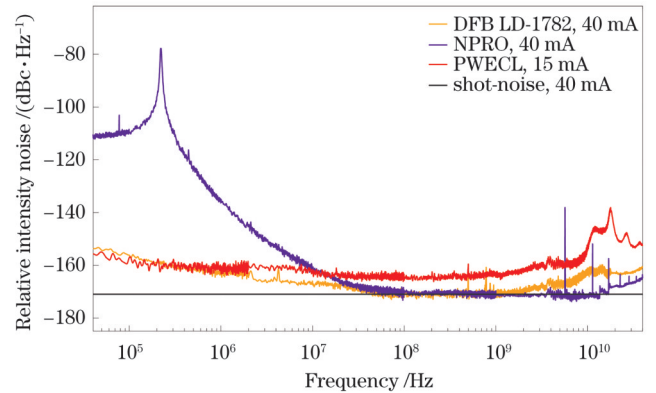


图 5 典型激光器的相对强度噪声

Fig. 5 Relative intensity noise of typical lasers

图 5 显示: PWECL、NPRO 和 DFB LD-1782 的相对强度噪声曲线在 100 MHz~1 GHz 范围内均达到了散粒噪声极限, 其中 NPRO 和 DFB LD-1782 的测试光电流为 40 mA, 对应的散粒噪声极限为 -171 dBc/Hz , 而 PWECL 的测试光电流为 15 mA, 对应的散粒噪声极限为 -166.7 dBc/Hz 。在厂家给出的参数表^[18-19]中, PWECL 和 DFB LD-1782 的相对强度噪声的最小值分别为 -145 dBc/Hz 和 -163 dBc/Hz , 并同时注明了测试结果受限于测试系统性能, 而它们基于极低本底测试系统的测试结果分别为 -165 dBc/Hz 和 -171 dBc/Hz , 显示了该激光器确实具有比厂家所给数据更好的性能参数。

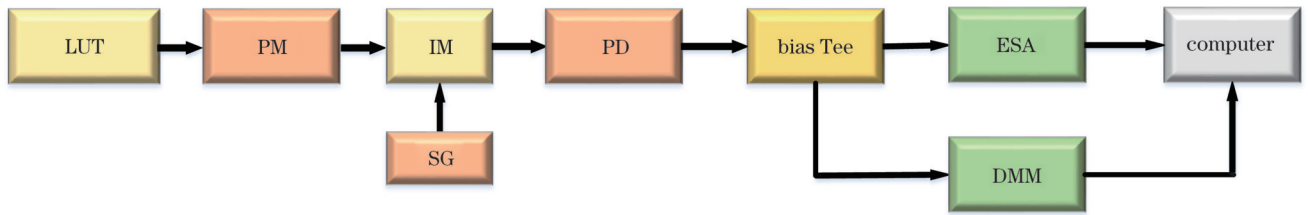
同时, 在极低本底的相对强度噪声测试下可以观察到一些原本未关注的特征, 可为未来的噪声产生机理研究提供更多素材。比如: NPRO 激光器的相对强度噪声从 220 kHz 处的 -78 dBc/Hz 降低到 30 MHz 处的 -168 dBc/Hz , 呈现出剧烈且没有突变的滚降特征, 同时在 10 GHz 以上高频处存在尖峰特征等。对于 PWECL, 在 10~40 GHz 之间能观察到除了 18 GHz 主弛豫振荡峰之外的多个振荡峰, 这为分析平面波导光栅的外腔反馈效应提供了更丰富的实验现象。

3.2 强度调制过程的谐波特征

接下来再从应用系统的角度进行实验, 展示极低本底相对强度噪声测试系统的测试能力。强度调制是

主要的信息调制方式之一,调制过程中往往伴随着谐波产生,从而降低了系统的性能。相对强度噪声测试系统的本底噪声越低,能够测量到的谐波就会越多,从而可以更好地评估系统的性能,特别是高阶交调失真。强度噪声测试系统如图 6 所示,使用 Emcore 公司的 1782A 半导体激光器作为光源,设置驱动电流为

414 mA,温度为 20.3 °C,输出光功率为 60 mW。激光经保偏隔离器后接入强度调制器(Ixblue MXAN-LN-20)进行调制。经强度调制器后,光功率在 20 mW 左右,之后激光进入光电探测器产生 16.2 mA 的光电流。本次实验所用调制信号由信号发生器(RIGOL DSG821A)产生。



LUT: laser under test
 PM: polarization maintaining optical isolator
 PD: photodetector
 SG: signal generator
 IM: intensity modulator
 ESA: electrical spectrum analyzer

图 6 强度调制过程的强度噪声测试系统

Fig. 6 Intensity noise measurement system for intensity modulation

加入正弦波调制信号后相对强度噪声的测量结果如图 7 和表 5 所示。图 7(a)显示:在 60 MHz 调制频率下,当调制幅度为 2 V 时存在 3 个谐波;在 1 V 调制幅度下,二次谐波和四次谐波的相对强度噪声分别降到 -161.8 dBc/Hz 和 -161.3 dBc/Hz,没有三次谐波;在 500 mV 调制幅度以下不存在任何谐波。图 7(b)显

示:在 600 MHz 调制频率下,当调制幅度为 2 V 时,只存在 2 个谐波;在 1 V 调制幅度下谐波个数还是 2 个,但是二次谐波的相对强度噪声降到 -161.1 dBc/Hz,极其微弱,如果测试系统本底不够低的话,将无法显示。图 7(c)显示:在 2 GHz 调制频率下,不存在任何调制谐波。

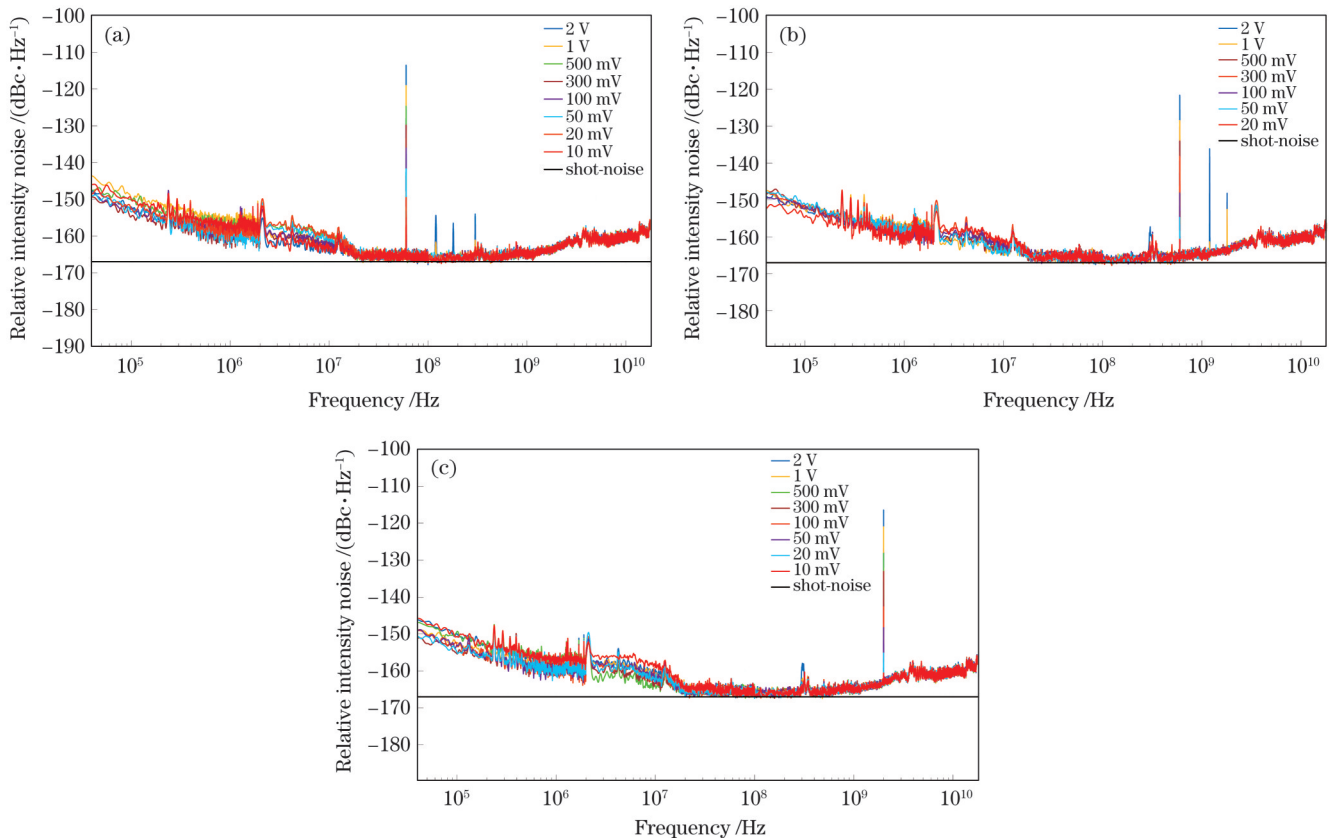


图 7 加入正弦波调制信号后的相对强度噪声。(a) 60 MHz;(b) 600 MHz;(c) 2 GHz

Fig. 7 Relative intensity noise after adding sinusoidal wave modulated signal. (a) 60 MHz; (b) 600 MHz; (c) 2 GHz

表 5 不同频率正弦波调制后的噪声水平

Table 5 Noise level after sinusoidal wave modulation at different frequencies

Input amplitude /V	Noise level / (dBc·Hz ⁻¹)					
	60 MHz signal			600 MHz signal		
	60 MHz	120 MHz	240 MHz	600 MHz	1.2 GHz	1.8 GHz
2	-113.6	-154.4	-154.1	-121.9	-136.3	-148.5
1	-119.1	-161.8	-161.3	-128.8	-161.1	-152.8

4 结 论

面向高速光通信和微波光子系统对单频激光相对强度噪声精确测试的需求,提出了一种极低本底的单频激光相对强度噪声测试方法,解决了散粒噪声和热噪声的限制问题,并依据该方法搭建测试系统,进行了相应的实验验证。研究结果对于激光器研制过程中的性能优化、系统的性能分析、器件选型等具有重要意义。

通过对相对强度噪声测试中激光器相对强度噪声、测试系统散粒噪声和热噪声等要素进行理论分析和实验验证,证明了增加光电流并采用低噪声频谱分析仪的方法可以显著降低测试系统的本底噪声。搭建的测试系统的频谱分析频段达到 40 GHz,测量本底达到 -171 dBc/Hz。对通过 EDFA 放大光功率从而增加光电流的方式进行了实验测试,结果显示该方式可使相对强度噪声的测试值更接近真实值,但也可能会引入附加噪声。

采用上述测试方法和系统测试了一些典型激光器的相对强度噪声,由于测试系统的本底噪声更低,所测试激光器的相对强度噪声水平比厂家给出的散粒噪声受限数据更接近真实值。同时,还可以在该噪声水平下测得一些原本无法测量到的噪声现象,比如极速噪声滚降和多个弛豫振荡峰等,可为噪声产生机理的深入研究提供更丰富的实验现象和数据。

此外还测试了强度调制过程的相对强度噪声特征,极低本底的相对强度噪声测试系统能观察到微弱的强度调制谐波,可为调制过程中交调失真等性能参数的评估提供更准确的数据。

参 考 文 献

- [1] Lienhart F, Boussem S, Carraz O, et al. Compact and robust laser system for rubidium laser cooling based on the frequency doubling of a fiber bench at 1560 nm[J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2): 177-180.
- [2] Cariou J P, Augere B, Valla M. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 213-223.
- [3] Yang F, Ye Q, Pan Z Q, et al. 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(2): 149-152.
- [4] 王雅君,高丽,张晓莉,等.用于精密测量的低噪声激光器研究进展(特邀)[J].*红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201073. Wang Y J, Gao L, Zhang X L, et al. Recent development of low noise laser for precision measurement(invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201073.
- [5] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1161-1172.
- [6] Baili G, Alouini M, Dolfi D, et al. Shot-noise-limited operation of a monomode high-cavity-finesse semiconductor laser for microwave photonics applications[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 650-652.
- [7] Lam D, Fard A M, Buckley B, et al. Digital broadband linearization of optical links[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 446-448.
- [8] Kaneko T, Okamoto M, Uesaka K. Phase noise study of laser diodes with external optical feedback for digital coherent communications[C]//2016 International Semiconductor Laser Conference (ISLC), September 12-15, 2016, Kobe, Japan. New York: IEEE Press, 2016.
- [9] Darcie T E, Moye A. Modulation-dependent limits to intensity-noise suppression in microwave-photonics links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(10): 2185-2187.
- [10] 杨飞,蔡海文,陈迪俊,等.激光器噪声特性的测量装置:CN102353523A[P]. 2012-02-15. Yang F, Cai H W, Chen D J, et al. Measuring device of noise characteristics of laser: CN102353523A[P]. 2012-02-15.
- [11] 徐丹,卢斌,杨飞,等.基于 3×3 耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术[J].*中国激光*, 2016, 43(1): 0102004. 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.
- [12] Zhao J J, Yang F, Wei F, et al. Effect of linewidth on intensity noise induced by stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15025-15034.
- [13] Rubiola E, Volyanskiy K, Larger L. Measurement of the laser relative intensity noise[C]//2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum, April 20-24, 2009, Besancon, France. New York: IEEE Press, 2009: 50-53.
- [14] Singley J M, Diehl J, Urick V J. Characterization of lasers for use in analog photonic links[R]. Washington, D. C.: Naval Research Laboratory, 2011.
- [15] 张曠,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.
- [16] Hashemi S E. Relative intensity noise (RIN) in high-speed VCSELs for short reach communication[D]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2012.
- [17] 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.
- [18] ORION 1550 nm laser module[EB/OL]. [2023-02-02]. <https://rio-lasers.com/1550-nm-laser-module>.
- [19] 南京先进激光技术研究院.非平面环形腔(NPRO)激光器[EB/OL]. [2023-02-02]. <http://www.nialt.com/product/50.html>. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology. Non-planar ring resonator (NPRO) lasers. [EB/OL]. [2023-02-02]. <http://www.nialt.com/product/50.html>.

Relative Intensity Noise Measurement of a Single-Frequency Laser with Ultralow Background

Yu Yihang¹, Hu Hailin^{1,2}, Chen Dijun¹, Wei Fang¹, Yang Fei^{1*}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Narrow-linewidth single-frequency lasers play an important role in coherent optical communication, coherent laser radar, microwave photonics, and fiber-optic sensing. The intensity noise of a single-frequency laser is an important indicator of its performance. Accurate evaluation of the intensity noise is of great significance, as it is necessary for optimizing laser performance, as well as for promoting and improving the design of application systems. However, current intensity noise measurement systems have insufficient performance in frequency bands and background noise and cannot meet the measurement requirements of advanced single-frequency lasers. Therefore, it is necessary to develop a relative intensity noise (RIN) measurement system with an ultralow broadband measurement background to satisfy the measurement requirements of more advanced single-frequency lasers and application systems.

Methods In this study, the noise mechanism and RIN measurement methods are analyzed. Measurement errors in the system are calculated, including shot-noise from photodetectors, thermal noise generated by components, thermal noise in spectrum analysis, and calibration error. Numerical simulations of the main noise sources in the measurement system (see Fig. 2) are conducted. A relationship that shows an increase in the photoelectric current can simultaneously reduce the shot-noise limit and the thermal noise limit of the measurement system is observed. A method is proposed for reducing the shot-noise and thermal noise limits of the system by generating a high photocurrent from a photodetector and combining it with a low-noise spectrum analyzer. On this basis, a measurement system of 40 kHz to 40 GHz is built with a background noise of -171 dBc/Hz.

Results and Discussions The above measurement principles and methods are experimentally verified using an ultralow background noise measurement system (see Fig. 3). An Emcore 1782 distributed-feedback semiconductor laser diode (DFB LD) is used to generate a photocurrent of 1 to 40 mA through an attenuator to measure the RIN. When the photocurrent is less than 10 mA, the measured noise power spectral density remains unchanged, and the measurement results are limited by the system background noise. When the photocurrent is 40 mA, the measured noise power spectral density is significantly higher than the background noise power spectral density, clearly reflecting the noise characteristics of the laser. Under a 40 mA photocurrent, the measurement results in the 100 MHz to 1 GHz frequency band reached a shot-noise limit of -171 dBc/Hz, which is consistent with the theoretical analysis. Subsequently, the feasibility of using an erbium-doped fiber amplifier (EDFA)-amplifying photocurrent to measure the RIN is analyzed (see Fig. 4). The results show that when the photocurrent is insufficient, the EDFA can amplify the optical power, increase the photocurrent, and reduce the background noise, thereby making the measurement value closer to the true noise level of the laser. However, this process introduces additional noise that makes the measured value larger than the actual noise value. Ultralow RIN lasers are then measured and characterized using this process. The PLANEX series planar-waveguide external cavity diode laser (PWECL) produced by RIO Lasers, the 1782 DFB LD produced by Emcore, and the self-developed nonplanar ring oscillator solid-state laser (NPRO) display better performance parameters compared with the manufacturer's data under ultralow background RIN measurements (see Fig. 5). The three measured lasers reached the corresponding shot-noise limits at 100 MHz–1 GHz. The results clearly demonstrate noise rollover, multiple relaxation oscillation peaks, intensity modulation harmonic distortion (see Fig. 7), and other rich experimental phenomena. Thus, the effectiveness of the ultralow background noise measurement method is confirmed by experiments.

Conclusions This study aimed to accurately measure the RIN of single-frequency laser sources in high-speed communication and microwave photonic systems. A method for achieving ultralow background RIN measurements of single-frequency laser sources is proposed, using a high-current photodetector to improve the photocurrent and a low-noise spectrum analyzer to reduce the thermal noise. An ultralow background RIN measurement system is built with a spectrum analysis frequency band of 40 GHz and a measurement background noise of -171 dBc/Hz. Subsequently, the RIN characteristics of common optical communication processes are characterized, clearly demonstrating noise rollover, multiple relaxation oscillation peaks, intensity-modulated harmonic distortion, and other characteristics of typical laser sources at extremely low frequencies. The research results have important application prospects for laser performance design optimization and evaluation.

Key words lasers; single-frequency laser; noise measurement; relative intensity noise; high-speed optical communication; microwave photon