

光纤矢量水听器系统本底噪声的自适应抵消

吴艳群 罗 洪 胡正良 熊水东 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 本底噪声是制约干涉型光纤矢量水听器系统在低频远距离目标探测领域中应用的重要因素之一。为降低系统的本底噪声,提出了一种基于自适应噪声抵消的降噪方法。在光学系统中增加一个与传感迈克耳孙干涉仪结构参数相等的对声压不敏感的参考干涉仪作为参考通道,以获得由光源与电路等共同噪声源引入到各干涉仪的高相关噪声。然后,使用归一化均方根误差的自适应算法分别对声压及加速度信号中与参考信号高相关的噪声部分进行抵消。湖试数据的分析结果表明,该方案能够有效降低系统本底噪声,其中对电磁干扰带来的 50 Hz 倍频信号的抑制能力高达 15~25 dB,对 500 Hz 以上的平坦噪声谱的抑制为 3 dB 左右。

关键词 传感器;光纤矢量传感器;迈克耳孙干涉仪;相位噪声;自适应噪声抵消;归一化均方根误差

中图分类号 TN253;TP212.14;TB565⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0305004

Adaptive Cancellation of Background Noise of Fiber Optic Vector Sensor System

Wu Yanqun Luo Hong Hu Zhengliang Xiong Shuidong Hu Yongming

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Background noise is one of the most important properties for the interferometric fiber optic vector sensor systems, which limits the systems' application of the detection of the long distance and low frequency targets. To reduce the background noise, a noise suppression scheme based on an adaptive noise canceller is proposed. A pressure insensitive reference fiber optic Michelson interferometer is added as a reference sensor, whose structural parameters are the same as those of the sensing fiber optic interferometers. Then the background noises of the pressure or acceleration signal, which are highly correlated with the reference signal, can be cancelled by the normalized least root mean square error algorithm. The results of a lake trial show that the scheme can effectively reduce both the background noise of the pressure and the accelerometer channels, which can suppress the 50 Hz multiples of the electromagnetic interference by 15~25 dB, and the flat phase noise above 500 Hz by about 3 dB.

Key words sensors; fiber optic vector sensor; Michelson interferometer; phase noise; adaptive noise canceller; normalized least root mean square error

OCIS codes 060.2370; 000.3860; 280.4788

1 引 言

随着声隐身技术的发展,水下目标的辐射噪声不断降低,这给浅海低频、远距离探测提出了新的挑战。在众多水声换能器中,光纤矢量水听器不仅具有指向性与频率无关、抗“左右舷模糊”等矢量水听

器共有的优点,而且还具有易于成阵、抗电磁干扰,且能在恶劣环境下工作等光纤传感器共有的优点,因此被认为是解决低频声目标探测与定位的有效手段之一^[1]。本底噪声是衡量干涉型光纤矢量水听器系统性能的重要指标之一,决定了系统的最小可测

收稿日期:2010-07-01;收到修改稿日期:2010-11-15

基金项目:国家自然科学基金(60908004)资助课题。

作者简介:吴艳群(1981—),女,博士研究生,主要从事光纤传感及相关信号处理等方面的研究。

E-mail: wuyanqun@nudt.edu.cn

导师简介:胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤信息技术、光纤光栅等方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

相移,因而直接决定了其对微弱的低频远距离目标的探测能力。目前能够满足实用化要求的光纤矢量水听器大多采用光纤迈克耳孙干涉仪结构^[2~5]。为降低系统本底噪声,许多研究者从光学和电学器件入手研究了影响干涉仪相位噪声的各种因素,并提出了一些抑制噪声的方法,取得了一定的效果^[6~10]。但是通过此途径进行降噪直接受限于各器件的技术发展水平。相比之下,使用参考传感器获得系统噪声对目标传感器进行降噪是一种更易实现且行之有效的方案,被成功地应用于光纤传感领域^[11~13]。A. D. Kersey 等^[13]将参考迈克耳孙干涉仪置于隔振隔声容器中以获得激光器的相位噪声,并假设由激光器引起的参考干涉仪与传感干涉仪的相位噪声相同,将两干涉仪的信号进行交叉相减就能够消除传感干涉仪信号的相位噪声。由于在实际应用中,受温度和外界环境的影响,参考干涉仪与传感干涉仪的相位信号存在不同程度的低频随机漂移,因此虽然由激光器引入两干涉仪的相位噪声的波形相似性很高,但不可能完全相同。此时使用交叉相减的方法效果并不理想。

自适应滤波器通过自动调节滤波器自身结构参数来消除时变噪声或干扰信号,且保持目标信号不失真,在语音信号处理、无线通信、导航等领域得到广泛的应用,并逐步被引入到光领域的信号处理中^[14,15]。本文研究的光纤矢量水听器的核心是全保偏结构的迈克耳孙干涉仪,并利用一个与

传感干涉仪等结构的对声压不敏感的参考迈克耳孙干涉仪,可靠地获得了由光源与电路等引入各干涉仪的高相关噪声,并使用自适应噪声抵消的方法,有效地减少了系统本底噪声。

2 基本原理

设计的单个全保偏光纤矢量水听器系统如图 1 所示。其中参考干涉仪、声压传感器和三维加速度计的核心都是由两出纤端镀有反射膜的保偏光纤耦合器构成的不等臂迈克耳孙干涉仪,且所有干涉仪的结构参数完全相同。参考干涉仪和声压传感器干涉仪的物理构造相同,不同的是,声压传感器的传感光纤缠绕在一层弹性材料上,起到增加灵敏度的作用,而参考干涉仪的传感光纤直接缠绕在金属骨架上。因此,参考干涉仪的声压灵敏度比声压传感器低几十个分贝,目的是防止其对周围环境中的声信号敏感而引入虚假的系统噪声,故参考干涉仪也称为声压不敏感干涉仪^[9]。这一方案避免了在干涉仪外部增加隔振隔声容器带来的系统复杂性,便于在大规模水下全光端系统中使用。构成加速度计的 3 个干涉仪则分别缠绕在以质量块为对称中心的两弹性柱上。为防止加速度计对声压信号敏感,通常在加速度计外封装声压屏蔽壳体。考虑到整个系统采用一套光源及空分结构,这里仅增加了 1 个参考干涉仪。当系统扩展到使用多套激光器时,为监测每个激光器的情况,需要增加相应数目的参考干涉仪。

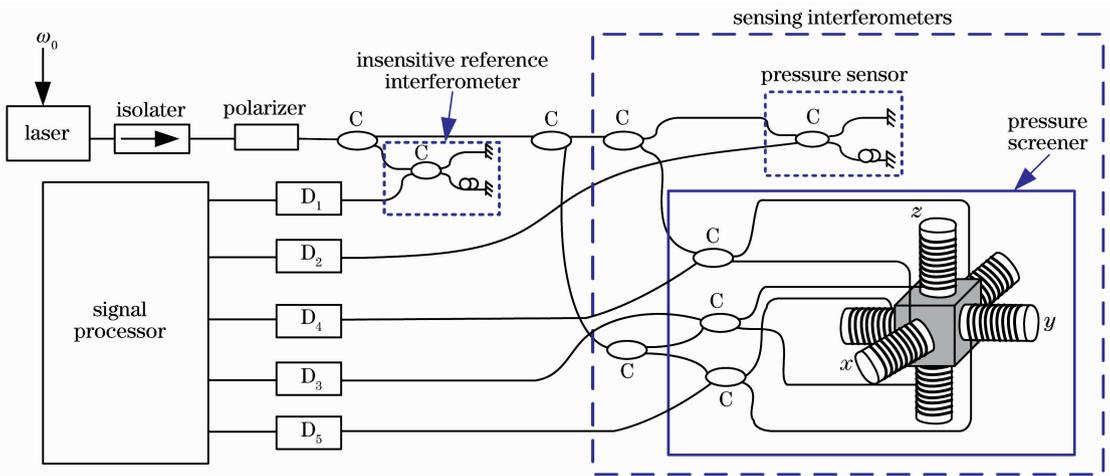


图 1 全保偏光纤矢量水听器系统降噪方案的结构图

C: 光纤耦合器, $D_1 \sim D_5$: 声压不敏感干涉仪、声压传感器以及加速度计的 x, y, z 轴分量对应的光电探测器

Fig. 1 Schematic of the phase noise suppression for the all polarization-maintaining fiber optic vector sensor system. C donates the fiber optic coupler, $D_1 \sim D_5$ are the photoelectric detectors for the pressure insensitive interferometer, the pressure sensor, the x, y and z axis accelerometer, respectively

图1中高相干可调谐激光器发出的光输入到耦合器中分为两束：一束光进入对声压不敏感的参考干涉仪，另一束光通过多个耦合器分束后分别进入声压传感器与3个加速度轴的传感干涉仪中。5路干涉光信号经过光电检测与相位载波(PGC)解调后可得

$$x_j(k) = s_j(k) + n_{b_j}(k) + n_{s_j}(k), \quad j = 1, \dots, 5; k = 1, \dots, K \quad (1)$$

式中 $s_j(k)$ 为第 k 个时刻外界待测物理量(声压或质点加速度)作用到第 j 个通道的信号; $n_{b_j}(k)$ 为外界环境噪声(声压或质点加速度)作用到第 j 个通道的噪声; $n_{s_j}(k)$ 为系统各噪声源(包括光路和电路噪声)经过 PGC 解调后的相位噪声,即下一步待消除的系统噪声。

由于各干涉仪共用光源和解调电路板,光源自身的强度和相位噪声、外界振动引起的光源噪声以及电路噪声经过各个干涉仪转化为各通道信号的系统本底噪声。相同的噪声源使得各干涉仪的系统本底噪声 $n_{s_j}(k)$ ($j = 1, \dots, 5$) 是高度相关的,但是由

于各个通道存在各自的随机性或者传输光路的微小差异,各通道的系统噪声在时域上不完全相同。参考干涉仪对周围环境的声信号不敏感,因此其解调后的信号只是与传感通道高度相关的相位噪声,即

$$x_1(k) = n_{s_1}(k), \quad (2)$$

在实际应用环境中,周围复杂的电磁干扰、光源的低频振动等都会使系统本底噪声高于实验室的测试结果。更为严重的是,各个通道的高相干噪声会使矢量水听器的目标定向结果大大偏离真实目标方位。自适应噪声抵消器正是通过参考传感器与目标传感器的输入端噪声的相关性实现的,其原理如图2所示。参考信号 $x_1(k)$ 经过一个滤波器得到的信号对第 j 个通道的与之相关的噪声进行估计 $\tilde{n}_{s_j}(k)$ ($j = 2, \dots, 5$),然后将该通道的受系统噪声污染的信号 $x_j(k)$ 减去 $\tilde{n}_{s_j}(k)$ 得到一个“干净”的输出信号 e_j 。滤波器系数随信号采集过程不断更新,目的是使参考信号对第 j 个通道的系统本底噪声的估计结果 $\tilde{n}_{s_j}(k)$ 尽量逼近真实的系统噪声 $n_{s_j}(k)$,这样才能实现有效的噪声抵消。

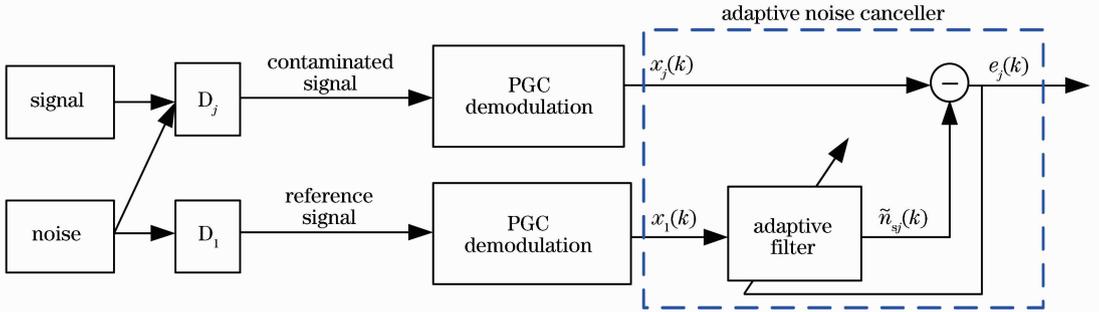


图2 改进的自适应噪声抵消原理图, D_j 为第 j 个通道的光电探测器 ($j = 2, 3, 4, 5$)

Fig. 2 Schematic diagram of the improved adaptive noise canceller for the sensing interferometers

D_j denotes the photoelectric detector of the j th channel ($j = 2, 3, 4, 5$)

实现自适应抵消的算法有多种,其中归一化最小均方根误差算法(NLRMS)在实时处理和收敛速度等方面均具有优势,其算法为^[16]

$$\tilde{n}_{s_j}(k) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i(k) x_1(k-i), \quad (3)$$

$$e_j(k) = x_j(k) - \tilde{n}_{s_j}(k), \quad j = 2, \dots, 5 \quad (4)$$

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \frac{\mu e_j(k) x_1(k-i)}{\sum_{m=0}^{M-1} x_1^2(k-m)}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

式中 $w_i(k)$ ($i = 0, 1, \dots, M-1$) 为第 k 个时刻 M 阶自适应滤波器的第 i 个加权系数,下一时刻的加权系数由(5)式得到; $e_j(k)$ 为 $x_j(k)$ 去除了相关噪声 $\tilde{n}_{s_j}(k)$ 后的信号; μ 为步长参数,通常 $0 < \mu < 2$ 。

上述自适应抵消器的实现过程是用有限脉冲响应(FIR)滤波器实现的,因此系统稳定且容易实现。基于数字信号处理(DSP)的自适应滤波器相比用硬件实现的自适应滤波器有很多优点,其功率消耗以及体积更小,更容易实现^[17],而且在工程上光纤传感系统的干涉信号的相位解调通常使用 DSP 实现。因此自适应噪声抵消模块可以很方便地嵌入原有的 DSP 系统,从而达到相位信号的实时解调和降噪的目的。

3 实验结果及分析

研制了如图1所示的光纤矢量水听器系统,并通过湖试测试了该方案在实际应用中的性能。数据采集选择在安静的夜晚,此时湖面平静,周围没有

船只及其他工业干扰等外界环境的影响。在20~2000 Hz频段,参考干涉仪和声压传感器的声压灵敏度分别为 -200 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa) 和 -160 dB(0 dB=1 rad/ μ Pa),加速度计各通道的加速度灵敏度为40 dB(0 dB=1 rad/g)。参考干涉仪的声压灵敏度比声压传感器的低40 dB,保证了其采集的系统噪声的可靠性。

由图3各通道的时域信号(仅给出前40 ms)可以看到,各通道均存在低频周期信号。由于参考通

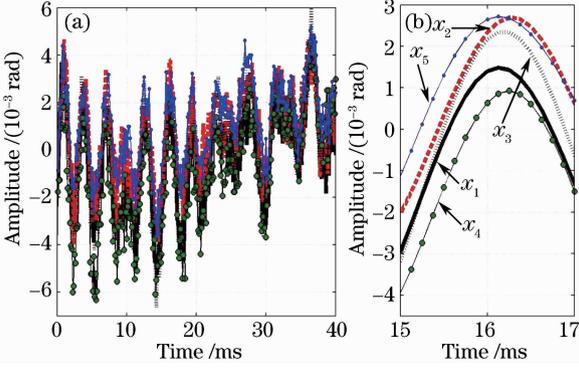


图3 PGC解调后各路信号的时域图

(a) 前40 ms, (b) 滤波后15~17 ms的信号

Fig. 3 Signals of all the channels in the time domain after PGC demodulation. (a) the first 40 ms, (b) the filtered signals during 15~17 ms

道 x_1 也存在这样的低频振荡信号,且 x_1 与传感通道的信号 $x_2 \sim x_5$ 在频率50~500 Hz之间相干性在0.5以上(见图4),因此可以断定这些低频周期信号是系统噪声。进一步观察图5中 $x_2 \sim x_5$ 的频谱,在500 Hz以下存在多个50 Hz倍频项的线谱,且能量很强,其来源可能是采集与信号解调电路没有良好接地,导致所有通道的信号均存在共同的电磁干扰源。虽然各个干涉仪经过相同的光路和电路板,从而由各通道低频振荡的系统噪声信号极为相似[图3(a)所示],但是对各通道进行50~500 Hz的带通

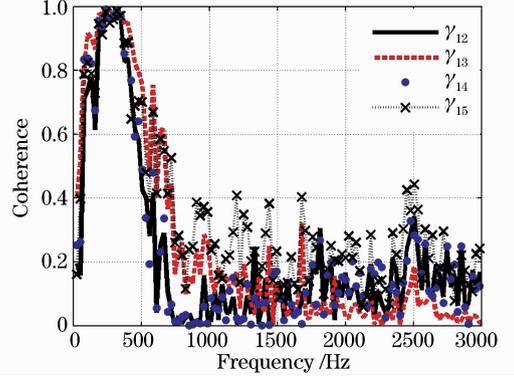


图4 参考信号 x_1 与传感通道的信号 $x_2 \sim x_5$ 的相干函数 $\gamma_{12} \sim \gamma_{15}$

Fig. 4 Coherence functions $\gamma_{12} \sim \gamma_{15}$ between x_1 and $x_2 \sim x_5$

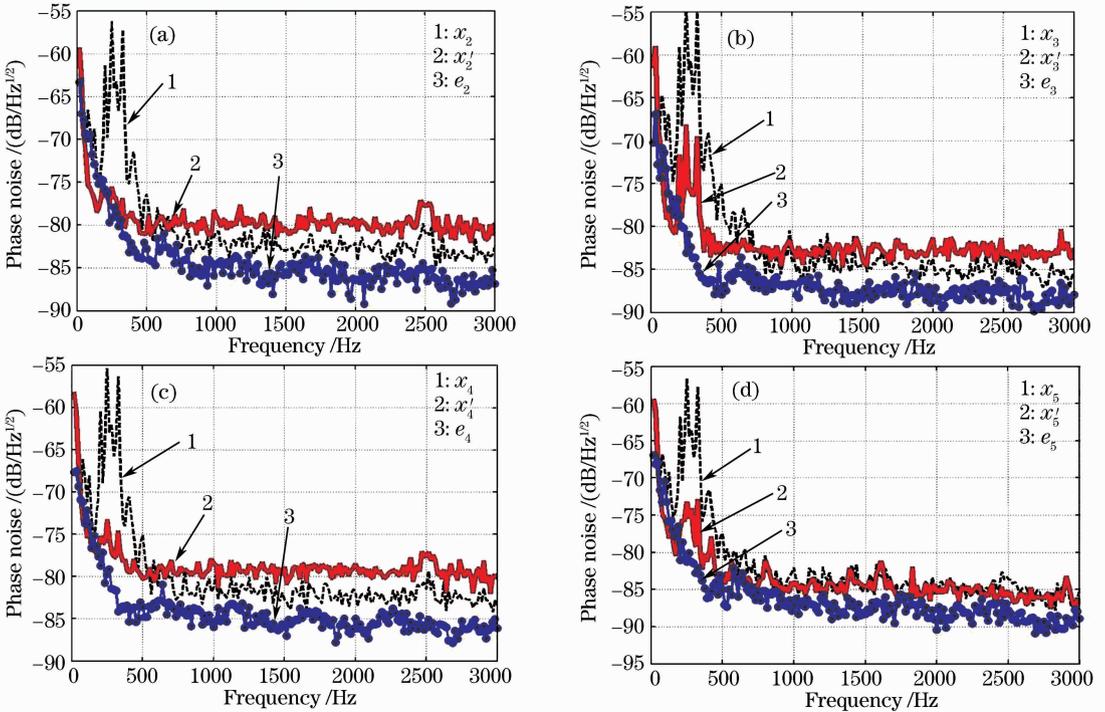


图5 不同算法对各通道降噪性能的比较。(a) 声压通道, (b)~(d) 分别为加速度计的 x, y, z 轴通道

Fig. 5 Comparisons of the noise suppression performance at all the sensing channels

(a) for the pressure channel, (b)~(d) for the accelerometer channels of the $x, y,$ and z axis, respectively

滤波后,观察时域信号的细节[如图 3(b)所示]发现:各通道相位噪声均存在不同程度的随机幅度调制和随机低频漂移。这一点也可以从图 5 的频谱上看到,声压与 3 个加速度轴在 50 Hz 及其倍频项处的幅度均不相同。对于各个通道中存在的这种高相关但时域上不完全相同的系统相位噪声,用各传感通道的信号直接减去单个参考干涉仪的信号 x_1 不仅很难同时对各个通道都有较好的降噪效果,而且还可能引入额外的噪声。这就是采用文献[13]后端的信号处理降噪效果不好的原因之一(图 5 的 $x'_2 \sim x'_5$)。

自适应算法能够自动调节声压和加速度通道各自滤波器的加权系数,仅需要一个参考干涉仪对各通道进行滤波。图 5 给出了自适应噪声抵消后的相位噪声 $e_2 \sim e_5$,并将采用文献[13]中算法的处理结果 $x'_2 \sim x'_5$ 与之对比,这里 0 dB = 1 rad。由图 5 可知, $x'_2 \sim x'_5$ 虽然在 20~500 Hz 的频带上有一定的噪声抵消效果,但是高频段的噪声反而被抬高。自适应噪声抵消不仅对 500 Hz 以下的线谱抑制能力在 15~25 dB 左右,且相比于原始信号 $x_2 \sim x_5$ 的频谱,各通道在 500 Hz 频带以上的相位噪声均下降 3 dB 左右。

4 结 论

自适应噪声抵消技术是目前用得最多和最有效的降低系统噪声的方法之一,可随着系统噪声的变化改变自身参数,从而达到跟踪噪声并对其抵消的目的。为取得良好的噪声抵消效果,参考信号的选择至关重要。在硬件增加了一个对声压信号不敏感的参考干涉仪,能够可靠地获得由光源与电路等引入到矢量水听器各通道的高相关的系统相位噪声。在此基础上使用合适的自适应算法,把传感通道中与参考通道高相干噪声过滤掉,从而降低了传感通道的本底噪声。湖试结果证明了该方法的有效性。根据不同的应用背景研制参考传感器并与自适应抵消算法相结合的方法具有普适性,可推广到其他类型光学系统的本底噪声抑制上。

参 考 文 献

- 1 Sun Guiqing, Li Qihu, Zhang Bin. Acoustic vector sensor signal processing [J]. *Chin. J. Acoustics*, 2006, **25**(1):1~15
- 2 Xiong Shuidong, Luo Hong, Hu Yongming *et al.*. Research on interferometric polarization maintaining fiber optic micro-vibration vector sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):843~847
熊水东,罗洪,胡永明等.干涉型保偏光纤微振动矢量传感器

- 研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):843~847
- 3 Luo Hong, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. Research on three-component all polarization-maintaining fiber optic accelerometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1382~1386
罗洪,熊水东,胡永明等.三分量全保偏光纤加速度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1382~1386
- 4 Wang Yongjie, Li Fang, Xiao Hao *et al.*. Sensitivity calculation of disk-type fiber-optic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1387~1392
王永杰,李芳,肖浩等.盘片式光纤传感器灵敏度计算方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1387~1392
- 5 Kang Chong, Zhang Min, Chen Hongjuan *et al.*. Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1214~1219
康崇,张敏,陈洪娟等.薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1214~1219
- 6 Zhou Meng, Yongming Hu, Shuidong Xiong *et al.*. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17):3425~3428
- 7 Liu Kui, Yang Rongguo, Zhang Hailong *et al.*. Noise suppression of single frequency fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1852~1856
刘奎,杨荣国,张海龙等.单频光纤激光器的噪声抑制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1852~1856
- 8 Liang Xun, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. Impact of relative intensity noise on fiber optic hydrophone's phase generated carrier scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):716~721
梁迅,熊水东,胡永明等.激光器强度噪声对光纤水听器相位载波解调的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):716~721
- 9 Liang Xun. Investigation of Noise Analysis and Suppression Technologies in Fiber Optic Hydrophone System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 50~57
梁迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008. 50~57
- 10 D. M. Dagenais, K. P. Koo, A. Dandridge. Demonstration of low-frequency intensity noise reduction for fiber sensors powered by diode-pumped Nd:YAG lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(5):518~520
- 11 Chang-Da Tsai, Hui-Hsun Huang, Shyh-Lin Tsao *et al.*. Error reduction of referenced intensity-based optical fibre sensor by adaptive noise canceller [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(11):982~983
- 12 H. P. Ho, K. C. Lo, W. L. Fong *et al.*. Passive phase demodulation and laser-noise compensation scheme for fibre interferometers [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1362~1363
- 13 A. D. Kersey, T. A. Berkoff. Passive laser phase noise suppression technique for fiber interferometers [C]. *SPIE*, 1990, **1367**:310~318
- 14 Wu Xiaodong, Chen Jun, Chen Zheming. A temperature self-adapting fiber Bragg grating dynamic sensor system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(12):1773~1777
吴晓冬,陈军,陈哲敏.一种新型温度自适应光纤光栅动态传感系统[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(12):1773~1777
- 15 Shen Shuang, Tang Zhen'an, Li Tong. Photodiode array detector based on the adaptive noise canceling [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(5):573~577
申爽,唐祯安,李彤.基于自适应噪声抵消的光电二极管阵列检测器[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(5):573~577
- 16 Shoji Makino, Yutaka Kaneda, Nobuo Koizumi. Exponentially weighted stepsize NLMS adaptive filter based on the statistics of a room impulse response [J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 1993, **1**(1):101~108
- 17 Chen Ziwei, Yao Zhendong. Application and Training of DSP System [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008. 85
陈子为,姚振东. DSP 系统应用与实训[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008. 85