

光学学报

基于短光纤循环自外差法的激光线宽测量

高静^{1,2}, 焦东东¹, 刘杰¹, 邓雪¹, 臧琦^{1,2}, 张翔^{1,2}, 王丹^{1,2}, 张晓斐¹, 刘涛^{1*}

¹中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于短光纤循环延迟自外差技术测量亚千赫兹激光器线宽的方法。采用延迟长度仅为 2 km 的循环延迟自外差干涉仪, 实现了一系列不同延迟时间拍频信号的同时测量。通过仿真拟合了多组高阶拍频信号的功率谱, 获得激光器的平均线宽为 944 Hz, 该结果与传统拍频法测得的激光线宽基本一致。所提方法不仅可以避免单次测量误差, 而且能有效减小 $1/f$ 频率噪声引起的频谱加宽, 可精密测量窄线宽激光器的线宽。

关键词 测量; 窄线宽激光器; 线宽测量; 循环延迟自外差法; 短延迟光纤; 拍频信号

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0712002

Laser Linewidth Measurement Based on Recirculating Self-Heterodyne Method with Short Fiber

Gao Jing^{1,2}, Jiao Dongdong¹, Liu Jie¹, Deng Xue¹, Zang Qi^{1,2},
Zhang Xiang^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Zhang Xiaofei¹, Liu Tao^{1*}

¹Key Laboratory of Time and Frequency Standards, National Time Service Center,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

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

Abstract A recirculating delayed self-heterodyne method with a short fiber is proposed for the precise measurement of sub-kHz laser linewidth. Using the recirculating delayed self-heterodyne interferometer with an only 2 km delayed fiber, a series of beat signals with different delay times are simultaneously measured. By simulating and fitting the power spectra of multiple high-order beat signals, the average linewidth of 944 Hz for a laser is obtained, which is basically in agreement with that obtained by the traditional beat frequency method. The proposed method can not only avoid a single measurement error, but also effectively reduce the frequency broadening induced by the $1/f$ frequency noise, therefore it can be used as an accurate detection tool for the linewidth measurement of a narrow linewidth laser.

Key words measurement; narrow linewidth laser; linewidth measurement; recirculating delayed self-heterodyne method; short delayed fiber; beat signals

OCIS codes 120.3688; 060.2840; 140.3510

1 引言

窄线宽激光器具有相位噪声低和相干长度长的优点, 在光钟、精密光谱、相干通信、光纤传感等领域

有着重要的应用^[1-4]。激光线宽作为激光器的一个重要指标, 是决定上述应用测量范围和测量精度的主要因素之一。因此, 实现激光器线宽的精密测量具有重要意义。

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-12; 录用日期: 2020-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(91636101, 91836301)、国家自然科学基金青年科学基金(11803041)、国家重点研发计划(2016YFF0200200)

* E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

目前,对于窄线宽激光器的线宽测量方法主要有两种:拍频法和延迟自外差法^[5-6]。拍频法测量精度较高,但该方法需要两台频率接近的光源,且参考源往往需要一台线宽更窄且频率更加稳定的激光器,因此该测量系统成本较高、调节复杂。延迟自外差法不需要外部参考光源,利用不等臂干涉仪产生两路具有不同延迟时间的光束进行外差拍频^[7],当干涉仪的延迟时间远大于激光相干时间时,两路光不再相干,相当于两个独立光源,通过测量拍频信号的谱宽获得激光线宽,具有成本低、结构简单的特点。目前商用光纤激光器的线宽已达到亚千赫兹量级^[8-9]。延迟自外差法在测量这种量级的窄线宽激光器时,光纤延迟线需要长达上百千米,但过长的延迟光纤会引起激光拍频功率谱的展宽,导致测量误差加大^[10-12]。2006年,Chen等^[13]采用基于损耗补偿的循环延迟自外差法,实现了亚千赫兹激光器的线宽测量。实验中利用光纤放大器补偿25 km延迟光纤的功率损耗,信号光在延迟环路中多次循环,从而使延迟光纤的等效长度高达上百千米,满足千赫兹线宽的分辨率要求。为了去除长延迟光纤引起的频谱加宽,采用Voigt函数对拍频功率谱进行拟合,得到激光器的洛伦兹线宽为0.68 kHz。实验探测到的光谱是包含洛伦兹型和类高斯型的Voigt谱型,但高斯线型在光谱中的占比不能准确确定,因此用Voigt拟合也不能准确获得激光器的洛伦兹线宽。2017年,研究者采用短光纤延迟外差法测量了窄线宽激光器的线宽^[14]。通过比较仿真和实验测得的拍频信号相干包络的峰谷差值,确定了激光器

的洛伦兹线宽。但该方案需要挑选合适的延迟光纤长度和相干包络,这增加了测试的复杂度。

为了进一步提高激光线宽测量的精度,本文在上述研究的基础上,提出了一种基于短光纤循环自外差法精确测量激光线宽的方案。采用延迟长度仅为2 km的短光纤,构建了环境不敏感的循环干涉仪,有效降低了 $1/f$ 频率噪声和环境噪声对拍频光谱的影响,提高了线宽测量精度。通过研究耦合器耦合系数对拍频信号峰值强度的影响,有效降低了高阶拍频信号峰值的衰减,实现了多个具有不同延迟时间的高阶循环拍频信号的同时测量,因此本文无需更换延迟光纤便可获得多组激光器线宽值,从而降低测量统计误差。为了验证短光纤自外差法测量激光器线宽的准确性,本文利用一台线宽约为0.3 Hz的超窄线宽激光器作为参考,采用拍频比对的方式对待测激光器进行了线宽测量及验证,结果表明,短光纤循环自外差法可用于激光器线宽的精确测量。

2 基本原理

2.1 实验原理

延迟自外差法测量激光器线宽的基本原理是:利用不等臂干涉仪产生两路具有不同延迟时间的光束进行外差拍频,拍频信号携带了激光频率噪声,通过分析拍频信号即可获得激光器线宽。为了避开低频噪声对拍频信号的干扰,采用声光调制器对干涉仪中的一路光进行光移频,拍频信号经探测器光电转换后在频谱仪上显示出其功率谱。其中拍频信号的功率谱密度 $S(\nu, \tau_d)$ ^[15-16]表示为

$$S(\nu, \tau_d) = S_0 \cdot S_1 + S_2 = \frac{\frac{1}{2} p^2 \cdot \tau_c}{1 + (2\pi)^2 \cdot (\nu - \Omega)^2 \cdot \tau_c^2} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_d}{\tau_c}\right) \cdot \left\{ \cos[2\pi \cdot (\nu - \Omega) \cdot \tau_d] + \frac{\sin[2\pi \cdot (\nu - \Omega) \cdot \tau_d]}{2\pi \cdot (\nu - \Omega) \cdot \tau_c} \right\} \right\} + \frac{1}{2} p^2 \cdot \pi \cdot \exp\left(-\frac{\tau_d}{\tau_c}\right) \cdot \delta(\nu - \Omega), \quad (1)$$

式中: S_0 为洛伦兹功率谱线; S_1 为周期调制的功率谱线; S_2 为Delta函数脉冲峰; p 为两路光光场的振幅之比; ν 为激光的光学频率; Ω 为声光频移器的移频量; $\tau_c = 1/(2\pi \cdot \Delta f)$ 为激光器的相干时间,其中 Δf 为激光器的线宽; τ_d 为延迟光纤产生的延迟时间; $\delta(\cdot)$ 为Delta函数。

由(1)式可知,拍频信号功率谱密度的谱型与 τ_c 、 τ_d 的值密切相关。图1所示为利用(1)式得到的

不同延迟时间 τ_d 条件下归一化的拍频功率谱(待测激光器频率设定为1 kHz)。当 τ_d/τ_c 较小时,拍频信号的功率谱是两翼叠加周期性相干包络的洛伦兹线型。随着延迟光纤长度的增加,即 τ_d/τ_c 增加,谱线两翼相干包络的周期和强度都会变小。由于相干包络的周期 T 与光纤延迟时间 τ_d 成反比,因此 $\tau_d/\tau_c = 0.5$ 对应谱线的包络周期是 $\tau_d/\tau_c = 1$ 对应谱线包络周期的2倍。当 $\tau_d/\tau_c = 6$ 时,即延迟光纤

的延迟时间远大于激光的相干时间时,拍频信号的功率谱如图1中的虚线所示,谱型呈两翼无相干包络的洛伦兹线型(即 $S \approx S_0$)。在该条件下,自外差法的路光退相干,其拍频线宽能直接表征激光器的线宽。但该方法在测量 kHz 及更窄的激光器线宽时具有一定的局限性。在利用自外差法测量激光器线宽时,均假设线宽来源于量子噪声。但激光的拍频光谱实际上并不是严格的洛伦兹线型,而是包含白噪声的洛伦兹线型和类 $1/f$ 噪声(如泵浦噪声、声学噪声等)的高斯线型,其中 $1/f$ 噪声的谱宽随延迟光纤长度的增加而变宽^[17-18]。对于激光线宽较大的激光器,所需的光纤延迟线比较短, $1/f$ 噪声对测量结果影响不大,但对于线宽为 kHz 量级的激光器,激光器的洛伦兹线宽易被高斯型的 $1/f$ 噪声淹没。为了提高线宽测量的准确度,通常采用 Voigt 函数对拍频谱型进行修正,并提取谱型中的高斯成分^[19-20]。为了减小长延迟光纤对线宽测量精度的影响,本文采用短延迟光纤以有效避免高斯线型对谱线宽的影响,并通过仿真拟合了多个具有不同延迟时间的高阶拍频信号,避免了单次测量误差,从而实现了窄线宽激光器的线宽精密测量。

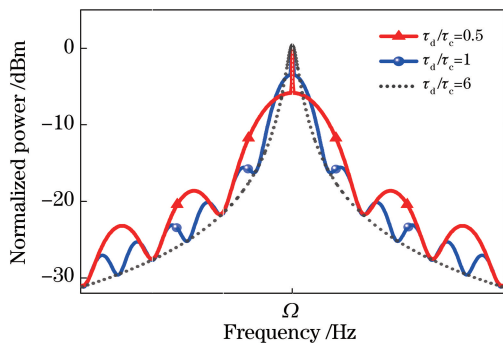


图1 延迟光纤的延迟时间对拍频信号功率谱谱型的影响
Fig. 1 Influence of delay time of delayed fiber on power spectral profile of beat signal

2.2 实验装置

基于短光纤循环自外差法测量激光线宽的实验装置示意图如图2所示。激光光源是波长为 1550 nm、线宽约为亚千赫兹的商用光纤激光器。激光器的输出光束经过隔离器和 X 型耦合器后分为两路:一路光作为参考光直接进入探测器,另一路光作为信号光进入延时环路中循环。延时环路主要由 X 型耦合器、延迟光纤环、一个声光频移器(AOM)及偏振控制器(PC)构成。AOM 用于实现多阶循环拍频信号的区分测量。这些拍频信号具有不同的延迟时间和不同的相干包络,可通过它们的

中心频率点来区分这些信号。PC 用于优化信号光的偏振态,从而提高拍频信号的信噪比。信号光在环路中循环 N 次后,一部分信号光从 X 型耦合器输出,并与参考光在 X 型耦合器的输出端发生干涉。干涉拍频光束经过光电探测器和频谱仪的探测分析后,系统输出一系列离散的拍频信号。拍频信号的阶数越高,代表延迟光纤越长,光纤的延时量越大。实验中延迟光纤为长度约为 2 km 的单模光纤,AOM 的频移量是 50 MHz。当信号光在自循环光路中循环 N 次时,延时 $10N \mu\text{s}$ (相当于 $2N$ km 光纤的延时量),并频移 $50N$ MHz。本文通过分析短延迟光纤的拍频谱来实现激光线宽测量,延迟光纤引入的信号衰耗不是限制线宽测量精度的主要因素,因此实验中无需使用光放大器,只需优化实验参数便能获得满足实验需求的多组具有不同延迟时间的拍频信号。在循环干涉仪中,X 型耦合器的耦合系数 α 会引起高阶拍频信号峰值的变化, α 越大(循环光路中的光功率越小),高阶拍频信号的峰值功率衰减得越慢,拍频阶数越多。图3为自循环干涉仪输入功率不变时,不同耦合系数 α 下系统输出的一系列离散的拍频信号。当 α 取 0.9 时,如图3(a)所示,在 310 MHz 范围内观测到 6 阶拍频信号,其相邻拍频信号的间隔为 50 MHz。当 α 值为 0.1 时,高阶拍频信号的功率衰减明显增大,在 310 MHz 范围内只观测到 5 阶拍频信号,具体如图3(b)所示。在实验中,通过权衡拍频信号的循环阶数和其信噪比,X 型耦合器的耦合系数 α 选取为 0.9[即有 10% (能量占比)的输入光进入循环光路]。

在激光器窄线宽测量中,系统环境噪声(如振动、声音等)都会耦合到延迟光纤中,从而降低拍频光谱的稳定性,最终影响拍频光谱的高分辨率测量及其仿真拟合^[21]。为了降低环境噪声对干涉仪的影响,将 2 km 光纤环置于密封的低压铝罐中,然后整个光学装置放在隔离度约为 30 dB 的隔音箱中,并利用隔离度约为 20 dB 的隔振台减小地面振动对光纤干涉仪的影响。

3 分析与讨论

本文利用频谱仪同时测得多个高阶拍频信号,从而降低线宽测量中的统计误差,从而提高线宽测量结果的可靠性。实验中我们分别测量了各阶拍频信号及其对应的系统噪声。由于第 1 阶拍频信号相干包络的谷底与测量系统的底噪接近,波包幅值测量精度受限,进而影响拟合线宽的准确性,因此实验

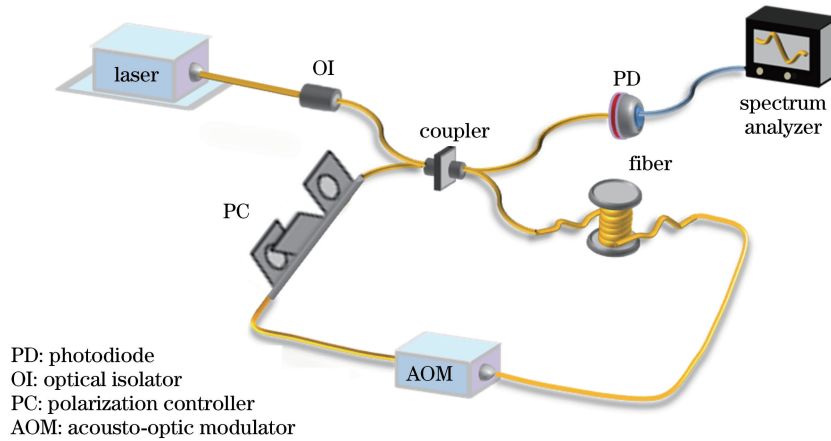
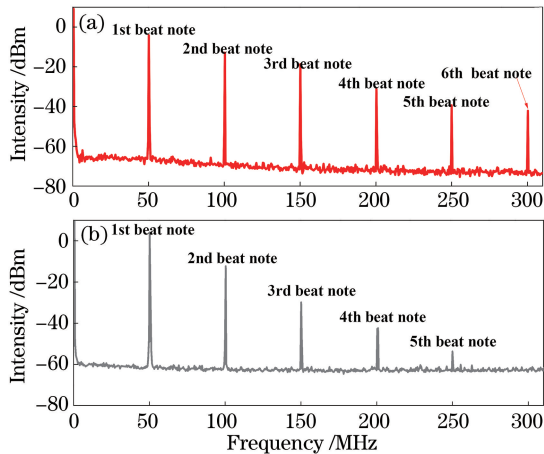


图 2 基于短光纤循环自外差法测量激光器线宽的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup of laser linewidth measurement based on recirculating self-heterodyne method with short fiber

图 3 耦合系数对拍频信号峰值强度的影响。(a) $\alpha=0.9$ 时干涉仪输出的拍频信号;(b) $\alpha=0.1$ 时干涉仪输出的拍频信号Fig. 3 Influence of coupling coefficient on peak intensity of beat signal. (a) Output beat signal from interferometer when $\alpha = 0.9$; (b) output beat signal from interferometer when $\alpha = 0.1$

中选取拍频相干包络高于其底噪的第 2、3 和 4 阶拍频信号进行测量。最后利用 Origin 软件编辑函数 [(1)式]并对实验数据进行非线性拟合,从而得到激光器的仿真线宽。图 4(a)中的点划线是频谱仪测得的第 2 阶拍频信号,实线是第 2 阶拍频信号的非线性拟合曲线,该仿真曲线的谱型及两翼包络周期和强度与实验测得的拍频信号基本吻合,其拟合线宽约为 0.940 kHz,波包周期约为 50.6 kHz(对应延迟光纤长度约为 2.019 km)。图 4(b)中的点划线是频谱仪测得的第 3 阶拍频信号,其谱型也是两翼叠加周期性波动的洛仑兹线型,实线是第 3 阶拍频信号的非线性拟合曲线。通过最小二乘法无限逼近该拍频信号,仿真计算的激光线宽为 0.950 kHz。

通过相同的方法对第 4 阶拍频信号进行非线性拟合,得到其仿真线宽为 0.942 kHz,如图 4(c)所示。从上面三组数据可以得到待测激光器的平均线宽为 0.944 kHz。

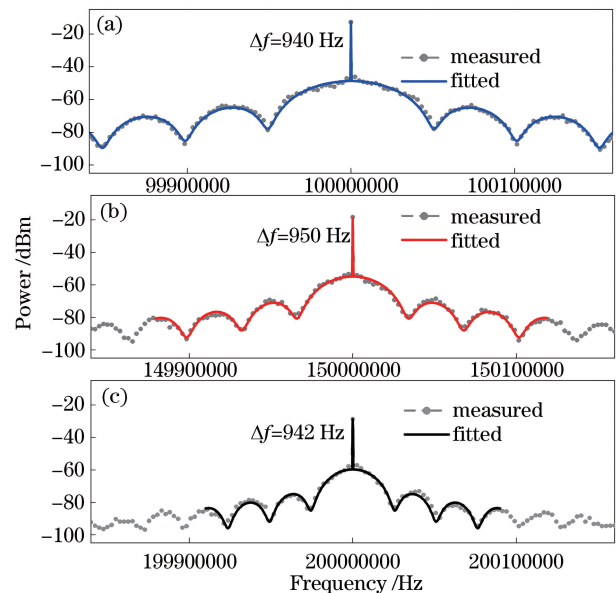


图 4 不同拍频信号及其仿真曲线。(a)第 2 阶拍频信号;(b)第 3 阶拍频信号;(c)第 4 阶拍频信号

Fig. 4 Different beat signals and their fitted curves. (a) 2nd order beat signal; (b) 3rd order beat signal; (c) 4th order beat signal

为了验证基于短光纤循环自外差法测量亚千赫兹激光器线宽方案的准确性,采用拍频比对的方式对待测激光器进行线宽测量^[22]。采用一台锁定线宽约为 0.3 Hz 的腔稳超窄激光器与待测激光器进行拍频比对,其拍频结果如图 5 所示,待测激光器的洛仑兹线宽为 0.989 kHz。该拍频线宽与本文所提

方法测得的线宽较为接近,这两种测量结果之间的差异主要是由待测激光器输出波长的漂移引起的。在测量过程中,待测激光器输出波长的漂移约为500 Hz/s,而频谱分析仪的测量范围为100 kHz,分辨率为300 Hz,测量时间为120 ms。对于两台激光器拍频,激光器波长漂移会导致线宽测量结果的展宽,而对于短光纤循环自外差法测量的激光器线宽,源于同一台激光器的两路光波长的相对漂移较小,因此短光纤循环自外差法比拍频法测得的激光器线宽偏小。通过上述两种方法的线宽测量及互相验证,可以得出,短光纤循环自外差法可精密测量窄线宽激光器的线宽。

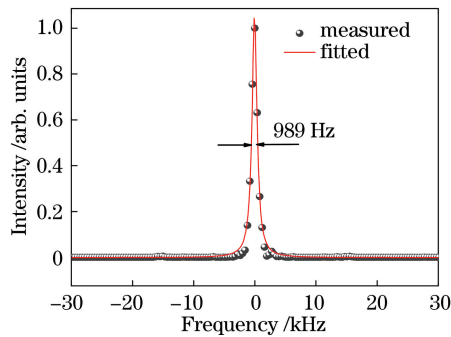


图5 传统拍频法测得的激光线宽

Fig. 5 Laser linewidth measured by traditional beat frequency method

4 结 论

提出了一种基于短光纤循环延迟自外差法精确测量窄线宽激光器线宽的方法。搭建了2 km短光纤循环延迟自外差实验装置,无需更换延迟光纤便可同时获得一系列具有不同延迟时间的激光拍频信号。通过对测得的多组拍频功率谱进行仿真拟合,获得了激光器的线宽。所提方法测得的延迟光纤的延迟时间远小于激光器的相干时间,几乎可以忽略 $1/f$ 频率噪声引起的频谱加宽。该方法具有误差小、结构简单等优点,为窄线宽激光器的线宽精密测量提供了一种切实可行的方法。

参 考 文 献

[1] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, et al. A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 687-692.

[2] Argence B, Chanteau B, Lopez O, et al. Quantum cascade laser frequency stabilization at the sub-Hz level[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(7): 456-460.

[3] Deng X, Liu J, Zang Q, et al. Coherent phase transfer via fiber using heterodyne optical phase

locking as optical amplification[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(32): 9620-9624.

[4] Zhu T, He Q, Xiao X, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2953-2963.

[5] Gu J B, Zhu F N, Liu L, et al. 1550 nm laser source with narrow linewidth and high tuning bandwidth[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901003. 古建标, 朱福南, 刘磊, 等. 1550 nm波段窄线宽高调谐带宽激光光源[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0901003.

[6] Hou H F, Jing M Y, Hu J Y, et al. Laser linewidth measurement at Fourier limit resolution[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 081402. 候慧芳, 景明勇, 胡建勇, 等. 傅里叶极限分辨率的激光线宽测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 081402.

[7] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(16): 630-631.

[8] Wang X, Yan F P, Han W G. Single longitudinal mode narrow linewidth thulium-doped fiber laser with special subring cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901001. 王雪, 延凤平, 韩文国. 基于特殊子环腔单纵模窄线宽掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0901001.

[9] Hu J, Wang Y F, Xing Z K, et al. Narrow-linewidth random fiber laser based on random fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1614002. 胡杰, 王奕斐, 邢志坤, 等. 基于随机光纤光栅的窄线宽随机光纤激光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1614002.

[10] Richter L, Mandelberg H, Kruger M, et al. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(11): 2070-2074.

[11] Horak P, Loh W H. On the delayed self-heterodyne interferometric technique for determining the linewidth of fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3923-3928.

[12] Tsuchida H. Simple technique for improving the resolution of the delayed self-heterodyne method[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(11): 640-642.

[13] Chen X P, Han M, Zhu Y Z, et al. Implementation of a loss-compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement[J]. *Applied Optics*, 2006,

- 45(29): 7712-7717.
- [14] Huang S H, Zhu T, Liu M, et al. Precise measurement of ultra-narrow laser linewidths using the strong coherent envelope[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41988.
- [15] Mercer L B. $1/f$ frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(4): 485-493.
- [16] Yu B L, Qian J R, Yang Y H, et al. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers [J]. Chinese Journal of 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.
- [17] Ludvigsen H, Tossavainen M, Kaivola M. Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay [J]. Optics Communications, 1998, 155(1/2/3): 180-186.
- [18] Huang S H, Zhu T, Cao Z Z, et al. Laser linewidth measurement based on amplitude difference comparison of coherent envelope[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 759-762.
- [19] Chen M, Meng Z, Wang J, et al. Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6803-6808.
- [20] Chen J P, Gao J, Jiao D D, et al. Laser linewidth measurement based on system parameters insensitive recirculating delayed self-heterodyne interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1114001. 陈玖朋, 高静, 焦东东, 等. 系统参数不敏感的循环延迟自外差激光线宽测量法 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1114001.
- [21] Conforti E, Rodigheri M, Sutili T, et al. Acoustical and $1/f$ noises in narrow linewidth lasers[J]. Optics Communications, 2020, 476:126286.
- [22] Jiao D D, Gao J, Deng X, et al. Sub-Hertz frequency stabilization of $1.55 \mu\text{m}$ laser on higher order HG_{mn} mode [J]. Optics Communications, 2020, 463: 125460.