

系统参数不敏感的循环延迟自外差激光线宽测量法

陈玖朋^{1,2} 高 静¹ 焦东东¹ 白巍凯^{1,2} 邓 雪¹
刘 杰^{1,2} 许冠军¹ 董瑞芳¹ 刘 涛¹ 张首刚¹

¹中国科学院国家授时中心中国科学院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 提出了一种激光线宽测量新方法—系统参数不敏感型循环损耗补偿循环延迟自外差法(LC-RDSHI)。通过对系统输出功率谱密度函数进行推导以及拍频功率谱仿真,分析讨论了该方法对系统参数不敏感的特性。在此基础上,搭建相应实验装置,观测了系统参数对 LC-RDSHI 输出功率谱的影响,发现实验观测结果与理论分析相吻合。此外,基于不同的实验系统参数,将本方法与传统的 LC-RDSHI 进行了线宽测量比较。结果表明,系统参数不敏感型 LC-RDSHI 具有更高的线宽测量精度,并且测试过程更加简单,从而具有更好的应用前景。

关键词 激光器; 线宽测量; 循环延迟自外差法; 功率谱; 系统参数; 不敏感

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1114001

Laser Linewidth Measurement Based on System Parameters Insensitive Recirculating Delayed Self-Heterodyne Interferometer

Chen Jiupeng^{1,2} Gao Jing¹ Jiao Dongdong¹ Bai Weikai^{1,2} Deng Xue¹
Liu Jie^{1,2} Xu Guanjun¹ Dong Ruifang¹ Liu Tao¹ Zhang Shougang¹

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

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

Abstract This paper presents a new approach for laser linewidth measurement-loss compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer (LC-RDSHI), which is insensitive to the system parameters. Through the derivation of its system output power spectral density function and simulation of beat frequency power spectrum, the characteristics of system parameters insensitivity for proposed method are analyzed and discussed. On this basis, we build the appropriate experimental device and observe the effects of system parameters on the output power spectrum of LC-RDSHI, and we find that the experimental observations agree with theoretical analysis. Besides, based on different experiment system parameters, we make a comparison of linewidth measurements between the proposed method and conventional LC-RDSHI. The results indicate that the system parameters insensitive LC-RDSHI has higher linewidth measurement accuracy, its measurement process is easier, and therefore, it has better application prospects.

Key words lasers; linewidth measurement; recirculating delayed self-heterodyne interferometer; power spectrum; system parameters; insensitive

OCIS codes 140.3518; 060.2480; 120.3688

收稿日期: 2016-04-12; 收到修改稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项(61127901)、国家自然科学基金(11273024, 61025023)、国家自然科学基金青年科学基金(11403031)、中组部"青年拔尖人才支持计划"项目(组厅字[2013]33号)、中科院科技创新"交叉与合作团队"项目(中科院人教字(2012)119号)、中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-W02)

作者简介: 陈玖朋(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤光频传递方面的研究。E-mail: chenjiupeng13@mailsucas.ac.cn

导师简介: 刘涛(1976—),男,研究员,博士生导师,主要从事光钟、光纤光频传递、窄线宽激光器等方面的研究。

E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

窄线宽光源具有频率噪声低、短期频率稳定性好等优点^[1-4],在光频传递、光纤传感、精密光谱测量、激光雷达、测距以及遥感^[5-8]等领域有着广泛应用。作为窄线宽光源的一个重要指标,线宽对相关应用中的测量距离、精度和灵敏度等起着决定性作用。目前,商用激光器线宽已达到千赫兹乃至百赫兹量级,光谱分析仪以及法布里-珀罗腔干涉仪的分辨率已无法满足这类激光器的线宽测试要求。国内外普遍采用自外差法实现这类激光器线宽的精确测量,自外差法无需另一台激光源作为参考,避免了对两台独立光源的频率匹配以及频率稳定性的苛刻要求,且激光的光谱线型可直接通过频谱分析仪观测。

国外对于自外差激光线宽测量法的研究工作开展较早。1980年,Okoshi等^[9]提出延迟自外差法(DSHI),在不需要另一台超窄且更加稳定的光源作为参考的情况下能够较为准确地测量激光线宽;实验中,由于延迟光束仅单次经过延时光纤,延迟时间有限,限制了线宽的实测分辨率。1990年,Tsuchida等^[10]在DSHI的基础上提出了基于光纤环的自外差法,这种方法允许延迟光束多次循环经过同一延时光纤,缩短了延时光纤的实际使用长度。1992年,Dawson等^[11]在光纤环中加入光纤放大器补偿光功率损耗,增加了循环次数,提高了测量分辨率,该方法即为循环损耗补偿延迟自外差法(LC-RDSHI)。相较于DSHI,LC-RDSHI利用光纤环作为延时线,延时可循环累积,可以大幅提高线宽测量分辨率。但是,由于光场在光纤环中循环传输,多光场干涉导致输出功率频谱混叠,与待测激光频率噪声谱之间难以形成良好的线性对应关系,同时功率谱型对耦合效率、增益等多个系统参数敏感,因此线宽测量精度有限,且系统调试繁杂,不利于实际应用。

本文基于频谱分离的思想,提出系统参数不敏感的LC-RDSHI。通过巧妙设计光纤干涉系统的结构,使干扰信号和待测信号映射到不同的探测频率处,进而获得无干扰的信号频谱,且信号频谱与待测激光频率噪声谱之间保持良好的线性对应关系,谱型基本不受系统参数的影响,从而克服了传统LC-RDSHI的不足。

2 基本原理

自外差法的基本原理是:利用光纤干涉系统把光频信号(激光频率噪声谱)转换为射频信号(拍频信号电流谱)进行测量。即将待测激光器的输出光作为本振光和信号光,信号光延时并移频后与本振光干涉拍频;当延迟时间远大于激光相干时间时,本振光与信号光等效于分别来自两个独立的光源,拍频信号功率谱与激光频率噪声谱之间存在线性对应关系,则通过拍频信号功率谱即可确定出激光器的线宽。

传统的LC-RDSHI光纤干涉系统结构如图1所示,待测激光器的输出被X型耦合器分为本振光束和信号光束,本振光束直接进入探测器(PD),信号光束进入光纤环循环 m ($m=1,2,3,\dots$)次后到达探测器与本振光合束拍频。信号光场经光纤环每循环一次,产生延时 τ_0 并移频 Ω 。于是系统输出功率谱密度函数可表示为^[12]

$$\sum_{m=1} S_m(\omega) = \sum_{m=1} \frac{\gamma^m}{(1-\alpha)^2} P(\omega) S_0(\omega, m\tau_0, m\Omega), \quad (1)$$

即系统输出一系列离散、中心角频率为 $m\Omega$ 的拍频功率谱, $\gamma=\alpha\beta$, α 为耦合器效率, β 为环路总增益; ω 为角频率, $P(\omega)$ 为 ω 的周期函数。当延迟时间远远大于待测激光相干时间 τ_c (即 $m\tau_0 \gg \tau_c$)时,则循环 m 次的信号光束与本振光束之间的拍频功率谱为

$$S_0(\omega, m\tau_0, m\Omega) \propto \frac{1}{2} \frac{2/\tau_c}{(2/\tau_c)^2 + (\omega - m\Omega)^2}. \quad (2)$$

拍频功率谱与激光频率噪声谱之间存在线性对应关系,谱型为严格的洛伦兹型,谱宽为激光线宽的2倍。然而信号光束经过多次循环,除了与本振光干涉拍频以外,还会相互干涉拍频,从而在频域上,信号光相互干涉拍频的信号和信号光与本振光之间干涉拍频的信号混叠在一起,使 $S_0(\omega, m\tau_0, m\Omega)$ 被函数 $P(\omega)$ 周期性调制。式中

$$P(\omega) = \alpha + \frac{(1-\alpha)(\gamma^2 - \alpha)}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos[(\omega + m\Omega)\tau_0]}, \quad (3)$$

于是, $S_m(\omega)$ 与激光频率噪声谱之间难以形成良好的线性对应关系,谱型不再是严格的洛伦兹型。同时,

由(3)式可以看到, $P(\omega)$ 是系统参数 γ, α 的函数, 故传统 LC-RDSHI 输出功率谱型随环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数的改变而变化, 其谱宽不能精确反映待测激光的线宽; 当且仅当系统参数满足 $\gamma = \alpha^{1/2}$ 时, $P(\omega) = \alpha, S_m(\omega)$ 为严格的洛伦兹型, 其谱宽才能精确反映待测激光的线宽。

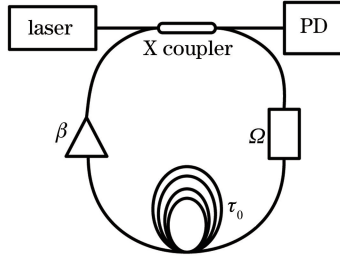


图 1 传统 LC-RDSHI 结构

Fig. 1 Structure of the conventional LC-RDSHI

因此, 基于频谱分离的思想, 设计了系统参数不敏感型 LC-RDSHI 光纤干涉系统(图 2), 该系统可以使干扰频谱与待测频谱相分离。从图 2 可见, 待测激光由 Y 型耦合器分为本振光和信号光, 本振光经移频器移频 Λ 后通过 Y 型耦合器进入光电探测器, 信号光场经光纤环循环 m 次后通过 Y 型耦合器进入光电探测器与本振光合束拍频, 且每循环一次, 信号光场延时 τ_0 并移频 Ω 。探测器输出的拍频光电流可表示为

$$I \propto \left(2 + \sum_{l=0}^{\infty} c_l c_l^* \right) + \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} c_m \exp\{-j[\varphi(t) - \varphi(t - m\tau_0)]\} \exp[j(m\Omega - \Lambda)t] + \text{c.c.} \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{l=0}^{\infty} c_l^* c_{l+m} \exp\{-j\{\varphi(t - l\tau_0) - \varphi[t - (l+m)\tau_0]\} \} \exp(jm\Omega) + \text{c.c.} \right\}, \quad (4)$$

式中系数 $c_0 \propto \alpha/(1-\alpha), c_m = \gamma^{m/2} \exp[jm(m-1)\Omega\tau_0/2], m = 1, 2, \dots$ 。

(4)式等号后第 1 项为直流项; 第二项为本振光与信号光之间的拍频项, 中心角频率为 $|m\Omega - \Lambda|$; 第三项为信号光多次循环后相互干涉形成的拍频项, 中心角频率为 $m\Omega$ 。当 Λ 不等于 Ω 的整数倍时, $k\Omega - \Lambda \neq m\Omega, k = 1, 2, 3, \dots$, 则从频域上会使第二项和第三项相分离。若不考虑直流项以及信号光相互干涉拍频形成的干扰项, 则系统输出功率谱密度函数为

$$\sum_{m=0} S_m(\omega) = F[\langle I(t)I^*(t - \tau) \rangle] = \sum_{m=0} \frac{\gamma^m}{(1-\alpha)^2} S_0(\omega, m\tau_0, m\Omega - \Lambda). \quad (5)$$

即系统输出一系列离散、中心角频率为 $m\Omega - \Lambda$ 的拍频功率谱, 环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数的变化只改变输出功率谱的增益, 不改变功率谱型。由(2)式可知, 当延迟时间远远大于相干时间时, 系统参数不敏感型 LC-RDSHI 输出的拍频功率谱与激光频率噪声谱之间存在良好的线性对应关系, 谱型始终保持严格的洛伦兹型, 基本不受系统参数的影响, 其谱宽能精确反映待测激光的线宽。

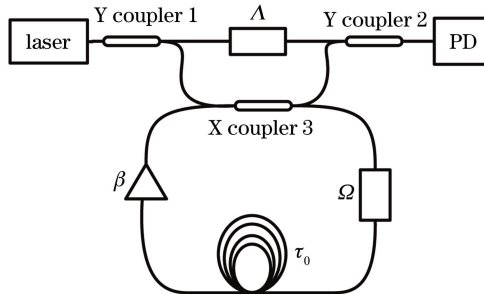


图 2 系统参数不敏感型 LC-RDSHI 结构

Fig. 2 Structure of the system parameter insensitive LC-RDSHI

3 拍频信号功率谱仿真及分析

对外差测线宽法来说, 电流谱与光频谱之间需保持良好的线性对应关系, 即当延迟时间远远大于待测

激光相干时间时,激光器相干性对拍频功率谱型的影响可以忽略,通过读取拍频功率谱的谱宽即可获得激光器的线宽。然而,由(1)式可知,消除激光相干性的影响后,传统 LC-RDSHI 拍频功率谱型还与环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数有关;但实际测量过程中,激光功率、声光调制器衍射效率会随机产生变化,光纤接头及散射等因素影响都会引起环路有效增益、耦合器耦合效率的改变。为了研究系统参数对拍频功率谱型的影响,利用 Matlab 软件模拟了两种系统不同环路有效增益以及不同耦合器耦合效率时的输出功率谱型,取 $\tau_0=6.5 \mu\text{s}, \tau_c=12.5 \mu\text{s}, m=10, \Omega=4 \text{ MHz}, \Lambda=3.7 \text{ MHz}$ 。不同环路有效增益下两种系统的仿真频谱图如图 3 所示,不同耦合器耦合效率下两种系统的仿真频谱图如图 4 所示。

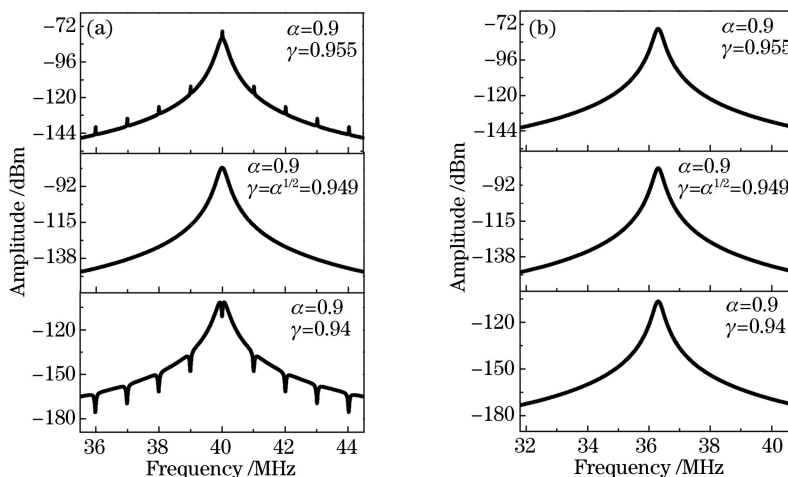


图 3 不同环路有效增益下(a)传统 LC-RDSHI 和(b)系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的仿真频谱
Fig. 3 Simulation spectra of (a) conventional LC-RDSHI and (b) system parameter insensitive LC-RDSHI with different loop effective gains

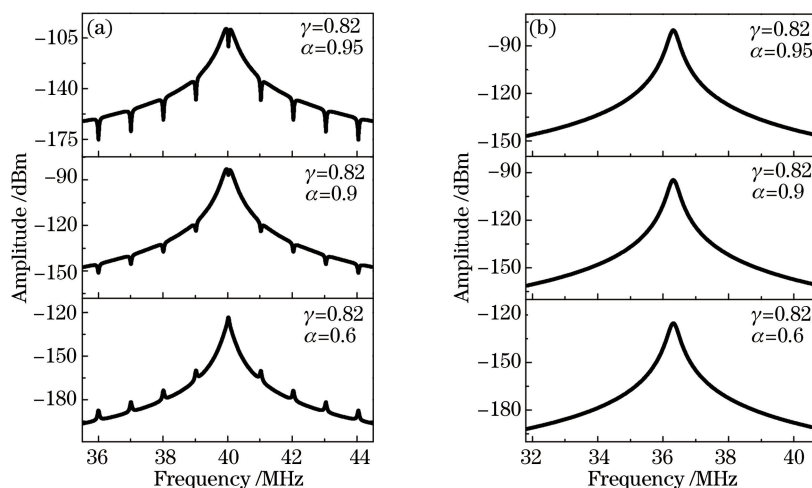


图 4 不同耦合器耦合效率下(a)传统 LC-RDSHI 和(b)系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的仿真频谱
Fig. 4 Simulation spectra of (a) conventional LC-RDSHI and (b) system parameter insensitive LC-RDSHI with different coupling efficiencies

由图 3 和图 4 可知,当延迟时间远大于相干时间时,传统 LC-RDSHI 的拍频功率谱型并不是严格的洛伦兹型,而且稳定性差,当环路有效增益、耦合器的耦合效率等系统参数产生小的改变时,其谱型变化剧烈;当且仅当 $\gamma=\alpha^{1/2}$ 时, $P(\omega)=\alpha$ 为常数,其谱型才为严格的洛伦兹型。而系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的输出功率谱型单一,稳定性高,当环路有效增益、耦合器的耦合效率等系统参数改变时,其谱型均始终保持严格的洛伦兹型。

4 实验装置

实验采用中心波长为 1550 nm 的商用光纤激光器(NKT E15)作为光源,其线宽约为 1 kHz。为比较改进前后的 LC-RDSHI 系统,搭建了相应的实验装置,如图 5 所示。传统 LC-RDSHI 的光纤干涉系统[图 5(a)]主要由一个光纤环构成,环内包含一个 X 型耦合器,一个衰减器(VOA),25 km 延时单模光纤(SMF),一个频移为 40 MHz 的声光调制器(AOM),一个增益为 18 dB、噪声系数小于 5 dB 的掺铒光纤放大器(EDFA),一个带宽为 50 GHz 的光纤带通滤波器(OBF),以及一个偏振控制器(PC)。参数不敏感型 LC-RDSHI 光纤干涉系统[图 5(b)]除了光纤环结构与传统 LC-RDSHI 系统相同以外,还包含两个 Y 型耦合器和一个声光调制器(频移量为 40.7 MHz)。待测激光器经衰减器进入光纤干涉系统进行干涉拍频,当拍频光束进入光电探测器后,采用罗德施瓦茨 FSC3 频谱仪获取拍频光电流谱。整个系统放置在包有隔音(30 dB)保温棉的木箱中,将声音及振动噪声对系统的干扰降至最小。

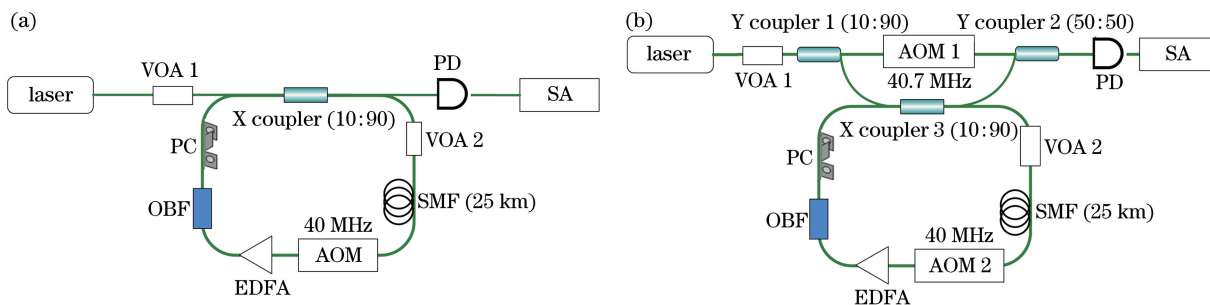


图 5 实验装置原理图。(a)传统 LC-RDSHI;(b)系统参数不敏感型 LC-RDSHI

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup. (a) Conventional LC-RDSHI; (b) system parameter insensitive LC-RDSHI

5 实验结果及分析

5.1 系统输出功率谱的测量

自外差线宽测量系统输出拍频功率谱的信噪比以及谱型稳定性影响线宽测量的精度。由模拟仿真结果可知,传统的 LC-RDSHI 线宽测量系统输出功率谱信噪比较低,谱型对耦合器效率、环路总增益等系统参数敏感,稳定性差,不利于分析;而改进后的系统输出功率谱信噪比较高,谱型具有较好的稳定性,几乎不受耦合器效率、环路总增益等系统参数的影响。为观察系统参数对拍频功率谱型的影响,可以通过改变光纤环中 X 型耦合器的耦合效率 α ,以及调节声光调制器信号源的输出功率来控制环路有效增益 γ ,并观察不同环路有效增益、不同耦合器耦合效率对应的拍频功率谱型。

不同环路有效增益($\alpha=0.9$)下测得的传统系统和改进系统的 12 阶(信号光束循环 12 次)拍频功率谱如图 6 所示,光纤环中 X 型耦合器不同耦合效率($\gamma=0.87$)下测得的传统系统和改进系统的 12 阶拍频功率谱(为便于观察,将所有输出功率谱的中心频率移至 0 Hz)如图 7 所示。由于信号光已循环 12 次,延迟时间远远大于激光相干时间,激光器的相干性对拍频功率谱型的影响可以忽略。从图 6 和图 7 可以看到,传统的 LC-RDSHI 输出功率谱信噪比较低,功率谱型稳定性较差,对环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数敏感,当环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数产生小的变动时,谱型会发生明显的变化,甚至彼此相差很远。而系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的输出功率谱信噪比较高,功率谱型比较稳定,当环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数变化时,谱型几乎保持不变。

5.2 NKT 激光器线宽值的测量

当延迟时间远大于相干时间时,信号光与本振光的拍频功率谱型接近严格的洛伦兹型,此时通过直接读取拍频谱峰值下 10 dB 处谱宽值再除以 $2\sqrt{9}$ 即为 3 dB 洛伦兹线宽(激光线宽值)^[11]。基于图 6 的光功率谱(两种系统在不同环路有效增益 γ 时测得的拍频功率谱),通过 10 dB 处直接读取获得的 NKT 激光器线宽值如图 8 所示,可以看出,在不同环路有效增益下,通过传统 LC-RDSHI 输出功率谱测得的激光线宽值(圆圈)差异明显,而通过系统参数不敏感型 LC-RDSHI 输出功率谱测得的激光线宽值(五角星)基本保持固定;当且仅当环路有效增益 $\gamma=\alpha^{1/2}=0.949$ 时,传统 LC-RDSHI 输出功率谱型接近严格洛伦兹型,通过两种系

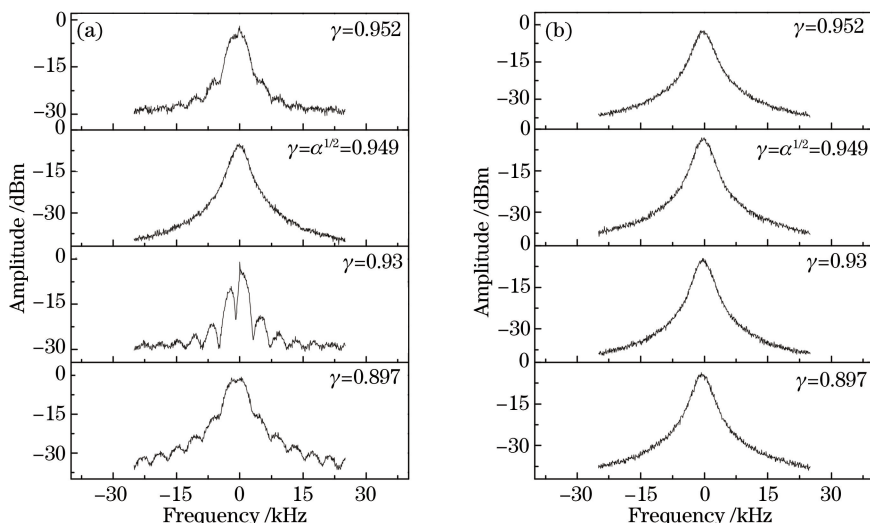


图 6 不同环路有效增益下(a)传统 LC-RDSHI 和(b)系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的输出功率谱
 Fig. 6 Output power spectra of (a) conventional LC-RDSHI and (b) system parameter insensitive LC-RDSHI with different loop effective gains

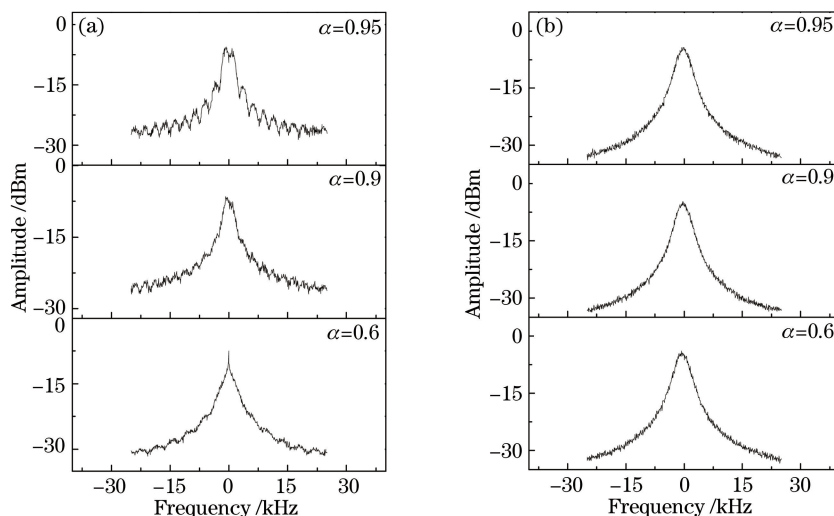


图 7 耦合器不同耦合效率下(a)传统 LC-RDSHI 和(b)系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的输出功率谱
 Fig. 7 Output power spectra of (a) conventional LC-RDSHI and (b) system parameter insensitive LC-RDSHI with different coupling efficiencies

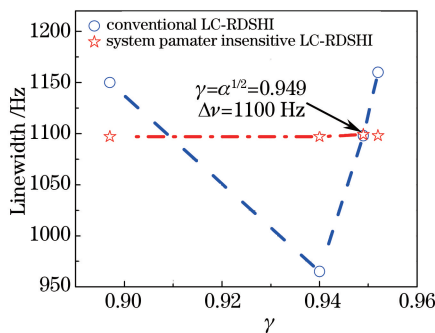


图 8 不同环路有效增益下的线宽值

Fig. 8 Linewidth with different loop effective gains

统获得的激光线宽值相同,均为 1100 Hz。由此可知,相较于传统 LC-RDSHI,系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的线宽测量结果几乎不受环路有效增益、耦合器耦合效率等系统参数的影响,具有更高的线宽测量

精度,而且不需要严格计算及调节系统参数,线宽测量过程更为简便。

5.3 误差分析及修正

利用自外差法进行线宽测量时,均假设线宽仅来源于量子噪声,即洛伦兹线型的白频率噪声。但实际上,除了白频率噪声成分外,自外差拍频信号功率谱还包含环境变化引起的类高斯线型 $1/f$ 噪声(如抽运噪声、声学噪声以及系统噪声等)成分,且高斯线型 $1/f$ 噪声的谱宽随延时光线长度的增加而变宽。因此,当延时时间远大于相干时间时,自外差系统测得的拍频信号功率谱是混杂了 $1/f$ 噪声类高斯型和白噪声洛伦兹型的 Voigt 型^[13-16]:

$$I(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu')L(\nu - \nu')d\nu', \quad (6)$$

$$G(\nu) = \frac{\sqrt{4\ln 2}}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_G} \exp\left[-(\nu \sqrt{4\ln 2})^2 / (\Delta\nu_G)^2\right], \quad (7)$$

$$L(\nu) = \frac{\Delta\nu_L}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_L)^2/4}, \quad (8)$$

式中 ν 为频率; $G(\nu)$ 为归一化的高斯型函数, $\Delta\nu_G$ 为其半峰全宽,代表 $1/f$ 噪声的大小; $L(\nu)$ 为归一化的洛伦兹型函数, $\Delta\nu_L$ 为其半峰全宽,即激光线宽。

激光器的相干性能主要受限于白频率噪声洛伦兹型谱宽,当 $1/f$ 类高斯型噪声的谱宽大于激光器自身线宽时,就会使自外差拍频谱额外加宽;当 $1/f$ 类高斯型噪声的谱宽接近或小于激光器自身线宽时,则对自外差拍频谱的额外加宽很小,基本可以忽略^[13]。利用 Origin 软件对实验数据进行 Voigt 拟合获得的洛伦兹线宽($985 \text{ Hz} \pm 85 \text{ Hz}$)以及相应的高斯线宽($2864 \text{ Hz} \pm 43 \text{ Hz}$)如图 9 所示,来源于激光器白频率噪声的洛伦兹线宽表征待测激光器的线宽(985 Hz),其略小于通过实验观测谱直接读取的线宽值(1100 Hz);高斯线宽表征 $1/f$ 噪声的谱宽(2864 Hz), $1/f$ 噪声分别来源于激光器非均匀展宽以及系统光纤噪声。晶格缺陷(错位、空位等晶体不均匀性)会造成待测激光器存在一定程度的非均匀展宽(高斯线型),使其输出光谱线型不再是严格的洛伦兹线型,而是洛伦兹线型与高斯线型形成的卷积 Voigt 线型;同时,在 LC-RDSHI 系统中,光纤噪声使高斯线宽随延迟光纤逐渐变宽。因此,由图 9 可知, $1/f$ 噪声谱宽(高斯线宽)大于激光器的线宽(洛伦兹线宽),从而使待测光谱线宽展宽。

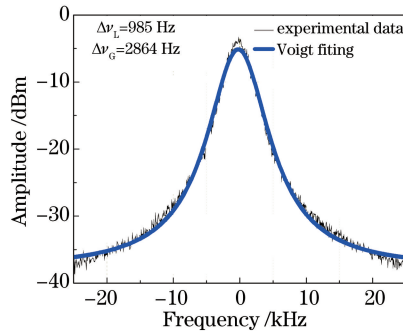


图 9 Voigt 拟合

Fig. 9 Voigt fitting

6 结 论

提出了一种系统参数不敏感的 LC-RDSHI 线宽测量新方法,从频域上分离了传统 LC-RDSHI 多光场干涉导致的干扰频谱,使反映激光线宽的拍频功率谱信噪比更高、谱型更加稳定且不受系统参数影响,从而简化了线宽测量过程,同时提高了测量精度。对系统参数不敏感型 LC-RDSHI 的系统输出功率谱密度函数进行了推导与仿真,并结合实验,测试了系统参数对其拍频功率谱型的影响,结果显示,实验测得的拍频功率谱型与理论分析结果相吻合。同时,基于拍频功率谱测得了千赫兹量级商用光纤激光器的线宽,并分析了 $1/f$ 噪声引起的测量误差以及剔除误差的方法。

参 考 文 献

- 1 Huang Changqing, Liu Mengshi, Che Tengyun, *et al.* Output characteristics of Brillouin-erbium random fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0314001.
黄昌清, 刘梦诗, 车腾云, 等. 布里渊-掺铒光纤随机光纤激光器输出特性分析[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0314001.
- 2 Peng Yu, Liu Pengfei, Li Wei. Bad-cavity Raman laser based on lattice-trapped cesium atoms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 041402.
彭 瑜, 刘鹏飞, 李 伟. 基于铯原子的坏腔拉曼激光器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 041402.
- 3 Wei Kaihua, Chen Qingguang, Wen Ruhua, *et al.* High power linearly polarized Yb fiber laser with picosecond pulse bunch output[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 0414002.
魏凯华, 陈庆光, 温如华, 等. 高功率线偏振皮秒脉冲簇 Yb 光纤激光器[J]. *光子学报*, 2016, 45(4): 0414002.
- 4 Ye Bin, Dai Shixun, Liu Zijun, *et al.* Research progress of Er^{3+} : ZBLAN fiber laser operating at $2.7 \mu\text{m}$ [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090004.
叶 斌, 戴世勋, 刘自军, 等. $2.7 \mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} : ZBLAN 光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090004.
- 5 Jiang H F. Development of ultra-stable laser sources and long-distance optical link via telecommunication networks[D]. Pairs: University Pairs XIII, 2010.
- 6 Nawrodt R, Rowan S, Hough J, *et al.* Challenges in thermal noise for 3rd generation of gravitational wave detectors[J]. *General Relativity & Gravitation*, 2011, 43(2): 593-622.
- 7 Rafac R J, Young B C, Beall J A, *et al.* Sub-dekahertz ultraviolet spectroscopy of 199Hg^+ [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(12): 2462-2465.
- 8 Bufton J L, Garvin J B, Cavanaugh J F, *et al.* Airborne lidar for profiling of surface topography[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(1): 72-78.
- 9 Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(16): 630-631.
- 10 Tsuchida H. Simple technique for improving the resolution of the delayed self-heterodyne method[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(11): 640-642.
- 11 Dawson J W, Park N, Vahala K J. An improved delayed self-heterodyne interferometer for linewidth measurements[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(9): 1063-1066.
- 12 Han M, Wang A. Analysis of a loss-compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer for laser linewidth measurement[J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(1): 53-58.
- 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 Murakami M, Saito S. Evolution of field spectrum due to fiber-nonlinearity-induced phase noise in in-line optical amplifier systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(11): 1269-1272.
- 15 Thompson W J. Numerous neat algorithms for the Voigt profile function[J]. *Computers in Physics*, 1993, 7(6): 627-631.
- 16 Weideman J A C. Computation of the complex error function[J]. *Siam Journal on Numerical Analysis*, 1994, 31(5): 1497-1518.