

文章编号: 0258-7025(2010)06-1542-05

# 基于相位载波解调法的多通道光纤激光传感系统相位一致性研究

王 延 何 俊 李 芳 刘 育 梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

**摘要** 光纤传感系统在应用于水声及地震波探测等场合时,其通道间相位一致性将影响波束形成的质量,进而影响探测目标的定位精度,因此研究传感系统的通道间相位一致性具有重要的意义。分析了影响基于相位产生载波(PGC)解调法和密集波分复用(DWDM)的多通道光纤激光传感系统通道间相位一致性的各种因素。理论计算结果表明,传感器波长差异对通道间相位差的影响可以忽略。两通道分布反馈式(DFB)光纤激光传感系统通道间相位一致性的实验测试结果表明,传感器波长差异不会对各通道解调结果的相位信息带来影响,当多通道 DFB 光纤激光传感系统各通道采用相同的参数设置时,各通道解调结果间具有很高的相位一致性,与理论分析结果相吻合。

**关键词** 光纤光学;光纤传感;相位一致性;相位载波解调;低通滤波器

中图分类号 TN253;TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1542

## Research on Phase Consistency of Fiber Laser Sensor Array System Based on Phase Generated Carrier Demodulation

Wang Yan He Jun Li Fang Liu Yuliang

(*Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract** The phase consistency between different channels of the fiber laser sensor system has great effect on beamforming and target locating in the detection of underwater acoustics and seismic wave. So it is important to study the phase consistency between different channels. The factors influencing the phase consistency of the fiber laser array system based on dense wavelength division multiplexing (DWDM) and phase generated carrier (PGC) demodulation are analyzed. The analysis and corresponding calculations show that the influence of the sensor's wavelength difference can be neglected. An experiment is carried out on two channels distribution-feedback (DFB) fiber laser sensor array system to demonstrate the analysis, The results show that the system has high phase consistency in the situation of different sensors and the results are in accordance with the theoretical expectations.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; phase congruency; phase generated carrier; lowpass filter

### 1 引 言

近年来,出现了一种以分布反馈式(DFB)光纤激光器为传感元件的新一代光纤传感器。与传统电

学传感器相比,光纤激光传感器(FLS)具有灵敏度高、抗电磁干扰、体积小、动态范围大、易于组阵等优点<sup>[1]</sup>,自 1995 年 K. P. Koo 等<sup>[2]</sup>首次将光纤激光

收稿日期: 2009-08-19; 收到修改稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z415, 2009AA11Z212)及中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿(ISCAS2008T05)资助课题。

作者简介: 王 延(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感网络信号解调技术、数字信号处理技术等方面的研究。  
E-mail: wangyan@semi.ac.cn

导师简介: 李 芳(1975—),女,研究员,硕士生导师,主要从事光纤传感网络与光纤激光器等方面的研究。  
E-mail: lifang@semi.ac.cn

器应用于传感领域以来,FLS 技术得到广泛关注,并取得了一些成果,现已广泛应用于地震监测、石油勘探、水声探测等领域<sup>[2~8]</sup>。DFB 光纤激光器利用光纤光栅的反射特性和选频作用,通过在一段高增益的有源光纤上写入光纤光栅形成激光器结构,在外界信号的作用下,光栅的周期和折射率发生变化,导致其反射光谱的中心波长发生位移,通过检测激光器激光波长的位移就能够还原出外界信号。

当 FLS 阵列用于水下声纳系统及地震信号采集等场合时,需要利用多个通道的数据来分析声源的强度和位置。波束形成是阵列信号处理的重要组成部分,它主要对特定方向的有用信号形成波束,使之输出最大并衰减其他方向的干扰信号<sup>[9]</sup>。目前大部分的波束形成算法对传感系统通道间的不一致性非常敏感,因此,传感系统的通道间要求具有高度的相位一致性,以达到良好的波束形成效果和准确的目标定位要求<sup>[9,10]</sup>。

本文提出并从理论上分析了基于相位产生载波 (PGC) 解调法和密集波分复用 (DWDM) 的多通道 FLS 系统相位一致性的影响因素,进而进行理论计算,并对两通道光纤激光传感系统进行相位一致性的实验测试。

## 2 系统介绍

图 1 所示为基于 PGC 解调的多通道 FLS 系统示意图。在抽运激光作用下,FLS 阵列产生中心波长分别为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  的窄线宽单频激光。经过波

分复用 (WDM) 耦合器后,滤去抽运激光。为减少反射光引入的噪声,激光从 WDM 输出经过光纤隔离器后,再进入非平衡干涉仪。非平衡干涉仪采用迈克耳孙结构,在两臂末端使用法拉第旋转反射镜 (FRM),消除由于输入光偏振态变化引起的干涉信号的衰落现象<sup>[11]</sup>,提高解调结果的稳定性。干涉仪将外界信号引起的激光器波长变化  $\Delta\lambda(t)$  转化为干涉仪的相位变化<sup>[2]</sup>

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi n_\lambda L_{\text{OPD}}}{\lambda_0^2} \Delta\lambda(t), \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$  为光纤激光传感器的中心波长,  $L_{\text{OPD}}$  为迈克耳孙干涉仪两臂的光程差 (OPD),  $n_\lambda$  为光纤纤芯的有效折射率。

为了产生解调所需要的相位载波,将干涉仪一个臂上的光纤缠绕在压电陶瓷 (PZT) 管上, PZT 驱动器产生远高于待测信号频率的正弦调制信号,驱动 PZT 管产生振荡,带动上面的光纤产生周期性伸缩,即干涉仪的臂长差发生周期性变化,从而对干涉仪相位产生高频调制。系统后端采用 PGC 解调算法还原外界动态信号<sup>[12,13]</sup>。

经过调制的干涉光信号进入 DWDM 进行各传感器波长的解复用。各波长传感器的干涉光信号进入相应的光电探测器 (PD) 转化为电压信号,用同步模拟/数字 (A/D) 采集卡将模拟电压信号转化为数字信号,对数字信号进行如图 2 所示的归一化的 PGC,最终得到外界待测信号,其中  $G\cos \omega_0, G\cos 2\omega_0$  分别为解调的基频和二倍频载波,  $\omega_0$  为载波频率。

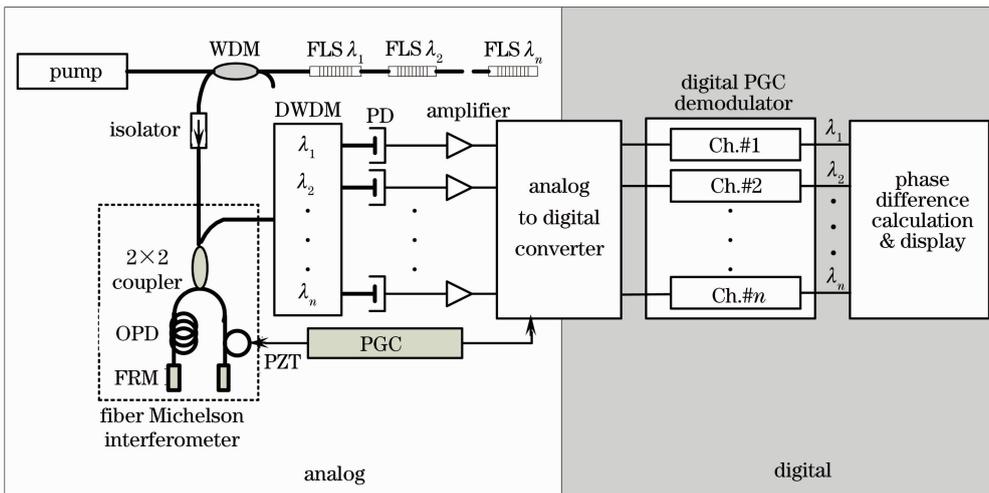


图 1 基于 PGC 解调的多通道 FLS 系统图

Fig. 1 Fiber laser sensor array system based on PGC demodulation

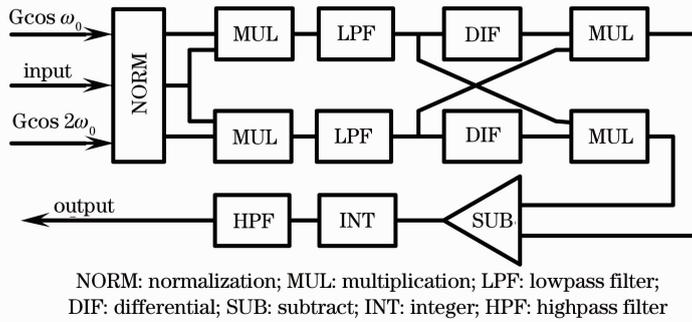


图 2 PGC 解调算法流程图

Fig. 2 Algorithm of PGC demodulation

为测试传感系统各通道间的相位一致性,将系统各通道解调结果送入相位差计算模块进行通道间相位差的计算。采用数字相关法计算两同频正弦信号之间的相位差,其相位分辨率可达到  $0.0017 \text{ rad}^{[14]}$ 。

设  $\lambda_1, \lambda_2$  两通道对输入的同频正弦信号的解调结果分别为

$$\begin{aligned} V_1(t) &= A \sin(2\pi f_{\text{sig}} t) + N_1(t), \\ V_2(t) &= B \sin(2\pi f_{\text{sig}} t + \varphi) + N_2(t), \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $A, B$  为两通道信号的幅值,  $N_1(t), N_2(t)$  为解调结果中的噪声,  $\varphi$  为两通道间相位差,  $f_{\text{sig}}$  为信号频率,  $t$  为时间。

实际处理的信号为  $V_1(t), V_2(t)$  采样后的离散散点序列  $V_1(i), V_2(i)$ , 相应的相位差  $\varphi$  离散计算公式<sup>[14]</sup>为

$$\varphi = \arccos \left[ \frac{\sum_{i=0}^{n-1} V_1(i) V_2(i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} V_1^2(i) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} V_2^2(i)}} \right]. \quad (3)$$

将传感系统中其中一通道作为参考通道,其解调结果为  $V_1(i)$ , 其他通道信号依次作为  $V_2(i)$ , 代入(3)式得到各通道与参考通道的相位差,根据相位差计算结果得到系统通道间的相位一致性。

### 3 系统通道相位一致性分析

对于上述的多通道 FLS 系统,以模数转换为分界点可将系统分为模拟和数字两部分,如图 1 所示,分别进行相位一致性的分析。

#### 3.1 模拟部分通道间相位一致性

在系统的模拟部分,首先分析单通道中所探测的信号的相位延迟,进而分析模拟部分通道间的相位一致性,主要是各通道传感器波长差异对通道间相位一致性的影响。

根据图 1 中模拟部分光路图,首先讨论光路传

输引入的相位延迟  $\varphi_{\text{fib}}$ , 其指光信号从光纤激光器发出,在光纤中传输,直到由探测器接收的整个传输过程中引入的相位延迟,可表述<sup>[15]</sup>为

$$\varphi_{\text{fib}} = 2\pi f_{\text{sig}} \cdot \frac{n_{\lambda} L_{\text{fib}}}{c}, \quad (4)$$

式中  $L_{\text{fib}}$  为从 DFB 光纤激光器到光电探测器整个光纤光路的总长度,  $c$  为真空中的光速。光信号经光路传输后进入光电探测器。本实验中采用 PIN 二极管作为光电探测元件,其光电转换延时为  $t_{\text{PD}}$ , 因此,对于频率为  $f_{\text{sig}}$  的信号,光电转换引入的相位延迟<sup>[16]</sup>为

$$\varphi_{\text{PD}} = 2\pi f_{\text{sig}} t_{\text{PD}}. \quad (5)$$

经光电转换后的模拟电信号进入放大电路进行信号放大,放大电路对于输入信号所引入的相移  $\varphi_{\text{amp}}$  满足<sup>[17]</sup>

$$\varphi_{\text{amp}} = -\arctan\left(\frac{f_{\text{sig}}}{f_{\text{H}}}\right), \quad (6)$$

式中  $f_{\text{H}}$  为放大电路的上限截止频率。放大的模拟信号进入模数采集卡,系统中采用的多通道同步模数转化卡,其前端的放大器电路是引入延迟的主要因素,因此模数转换卡引入的相位延迟  $\varphi_{\text{L.A}}$  与(6)式中  $\varphi_{\text{amp}}$  计算原理相同。

基于前面的分析,当传感系统各通道采用相同的探测器、放大器,以及模数转换卡时,因传感器波长差异所导致的相位延迟将成为系统通道间相位一致性主要的影响因素。对于波长  $\lambda$  的传感器其在光纤中传输的折射率  $n_{\lambda}$  可近似表述为<sup>[18]</sup>

$$n_{\lambda} = A_0 + \frac{B_0}{\lambda^2}, \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为光波波长,  $A_0, B_0$  为常数。由(7)式可得到波长为  $\lambda_0, \lambda_1$  的激光信号在光纤中传输的折射率,代入(4)式,分别计算出  $\lambda_0, \lambda_1$  两通道光波的相位延迟,进而得到其在光路中传输的相位差

$$\Delta\varphi_{\text{fib}} = 2\pi f_{\text{sig}} \left( \frac{n_{\lambda_0} L_{\text{fib}}}{c} - \frac{n_{\lambda_1} L_{\text{fib}}}{c} \right). \quad (8)$$

### 3.2 数字部分通道间相位一致性

数字部分相位一致性分析主要如图 2 所示 PGC 解调算法各个步骤所带来的相移分析以及通道间的相位一致性分析。首先讨论低通滤波所引入的相位延迟  $\varphi_{LP}$ , 为保证低通滤波器不会对输入信号产生相位扭曲, 系统采用具有线性相位的有限长响应(FIR)滤波器, 对于频率为  $f_{sig}$  的信号, 在采样频率为  $f_s$  情况下, 滤波器引入的相位延迟<sup>[19]</sup>

$$\varphi_{LP} = [2\pi f_{sig} \times (N-1)] / (2 \times f_s), \quad (9)$$

式中  $N$  为高通滤波器阶数,  $f_s$  为采样频率。微分和积分作为 PGC 解调算法的两个重要步骤, 分别引入  $\pi/2$  的相移, 对于每个通道而言都是固定值。由于图 2 中高通滤波同样采用具有线性相位的 FIR 滤波器, 其引入的相位延迟  $\varphi_{HP}$  与之前讨论的低通滤波器原理一致, 可表述为

$$\varphi_{HP} = [2\pi f_{sig} \times (N-1)] / (2 \times f_s). \quad (10)$$

从以上分析可以看出, 系统数字部分各通道间的相位一致性主要和各通道中低通以及高通滤波器的阶数设置有关, 当采用相同的参数设置时, 数字部分各通道间相位差为 0。

## 4 理论计算

根据上述系统通道相位一致性分析, 结合传感系统的各项参数, 对模拟和数字部分中相位一致性的影响因素分别进行初步计算及讨论。

### 4.1 模拟部分

实验系统中从 DFB 光纤激光器到探测器光纤光路的总长度  $L_{fb}$  约 20 m, 折射率  $n_a$  为 1.456, 光速  $c$  为  $3 \times 10^8$  m/s, 信号频率  $f_{sig}$  为 2 kHz, 根据(4)式得到相移  $\varphi_{fb}$  为 0.001 rad。系统所采用的 PIN 管最大响应时间  $t_{PD}$  为 1.15 ns。对于  $f_{sig}$  为 2 kHz 的信号, 根据(5)式光电转换引入的相移  $\varphi_{PD}$  为  $1.4 \times 10^{-5}$  rad。系统中探测器放大电路的上限截止频率  $f_H$  为 100 kHz, 对于  $f_{sig}$  为 2 kHz 的信号, 代入(6)式计算得到探测器引入相移  $\varphi_{amp}$  为 -1.15 rad。实验系统采用的模数转换卡放大电路带宽为 420 kHz, 对于频率  $f_{sig}$  为 5 kHz 的信号, 代入(6)式得到  $\varphi_{LA}$  为 -0.6821 rad。

当系统各通道采用相同的探测器、放大电路和模数转换卡时, 通道间传感器波长差异成为影响系统模拟部分通道间相位一致性的唯一因素。对于波长为  $\lambda_0 = 1530$  nm,  $\lambda_1 = 1550$  nm 的 FLS 通道, 由于  $(\lambda_1^2 - \lambda_0^2) / \lambda_1^2 = 0.025$ , 根据前面的计算, 当折射率  $n_a$  为 1.456 时, 对于  $f_{sig}$  为 2 kHz 的信号, 整个光路相位延迟  $\varphi_{fb}$  为 0.001 rad, 因此根据(8)式通道间相位

差  $\Delta\varphi_{fb} < 2.5 \times 10^{-5}$  rad。

根据前面的计算结果可以看出, 传感器波长差异引入的通道间相位差小于测量方法分辨率。因此, 模拟部分对系统各通道间相位一致性的影响可以忽略。

### 4.2 数字部分

基于 3.2 节中的分析, 低通和高通滤波器的阶数设置是数字部分通道相位延迟的主要影响因素, 由(9)式和(10)式可知, 低通和高通滤波器对相位延迟的影响可作类比分析, 因此本节以低通滤波器为例进行讨论。

在采样频率  $f_s$  为 100 kHz 情况下, 当信号频率  $f_{sig}$  为 200 Hz 时, 根据(9)式, 求得阶数为  $N$  阶的低通滤波器引入的相位延迟  $\varphi_{LP} = (N-1)\pi/500$ 。因此低通滤波器阶数每变化 1 阶, 将会带来  $\pi/500$ , 即 0.006 rad 的相位变化。

## 5 实 验

为了验证理论分析及计算结果, 进行了如图 1 所示的两通道 FLS 系统相位一致性测试实验。实验采用波长为 980 nm, 功率 150 mW 的半导体激光器来抽运中心波长分别为  $\lambda_0 = 1530.41$  nm,  $\lambda_1 = 1545.30$  nm 的两支光纤激光器。产生的激光经过 980/1550 WDM 进入隔离度为 45 dB 光纤隔离器。实验中采用的非平衡迈克耳孙干涉仪臂长差为 5 m。系统采用的 PGC 载波频率为 5 kHz, 实现的相位调制幅度为 2.64 rad。干涉仪的输出光信号经波长间隔为 300 GHz(对应波长间隔为 2.4 nm), 相邻通道隔离度为 45 dB 的 DWDM 分波后, 由相应的 PIN 管进行接收。采样频率  $f_s$  为 100 kS/s(S: samples)的同步模数转换卡(NI-USB-9215)将探测器输出的模拟电信号转换为数字信号, 将数字信号送入计算机, 运用 LabVIEW 编写程序实现 PGC 算法还原出外界信号, 并实现了用互相关法计算两通道间的相位差。

实验中, 将两支激光器以相同的形式粘贴在同一 PZT 上, 用信号发生器产生频率为 200 Hz 的正弦电压信号, 施加在 PZT 上, 使两支激光器获得相位相同的动态应变信号。将解调系统输出的两路解调结果送入相位差计算模块, 测试两者之间的相位差, 并记录 400 s 时间的相位差测试结果。

两通道均采用采样频率为 100 kS/s, 高低通截止频率分别为 3500 Hz, 2500 Hz 的 FIR 低通滤波器, 依次改变两通道中低通滤波器的阶数设置得到

不同的相位差测试结果 400 s 时间内的平均值, 分别如表 1 中序号 a, b, c 所示, 最后两通道设置相同的滤波器参数, 得到的相位差测试结果平均值如序号 d 所示。

表 1 不同低通滤波器设置下两通道光纤激光传感系统通道间的相位差

Table 1 Phase difference of two channels DFB FLS system with different parameters of lowpass filters

No.	Sensor wavelength /nm	Filter steps	Phase difference /rad
a	1530	1001	35.98
	1545	1101	
b	1530	1001	71.97
	1545	1201	
c	1530	1001	107.99
	1545	1301	
d	1530	1001	-0.01
	1545	1001	

从表 1 中的相位差测试结果可以看出, 序号 a, b, c 中两通道滤波器的阶数分别相差 100, 200, 300 阶, 对应通道间相位差分别为 35.98, 71.97, 107.99 rad, 与依据(9)式计算的理论值 36, 72, 108 rad 最大差值为 0.03 rad, 在相位差测试精度范围之内。序号 d 中设置两通道滤波器参数相同, 测得两通道间相位差为 -0.01 rad。整个传感系统通道间的相位差与因数字部分滤波器的阶数设置引入的通道间相位差一致。实验结果表明, 传感器波长差异对通道间相位差的影响可以忽略, 符合理论分析的结果。因此, 在各通道具有相同参数设置的多通道 FLS 系统中, 传感器波长差异不会对通道一致性带来影响。

## 6 结 论

从理论上分析了影响多通道光纤传感系统通道间相位一致性的因素, 并结合系统参数对理论分析进行了计算。进而构建了两通道光纤激光传感系统相位一致性测试实验, 实验结果与理论分析及计算的结果一致。当传感系统各通道的参数设置相同时, 各通道解调结果间具有高度的相位一致性, 传感器波长差异对通道间相位一致性的影响可以忽略。

## 参 考 文 献

- G. A. Cranch, G. Flockhart, C. K. Kirkendall. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. *IEEE, Sens. J.*, 2008, **8**(7): 1161~1172
- K. P. Koo, A. D. Kersey. Fibre laser sensor with ultrahigh strain resolution using interferometric interrogation[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(14): 1180~1182
- D. J. Hill, P. J. Nash, D. A. Jackson *et al.*. A fiber laser hydrophone array[C]. *SPIE*, 1999, **3860**: 55~66
- S. Foster, A. Tikhomirov, M. Englund *et al.*. A 16 channel fibre laser sensor array[C]. *Conf. Optical Fiber Sensors*, 2006, FA4
- Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91  
肖浩, 李芳, 王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 87~91
- Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98  
王泽锋, 胡永明, 孟洲等. 干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 92~98
- Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic-hydrophone using phase generated carrier techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1536~1540  
曹家年, 张立昆, 李绪友等. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1536~1540
- Gu Hongcan, Yuan Bingcheng, Huang Junbin *et al.*. Theoretical and experimental analysis of an active optical fiber hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2316~2320  
顾宏灿, 苑秉成, 黄俊斌等. 一种有源型光纤水听器原理与实验分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2316~2320
- Hu Peng, Yang Yixin. Simulation of virtual array beamforming algorithm based on least squares estimator [J]. *Computer Simulation*, 2007, **24**(1): 323~325  
胡鹏, 杨益新. 基于最小二乘估计的虚拟阵元波束形成仿真[J]. *计算机仿真*, 2007, **24**(1): 323~325
- Liu Bosheng, Tan Baojing. Simulation study on errors for evaluation of target azimuth by single vector transducer[J]. *J. Harbin Engineering University*, 2003, **24**(5): 491~495  
刘伯胜, 田宝晶. 矢量传感器估计目标方位的误差的仿真研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, **24**(5): 491~495
- A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 518~520
- C. K. Kirkendall, Anthony Dandridge. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Lasers and Electro-Optics*, 2002, **393**(1): 197~216
- Zhou Xiaodong, Tang Weizhong, Zhang Yu. Realization of phase generated carrier scheme interferometric fiber optic sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1177~1181  
周效东, 汤伟中, 张宇. 干涉型光纤传感器相位载波调制-解调技术的研究与实现[J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1177~1181
- Wu Junqing. Research of digital measurement for phase difference[J]. *J. Basic Science and Engineering*, 2005, **13**(1): 99~104  
吴俊清. 相位差的数字化测量研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, **13**(1): 99~104
- Gu Wanyi. *Optical Fiber Communication*[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2006. 1~4  
顾贻仪. *光纤通信*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 1~4
- Zhang Zhiwei. *Optoelectronics Testing Technology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005, 66~67  
张志伟. *光电检测技术*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 66~67
- Tong Shibai. *Analog Electronic Technology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 211~212  
童诗白. *模拟电子技术基础*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 211~212
- Liang Quanting. *Physical Optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 42~44  
梁铨廷. *物理光学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 42~44
- Sanjit, K. Mitra. *Digital Signal Processing, A Computer-Based Approach*[M]. 2nd Edition, Sun Hong, Yu Xiangyu Trans.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005, 307~311  
Sanjit, K. Mitra. *数字信号处理——基于计算机的方法*[M]. 第二版. 孙洪, 余翔宇译. 北京: 电子工业出版社, 2005, 307~311