

## 超短时延测量 DFB 激光器的动态线宽\*

安颖<sup>1)2)</sup> 杜振辉<sup>1)†</sup> 徐可欣<sup>1)</sup>

1) (天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

2) (河北联合大学信息工程学院, 唐山 063009)

(2013 年 3 月 27 日收到; 2013 年 5 月 27 日收到修改稿)

激光器调谐过程中的动态线宽是非常重要的参数, 然而, 当前各种测量方法得到的都是激光器稳定状态下的静态线宽. 本文提出一种对干涉拍信号进行基于局部均值分解的时频分析进而获取激光动态线宽的方法, 通过仿真信号验证了这种时频分析方法提取瞬时相位噪声的有效性; 构建实验系统, 利用 10 cm 路径差产生约 0.5 ns 的超短时延, 提取相位噪声的时频分布, 首次得到了分布反馈半导体激光器在脉冲工作模式下的动态线宽.

**关键词:** 超短时延, 动态线宽, 局部均值分解, 时频分布

**PACS:** 42.55.Px, 42.60.Fc, 42.62.Eh

**DOI:** 10.7498/aps.62.174208

## 1 引言

分布反馈 (distributed-feedback, DFB) 半导体激光器具有窄线宽、动态单模、波长可调谐等优异性能, 广泛应用于光通信、光传感和光测量等技术领域. 作为系统的核心器件, DFB 激光器调谐的动态特性, 尤其是动态线宽对可调谐激光吸收光谱分析 (TDLAS)、光频域反射测量 (OFDR) 等系统的整体性能有很大影响, 需要测量激光器的动态线宽特性. 然而, 目前的测量仪器及相关文献报道, 主要针对的是激光器稳态线宽的测量.

1980 年, Okoshi 等首次提出双光束外差法测量激光器的稳态线宽, 分辨率为 50 kHz<sup>[1]</sup>, 1986 年, Richter 等采用声光调制器对分光后的其中一路光移频 56 MHz, 然后分别用米、百米、千米数量级路径差做延时自外差, 测量了外腔激光器的线宽, 证明只有当延时时间大于 6 倍的激光相干时间时, 光电流强度的功率谱才能准确反映被测激光器的线宽<sup>[2]</sup>; Daeson 等在 1992 年改进了延时自外差干涉法, 选用路径差为 11 km, 测量了掺 Er 光纤激光

器线宽为 0.606 kHz, 测量分辨率进一步被提高<sup>[3]</sup>; 1998 年, Ludvigsen 等利用加入相位调制器的方法, 采用 20.4 m 短光纤测量了 DFB 激光器的线宽为 450 kHz<sup>[4]</sup>; 2000 年后, 由于认识到长光纤时延加大了测量线宽, 研究从不相干的光场向相干光场转化, 集中在激光器相位噪声的测量<sup>[5]</sup>、光纤延时线长度的讨论<sup>[6]</sup>、改进测量光路<sup>[7]</sup>、 $1/f$  噪声对线宽的扩宽<sup>[8]</sup>、激光器频率噪声对激光器线型的影响<sup>[9]</sup>、利用频率噪声功率谱测量线宽<sup>[10,11]</sup>等方面, 但是, 最短光纤延时线长度仍为 1 m, 同时, 信号处理方法仍然采用全局傅里叶变换, 因此得到的均是激光器的稳态线宽, 本课题组为了获得 DFB 激光器电流调谐过程的动态线宽, 采用步进电流测试了激光器线宽与调谐电流的关系<sup>[12]</sup>, 但是激光器仍然是稳态工作模式, 受信号处理方法的限制, 得到的是在某一时段的动态线宽.

延时光纤的长度是线宽测量中非常重要的参数. 采用非相干光场进行测量时, 要求延时时间远大于激光相干时间, 激光线宽在 kHz 量级所需要的光纤长度为几到几十 km, 过大的光纤损耗使得信号平衡困难, 更为严重的是瑞利散射、多次折射以

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60938002)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2012YQ06016501) 和河北省自然科学基金项目 (批准号: F2013209331) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: duzhenhui@tju.edu.cn

及  $1/f$  噪声都叠加到差拍信号, 产生一个低频调制导致测量误差加大<sup>[7]</sup>; 而采用相干光测量时, 光纤延时线的长度与差拍信号检测到的相位噪声起伏成正比, 短路径差产生的相位噪声起伏小, 增大了对差拍信号处理时的难度.

希尔伯特黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT)<sup>[13]</sup> 和局部均值分解 (local mean decomposition, LMD)<sup>[14]</sup> 是近年来活跃在时频分析领域里的一种新方法, 可以对复杂信号进行分解, 针对微弱信号也有非凡的表现, 为通过短路径差测量动态线宽提供了一个可行的方法. 本文利用 10 cm 超短光纤延时线搭建了可调谐的相干光外差测量系统, 同时采用了局部均值分解方法对差拍信号的相位噪声谱进行了时频分析, 首次得到了线宽的动态变化特征, 对 DFB 激光器的使用具有很强的指导意义.

## 2 相干光法测量动态线宽的原理

光外差法得到的差拍信号, 相位噪声和频率噪声与激光器输出信号的线宽有着直接的联系, 因此, 可以用来确定激光器的线宽<sup>[10,11]</sup>, 此时要求两光束信号属于相干信号, 应采用短时延进行测量.

半导体激光器输出的瞬时光脉冲, 其光场强度的时域特性可以用下式来表示:

$$E(t) = E_0(1 + \alpha(t))\text{Re}\{\exp[-j(\omega_0 t + \varphi(t))]\}, \quad (1)$$

其中,  $\omega_0$  是激光器输出瞬间角频率的中心值;  $E_0$  为光场强度的稳定数值;  $\alpha(t)$  表示光场强度的随机波动, 反映激光器强度噪声的大小. 通常  $\alpha(t) \ll 1$ , 在激光器线宽测量中, 强度噪声往往忽略不计;  $(\omega_0 t + \varphi(t))$  表示激光器输出光脉冲的瞬间相位,  $\varphi(t)$  是随机相位波动, 是一个均值为零的 Gaussian 随机过程, 正是这一相位波动使激光器输出的瞬间频率不再是一个固定数值, 而是具有了一个随机带宽, 这个随机带宽的大小可以用线宽来度量.

激光器输出光场的频域特性, 可以利用光场强度的自相关函数通过 Wiener-Khinchine 定理得到.

光场强度的自相关函数为

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \langle E(t)E^*(t - \tau) \rangle \\ &= E_0^2 \cos(\omega_0 \tau) \text{Re}\langle \exp[-j\Delta\varphi(t, \tau)] \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

式中角括号表示数学期望值, 而  $\Delta\varphi(t, \tau) = \varphi(t) - \varphi(t - \tau)$  表示不同时刻噪声的关联性, 可以理解

为时间  $\tau$  内的相位噪声改变量, 也是均值为零的 Gaussian 随机过程, 因此有式成立:

$$\langle \exp[-j(\Delta\varphi(t, \tau))] \rangle = \exp\langle -\Delta\varphi^2(t, \tau)/2 \rangle, \quad (3)$$

其中,  $\langle \Delta\varphi^2(t, \tau) \rangle$  是相位噪声改变量的方差, 当时延  $\tau$  足够小时,  $\varphi(t)$  与  $\varphi(t - \tau)$  完全相干,  $\langle \Delta\varphi^2(t, \tau) \rangle = 2\pi\Delta f\tau$ ,  $\Delta f$  是激光器输出光信号功率谱的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM), 称为激光器的线宽, 定义  $\tau_c = 1/\pi\Delta f$  为激光器输出光信号的相干时间, 则光场强度的自相关函数为

$$\begin{aligned} R_E(\tau) &= E_0^2 \cos(\omega_0 \tau) \exp(-\pi\Delta f\tau) \\ &= E_0^2 \cos(\omega_0 \tau) \exp(-\tau/\tau_c). \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式的傅里叶变换, 即为光场的激光谱, 描述了光强度功率的频域特性<sup>[15]</sup>, 表示为

$$G_E(f) = \frac{2E_0^2}{\pi\Delta f} \frac{1}{1 + \left(\frac{f - f_0}{\Delta f/2}\right)^2}. \quad (5)$$

(5) 式称为光场强度的 Lorentzian 线型,  $f_0 = \omega_0/2\pi$  为光脉冲的中心频率. 由 (2) 式可知,  $\langle \exp[-j(\Delta\varphi(t, \tau))] \rangle$  是决定线宽的关键量.

在光外差测量系统中, 两光纤臂的光场强度信号分别为

$$E(t) = E \text{Re}\{\exp[-j(\omega_1 t + \varphi(t))]\}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E(t - \tau_d) &= E \text{Re}\{\exp[-j(\omega_2(t - \tau_d) \\ &+ \varphi(t - \tau_d))]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

为了简化计算, 忽略两束激光中心角频率的抖动, 取  $\omega_1, \omega_2$  分别为两束光发生干涉时刻的中心角频率. 经光电探测器接收并经中频放大后, 差拍电流方程如下:

$$\begin{aligned} i(t) &= R_i E^2 \cos(\omega_2 \tau_d) \text{Re}\{\exp[-j\Delta\varphi(t, \tau_d) \\ &- j\omega_b t]\}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $R_i$  是探测器的响应度,  $\omega_b = \omega_1 - \omega_2$  是差拍频率,  $\Delta\varphi(t, \tau_d) = \varphi(t) - \varphi(t - \tau_d)$ , 为差拍信号的相位起伏噪声, 当  $\tau_d$  非常小以致两束激光是完全相干的信号时, 差拍信号的相位噪声近似等于激光器输出信号的相位噪声抖动  $\Delta\varphi(t, \tau)$ , 通过 (2) 和 (5) 式可以得到光场功率谱, 确定激光器的线宽. 此时,  $\tau_d$  的数值应该足够小, 但是相位起伏噪声与时延成正比, 时延很小时, 相位起伏噪声也很小, 势必加大信号处理的难度.

### 3 基于局部均值分解的动态线宽测量

#### 3.1 时频分析法确定动态线宽的原理

(5) 式表示的是光场的激射谱, 光脉冲震荡的中心频率为  $f_0$ ,  $\Delta f$  为线宽, 也就是说, 每一个时刻, 光场的频率不是唯一固定的数值, 因此, 激光器输出的光信号是一个多分量的非平稳随机信号, 而信号的功率谱密度当且仅当信号是广义的平稳随机过程时才存在<sup>[16]</sup>. 从上面传统的外差法测量中可以看到, 在求取线宽的过程中, 信号从时间域变换到频率域, 都被当成平稳信号而应用了傅里叶变换, 不但产生很大的误差, 而且这种全局变换的必然结果是失去时间信息, 动态线宽是无法得到的.

非平稳信号的自相关函数及其傅里叶变换都是时间的函数, 可以使用时频分析的方法来估计时变的功率谱密度<sup>[17]</sup>, 对光场或差拍信号进行时频分析即可得到线宽的动态时频分布情况.

将激光器的输出信号在时频域上表示为  $E(f, t)$ , 有

$$E(f, t) = E_0(1 + \alpha(f, t))\text{Re}\{\exp[-j(\omega_0 t + \varphi(f, t))]\}, \quad (9)$$

式中,  $\alpha(f, t)$  和  $\omega_0$  的随机抖动忽略不计, 当时延  $\tau$  趋近于零时, 激光器输出信号的能量可以用其二阶矩来描述:

$$R(f, t) = \langle E(f, t)E^*(f, t - \tau) \rangle = E_0^2 \cos(\omega_0 \tau) \langle \cos[\Delta\varphi(f, t, \tau)] \rangle. \quad (10)$$

由时频分布的边缘特性可知, (10) 式沿频率轴的积分表示时间域的能量, 而沿时间轴的积分表示频域上的能量, 因此时变功率谱密度函数可以通过下式来计算:

$$G_t(f) = \frac{1}{t} \int_0^t R(f, t) dt. \quad (11)$$

同时基于时频分布的差拍电流方程如下:

$$i(f, t) = R_i E^2 \cos(\omega_2 \tau_d) \cos[\Delta\varphi(f, t, \tau_d) + \omega_b(f, t)t], \quad (12)$$

其中,  $\omega_b(f, t)$  没有相位起伏噪声的激光脉冲生成的纯差拍信号角频率的时频分布,

$$\Delta\varphi(f, t, \tau_d) = \varphi(f, t) - \varphi(f, t - \tau_d)$$

是时延  $\tau_d$  下差拍信号的相位噪声起伏的时频分布. 在超短的路径差 10 cm 下, 产生的时延  $\tau_d = 0.5$  ns, 此时两光纤臂输出的信号为完全相干信号, 由此得到的  $\Delta\varphi(f, t, \tau_d)$  可以近似代替  $\Delta\varphi(f, t, \tau)$ , 再利用 (10) 和 (11) 式, 即可得到 DFB 激光器输出信号功率的时频分布, 在每一个时刻信号功率谱密度函数的 FWHM 即为那个时刻的线宽, 从而可以获知激光器的动态线宽.

#### 3.2 局部均值分解下的相位时频分布

1998 年, Huang 提出了 HHT 方法<sup>[13]</sup>, 2005 年, Smith 在 HHT 基础上提出 LMD 方法<sup>[14]</sup>. LMD 方法的核心是将多分量信号分解成一系列调幅调频信号, 从而每一个调幅调频信号都是一个单分量信号, 使频率具有清晰的物理意义. 它具有 HHT 的优点, 诸如无须选用基函数, 可以实现信号的自适应分解, 同时, 端点效应、模态混叠现象要少于 HHT. 近年来, 在故障诊断、生物医学处理等领域有着良好的应用, 但是在光学外差信号处理领域的应用未见报道.

将接收到的差拍信号进行局部均值分解, 分解出的乘积函数的个数为  $N$  时, 由得到的瞬时幅值  $a_i$  和瞬时频率  $f_i$  可以得到差拍信号的时频分布为

$$H(f, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\pi f_i t). \quad (13)$$

由于分解出的乘积函数满足完备性和局部正交性, 则差拍信号局部相位的时频分布为

$$\Phi(f, t) = \arctan \left( \frac{\sum a_i \cos(2\pi f_i t)}{\sum a_i \sin(2\pi f_i t)} \right). \quad (14)$$

由 (12) 式知, 差拍信号的相位中包含纯差拍信号的相位信息, 因此将分解后的信号除去纯差拍信号后的几个乘积函数按 (14) 式计算出  $\Phi(f, t)$ , 即可得到近似的  $\Delta\varphi(f, t, \tau)$ .

#### 3.3 数据仿真验证

为了验证局部均值分解下测量动态线宽原理的正确性, 进行了数据仿真验证. 首先通过对恒定相位的模拟信号进行局部均值分解, 验证相位时频分布的准确性; 其次采用非恒定相位信号的分解, 验证相位噪声时频谱对相位的分离和相位变化的

敏感性;最后通过对已知线宽的信号做差拍,将利用 LMD 分解并用 (10) 和 (11) 式得到的线宽与已知线宽作比较,验证算法的正确性及精度.

### 3.3.1 恒定相位信号仿真

模拟的信号表达式为  $y(t) = 0.5\cos(2\pi f_1 t)$ ,  $f_1 = 10^5$  Hz, 相位的时频分布应是频率为  $10^5$  Hz 的全局分布. 图 1 为信号的波形及其 LMD 分解, 首尾都没有进行端点处理, LMD 分解后的乘积函数只有一个, 在信号尾部出现了端点效应. 图 2 是利用分解后的信号依据 (14) 式得到的相位功率时频谱, 图中可以看出, 频率逐渐向  $10^5$  Hz 趋近, 到 0.01 ms 时达到稳定, 由于数据截断在前端出现了频谱泄露. 加大数据长度、对端点进行处理会使相位功率时频谱的精度更进一步提高.

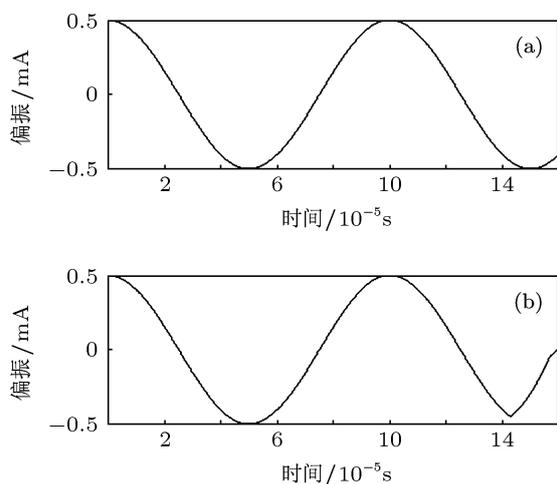


图 1 恒定相位信号及其分解

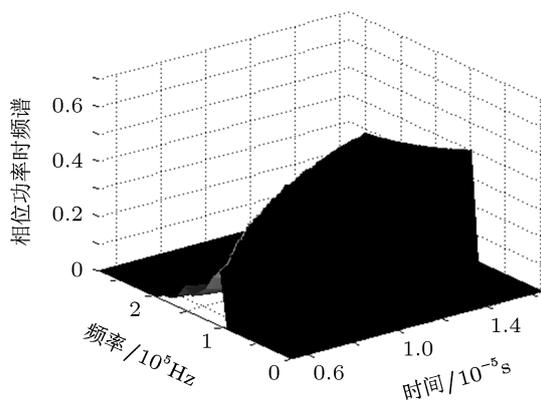


图 2 恒定相位信号的相位功率时频分布

### 3.3.2 非恒定相位信号仿真

仿真信号表达式为  $y(t) = 0.5\cos(2\pi f_1 + 2\pi a t)t$ ,  $f_1 = 10^7$  Hz,  $a = 5 \times 10^7$  Hz/s, 信号的采样率为

$6.25 \times 10^7$  Hz, 相位的时频分布应是频率为  $10^7$  Hz 的全局分布, 加上一个变化的频率, 范围在 160—810 Hz. 信号经 LMD 分解后共有 6 个乘积函数, 图 3 为仿真信号及其 LMD 分解后的前 4 个乘积函数, 图 4 为其相位功率时频谱, 图中可以看出, 相位分布为明显的两部分, 稳定的部分在  $10^7$  Hz 处, 数值的波动在 kHz 以内, 变化的部分由于频率轴单位为  $10^4$  Hz, 所以显示在频率轴的第二个单元里.

### 3.3.3 差拍信号仿真

差拍信号的仿真分为恒定差拍频率与变化差拍频率两种情况, 依据 (8) 式, 差拍信号可以模拟为  $y(t) = 0.5\cos(2\pi f(t)t + \Delta\phi(t))$ , 其中差拍频率  $f(t)$  取  $10^5$  和  $10^5 + 10^{10}t$ ,  $\Delta\phi(t)$  是零均值, 方差为  $2\pi\Delta f\tau$  的高斯白噪声, 其中时延  $\tau = 0.5$  ns,  $\Delta f$  为线宽, 分别为 500 kHz, 800 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz 和 10 MHz. 依据 3.2 节的分析, 纯差拍信号要提取出来, 因此改进了 LMD 算法, 先提取主模态, 然后将剩余信号分别进行了分解, 分解的乘积函数为 5 或 6 个.

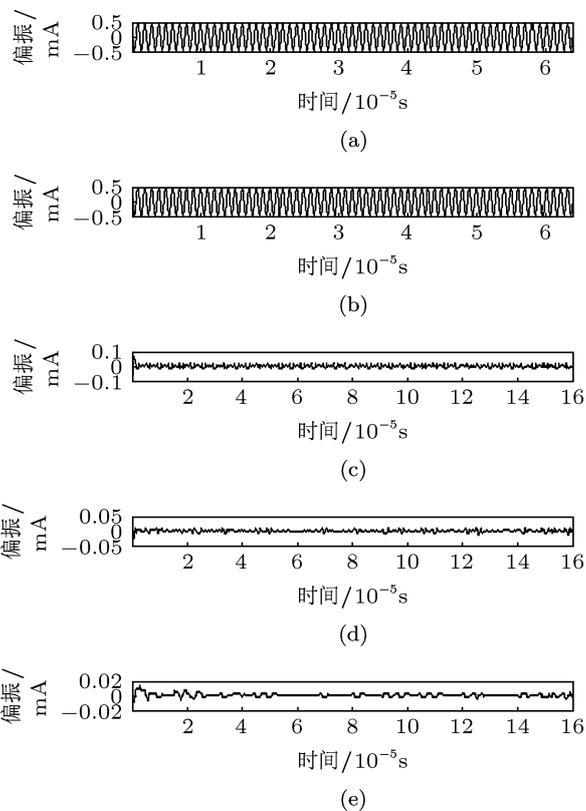


图 3 非恒定相位信号及其分解

图 5 和图 6 是恒定差频和变化差频在 10MHz 线宽下的差拍信号、主模态函数及其前三个分

解信号. 利用这些分解信号求得相位噪声起伏  $\Delta\varphi(f, t, \tau_d)$ , 而后依据式 (10) 和 (11) 确定的光场功率的时频分布如图 7 所示. 由于纯差拍信号的相位不参与矢量叠加, 故差频变化与否不影响光场功率的时频分布情况.

图 8 是不同线宽时, 通过算法确定的线宽. 表 1 为仿真信号的线宽与计算线宽的比较.

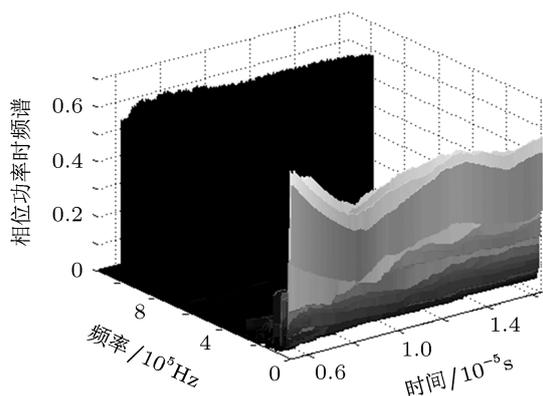


图 4 非恒定相位信号的相位功率时频分布

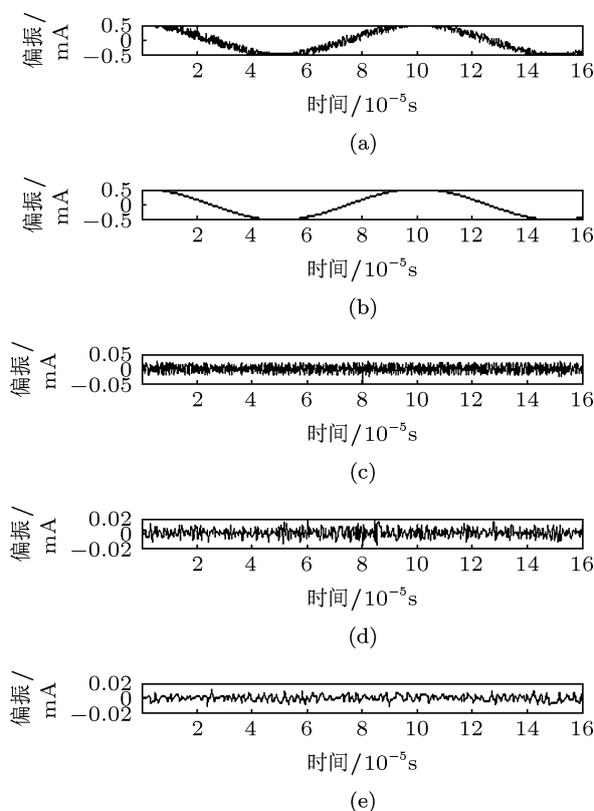


图 5 恒定拍频的差拍信号及其分解

由表 1 可知, 在线宽较窄时, 相位噪声比较小, 导致相对误差增大.

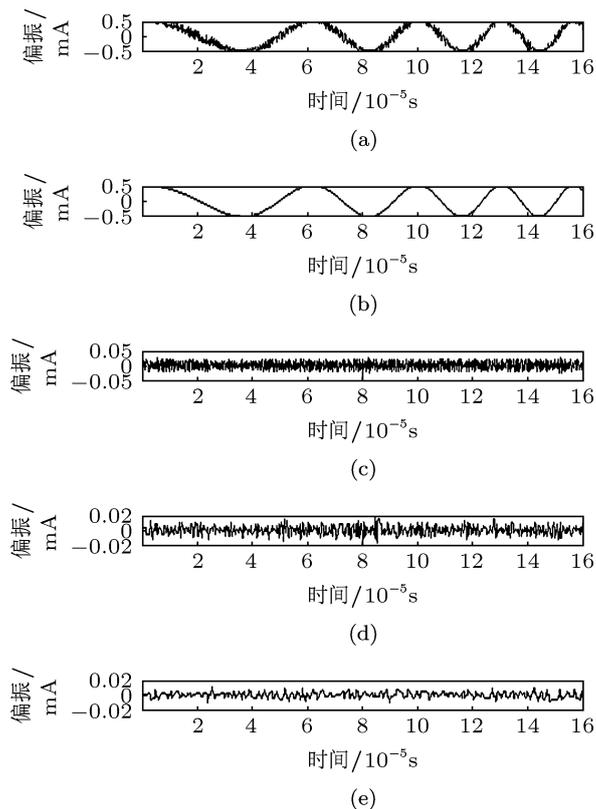


图 6 非恒定拍频的差拍信号及其分解

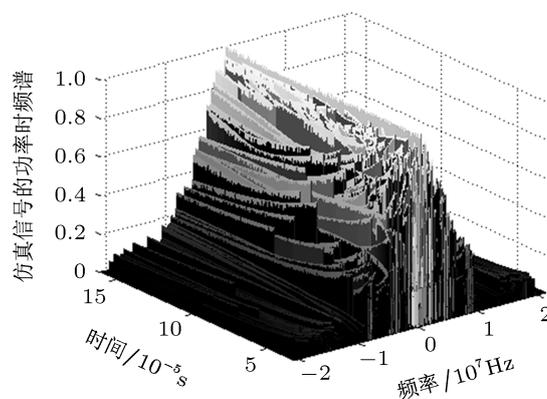


图 7 模拟信号的幅度功率时频分布

## 4 实验结果

实验采用基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的可调谐自外差测量系统, 如图 9 所示.

采用 FITEL 公司的 DFB 半导体激光器, 型号为 FOL15DDRO-A31-18735, 中心波长为 1600 nm. 信号发生器对偏置电流为 0 mA、工作温度为 25.9 °C 的激光驱动器 LDC3908 加以 50 mA 的脉冲信号, 脉冲周期为 100 ms, 脉宽为 5 ms.

DFB 激光器的输出光经过分光比为 50:50 的光纤耦合器后一分为二, 两束光分别经过长臂与短臂光纤, 两臂光纤长度差为 10 cm, 在分光比为 50:50 的耦合器 B 中发生干涉, 产生的差拍信号经带宽为 150 MHz 的光电探测器接收, 经中频放大、A/D 转换后进行信号处理.

采集数据的时间为 2 ms, 对接收到的差拍信号进行了预处理, 去掉了前 0.2 ms 的数据, 从而保留了完整的差拍周期. 处理后的差拍信号、经 LMD 分解后的主函数以及直流分量如图 10 所示, 图 11 为分解得到的其余 5 个调幅调频分量.

利用这些乘积函数可以求得不同时刻的相位噪声功率谱, 图 12 中从上到下依次是 0.88 ms, 1.4 ms, 2 ms 时刻的相位噪声功率谱图, 整体上说, 相位噪声谱在不同时刻具有相似的形状, 频率小于

800 kHz 时, 功率呈下降趋势, 数值大于 -50 dB; 随后, 功率不随频率增大继续下降, 在图示的 3 个时刻, 分别保持在 -50 dB, -60 dB 及 -70 dB 左右.

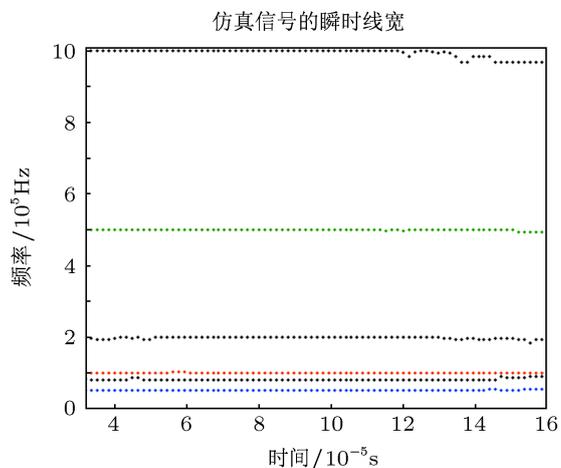


图 8 动态线宽

表 1 仿真线宽与计算线宽比较

仿真线宽/MHz	0.5	0.8	1	2	5	10
计算线宽/MHz	0.5—0.54	0.78—0.88	0.96—1.04	1.92—2	4.96—5	9.85—10
相对误差/%	8	10	4	4	0.8	1.5

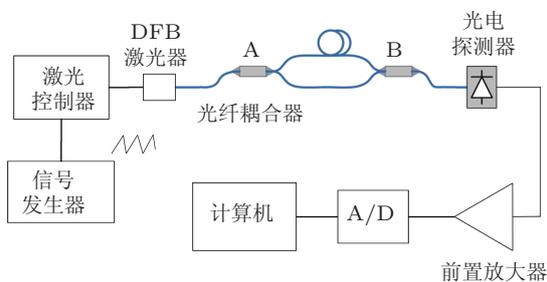


图 9 基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的自外差测量系统

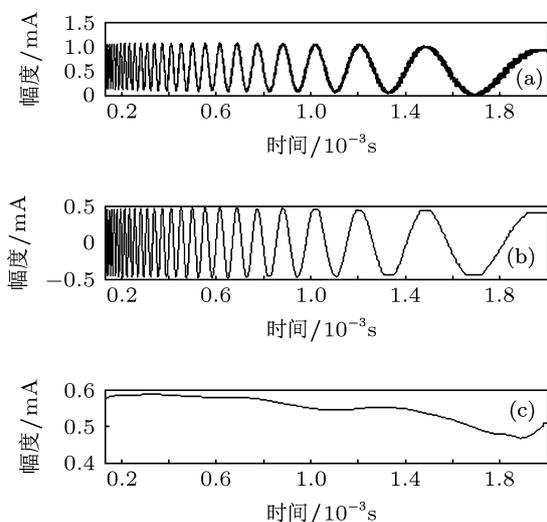


图 10 差拍信号、主函数、剩余函数

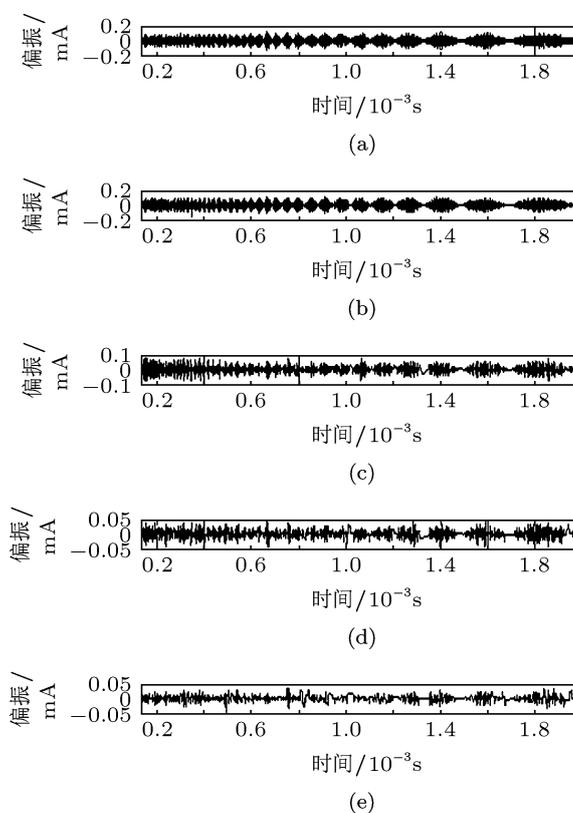


图 11 分解的乘积函数

利用 (11) 式得到的 DFB 激光器输出功率的

归一化时频分布如图 13 所示. 可以看到每个时刻, DFB 激光器输出的信号均占据一个频带, 不是简单的脉冲信号. 图 14 是在 0.88 ms, 1.4 ms 和 2 ms 时刻用 Lorentz 线型拟合瞬间归一化功率谱的曲线, 图中实线为 Lorentz 线型, 点线为实际数值, 3 个时刻的线宽分别为 1.462 MHz, 1.422 MHz, 1.422 MHz.

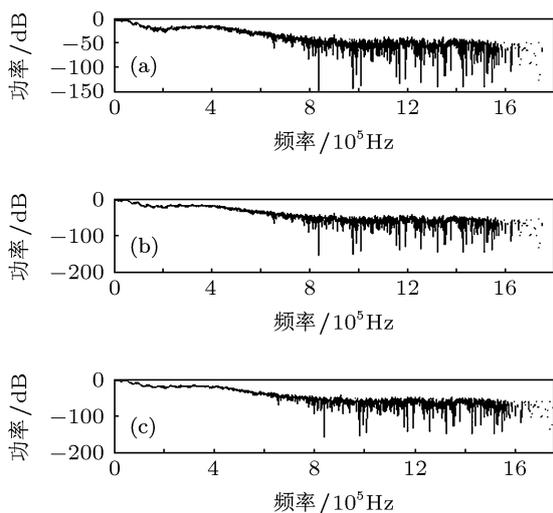


图 12 不同时刻的噪声功率谱

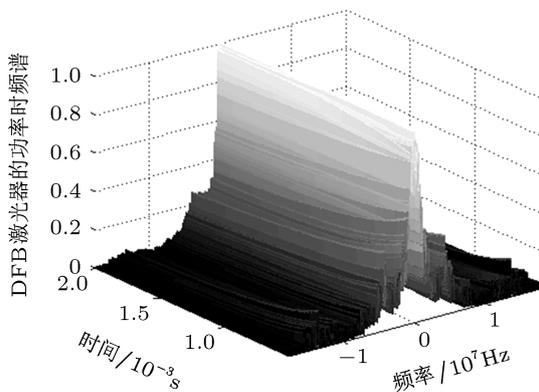


图 13 DFB 激光器的幅度功率时频分布

对 0.5 ms 至 2 ms 的全部光强度功率谱在每一时刻进行 Lorentz 拟合, 拟合后得到的线宽范围为 1.4088 到 1.5966 MHz, 图 15 为拟合的时频场. 图 16 显示了 DFB 激光器加以 50 mA 脉冲信号时, 0.5 ms 至 2 ms 内线宽的动态变化, 线宽呈下降趋势并出现了跳变, 可能是由于激光器的热效应, 我们暂时还未能得到合理的解释, 会针对这一问题继续进行研究.

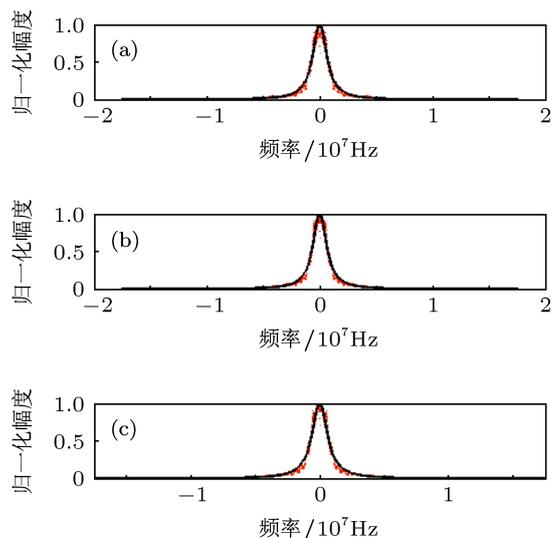


图 14 不同时刻的幅度功率谱

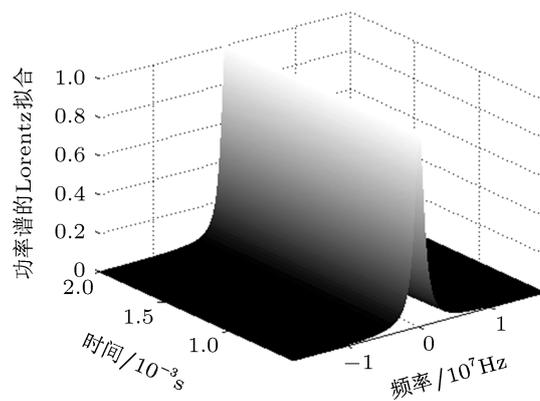


图 15 Lorentz 拟合下幅度功率的时频分布

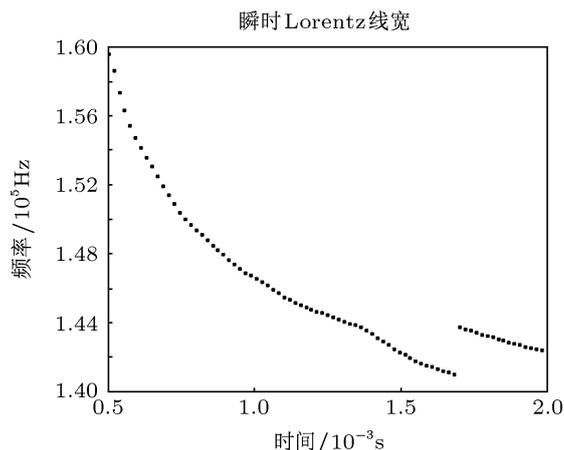


图 16 DFB 激光器的动态线宽

## 5 结论

DFB 激光器的动态线宽是在使用过程中极为重要的参数, 很长时间以来, 一直以稳态线宽来替代激光器在调谐过程当中的动态变化, 不能客观表

征激光器动态工作过程的线宽特征. 利用 LMD 分解方法, 将激光器输出的非平稳信号分解成单分量信号, 不但使信号每一个时刻的频率更有意义, 同时, 可以得到信号的幅度和相位的时频分布情况, 更多更好地利用了差拍信号的信息, 同时避免了傅里叶变换带来的误差.

我们得到了 DFB 激光器加脉冲信号时的线宽

分布情况, 验证了超短光纤时延进行线宽测量的可行性, 若将激光器进行调谐, 将可以得到更多的线宽动态变化信息, 这是下一步将要进行的工作, 同时将进一步研究光纤延时线对线宽测量的影响. 总之, 将局部均值分解方法应用在光学外差系统, 开创了一个外差信号处理的新局面, 必然会有更广阔的应用前景.

- 
- [1] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A 1980 *Electron. Lett.* **16** 630
- [2] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 2070
- [3] Daeson J W, Namkyoo P, Kerry J V 1992 *IEEE Photon. Technol.* **4** 1063
- [4] Ludvigsen H, Tossavainen M, Kaivola M 1998 *Opt. Commun.* **155** 180
- [5] Turner L D, Weber K P, Hawthorn C J, Scholten R E 2002 *Opt. Commun.* **201** 391
- [6] Han M, Wang A 2005 *Appl. Phys. B* **81** 53
- [7] Camatel S, Ferrero V 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 3048
- [8] Zhou W, Chong K M, Guo H 2008 *Phys. Lett. A* **372** 4327
- [9] Domenico G D, Schilt S, Thomann P 2010 *Appl. Opt.* **49** 4801
- [10] Bartalini S, Borri S, Galli I, Giusfredi G, Mazzotti D, Edamura T 2011 *Opt. Express* **19** 17996
- [11] Kikuchi K 2012 *Opt. Express.* **20** 5291
- [12] Liu J W, Du Z H, Qi R B, Xu K X 2012 *Nanotechnol. Precision Eng.* **10** 332 (in Chinese) [刘景旺, 杜振辉, 齐汝宾, 徐可欣 2012 纳米技术与精密工程 **10** 332]
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R 1998 *Proceedings of Royal Society A* **454** 903
- [14] Smith J S 2005 *J. R. Soc. Interface* **2** 443
- [15] Henry C H 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 259
- [16] Wang H Y, Qiu T S, Chen Z 2008 *Nonstationary Random Signal Analysis and Processing* (Second Edition) (Bei Jing: National Defense Industry Press) p5 (in Chinese) [王宏禹, 邱天爽, 陈喆 2008 非平稳随机信号分析与处理 (第 2 版) (北京: 国防工业出版社) 第 5 页]
- [17] Zhang X D 2002 *Modern Signal Processing (Second Edition)* (Bei Jing: Thinghua University Press) p350 (in Chinese) [张贤达 2002 现代信号处理 (第 2 版) (北京: 清华大学出版社) 第 350 页]

# The instantaneous linewidth measurement of DFB laser with ultrashort delay\*

An Ying<sup>1)2)</sup> Du Zhen-Hui<sup>1)†</sup> Xu Ke-Xin<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (College of Information Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

(Received 27 March 2013; revised manuscript received 27 May 2013)

## Abstract

The instantaneous linewidth in the process of tuning is a very important parameter of laser, however only static linewidth in steady state could be obtained by all kinds of measurement at present. So we proposed a method of measuring instantaneous linewidth by time-frequency analysis based on local mean decomposition, and after its validity of extracting the instantaneous phase noise of simulation signal was proved, we set the heterodyne measurement system with ultrashort delay (about 0.5 ns) which came from 10 cm optical path difference. Finally, we not only extracted the time-frequency spectrum of the beat signal's phase noise power, but also obtained the instantaneous linewidth of distributed-feedback diode laser under the pulse current for the first time so far as we know.

**Keywords:** ultrashort delay, instantaneous linewidth, local mean decomposition, time-frequency spectrum

**PACS:** 42.55.Px, 42.60.Fc, 42.62.Eh

**DOI:** 10.7498/aps.62.174208

---

\* Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 60938002), the Special-funded Program on National Key Scientific Instruments and Equipment Development of China (Grant No. 2012YQ06016501), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2013209331).

† Corresponding author. E-mail: duzhenhui@tju.edu.cn