

# 应用于光纤复合架空地线的光纤分布式振动的测量

苗春生

深圳海油工程水下技术有限公司, 广东 深圳 100027

**摘要** 为了实现大范围的光纤复合架空地线(OPGW)舞动探测,提出了一种基于后向瑞利散射空间差分干涉的光纤分布式振动测量技术。舞动引起单模传感光纤中的后向瑞利散射光的变化,将含有振动信息的后向瑞利散射光注入到非平衡迈克耳孙干涉仪,利用干涉仪的臂长差实现相邻空间段的后向瑞利散射光干涉,采用 $3\times 3$ 耦合器解调技术解调出相位信息,实现对振动信号的准确测量。在输电线路舞动实验室进行了OPGW的舞动测试,实现了0.9 Hz舞动、2.3 Hz非舞动的检测。

**关键词** 光纤光学; 后向瑞利散射; 空间差分干涉; 非平衡迈克耳孙干涉仪; 光纤复合架空地线

中图分类号 TP394.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040604

## Distributed Optical Fiber Vibration Sensing in Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire

Miao Chunsheng

COOEC Subsea Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 100027, China

**Abstract** We propose a distributed optical fiber vibration sensing scheme based on space difference interference of Rayleigh backscattering, to detect the swing of the optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) over large areas. In this scheme, Rayleigh backscattered light with phase changes induced by the swing of the OPGW is split and fed into an imbalanced Michelson interferometer. We use the arm length difference of the interferometer to realize the Rayleigh backscattered light interference of adjacent space segments along the sensing fiber. The phase information is demodulated via  $3\times 3$  coupler demodulation technology, and the accurate measurement of the vibration signal is realized. We achieve the swing at 0.9 Hz and non-swing at 2.3 Hz in the transmission line swing laboratory.

**Key words** fiber optics; Rayleigh backscattering; space difference interference; imbalanced Michelson interferometer; optical fiber composite overhead ground wire

**OCIS codes** 060.2370; 120.3180; 120.4825

## 1 引言

中国幅员辽阔,电网建设和运行复杂、多样,高压电线覆冰及舞动对电网造成了严重威胁,特别是目前在电网大量应用于光纤复合架空地线(OPGW)的情况下,当OPGW的覆冰掉落时,可导致OPGW形成类驻波形式的上下跳跃舞动,对杆塔产生极大的冲击力。动、静载荷超过铁塔的设计承载能力是导致倒塔的主要原因,因此OPGW振

动信号测量在电力领域具有重要的研究价值。光纤振动检测器分为点式和分布式传感器两种类型<sup>[1-3]</sup>。点式传感器存在复用容量不够大、大范围布阵困难以及传感器之间信号多串扰等问题,使其在大面积下的实时检测应用受到很大限制。分布式传感器分为干涉式和反射式两类,其中干涉式传感器的干涉仪主要分为迈克耳孙(Michelson)干涉式<sup>[4]</sup>、Mach-Zehnder干涉式<sup>[5]</sup>、Sagnac干涉式<sup>[6]</sup>、双Sagnac<sup>[7]</sup>、Sagnac-Machelson式<sup>[8]</sup>等多种复合结构。干涉式

收稿日期: 2017-09-01; 收到修改稿日期: 2017-09-27

基金项目: 山东省自然科学基金博士基金(ZR2016FB03)、山东建筑大学博士基金(XNBS1535)

作者简介: 苗春生(1972—), 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋油气监测与检测以及维修技术方面的研究。

E-mail: miaocs@mail.cooec.com.cn

传感器对于相位变化具有很高的灵敏度,但不能同时检测多个扰动点,复合式干涉传感器扰动点定位复杂,光路繁琐,易受环境干扰;反射式<sup>[9]</sup>传感器利用了光纤外部干扰引起的瑞利、拉曼和布里渊散射,其中拉曼散射只用于温度测量,而布里渊散射用于测试应变信号,不适用于快速动态信号的检测。目前基于瑞利散射的光时域反射(OTDR)技术主要包含传统 OTDR<sup>[10-11]</sup>、相敏 OTDR( $\varphi$ -OTDR)<sup>[12-14]</sup>和相干 OTDR(C-OTDR)<sup>[15-16]</sup>等。传统 OTDR 是基于宽线宽光源的强度解调,系统的灵敏度受到限制。 $\varphi$ -OTDR 是采用窄线宽光脉冲作为 OTDR 的探测光源,此系统通过将一个光脉冲内不同散射中心之间的相干叠加形成的相位信息转化为强度信息,进行振动信息的检测,其灵敏度虽然高于传统 OTDR 的灵敏度,但受限于强度解调,在微弱信号检测方面的应用受到限制。C-OTDR 利用本地参考光与后向瑞利散射光干涉,采用相位信息的解调方案,提高了灵敏度,但本地参考光与后向瑞利散射光干涉时的偏振干涉严重影响系统性能。

基于以上问题,本文提出了一种基于后向瑞利散射空间差分干涉的光纤分布式振动检测技术。该技术将含有振动信号的后向瑞利散射信号注入到非平衡迈克尔孙干涉仪中,利用干涉仪的臂长差实现相邻空间段内的后向瑞利散射光干涉,采用  $3 \times 3$  耦合器解调技术解调出相位信息,实现振动信号的准确测量。在输电线路舞动实验室进行了 OPGW 的舞动测试,实现了 0.9 Hz 舞动、2.3 Hz 非舞动的检测。

## 2 系统工作原理

### 2.1 后向瑞利散射光的空间差分干涉原理

参考单个脉冲周期内光纤后向瑞利散射光在无扰动情况下振幅的一维脉冲响应模型<sup>[17-18]</sup>,利用分布反馈光纤激光器(DFB-FL)作为光源,通过声光

调制器(AOM)后调制为频率为  $f$  的准单色矩形脉冲,脉宽为  $w$ ,并假设该光源相干时间与脉宽  $w$  相比足够大。在  $t=0$  时将这样一个光脉冲发射进光纤,在光纤输入端获取后向瑞利散射光,接收到的散射光振幅可表示为

$$e_r(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos[2\pi f(t - \tau_i)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{w}\right), \quad (1)$$

式中,  $a_i$  和  $\tau_i$  分别为第  $i$  个散射波的振幅和时间延迟,  $N$  为设定的散射中心个数,当  $[(t - \tau_i)]/w \leq 1$  时,矩形函数  $\text{rect}[(t - \tau_i)/w]$  值为 1,否则为 0。时间延迟  $\tau_i$  和从输入端到第  $i$  个散射的光纤长度  $l_i$  的关系为  $\tau_i = 2nl_i/c$ ,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为光纤折射率。

图 1 为后向瑞利散射光的空间差分干涉原理图,图中  $s$  为含法拉第旋镜(FRM)的非平衡干涉仪的臂长差,延时光为  $e_{rs}(t)/2$ ,其中

$$e_{rs}(t) = \sum_{j=1}^N a_j \cos[2\pi f(t - \tau_j - \tau_s)] \times \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_s}{w}\right), \quad (2)$$

式中  $\tau_s$  为光在非平衡干涉仪中两臂间传输时间延时。干涉仪的干涉光强为

$$I(t) = [e_r(t) + e_{rs}(t)] [e_r(t) + e_{rs}(t)]^* = I_{rr} + I_{rs} + I_{rrs}, \quad (3)$$

式中

$$I_{rr} = \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^N a_i a_p \cos \varphi_{ip} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{w}\right), \quad (4)$$

$$I_{rs} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N a_j a_q \cos \varphi_{jq} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_s}{w}\right), \quad (5)$$

$$I_{rrs} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j \cos \varphi_{ij} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i - \tau_s}{w}\right) \times \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_s}{w}\right), \quad (6)$$

$$\varphi_{ip} = 2\pi f(\tau_i - \tau_p), \quad (7)$$

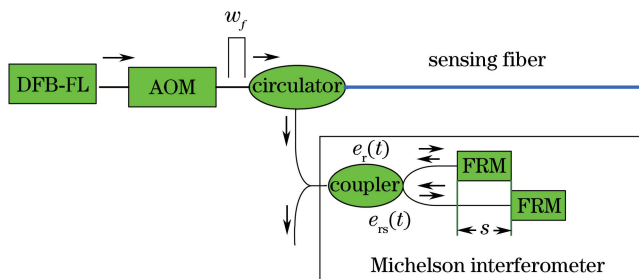


图 1 后向瑞利散射光的空间差分干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of space difference of Rayleigh backscattering

$$\varphi_{jq} = 2\pi f(\tau_j - \tau_q), \quad (8)$$

$$\varphi_{ij} = 2\pi f\tau_s = (4\pi fn/c)/s. \quad (9)$$

如(3)~(9)式所示,干涉信号包含由声信号引起的相位差  $\varphi_{ij}$ ,只要解调相位差  $\varphi_{ij}$ ,则新型  $\varphi$ -OTDR 系统就可以定量地恢复出声源信号的幅度、相位和频率等相关信息。

## 2.2 3×3 光纤耦合器解调原理

系统采用 3×3 耦合器对光纤干涉信号进行相位解调,将干涉仪输出光  $I(t)$  输入 1 个 1×3 耦合器的一端,并在另一端 3 路中各接 1 个光电探测器,探测器探测到的光强可表示为<sup>[19]</sup>:  $I_k = \bar{I} + I_0 \cos[\varphi(t) - (k-1) \times (2\pi/3)]$ ,  $k$  为输出的光路序

号,  $k=1,2,3$ ;  $\bar{I}$  为各路输出的平均光强,  $I_0$  为干涉条纹的峰值强度;  $\varphi(t) = \phi(t) + \psi(t)$ ,  $\phi(t)$  为两传感臂上信号相位差信号,即待测信号,  $\psi(t)$  为在实际环境中由于环境变化产生的相位差。

3×3 耦合器相位解调方法如图 2 所示,  $A_1 \sim A_7$  分别为:加法器、加法器、加法器、微分器、乘法器、平方器、除法器; HP 为高通滤波器。为便于推导,先令  $A_1 \sim A_7$  均等于 1,图 2 中将 3 路输出信号  $I_1 \sim I_3$  求和乘以 1/3,得到第 1 个加法器的输出,然后 3 路光强信号减去第 1 个加法器的输出,消除直流因子的影响,再经过微分交叉相乘、累加、积分运算后输出得

$$V_{out} = \sqrt{3}\varphi(t) = \sqrt{3}[\varphi(t) + \psi(t)]. \quad (10)$$

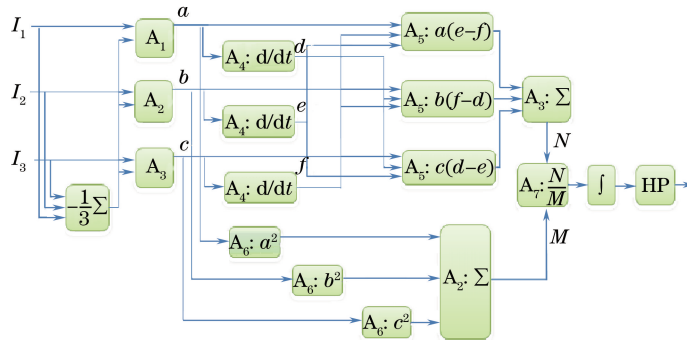


图 2 3×3 光纤耦合器解调框图

Fig. 2 Block diagram of 3×3 coupler demodulation

由于  $\psi(t)$  是缓变量,故可经过高通滤波器来滤除这个缓变量,从而解调出待测的信号  $\phi(t)$ 。

## 3 实验与结果

由于 OPGW 舞动的本质是两杆塔间的 OPGW 受外界影响发生的驻波抖动,而杆塔间距一般均为几十千米,因此舞动振动信号绝大部分

是小于 2 Hz 的低频成分。在此,使用舞动模拟器模拟两杆塔之间发生的舞动情况,整体结构如图 3 所示。舞动台能够发出固定频率的振动信号,带动 OPGW 线缆上下舞动,使 OPGW 的舞动频率与舞动台输出频率一致,当舞动频率满足驻波条件时,OPGW 线缆振幅将被放大增强,出现实际场景中舞动情况。实验采用的标准 OPGW 线

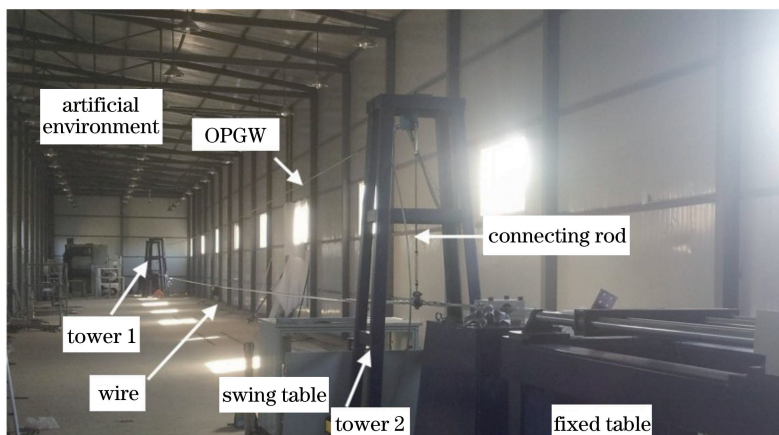


图 3 OPGW 舞动测试现场图

Fig. 3 Test site of OPGW swing



缆长度为 15 m, OPGW 内光纤为普通单模光纤, 将内光纤接入分布式光纤检测仪器, 进行振动信号的采集与分析。

将舞动台输出频率调至已测量好的模拟器舞动频率 0.9 Hz, 人为地使 OPGW 线缆发生舞动, 从分布式光纤检测仪器读出 OPGW 线缆区域的时域、频域信息。图 4 为 0.9 Hz 舞动信号测试结果图, 频域分析可以得到非常明显的 0.9 Hz 的信号, 说明分布式光纤检测仪器可准确还原 OPGW 线缆上的振动信息; 舞动发生时的振幅测量结果可达 560 rad。另外, 分布式光纤检测仪器还监测出幅值非常高的

二次谐波, 分析认为可能是由于舞动台输出频谱不佳和仪器解调误差所造成的。

将舞动台输出频率调至非舞动频率 2.3 Hz, 再从分布式光纤检测仪器读出 OPGW 线缆区域的时域、频域信息, 结果如图 5 所示。频域分析得到非常明显的 2.3 Hz 的信号, 但振幅测量结果仅有 35 rad, 说明没有发生舞动。

从上述实验可见, 通过分布式光纤检测仪器监控 OPGW 线缆区域的时域、频域信息, 可准确确定舞动是否发生、舞动频率以及舞动振幅, 这为接下来的输电线路应急处理提供预警。

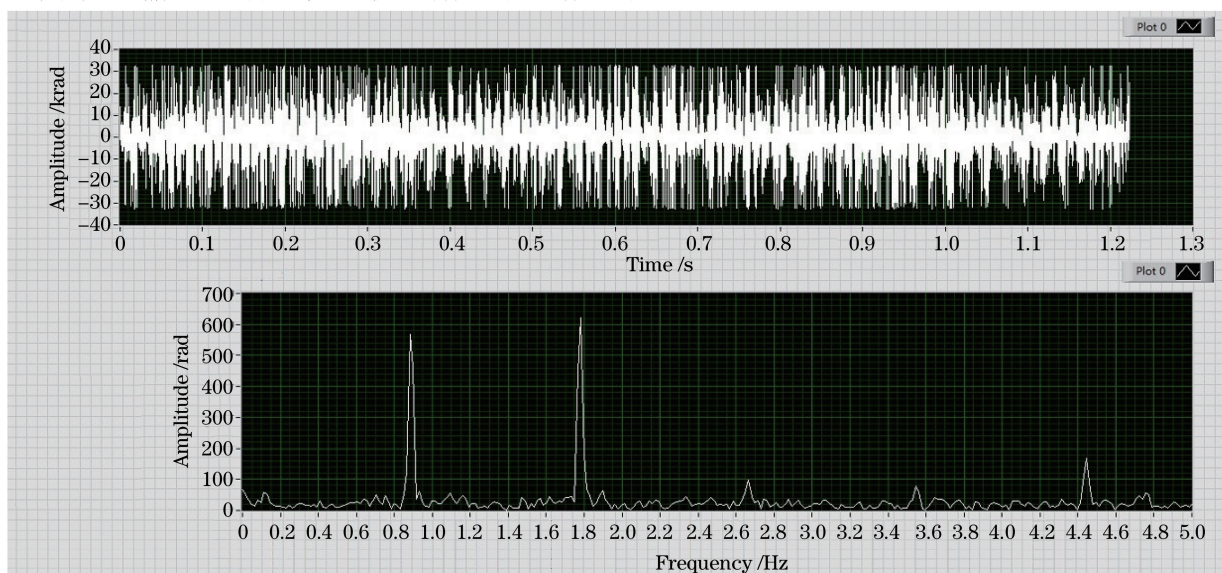


图 4 0.9 Hz 舞动信号测试结果

Fig. 4 0.9 Hz swing signal test results

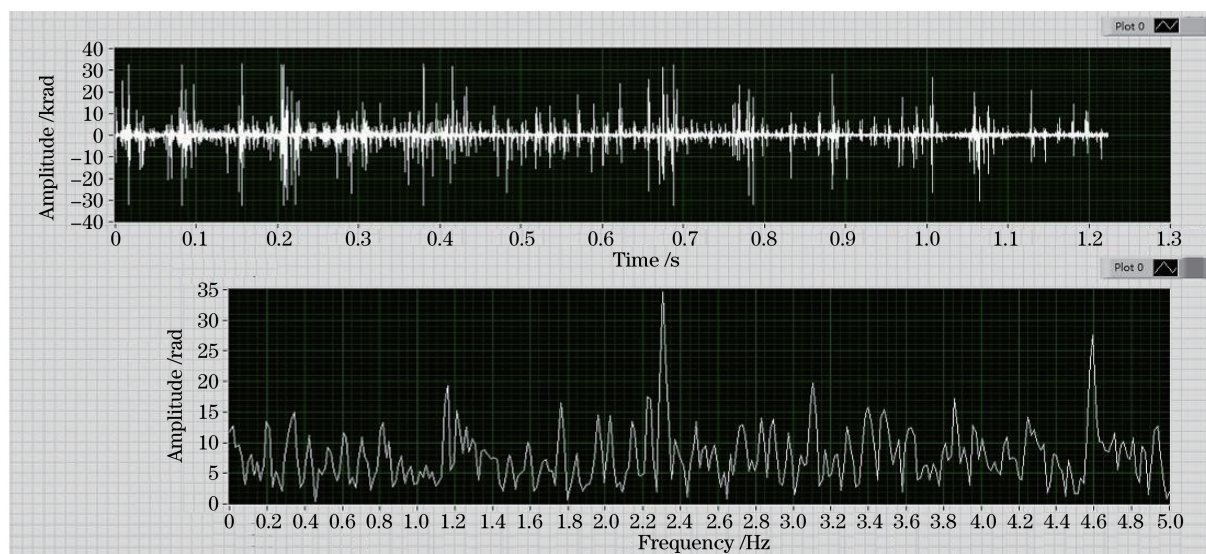


图 5 2.3 Hz 非舞动信号测试结果

Fig. 5 2.3 Hz non-swing signal test results



## 4 结 论

建立了基于后向瑞利散射信号空间差分干涉技术的光纤分布式振动监测系统,利用干涉仪的臂长差实现相邻空间段的后向瑞利散射光干涉,采用 $3\times 3$ 耦合器解调技术解调出相位信息,实现振动信号的准确测量。在输电线路舞动实验室进行了OPGW的舞动测试,实现了0.9 Hz舞动、2.3 Hz非舞动检测,为实际情况中预防OPGW线缆舞动提供了一种直观准确的监测手段。

### 参 考 文 献

- [1] Feng K B, Song M P, Xia Q L, *et al.* High-resolution distributed optical-fiber sensing technology based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0106002.  
冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0106002.
- [2] Bao X, Zhou D P, Baker C, *et al.* Recent development in the distributed fiber optic acoustic and ultrasonic detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3256-3267.
- [3] Sergi V, Joanr C. Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 39(1/2): 441-451.
- [4] Le Y F, Ju A S. Analysis and measurement of the nonlinear errors in heterodyne interferometers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051203.  
乐燕芬, 句爱松. 外差激光干涉仪非线性误差分析及测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051203.
- [5] Wei P, Shan X K, Sun X H. Frequency response of distributed fiber-optic vibration sensor based on nonbalanced Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(1): 47-51.
- [6] Wada K, Narui H, Yamamoto D, *et al.* Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21467-21474.
- [7] Russell S J, Brady K R, Dakin J P. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances, acting over a 40-km fiber section, using a novel dual-Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(2): 205-213.
- [8] Kondrat M, Szustakowski M, Palka N, *et al.* A Sagnac-Michelson fibre optic interferometer: signal processing for disturbance localization [J]. *Opto-Electronics Review*, 2007, 15(3): 127-132.
- [9] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [10] Zhang C X, Zhong X, Li L J, *et al.* Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 742-746.
- [11] Ding X X, Zhang X, Wang H B, *et al.* Influences of modulation frequency on dynamic performance of vibration sensor based on  $\varphi$ -OTDR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 210-214.
- [12] Hui X N, Zheng S L, Zhou J H. Electro-optic modulator feedback control in phase-sensitive optical time-domain reflectometer distributed sensor [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(35): 8581-8584.
- [13] Peng F, Wu H, Jia X H. *et al.* Ultra-long high-sensitivity  $\varphi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [14] Liang S, Liu T F, Sheng X Z, *et al.* Investigation on space-domain difference based location method for  $\varphi$ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45(6): 0622005.  
梁生, 刘腾飞, 盛新志, 等. 基于空间域差分的  $\varphi$ -OTDR 光纤分布式扰动传感器定位方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 45(6): 0622005.
- [15] Lu Y L, Zhu T. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [16] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, *et al.* Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9): 1142-1146.
- [17] Nakazawa M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(9): 1175-1180.
- [18] Juskaitis R. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(3): 225-227.
- [19] Todd M D, Seaver M, Bucholtz F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using  $3\times 3$  [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(15): 784-786.