

基于延迟自外差方法的调频激光器线型分析

张楠 饶伟 徐攀 孟洲 胡正良

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 用延迟自外差法分析了调频激光器的光谱线型。从理论上给出了调频激光器的线型表达式,理论结果表明,用延迟自外差法测得的调频激光器的线型是与调制函数及测试系统有关的传递函数和激光器自然线型的卷积。根据所获得的调频激光器线型表达式,分析了线型和激光器调制频率以及延迟光纤长度的关系。实验对理论分析进行了验证。

关键词 激光器;调频激光器;线宽;线型分析;延迟自外差

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0302005

Line Shape Analysis of Frequency-Modulated Laser with Delayed Self-Heterodyne Method

Zhang Nan Rao Wei Xu Pan Meng Zhou Hu Zhengliang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The line shape of power spectrum of frequency-modulated laser with delayed self-heterodyne method is presented. Theoretical analysis is carried out and a mathematical expression is used to describe the line shape. According to the theoretical results, the line shape of frequency-modulated laser measured by delayed self-heterodyne method is the convolution of the natural line shape and the transfer function related with the modulation signal and the testing system. The dependence of line shape on the modulation frequency and the length of optical delay is analyzed based on the obtained expression. Experiments are carried out and the testing results verify the theoretical analysis results.

Key words lasers; frequency-modulated laser; linewidth; line shape analysis; delayed self-heterodyne

OCIS codes 140.3518; 060.2840; 120.3688

1 引 言

线宽是激光器的一个重要参数,它反映了激光器的相干长度、噪声水平以及频谱覆盖范围等指标^[1~3]。激光器的线宽常用延迟自外差(DSH)方法进行测量^[4~6],对于没有频率调制的激光器而言,用延迟自外差法测得的功率谱线型(本文称为自然线型)通常为 Lorentzian 型^[7,8], Gaussian 型^[9,10] 或 Voigt^[11]型;该三种类型对应的激光器线宽分别为功率谱线型半峰全宽的 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 和 $\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}}$ ^[12] 而当对激光

器进行频率调制后,激光器的线型通常会发生变化,利用这种性质,可以对激光器进行主动的线型控制,改变激光器的线宽^[13]。文献[14]在用延迟自零差的方法测试调频激光器的频率响应时,发现了调频激光器的线型和调制频率有关,并给出了正弦调制下,调频激光器线型的近似表达式,但该表达式为经验式,不具通用性,且延迟自零差法不能得到激光器的完整线型,测试结果易受低频扰动影响,因此并不是研究激光器线宽的最佳方法^[5]。本文将用延迟自外差法分析调频激光器的线宽,从理论上详细推导

收稿日期: 2012-09-03; 收到修改稿日期: 2012-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(61177073)和高等学校博士学科点专项科研基金(20104307110020)资助课题。

作者简介: 张楠(1983—),女,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhangnan0622@yahoo.com.cn

导师简介: 孟洲(1968—),女,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhoumeng6806@163.com(通信联系人)

调频激光器线型的数学表达式,分析决定线宽的因素,并通过实验对理论分析的结果加以验证。

2 理论分析

2.1 调频激光器的线型表达式

加载到调频激光器的调制信号可以是多种形式,而任意一个复杂信号都可以分解成一系列单频

信号的叠加形式,因此本文中采用正弦信号作为光频调制信号,此时激光器的角频率可表达为

$$\omega(t) = 2\pi[f_0 + \Delta\nu_0 \sin(2\pi f_m t)], \quad (1)$$

式中 f_0 为光频, f_m 为调制信号的频率, $\Delta\nu_0$ 为调制信号的最大频率偏移量。相位是角频率对时间的积分,则光场可以表示为

$$E(t) = E_0 \exp\left\{j\left\{2\pi f_0 t - \left[\frac{\Delta\nu_0}{f_m} \cdot \cos(2\pi f_m t + \phi_0)\right] + \varphi(t)\right\}\right\}, \quad (2)$$

式中 E_0 是电场的幅值, ϕ_0 是调制信号的初相位, $\varphi(t)$ 是光场的随机相位。

图 1 中,激光器发出的光经由耦合器 C_1 分成两束,其中一束通过延迟光纤后,与另一束在耦合器 C_2 处会合拍频。假设移频器将光波移频 f_c , 延迟线长度为 ΔL , 对应的延迟时间为 $\tau = \frac{N\Delta L}{c}$, 其中 N 为光纤的折射率, c 为真空中的光速。则两束光的光场可以分别表达为

$$E_1(t) = E_1 \exp\left\{j\left\{2\pi(f_0 + f_c)t - \left[\frac{\Delta\nu_0}{f_m} \cdot \cos(2\pi f_m t + \phi_0)\right] + \varphi(t)\right\}\right\}, \quad (3)$$

$$E_2(t + \tau) = E_2 \exp\left\{j\left\{2\pi f_0 \cdot (t + \tau) - \left[\frac{\Delta\nu_0}{f_m} \cdot \cos[2\pi f_m(t + \tau) + \phi_0]\right] + \varphi(t + \tau)\right\}\right\}. \quad (4)$$

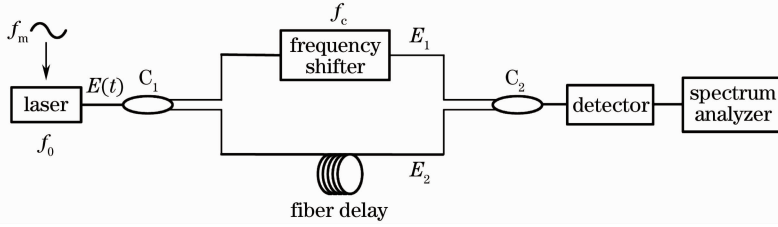


图 1 延迟自外差法组成框图

Fig. 1 Schematic diagram of delayed self-heterodyne method

两束光的拍频信号强度表达式为

$$I(t) = \langle [E_1(t) + E_2(t + \tau)] \cdot [E_1(t) + E_2(t + \tau)]^* \rangle = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \times \cos\left\{2\pi f_c t + \left[2 \frac{\Delta\nu_0}{f_m} \cdot \sin\left(\pi f_m \cdot \frac{n\Delta L}{c}\right)\right] \cdot \sin\left[2\pi f_m \left(t + \frac{\tau}{2}\right) + \phi_0\right] + 2\pi f_0 \tau + \varphi(t + \tau) - \varphi(t)\right\}, \quad (5)$$

式中 I_1 、 I_2 为两束光的光强。信号的频谱可以通过对(5)式作傅里叶变换得到。为了更清晰地表示出(5)式的频率成分,将其用贝塞尔函数展开,得

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2I_1 I_2 \left\{ J_0(C) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(C) \left\{ \cos\left[2\pi \cdot 2n \cdot f_m \left(t + \frac{\tau}{2}\right) + 2n\phi_0\right]\right\} \cdot \cos[\Psi(t)] - 2I_1 I_2 \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(C) \left\{ \sin\left[2\pi \cdot (2n-1) \cdot f_m \left(t + \frac{\tau}{2}\right) + (2n-1)\phi_0\right]\right\} \cdot \sin[\Psi(t)] \right\}, \quad (6)$$

式中 $J_n(C)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数,

$$C = 2 \frac{\Delta\nu_0}{f_m} \cdot \sin\left(\pi f_m \cdot \frac{n\Delta L}{c}\right), \quad (7)$$

$$\Psi(t) = 2\pi f_c t + 2\pi f_0 \tau + \varphi(t + \tau) - \varphi(t), \quad (8)$$

式中 C 为相位调制深度。拍频信号的功率谱为

$$S(f) = |\mathcal{F}\{I(t)\}| = 2I_1 I_2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_{2q}(C) \delta(f - 2qf_m) * |\mathcal{F}\{\cos[\Psi(t)]\}| + 2I_1 I_2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_{2q-1}(C) \delta[f - (2q-1)f_m] * |\mathcal{F}\{\sin[\Psi(t)]\}|, \quad (9)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换, q 为整数。直流项因对结果无影响而被忽略。

如文献[8]所述, $2I_1 I_2 |\mathcal{F}\{\cos[\Psi(t)]\}|$ 为未加频率调制时, 用延迟自外差法测得的激光器的频率噪声功率谱, 为自然线型, 用 $S_0(f)$ 来表示。 $\varphi(t)$ 被认为是一个平稳随机过程, 与时间初始值无关, 因此 $\cos[\Psi(t)]$ 的傅里叶变换与相位初始值无关, 故 $2I_1 I_2 |\mathcal{F}\{\sin[\Psi(t)]\}|$ 也可以用 $S_0(f)$ 来表示。这样(9)式可以表达为

$$S(f) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(C) \delta(f - qf_m) * S_0(f), \quad (10)$$

式中 $\sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(C) \delta(f - qf_m)$ 是与调制信号及测试系统有关的传递函数, 该传递函数可以根据引入频率调制的理想单色光经过测试系统后发生干涉的信号频谱得到。根据(10)式, 用延迟自外差法测得的调频激光器的线型是与调制信号及测试系统有关的传递函数和激光器自然线型的卷积。这个结论为线型分析、设计和控制提供了理论依据。

2.2 数值仿真

为了更直接地得到调频激光器的线型, 根据(10)式给出数值仿真结果。激光器的自然线型可表示为^[7,8]:

$$S_0(f) = \frac{I_1 I_2 \tau_c}{1 + 4\pi^2 (f - f_c)^2 \tau_c^2} \times \left\{ 1 - \exp(-\tau_d / \tau_c) \times \left\{ \cos[2\pi(f - f_c)\tau_d] + \frac{\sin[2\pi(f - f_c)\tau_d]}{2\pi(f - f_c)\tau_d} \right\} \right\}, \quad (11)$$

式中 τ_d 是延迟时间, τ_c 是相干时间。将(11)式代入(10)式, 可以得到延迟自外差法测得的调频激光器的线型:

$$S(f) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(C) \delta(f - qf_m) * \left\{ \frac{I_1 I_2 \tau_c}{1 + 4\pi^2 (f - f_c)^2 \tau_c^2} \times \left\{ 1 - \exp(-\tau_d / \tau_c) \times \left\{ \cos[2\pi(f - f_c)\tau_d] + \frac{\sin[2\pi(f - f_c)\tau_d]}{2\pi(f - f_c)\tau_d} \right\} \right\} \right\}. \quad (12)$$

图2显示了根据(12)式得到的线型仿真结果。其中自然线宽设置为1 kHz, 图2(a)为调制频率为1 kHz调频激光器的线型, 可以看到激光器线宽发生展宽; 图2(b)为调制频率为40 kHz调频激光器的线型, 图2(c)为图2(b)的局部放大图, 此时的线型表现为在频率等于 qf_m 处的一系列分立谱, 每个

分立谱的形状都为自然线型。事实上, 在1 kHz调制下表现为一个整体展宽的线型, 这是因为调制频率不够大到将 qf_m 处的自然线型彼此分开。所有图中都进行了横坐标变换, 将线型的中心频率移到了零频处, 从而更加方便线型的对比及线宽的读取。

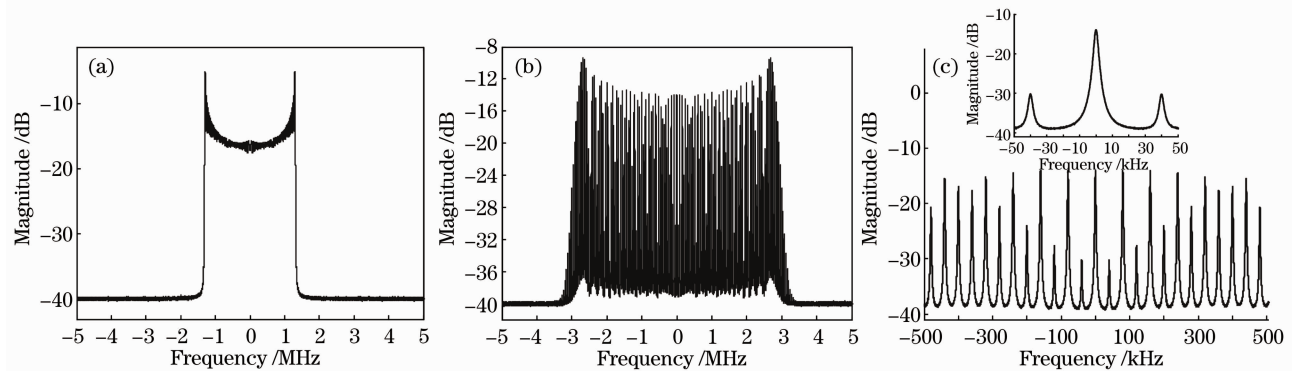


图2 延迟自外差法测调频激光器线型的仿真。(a)调制频率为1 kHz;(b)调制频率为40 kHz;(c) (b)图的局部放大图
Fig. 2 Simulating line shape of frequency-modulated laser testing by DSH method. (a) Modulation frequency is 1 kHz;

(b) modulation frequency is 40 kHz; (c) corresponding detail spectra to Fig. (b)

2.3 调频激光器线宽的影响因素

无论调频激光器的线型表现为一个整体展宽的频谱, 还是一些的分立谱, 整个线型的宽度均与边

带的阶数有关, 对于第 q 阶边带, 其幅值为 $J_q(C)$ 。当 C 固定时, $J_q(C)$ 的值随着 q 的增大而减小, 当 q 值足够大时, $J_q(C)$ 就可以忽略。也就是说, C 值越大, 不

可忽略的边带就越多,谱宽就越大。

C 值随着 $\Delta\nu_0$ 的增大而增大。除此之外, C 也与调制频率和延迟线的长度 ΔL 有关。当 $\Delta\nu_0$ 为常数时, C 随 ΔL 成 \sin 函数的变化关系, 随 f_m 成 sinc 函数的变化关系, 如图 3 所示。

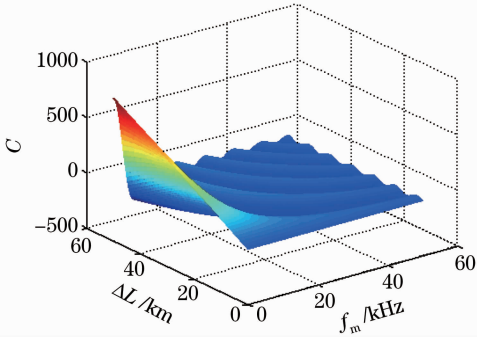


图 3 C 值与 f_m 和 ΔL 的关系

Fig. 3 Relationship among f_m , ΔL and C

如果 f_m 等于 $(M + \frac{1}{2}) \frac{c}{(n\Delta L)}$ (其中 M 是整数), C 将达到极大值, 整个谱宽达到周期性的最大值; 如果 f_m 等于 $M \frac{c}{(n\Delta L)}$, 则 C 为 0, 得到的就是自然线型。另外, 随着 f_m 的增加, 线宽到达周期性的最大值会渐渐变小。这些提示要注意选择适当的调制频率以确保一个合适的线宽值。同时, 在相同的 f_m 下, 线宽也随 ΔL 变化而变化, 当 ΔL 等于 $(M + \frac{1}{2}) \times \frac{c}{(nf_m)}$ 时, 线宽将达到最大值; 当 ΔL 等于 $M \frac{c}{(nf_m)}$ 时, 线宽不会展宽, 和未加调制时相同。综合以上结论可知, 延迟自外差法测得的调频激光器的线型

不仅与调制形式和调制幅度有关, 还与调制频率和延迟线长度有关, 在分析和控制调频激光器线型时, 这些因素都要考虑进去。

3 实验测试

延迟自外差法的实验装置与图 1 所示相同。实验中用了两种激光器, 一种是 RIO™ 半导体激光器 (LD), 给出的指标是线宽小于 10 kHz, 一种是实验室自行研制的超窄线宽光纤激光器 (FRL), 线宽约为 1 kHz。这两种激光器主要用于光纤传感领域, 频率调制范围均在几十千赫兹。当测试 LD 的线型时, 延迟光纤长度为 50 km, 当测试 FRL 的线型时, 延迟光纤长度为 400 km, 以满足各自的去相干长度。在连接 400 km 光纤时, 每隔 100 km 连接一个掺铒光纤放大器, 以补偿光功率的损耗。声光调制器 (AOM) 将产生 200 MHz 的频移作为外差载频。干涉仪的输出由光电探测器 (New Focus, Model 1623, 带宽 400 MHz) 进行探测, 然后输入频谱分析仪 (Rigol, DSA1030, 9 kHz~3 GHz)。

首先测试了两种激光器的自然线型, 如图 4 所示。因为 LD 主要是自发辐射引入的白噪声, 故用 Lorentzian 函数来拟合 LD 的线型。从图 4(a) 中可以看到, Lorentzian 函数和实测线型符合得很好。半峰全宽为 22 kHz, 对应的线宽为 11 kHz, 比厂家给出的值略大, 这是因为测试的延迟光纤较长, 引入了中心频率抖动及环境扰动噪声。对于 FRL, 因 $1/f$ 噪声较大, 因此用 Gaussian 函数拟合其线型。根据图 4(b), FRL 的线宽为 1.1 kHz。

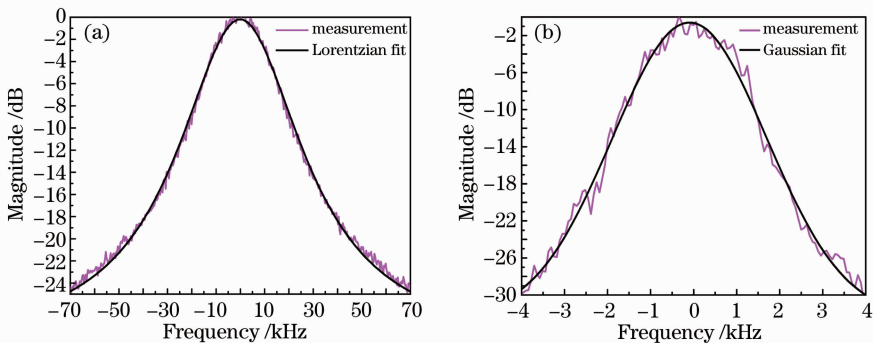


图 4 激光器的自然线型测试结果。(a) LD 的自然线型; (b) FRL 的自然线型

Fig. 4 Natural line shape of the lasers. (a) Natural line shape of LD; (b) natural line shape of FRL

频率为 1 kHz 和 42 kHz 的正弦信号加载于 LD, 频率为 1.25 kHz 和 41.25 kHz 的正弦信号加载于 FRL。频谱分析仪的分辨率设为 300 Hz, 小于两激光器的自然线宽。线型测量结果如图 5 所示。

对于 LD, 当调制频率为 1 kHz 和 42 kHz 时, 测得的线型为整体展宽的线型, 如图 5(a) 和 (b) 所示, 在 FRL 的调制频率为 1.25 kHz 时, 测得的也是整体展宽的线型, 如图 5(c) 所示。根据理论部分的分

析,这是因为调制频率不够大到将各个边带分开。当FRL的调制频率为41.25 kHz时,调制边带就会显示出来,如图5(d)和(e)所示[(e)是(d)的局部放大图],每个边带都表现为自然线型。值得提出的

是,FRL的线宽的线型[图5(c),(d),(e)]也与仿真的线型[图2(a),(b),(c)]是基本相同的,这也证明了理论分析的正确性。

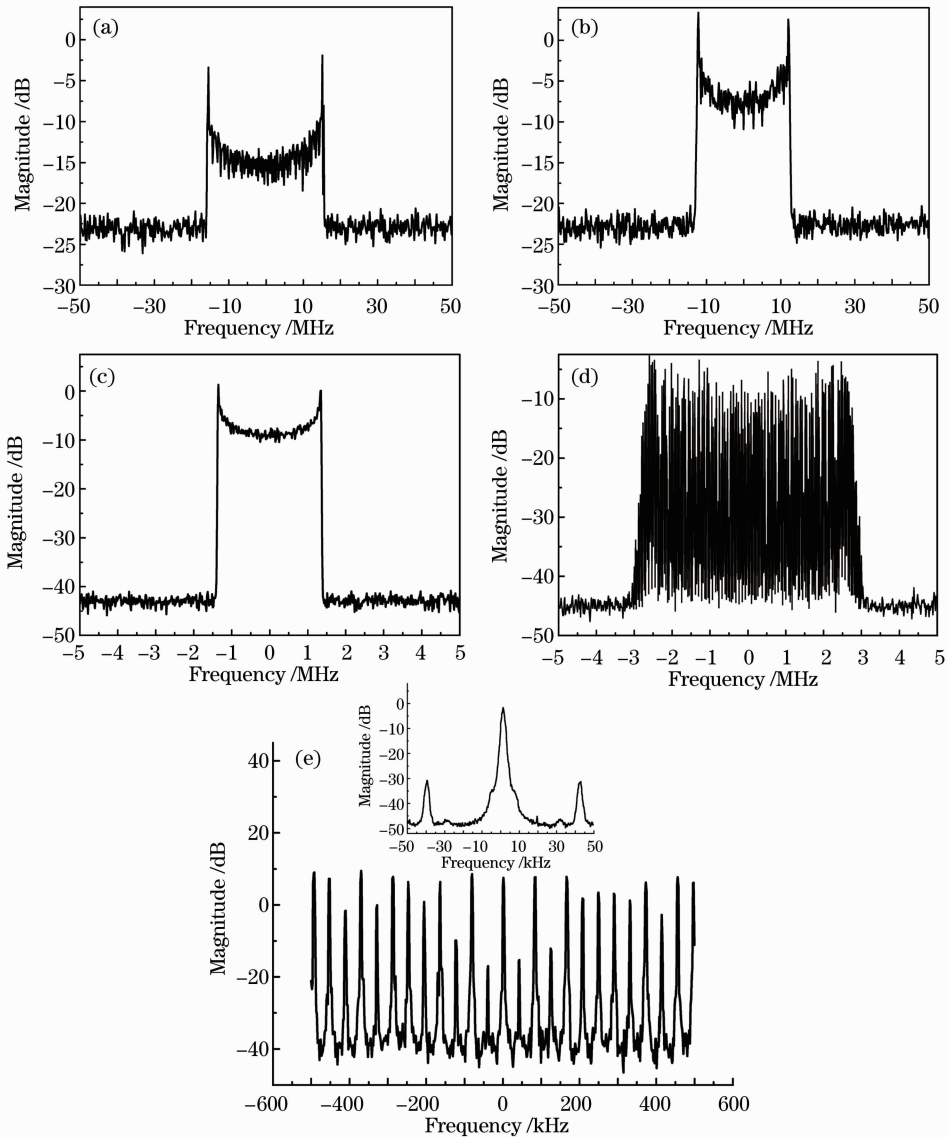


图5 不同类型的激光器以及在不同的调制频率下的线型。(a) LD,调制频率为1 kHz;(b) LD,调制频率为42 kHz;(c) FRL,调制频率为1.25 kHz;(d) FRL,调制频率为41.25 kHz;(e) (d)图的局部放大图

Fig. 5 Line shape of different types of lasers with different modulation frequencies. (a) Line shape of LD with modulation frequency of 1 kHz; (b) line shape of LD with modulation frequency of 42 kHz; (c) line shape of FRL with the modulation frequency of 1.25 kHz; (d) line shape of FRL with modulation frequency of 41.25 kHz; (e) corresponding detail spectra to Fig. (d), where inset shows the higher resolution spectrum

图6给出了调制频率分别为0.5, 1, 1.5, 2 kHz,幅度相同的调制信号调制下LD的线型。可以看到随着调制频率从0.5 kHz增加到2 kHz,线宽也在不断地增加。根据前面的分析,2 kHz是光程差为50 km时线宽达到最大值的一个频率点。超过2 kHz的线宽没有给出来。因为随着调制频

率的再增加,线宽将会变窄,在4 kHz处最窄,为自然线宽,然后在6 kHz处又到达了最大值,以后重复此过程。实验结果证明了用延迟自外差法测得的线宽随着调制频率的变化而不同。

图7给出了当调制频率为36 kHz时,不同延迟线长度下LD的线型,当延迟线长度为25 km时,线

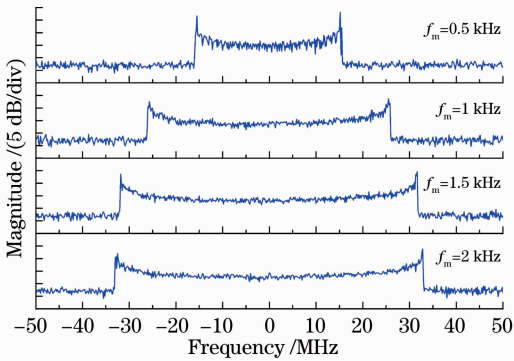


图6 不同调制频率下LD的线型

Fig. 6 Line shape of LD with different modulation frequencies

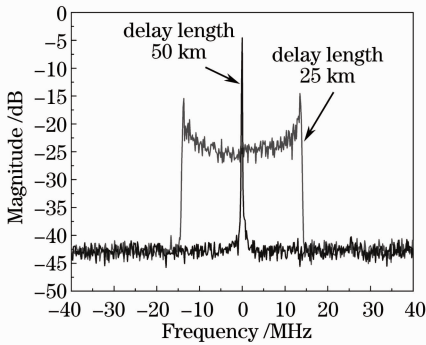


图7 不同延迟线长度下LD的线型

Fig. 7 Line shape of LD with different delay lengths

宽展宽到 15 MHz, 当延迟线长度为 50 km 时, 却为自然线宽。这证明了对于同样的调制频率和调制幅度, 延迟线的长度不同, 延迟自外差法测得的线型也会不同。

4 结 论

分析了延迟自外差法测得的调频激光器的线型。得到了线型的数学表达式, 结果表明, 调频激光器的线型是与调制函数及测试系统有关的传递函数和激光器自然线型的卷积, 传递函数可以根据引入频率调制的理想单色光经过测试系统后发生干涉的信号频谱得到。分析了线宽和测试参数的关系, 结果表明, 基于延迟自外差法测得的调频激光器的线宽和调制频率以及延迟线的长度有关, 随着调制频率和延迟线长度的增加, 线宽呈周期性变化。实验对理论分析进行了验证。本文得到的结论对用调频激光器实现线宽和线型控制有指导性意义。

参 考 文 献

- 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
- Z. Meng, Y. Hu, S. Xiong *et al.*. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17): 3425~3428
- Xie Weilin, Dong Yi, Zhou Qian *et al.*. Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706003
- 谢玮霖, 董毅, 周潜等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706003
- Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong *et al.*. Short fiber delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, **34**(5): 568~571
- 贾豫东, 欧攀, 杨远洪等. 短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, **34**(5): 568~571
- Peng Yu, Li Ye, Cao Jianping *et al.*. Measurement for linewidth of an external cavity diode laser based on monolithic Fabry-Perot cavity with delayed self-heterodyne method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0414001
- 彭瑜, 李烨, 曹建平. 利用自相位延迟方法测量单块腔反馈半导体外腔激光器的线宽[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0414001
- Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 350~353
- 伍波, 刘永智, 张谦述等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效率窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 350~353
- L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kruger *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2070~2074
- K. Liyama, K. Hayashi, Y. Ida *et al.*. Reflection-type delayed self-homodyne/heterodyne method for optical linewidth measurements[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(5): 635~640
- L. B. Mercer. 1/f frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(4): 485~493
- P. Horak, W. H. Loh. On the delayed self-heterodyne interferometric technique for determining the linewidth of fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 3923~3928
- G. M. Stéphan, T. T. Tam, S. Blin *et al.*. Laser line shape and spectral density of frequency noise[J]. *Phys. Rev. A.*, 2005, **71**(4): 043809
- T. Okoshi, Ki Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 630~631
- S. L. Girard, H. Chen, G. W. Schinn *et al.*. Frequency-modulated, tunable, semiconductor-optical-amplifier-based fiber ring laser for linewidth and line shape control[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1920~1922
- J. S. Ryu, S. Yamamoto. Measurement of direct frequency modulation characteristics of DFB-LD by delayed self-homodyne technique[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(20): 1052~1054