

基于外差干涉法的微腔光频梳模式线宽分析与表征

张朗朗^{1,2}, 丁宝轲², 周治垒^{1,2}, 王文亭^{3*}, 梁磊^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 激光频率梳的线宽是衡量其性能的关键参数之一, 在星载相干光通信、精密计量以及时间频率标准等应用中具有重要意义。为了提升系统灵敏度和整体性能, 频率梳线宽通常需要被压窄至千赫兹甚至赫兹量级, 这也对单个激光模式线宽的准确表征提出了更高要求。本文围绕克尔微腔光频梳模式的线宽表征, 分别研究了短延时部分相干和长延时近似非相干两种延时自外差测量状态。建立相干包络第二峰与第二谷功率差与光频梳本征线宽之间的定量关系, 优化延时光纤长度, 得到了多个微腔光频梳模式的线宽。理论分析与实验结果表明, 在合适的短延时条件下, 基于功率差的相干包络分析能够减弱低频频率噪声引起的谱线展宽, 适用估计快速相位扩散对应的线宽分量。另外, 本文采用长延时自外差方法测量泵浦激光器和微腔光频梳梳齿的线宽, 并分析了低频频率噪声、长光纤环境扰动及相干状态变化对测量结果的影响。短延时和长延时自外差测量具有不同的噪声响应特性, 可为窄线宽微腔光频梳的线宽评估提供互补的表征手段。

关键词: 激光线宽; 克尔微腔光频梳; 外差干涉法

中图分类号: TN247

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260218

CSTR: 32170.14.CJL.20260218

Linewidth analysis and characterization of frequency microcomb modes via heterodyne interferometry

ZHANG Langlang^{1,2}, DING Baoke², ZHOU Zhilei^{1,2}, WANG Wenting^{3*}, LIANG Lei^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

3. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wtwang@bit.edu.cn; liangl@ciomp.ac.cn

Abstract: The linewidth of an optical frequency comb is one of the key parameters for evaluating its performance and is of considerable importance in applications such as spaceborne coherent optical communication, precision metrology, and time-frequency standards. To improve system sensitivity and overall performance, the linewidths of frequency-comb modes generally need to be narrowed to the kilohertz or even hertz level, which imposes more stringent requirements on the accurate characterization of individual laser-mode linewidths. This work investigates the linewidth characterization of Kerr microresonator frequency-comb modes under two delayed self-heterodyne measurement regimes: short-delay partial coherence and long-delay approximate incoherence. A quantitative relationship is established between the power difference of the second peak and the second valley in the coherent envelope and the intrinsic linewidth of the optical frequency comb. By optimizing the delay-fiber length, the linewidths of multiple microresonator frequency-comb modes are obtained. Theoretical analyses and experimental results demonstrate that, under appropriate short-delay conditions, coherent-envelope analysis based on the peak-to-valley power difference

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB2806200)

This research was supported by the Youth Scientist Project of the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB2806200)

can mitigate spectral broadening caused by low-frequency frequency noise and is suitable for estimating the linewidth component associated with rapid phase diffusion. In addition, the linewidths of the pump laser and microresonator frequency-comb lines are measured using the long-delay self-heterodyne method, and the effects of low-frequency frequency noise, environmental perturbations in the long optical fiber, and variations in the coherence state on the measurement results are analyzed. Short-delay and long-delay self-heterodyne measurements exhibit different noise-response characteristics and can therefore serve as complementary approaches for evaluating the linewidths of narrow-linewidth microresonator optical frequency combs.

Keywords: Laser linewidth; Kerr microcomb; Heterodyne interferometry

1 引 言

光学频率梳在频域上表现为一系列等间隔分布的谱线,而在时域上则对应于具有固定重复频率的脉冲序列^[1]。随着应用场景的不断拓展,人们已经发展出多种光学频率梳产生机制,包括基于锁模激光器的飞秒光频梳^[2]、基于微腔的克尔光频梳^[3]、由电光调制器产生的光频梳^[4],以及由四波混频效应诱导产生的光频梳^[5]。在这些技术平台中,微腔产生的光频梳,尤其是克尔微腔光学频率梳^[6],因其结构紧凑、功耗低、具备大规模片上集成潜力以及梳齿相干性高等优势,已成为当前研究的重要方向。

克尔微腔光频梳中的噪声主要来源于泵浦激光器频率噪声的相干转移以及重复频率定时抖动的波动^[7],同时还受到微谐振腔热折射噪声^[8]、拉曼自频移与色散波诱导孤子反冲之间相互作用^[9]等因素的影响。具体而言,定时抖动 $\delta t(t)$ 会引入相位偏差 $\phi_n(t)=2\pi n f_{\text{rep}} \delta t(t)$,且该相位偏差会随模式序号 n 的增大而增大,从而将梳齿线宽与脉冲序列的时间稳定性直接联系起来。近年来,线宽压窄方面已取得一系列实验进展,包括基于微谐振腔的赫兹线宽半导体激光器^[10]、片上螺旋腔和环形腔激光器^[11],以及亚赫兹线宽布里渊激光器^[12],其线宽已达到数赫兹量级。这些进展显著提升了频率梳梳齿的相干性和光谱纯度,为多种超精密应用提供了重要支撑。尽管微腔激光器和光频梳稳频技术已经取得了显著进展,但对光频梳线宽的精确控制和准确表征仍然面临挑战。因此,获得窄线宽且线宽特性明确的光频梳,对于星载相干光通信、精密计量以及太赫兹科学与技术等高要求应用具有重要意义^[13-16]。

为了表征光学线宽特性,常用方法包括延时自外差干涉仪(delayed self-heterodyne or homodyne interferometers, DSHIs)^[17]、损耗补偿型循

环延时 DSHIs^[18],以及偏振不敏感的 Michelson DSHIs^[19]。由这些方法获得的功率谱密度通常包含两个组成部分:其一是与平稳白频率噪声相关的本征洛伦兹线型分量,其二是由非平稳 $1/f$ 频率噪声与长光纤延时共同作用所引起的展宽高斯分量。尽管 Voigt 线型拟合常被用于分离这两类贡献,但要准确确定二者的相对权重仍较为困难^[20]。在采用长延时光纤进行超窄线宽测量时,本征洛伦兹分量往往会被占主导地位的高斯基底所掩盖^[21]。

本文围绕窄线宽克尔微腔光频梳的线宽准确表征需求,对短延时和长延时两种典型延时自外差测量状态进行了对比分析。具体而言,本文首先利用短延时条件下的相干包络特征,建立相干包络第二峰与第二谷功率差(contrast difference with the second peak and the second trough, CD-SPST)参数与微腔光频梳模式本征线宽之间的定量关系,并对延时光纤长度进行优化,以减弱低频率噪声引起的谱线展宽。随后,采用长延时近似非相干自外差方法测量泵浦激光器和微腔光频梳梳齿的线宽,并分析延时长度、相干状态及低频噪声对测量结果的影响。该研究可为不同延时条件下微腔光频梳线宽测量结果的理解和窄线宽光频梳的性能评估提供参考。

2 原 理

激光线宽表征的是激光发射光谱的宽度,并直接反映光场的时间相干性与相位稳定性。激光线宽来源于由基本噪声过程驱动的相位涨落,例如由 Schawlow - Townes 极限所描述的自发辐射噪声;同时也受到泵浦波动、热噪声以及环境扰动等技术噪声源的影响^[22]。在频域中,激光线宽通常定义为光功率谱的半高全宽(full width at half maximum, FWHM),其线型可根据主导噪声统计

特性的不同表现为洛伦兹型、高斯型或 Voigt 型。在时域中, 线宽也可以等效地与一阶光场相关函数的衰减相联系。瞬时光学频率可表示为 $f(t) = f_0 + \delta f(t)$, 其中频率涨落 $\delta f(t)$ 会积分形成相位噪声, 进而导致谱线展宽。因此, 激光线宽与单边带相位噪声谱之间存在内在联系, 这一关系通常可通过 β 分离线进行描述; β 分离线用于区分慢频率漂移和快速相位扩散对线宽的不同贡献。在实际系统中, 测得的线宽不仅取决于激光器自身的本征动力学特性, 还与观测时间尺度密切相关。因此, 线宽应被视为一个系统级参数, 而不是固定不变的材料常数。尤其是在微秒至毫秒时间尺度上测得的短时本征线宽, 通常主要受快速相位扩散过程支配。

对于光学频率梳而言, 线宽指的是每一个独立梳齿的光谱宽度, 它决定了频率梳梳齿的频率确定性和相干性。在弹性带模型中, 以静线宽模式为参考时, 各个梳齿的线宽会随着模式序号的增加呈二次增长^[23], 从而导致光频梳光谱范围内出现系统性的线宽展宽。因此, 单个梳齿的线宽可以看作由多种因素共同作用的结果, 包括泵浦激光器的本征线宽、光频梳产生过程中的非线性噪声转移, 例如微谐振腔或非线性光纤中的噪声转移, 以及热噪声、机械噪声等环境扰动。若将这些贡献分别记为 Δf_{laser} 、 $\Delta f_{\text{nonlinear}}$ 和 $\Delta f_{\text{thermal}}$, 则梳齿总线宽可近似表示为:

$$\Delta f^2 = \Delta f_{\text{laser}}^2 + \Delta f_{\text{nonlinear}}^2 + \Delta f_{\text{thermal}}^2 \quad (1)$$

为了表征微腔光频梳的线宽, 本文采用延时自外差干涉方法, 并分别研究短延时部分相干和长延时近似非相干两种工作状态。在光纤延时自外差线宽测量中, 待测激光被分为两束。其中一束经过长延时光纤后进入光电探测器, 另一束则经过声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 后进入光电探测器。光电探测器接收到的合成电场可表示为^[24-25]:

$$E_T(t) = E(t) + \rho E(t + \tau_0) \exp(j2\pi f_{\text{AOM}} t) \quad (2)$$

其中, ρ 为两束光的幅度比, τ_0 为时间延时, f_{AOM} 表示两束混合光场之间的平均频率差。当引入 AOM 调制时, $f_{\text{AOM}} \neq 0$ 。为了描述其噪声特性, 合成电场的二阶强度相关函数可写为:

$$G_{E_T}^{(2)}(\tau_0) = \left\langle |E_T(t)|^2 |E_T(t + \tau_0)|^2 \right\rangle \quad (3)$$

探测器中光电流自相关函数与二阶强度相关函数之间满足如下关系:

$$R_I(\tau) = e\sigma G_{E_T}^{(2)}(0) \delta(\tau) + \sigma^2 G_{E_T}^{(2)}(\tau) \quad (4)$$

其中, e 为电子电荷, σ 为探测器响应灵敏度, $\delta(\tau)$ 为 δ 函数。通过对 $R_I(\tau)$ 进行傅里叶变换, 即可得到光电流功率谱。进一步引入归一化变量 $\bar{\tau}_0 = 2\pi\Delta f\tau_0$, $\bar{f} = \frac{f}{\Delta f}$, $\bar{f}_{\text{AOM}} = \frac{f_{\text{AOM}}}{\Delta f}$, 其中 Δf 为光谱洛伦兹分量的半高全宽。当 $f_{\text{AOM}} \neq 0$ 时, 探测器输出频谱可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{S_I(\bar{f})}{\sigma^2 E_0^4} = & (1 + \rho^2)^2 \delta(\bar{f}) + \rho^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \delta(\bar{f} - \bar{f}_{\text{AOM}}) \\ & + \rho^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \frac{1/\pi}{1 + (\bar{f} - \bar{f}_{\text{AOM}})^2} \\ & \times \left\{ \exp(\bar{\tau}_0) - \frac{\sin[(\bar{f} - \bar{f}_{\text{AOM}})\bar{\tau}_0]}{\bar{f} - \bar{f}_{\text{AOM}}} - \cos[(\bar{f} - \bar{f}_{\text{AOM}})\bar{\tau}_0] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

当归一化延时 $\bar{\tau}_0 \gg 1$ ($\tau_0 \gg \tau_c$), 探测器输出频谱在 f_{AOM} 附近趋近于严格的洛伦兹线型。此时, 由拍频信号得到的半高全宽满足 $\Delta f_{\text{beat}} \approx 2\Delta f$, 其中, Δf_{beat} 为由拍频信号获得的探测器频谱半高全宽, Δf 为待测激光器的本征洛伦兹线宽。当归一化延时 $\bar{\tau}_0 \leq 1$ ($\tau_0 \leq \tau_c$), 延时光场与原始光场之间仍保持显著的相位相关性。此时, 频谱中会同时存在单色分量和连续谱分量, 且连续谱不再呈现严格的洛伦兹线型。因此, 频谱半高全宽不再是具有明确物理意义的可观测量, 若直接采用线宽拟合方法进行分析, 将会引入系统误差。短延时自外差干涉法用于线宽测量已有较长时间的研究基础。早期研究表明, 当延时时间与相干时间相当或短于相干时间时, 参与干涉的两束光场仍然保持部分相干性, 所测得的拍频频谱表现为相干包络, 而非单纯的洛伦兹线型。短延时测量能够有效抑制低频 $1/f$ 噪声的影响, 因此适合用于提取与白频率噪声相关的洛伦兹本征线宽^[25]。

后续研究进一步发展了短延时状态下基于相干包络的线宽测量方法^[26]。具体而言, 短延时相干包络分析方法的提出旨在避免长延时光纤测量中由低频噪声引起的谱线展宽问题; 在此基础上, 相关研究又进一步发展了迭代解调方法, 以及基于特征点提取的分析策略, 例如对比度差分析方法和相关的双参数测量方法。受这些研究启发, 本文采用短延时相干包络分析方法, 并将其应用于克尔微腔光频梳模式的线宽表征。具体而言, 本文建立了 CDSPST 参数与梳齿本征线宽之间的

定量关系,并进一步结合延时光纤长度优化,以提高线宽测量结果的鲁棒性。连续谱分量的整体包络仍由激光器的洛伦兹线宽决定。特别是在包含周期性延时结构的短延时自参考系统中,例如短光纤延时线干涉仪,其输出功率谱可表示为 $P(f, \Delta f) = P_1 * P_2$ 。其中, P_1 表示洛伦兹谱, P_2 表示周期调制功率谱, f 为傅里叶频率, f_{AOM} 为 AOM 引入的频移。为避免中心频率处幅度波动对线宽测量的影响,本文选取第二峰与第二谷之间的幅度对比度差 ΔP 作为反映激光洛伦兹线宽的特征参数^[26]。

$$\Delta P = 10 \log_{10} P_{\text{peak}} - 10 \log_{10} P_{\text{trough}}$$

$$= 10 \log_{10} \left[\frac{P \left(f_{\text{AOM}} - \frac{2m-1}{2} \frac{c}{nL}, \Delta f \right)}{P \left(f_{\text{AOM}} - N \frac{c}{nL}, \Delta f \right)} \right] \quad (6)$$

其中, m 和 N 分别表示相干包络峰和谷的序号,当 $m=2, N=2$ 时,可以得到如下表达式:

$\Delta P =$

$$10 \log_{10} \frac{\left[1 + \left(\frac{2c}{n\Delta f L} \right)^2 \right] \left[1 + \exp \left(-2\pi \frac{n\Delta f L}{c} \right) \right]}{\left[1 + \left(\frac{3}{2} \frac{c}{n\Delta f L} \right)^2 \right] \left[1 - \exp \left(-2\pi \frac{n\Delta f L}{c} \right) \right]} \quad (7)$$

其中, c 为光速, L 为延时光纤长度, Δf 为功率谱的半高全宽,即洛伦兹线宽。理论上,相干包络中的不同阶峰谷均可作为线宽测量的特征点,但不同阶峰谷受到的测量误差来源有所不同。第一峰谷距离 AOM 中心频率较近,虽然信号功率较高,但容易受到中心相干分量、载波泄漏、中心频率漂移以及频谱分析仪有限分辨率带宽的影响,从而增加峰谷功率读取的不确定性。对于第三阶及更高阶峰谷,由于其距离中心频率较远,谱功率受到整体洛伦兹包络衰减,信噪比下降,更容易受到噪声底、EDFA 放大自发辐射以及频谱基底起伏的影响。

相比之下,第二峰谷能够避开中心频率附近的相干分量,同时仍保持相对较高的谱功率和清晰的峰谷结构。因此,在本文所采用的延时光纤长度、待测线宽范围和实验信噪比条件下,第二峰谷在减小中心区域干扰与避免高阶峰谷低信噪比之间取得了较好的折中。基于上述考虑,本文选取第二峰与第二谷之间的功率对比度差作为线宽测量参数。

图 1(a) 给出了在固定短延时光纤长度 L 条件下,不同线宽克尔光学频率梳的外差干涉频谱。随着光频梳线宽减小,干涉效应逐渐增强,相干包络特征更加明显。图 1(b) 展示了窄线宽光学频率梳在不同延时光纤长度下的干涉频谱。当延时光纤长度超过 5 km 时,光频梳逐渐表现出非相干特性;当延时光纤长度设为 10 km、线宽设为 0.1 kHz 时,频谱呈现出图 1(b) 所示的典型洛伦兹线型。当延时长度小于激光相干长度时,输出功率谱 P 可表示为洛伦兹谱 P_1 与周期调制功率谱 P_2 的乘积。图 1(a) 和图 1(b) 表明,较短的光纤延时长度和更窄的激光线宽能够增强仿真功率谱中相干包络的对比度和可见度。理论分析与仿真结果均表明,在延时光纤长度和激光线宽参数确定的条件下,相干包络中会形成确定性的幅度差异。因此,特定频率位置处谱线相干包络的峰谷对比度差可作为表征激光线宽特性的有效指标。

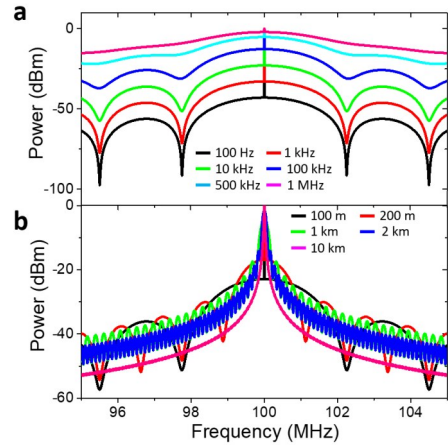


图 1 (a) 不同微腔光频梳线宽下归一化功率谱 ΔP 的仿真结果。(b) 不同延时光纤长度下归一化功率谱 ΔP 的仿真结果。

Fig. 1 (a) Simulation results of normalized power spectrum ΔP for different microcomb linewidth. (b) Simulation results of normalized power spectrum ΔP for different delayed fiber length

图 2(a) 给出了在不同延时光纤长度下, CD-SPST(ΔP) 与微腔光频梳线宽(Δf) 之间的对应关系。由该关系可知, CDSPST(ΔP) 的取值可用于估计待测光频梳的线宽。图 2(b) 展示了在不同微腔光频梳线宽条件下, CDSPST(ΔP) 随延时光纤长度变化的关系。通过对比图 2(c) 中泵浦光与微腔光频梳的仿真结果可以看出,微腔光频梳的功率谱密度具有较为明显的相干包络特征。

若在常规短延时自外差干涉测量中,直接利

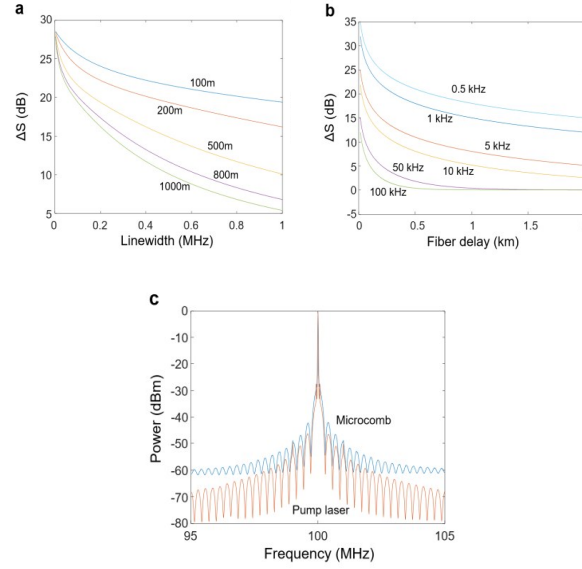


图2 (a)不同微腔光频梳线宽下归一化功率谱的仿真结果。(b)不同延时光纤长度下归一化功率谱的仿真结果。(c) 泵浦激光与微梳的归一化功率谱仿真结果。

Fig. 2 (a) The relationship between the CDSPT and microcomb linewidth for different delayed fiber length; (b) The relationship between the CDSPT and delayed fiber length for different microcomb linewidth; (c) Simulation normalized power spectrum of pump laser and microcomb

用探测得到的整体功率谱进行拟合以获得激光线宽,将可能引入较大的测量误差。因此,应选取靠近中心频率附近的包络特征值进行分析,以降低包络误差对线宽测量结果的影响。

3 实验与结果

为了准确表征孤子微腔光频梳的线宽,本文分别在短延时部分相干和长延时近似非相干条件下开展延时自外差测量,并对两种延时状

态下的线宽结果及噪声响应特性进行对比分析。首先,本文采用热补偿方法在氮化硅微腔中所产生光频梳的光谱如图 3(a) 所示,微环半径为 $60\mu\text{m}$,主泵浦频率为 187.3THz ,辅助加热光频率为 191.9THz ,可以看到其在中心频率附近具有明显的泵浦峰,并在约 178THz 至 200THz 范围内呈现出较宽的光谱覆盖。相邻梳齿之间的频率间隔与微环谐振腔的自由光谱范围相对应。

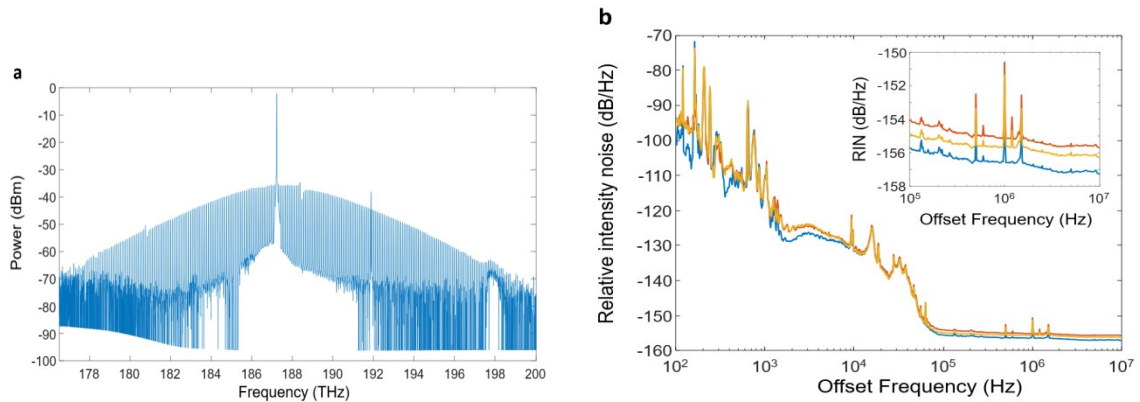


图3 (a)产生的克尔微腔光频梳光谱(b)不同整数孤子数锁模状态下测得的相对强度噪声

Fig. 3 (a) The generated Kerr optical microcomb spectrum; (b) The measured relative intensity noise at the different mode-locking soliton states with integer numbers of solitons

图 3(b) 给出了不同孤子状态下的相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 曲线。其中, 蓝色曲线对应单孤子状态, 橙色曲线对应双孤子状态, 红色曲线对应五孤子状态。随着孤子数目的增加, 不同偏移频率处的相对强度噪声表现出一定变化, 并且在较高偏移频率范围内噪声整体呈增强趋势。插图进一步展示了特定频率范围内 RIN 曲线的细节变化。

随后, 本文对所产生的克尔微腔光频梳进行了线宽表征。单个梳齿的线宽可通过短光纤延时线性干涉仪 (short-fiber-delayed linear interferometer, SFDLI) 输出相干干涉图样中第二峰与第二谷 (second-peak and second-trough, SPST) 的功率对比度差 ΔP 进行测量计算。需要指出的是, 在长延时光纤测量方案中, 由于延时光纤引入的 $1/f$ 频率噪声影响, 克尔光频梳本征的洛伦兹线型可能会被展宽并表现出近似高斯线型特征。

在实验测量中, 本文首先分别对 C 波段和 L 波段光频梳进行光放大, 随后利用自搭建的带通滤波器选取单个梳齿模式。该滤波器具有约 50 dB 的边模抑制比。经过滤波后的微腔光频梳模式被分别输入相对强度噪声和线宽测量系统中。相对强度噪声测量系统如图 4 所示, 主要由 1 GHz 高速光电探测器、信号源分析仪 (signal source analyzer, SSA) 以及高速示波器 (oscilloscope, OSO) 组成。

微腔光频梳产生系统由泵浦激光器、掺铒光

纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 和偏振控制器等部分组成。泵浦光经 EDFA 放大并进行偏振调节后耦合进入集成微腔, 在微腔中通过非线性效应产生覆盖 C 波段和 L 波段 of 克尔微腔光频梳。光频梳产生后, 通过波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 进行分波与合波, 以便分别对不同波段的光频梳进行放大。随后, 利用光学带通滤波器 (optical bandpass filter, OBF) 选取目标梳齿模式, 用于后续的相对强度噪声和线宽表征。

对于所选取的梳齿模式, 本文在不同延时光纤长度下测量其 SPST 功率差。在 SFDLI 中, 输入光场与其延时副本发生干涉, 所形成的相干干涉图样由光电探测器 (photodetector, PD) 探测。该干涉仪主要由两个法拉第旋转镜、一个由高功率驱动器驱动的声光调制器以及特定长度的延时光纤组成。当 SFDLI 中的光学延时长度远小于光频梳梳齿的相干长度时, 参与干涉的两束光场仍保持部分相位相关性, 因此在 SFDLI 输出端的射频功率谱中可以观察到相干干涉图样。本文采用 1 GHz 光电探测器和宽带电频谱分析仪 (electrical spectrum analyzer, ESA) 对输出功率谱进行测量, 并通过相干干涉图样中 SPST 的功率对比度差读取和计算梳齿线宽。微腔光频梳梳齿线宽主要由泵浦激光器线宽以及光参量频率转换过程中的噪声转移共同决定^[20]。

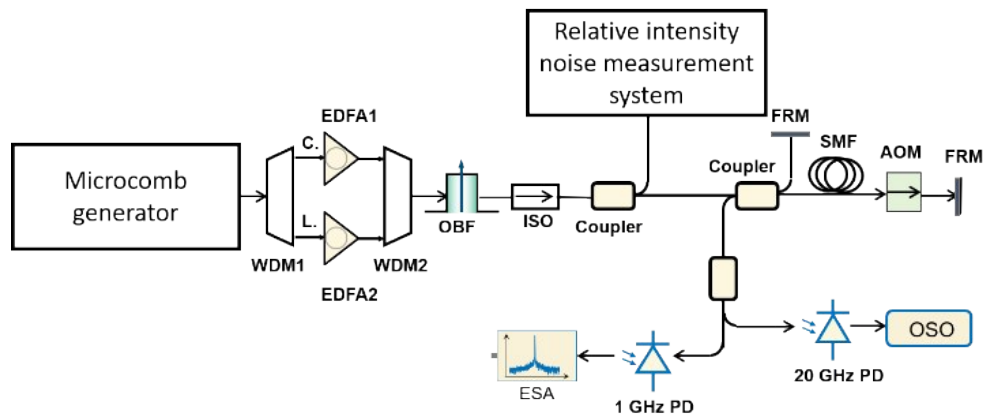


图 4 克尔微腔延时自外差法光频梳线宽测量实验装置示意图

LD: 激光二极管; EDFA: 掺铒光纤放大器; PBS: 偏振分束器; WDM: 波分复用器; OBF: 光学带通滤波器; ISO: 光隔离器; PD: 光电探测器; FRM: 法拉第旋转镜; SMF: 单模光纤; AOM: 声光调制器; ESA: 电频谱分析仪; OSO: 光采样示波器

Fig. 4 Schematic setup of Kerr microcomb linewidth measurement. LD: laser diode; EDFA: erbium-doped optical fiber amplifier; PBS: polarization beam splitter; WDM: wavelength division multiplexing; OBF: optical band pass filter; ISO: optical isolators; PD: photodetector; FRM: faraday rotating mirror; SMF: single mode fiber; AOM: acoustic-optical modulator; ESA: electrical spectrum analyzer; OSO: optical sampling oscilloscope

通过改变延时光纤长度可以发现, 测量得到的线宽会随光纤长度发生变化, 这是因为测量灵敏度取决于相干包络可见度与低频噪声展宽之间的平衡关系, 如图 5(a) 所示。本文从实验上依据两个准

则确定最优延时光纤长度: 一是相干包络应保持足够明显, 以保证 CDSPST 参数能够被可靠提取; 二是测量得到的线宽应进入相对稳定的最小值区域, 并且对延时光纤长度的进一步变化不再敏感。

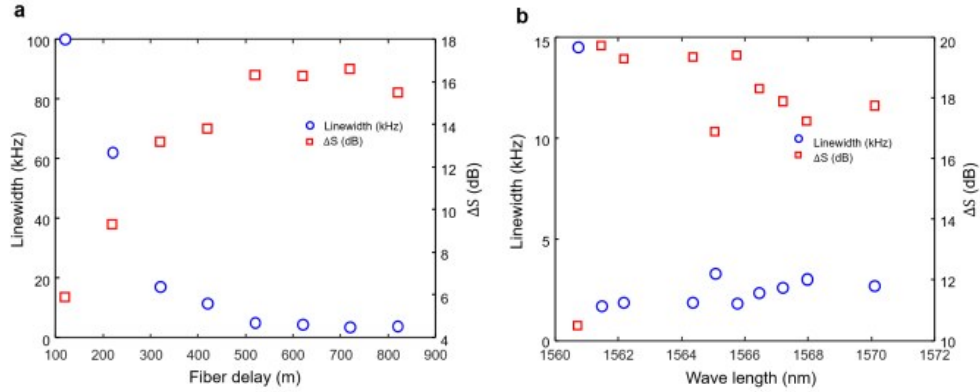


图 5 (a) 不同延时光纤长度下线宽和 ΔP 的实验结果 (b) 1560-1570 nm 范围内不同微腔光频梳模式的线宽和 ΔP 实验结果

Fig. 5 (a) Experimental results of linewidth and ΔP for different delayed fiber length. (b) Experimental results of linewidth and ΔP over the different microcomb modes from 1560 to 1570 nm

当延时光纤过短时, 包络读取精度容易受到噪声底和频谱分辨率限制的影响; 而当延时光纤过长时, 相干包络对比度会降低, 测得的线宽也更容易受到 $1/f$ 噪声诱导展宽的影响。在本文实验中, 约 700m 的延时光纤长度能够在上述两种效应之间取得较好折中, 因此被选为后续线宽测量的最优延时长度。

随后, 本文利用优化后的测量系统对多个微腔光频梳模式进行了线宽测量, 结果如图 5(b) 所示。实验共测量了 10 个微腔光频梳模式的线宽, 除个别异常点外, 梳齿线宽的峰峰值波动约为 2 kHz。该波动可能来源于测量系统精度限制以及不同梳齿功率差异的影响。

由于微腔光频梳中的所有梳齿均处于锁模状态, 梳齿频率涨落通常表现为集体运动的形式。特定扰动会使各个梳齿围绕某一固定频率点 f_{fix} 发生类似“呼吸”的频率变化, 并且梳齿频率涨落幅度会随其相对于该固定频率点的频率偏移而放大。无界定时抖动会进一步引起光频梳梳齿的频率涨落。

为了对比不同延时状态下的线宽测量结果, 本文进一步采用长光纤延时线性干涉仪 (long-fiber-delayed linear interferometer, LFDLI), 分别测量泵浦激光器和一个微腔光频梳梳齿的线宽。实验中采用的延时光纤长度为 5 km。在该延时条件下, 两路光场可近似视为进入非相干状态, 因此

可以利用拍频谱的半高全宽进行线宽估计。

如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 对泵浦激光器以及波长约为 1550 nm 的微腔光频梳梳齿拍频谱进行洛伦兹线型拟合, 得到的拍频谱半高全宽分别约为 11.4 kHz 和 15.3 kHz。对于理想洛伦兹线型, 延时自外差拍频谱的半高全宽约为待测光源线宽的两倍, 因此对应的泵浦激光器线宽和微腔光频梳梳齿线宽分别约为 5.7 kHz 和 7.6 kHz。

根据上述结果可以看出, 在短延时测量状态下, 两路光场仍保持部分相干, 相干包络中的 CDSPST 参数主要反映快速相位扩散所对应的洛伦兹线宽分量。由于延时时间较短, 低频频率波动在两路光场中仍具有一定相关性, 其对拍频谱展宽的影响受到一定抑制。相比之下, 在长延时自外差测量中, 两路光场逐渐失去相干性, 拍频谱可近似采用洛伦兹线型进行拟合。然而, 随着延时光纤长度增加, 低频频率噪声、慢频率漂移以及长光纤中的温度和机械扰动会更加明显, 并可能使测得的拍频谱发生额外展宽。因此, 长延时测量得到的线宽包含更宽频率范围内的噪声贡献。总体而言, 短延时自外差法更适合估计快速频率噪声所对应的洛伦兹线宽分量, 而长延时自外差法能够在近似非相干条件下采用常规频谱拟合方法进行线宽测量, 但更容易受到低频噪声和长光纤环境扰动的影响, 两种方法具有不同的噪声响应特性。

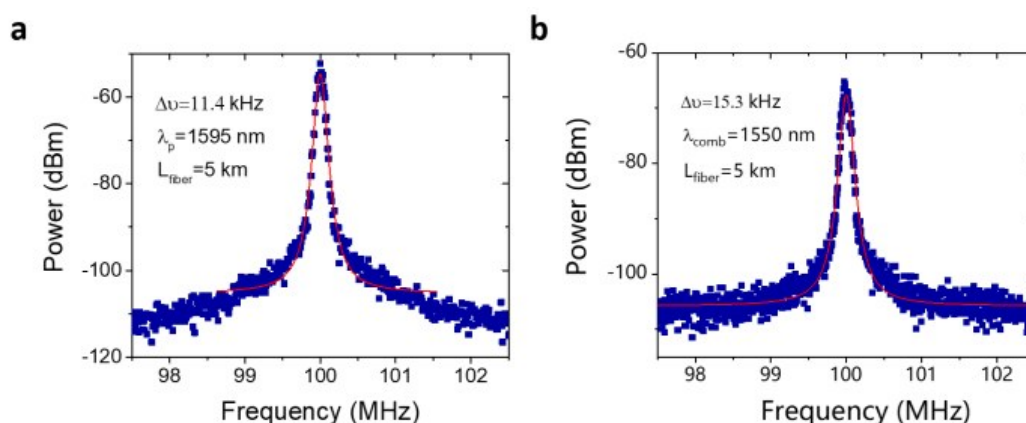


图6 长光纤延时自外差线宽测量结果 (a)采用5 km延时光纤测得的泵浦激光器拍频谱及洛伦兹拟合结果 (b)采用5 km延时光纤测得的微腔光频梳梳齿拍频谱及洛伦兹拟合结果

Fig. 6 Long-delay self-heterodyne linewidth measurement results: (a) beat-note spectrum and Lorentzian fitting result of the pump laser measured using a 5 km delay fiber; (b) beat-note spectrum and Lorentzian fitting result of a microcomb mode measured using a 5 km delay fiber.

4 结 论

本文研究了克尔微腔光频梳模式的线宽特性,并分别采用短延时部分相干和长延时近似非相干自外差方法进行表征。通过建立 CDSPST 参数与微腔光频梳模式洛伦兹线宽之间的定量关系,并结合延时光纤长度优化,实现了多个微腔光频梳模式的线宽测量。

理论仿真与实验测量结果表明,在合理选择延时光纤长度的条件下,基于 CDSPST 的短延

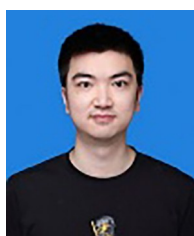
时分析方法能够有效估计克尔微腔光频梳模式的本征线宽。值得注意的是,短延时自外差干涉技术的应用范围并不局限于传统单频激光器的线宽测量;当其与光学带通滤波相结合时,还可扩展用于克尔光频梳多梳齿模式的精确线宽表征。

总体而言,对集成激光器和光频梳光源进行精确、可靠的线宽表征,对于推动其在相干光通信、精密测量、频率标准以及片上光子系统等应用中的实际部署具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. *Communications Physics*, 2019, 2(1): 153.
- [2] Kim J, Song Y. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2016, 8(3): 465-540.
- [3] Yao B. C., Wang W. T., Xie Z. D., Zhou Q., Tan T., Zhou H., Guo G. C., Zhu S. N., Zhu N. H., and Wong C. W., Interdisciplinary advances in microcombs: bridging physics and information technology, *eLight* 4, 19 (2024).
- [4] Parriaux A, Hammani K, Millot G. Electro-optic frequency combs[J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2020, 12(1): 223-287.
- [5] Seidler G A, Kitayama K I. Frequency comb generation by four-wave mixing and the role of fiber dispersion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(9): 1596-1605.
- [6] Wang W. T., Aldhfeeri A., Zhou H., Melton T., Jiang X. H., Vinod A. K., Yu M., Lo G. -Q., Kwong D. -L., and Wong C. W.. Polarization-diverse soliton transitions and deterministic switching dynamics in strongly-coupled and self-stabilized microresonator frequency combs. *Comm. Phys.* 7, 279 (2024).
- [7] Wang W. T., Liu W. Z., Liu H., Melton T., Aldhfeeri A., Lee D. -I., Yang J. H., Vinod A. K., Lim J. K., Jang Y. -S., Zhou H., Yu M. B., G. -Q. P., Lo, Kwong D. -L., DeVore P. S., Chou J. T., Zhu N. H., and Wong C. W.. Mapping ultrafast timing jitter in dispersion-managed 89 GHz frequency microcombs via self-heterodyne linear interferometry. *Adv. Photon. Nexus* 4(3), 036011 (2025).
- [8] Drake T. E., Stone J. R., Briles T. C., et al., "Thermal decoherence and laser cooling of Kerr microresonator solitons," *Nat. Photonics* 14(8), 480 - 485 (2020).
- [9] Lei F, Ye Z, Helgason Ó B, et al. Optical linewidth of soliton microcombs[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1):

- 3161.
- [10] JinW. , YangQ. -F. , ChangL. , *et al.* , “Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators,” *Nat. Photonics* 15(5), 346 – 353 (2021).
 - [11] LeeH. , SuhM. -G. , ChenT. , *et al.* , “Spiral resonators for on-chip laser frequency stabilization,” *Nat. Commun.* 4(1), 468 (2013).
 - [12] GundavarapuS. , BrodnikG. M. , PuckettM. , *et al.* , “Sub-hertz fundamental linewidth photonic integrated Brillouin laser,” *Nat. Photonics* 13(1), 60 – 67 (2019).
 - [13] Wicht A, Bawamia A, Krüger M, Kürbis C, Schiemangk M, Smol R, Peters A, Tränkle G. Narrow linewidth diode laser modules for quantum optical sensor applications in the field and in space[C]//Glebov A L, Leisher P O. *Components and Packaging for Laser Systems III. SPIE*, 2017, 10085: 100850F.
 - [14] Bennetts S, McDonald G D, Hardman K S, *et al.* External cavity diode lasers with 5kHz linewidth and 200nm tuning range at 155 μ m and methods for linewidth measurement[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10642.
 - [15] Wang W T, Liu H, Wu J, McMillan J F, Lee D I, Hu F, Liu W, Yang J, Yang H, Vinod A K, Ezzeldin Y H, Fragouli C, Yu M, Lo P G Q, Kwong D L, Kahrs D S, Zhu N, Wong C W. Free-space terabit/s coherent optical links via platonic frequency microcombs[J]. *eLight*, 2025, 5: 8.
 - [16] WangW. T. , LuP. -K. , VinodA. K. , McMillanJ. , LiuH. , YuM. , KwongD. -L. , JarrahiM. , and WongC. W. . Coherent terahertz radiation with 2.8-octave tunability through chip-scale photomixed microresonator optical parametric oscillation. *Nature Comm.* 13, 5123 (2022).
 - [17] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(16): 630-631.
 - [18] 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.
 - [19] Canagasabay A, Michie A, Canning J, *et al.* A Comparison of Delayed Self-Heterodyne Interference Measurement of Laser Linewidth Using Mach-Zehnder and Michelson Interferometers[J]. *Sensors*, 2011, 11(10): 9233-9241.
 - [20] Chen M, Meng Z, Wang J, *et al.* Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6803.
 - [21] 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.
 - [22] Gallion P B, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(4): 343-349.
 - [23] WangWenting, Dong Il Lee, LiuWenzheng, YuMingbin, KwongDim-Lee, ZhuNinghua, and WongCheewei, "Probing linewidth dynamics with short-time delayed linear interferometer in integrated frequency microcombs," *Opt. Express* 33, 27043-27055 (2025)
 - [24] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, McGrath P A. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(11): 2070-2074.
 - [25] Huang S, Zhu T, Cao Z, *et al.* Laser Linewidth Measurement Based on Amplitude Difference Comparison of Coherent Envelope[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7): 759-762.
 - [26] Zhao Z, Bai Z, Jin D, *et al.* The Influence of Noise Floor on the Measurement of Laser Linewidth Using Short-Delay Self-Heterodyne Interferometry[J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1311.



张朗朗(2002—),男,湖南人,硕士研究生,主要从事光电混合集成技术的研究。
E-mail: zhanglanglang23@mails.ucas.ac.cn



梁磊(1985—),男,吉林人,研究员,主要从事固态激光雷达、空间激光通信、量子通信与传感、红外气体检测、激光农业等领域研究。
E-mail: liangl@ciomp.ac.cn



王文亭(1988—),男,内蒙古人,研究员,主要从事微波光子学,集成光子学,精密测量等领域研究。
E-mail: wtwang@bit.edu.cn