

两台独立激光器拍频线型对线宽测量的影响

彭雪峰^{1,2} 马秀荣^{1,2} 张双根^{1,2} 任广军^{1,2} 刘涛¹

(¹ 天津理工大学计算机与通信工程学院通信器件教育部工程研究中心, 天津 300384)
(² 天津理工大学电子信息工程学院薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384)

摘要 根据两台独立激光器拍频的理论模型, 计算得到了洛伦兹线型和高斯线型的拍频线宽随衰减值的变化的关系。为了提高激光线宽测量精度, 在未知拍频线型时应选取较小的衰减值计算激光线宽; 在已知拍频线型的情况下可选取较大的衰减值计算激光线宽。实验上采用窄线宽半导体激光器拍频测量其激光线宽, 根据几个特殊衰减值处的线宽比值关系来判别拍频线型。选用较大衰减值的拍频线宽计算激光线宽, 测量结果与仪器出厂指标相比, 误差仅为 0.23%。该方法对其他线型仍然适用。

关键词 激光光学; 激光线型; 拍频; 窄线宽

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0408002

Effect of Beat Frequency Linetype on Measurement of Laser Linewidth Using Two Independent Lasers

Peng Xuefeng^{1,2} Ma Xiurong^{1,2} Zhang Shuanggen^{1,2} Ren Guangjun^{1,2} Liu Tao¹

¹ *Engineering Research Center of Communication Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*
² *Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, School of Electronics Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*

Abstract Based on theoretical model of beat frequency using two independent lasers, beat frequency linewidths of Lorentz and Gaussian linetypes changing with different attenuation values are obtained theoretically. It is significant that smaller attenuation value should be chosen to calculate laser linewidth if laser linetype is unknown previously and larger attenuation value for known laser linetype. In the experiment of beat frequency using two external cavity diode lasers (ECDL), linewidth ratio is measured under typical attenuation values, which can be used to judge linetype of laser. Using the method above, linewidth of laser is achieved with an error about 0.23% compared with its calibration data, therefore linewidth measurement precision of laser is enhanced. The method is still applicable to other linetypes analysis.

Key words laser optics; laser linetype; beat frequency; narrow linewidth

OCIS codes 300.3700; 300.6170; 300.6360

1 引 言

随着激光技术的发展和窄线宽激光的广泛应用^[1~3], 对激光线宽的测量成为一个新的挑战。目前测量激光线宽的常用方法是拍频法^[4~6]。然而在采用拍频法时, 人们习惯地将激光线型作为洛伦兹型(L型)处理。例如, 在文献[7, 8]中采用拍频法

时直接选取洛伦兹线型计算激光线宽; 文献[9]中测量时选取洛伦兹线型的 20 dB 线宽来计算激光器输出的 3 dB 线宽。由于激光线型有多种, 不同拍频线型对激光线型的测量将产生影响, 因此需要先判断激光线型, 再计算激光线宽。在上述工作中, 如果激光线型更接近高斯型(G型), 则会给测量结果带来

收稿日期: 2010-11-12; 收到修改稿日期: 2010-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(11004152)和天津市教委(20090715)资助课题。

作者简介: 彭雪峰(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学信号处理等方面的研究。E-mail: pexufe@126.com

导师简介: 马秀荣(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信和光学信号处理等方面的研究。

E-mail: maxiuorong@eyou.com

较大的误差。

本文根据两台激光器拍频的理论模型,分析了拍频线型对激光线宽测量的影响,计算得到了L型和G型的拍频线宽随衰减值的变化关系。在未知拍频线型时应选取较小的衰减值计算激光线宽;在已知拍频线型的情况下可选取较大的衰减值计算激光线宽。实验中采用两台窄线宽半导体激光器对其激光线宽进行拍频测量,通过测量比较几个特殊衰减位置处拍频线宽的比值来判别激光线型。

拍频线型 $g_L(\nu)$ 为 $g_{L1}(\nu)$ 和 $g_{L2}(\nu)$ 的卷积^[11]

$$g_L(\nu) = g_{L1}(\nu) * g_{L2}(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta\nu}{(\tau - \nu_1)^2 + (\Delta\nu/2)^2} \frac{\Delta\nu}{(\nu - \tau - \nu_2)^2 + (\Delta\nu/2)^2} d\tau = \frac{4\pi\Delta\nu^2}{(\nu - \nu_1 - \nu_2)^2 + \Delta\nu^2}, \quad (2)$$

由(2)式可以看出,L型拍频后的线型仍为L型。

当激光线型为G型时,激光器输出线型和拍频线型分别为

$$g_{Gi}(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left[-\frac{4\ln 2}{\Delta\nu^2}(\nu - \nu_i)^2\right], \quad (3)$$

$$g_G(\nu) = g_{G1}(\nu) * g_{G2}(\nu) = \frac{\sqrt{2}}{\Delta\nu} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left[-\frac{2\ln 2}{\Delta\nu^2}(\nu - \nu_1 - \nu_2)^2\right], \quad (4)$$

由(4)式可以看出,由G型拍频后的线型仍为G型。

设 $\delta_j(x)$ (其中 $j = L, G$) 分别为拍频谱 $g_L(\nu)$ 和 $g_G(\nu)$ 的 x dB 线宽,则有

$$\delta_j(x) = \nu_j^1 - \nu_j^2, \quad (5)$$

式中 ν_j^1 和 ν_j^2 为 $g_j(\nu) = \max[g_j(\nu)] * 10^{-0.1x}$ 方程互不相等的两个根。由此可以计算不同拍频线型情况下产生的拍频线宽。

当 $j = L$ 时,即拍频激光均为L型时,拍频线宽 $\delta_L(x)$ 为

$$\delta_L(x) = \nu_L^1 - \nu_L^2 = 2 \sqrt{10^{0.1x} - 1} \Delta\nu; \quad (6)$$

当 $j = G$ 时,即拍频激光均为G型时,拍频线宽 $\delta_G(x)$ 为

$$\delta_G(x) = \nu_G^1 - \nu_G^2 = 2 \sqrt{0.1x \ln 10 / \ln 2} \Delta\nu. \quad (7)$$

从(6),(7)式可以看出,以 $\Delta\nu$ 为单位的拍频线宽 $\delta_j(x)$ 会随着衰减值 x dB 变化,其变化关系如图1所示。

图1中横轴表示衰减值 x dB,纵轴表示拍频线宽 $\delta_j(x)$ 。其中实线表示拍频激光均为L型时拍频线宽随衰减值的变化,虚线表示拍频激光均为G型

2 理论分析

激光线宽可以通过拍频谱的线宽测量获得。设两拍频激光线型一致,均为L型,并且线宽相同。激光器输出线型为^[10]

$$g_{Li}(\nu) = \frac{\Delta\nu}{(\nu - \nu_i)^2 + (\Delta\nu/2)^2}, \quad (1)$$

式中下标 $i = 1, 2$ 分别表示激光器1和激光器2。 ν_i 为激光器的中心频率, $\Delta\nu$ 为激光的3 dB半峰全宽(FWHM)。

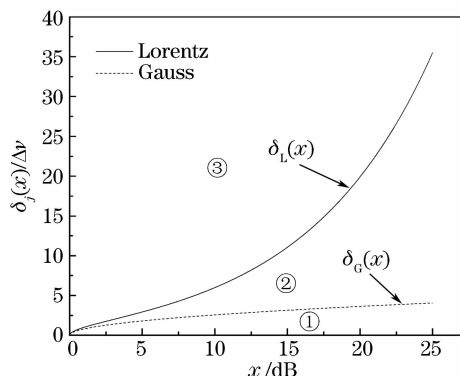


图1 拍频线宽随衰减值的变化关系

Fig. 1 Relationships between beat frequency width and attenuation values

时不同衰减值下拍频线宽随衰减值的变化。从图中可以看出,当衰减值较小或者接近于零时,两者的拍频线宽相差较小;随着衰减值的增加,两者的拍频线宽相差迅速增大。因此,在不能确定激光线型的情况下,可选取较小的衰减值(如本文分析中取1 dB)来计算激光线宽,以减小线型选择不当带来的误差(本文误差大约为20%,若取较大衰减值时误差增大);另外,在确定了激光线型时,根据仪器本身噪声和输入信号强度来确定最大衰减值(如本实验中取20 dB)处的线宽,以提高测量的准确性。

如果测量结果的比值既不满足G型,也不满足L型时,可以将G型和L型两条曲线划分出来的区间分为3个区域①,②,③,如图1所示。落在区域①时选择G型来近似计算,落在区域②时既可选择G型也可选择L型来近似计算,落在区域③时选择L型来近似计算。

为了进一步判别拍频激光线型,比较了不同拍频线型下, 3, 10, 20 dB 衰减值处的拍频线宽, 因为

在这些衰减值处的拍频线宽为激光器线宽的整数倍, 便于判断和处理, 理论计算结果如表 1 所示。

表 1 不同衰减下的拍频线宽

Table 1 Theoretical optical beating widths under different attenuations

Function	Lorentz	Gauss
	$\frac{4\pi\Delta\nu^2}{(\nu - \nu_1 - \nu_2)^2 + \Delta\nu^2}$	$\frac{\sqrt{2}}{\Delta\nu} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left[-\frac{2\ln 2}{\Delta\nu^2}(\nu - \nu_1 - \nu_2)^2\right]$
3 dB	$2\Delta\nu$	$\sqrt{2}\Delta\nu$
10 dB	$6\Delta\nu$	$\sqrt{\frac{\ln 10}{2\ln 2}}\Delta\nu \approx 2.5776\Delta\nu$
20 dB	$20\Delta\nu$	$\sqrt{\frac{\ln 10}{\ln 2}}\Delta\nu \approx 3.6452\Delta\nu$

从表 1 可以看出, 在 3 dB 衰减值时, L 型的拍频线宽为 $2\Delta\nu$, 而 G 型的拍频线宽为 $\sqrt{2}\Delta\nu$ 。这时, 如果将 L 型按 G 型处理, 就会引起一定的误差, 为 $|(2 - \sqrt{2})\Delta\nu / (\sqrt{2}\Delta\nu)|\% \approx 40\%$; 反之, 如果将 G 型当作 L 型处理, 引起的误差为 $|(2 - \sqrt{2})\Delta\nu / (2\Delta\nu)|\% \approx 30\%$ 。当采用 20 dB 衰减值的拍频线宽计算激光线宽时, 线型判断错误将会带来更大的误差。

在表 1 中, 对于 L 型在 10 dB 和 3 dB 衰减值下, 拍频线宽的比值为 $6\Delta\nu / (2\Delta\nu) = 3$, 在 20 dB 和 3 dB 衰减值下, 拍频线宽的比值为 $20\Delta\nu / (2\Delta\nu) = 10$; 而对于 G 型在 10 dB 和 3 dB 衰减值下, 拍频线宽的比值为 $2.5776\Delta\nu / (\sqrt{2}\Delta\nu) \approx 1.82$, 在 20 dB 和 3 dB 时, 其比值为 $3.6452\Delta\nu / (\sqrt{2}\Delta\nu) \approx 2.58$ 。可以看出, 不同拍频线型在不同衰减值下, 其拍频线宽的比值不同。因此, 可以通过测量拍频谱线 3, 10, 20 dB 下的拍频线宽, 比较它们之间的比值关系就可以判别激光线型。

3 拍频实验

拍频实验光路如图 2 所示, 其中图 2(a) 表示实验布局示意图, 图 2(b) 表示实验光路实物图, 两台激光器均为窄线宽外腔半导体激光器 (ECDL, Newfocus TLB-6017)。

在图 2(a) 中, 激光器 1 输出线偏振光经半波片后到偏振分束器 (PBS), 旋转半波片使激光器 1 的输出光全部透过 PBS。激光器 2 输出光也为线偏振光, 经反射镜和半波片后也到达 PBS, 旋转半波片使激光器 2 输出光被 PBS 完全反射。调整光路使激光器 1 的透射光和激光器 2 的反射光在空间上完全重合。空间合束之后反射光和透射光的偏振态相互垂直, 需要另外一组半波片和 PBS, 使反射光和透射光经过第二个 PBS 后偏振态完全重合, 然后经过透

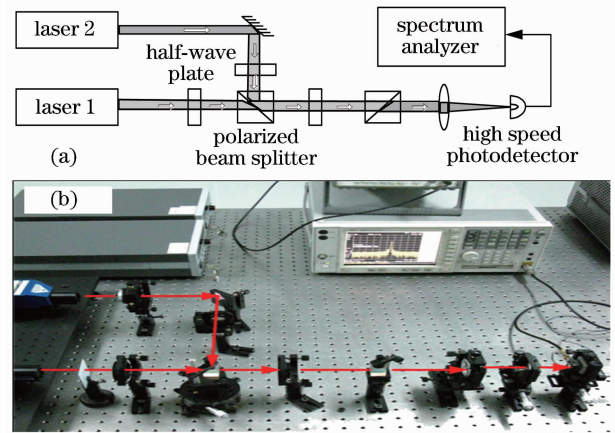


图 2 拍频实验光路图

(a) 拍频示意图, (b) 拍频实物图

Fig. 2 Experimental setup of optical beating

(a) schematic of optical beating,

(b) physical configuration of optical beating

镜汇聚到高速光电探测器 (Newfocus 1557-A) 上进行探测。

4 结果及分析

将高速光电探测器的输出信号输入到频谱分析仪 (Agilent E4445A) 中进行处理。实验中测得的拍频谱线 3 dB 线宽如图 3 所示, 约为 232 kHz。

图 4 中点线为实验测量的拍频线宽值, 实线和虚线分别表示拍频线型均为 L 型和 G 型时的拍频线宽随衰减值的变化, 误差棒表示在不同衰减下拍频线宽的测量误差。在同一分辨率带宽下测量不同衰减位置处的拍频线宽, 先用 L 型和 G 型的理论曲线分别对实验测量数据进行模拟, 得到各自的 $\Delta\nu$ 值和拟合度, 发现 L 型和测量数据的拟合度不到 10%, 而 G 型和测量数据的拟合度为 99%, 从而判断曲线为 G 型, 并得到 $\Delta\nu$ 的拟合值, 然后将 $\Delta\nu$ 的拟

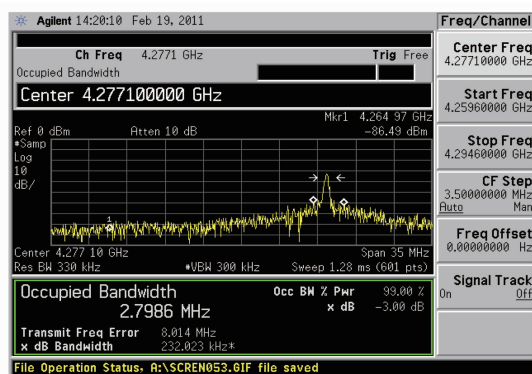


图 3 拍频谱线的 3 dB 线宽

Fig. 3 Measured beating width under 3 dB attenuation

合值分别代入 L 型和 G 型曲线,理论计算和测量结果如图 4 所示。从图中可看出,实际测量的拍频线型与理论计算的 G 型较好地吻合。

实验中测量 3,10 和 20 dB 衰减位置处的拍频线宽,测量数据的采集规则是:首先确定某一固定衰减值如 3 dB,在该处对拍频线宽测量 1000 次,然后根据测量得到的最大最小值划分间隔大小相等的区间,如按照 30 kHz 来划分间隔区间,然后作出频率

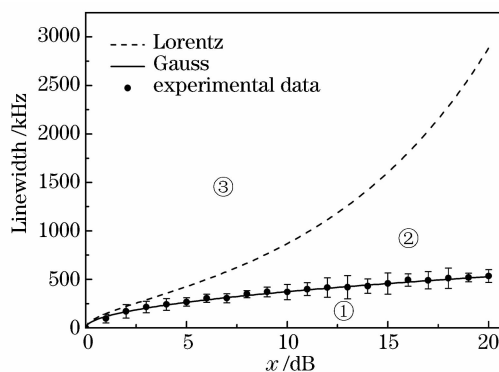


图 4 不同衰减位置的拍频线宽

Fig. 4 Measured beating widths and corresponding fitting curves under different attenuations

分布直方图,确定频数最多的分布区间,然后选取落在该区间之内的数据,取 6 次平均得到该衰减值处的拍频线宽,结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出测量 10 dB 和 3 dB 的拍频线宽平均值之比为 $393.3/220.5 \approx 1.78$,理论计算得到 G 型拍频的 10 dB 和 3 dB 线宽比值为 1.82,而 L 型情形下的 10 dB 和 3 dB 线宽比值约为 3,实际测量值更接近于 G 型拍频。

表 2 实验测量的 3,10 和 20 dB 线宽

Table 2 Measured beating widths under 3, 10 and 20 dB attenuation

kHz	1	2	3	4	5	6	Average	Error (Gauss) / %	Error (Lorentz) / %
3 dB	232	222	199	205	227	238	220.5	7.50	24
10 dB	382	390	384	400	395	409	393.3	5.20	55
20 dB	541	531	535	539	526	537	534.9	0.23	82

另外,测量得到 20 dB 和 3 dB 拍频线宽之比为 $534.9/220.5 \approx 2.43$,G 型拍频线宽的比值为 2.6,L 型下拍频线宽的比值为 10。可以看出,G 型下的拍频线宽比值与 L 型下拍频线宽的比值在更大衰减处的差别更明显。因此,根据测量的拍频线型在不同衰减处的线宽比值可以判断出激光器线型属于 G 型,激光线宽为拍频线宽的 $1/\sqrt{2}$ 倍。然而,测量谱线有时会伴有尖峰结构,在较大衰减处如 20 dB 处,计算得到的激光线宽更接近于实际值。实验中,用拍频谱线的 20 dB 线宽计算激光线宽约为 $534.9 \text{ kHz}/3.65 \approx 146.5 \text{ kHz}$,实验所用窄线宽外腔半导体激光器的线宽指标为 150 kHz,两者相比,误差仅为 0.23%。而采用拍频谱线的 10 dB 线宽和 3 dB 线宽计算得到的误差均较大。相反,如果采用 L 型处理,在不同衰减处的误差均较大,在 20 dB 处计算结果的误差达 82%。该方法很大程度上减小了由于拍频线型选择不当带来的误差。

5 结 论

根据两台独立激光器拍频的理论模型,分析了拍频线型对激光线宽测量的影响。发现 L 型激光束拍频后仍为 L 型,G 型激光束拍频后仍为 G 型。并且得到了这两种情形下拍频线宽随衰减值的变化关系。根据不同衰减值之间的拍频线宽比值关系可以快速地判断线型;在确定线型后根据激光线宽和拍频线宽之间的关系选取较大的衰减值计算线宽,在未知线型时尽量选取较小的衰减值计算,可以减小误差。运用该方法测得的结果与仪器出厂指标相比,误差仅为 0.23%。避免了由于随意选择激光器输出线型引起的误差,给激光线宽的精确测量提供了实际参考。该方法对于其他线型也适用。

参 考 文 献

1 P. Signoret, M. Myara, J. P. Tourrenc *et al.*. Bragg section effects on linewidth and lineshape in 1.55 μm DBR tunable laser diodes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6):1429~

1431

- 2 Liu Yuan, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1857~1860
刘源, 刘继桥, 陈卫标. 人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1857~1860
- 3 Wu Bo, Du Weimin, Hou Tianjin *et al.*. High power narrow linewidth fiber amplifier and laser linewidth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1866~1869
伍波, 杜伟敏, 侯天晋等. 高功率窄线宽光纤放大器及放大线宽特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1866~1869
- 4 Li Ning, Yang Jianhua, Wang Fei *et al.*. Effect of linewidth on measurement of CO₂ by wavelength modulation absorption spectrometry using tunable diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10):1567~1572
李宁, 严建华, 王飞等. 光谱线宽对可调谐激光调制吸收光谱技术测量 CO₂ 浓度的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10):1567~1572
- 5 Lwatsukik, H. Okamura, I. M. Saruwatar. Wavelength tunable single frequency and single polarization Er-doped fiber ring laser width 1.4 kHz linewidth [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(24):2033~2034
- 6 A. Debut, S. Randoux, I. J. Zermour. Line-width narrowing in Brillouin lasers: Theoretical analysis [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(2):023803
- 7 Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong *et al.*. Short fiber delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. *Journal of 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
- 8 Namkyoo Park, W. Dawson Jay, J. Vahala Kerry. Linewidth and frequency jitter measurement of an erbium-doped fiber ring laser by using a loss-compensated delayed self-heterodyne interferometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(9):1063~1066
- 9 Qu Ronghui, Cai Haiwen. Narrow linewidth lasers with high stability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(6):1033~1038
瞿荣辉, 蔡海文. 高稳定性窄线宽激光器的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(6):1033~1038
- 10 L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kriger *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay time [J]. *Quantum Electron. Lett.*, 1986, **22**(11):2070~2074
- 11 Liu Xiaobo. Measurement System Design and Implementation of Narrow Linewidth of Semiconductor Laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009
刘晓波. 窄线宽半导体激光器线宽测量系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2009