

文章编号: 0253-2239(2008)12-2316-05

一种有源型光纤水听器原理与实验分析

顾宏灿 苑秉成 黄俊斌 谭波 李日忠 李玉

(海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要 分析了一种有源型光纤水听器的水声传感原理, 在一段掺铒光纤中写入具有 π 相移的光纤光栅构成光纤激光器, 水声压力作用在激光器上引起激光波长的移位, 采用干涉法检测出波长移位引起的相位变化即得到声压的信息。水声探测实验表明, 有源型光纤水听器的声压灵敏度为 -166.5 dB(参考值 $1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$)。将不同工作波长的四元光纤水听器串接于一根光纤内组成水听器阵列, 使用带通波分复用器将阵列发出的激光分离至各独立通道后检测出相应的声压信号, 测得水听器之间的级串扰小于 -60 dB, 且单元水听器水声响应的动态范围不受影响。

关键词 光纤水听器; 有源型; 光纤激光器; 波分复用

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2316

Theoretical and Experimental Analysis of an Active Optic Fiber Hydrophone

Gu Hongcan Yuan Bingcheng Huang Junbin Tan Bo Li Rizhong Li Yu

(Department of Arms Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract The acoustic sensing characteristics of an active optic fiber hydrophone was analyzed. The fiber laser sensor is made by writing Bragg grating with π phase-shift into a section of Er-doped fiber. Acoustic pressure applied to the fiber laser induces laser wavelength shift. The wavelength shift is demodulated through interferometric interrogation scheme, and the acoustic pressure information is obtained. The sensitivity experiment shows that the sensitivity is -166.5 dB(reference value, $1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$). Four optic fiber hydrophones were spliced along a single fiber to form an array. A band-pass wavelength division multiplexer was used to separate the composite interferometer signal into discrete channels and demodulate the acoustic pressure information. The experiment shows that the crosstalk of the array is less than -60 dB, and it will not affect the dynamic response range of a single hydrophone.

Key words optic fiber hydrophone; active; fiber laser; wavelength division multiplexing

1 引言

目前光纤水听器使用光纤绕制的干涉仪作为水声传感单元^[1,2], 为了达到灵敏度要求, 它的传感臂光纤长度一般达到百米以上, 其体积与压电型水听器的相比没有明显的优势。而且光纤水听器中的传感单元为无源的, 光纤干涉仪只作为水声探测元件和光传输的介质, 不具备本征的波长可复用性, 使用波分复用技术组成阵列时需使用不同波长的激光作为光源^[3], 技术实现复杂, 系统体积较大。分布式反馈光纤激光器作为水声传感单元其直径即为光纤的外径, 体积较小, 且可利用激光器的本征可

复用特性, 减小了光纤水听器阵列系统的体积, 因此基于分布式反馈(DFB)光纤激光器的有源型光纤水听器在需要小尺寸、高灵敏度水听器的领域有广泛的应用潜力^[4~6]。

本文分析了一种基于分布式反馈光纤激光器的有源型光纤水听器的水声传感原理, 并进行了水声探测实验。

2 分布式反馈光纤激光器水声传感原理

分布式反馈光纤激光器的结构如图 1 所示, 在掺铒光纤中写入一段光纤光栅, 利用光栅对激光的

收稿日期: 2008-03-21; 收到修改稿日期: 2008-07-11

作者简介: 顾宏灿(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究工作为光纤传感技术。E-mail: guhongcan@yahoo.com.cn

导师简介: 苑秉成(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水声制导。E-mail: ybc19502000@yahoo.com.cn

分布反馈构成激光谐振腔，在抽运光的作用下满足激射条件即发出激光。当光栅中引入 π 相移时，DFB 光纤激光器在光栅的中心波长处能够实现稳定的单纵模激光输出^[4~6]，即 π 相移 DFB 光纤激光器的运行波长为

$$\lambda = 2n_c\Lambda, \quad (1)$$

式中 Λ 为光栅周期， n_c 为纤芯的有效折射率。

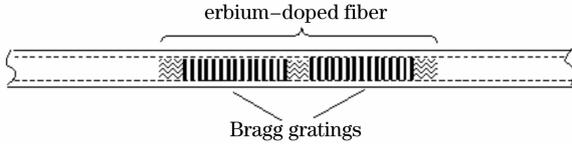


图 1 DFB 光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of DFB fiber laser

由(1)式可知，掺铒光纤芯区有效折射率的变化或光栅周期的变化都将导致 π 相移 DFB 光纤激光器运行波长的变化，当光纤激光器受到外界压力作用时，压力产生的应变将改变光纤的有效折射率和光栅的周期，此时 DFB 光纤激光器运行波长的变化量可由下式确定^[7]：

$$\Delta\lambda = 2n_c\Lambda\epsilon_z - 2n_c\Lambda\left\{n_c^2/2[(p_{11} + p_{12})\epsilon_r + p_{12}\epsilon_z]\right\} \quad (2)$$

式中， P_{11} 和 P_{12} 均为光弹系数， ϵ_z 、 ϵ_r 分别为光纤轴向和径向应变，在均匀水声压力作用下^[8]，

$$\epsilon_r = \epsilon_z = \frac{(2\nu - 1)P}{E}, \quad (3)$$

E 、 ν 分别为石英晶体的杨氏模量和泊松比，

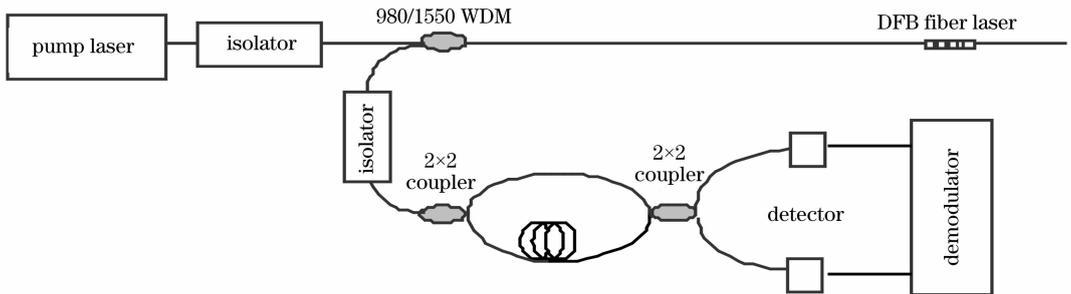


图 2 基于非平衡 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的波长位移检测方案

Fig. 2 Wavelength shift detection scheme based on unbalanced Mach-Zehnder fiber interferometer

非平衡光纤干涉仪的输出可表示为

$$V = V_0[1 \pm \alpha \cos(\Delta\varphi + \varphi_0)], \quad (5)$$

式中 V_0 为成正比于输入激光光强的电压， α 为干涉条纹可见度，与激光的相干度有关， φ_0 包含干涉仪的初始相位和相位漂移， $\Delta\varphi$ 为激光波长位移引起的相位变化：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_c d}{\lambda^2} \Delta\lambda. \quad (6)$$

$E = 7.2 \times 10^{10}$ Pa， $\nu = 0.17$ 。由(3)式计算得出声压应变灵敏度为 $\epsilon_z = -9.17 \times 10^{-12}$ stain/pa。

将(3)式代入(2)式化简得

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(1 - \frac{n_c^2}{2}(p_{11} + 2p_{12})\right)\epsilon_z. \quad (4)$$

已知光栅有效折射率系数 n_c 和周期 Λ 分别为 1.456 和 528.8 nm，激光工作波长 λ 为 1540 nm。光弹系数 P_{11} 和 P_{12} 分别取值 0.121、0.265。使用(4)式计算得出均匀水声压力作用下声压引起的波长位移量为 -4.38×10^{-9} nm/Pa。

从分析中可见，DFB 光纤激光器应用于水声探测，其传感单元即为一段掺铒的有源光纤，且其出射激光波长的位移正比于外界声压的变化，因此只要检测出波长的位移量就可得出外界声压变化的大小。目前有很多检测波长位移的方法，其中干涉法可高灵敏地检测出波长的动态位移^[9]。

3 DFB 光纤激光器水声传感信号检测技术

干涉法检测波长位移的原理如图 2 所示。在 980 nm 抽运光源的作用下，DFB 光纤激光器出射的激光通过 980/1550 nm 光纤波分复用器传输至非平衡马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 光纤干涉仪，光纤干涉仪由两个 2×2 耦合器组成，耦合器的输出端通过光电探测器转换成电信号后通过信号检测电路输出正比于水声大小的电信号。

d 为非平衡路径。可以采用相位载波调制解调技术将式(5)中成正比于波长位移的相位变化解调出来^[10~13]。

不平衡路径 d 与激光的带宽有关，干涉仪的非平衡路径必须小于激光的有效相关长度，由于这种 DFB 光纤激光器的线宽小于 50 kHz，有效干涉长度很长(实验测量达几千米)，这允许使用大的光学不平衡路径，极大地提高系统的灵敏度。例如使用

200 m 的不平衡路径, 激光工作波长为 1540 nm, 则波长-相位的转换因子为 7.7×10^5 rad/nm, 应用上述声压和波长位移的关系, 则声压相位灵敏度为 3.4×10^{-9} rad/ μ Pa, 即光纤激光器的声压灵敏度为 -169.4 dB(参考值 1 rad/ μ Pa)。

4 实 验

4.1 响应灵敏度实验

实验中, 将 DFB 光纤激光器施加一定的应力后固定于金属框架上, 外径 4 mm, 长 7 cm, 其激光光谱如图 3 所示。

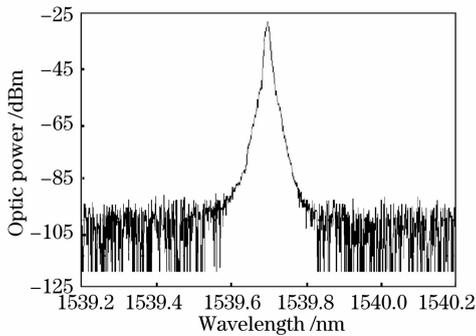


图 3 DFB 光纤激光器的激光光谱
Fig. 3 Spectrum of DFB laser

金属支架使用聚氨酯涂覆保护后制成有源型光纤水听器, 使用比较法在消声水池内测试了该光纤水听器 6.3 kHz 水声响应灵敏度和线性度。980 nm 抽运源出光功率为 115 mW, 信号解调采用自制的光纤水听器信号解调仪, 解调系统中相位和电压的转换因子为 8, 即电压相对于相位有 18 dB(参考值 1 V/rad)的增益, 光纤干涉仪非平衡长度为 200 m, 标准水听器为 B&K Hydrophone Type 8100, 灵敏度为 -216.3 dB(参考值 1 V/ μ Pa)。

待测光纤水听器、标准水听器靠近放置于水下 1.8 m 深处, 距位于同一深度的换能器 2 m。在换能器发射频率从 6.3 kHz 按 1/3 倍频程增至 40 kHz 的过程中, 光纤水听器均有与发射频率同频的水声响应, 图 4 为换能器发射频率为 6.3 kHz 时水声信号解调仪输出的信号。解调仪的输出信号频谱和发射换能器的发射频率一致。

换能器发射频率为 6.3 kHz, 标准水听器电压输出为 28.8μ V 时, 光纤水听器信号解调仪输出为 71.1 mV, 根据标准水听器的声压灵敏度推算得光纤水听器的声压, 计算出有源型光纤水听器的灵敏度为 -148.5 dB(参考值 1 V/ μ Pa), 减去电压相对于相位的 18 dB(参考值 1 V/rad)增益得 -166.5 dB(参考

值 1 rad/ μ Pa), 与理论分析的 -169.4 dB(参考值 1 rad/ μ Pa)有 2.9 dB 的误差, 这可能来自于光纤激光器的机械共振, 需要进一步的分析。

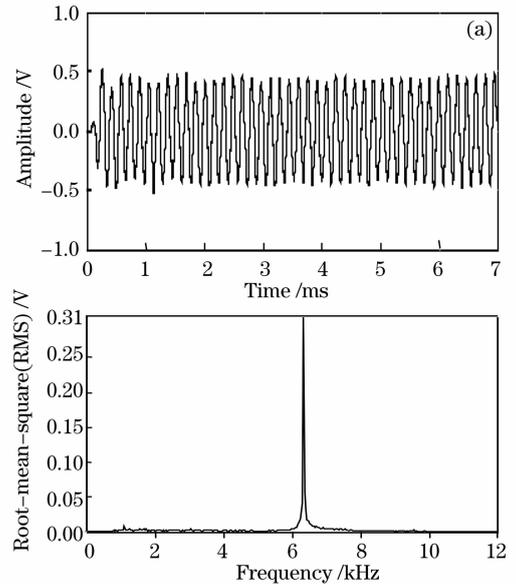


图 4 换能器发射 6.3 kHz 水声信号时解调仪的输出(a) 时域波形; (b) 信号频谱

Fig. 4 Demodulator output when the frequency of the acoustic pressure is 6.3 KHz (a) time domain waveform; (b) frequency spectrum

改变发射换能器的驱动功率, 使光纤水听器所受声压从 0.1 Pa 升至 33.6 Pa(根据标准水听器计算), 记录解调仪的输出电压。图 5 为测试结果, 通过最小二乘法拟合, 得拟合度为 0.9994, 灵敏度为 38.29 mV/Pa, 即 -148.34 dB(参考值 1 V/ μ Pa), 与上述灵敏度测试结果一致。因实验用的光纤水听器具有指向性, 在不改变水听器和发射换能器相对位置的情况下, 线性度测试具有良好的重复性, 不同测量数据组拟合所得灵敏度值围绕 -148.6 dB(参考值 1 V/ μ Pa)有小于 ± 0.5 dB 波动, 实验中未发现灵敏

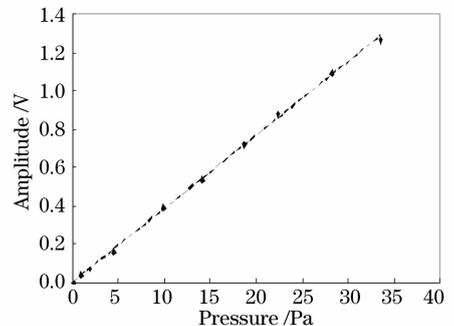


图 5 有源型光纤水听器线性度测试

Fig. 5 Linearity measurements of the active optic fiber hydrophone

度响应存在迟滞回线,实验结果表明该有源型光纤水听器可应用于水声信号的探测。

4.2 波分复用实验

将工作波长分别为 1530 nm、1540 nm、1550 nm 和 1560 nm 的四元 DFB 光纤激光器按序串接于一根

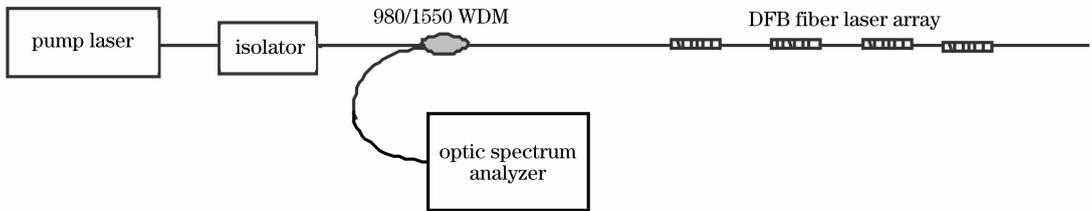


图 6 基于 DFB 光纤激光器的有源型光纤水听器阵列原理

Fig. 6 Principle of the active optical fiber hydrophone array based on the fiber laser

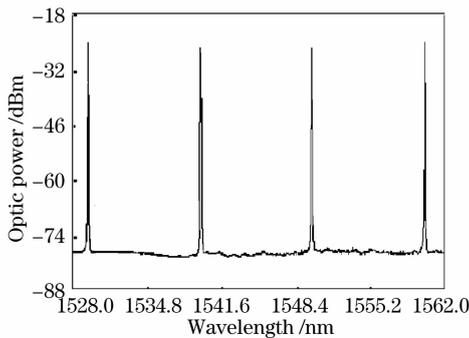


图 7 四元 DFB 光纤激光器串联光谱

Fig. 7 Spectrum of output laser from the concatenated array of four DFB fiber lasers

光谱仪显示各激光器能正常出光,但各路激光功率有所下降。各激光器单独工作时,光谱仪显示 1530 nm、1540 nm、1550 nm 和 1560 nm 激光器的光功率分别为 -18.95 dBm、 -19.57 dBm、 -18.96 dBm 和 -17.53 dBm。四元光纤激光器串联后光谱仪显示各路激光功率分别为: -19.61 dBm、 -20.62 dBm、 -20.9 dBm 和 -19.91 dBm, 分别下降 0.66 dBm、 1.05 dBm、 1.94 dBm 和 2.38 dBm, 由于激光器对抽运激光的吸收以及光纤熔接损耗,离抽运光源越远的激光器出射光功率降低幅度越大。

使用选通中心波长分别为 1533.9 nm、1541.8 nm、1549.7 nm 和 1557.8 nm 的商用带通波分复用器(BWDM)将四元 DFB 光纤激光器发出的激光分离至各通道, BWDM 各通道谱宽 6.5 nm, 通道隔离度大于 45 dB, 插入损耗小于 1.3 dB。对分离出的信号使用图 2 所示的干涉法检测波长位移引起的相位变化。

对各个光纤水听器单元施加正弦声压测试信号,其他三个水听器进行声学隔离并测试解调输出

光纤内构建光纤水听器阵列,通过同一个 980 nm 抽运光提供激励,抽运浦光功率 115 mW,阵列发出的激光经 980/1550 nm 光纤波分复用器后连接光谱仪,系统原理如图 6 所示。串联后阵列出射激光光谱如图 7 所示。

的残留信号级,这样就获得系统的通道间串扰。对激光工作波长为 1540 nm 的光纤水听器施加 6.3 kHz 正弦声压信号,其解调输出功率谱如图 8 所示。

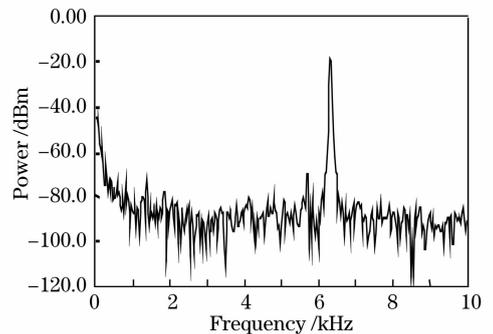


图 8 水声压力作用下光纤水听器输出功率谱

Fig. 8 Power spectrum of the output from the active optical fiber hydrophone with acoustic pressure

同时测量其他三个声学隔离的光纤水听器解调输出信号的功率谱,其中激光工作波长为 1550 nm 的光纤水听器输出信号功率谱如图 9 所示。

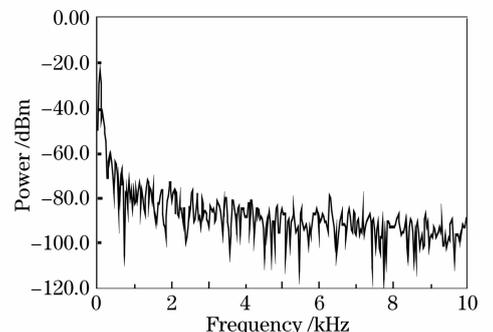


图 9 无声压作用的光纤水听器的输出功率谱

Fig. 9 Power spectrum of the output from the active optical fiber hydrophone without acoustic pressure

图 8 表明作用于光纤水听器的声压功率谱级大

于-20 dBm。图9中的功率谱级小于-80 dBm。激光工作波长为1530 nm、1560 nm的光纤水听器输出信号的功率谱与图9相似,表明串扰级小于-60 dBm。对其他光纤水听器单独施加声压作用时,测试结果与之相同。

根据(4)式计算的波长声压灵敏度 -4.38×10^{-9} nm/Pa,则在 1×10^3 Pa的声压作用下,出射激光波长移动 4.38×10^{-6} nm,与通道谱宽6.5 nm相比为小量,因此复用成阵不影响单元水听器响应的动态范围。

实验表明DFB光纤激光器具有本征波长可复用特性,串接于一根光纤内能独立发出激光,通道间串扰小于-60 dB,且单元水听器响应的动态范围不受影响,可以保持单个水听器原有的性能,在实用化过程中,一定功率的抽运光源可复用水听器的最大数量需进行实验,可考虑应用空分和波分技术构建大规模的水听器阵列。

5 结 论

分析了一种基于分布式反馈光纤激光器的有源型光纤水听器的水声传感原理,其水声传感单元即为一段掺铒的有源光纤,比干涉型光纤水听器的体积小,同时具有光纤水听器灵敏度高、抗电磁干扰等优点。使用200 m不平衡路径的光纤干涉仪检测声压引起的相位变化,则该型光纤水听器的声压灵敏度为-169.4 dB(参考值1 rad/ μ Pa)。水声探测实验结果表明,该光纤水听器可应用于水声传感,由于其本征的波分复用特性,可使用WDM技术在单根光纤内复用多个光纤激光器组成水听器阵列。

参 考 文 献

- 1 Cao Jianian, Bao Jianxin, Li Xuyou *et al.*. Fiber optic hydrophone[J]. *Optic Communication Technology* [J]. 1997, **21**(2): 90~94(in Chinese)
曹家年,包建新,李绪友等. 光纤水听器[J]. 光通信技术, 1997, **21**(2): 90~94
- 2 David Hill, Phil Nash. Fibre-optic hydrophone array for acoustic

- surveillance in the littoral[C]. *SPIE*, 2005, **5780**: 1~10
- 3 Geoffrey A. Cranch, Philip J. Nash. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5): 687~699
- 4 Fan Wei, Li Xuechun, Chen Bai *et al.*. Theoretical analysis of Yb³⁺-doped phase-shift fibre distributed feedback lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 710~712(in Chinese)
范 薇,李学春,陈 柏等. Yb³⁺相移分布反馈光纤激光器的理论分析[J]. 光学学报, 2002, **22**(6): 710~712
- 5 Kuthan Yelen, Louise M. B. Hickey, Mikhail N. Zervas. A new design approach for fiber DFB lasers with improved efficiency [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(6): 711~720
- 6 Wang Li, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Fabrication of Yb-doped phase-shifted fiber grating laser [J]. *Chin. J. Laser*, 2007, **34**(12): 1617~1620(in Chinese)
王 利,陈 柏,陈嘉琳等. 一种制作掺Yb相移光纤光栅激光器的实验方案[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1617~1620
- 7 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsing-hua University Press, 2000, 199~204 (in Chinese)
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000, 199~204
- 8 D. J. Hill, P. J. Nash, D. A. Jacksonb *et al.*. A fiber laser hydrophone array[C]. *SPIE*, 1999, **3860**: 55~66
- 9 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 10 Shen Liang, Ye Xianfeng, Li Zheneng. Research on demodulation of interferometric fiber optic hydrophone [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(2): 105~108(in Chinese)
沈 梁,叶险峰,李志能. 干涉型光纤水听器调制解调方案研究 [J]. 半导体光电, 2001, **22**(2): 105~108
- 11 Yuan Daling, Li Ping, Zhang Renhe. Implementation of PGC demodulation for interferometric optic fiber hydrophone based on DSP[J]. *J. Transducer Technol.*, 2005, **24**(8): 57~59 (in Chinese)
袁大岭,李 平,张仁和. 干涉型光纤水听器 PGC解调的 DSP实现[J]. 传感器技术, 2005, **24**(8): 57~59
- 12 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(in Chinese)
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
- 13 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A J₀-J₁ method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor[J]. *Chin. J. Laser*, 2007, **34**(1): 103~106 (in Chinese)
王泽锋,罗 洪,熊水东等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的J₀-J₁法[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 103~106