

基于微纳光纤全光相位调制器的 PGC 解调系统

于 洋^{1,2} 张学亮¹ 孙世林¹ 宋章启¹ 孟 洲¹

¹国防科学技术大学海洋科学与工程研院, 湖南 长沙 410073

²91362 部队, 浙江 岱山 316200

摘要 基于光源内调制法的相位生成载波(PGC)解调系统中存在因干涉仪臂差及光源快速调谐引入环境相位噪声和光源相位噪声等问题,为此,建立了基于微纳光纤全光相位调制器的新型 PGC 解调系统。为满足 PGC 解调技术应用要求,设计了基于光吸收致热效应的微纳光纤全光相位调制器,调制带宽可达 10 kHz 以上。在此基础上,构建了光纤水听器 PGC 解调系统,并进行了模拟水声信号的测试解调研究。实验结果显示,该系统可以对 3 kHz 以下水声信号的进行良好解调。

关键词 光学器件;微纳光纤;全光调制器;光纤传感;相位生成载波

中图分类号 O431.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0710002

Study on PGC Demodulation System Based on All-Optical Microfiber Phase Modulator

Yu Yang^{1,2} Zhang Xueliang¹ Sun Shilin¹ Song Zhangqi¹ Meng Zhou¹

¹Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²Troops of 91362, Daishan, Zhejiang 264001, China

Abstract The current phase generated carrier (PGC) demodulation system based on light source internal modulation method has phase noises of environmental and light source introduced by the interferometer arms difference and the high speed light source tuning. Aiming at this, a new PGC demodulation system based on microfiber all-optical phase modulator is studied. To satisfy the PGC demodulation requirements, the microfiber all-optical phase modulator based on light absorbing thermal effect is designed with bandwidth exceeding 10 kHz. Based on this, the PGC demodulation system of fiber hydrophone is constructed, and used to study the detection and demodulation performance of underwater acoustic signal. Experimental results show that the proposed system can realize good demodulation performance for the underwater signal with frequency below 3 kHz.

Key words optical devices; microfiber; all-optical modulator; fiber sensing; phase generated carrier

OCIS codes 230.4000; 060.2370

1 引 言

当前,光纤水听器已成为光纤传感技术和水声探测技术的重要发展方向^[1-6]。为适应水下应用环境,对光纤水听器探头结构、解调系统及技术要求进行相应设计,即具备湿端全光特性。目前,相位生成载波(PGC)解调技术较为常用^[4-7],不仅可以解调干涉型光纤水听器,还可通过将波长参量信息转换成相位参量信息解调光纤光栅型光纤水听器。现有 PGC 解调技术的相位载波生成方法主要有光源内调制法和干涉仪外加调制法^[2,5]。其中,干涉仪外加调制法通常需在置于干涉仪中的相位调制器上外加电调制信号,故很难满足全光探头结构要求。而采用光源内调制法时,光纤干涉仪必须有一定臂差,且光源需要一定频率的快速调谐,导致该类水听器系统存在光源相位噪声和非平衡干涉仪结构引入额外环境相位噪声等问题。如能在干涉仪内实现全光相位调制,并将干涉仪保持到准平衡干涉仪结构,对解决上述光纤水听器噪声问题大有作为。

收稿日期: 2016-01-21; 收到修改稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61177073)

作者简介: 于 洋(1984—),男,博士,工程师,主要从事光纤传感、微纳光纤等方面的研究。E-mail: 56046728@qq.com

微纳光纤具有大比例倏逝波传输、强光场约束性、大波导色散和弯曲半径小等优良的光学特性^[8-11],近年来已取得较多研究成果。值得关注的是,基于微纳光纤的全光相位调制器已有报道^[12-13],其中一种基于光致热效应的全光相位调制器^[12],可置于常规光纤干涉仪中实现相位调制。但目前报道结果显示,该类型全光相位调制器的调制带宽较窄。为满足 PGC 解调技术应用要求,本文对基于光吸收致热效应的微纳光纤全光相位调制器进行了设计。在此基础上,开展了基于微纳光纤全光调制器的光纤水听器 PGC 解调系统构建及测试研究,并对模拟水声信号进行了解调测试实验。

2 基于微纳光纤全光调制器的 PGC 设计及性能测试

2.1 基于微纳光纤全光相位调制器的 PGC 基本工作原理及设计

目前,微纳光纤多由常规光纤或玻璃材料熔融拉锥而成^[8-11]。在微纳光纤拉制过程中容易引入外来杂质^[14],势必导致微纳光纤具备比常规通信光纤更高的非本征吸收。这些被吸收光的部分能量将会转化成热量,从而使微纳光纤的波导产生热致折射率变化,进而会对其内传输的信号光相位产生调制作用(即热光效应)。微纳光纤单位长度的体积小,故相比常规光纤其产生热光效应所需的调制光功率更小。其强光约束能力和较强的光吸收致热能力,使其相比常规光纤具备更高的光热相位调制效率,即可在较小的调制光作用下产生较大的光热相位调制响应幅度。另外,微纳光纤直径达亚微米量级,表面积体积比更大,故其相对于常规光纤具备更高的热传导效率^[15]。即微纳光纤本身更容易被加热,且吸收的光热量更容易释放出去,使其具备更高的光致热效应的调制响应速率。以上因素,为微纳光纤开发成基于光吸收致热效应的内光注入式全光相位调制器创造了先决条件。

设计了基于光致热效应的微纳光纤全光相位调制器,其基本工作原理是利用一路强度调制光注入微纳光纤以加热微纳光纤波导材料,进而对其中传输的另一路信号光产生光热相位调制作用。所用微纳光纤由常规光纤采用火焰扫描法拉制而成^[11]。整个微纳光纤器件包含直径达微米、亚微米的均匀腰区部分,和与常规光纤相连的锥形过渡段。

鉴于微纳光纤直径较小(在微米量级附近),其波导内径向温度梯度可以忽略不计。而其均匀腰区长度一般控制在几毫米到几十毫米,同样可忽略纵向温度梯度,即可忽略沿微纳光纤纵向的热传导。假设调制光为正弦形式强度调制光,即调制光功率为 $P_0 \sin(2ft)$,其中, P_0 为调制光功率幅度, f 为调制频率。则根据热传导理论,采用经典热传导方程,可推导出微纳光纤在调制光下的热光效应相位响应幅度为^[12]

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda_s} \frac{\partial n}{\partial T} \frac{\eta B P_0 L \sin(2\pi f t - \theta)}{\sqrt{(2\pi f)^2 + A^2}} - \frac{2\pi}{\lambda_s} \frac{\partial n}{\partial T} \frac{A B P_0 L \exp(-At)}{\sqrt{(2\pi f)^2 + A^2}}, \quad (1)$$

式中 $A = \frac{2h}{\rho c_v r}$, $B = \frac{\alpha}{\pi \rho c_v r^2}$, λ_s 是信号光波长, $\partial n / \partial T$ 是折射率温度系数(这里可忽略光纤的热膨胀系数,因为热膨胀系数对相位的贡献要比折射率系数小的多^[12,15]), η 是吸收损耗的光能量到热能量的传递效率, h 是空气的热传导系数, ρ 和 c_v 是微纳光纤的密度以及比热, L 是微纳光纤均匀腰区长度, r 是微纳光纤均匀腰区半径, α 是微纳光纤腰区损耗系数, θ 是微纳光纤对热响应的相位延迟(与调制激光激光器响应特性及微纳光纤材料参数等有关)。

由(1)式可见,微纳光纤均匀腰区长度 L 越大,腰区半径 r 越小,其在单位调制光功率调制下的热光效应相位响应幅度越大,调制器调制带宽也越大^[12]。但纳光纤腰区半径 r 过小,将增大器件插损,并增大器件制作难度。而微纳光纤腰区长度 L 过大,一方面会增大器件尺寸,另一方面将额外引入环境热噪声,降低器件调制稳定性。

为满足相位生成载波技术的相位解调应用需求,微纳光纤全光相位调制器的调制带宽需足够大(对于水声信号 PGC 解调应用,调制器调制带宽需达到 6 kHz)。故在保障系统稳定性和控制系统相位噪声的前提下,需尽量增大调制器调制带宽。参考文献[12]微纳光纤全光相位调制器的制作方法及器件调制性能,综合考虑了系统的信号解调带宽、调制器调制响应效率、器件插损、便于封装集成等因素,将微纳光纤全光相位调制器参数选为:器件整体损耗小于 3 dB,微纳光纤均匀腰区长度约为 20 mm,微纳光纤均匀腰区直径约为 2 μm 。

2.2 微纳光纤调制器基本性能测试

为测试所设计的 PGC 用微纳光纤全光相位调制器的调制性能,构建了基于压电陶瓷(PZT)外调制法的 PGC 解调测试系统。如图 1 所示,PGC 解调系统的光纤干涉仪为迈克耳孙型,由两个法拉第旋镜(FRM)和 3 dB 光纤耦合器组成。干涉仪其中一臂上约有 2 m 光纤缠绕在环形压电陶瓷上,通过调制在 PZT 上施加调制信号,实现解调系统的相位调制载波生成(即 PGC 外调制)。系统选用 1550 nm 的高相干光(1550 nm 半导体激光器,RIO,线宽约为 2 kHz)作为干涉仪工作信号光,经隔离器注入干涉仪中。

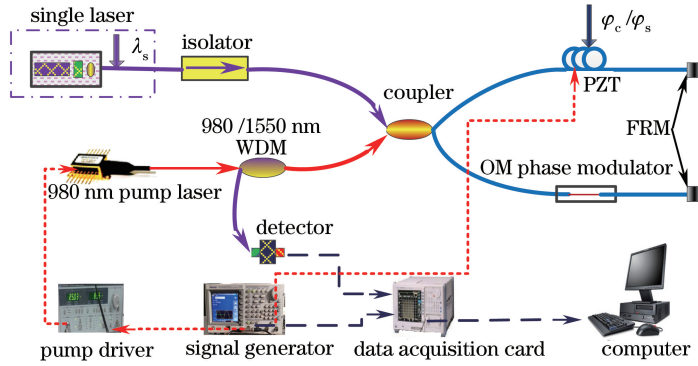


图 1 基于微纳光纤全光相位调制器 PGC 解调测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PGC demodulation system based on microfiber all-optical phase modulator

实验测试时,将微纳光纤调制器接置于干涉仪另一臂,通过内光加热调制微纳光纤,使干涉仪产生相位调制。系统采用 980 nm 抽运光,经 980/1550 nm 波分复用器(WDM)注入干涉仪中加热微纳光纤调制器。980 nm 抽运激光器由抽运驱动源(ILX Light wave LDC-37488B)控制,通过信号发生器在驱动源上施加不同信号,实现对 980 nm 抽运光的强度调制。干涉仪反射回的 1550 nm 干涉信号光则经 980/1550 nm 波分复用器(WDM)后,经光电探测器(New Focus, Model 1623)进行监测,再采集到计算机中进行 PGC 数字信号处理。采用 980/1550 nm WDM 可将 980 nm 抽运调制光耦合到干涉仪中,又可有效隔断 1550 nm 信号光中可能混有的 980 nm 抽运光。实验测试显示,扣除各种连接插损后,将会有约 70% 的 980 nm 抽运光耦合进入微纳光纤所在的干涉臂中。

对于光纤水听器 PGC 解调系统,载波调制后输出的干涉信号可表示为^[7]

$$V = M + N \cos [C \cos \omega_c t + \phi_s(t) + \phi_0], \quad (2)$$

式中 C 为载波调制信号产生的相位幅度, ω_c 为载波调制信号角频率, M 为与光强相关的直流项, N 为与光强和干涉条纹可见度相关的系数, $\phi_s(t)$ 为附加调制(声压、振动或其他相位调制)响应的相位信号, ϕ_0 是为环境引起的随机相位噪声(属于低频信号)。

PGC 解调方法是通过对干涉仪初始相位进行主动调制,使干涉仪具有较稳定的工作点。实验测试微纳光纤相位调制器工作性能前,先将施加在 PZT 上的调制信号频率(即载波信号频率)设定为 25 kHz,则该系统可以解调 12.5 kHz 以下的附加信号^[7]。通过调节 PZT 上调制信号幅度,使系统获得稳定的工作点。

实验时,首先采用不同调制频率及调制幅度的 980 nm 抽运调制光,对微纳光纤相位调制器进行调制,通过解调调制器的相位相应信号,测试调制器的工作性能。实验所采用的用于加热调制微纳光纤相位调制器的 980 nm 抽运光,均为经过标定的标准正弦信号强度调制光(调制深度 $M \approx 1$)。图 2 所示为,微纳光纤调制施加调制信号后,系统输出的原始相应信号,可见载波信号上附加有相应的相位调制信号。

通过 PGC 数字信号处理解调,系统可以解调出微纳光纤相位调制器的调制信号 $\phi_s(t)$ 。图 3 所示为,微纳光纤调制器上施加 6.25 kHz 调制信号时(对应 980 nm 抽运调试光功率约为 1 mW),系统解调输出的 1550 nm 信号光相位响应信号。实验结果显示,微纳光纤相位调制器输出的相位响应信号与施加的 980 nm 抽运调制的调制信号频率一致,可实现良好稳定的相位调制功能,PGC 解调测试系统可以稳定解调出相应的相位调制响应信号。

为测试微纳光纤相位调制器的调制带宽,在保持 980 nm 抽运光调制信号幅度不变的情况下(980 nm 抽

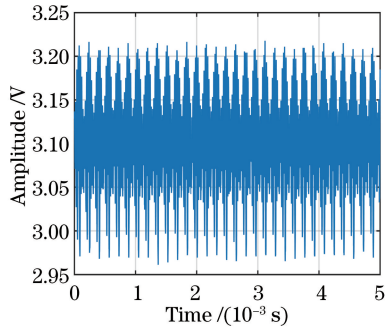


图 2 微纳光纤调制器调制频率为 6.25 kHz 时,系统解调出的响应信号

Fig. 2 Demodulated response signal with microfiber demodulation frequency of 6.25 kHz

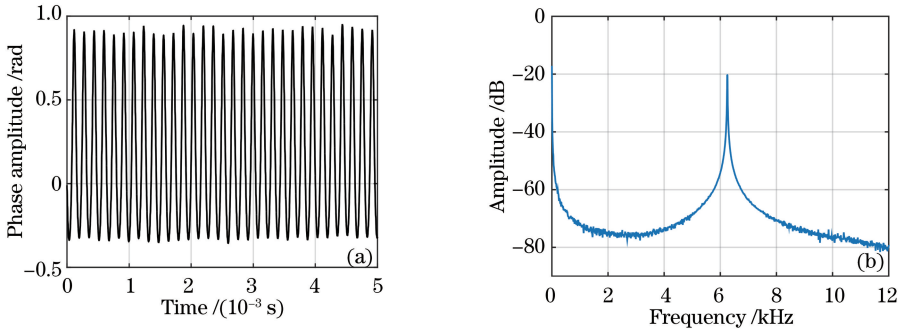


图 3 微纳光纤调制器调制频率为 6.25 kHz 时,系统解调出的解调信号。(a) 时域信号; (b) 频域信号

Fig. 3 Demodulation signal with microfiber demodulation frequency of 6.25 kHz.

(a) Time domain signal; (b) frequency domain signal

运光的平均调制光功为 2 mW,强度信号调制深度 $M \approx 1$),改变调制频率(0.1~10 kHz),对微纳光纤相位调制器的调制响应特性进行了测试,测试结果如图 4 所示。随着 980 nm 抽运光调制信号频率的增大,微纳光纤相位调制器的相位调制响应幅度逐渐减小,基本与调制频率呈反比关系。但在 10 kHz 以内,调制的相位相应幅度均可达到 1 rad 以上。可见该微纳光纤相位调制器在较小功率的 980 nm 抽运调制光作用下,即可实现较大幅度的相位调制相应,并具备较大的调制带宽。

为进一步测试该微纳光纤相位调制器的调制性能,还对其不同调制频率下的调制响应效率进行了测试。即在固定 980nm 抽运光调制频率的情况下,改变调制信号调制幅度,以测试调制的调制响应特性。图 5 为调制频率 6.25 kHz 时,微纳光纤相位调制器的调制响应测试结果。微纳光纤相位调制器的调制响应幅度与 980 nm 抽运调制光功率(即调制信号幅度)呈正比关系,且线性响应特性良好。该调制器在调制信号频率为

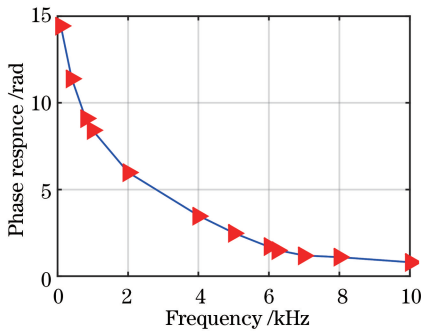


图 4 微纳光纤幅频响应特性测试结果

Fig. 4 Testing result of microfiber amplitude-frequency response characteristics

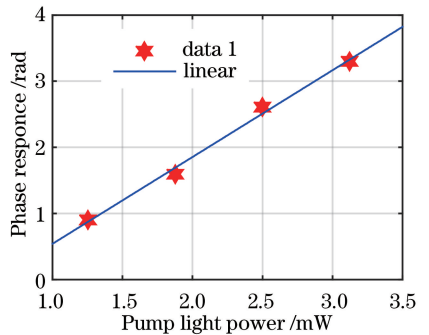


图 5 调制频率为 6.25 kHz 时,微纳光纤调制器幅度响应特性测试及线性拟合结果

Fig. 5 Testing and fitting results of microfiber amplitude response with demodulation frequency of 6.25 kHz

6.25 kHz, 调制响应效率约为 1.1 rad/mW。当 980 nm 抽运调制光功率达到约 3 mW 时, 该微纳光纤相位调制器即可实现 π 相位的调制幅度。

综合以上实验结果可见, 该微纳光纤相位调制器, 调制效率较高, 调制带宽较大。在较小功率的 980nm 抽运调制光作用下, 微纳光纤相位调制器即可以达到 10 kHz 的调制带宽, 基本满足光纤水听器 PGC 解调应用需求。

3 PGC 解调系统水声信号模拟测试

为验证微纳全光相位调制器作为光纤水听器 PGC 解调系统的相位载波生成外调制器的可行性, 在构建相应光纤水听器 PGC 解调系统的基础上, 进行了模拟水声信号测试解调。所构建的基于微纳光纤全光相位调制器的光纤水听器 PGC 解调系统, 其系统构成与图 1 所示的微纳光纤全光相位调制器 PGC 解调测试系统基本相同。差异在于选择微纳光纤调制器代替 PZT 缠绕光纤作为相位载波生成外调制器。如光纤水听器探头为光纤光栅型, 则该 PGC 解调系统中的信号激光器由带有波长参量信息 λ_s 的信号光代替, 系统光纤干涉仪可将波长参量信息 λ_s 转换为相位参量信息 ϕ_s 进行解调。如光纤水听器为干涉型, 则 PGC 解调系统的光纤干涉仪即为传感探头干涉仪。根据光纤水听器探头结构的不同, 微纳光纤调制器所在干涉仪臂即可作为参考臂, 也可以作为传感臂。因微纳光纤相位调制器为内光调制全光型器件, 可保证光纤水听器探头的全光无电结构要求。另外, 微纳光纤调制器是置于干涉仪内实现外加相位载波调制, 光纤干涉仪可以做成零臂差结构, 可有效解决光纤水听器引入环境噪声问题。

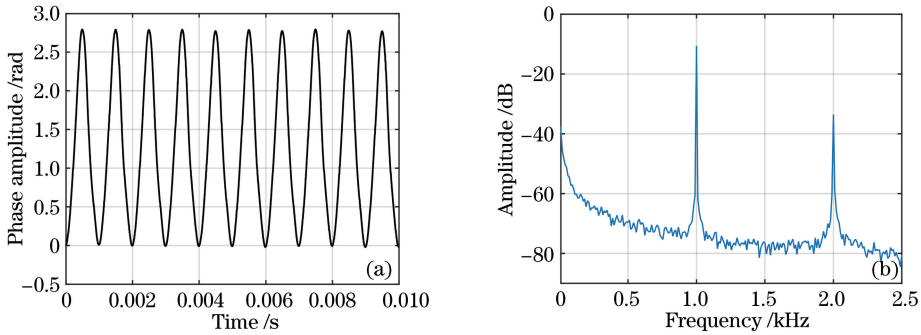


图 6 模拟水声信号频率为 1 kHz 时, PGC 解调测试系统输出的响应信号。(a) 时域信号; (b) 频域信号

Fig. 6 PGC response signal with simulated underwater acoustic signal frequency of 1 kHz.

(a) Time domain signal; (b) frequency domain signal

为模拟光纤水听器水声信号测试, 将微纳光纤调制器所光纤干涉仪臂作为参考臂, 另一干涉仪臂作为信号臂, 并且将信号臂部分光纤缠绕在 PZT 上, 通过在 PZT 上施加调制信号来模拟水声信号。实验时, 微纳光纤调制器上施加 6.25 kHz 的固定调制频率, 通过调节 980 nm 抽运调制光的调制幅度, 使 PGC 解调系统产生稳定有效的相位载波调制。在此基础上, 对 1 kHz 以下的模拟水声信号进行了测试解调。图 6 为 PZT 上施加 1 kHz 标准正弦模拟水声信号时, 系统解调出的传感信号。在改变 PZT 上调制信号幅度和频率时, 系统均可稳定并无失真地解调出相应的模拟水声信号。

实验结果表明, 基于微纳光纤全光相位调制器的光纤水听器 PGC 解调系统, 可以实现对 3 kHz 以下的水听器信号进行传感解调。所设计的微纳光纤相位调制器, 满足光纤水听器 PGC 解调系统的相位载波生成外调制器应用要求。但微纳光纤调制器置于实验环境下, 存在环境热噪声问题, 对系统噪声特性还有较大影响, 需对调制器进一步开展封装设计和热噪声抑制研究。

4 结 论

设计了基于热光效应的微纳光纤全光调制器, 调制带宽可以达到 10 kHz, 满足光纤水听器 PGC 解调系统的相位载波生成调制器应用需求。所构建的基于微纳光纤全光相位调制器的光纤水听器 PGC 解调系统, 可以实现对 3 kHz 以下的水声信号进行稳定传感解调。该 PGC 解调系统采用微纳光纤全光相位调制器可

实现全光纤结构的远程光相位调制,一方面可保持光纤水听器探头的全光优势,另一方面可采用准平衡干涉仪结构,进而克服引入环境噪声,并消除信号光源内调制导致的相位噪声,以改善光纤水听器系统的整体传感性能。该研究成果将为研制新型结构的自带调制功能的光纤水听器提供技术基础,并将在水声传感,特别是在反潜领域展现良好的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou, *et al.*. Frequency response of fourth-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones[J]. *Acta Physica sinica*, 2009, 58(10): 7034-7043.
王泽锋, 胡永明, 孟 洲, 等. 四阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7034-7043.
- 2 Cao Chunyan, Xiong Shuidong, Hu Zhengliang, *et al.*. Noise analysis of repeaterless long-haul fiber-optic hydrophone systems with the fiber length up to 200 km[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406006.
曹春燕, 熊水东, 胡正良, 等. 光纤水听器 200 km 无中继传输系统噪声研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0406006.
- 3 Wang Jianfei, Yu Yang, Luo Hong, *et al.*. Development of a metal annulus-based low frequency fiber Bragg grating vibration sensing system[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(1): 89-93.
王建飞, 于 洋, 罗 洪, 等. 金属环封装低频光纤布拉格光栅振动传感系统研制[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(1): 89-93.
- 4 Zhang Nan, Meng Zhou, Rao Wei, *et al.*. Analysis on upper limit of dynamic range of fiber optic interferometric hydrophone using digital heterodyne detection scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806011.
张 楠, 孟 洲, 饶 伟, 等. 干涉型光纤水听器数字化外差检测方法动态范围上限研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806011.
- 5 Wang Kai, Shi Qingping, Jiang Jiajia, *et al.*. Influence of parameter estimation error on demodulation performance of PGC arctangent algorithm in optical fiber hydrophone[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(10): 1856-1862.
王 凯, 施清平, 蒋佳佳, 等. 参数估计误差对光纤水听器 PGC 反正切解调性能的影响[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(10): 1856-1862.
- 6 Zhang Huangyong, Wang Liwei, Shi Qingping, *et al.*. A new demodulation method for time division multiplexing system of fiber-optic hydrophone using a 3×3 coupler[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505011.
张华勇, 王利威, 施清平, 等. 光纤水听器时分复用系统通过 3×3 耦合器信号解调的一种新算法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505011.
- 7 Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, *et al.*. Working-point control method for readout of dynamic phase changes in interferometric fiber optic sensors by tuning the laser frequency[J]. *Appl Opt*, 2008(47): 3524-3529.
- 8 Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: A review[J]. *J Opt*, 2010, 12: 043001.
- 9 Tong L, Zi F, Guo X, *et al.*. Optical microfibers and nanofibers: A tutorial[J]. *Opt Commun*, 2012, 285: 4641-4647.
- 10 Tong L, Lou J, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. *Opt Express*, 2004, 12(6): 1025-1035.
- 11 Brambilla G, Xu F, Feng X. Fabrication of optical fibre nanowires and their optical and mechanical characterization[J]. *Electronics Lett*, 2006, 42(9): 517-519.
- 12 Song Z Q, Yu Y, Zhang X L, *et al.*. All-optical phase modulator based on optical microfiber[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 3(1): 44-64.
- 13 Yu Y, Zhang X L, Song Z Q, *et al.*. Investigation on an all-optical modulator based on an optical microfiber coupler[C]. *IPTA 2014*, 2014(5).
- 14 Yu Y, Zhang X L, Song Z Q, *et al.*. An investigation on optical microfiber reflector with low reflectance[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12: 012301.
- 15 Davis M K, Dignonnet M J F, Pantell R H. Thermal effects in doped fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(6): 1013-1023.