

文章编号: 1001-3806(2016)04-0536-05

## 光开关选通的光纤激光水听器时分复用阵列

顾宏灿<sup>1</sup>, 程玲<sup>2</sup>, 黄俊斌<sup>1</sup>, 唐波<sup>1</sup>, 李日忠<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033; 2. 中国船舶重工集团公司研究中心, 北京 100192)

**摘要:** 为了降低传感器系统的成本及体积, 利用光纤激光传感单元的特性, 采用光开关选通的光纤激光水听器时分复用技术, 构建了实用的基于光开关的4元光纤激光水听器时分阵列。进行了理论分析和实验验证, 分析了使用光开关选通的光纤激光水听器时分复用阵列方案的选通脉宽和损耗, 指出了各通道光脉冲对干涉信号的采样率的限制因素。结果表明, 光开关选通的光纤激光水听器时分阵列可以很好地完成复用信号的采集和复用, 实验中4元时分复用水听器相邻通道的串扰为-17dB。

**关键词:** 传感器技术; 水听器阵列; 时分复用; 光开关; 光纤激光器**中图分类号:** TP212.9; TN253**文献标志码:** A**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.017

## Time division multiplexing array of fiber laser hydrophone using optical switch

GU Hongcan<sup>1</sup>, CHENG Ling<sup>2</sup>, HUANG Junbin<sup>1</sup>, TANG Bo<sup>1</sup>, LI Rizhong<sup>1</sup>

(1. Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Research Centre, China Shipbuilding Industry Corporation, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to reduce the cost and the size of a sensing system, a 4-element fiber laser hydrophone time division multiplexing array was established by using high-speed optical switches based on the characteristics of fiber laser sensing elements. The selective pulse width and the loss of the time division multiplexing array were analyzed after theoretical analysis and experimental verification. Because of time delay of the interferometer and switch speed of the optical switches, sampling frequency was limited. The acoustic detecting experiments show that the multiplexing signal can be acquired and demultiplexed correctly. The crosstalk between adjacent channels of the 4-element fiber laser hydrophone array is -17dB.

**Key words:** sensor technique; hydrophone array; time division multiplexing; optical switch; fiber laser

## 引言

在水下声传感领域, 各种新技术被发展和应用以远程获取水声信息, 其中光纤水听器以高灵敏度、抗干扰、频带宽等特性在声学探测领域得到了快速的发展<sup>[1]</sup>。近年来, 一种以光纤激光器作为水声传感单元的光纤激光水听器成为光纤水听器领域的一个研究热点, 由于用作传感单元的光纤激光谐振腔一般是利用光纤光栅作为波长选择元件而制成, 因此, 在一些文献中, 这一传感技术也被称之为有源型光纤光栅水听器。分布式反馈(distributed feedback, DFB)光纤激光器的输出激光具有大的光谱功率密度和良好的相干度, 结合其小直径和本征可波分复用的特性, 光纤激光水听器易于构建灵敏度高、体积小、重量轻的水听器阵列,

在水下声压探测领域具有广阔的应用前景。

1994年, 美国海军研究实验室 KERSEY 等人将激光谐振腔作为传感元件, 使用光纤干涉仪检测激光波长的变化, 系统的应变分辨率达  $8 \times 10^{-14}$  (在 10kHz 频点)<sup>[2]</sup>。如此优越的分辨率性能, 使得光纤激光器的应用被迅速推广到水听器领域。此后英国防卫评估研究局(Defence Evaluation and Research Agency, DE-RA)、澳大利亚防务科技局(Defense Sciences and Technology Organization, DSTO)、英国 QinetiQ 公司、泰利斯(Thales)公司、瑞典防务研究处等机构先后对光纤激光水听器进行了深入研究<sup>[3-9]</sup>。2005年, QinetiQ 公司成功进行了 250m 拖缆的八基元 DFB 光纤激光水听器细线阵列的海上实验<sup>[5]</sup>。2006年, DSTO 报道了 980nm 光抽运的 16 元的 DFB 光纤激光传感器线形阵列<sup>[7]</sup>。2008年, DSTO 和 Thales 公司合作在 Jervis 海湾成功地进行了八传感阵元、1.5km 长光缆的可布放光纤激光水听器阵列的试验。国内近年来在光纤激光水听器领域也取得了一些研究成果<sup>[10-13]</sup>。

为了降低系统的成本及体积构建实用的水听器阵

基金项目: \* \* \* 探索研究资助项目

作者简介: 顾宏灿(1980-), 男, 讲师, 现主要从事光纤传感技术的研究。

E-mail: tanktomb@163.com

收稿日期: 2015-07-23; 收到修改稿日期: 2015-10-13

列,大规模光纤激光水听器阵列需采用多路复用的方式来实现。由于抽运功率及吸收损耗的限制,根据报道,波分复用的阵元数目最多可实现 16 元,因此需发展其它的复用技术。针对光纤激光传感单元的特性,本文中主要研究了基于光开关的光纤激光水听器时分复用技术。

### 1 光纤激光水听器时分复用阵列

光纤激光水听器时分复用方案如图 1 所示,由于 DFB 光纤激光器需要一定时间的抽运作用才能稳定出光,本时分复用方案能避免抽运光源对 DFB 光纤激光器作用的非连续性,980nm 抽运激光经隔离器后由  $1 \times N$  光纤耦合器分光至 980nm/1550nm 光纤波分复用器对  $N$  路光纤激光水听器阵列进行抽运,阵列输出激光经 1550nm 隔离器后通过光开关实现各通道的分时复用,光开关输出端的脉冲串经过基于  $3 \times 3$  耦合器的非平衡 Michelson 干涉仪后输入信号解调系统,解调系统对光脉冲进行光电探测、解时分复用、信号解调处理,提取光开关选通的光纤激光水听器光脉冲信号中包含的水声信号。

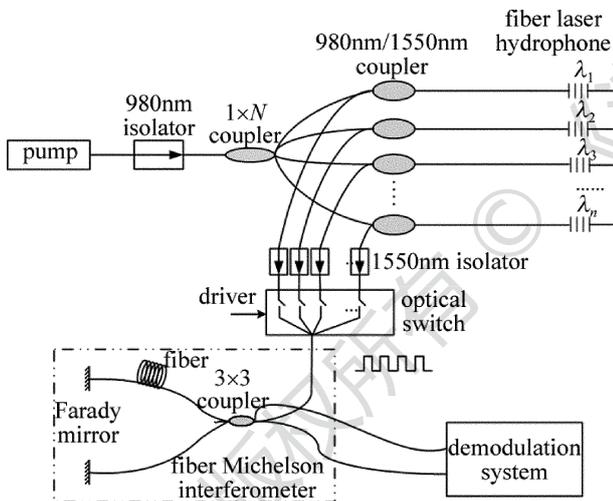


Fig. 1 Time division multiplexing array of fiber laser hydrophone using high-speed optical switches

目前应用较多的干涉解调技术是相位载波调制解调方案以及基于  $3 \times 3$  耦合器的对称解调方案,其中基于  $3 \times 3$  耦合器的对称解调方案动态范围和工作频带不受相位载波调制频率的限制。本复用方案中信号解调处理方法采用基于  $3 \times 3$  耦合器的对称解调方案<sup>[14]</sup>,由于光纤的微弯、扭曲和环境温度的变化可能导致参与干涉的两束光的偏振态的变化<sup>[15]</sup>,使得输出信号呈随机消隐状态,为此,方案中干涉仪结构为非平衡 Michelson 光纤干涉仪,在  $3 \times 3$  耦合器两臂的末端使用法拉第旋转反射镜(Faraday rotator mirror, FRM),其中一臂空置,当法拉第旋转镜旋转角度为  $45^\circ$  时,干

涉仪可见度不受两臂光纤双折射效应以及输入光波偏振态的影响<sup>[16-17]</sup>。

#### 1.1 通道选通脉宽

理想状态下,光开关控制信号时序图如图 2 所示。设通道选通脉冲脉宽为  $\tau$ ,阵列中各通道的采样周期为  $T$ ,则通道选通脉宽  $\tau$  应满足  $\tau \leq T/N$ 。

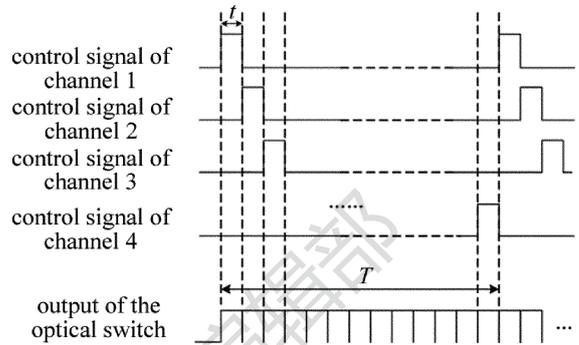


Fig. 2 Timing of control signals of optical switches

由于图 1 所示的时分复用系统的解调部分使用了非平衡 Michelson 光纤干涉仪,干涉仪两臂存在臂长差,这样两臂出射的光脉冲在时间上存在相对延迟  $\Delta t = 2n\Delta L/c$ ,其中  $c$  为真空中的光速, $n$  为光纤折射率。

由于光开关选通的光脉冲存在上升沿  $\Delta t_u$  和下降沿  $\Delta t_d$ ,因此,若保证经光开关选通后的光脉冲可以发生干涉,脉冲宽度  $\tau$  必须大于  $\Delta t + \Delta t_u + \Delta t_d$ <sup>[18]</sup>。

这样,当干涉仪臂长差确定后,光开关对各通道选通时间的最小值即确定,因此随着复用通道  $N$  的增加,阵列中各通道的采样周期  $T$  随之增加,即各通道光脉冲对干涉信号的采样率  $f_{\text{sample}}$  下降。

假设非平衡路径带来的干涉延时为 500ns、上升沿和下降沿均为 50ns,光纤激光水听器时分系统的复用通道数为 8 时,各通道光脉冲对干涉信号的采样率  $f_{\text{sample}} \leq 208\text{kHz}$ ,同时随着通道数的增加,各通道采样率会进一步降低。

#### 1.2 系统损耗预估

在光源输出功率一定的情况下,损耗是决定系统水听器复用数目最重要的因素。在作者所设计的系统中,如果使用  $8 \times 1$  光开关和  $1 \times 8$  分路耦合器,损耗的来源主要是:(1)传输光纤带来的损耗,大小是  $0.3\text{dB/km}$ ;(2)熔接点带来的损耗,平均值为  $0.3\text{dB/点}$ <sup>[19]</sup>;(3)隔离器和 980nm/1550nm 光纤波分复用器的插入损耗  $0.3\text{dB}$ ;(4)使用  $1 \times 8$  分路耦合器的  $9\text{dB}$  的分束损耗;(5)使用  $8 \times 1$  光开关带来的插入损耗,以  $9\text{dB}$  计;(6)光纤 Michelson 干涉仪中  $2 \times 2$  耦合器和  $3 \times 3$  耦合器各有一路空置,干涉仪插入损耗取值  $13\text{dB}$ 。

系统中使用的抽运光源输出功率为 700mW,假设

光纤激光水听器由 100mW 的抽运光抽运时出射激光功率为 100μW, 试验中 980nm/1550nm 光纤波分复用器至光纤激光水听器的距离为 1m 左右, 损耗可不考虑, 如果应用于远程声预警, 传输光纤较长时应考虑光纤损耗。抽运光源输出光传输至光纤激光水听器经过 4 个熔接点、一个分路耦合器、一个隔离器、一个 980nm/1550nm 光纤波分复用器, 损耗为 10.8dB, 传输光纤到达水听器的抽运光功率为 58mW, 水听器出射激光的光功率为 58μW, 出射激光传输至光电探测器经过 5 个熔接点、一个隔离器、一个光开关以及光纤干涉仪, 损耗为 23.8dB, 传输至光电探测器的激光功率为 0.24μW, 此功率偏小, 实际使用时, 可使用多个抽运光源或在接收端加光放大器以提高光电探测器接收的激光功率。

## 2 光纤激光水听器时分复用阵列实验

实验系统采用 EPIPhotonics 公司纳秒级锆钛酸铅镧材料(lead lanthanum zirconate titanate, PLZT)定向耦合器型 8 × 1 光开关(此光开关采用三级关断控制, 一级关断通道隔离度约 9dB、二级关断通道隔离度约 20dB, 三级关断通道隔离度约 30dB), 光开关 8 个通道循环导通, 取导通的脉冲宽度  $\tau = 1.25\mu s$ , 由于光纤激光水听器的输出受到光开关信号的选通, 干涉信号不是连续的, 对各通道干涉信号选通的频率为 100kHz。当光开关的 8 个通道中仅第一通道接入光纤激光水听器, 采集信号解调系统中光电探测器输出脉冲激光干涉信号数据如图 3 所示。

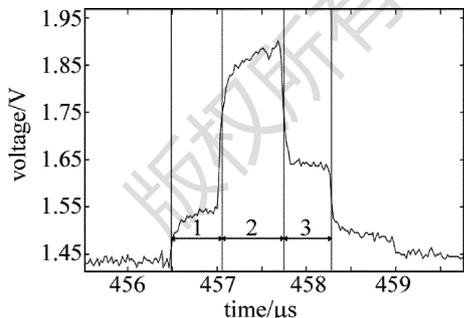


Fig. 3 Pulse laser interference signal output from the photodetector

从图 3 中可以看出, 由于干涉仪臂长差引起的延迟, 干涉信号脉冲的图形呈阶梯型, 实验中干涉仪的非平衡路径长度为 50m, 因此两路光到达的时间差约为 483ns(非平衡路径光纤的折射率取 1.456)。而实际的干涉部分为图 3 中的区域 2。从以上分析可知, 为了得到光纤激光水听器的干涉信号, 按 100kHz 的频率间隔, 依次取出光开关开通时干涉信号脉冲区域 2 中的一点即可。

将时分复用的 4 元光纤激光水听器接入光开关的

8 个通道中的第 1 个 ~ 第 4 个通道, 光纤激光水听器为套筒开孔式结构光纤激光水听器, 探头的主体为一个中段沿径向均布有 4 个长条形开口的套筒, 套筒两端内部灌注有一定长度的聚氨酯, DFB 光纤激光器张紧后被聚氨酯固定, 通过聚氨酯的形变牵动光纤激光器发生变形, 从而引起光纤激光水听器激光工作波长的变化<sup>[20]</sup>, 光纤激光水听器直径 8mm, 长 75mm, 声压灵敏度 -131dB(参考 1rad/μPa)。4 个光纤激光水听器悬置于 40cm × 30cm × 23cm 的水箱中, 并通过一个 700mW 的 980nm 抽运激光器(明鑫激光 MXLS-980)经 1 × 4 分路耦合器后同时抽运, 水箱中的水声换能器向光纤激光水听器施加水声压, 水声换能器驱动信号由数英 TFG2030DOS 函数信号发生器提供, 光纤激光水听器反射回带有水声压信息的激光, 各路激光通过各自的隔离器后进入光开关, 通过光开关的选通进入 Michelson 干涉仪, 最后干涉仪输出干涉信号被光电探测器探测和采集卡采集, 在计算机中采用 MATALB 语言对采集信号进行处理, 使用基于 3 × 3 耦合器的被动零差解调方案进行信号解调。当水声换能器的驱动信号的频率为 5kHz 时, 光电探测器输出原始波形的整体和细节部分如图 4 所示。

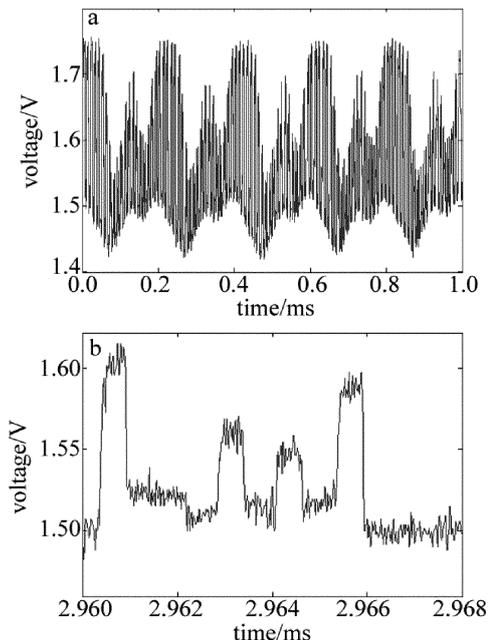


Fig. 4 Original waveform of photodetector  
a—overall b—detail

根据光开关的驱动信号, 依次取出光开关开通时相应通道水听器输出激光的干涉信号数据, 采用基于 3 × 3 耦合器的被动零差对称解调方案进行信号解调, 解调结果如图 5 所示。

从图中可以看出各路水听器均能正确感知水声信号。

仅将第 1 路光纤激光水听器置于水箱中, 其它水

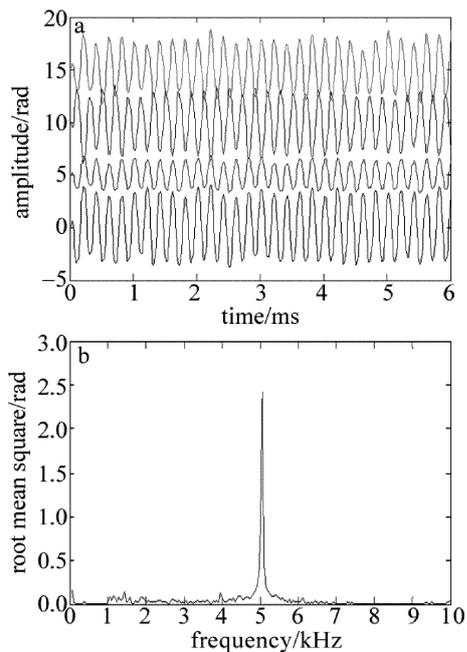


Fig. 5 Waveform of the interrogated acoustic signals detected by the 4-element fiber laser hydrophone array (6ms, 5kHz)

听器不感受水声压力的作用。水声换能器的驱动信号的频率为 5kHz,各通道水听器解调水声信号的功率谱密度如图 6 所示。图 6 中纵坐标是以均方根值为 1rad/kHz 的幅度作为参考。

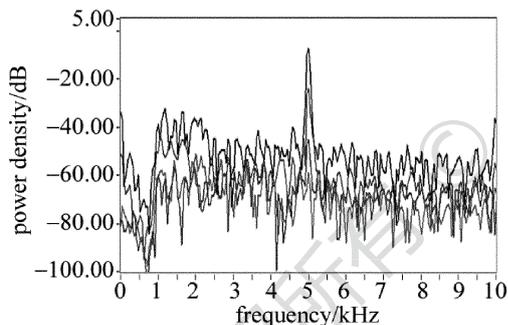


Fig. 6 Power density of the interrogated acoustic signals detected by the fiber laser hydrophone array

从功率谱计算结果可以得到第 1 个通道光纤激光水听器对第 2 个通道、第 3 个通道和第 4 个通道的串扰分别为: -17dB, -38dB, -50dB。

光开关选通的光纤激光水听器时分复用系统的串扰问题主要由光开关器件消光比的非理想性造成,且通道间的串扰受相位的影响而随机缓慢变化,如果各光纤激光水听器的出光功率相同,光开关对各通道的插入损耗也一致,考虑最大串扰的情况,则通道间的最大串扰为<sup>[21-22]</sup>  $C_{\text{crosstalk}} = -2E_{ij}$ ,其中,  $E_{ij}$  为  $j$  通道导通时  $i$  通道的消光比。因此,光纤激光水听器时分复用阵列通道间的串扰主要与光开关的消光比有关。实验中第 2 个通道~第 4 个通道分别开通时,第 1 个通道的消光比为 9.13dB, 16.52dB, 20.82dB, 考虑到串扰级

的随机变化,实验结果很好地验证了通道串扰受消光比影响的结论。因此,增大光开关的消光比将有利于光纤激光水听器时分复用系统中通道串扰的减少。

### 3 结论

主要研究了基于光开关的光纤激光水听器时分复用技术,设计并从选通脉宽和损耗方面分析了基于光开关的光纤激光水听器时分复用阵列方案,构建了基于光开关的 4 元光纤激光水听器时分阵列。实验表明,光纤激光水听器时分阵列可以很好地完成复用信号的采集和解复用,验证了时分复用方案的可行性,对光纤激光水听器时分复用技术的进一步研究和发展具有参考价值。实验中水听器相邻通道的串扰分别为 -17dB,为了进一步降低串扰级,可采用高隔离度的光开关来实现。本文中设计的技术方案系统损耗较大,可考虑在系统中使用光纤放大器来改善,并可联合波分复用技术来扩大水听器的复用规模。

### 参考文献

- [1] LI D, ZHOU J H, QU K L, *et al.* Anti-wave demodulation method for acousto-optic coupling fiber hydrophones on the water surface[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(1): 1-5 (in Chinese).
- [2] KERSEY A D, KOO K P, DAVIS M A. Fiber optic Bragg grating laser sensors[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1994, 2292: 102-112.
- [3] KOO K P, KERSEY A D. Bragg grating based laser sensor systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1243-1249.
- [4] HILL D J, NASH P J, JACKSON D A, *et al.* A fiber laser hydrophone array[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1999, 3860: 55-66.
- [5] HILL D J, HODDER B, FREITAS J D. DFB fibre-laser sensor developments[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, 5855: 904-907.
- [6] SCOTT F, ALEXEI T, MARK M, *et al.* A fibre laser hydrophone [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, 5855: 627-630.
- [7] SCOTT F, ALEXEI T, MARK M, *et al.* A 16 channel fibre laser sensor array[C]//Australian Conference on Optical Fibre Technology 2006. Melbourne, Australia: Australian Optical Society, 2006: 40-42.
- [8] STEVEN G, SCOTT F, JOHN V, *et al.* Demonstration of a DFB fibre laser hydrophone seabed array in jervis bay [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2009, 7503: 75034L.
- [9] KULLANDER E, VAHLBERG C. Towed a thin and lightweight fibre optic towed array sonar[J]. *Archives of Acoustics*, 2005, 30(4): 91-94.
- [10] XU H, WANG C, PENG G D, *et al.* A distributed feedback fiber laser hydrophone with high sensitivity and flat frequency response [J]. *Shandong Science*, 2013, 26(4): 46-50 (in Chinese).
- [11] ZHANG W T, HUANG W Z, LUO Y B, *et al.* Field test of the flow noise of fiber laser hydrophone array[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2014, 9157: 91579P.
- [12] ZHANG F X, ZHANG X L, WANG L J, *et al.* Study on the frequency response of static pressure compensated fiber laser hydrophone-theory and finite element simulation [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2014, 9157: 91571I.
- [13] GU H C, HUANG J B, YU H B, *et al.* A 4-element fiber laser hy-

- drophone towed linear array [J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 9297:92972Y.
- [14] ZHAO Z Q, SULEYMAN D M. Improved demodulation scheme for fiber optic interferometers using an asymmetric  $3 \times 3$  coupler [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(11):2059-2068.
- [15] CHEN D S, XIAO L, CUI J, *et al.* Analysis of  $3 \times 3$  coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(5):523-525 (in Chinese).
- [16] QI L Z, XIAO H, LI F, *et al.* Study of polarization-insensitive fiber optic interferometers for wavelength demodulation [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3):259-262 (in Chinese).
- [17] GU H C, HUANG J B, YUAN B C, *et al.* Fiber laser acoustic pressure sensing system based on interferometric demodulation technique [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(12):73-77 (in Chinese).
- [18] ZHANG N. Optical heterodyne and time division multiplexing technology in large-scale fiber optic hydrophone array [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007:8-9 (in Chinese).
- [19] JIN Z G, HU Y M, LUO H. Time division multiplexing of optical fiber hydrophone using optical switch [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(1):63-65 (in Chinese).
- [20] TAN B, HUANG J B. Design about a novel encapsulation structure of DFB fiber laser hydrophones [J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 9233:92330X.
- [21] LI J T. Analyses of crosstalks and noise in multiplexing array of fiber optic hydrophone [D]. Changsha: National University of Defense and Technology, 2005: 36-37 (in Chinese).
- [22] GU H C, HUANG J B, LI R Zh, *et al.* Analysis of the channel crosstalk in multiplexing system of the fiber laser sensors [J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 9297:92972X.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©