

一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器

梁可桢^{1,2} 潘政清¹ 周俊^{1,2} 叶青¹ 蔡海文¹ 瞿荣辉¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 提出了一种基于数字相干检测和维纳滤波技术的相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)。在该技术中,实时解调出了沿光纤链路散射回的瑞利信号电场的振幅和相位。通过分析解调出的振幅和相位,检测到了位于 3.5 km 传感光纤上的一个由压电陶瓷(PZT)所产生的正弦振动信号的位置、频率和强度。应用维纳滤波降低了由激光器的相位噪声和探测器加性噪声引起的相位波动。系统的空间分辨率为 5 m。

关键词 传感器;相位敏感光时域反射计;光纤传感;相干检测;维纳滤波

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0805004

Multi-Parameter Vibration Detection System Based on Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer

Liang Kezhen^{1,2} Pan Zhengqing¹ Zhou Jun^{1,2} Ye Qing¹ Cai Haiwen¹ Qu Ronghui¹

(¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A phase sensitive optical time domain reflectometer (OTDR) technology based on the digital coherent detection and Wiener filter is proposed and analyzed, in which the phase and amplitude of the Rayleigh scattering light along the fiber link can be demodulated in real time. Using the proposed method, the vibration position, frequency and intensity for a sinusoidal disturbance signal driven by a lead zirconate titanate (PZT) on a 3.5 km single mode fiber link are obtained exactly. Wiener filter is used to reduce the laser phase noise and additive noise caused the phase fluctuation. A spatial resolution of 5 m for the system is realized.

Key words sensors; optical time domain reflectometer; fiber sensor; coherent detection; Wiener filter

OCIS codes 060.2370; 120.4825; 120.7280

1 引 言

相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)是一种新型的分布式光纤传感技术,它能够在长距离范围内对微小振动信号进行分布式、多点、实时检测,因此在周界安防领域具有其他类型的振动传感器所不能比拟的优势。

早在 1993 年 Taylor 就提出了 φ -OTDR 技术^[1]。 φ -OTDR 采用窄线宽和极小频率漂移的激光器作为光源,通过探测脉冲宽度区域内的后向瑞利散射光干涉信号强度变化来发现振动信号,通过回

波时间对事件定位。

鉴于 φ -OTDR 在周界安防领域的巨大应用前景,国内外的研究者们在过去的 20 年中对该技术进行了深入的研究。然而,已经报道的基于 φ -OTDR 的振动传感器的研究大多着眼于提高它的空间分辨率和传感距离,对扰动频率和强度的探测则鲜有报道。外界扰动对传感光纤的作用表现为改变扰动位置的光程,通过监测扰动区域内两点间散射光的相位差变化,可以反映出扰动的频率和强度。但已报道的实验方案多采用直接检测的接收,系统只能得

收稿日期: 2012-03-30; 收到修改稿日期: 2012-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(联合)重点基金(U0934001)和上海市科技攻关项目(11DZ1140202)资助课题。

作者简介: 梁可桢(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: liangkezhen2005@gmail.com

导师简介: 蔡海文(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

到探测到散射光的功率,无法进一步得到散射光的相位信息,因此不能准确测量扰动的频率和强度信息^[1~4]。

随着电子技术的发展,高速数据采集卡的成本降低,利用数字相干检测方案对散射光的相位进行解调成为了可能。Lu等^[5]在2010年提出利用 φ -OTDR相干检测的方法来测量外界声场的扰动频率。但他们采用对原始数据进行快速傅里叶变换(FFT)的方法来获得扰动的频率,这种方法避免了对瑞利光相位进行解调,所以无法测得扰动信号的强度。此外他们通过移动平均的方法来降低噪声,系统的测量带宽也将被降低。

本文提出了基于数字相干检测技术和维纳滤波技术^[6,7]的 φ -OTDR。该技术将 φ -OTDR分布式多点实时测量振动的优点和相干检测可实现相位解调的优点结合起来,实现了对长距离范围内扰动信号的位置、频率和强度同时测量。应用维纳滤波技术降低了激光器相位噪声和探测器引入的加性噪声所造成的解调相位波动。通过分析解调出的瑞利信号电场的幅度和相位,实现了对加载在3.5 km传感光纤上一个由压电陶瓷(PZT)所产生的频率为200 Hz的正弦振动信号位置、频率和强度的探测。

2 理论分析

2.1 数字相干检测

在相干检测(图1)中,首先将接收到的瑞利光信号与本地光进行拍频。平衡探测器对拍频信号进行光电转换,输出交流部分。数据采集卡(DAQ)将交流信号转换为数字信号送入计算机中进行处理。

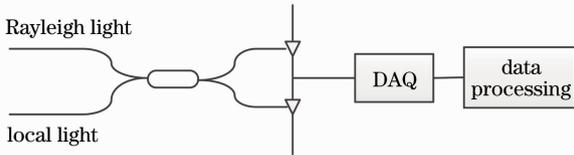


图1 数字相干检测

Fig.1 Digital coherent detection

在 φ -OTDR中,某一时刻接收到的瑞利信号是脉冲宽度内所有散射光干涉的结果,表示为^[1]

$$E_R(t) \exp\{j[(\omega + \Delta\omega)t + \Phi_R(t)]\}, \quad (1)$$

式中 E_R 是干涉场的振幅, $\Phi_R(t)$ 是干涉场的相位, ω 是种子光的频率, $\Delta\omega$ 是声光调制器引入的频移量。

本地光表示为

$$E_{LO}(t) \exp\{j[\omega t + \Phi_{LO}(t)]\}, \quad (2)$$

式中 E_{LO} 是本地光的振幅, $\Phi_{LO}(t)$ 是本地光的初始

相位。

平衡探测器探测的输出电流为^[8]

$$C(t) = 4E_R E_{LO} \cos[\Delta\omega t + \varphi(t)], \quad (3)$$

式中

$$\varphi(t) = \Phi_{LO}(t) - \Phi_R(t), \quad (4)$$

数据采集卡将交流信号 $C(t)$ 转换为数字信号之后送入计算机进行幅度和相位解调。

2.2 信号解调方案

对送入计算机中的数字信号,采用正交解调方案获得瑞利信号的振幅和相位^[9]。如图2所示,对 $C(t)$ 分别乘以一个频率为 $\Delta\omega$ 的正余弦信号,然后对结果进行低通滤波(LPF), I, Q 两路的输出结果为

$$I = E_R E_{LO} \cos \varphi(t), \quad (5)$$

$$Q = E_R E_{LO} \sin \varphi(t). \quad (6)$$

具体的幅度,相位解调算法为

$$\begin{cases} E_R E_{LO}(t) \propto \sqrt{I^2 + Q^2} \\ \varphi(t) \propto \arctan\left(\frac{Q}{I}\right) + 2k\pi \end{cases}, \quad (7)$$

式中 k 为整数。(7)式首先通过反正切函数得到位于 $[-\pi/2, \pi/2]$ 区间的相位,再根据已知 I, Q 的符号,得到位于 $[-\pi, \pi]$ 区间的相位。最后通过相位解卷绕算法对该相位进行处理,得到最终的瑞利光相位^[8]。

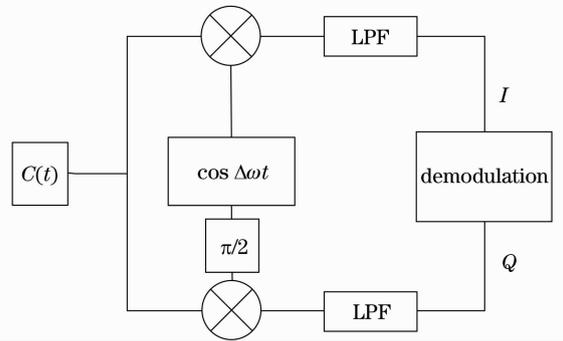


图2 正交相位/幅度解调

Fig.2 Quadrature phase/amplitude demodulation scheme

不同光脉冲所产生的瑞利光差异,反映了在不同时间光纤沿路状态的差异。当某一扰动造成了扰动位置处光纤折射率的变化,则光脉冲在该位置处所产生的瑞利光的幅度和相位都将随之变化。由(7)式可见,解调出来的振幅与干涉场的振幅具有线性的关系,因此通过振幅曲线的时间差分,即可确定扰动所在空间位置。通过监测扰动区域内两点间的相位差,即 $\varphi(t) - \varphi(t - \Delta T)$,随时间变化情况,即可得到扰动的频率和强度信息。

2.3 噪声模型和维纳滤波方法

在 φ -OTDR 中,主要考虑两类噪声的影响。第一类是加性噪声,主要是探测器、射频放大器的热噪声。第二类是激光器的相位噪声^[5~8]。噪声的存在会降低系统的信噪比,影响相位解调精度。这里采用维纳滤波的方式来降低这两种噪声的影响。

维纳滤波的作用可以表述为:在已知信号和噪声的功率谱特性的情况下,给出信号在均方误差最小意义下的最佳估计。

在 φ -OTDR 中,考虑加性噪声时,接收到的瑞利信号可表示为

$$E_R(t) \exp\{j[(\omega + \Delta\omega)t + \Phi_R(t)]\} + \mathbf{n}(t), \quad (8)$$

式中,加性噪声 $\mathbf{n}(t)$ 是一个有幅度和相位的矢量,服从高斯分布。将其在极坐标下分解为正交的相位矢量和幅度矢量。容易理解,噪声幅度矢量将引起接收到瑞利光信号振幅的波动,噪声相位矢量将引起瑞利光信号的相位波动,如图 3 所示。 x 是传输的光信号, y 是最终接收到的信号。虚线表示两个正交的噪声分量。

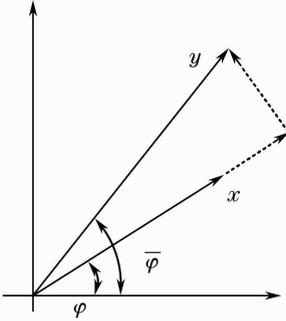


图 3 加性噪声的影响示意图

Fig. 3 Effect of the additive noise vector

激光器相位噪声使本地光的初相位 $\Phi_{LO}(t)$ 包含了随时间随机变化的量。当光源具有洛伦兹线型时,本地光的初相位是一个维纳过程^[10],即

$$\Phi_{LO}(t) = \Phi_{LO}(t - \tau) + \omega(t), \quad (9)$$

式中 $\omega(t)$ 是一个实的高斯噪声,它的方差可以表示为 $\sigma_w^2 = 2\pi\tau\Delta\nu$, $\Delta\nu$ 是激光器的线宽, τ 是种子光脉冲时间间隔。

对不同的脉冲所产生的瑞利光信号进行相干检测解调相位时,由于本地光初相位的波动,解调得到的相位存在由激光器相位噪声引起的波动。

综合考虑加性噪声和激光器相位噪声的影响,解调出来的相位可以表示为

$$\widetilde{\varphi}(t) = \varphi(t) + n', \quad (10)$$

式中 n' 是加性噪声相位矢量经过解调后的值,仍然为高斯分布,其方差为 σ_n^2 。 $\varphi(t)$ 由(4)和(9)式确定,是一个维纳过程。将维纳滤波器作用于 $\widetilde{\varphi}(t)$ 获得对瑞利光相位最小均方误差下的估计。

通过一套标准的计算流程可以得到该维纳滤波器的传递函数,为简明起见,直接给出无延迟的维纳滤波器传递函数为^[6~8]

$$\varphi_{\text{estimation}}(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \widetilde{\varphi}(z), \quad (11)$$

式中 α 由加性噪声和相位噪声的方差决定,可表示为

$$\alpha = \frac{\sigma_w^2 + 2\sigma_n^2 - \sigma_w \sqrt{\sigma_w^2 + 4\sigma_n^2}}{2\sigma_n^2}. \quad (12)$$

3 实验结果和讨论

3.1 实验装置

实验装置如图 4 所示。系统的光源是一个自制的光纤激光器,激光器的线宽为 2 kHz,输出功率为 100 mW。通过一个 1:99 的耦合器将光源输出的光分为两部分,其中 99% 的光用作种子光,1% 的光用作本地光。种子光经过声光调制器调制为脉冲光。该脉冲光的脉宽为 50 ns,重复频率为 20 kHz,声光

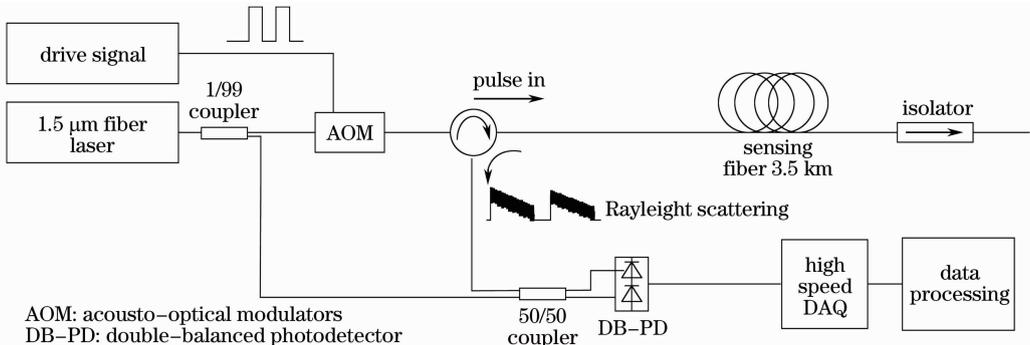


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

调制器引入的频移为 160 MHz。光脉冲经过一个环形器连续地注入到传感光纤中。由于脉冲重复频率限制,实验中传感光纤的长度不得超过 5 km,因此取 3.5 km。

返回接收端的瑞利光采用相干检测接收。瑞利散射光与本地光经过一个 1:1 耦合器拍频,得到频率为 160 MHz 的拍频信号,该信号被平衡探测器转换为电信号。采集速率为 3 Gb/s 的数据采集卡将电信号转换为数字信号,送入计算机处理。

为了证明系统的探测能力,在实验中使用了一个被正弦电压所驱动的 PZT 作为振动源,加载在光

纤 640 m 的位置处。正弦驱动信号由信号发生器产生,频率为 200 Hz,驱动信号的直流偏置为 80 V,峰-峰值为 25 V。

3.2 对抗动位置的探测

采用振幅时间差分的方式来确定扰动位置。在相干探测系统中,进入计算机的数字信号是频率为 160 MHz 的拍频信号。因此,首先采用正交解调算法从拍频信号中解调出瑞利信号的幅度,然后再进行振幅差分。图 5(a)是解调出的 400 条瑞利光振幅曲线叠加的结果。

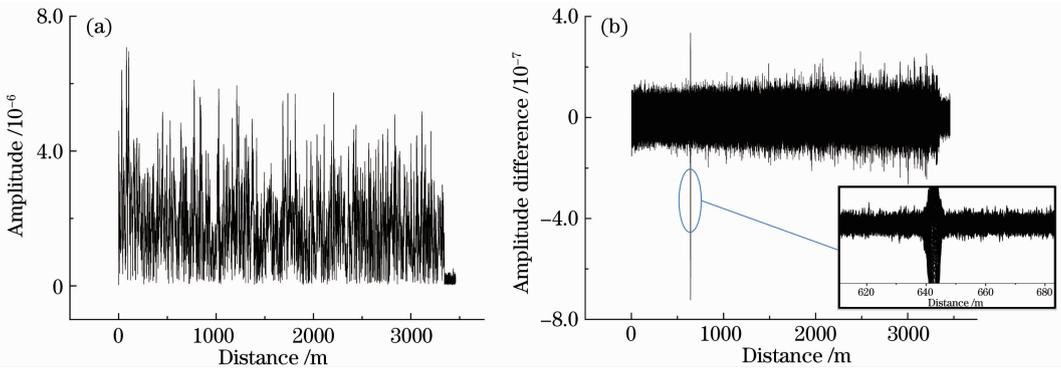


图 5 (a) 400 条瑞利信号幅度曲线叠加;(b) 390 条振幅差值曲线叠加

Fig. 5 (a) 400 superimposed amplitude traces of the Rayleigh light; (b) 390 superimposed subtraction results of the adjacent amplitude traces

由扰动所造成的相邻脉冲所产生的瑞利信号在幅度上的差别非常小,在实验中选取相邻 10 个脉冲的振幅曲线做差分。第 1 个脉冲所得振幅曲线与第 11 个脉冲所得振幅曲线差分,依次类推,通过移动时间窗口,得到 390 个差分结果。做差的结果叠加显示在图 5(b)中,可以明显看到,扰动位置在 640~645 m 之间。由于采用 50 ns 的脉冲,空间分辨率为 5 m。

3.3 对抗动强度和频率的探测

振幅时间差分确定了扰动的位置,对该位置附近的相位进行分析,便可得到扰动的频率和强度信

息。利用正交解调算法从拍频信号中解调出的 400 条瑞利光相位曲线如图 6(a)所示。取所有脉冲产生的瑞利光信号在扰动位置处的相位进行分析,可得到该位置处两点间的相位差 $\varphi(t) - \varphi(t - \Delta T)$ 随时间改变情况,如图 6(b)所示。可以看出,相位差的改变表现出近似正弦曲线的形式。这是因为所用的 PZT 驱动信号是一个正弦信号。显然,相位差的改变是随着扰动的强度改变而改变。

从图 6(b)中可见,扰动位置处的相位差随时间周期变化。实验中探测时间为 400 个脉冲的持续时

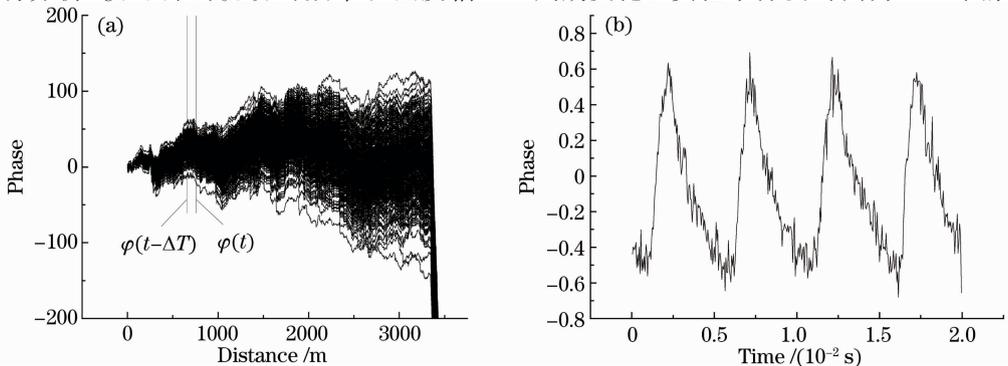


图 6 (a) 400 条瑞利信号相位曲线叠加图;(b)扰动位置处相位差随时间变化曲线

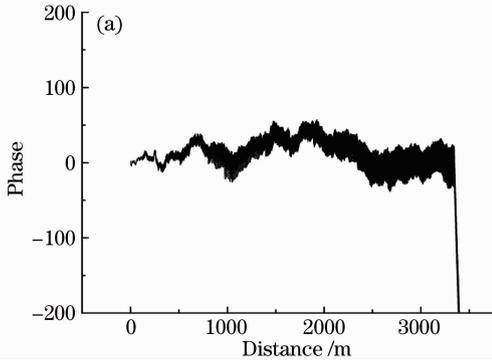
Fig. 6 (a) 400 superimposed phase trace of the Rayleigh light; (b) phase changing at the vibration point

间 2×10^{-2} s, 在此时间内, 扰动位置处相位差改变了 4 个周期。由此可以计算相位改变频率为 200 Hz, 与所使用的驱动信号的频率一致。

从图 6(a), (b) 可以看到, 由于噪声的影响, 从不同脉冲所产生的瑞利光中解调得到的相位发散非常严重。

3.4 维纳滤波技术对相位解调结果的改进

在计算滤波器传输函数参数 α 时, 激光器相位噪声的方差按照 $\sigma_w^2 = 2\pi\tau\Delta\nu$ 确定, 其中 τ 为 5×10^{-5} s, $\Delta\nu$ 为 2 kHz。对于加性噪声, 仅考虑了平衡探测器的噪声, 采用说明书中给定的噪声功率谱,



按公式确定其方差, 公式为

$$\sigma_n^2 = \frac{3B}{\tau^2} S_n(f), \quad (13)$$

式中 B 是系统的带宽为 160 MHz, $S_n(f)$ 是说明书给出的噪声的功率谱, 为 $40 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, τ 为 5×10^{-5} s。最终确定的参数 α 为 0.9999。

使用维纳滤波器之后的相位曲线和扰动位置处的相位差随时间改变曲线如图 7(a)、(b) 所示。可以看到, 相比于图 6(a), 相位曲线发散降低了一半, 扰动位置处的相位差随时间变化曲线也得到了改善。

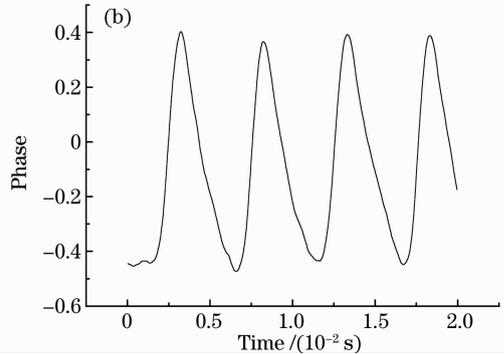


图 7 (a) 维纳滤波后 400 条瑞利信号相位曲线叠加图; (b) 维纳滤波后扰动位置处相位随时间变化曲线

Fig. 7 (a) 400 superimposed phase trace of the Rayleigh light after Wiener filter being applied; (b) phase changing at the vibration point after wiener filter being applied

4 结 论

本文提出了一种基于数字相干检测和维纳滤波技术的 φ -OTDR, 提高了基于 φ -OTDR 分布式光纤传感器的探测性能。通过数字相干检测技术, 解调出了瑞利信号的振幅和相位。通过对振幅和相位的分析, 探测到了加载在传感光纤上, 位于 640 ~ 645 m 处的振动信号, 并且得到了该振动信号的频率和强度。通过比较使用维纳滤波前后的相位解调结果, 证明了维纳滤波能够降低激光器的相位噪声和探测器加性噪声对系统的影响, 使相位解调精度得到了提高。

参 考 文 献

- 1 J. Park, W. Lee, H. F. Taylor. A fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering [C]. *SPIE*, 1998, **3555**: 49~56
- 2 J. C. Juarez. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2081~2087
- 3 J. C. Juarez. Field test of a distributed fiber-optic intrusion

sensor system for long perimeters [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(11): 1986~1971

- 4 Peng Long, Zou Qilin, Zhang Min *et al.*. Developments in and applications of fiber perimeter detection sensors[J]. *Journal of Lasers*, 2007, **28**(4): 1~3
- 彭 龙, 邹琪琳, 张 敏等. 光纤周界探测技术原理及研究现状 [J]. *激光杂志*, 2007, **28**(4): 1~3
- 5 Y. Lu, T. Zhu, L. Chen *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(22): 3243~3248
- 6 M. G. Taylor. Accurate digital phase estimation process for coherent detection using a parallel digital processor[C]. European Conference of Optical Communication, 2005, **2**(3): 263~264
- 7 E. Ip, A. P. T. Lau, D. J. F. Barros *et al.*. Coherent detection in optical fiber systems [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 753~791
- 8 M. G. Taylor. Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(7): 901~914
- 9 K. C. Ho, Y. T. Chan, R. Inkol. A digital quadrature demodulation system[J]. *IEEE Trans. Aerospace & Electron. Syst.*, 1996, **32**(4): 1218~1227
- 10 M. Tur, B. Moslehi, J. W. Goodman. Theory of laser phase noise in recirculating fiber-optic delay lines[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(1): 20~31