

基于延时自零差光相干接收机的激光器相位噪声测试系统

赵振阳, 张 鹏, 佟首峰

(长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘 要: 在相干光通信系统中, 激光器相位噪声是影响接收机灵敏度的重要因素。针对相干光通信中的激光光源相位噪声测试提出并研究了表征激光器相位噪声的 3 个关键指标, 分别是电场的功率谱密度、相位误差方差和 FM 噪声谱线, 建立了基于延时自零差相干接收技术的窄线宽激光器相位噪声测试系统, 实现了系统仿真, 并对一窄线宽激光器进行了相位噪声测试, 相比传统的自外差线宽测量技术, 此方法在满足测试分辨率要求的同时能够更全面表征激光器相位噪声特性。

关键词: 延时自零差法; 相位噪声测量; 相干通信; DSP

中图分类号: TN29; TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3211-05

Delayed self-homodyne phase noise measurement system with optical coherent receiver

Zhao Zhenyang, Zhang Peng, Tong Shoufeng

(Institute of Space Photo-Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In coherent optical communication system, the phase noise of laser sources has been identified as a crucial characteristic that affects the receiver sensitivity of optical communication terminal. To characterize the laser sources phase noise of coherent optical communication system, three critical parameters which contained the field spectrum, phase-error variance and FM-noise spectrum were proposed for noise test in this paper. A delayed self-homodyne phase noise measurement system with optical coherent receiver was established and the optical communication system simulation had been achieved at the same time. The phase noise tests based on delayed self-homodyne phase noise measurement system which were used to evaluate the quality of coherent optical communication system had been performed on a narrow line-width semiconductor laser. Compared with traditional self-heterodyne narrow line-width measurement, this method can fully characterize the laser phase noise and achieve the requirement of resolution.

Key words: delay self-homodyne method; phase noise measurement; coherent communications; DSP

收稿日期: 2015-07-07; 修订日期: 2015-08-10

作者简介: 赵振阳(1989-), 男, 硕士生, 主要从事现代测试计量技术与质量控制方面的研究。Email: zzynsd7027@163.com

导师简介: 佟首峰(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者, 主要从事空间激光通信方面的研究。Email: tsf1998@sina.com

0 引言

随着数字相干接收机的不断发展，在偏振和波分复用系统中由于光谱效率的传输特性，多级调制形式引起广泛关注^[1-4]。在这些系统中，传输激光器和本振激光器的相位噪声特性极大地影响传输系统误码率性能^[5]。通常关注的激光器 3-dB 光谱宽度并不能完全描述激光器相位噪声^[6-7]。现如今各种基于外差宽测量方法对于激光器相位噪声的测试存在着分辨率限制和表征参数单一缺乏可靠性^[8-12]。文中通过理论推导和深入分析表征相位噪声的 3 个参数，电场的功率谱密度、相位误差方差和 FM 噪声谱，设计

了一个全光纤搭建的基于延时自零差相干接收技术的激光器相位噪声测试系统，进行一系列软件模拟并对 TeraXion 公司的窄线宽激光器进行了测试。测试结果表明文中系统能全面分析激光器相位噪声特性，其 DSP 处理部分相比传统光谱仪分析降低了测试成本，测得的 3 个参数能为相干光通信系统评估提供可靠的理论依据。

1 理论模型

此部分分析了基于延时自零差相干接收相位噪声测试系统的理论基础，测试系统框图如图 1 所示。

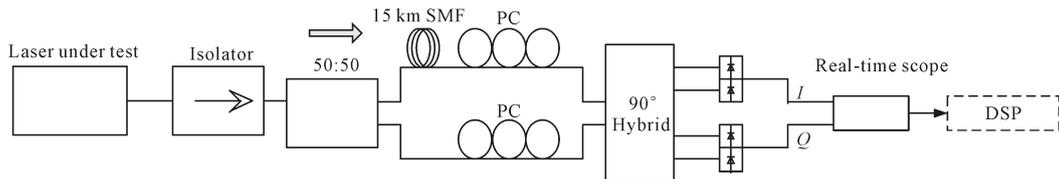


图 1 延迟自零差相干接收相位噪声测试系统

Fig.1 Delayed self-homodyne phase noise measurement system with optical coherent receiver

单模激光器输出的电场为：

$$E(t) = P_0 + \Delta P(t) \times e^{j[\omega_0 t + \Phi_n(t)]} \quad (1)$$

图 2 为带有 90° 混频器的延迟自零差相位噪声测试图。

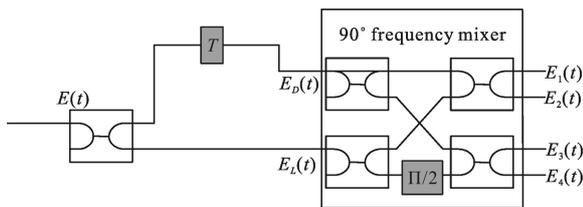


图 2 带有 90° 混频器的延迟自零差相位噪声测试方法

Fig.2 Delayed self-homodyne method for phase noise measurement with 90° frequency mixer

输入到 90° 混频器的电场为：

$$\begin{bmatrix} E_p(t) \\ E_L(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \gamma E(t) \times e^{-j[\omega_0 T + \Phi_n(t) - \Phi_n(t-T)]} \\ jE(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

90° 混频器的电场传输矩阵为：

$$\begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ E_3(t) \\ E_4(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p(t) \\ E_L(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

平衡探测器输出电流为：

$$I_Q(t) = \frac{\gamma \mathcal{R}[P_0 + \Delta p(t)]}{2} \sin[\Delta \Phi_n(t) + \omega_0 T] \quad (4)$$

$$I_I(t) = \frac{\gamma \mathcal{R}[P_0 + \Delta p(t)]}{2} \cos[\Delta \Phi_n(t) + \omega_0 T] \quad (5)$$

相位噪声会在信号光和本振光之间产生相位误差抖动。相位噪声包括白噪声 (white noise)、闪烁噪声 (flicker noise)、随机漂移噪声 (random walk noise)。

激光器的 FM 噪声谱的 PSD 为：

$$S_f(f) = S_0 + \frac{K_1}{f} + \frac{K_2}{f^2} = S_0 + \left[1 + \frac{f_1}{f} + \left(\frac{f_2}{f} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中： S_0 为白频率噪声的 PSD； f_1 为附加闪烁噪声的拐角频率； f_2 为随机漂移 $1/f^2$ 调频噪声。

激光器的测量相位误差方差为：

$$\sigma_\phi^2(\tau) = 4 \int_{-f_L}^{f_U} S_f(f) = \frac{\sin 2(\pi f \tau)}{f^2} df \quad (7)$$

通过计算白噪声、闪烁噪声和 FN 噪声各自的积分，得到相位误差方差的分析公式。

$$\sigma_\phi^2(\tau) = 2\pi \Delta v \left[1 + [1.5 + C_1(2\pi f_1 \tau) - C_1(2f_1 \tau)](2\pi f_L \tau) + \left(\frac{f_2}{f_L} \right) (2f_2 \tau) - \frac{2}{3} (\pi f_2 \tau)^2 \right] \quad (8)$$

因而，公式 (4)、(5) 即为延迟自零差法得到的差分相位误差的 I 分量和 Q 分量，通过对采集到的 I/Q

数据进行计算分析就能够得到前面提到的表征相位噪声的 3 个参数,分别是电场的功率谱密度、相位误差方差和 FM 噪声谱线,从而进行激光器相位噪声总体评估。

图 1 测试系统中的 DSP 过程是通过软件实现的,其详细的 DSP 处理过程和算法实现如图 3 所示。表 1 是 DSP 算法中的相关公式,此过程实现了将平衡探测器采集的时域信息进行进一步处理,计算出表征激光相位噪声 3 个参数的曲线。

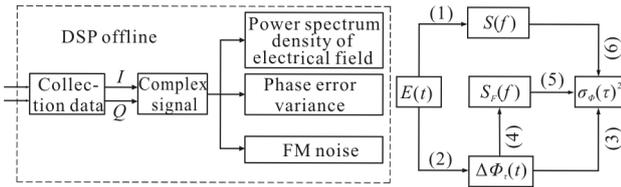


图 3 DSP 处理过程及其算法实现

Fig.3 DSP processing and algorithm

表 1 DSP 算法中的公式

Tab.1 Formula in DSP algorithm

Equation	Eq. number
$S(f)=\langle \xi[E(t)] ^2 \rangle$	(1)
$\Delta\phi_r(t)=\phi_r(t)-\phi_r(t-\tau)$	(2)
$\sigma_\phi(\tau)^2=\langle \Delta\phi_r(t)^2 \rangle$	(3)
$S_{\Delta\phi_r}(f)=4\left(\frac{\sin(\pi f\tau)}{f}\right)^2 S_F(f)$	(4)
$\sigma_\phi(\tau)^2=4\int_0^\infty\left(\frac{\sin(\pi f\tau)}{f}\right)^2 S_F(f)df$	(5)
$S(f)=\xi\left[\exp\left(-\frac{\sigma_\phi(\tau)^2}{2}\right)\right]$	(6)

其中, $E(t)$ 为复振幅; $\Delta\phi_r(t)$ 为相位差异; $S(f)$ 为场谱; $S_F(f)$ 为 FM 噪声谱; $\sigma_\phi(\tau)^2$ 为相位误差方差; $\xi[*]$ 为傅里叶变换; $\langle * \rangle$ 为全体的均值。

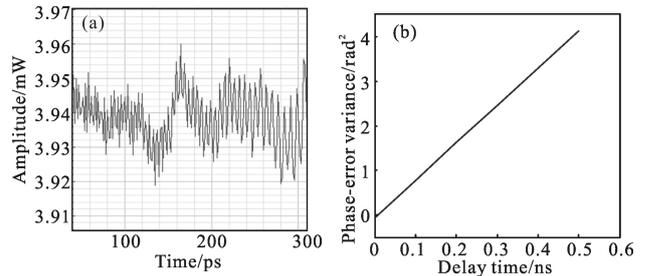
2 仿真

通过 OptiSystem 软件对延迟自零差相干接收相位噪声测试系统进行仿真来验证理论模型。仿真系统中使用的是连续激光器,初始功率 80 mW,其相位噪声完全由随机漂移过程描述,相位方差为:

$$\sigma_\phi(\tau_s)=2\pi\Delta\nu\tau_s \quad (9)$$

式中: $\Delta\nu$ 为仿真激光器的模拟线宽(初始值设为 65 K); τ_s 为采样时间,文中仿真采样时间是 0.5 ns。通过此仿真得到的差分时域信号分布、相位误差方差和 FM 噪声谱分布如图 4 所示。从仿真曲线可以看出相位

误差方差随时间间隔 τ_i 线性递增,通过线性拟合曲线的斜率能够算出激光器线宽为 67 K(初始线宽设为 65 K)。从 FM 噪声谱线的白频区域计算得到的线宽值为 63 K。上面的仿真结果证实了前面提出的基于延时自零差相位噪声描述方法的理论可行性。

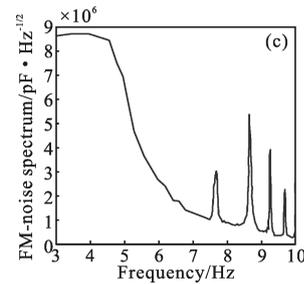


(a) 示波器差分信号时域曲线

(b) 相位误差方差

(a) Differential trajectory from oscilloscope

(b) Phase-error variance



(c) FM 噪声谱线

(c) FM-noise spectrum

图 4 仿真结果

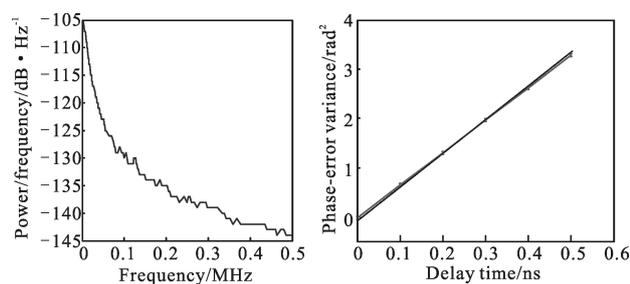
Fig.4 Simulation results

3 实验和结果

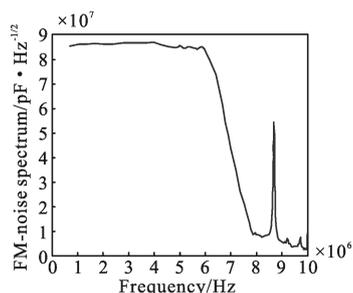
基于延迟自零差相干接收激光相位噪声测试系统的实验装置图如 1 所示,测试激光器是加拿大 TeraXion 公司生产的 PureSpectrum™-NLL Embedded 窄线宽激光器,测试激光器先通过光隔离器,然后经一耦合器分成两路,一路经过 15 km 单模光纤产生 60 μs 的时间延迟,两路光进入一光 90°混频器,从混频器输出的光被一对平衡探测器接收,示波器采集从平衡探测器输出的 I 路和 Q 路信号,通过 MATLAB 软件实现了 DSP 计算^[13],得到表征激光器相位噪声的 3 个关键参数,分别是电场功率谱线、相位误差方差曲线和 FM 噪声谱线。

图 5 是使用延时自零差相干接收方法得到的实验结果。通过计算得到 3 个图的线宽估计值分别为

60 K、59 K、57 K。估算的激光器 FWHM 3dB 线宽是通过将电场的单边带功率谱密度谱线宽度除以 2 得到的。其中相干接收机的高频峰值是人为设定的。实验结果和仿真模拟基本一致,证明了此方法的可行性。



(a) 电场的功率谱密度曲线 (b) 相位误差方差
(a) Power spectrum density of electric field (b) Phase-error variance



(c) FM 噪声谱线
(c) FM-noise spectrum

图 5 实验结果

Fig.5 Experimental results

4 结论

文中提出表征激光器相位噪声的 3 个关键指标,并进行全面的理论分析。建立一台新式的基于延时自零差接收机的激光器相位噪声测试系统,通过 OptiSystem 软件进行了系统仿真,验证了理论的可行性,用此方法通过对 TeraXion 公司的 PureSpectrum™ 的 DFB 窄线宽激光器噪声测试,经 DSP 处理得到激光器相位噪声的 3 个参数曲线,并计算了激光器线宽,分别为 60 kHz, 59 kHz 和 57 kHz,与理论仿真值基本一致。结果表明 FM 噪声谱能较好地描述 DFB 激光器相位噪声特性,相比传统的延迟自外差线宽测量技术,此方法能更全面描述激光相位噪声特性,为相干通信系统的接收机灵敏度分析和性能评估提供理论依据。由于测试系统的高灵敏性,所以不可避免地带来外界环境变化所引起的低频干扰对测

量结果精度的影响,并且探测器的散粒噪声和热噪声、光电探测器和示波器的线性度以及数据处理的误差都会影响最终的测试结果,所以如何进一步提高系统性能和增强稳定性是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Nakazawa M, Kikuchi K, Miyazaki T. High Spectral Density Optical Communication Technologies[M]. New York: Springer, 2010.
- [2] Gnauck A H, Winzer P J, Chandrasekhar S, et al. Spectrally efficient long-haul WDM transmission using 224-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 373-377.
- [3] Zhang Peng, Wang Tianshu, Yang Guowei, et al. Performance of evaluation of full-duplex free space laser communication system based on modulating retro-reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2506-2510. (in Chinese)
张鹏, 王天枢, 杨国伟, 等. 全双工逆向调制回复空间光通信系统性能评价 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2506-2510.
- [4] Jiang Huilin, Fu Qiang, Wang Xiaoman, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
姜会林, 付强, 王晓曼, 等. 国外空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 116-125.
- [5] Seimetz M. Laser linewidth limitations for optical systems with high-order modulation employing feed forward digital carrier phase estimation[C]//Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2008: OTuM2.
- [6] Kikuchi K, Igarashi K. Characterization of semiconductor-laser phase noise with digital coherent receivers[C]//Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2011: OML3.
- [7] Zhou Hui, Li Song, Wang Liangxun, et al. Influence of noise on range error for satellite laser altimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2256-2261. (in Chinese)
周辉, 李松, 王良训, 等. 噪声对星载激光测高仪测距误差的影响[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2256-2261.
- [8] Xiao Huaju, Wang Xiang, Ma Yun, et al. Linewidth measurement of narrow fiber laser based on the DSHI [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(8): 57-61. (in Chinese)
肖华菊, 王翔, 马云, 等. 基于 DSHI 的窄线宽光纤激光器

- 线宽测量)[J]. 光电工程, 2010, 37(8): 57-61.
- [9] Xie Donghong, Deng Dapeng, Guo Li, et al. Line-Width measurement method of narrow line width lasers[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2012, 50(1): 10006. (in Chinese)
解东宏, 邓大鹏, 郭丽, 等. 窄线宽激光器线宽测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 50(1): 10006.
- [10] Cao Chunyan, Yao Qiong, Rao Wei, et al. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interferometer for narrow linewidth lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 215-218. (in Chinese)
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): 215-218.
- [11] Hu Zhaoyang, Pan Zhenwu, Zhang Bin, et al. Linewidth study of laser diode with fiber Bragg grating externa-l cavity from delayed self-heterodyne method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(1): 46-48. (in Chinese)
胡朝阳, 潘珍吾, 张斌, 等. 利用全光纤自外差系统研究光纤光栅半导体激光器的线宽[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1): 46-48.
- [12] Zhou Qiuzhan, Zhang Yanchuang, Zhou Chengpeng, et al. Precise measurement of 1/f noise and its application to reliability screening for solar cells [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 625-631. (in Chinese)
周求湛, 张彦创, 周承鹏, 等. 1/f 噪声的精确测量及其在太阳能电池可靠性筛选中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 625-631.
- [13] Xue Nianxi. Application of MATLAB in Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
薛年喜. MATLAB 在数字信号处理中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.