

文章编号 : 0258-7025(2001)04-0351-04

# 窄线宽激光的零拍测量法 \*

俞本立<sup>1</sup> 钱景仁<sup>2</sup> 杨瀛海<sup>1</sup> 罗家童<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 安徽大学物理系 合肥 230039 ; <sup>2</sup> 中国科技大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

**提要** 分析了用光纤延时零拍法测量窄线宽激光时, 光纤延时线长度与零拍光电流谱线上的附加波动关系, 利用该方法对有源光纤环形腔滤波器输出谱线进行了测量, 其附加波动变化规律实验结果与理论分析一致。

**关键词** 零拍法 线宽测量 光纤环形腔

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Homodyne Method for Measuring Narrow Linewidth Lasers

YU Ben-li<sup>1</sup> QIAN Jing-ren<sup>2</sup> YANG Ying-hai<sup>1</sup> LUO Jia-tong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039  
<sup>2</sup> Department of EEIS, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

**Abstract** The relationship between the length of optical fiber time delay line and characteristics of periodical fluctuation affixed on homodyne spectrum is analyzed. Using this method, the output linewidth of active optical fiber ring resonator filter is measured. Experiment results are consistent with the theoretical model.

**Key words** homodyne, linewidth measurement, optical fiber ring resonator

### 1 引 言

在高速光通信系统、高密集波分复用系统、相干检测系统及相位型光纤传感系统中均需要单频窄线宽的光源。光纤环形腔激光器<sup>[1]</sup>和光纤有源环形腔滤波器<sup>[2]</sup>等可以实现单频窄线宽激光输出, 输出谱线的线宽是衡量其性能的重要指标。早期一般均采用扫描式法布里-珀罗干涉仪测量激光线宽, 但是当线宽小于几十兆赫时, 其精度显得不够了。Okoshi 首先提出用外差法测量分布反馈式半导体激光器的线宽<sup>[3]</sup>。本文采用的零拍法(见图 1), 就是将一路入射光分成两路, 并将其中一路光用光纤延时后, 使两路光相拍, 经光电转换, 在频谱分析仪上得到相拍后的光电流谱线。

作者在实验中发现, 一定条件下该光电流谱线上会附加周期性的波动。本文利用自相关函数和光电流的谱密度函数, 考察了光电流谱上的附加波动, 并将实验结果与理论分析进行了对比。



图 1 带光纤延时线的零拍实验装置

1 : 3 dB 耦合器 ; 2 : 光纤延时线 ; 3 : 3 dB 耦合器

Fig.1 Experimental setup of homodyne with delay fiber

1 : 3 dB coupler ; 2 : fiber time delay line ; 3 : 3 dB coupler

### 2 理 论

单模激光可认为是一个有相位扰动振幅稳定的准单色电磁场

$$E(t) = E_0 \exp[j\omega_0 t + \phi(t)] \quad (1)$$

式中  $E_0$  为振幅,  $\omega_0$  为电磁场的中心频率,  $\phi(t)$  代表相位的随机波动, 它导致谱线展宽。当采用光纤延时零拍法时, 其合成场可表示为

$$E_T(t) = E(t) + \alpha E(t + \tau_0) \quad (2)$$

式中  $\alpha$  代表两束光之间的分光振幅比,  $\tau_0$  代表光纤延时线所产生的延时时间。由于光电探测器的平方率, 其  $E(t)$  中相位随机波动将转化为强度噪声, 反映为光电流的频谱展宽, 为了将光电流的频谱与单

\* 国家自然科学基金(编号 69677023)资助项目。

收稿日期 2000-03-23 ; 收到修改稿日期 2000-06-12

模激光线宽相联系,这里引进光电流自相关函数  $R(\tau)$ ,它取决于(2)式所决定的总合成场的强度相关函数<sup>[4,5]</sup>,如下式

$$R(\tau) = e\sigma G_{E_T}^{(2)}(0)\chi(\tau) + \sigma^2 G_{E_T}^{(2)}(\tau) \quad (3)$$

式中  $e$  为电子电荷,  $\sigma$  为光电探测器灵敏度,  $\delta$  即是  $\delta$  函数,  $G_{E_T}^{(2)}(\tau)$  为第一阶光电流强度相关函数,该相关函数定义为

$$G_{E_T}^{(2)}(\tau) = E_T(t)E_T^*(t)E_T(t+\tau)E_T^*(t+\tau) \quad (4)$$

将(2)式代入(4)式,并注意到

$$\Delta\phi(t, \tau) = \phi(t+\tau) - \phi(t) \quad (5)$$

式中的  $\Delta\phi(t, \tau)$  即是相位随机变化,在大多数情况下该相位随机变化可以假设成平稳高斯随机过程,所以有

$$\exp[\pm j\Delta\phi(t, \tau)] = \exp\left[-\frac{1}{2} \Delta\phi^2(\tau)\right] \quad (6)$$

同时相位相关性可写为

$$\Delta\phi^2(\tau) = 2\gamma|\tau| \quad (7)$$

经过推导可得

$$\frac{G_{E_T}^{(2)}(\bar{\tau})}{E_0^4} = \begin{cases} \left[ (1 + \alpha^2) + 2\alpha \cos\theta \exp\left(-\frac{\bar{\tau}_0}{2}\right) \right]^2 & (-\infty < \bar{\tau} < \infty) \\ -4\alpha^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \left\{ \sin\left[|\bar{\tau}| - \bar{\tau}_0\right] + \cos^2\theta [1 - \exp(|\bar{\tau}| - \bar{\tau}_0)] \right\} & (0 < |\bar{\tau}| < \bar{\tau}_0) \end{cases} \quad (8)$$

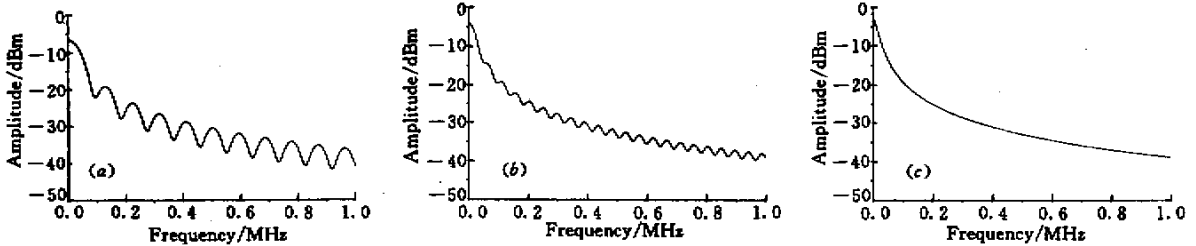


图2 零拍谱线

Fig.2 Homodyne spectra

(a)  $\bar{\tau}_0 = 1$  ( $\tau_0 = 10.9 \mu\text{s}$ ) and  $\cos^2\theta = 0.5$ ;

(b)  $\bar{\tau}_0 = 2$  ( $\tau_0 = 21.8 \mu\text{s}$ ) and  $\cos^2\theta = 0.5$ ; (c)  $\bar{\tau}_0 = 6$  ( $\tau_0 = 61.8 \mu\text{s}$ ) and  $\cos^2\theta = 0.5$

同时代表相干因子的  $\cos^2\theta$  有重要作用,如图3所示,当  $\cos^2\theta = 0$  在准 Lorentz 形光电流谱线上叠加的周期性波动会充分地表现出来,而当  $\cos^2\theta = 1$  时,其周期性波动的幅度就会明显地减少并对线形有一定的影响。显然当光纤延时线较长时很难保持

式中  $\bar{\tau} = 2\gamma\tau$ ,  $\bar{\tau}_0 = 2\gamma\tau_0$ ,  $\theta = \omega_0\tau_0 = \bar{\omega}_0\bar{\tau}_0$  反映为两束光之间的相位差,而  $2\gamma$  为单模激光角频率 FWHM (半高全宽),根据著名的 Wiener-Khintchine 公式,通过对自相关函数进行傅里叶变换即可得到光电流的谱密度,故由(3)(8)式得

$$\frac{S(\omega)}{\sigma^2 E_0^4} = \left[ 1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos\theta \exp\left(-\frac{\bar{\tau}_0}{2}\right) \right]^2 \chi(\bar{\omega}) + 4\alpha^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \frac{1}{\pi(1 + \bar{\omega}^2)} \cdot \left\{ \text{ch } \bar{\tau}_0 - \cos \bar{\omega} \bar{\tau}_0 + \cos^2\theta \left[ \cos \bar{\omega} \bar{\tau}_0 - \frac{\sin \bar{\omega} \bar{\tau}_0}{\bar{\omega}} - \exp(-\bar{\tau}_0) \right] \right\} \quad (9)$$

从(9)式可以看出,当延时时间变短时,能量就向体现相干特性的第一项  $\delta$  函数集中;当延时时间变长时能量逐渐向第二项转移,光的相干特性将转化为光的相拍特征,第二项中  $1/\pi(1 + \bar{\omega}^2)$  表现为准 Lorentz 线形,其半高全宽 (FWHM) 为  $4\gamma$ ,是被测激光线宽的两倍,这就是用零拍法测量激光线宽工作原理,同时必须注意到第二项大括号中的因子对光电流谱线的影响。

根据(9)式设 FWHM = 16 kHz,绘出图2(a)~(c),从图中可以看出当  $\bar{\tau}_0 < 6$  时,在准 Lorentz 光电流谱线上就会叠加周期性波动,该波动显然主要是(9)式中  $\cos \bar{\omega} \bar{\tau}_0$  项的贡献,其周期大小等于光纤延时时间  $\tau_0$ ;其幅度大小受相对延时时间  $\bar{\tau}_0$  的影响,即当被测线宽一定时,光纤延时线愈长波动幅度愈小,反之被测线宽愈窄,波动幅度愈大。

两束相拍光的相位差是  $\pi/2$  奇数倍,同样很难保持两束相拍光的相位差是  $\pi$  整数倍,所以实际情况中  $\cos^2\theta$  应取平均值 0.5。

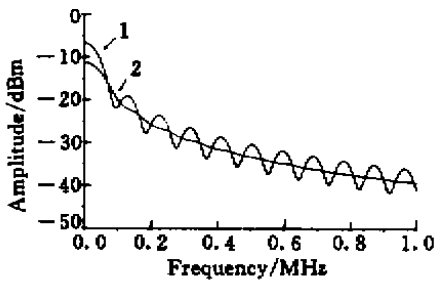


图3 零拍谱线  $\bar{\tau}_0 = 1$  ( $\tau_0 = 10.9 \mu s$ )

曲线 1 :  $\cos^2 \theta = 0$  ; 曲线 2 :  $\cos^2 \theta = 1$

Fig.3 Homodyne spectra with  $\bar{\tau}_0 = 1$  ( $\tau_0 = 10.9 \mu s$ )

curve 1 :  $\cos^2 \theta = 0$  ; curve 2 :  $\cos^2 \theta = 1$

### 3 实验与结果

实验中将自制的光纤有源环形腔滤波器(见图4)输出谱线作为测量对象,其原理见文献[2],图中注入光用分布反馈式半导体激光器(DFB LD),其中心波长为 1534 nm,3 dB 线宽为 1.3 MHz,输入耦合器  $C_1$  耦合比为 4%,输出耦合器  $C_2$  的耦合比为 5%,抽运 LD 波长为 980 nm,光纤带通滤波器 3 dB 带宽为 23 nm,PC 为偏振状态控制器,掺铒光纤(EDF)的长度为 9 m,腔长约为 15 m,谐振腔损耗约 5.5 dB,PZT 用于克服环境对谐振腔的扰动,通过调节抽运光功率,使其环形腔工作在寄生激光阈值点以下且近阈值点处,根据有源光纤环形腔理论,其注入激光的线宽将被压缩,图5是作为注入光的 DFB LD 零拍谱线。图6为有源滤波器输出的零拍谱线,可以清楚地看到输出激光的线宽为 200 kHz,输入激光的线宽被明显压缩了。

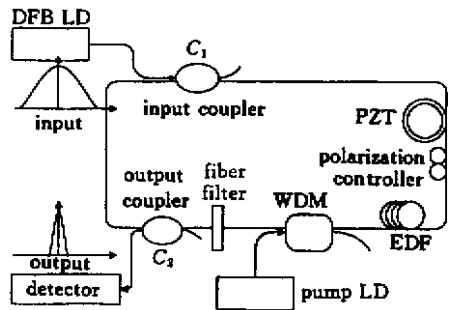


图4 有源光纤环形腔滤波器示意图

Fig.4 Schematic diagram of active optical fiber ring resonator filter

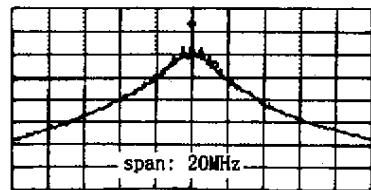


图5 DFB 半导体激光器的零拍光电流谱

Fig.5 Homodyne spectrum of DFB laser diode

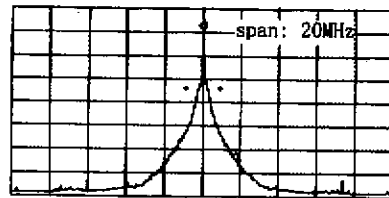


图6 有源滤波器的零拍谱线

Fig.6 Homodyne spectrum of active filter

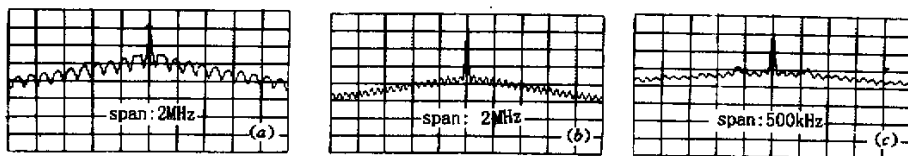


图7 有源滤波器的零拍谱线

光纤延时线长度为 (a) 2.2 km ( $\tau_0 \approx 10.9 \mu s$ ); (b) 4.4 km ( $\tau_0 \approx 21.8 \mu s$ ); (c) 12.4 km ( $\tau_0 \approx 61.8 \mu s$ )

Fig.7 Homodyne spectra of active filter with

(a) 2.2 km ( $\tau_0 \approx 10.9 \mu s$ ), (b) 4.4 km ( $\tau_0 \approx 21.8 \mu s$ ) and (c) 12.4 km ( $\tau_0 \approx 61.8 \mu s$ ) delay fiber

由于测量对象的线宽均小于 50 MHz,所以在零拍法测量线宽实验中采用了一个带宽 50 MHz 的光电转换电路,频谱分析仪为 HP8591E 型,其频谱范围为 9 kHz ~ 1.8 GHz。

为了清楚显示光纤延时线长度与零拍光电流谱

线上的周期性波动关系,在零拍实验装置中,光纤延时线分别选用长度为 2.2 km、4.4 km 和 12.4 km 单模光纤。图 7(a) ~ (c) 即为有源滤波器输出光零拍谱线的局部图。可以看出:

1) 由于  $\delta$  函数,存在明显的零频直流峰,它的

线宽与频谱分析仪低频测量极限有关,当被测激光的线宽很窄时将会给测量带来误差;

2) 由于实测谱线上有明显的附加波动,代表相干因子的  $\cos^2\theta$  取平均值是合理的;

3) 比较图  $\chi(a)$  和图  $\chi(b)$  及图  $\chi(a)$  和图  $\chi(b)$ , 在谱线上的附加波动的周期及幅度变化,实验结果与理论分析一致;

4) 当被测激光的线宽很窄时,如果光纤延时线长度不够,由于谱线上附加波动的影响,3 dB 线宽将难于测定,解决的方法就是加大光纤延时线的长度,光纤延时线的长度远大于被测激光的相干长度。

## 4 讨 论

1) 在上述讨论中仅限于零拍,同样如果将零拍中的一路光进行移频,然后使两路光相拍就是差拍,差拍中的附加波动规律与零拍相近。

2) 在理论计算时,如果  $\tau_0 \geq 6$  时光电流谱线上的附加波动将消失,而在光纤环形腔有源滤波器实测曲线上,即使  $\tau_0 \geq 6$  谱线上的附加波动依然很明显(如图  $\chi(c)$ )。可能的一种解释是:为了克服环

境对光纤环形腔有源滤波器的扰动,使输出稳定,在实验中使用了 50 Hz 的正弦波驱动 PZT,当光纤环形腔有源滤波器工作在谐振点附近时,具有很高精细度(finesse)输出光线宽很窄,当偏离谐振点后精细度下降,输出光线宽变宽,所以实测谱线包络反映的是平均线宽,而在附加波动上体现出了窄线宽特征。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Jian, Ai Hezhi, Chen Zhihao *et al.*. An all-fiber compound ring laser and its use as a rotation sensor. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(7) 581 ~ 584 (in Chinese)
- 2 Qian Jingren, Chen Ming, Yu Benli. Active optical fiber ring resonator filters. *J. China University of Science and Technology* (中国科技大学学报), 2000, **30**(1) 69 ~ 72 (in Chinese)
- 3 T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16) 630 ~ 631
- 4 A. Guttner, H. Welling, K. H. Gericke *et al.*. Fine structure of the field autocorrelation function of a laser in the threshold region. *Phys. Rev. A*, 1978, **18**(3) 1157 ~ 1168
- 5 P. B. Gallion, G. Debarge. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(4) 343 ~ 349