

基于3×3耦合器的窄线宽单频激光器 噪声测量技术

徐 丹^{1,2} 卢 斌^{1,2} 杨 飞^{1*} 陈迪俊¹ 蔡海文¹ 瞿荣辉¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种基于3×3耦合器的非平衡迈克尔逊干涉仪的延时自外差技术,理论分析了此技术用于测量窄线宽单频激光器噪声的原理,搭建了测试系统,对Emcore公司的分布反馈式(DFB)半导体激光器以及NKT公司的商用超窄线宽DFB光纤激光器这两类典型光源的相位噪声、频率噪声以及线宽进行了测试。结果表明,此技术可以用于完整地测试不同类型激光器的噪声特性,并且验证了此技术的正确性和稳健性。

关键词 测量; 窄线宽单频激光器; 相位噪声; 线宽; 迈克尔逊干涉仪

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0102004

Narrow Linewidth Single-Frequency Laser Noise Measurement Based on a 3×3 Fiber Coupler

Xu Dan^{1,2} Lu Bin^{1,2} Yang Fei¹ Chen Dijun¹ Cai Haiwen¹ Qu Ronghui¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A new delayed self-heterodyne technique using an unbalanced Michelson interferometer (MI) composed of a 3×3 optical fiber coupler is proposed. The principle of the technique to measure the laser phase and frequency noise are analyzed theoretically. The experimental setup is introduced. Also, the technique is used to characterize the phase noise power spectral density (PSD), frequency noise PSD and linewidth of two typical kinds of lasers, distributed feedback (DFB) semiconductor laser (Emcore) and super-narrow linewidth DFB fiber laser (NKT). The results show that the technique can measure the noise characters of different kinds of lasers and it confirms the correction and robustness of the proposed technique.

Key words measurement; narrow linewidth laser; phase noise; linewidth; Michelson interferometer

OCIS codes 140.3570; 300.6310; 300.3700; 300.6360

1 引 言

窄线宽单频激光器在相干光通信、高精度光纤传感、相干激光雷达等领域有着十分重要的地位^[1-7]。激光器相位噪声、频率噪声、线宽等参数是评价激光器性能的重要指标,如何测量是一项非常重要的工作,因此发展了多种不同的噪声测量技术。例如对于传统激光光源的线宽测量,一般采用光谱分析仪(OSA),其测量精度一般为0.01 nm;对于线宽在兆赫兹量级的激光光源,一般采用法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪测量^[8]。但是目前用于高精度测量系统中的激光器线宽越来越窄,达到千赫兹量级甚至百赫兹量级,而上述两种测

收稿日期: 2015-08-10; 收到修改稿日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(61405212)

作者简介: 徐 丹(1988—),女,博士研究生,主要从事激光器方面的研究。E-mail: xudan@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—),男,博士,研究员,主要从事激光器与光电子器件方面的研究。E-mail: rhqu@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: fyang@siom.ac.cn

量系统的精度和分辨率很难满足要求。对于窄线宽激光光源,目前主要的测试技术有以下两类:一类是基于两台同类型激光器的光外差拍频技术^[9];另一类是基于干涉仪相位解调的延时自外差技术^[10-19]。光外差拍频技术需要一台性能优良的参考光源或两台完全相同的激光器,并且要求两台激光器的频率十分接近,然而对参考光源的获得、测量以及校准是项艰巨的工作,并且对线宽的测试依赖于先验的噪声模型,测量性能越高对环境的要求也会越高。1980年,Okoshi等^[10]首次提出了光纤延时自外差技术(DSH),广泛用于窄线宽半导体激光器的相位噪声和线宽测量。根据干涉仪的种类,可以将延时自外差技术分为以下几种:1) 基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的延时自外差技术^[11-14];2) 基于光纤环结构的重复环路延时自外差技术^[15-17];3) 基于迈克耳孙干涉仪(MI)的延时自外差技术^[18-19]。MZI延时自外差技术相比于光外差拍频技术,避免了对两个独立光源频率稳定性和频率匹配的苛刻要求,并且系统只需一个光源,测试环境简单,具有更好的稳定性。但此技术也依赖于先验的噪声模型,并且存在随机偏振态漂移,给测量引入了噪声,造成测量误差;同时要求时延光纤的长度远大于待测激光的相干长度,因此在测量窄线宽激光器时,所需的光纤长度非常长(例如,对于目前线宽能达到1 kHz量级的激光器而言相干时间 $\tau_c = 10^5$ s,严格说来需要用到百公里量级长度的光纤才能满足要求),导致损耗、瑞利散射等因素给测量带来困难,而且整个方案极易受到外界环境的影响,对于测试系统的抗环境干扰能力提出了非常苛刻的要求。在光纤延迟时间达到要求的前提下尽量缩短时延光纤长度是一个行之有效的方法。1990年,Tsuchida^[15]提出一种基于光纤环结构的重复环路自外差技术,在保持光纤长度不变的情况下多次通过光纤环以达到增加时延的目的,在获得更高测量精度的同时,简化了系统结构并且提高了抗环境干扰能力。1992年,Dawson等^[16]在此项技术的基础上增加了掺铒光纤放大器(EDFA)以补偿多次通过光纤环造成的功率损耗,并且利用11 km光纤环获得了606 Hz的极限分辨率。2011年,Tsuchida^[17]将此项技术成功地运用于测量激光器频率调制噪声功率谱密度。MI延时自外差技术是对传统MZI型延时自外差技术的一种改进,采用了法拉第旋转反射镜,既降低了随机偏振态漂移引起的噪声,又将时延光纤所需的长度缩短至MZI的一半。利用该技术能够测得激光器的噪声功率谱,并且不需要先验模型,但是有如下主要缺点:为了使干涉仪工作在正交工作点状态,需要对干涉仪的臂长差进行主动反馈控制,增加了系统的复杂度和对环境的要求;由于需要利用干涉仪的直流输出信号进行主动反馈控制,因而限制了系统的噪声基底和低频测试能力。由于很难保证做到测量完整性的同时保证其稳定性,因此目前仍无基于这些技术诞生标准的测试仪器。

本文提出一种新的低噪声单频激光器相频噪声特性的测试方法,即基于3×3耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的延时自外差技术。利用此技术对Emcore公司的分布反馈式(DFB)半导体激光器以及NKT公司的商用超窄线宽DFB光纤激光器的相位噪声、频率噪声以及线宽进行了实验验证和测试对比。

2 原 理

考虑到传统MI延时自外差技术中需要额外的主动控制手段保持正交性,借鉴相干探测的核心思想,即增加一个附加变量然后通过数字处理进行自适应的相位解调,从而大大提高了测试技术的稳健性和可扩展性。具体实施方法是将基于3 dB耦合器的两臂反相干涉改为增加一个输出端口的120°相差干涉,这可以通过3×3耦合器的结构来实现。

基本原理如图1所示,3×3耦合器(OC)、时延光纤、法拉第旋转反射镜(FRM)组成了非平衡迈克耳孙干涉

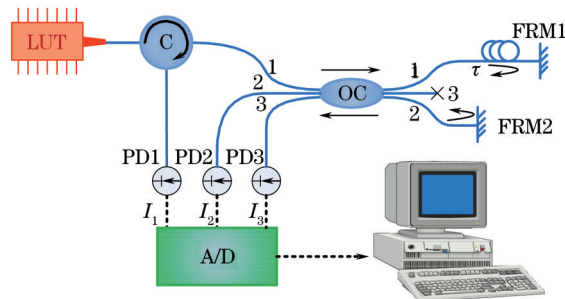


图1 基于3×3耦合器非平衡MI的延时自外差技术

Fig.1 3×3 fiber coupler unbalanced Michelson interferometer self-heterodyne technique

仪。待测激光(LUT)的输出经过环形器(C)进入3×3耦合器的输入端口1,然后经过OC的输出端口1和2分别到达FRM1和FRM2,输出端口3未使用,两路信号因臂长差带来的时延为 τ 。反射的两束光在OC处发生干涉,干涉信号分为3束,分别到达光电探测器PD1、PD2和PD3进行光电转换,完成待测激光的相干探测。然后用高速数据采集卡(A/D)采集探测信号输入计算机,并对其进行相干解调获得待测激光的相位信息。

假设入射激光的光场形式为 $\mathbf{E}(t)=|\mathbf{E}(t)|\exp\{i[\omega_0 t+\varphi(t)]\}$,从干涉仪的端口1正向入射,即入射光矩阵可以表示为 $\mathbf{E}^m=[\mathbf{E}(t),0,0]^T$,于是经过干涉仪(传输矩阵为 \mathbf{M})后的输出光场可以表示为 $\mathbf{E}^{out}=\mathbf{M}\mathbf{E}^m$,经PD(响应度为 r_n)探测后的光电流为

$$\begin{pmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\delta+\Delta\varphi)|\mathbf{E}(t)\mathbf{E}(t-\tau)| \\ \sin(\delta+\Delta\varphi)|\mathbf{E}(t)\mathbf{E}(t-\tau)| \\ \left[|\mathbf{E}(t)|^2+|\mathbf{E}(t-\tau)|^2\right]/2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\eta_n, \zeta_n, \xi_n(n=1,2,3)$ 为干涉仪仪器常数, τ 为MI臂长差引入的时间延迟, δ 为MI臂长差引入的相移延迟, $\Delta\varphi$ 为待测光场的差分相位波动。

定义一个中间矩阵 \mathbf{X}' :

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} X'_1(t) \\ X'_2(t) \\ X'_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\delta+\Delta\varphi)|\mathbf{E}(t)\mathbf{E}(t-\tau)| \\ \sin(\delta+\Delta\varphi)|\mathbf{E}(t)\mathbf{E}(t-\tau)| \\ \left[|\mathbf{E}(t)|^2+|\mathbf{E}(t-\tau)|^2\right]/2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

于是可以将 \mathbf{X}' 表示为 $I_n(t)$ 的函数,即

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

根据(3)式,当矩阵 \mathbf{X}' 求出以后,可以得到待测激光的差分相位波动为

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi(t-\tau) = \arctan[X'_2(t)/X'_1(t)] - \arctan[X'_2(t-\tau)/X'_1(t-\tau)], \quad (4)$$

记差分相位波动的傅里叶频谱为 $\phi(f)$,对 $\Delta\varphi(t)$ 进行功率谱估计^[20],可以得到差分相位波动功率谱密度(PSD)为

$$S_{\Delta\varphi}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \langle \phi(f)\phi^*(f) \rangle, \quad (5)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示对 f 的系综平均, T 为测量时间。

由于 $\Delta\varphi=\varphi(t)-\varphi(t-\tau)$,则由傅里叶变换的相移定理可知

$$\phi(f) = \psi(f) - \psi(f)\exp(-j2\pi f\tau), \quad (6)$$

式中 $\Psi(f)$ 为待测激光瞬时相位波动 $\varphi(t)$ 的傅里叶频谱,于是

$$S_{\varphi}(f) = \frac{1}{4[\sin(\pi f\tau)]^2} S_{\Delta\varphi}(f). \quad (7)$$

考虑到频率和相位的关系为 $\varphi=2\pi\tau\nu$,假设干涉仪的延迟时间 τ 不受外界环境的影响为一个常数,于是激光经过时延为 τ 的干涉仪后,在时延 τ 内积累的差分频率波动 $\Delta\nu(t)$ 和差分相位波动 $\Delta\varphi(t)$ 的关系可表示为 $\Delta\nu(t)=\Delta\varphi(t)/(2\pi\tau)$,根据傅里叶变换的线性定理,可以得到待测激光的差分频率波动PSD为

$$S_{\Delta\nu}(f) = \frac{1}{(2\pi\tau)^2} S_{\Delta\varphi}(f), \quad (8)$$

待测激光的瞬时频率波动PSD为

$$S_{\nu}(f) = f^2 S_{\varphi}(f) = \frac{f^2}{4[\sin(\pi f\tau)]^2} S_{\Delta\varphi}(f), \quad (9)$$

待测激光的单边带相位噪声 $L(f)$ 为^[21]

$$L(f) = \frac{1}{2} S_{\varphi}(f) = \frac{1}{8[\sin(\pi f\tau)]^2} S_{\Delta\varphi}(f). \quad (10)$$

根据 Domenico 等^[22]提出的 β 算法,由频率噪声 PSD $S_v(f)$ 可计算出待测激光的线宽,即

$$\Delta\nu = (8 \ln 2A)^{1/2}, \quad (11)$$

$$A = \int_{1/T_0}^{\infty} H[S_v(f) - 8 \ln 2f/(\pi^2)] S_v(f) df, \quad (12)$$

式中 $H(x)$ 为单位阶梯函数, A 表示频率噪声 PSD 的频谱图中 $S_v(f) > 8 \ln 2f/(\pi^2)$ 对应的面积, T_0 为测量时间, 以 $1/T_0$ 为积分下限可以避免低频噪声发散(例如 $1/f$ 噪声)造成的不可积, 而积分上限为 $S_v(f)$ 与 $8 \ln 2f/(\pi^2)$ (β 线)的交点。在此方法中, 定义 β 线为 $S_v(f) = 8 \ln 2f/(\pi^2)$, 它从几何上将频率噪声 PSD $S_v(f)$ 分为两部分: 1) $S_v(f) > 8 \ln 2f/(\pi^2)$, 低频调制区域, 具有很高的调制系数 $\beta > 1$, 这部分噪声为高斯型, 决定了待测激光的线宽; 2) $S_v(f) < 8 \ln 2f/(\pi^2)$, 高频调制区域, 调制系数 β 很小, 这部分噪声为洛伦兹型, 频率波动太快以至于对待测激光线宽影响可忽略。 β -算法的优点为: 1) 基于频率噪声测量线宽, 不仅仅是得到了线宽一个参数, 还可以完整清晰地看出噪声的频域分布特性; 2) 测量的线宽适用于任意噪声类型的待测激光光源, 不像传统的线宽测试方法需要进行线型拟合, 并且一般只有在洛伦兹线型或者高斯线型时才可以得到较为准确的数值; 3) 测量窄线宽激光器的线宽时, 干涉仪的臂长差不再需要几十公里甚至上百公里, 而是几十米即可, 大大提升了抗环境干扰能力; 4) 测量不同量级的线宽时, 不需要更换干涉臂长差, 同一固定臂长差的干涉仪可以测量不同量级的线宽。

3 实 验

根据图 1 所示的实验原理, 搭建了一套基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪, 并且用于待测激光的差分相位解调。MI 两臂长差引入的时延为 244 ns, 对应干涉仪的带宽为 4.1 MHz。为了提高干涉仪的抗环境干扰能力, 尽量将干涉仪的两臂平行放置, 并且将整个干涉仪固定在铝盒里, 外面用吸音棉和塑料泡沫封装, 以达到隔音隔震隔热的效果。然后对干涉仪的 3 路输出进行采集, 将采集到的信号送入计算机进行各种噪声功率谱估计。

使用之前需要先进行干涉仪仪器常数校准, 各仪器常数的表达式为^[23]

$$\begin{cases} \eta_n = \frac{I_{n,dc}(E_m - 1)}{P_{ASE}(E_m + 1)} \cos \theta_n \\ \zeta_n = \frac{I_{n,dc}(E_m - 1)}{P_{ASE}(E_m + 1)} \sin \theta_n, (n = 1, 2, 3), \\ \xi_n = \frac{I_{n,dc}}{P_{ASE}} \end{cases} \quad (13)$$

式中 θ_n 表示 3×3 耦合器各端口之间的相位差, E_m 表示 3×3 耦合器各端口干涉条纹的消光比, $I_{n,dc}$ 表示每个端口输出光电路的直流成分, P_{ASE} 表示入射平均光功率。

本实验中所搭建迈克耳孙干涉仪的仪器常数为

$$\begin{pmatrix} \eta_1 & \zeta_1 & \xi_1 \\ \eta_2 & \zeta_2 & \xi_2 \\ \eta_3 & \zeta_3 & \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1198 & 0.0002 & 0.1223 \\ -0.0519 & 0.1366 & 0.1491 \\ -0.0634 & -0.1094 & 0.1290 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

干涉仪仪器常数校准完后, 整个系统就处于即插即用的状态, 无需再调试。

下面以 Emcore 公司的 DFB 半导体激光器以及 NKT Photonics 公司的商用超窄线宽 DFB 光纤激光器 (Koheras BasiK™) 这两类典型的窄线宽激光器作为待测激光, 进行实验验证。

3.1 相位噪声测试

图 2 所示为 Emcore 公司 DFB 半导体激光器 (LUT1) 的归一化到 1 m 的差分相位波动 PSD $S_{\Delta\phi}(f)$ 、瞬时相位波动 PSD $S_\phi(f)$ 、单边带相位噪声 $L(f)$ 、差分频率波动 PSD $S_{\Delta f}(f)$ 以及瞬时频率波动 PSD $S_f(f)$ 。从图 2(a) 可以看出, 在 1 MHz 以下的频率段内, LUT1 的差分相位波动归一化到 1 m 的 PSD $S_{\Delta\phi}(f)$ 远小于瞬时相位波动 PSD $S_\phi(f)$, 单边带相位噪声 $L(f)$ 为瞬时相位波动 PSD $S_\phi(f)$ 的一半。从图 2(b) 可以看出, 考虑 1 MHz 以下的频率段, LUT1 的差分频率波动 PSD $S_{\Delta f}(f)$ 近似于瞬时频率波动 PSD $S_f(f)$ 。此外, 观察到各功率谱密度在 1 MHz 频率处存在较大的振荡现象, 并且存在 4.1 MHz 的周期性振荡, 这是由于干涉仪的带宽 (4.1 MHz) 限制造成的。图 3 所示为

NKT公司的商用超窄线宽DFB光纤激光器(LUT2)归一化到1 m的 $S_{\Delta\nu}(f)$ 、 $S_{\nu}(f)$ 、 $L(f)$ 、 $S_{\Delta\nu}(f)$ 以及 $S_{\nu}(f)$ 。相比较而言,LUT2的相位噪声和频率噪声水平与LUT1的相比明显低3个数量级以上。所得LUT2的实验结果与其产品测试报告的数据吻合(LUT1产品测试报告没有给出相位噪声和频率噪声的数据,因而在此不做比较),如表1所示,验证了本实验测试方法的正确性。

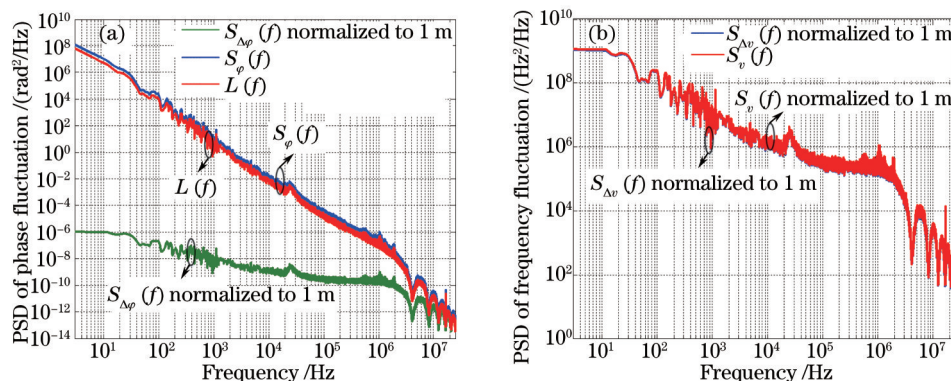


图2 LUT1(a) 相位噪声 PSD; (b) 频率噪声 PSD

Fig.2 (a) Phase noise PSD; (b) frequency noise PSD of LUT1

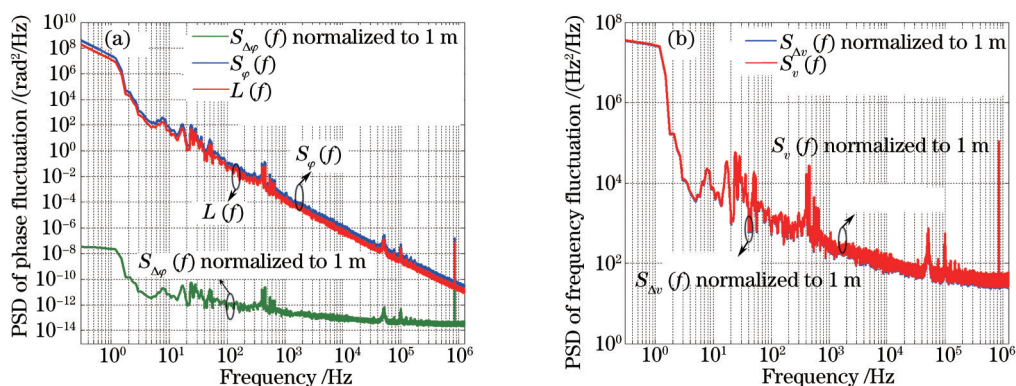


图3 LUT2(a) 相位噪声 PSD; (b) 频率噪声 PSD

Fig.3 (a) Phase noise PSD; (b) frequency noise PSD of LUT2

表1 LUT2的实验数据和产品测试报告数据

Table 1 Experimental data and product test datasheet of LUT2

Phase noise	Experiment $/(dB \cdot rad^{-1} \cdot Hz^{-1})$	Datasheet $/(dB \cdot rad^{-1} \cdot Hz^{-1})$
10 Hz	-118	-115
100 Hz	-126	-125
1 kHz	-135	-135
10 kHz	-140	-137

3.2 线宽计算

从这两类待测激光的频率噪声 PSD 可以看出其噪声分布,低频段为 $1/f$ 噪声,高频段为白噪声(假设对线宽的影响忽略不计)。当测量时间 $T_0 \rightarrow \infty$, $1/f$ 噪声在低频段呈发散趋势,导致积分区域 A 发散,因而(12)式不可积。因此,当激光器频率噪声 PSD 呈 $1/f$ 噪声特征时,测量时间 T_0 是计算线宽的一个重要参数。

LUT1 和 LUT2 的线宽测试结果如图 4 和图 5 所示。搭建了一个 MZI(臂长差为 45 km)用于测量 LUT1 和 LUT2 的线宽,外差拍频信号的中心频率为 80 MHz,示波器记录的拍频频谱如图 4(b)和 5(b)所示。通过洛伦兹拟合,LUT1 的 -20 dB 线宽约为 1.6 MHz,表明其半峰全宽(FWHM)为 800 kHz;LUT2 的 -20 dB 线宽约为 16 kHz,表明其半峰全宽(FWHM)为 800 Hz。

同时根据 β -算法,利用前文实验测得的各项待测激光的频率噪声 PSD $S_{\nu}(f)$,计算不同测量时间 T_0 (即不同积分带宽)下的线宽如图 4(a)和 5(a)所示。实验结果表明线宽随着积分带宽下限的减小而增大,即计算出的线

宽依赖于积分带宽。例如对于LUT1,在很短的测量时间(高的积分带宽)下,对应频率噪声的白噪声极限,线宽达到最小值, $\Delta\nu_1 = \pi S_w \approx 300$ kHz。但是随着测量时间的增加(积分带宽的减小),线宽值会增大,在0.2 ms测量时间(对应积分带宽5 kHz)时,线宽值约为800 kHz,而该值是利用MZI方法测量得出的线宽值。同样地,对于LUT2,其白噪声极限对应的噪声极限为 $\Delta\nu_2 = \pi S_w \approx 300$ Hz,在2 ms测量时间(对应积分带宽500 Hz)时,线宽值约为1.2 kHz,同时MZI测量方法得到的800 Hz线宽值对应的积分带宽大于500 Hz,约为千赫兹量级。从对比测试可以看出MZI方法仅能得到线宽的一种笼统反映,不能对线宽特征进行完整评价,而本文方法可以得到完整的噪声频域分布特性以及不同测量时间下的线宽值。

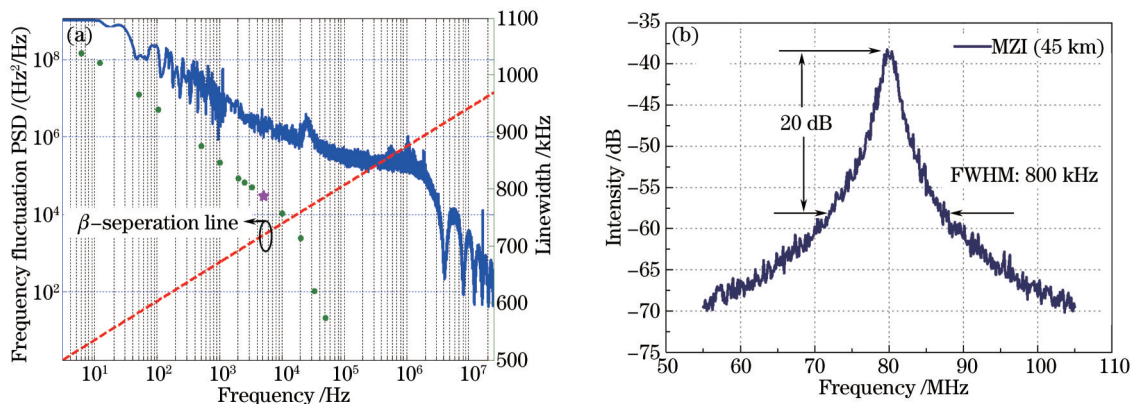


图4 LUT1的线宽测试结果。(a) β 算法;(b) MZI自外差法

Fig.4 Linewidth of LUT1. (a) β method; (b) MZI self-heterodyne method

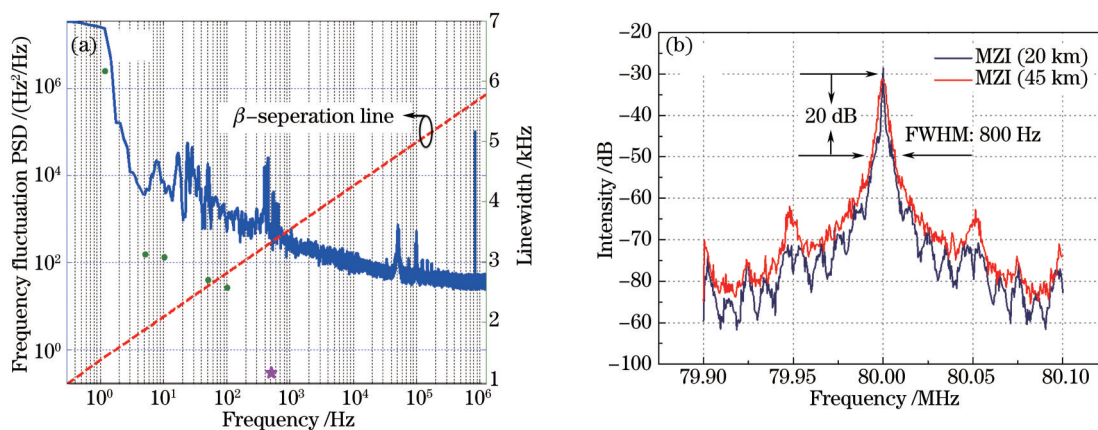


图5 LUT2的线宽测试结果。(a) β 算法;(b) MZI自外差法

Fig.5 Linewidth of LUT2. (a) β method; (b) MZI self-heterodyne method

4 结 论

提出了一种基于3×3耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的延时自外差技术,讨论了该技术用于测量激光器噪声特性的原理,并搭建了测量系统。以Emcore公司的DFB半导体激光器以及NKT公司的商用超窄线宽DFB光纤激光器这两类典型的光源作为待测激光,进行了实验验证。结果表明,此技术可以测量从几百赫兹到几百千赫兹不同量级线宽的激光器,而且能够非常完整地呈现出他们的相位噪声、频率噪声分布特性以及线宽值依赖于测量时间等线宽特征。该技术具有明显的优势,深入研究将有可能促使形成单频激光领域的相频噪声测量标准,具有很好的学术意义。

参 考 文 献

- 1 F Lienhart, S Boussen, O Carraz, *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: Lasers and Optics, 2007, 89(2-3): 177-180.
- 2 G A Cranch, G M H Flockhart, C K Kirkendall. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2008,

- 8(7-8): 1161-1172.
- 3 Fan Shibin, Xu Chunhong, Xiang Xiong. Multi-point optical fiber sensing technology for methane detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 100602.
樊士彬, 徐春红, 向 雄. 多点光纤瓦斯传感技术[J]. *激光与光电子进展*, 2010, 47(10): 100602.
- 4 Wang Zhaoyong, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.*. Fast pattern recognition based on frequency spectrum analysis used for intrusion alarming in optical fiber fence[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0405010.
王照勇, 潘正清, 叶 青, 等. 用于光纤围栏入侵告警的频谱分析快速模式识别[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0405010.
- 5 J P Cariou, B Augere, M Valla. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 213-223.
- 6 F Yang, Q Ye, Z Pan, *et al.*. 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(2): 149-152.
- 7 Zhang Zhen, Sun Jianfeng, Lu Bin, *et al.*. Costas optical phase lock loop system design in inter-orbit coherent laser communication[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0805006.
张 震, 孙建锋, 卢 斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805006.
- 8 Takakura T, Iga K, Tako T. Line-width measurement of a single longitudinal mode AlGaAs laser with a Fabry-Perot interferometer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, 19(12): 1468-1488.
- 9 Zhu Ninghua. *Microwave Design and Characterization of Optoelectronics Devices and Packing*[M]. Beijing: Science Press, 2007.
祝宁华. *光电子器件微波封装与测试*[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 10 T Okoshi, K Kikuchi, A Nakayama, *et al.*. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electron Lett*, 1980, 16(16): 630-631.
- 11 L Richter, H I Mandelberg, M Kruger, *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurement with subcoherence delay times[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(11): 2070-2074.
- 12 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai, *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(4): 351-354.
俞本立, 钱景仁, 杨瀛海, 等. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. *中国激光*, 2001, 28(4): 351-354.
- 13 Wang Jinwen, Dong Xiaopeng, Zhou Jinlong. Measurement of the line width of DFB fiber laser based on the delayed self-heterodyne[J]. *J Xiamen University (Natural Science)*, 2007, 46(3): 322-325.
王劲文, 董小鹏, 周金龙. 基于延时零拍法的DFB光纤激光器线宽测量[J]. *厦门大学学报(自然科学)*, 2007, 46(3): 322-325.
- 14 Wang Zhe, Wang Zhi, Liu Lanlan, *et al.*. Dynamic measurement of linewidth of the wavelength-swept lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0608005.
王 哲, 王 智, 刘岚岚, 等. 波长扫描激光器光谱线宽的动态测量技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608005.
- 15 H Tsuchida. Simple technique for improving the resolution of the delayed self-heterodyne method[J]. *Opt Lett*, 1990, 15(11): 640-642.
- 16 J W Dawson, Namkyoo Park, K J Vahala. An improved delayed self-heterodyne interferometer for linewidth measurements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 40(9): 1063-1066.
- 17 H Tsuchida. Laser frequency modulation noise measurement by recirculating delayed self-heterodyne method[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(5): 681-683.
- 18 Cao Chunyan, Yao Qiong, Rao Wei, *et al.*. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interferometer for narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0508005.
曹春燕, 姚 琼, 饶 伟, 等. 窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508005.
- 19 杨 飞, 蔡海文, 陈迪俊, 等. 激光器噪声特性的测量装置: 中国, 201110172609.3[P]. 2012-02-25.
- 20 P D Welch. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1967, 15(2): 70-73.
- 21 R P Scott, C Langrock, B H Kolner. High-dynamic-range laser amplitude and phase noise measurement techniques[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(4): 641-655.
- 22 G D Domenico, S Schilt, P Thomann. Simple approach to the relation between laser frequency noise and laser line shape [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(25): 4801-4807.
- 23 Y Takushima, H Y Choi, Y C Chung. Measurement of differential phasor diagram of multilevel DPSK signals by using an adjustment-free delay interferometer composed of a 3×3 optical coupler[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(6): 718-730.

栏目编辑: 何卓铭