

文章编号: 0258-7025(2002)05-0415-03

全保偏光纤水听器阵列

孟 洲, 胡永明, 熊水东, 刘 阳, 倪 明, 张学亮

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

提要 报道了全保偏光纤水听器阵列的研究结果。在详细介绍全保偏光纤水听器基元结构和工作原理基础上, 描述了四基元阵列结构和性能, 给出了光纤水听器基元相对接收灵敏度的频率响应和阵列指向性的测量结果。

关键词 保偏光纤, 干涉仪, 水听器, 阵列

中图分类号 TN 253; TH 744. 3 文献标识码 A

All Polarization Maintaining Fiber Hydrophone Array

MENG Zhou, HU Yong-ming, XIONG Shui-dong,

LIU Yang, NI Ming, ZHANG Xue-liang

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The research results of all polarization maintaining fiber hydrophone array have been reported in this paper. On the basis of detail introduction of structure and operating principle of all polarization maintaining fiber hydrophone element, the structure and performances of four element array have been described. The measurement results of element frequency responses of relative receiving sensitivity and array directional responses have been given.

Key words polarization maintaining fiber, interferometer, hydrophone, array

光纤水听器是一种新型水声传感器, 其检测声压灵敏度比传统的压电水听器高 3 个数量级^[1], 在水下军事应用、海洋探测和保密监听等方面具有很大的应用前景。多年来, 人们在这个领域不断地进行探索和研究^[2~4]。过去受技术条件和工艺水平的限制, 国内外都采用单模光纤制作水听器^[2,4], 由于单模光纤抗弯绕能力差, 同时存在光偏振态随机变化的固有缺陷, 使水听器难以小型化和稳定性较差, 严重阻碍其实用化发展。我们在多年研究保偏光纤器件的基础上^[5,6], 研制了全保偏光纤水听器阵列, 系统稳定性得到大大改善。本文报道了全保偏光纤水听器基元结构和工作原理, 介绍了阵列结构和性能, 并给出了在国家水声一级计量站测量的结果。

干涉仪型, 如图 1 所示。从半导体激光器输出的光由保偏光纤偏振器 P 起偏后, 经保偏光纤传输到保偏光纤耦合器 C_1 分成两束, 分别经过干涉仪的传感臂和参考臂, 再通过保偏光纤耦合器 C_2 进行干涉, 干涉信号经探测电路 D 输入计算机进行处理。系统工作波长为 $1.3 \mu\text{m}$, 光纤为熊猫型保偏光纤, 偏振器采用磨抛型保偏偏振器, 耦合器为熔锥型保偏耦合器, 干涉仪的消光比约 25 dB。由于采用了全保偏光纤结构, 从根本上解决了系统偏振稳定性问题。为增加干涉仪的相干长度、减小相位噪声, 光源采用窄带光谱分布反馈(DFB)激光器。

水波声压的变化将影响干涉仪传感臂中光波相位, 通过干涉转变为光强信号, 此时干涉仪输出信号 I 为

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_0 + \Delta\phi_s) \quad (1)$$

式中 I_1, I_2 为发生干涉的两束光强度, ϕ_0 为干涉仪的

1 全保偏光纤水听器基元

研制的光纤水听器基元结构为 Mach-Zehnder

初始相位, $\Delta\phi_s$ 为由声波产生的相位信号。在实际系统中 ϕ_0 受环境温度、应力等影响将在 $0 \sim 2\pi$ 间无规则地缓慢变化, 导致系统响应不稳定。为消除干涉仪的初始位相随机变化对测量稳定性的影响, 信号检

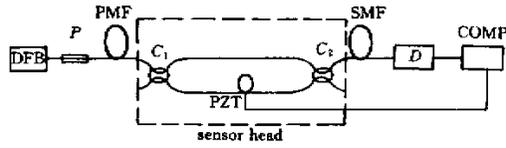


图 1 全保偏光纤水听器基元结构

Fig. 1 Schematic diagram of all polarization maintaining fiber hydrophone element

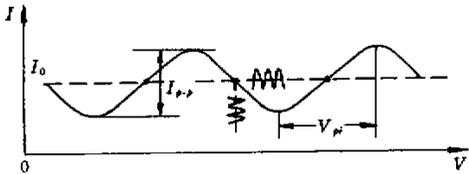


图 2 PZT 上扫描电压与干涉信号强度的关系

Fig. 2 Relation between scan voltage on PZT and interference signal intensity

测技术采用闭环控制主动相位补偿法。在参考臂上加一个压电陶瓷(PZT)相位调制器, 工作时, 首先加一个大幅度锯齿波信号于 PZT 上进行主动相位扫描, 得到干涉仪的初始工作参数, 如图 2 所示, 包括干涉信号峰峰值 I_{p-p} , 平均值 I_0 , 半波电压 V_{π} 等, 然后根据测得的干涉信号平均值闭环调节 PZT 上电压, 使干涉仪工作点锁定在信号平均值 I_0 及其附近处(干涉仪灵敏度最大处), 从而有效地消除外界环境干扰造成的相位随机漂移。此时 $\phi_0 = \pi/2$, 代入式(1), 得到

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin \Delta\phi_s \quad (2)$$

当 $\Delta\phi_s \ll 1$ 时, 式(2)可以近似为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \Delta\phi_s \quad (3)$$

式(3)表明干涉仪输出交流信号与声波信号成正比。

为降低电路噪声, 检测电路采用数字信号处理方法。探测电路仅包含光电转换和信号放大两部分, 其他均转换成数字信号在计算机中处理。

这种基于工作点控制的闭环相位补偿法与常用的相位调制载波(PGC)法^[7,8]相比, 有许多优点。首先, 检测电路很简单, 干涉仪直接输出信号就是被测声信号, 不需要相干、微分交叉相乘等复杂的信号解调电路。其次, 当光源相干长度一定时, 干涉仪相位

噪声与两光纤臂臂长差成正比^[7]。原理上, 相位补偿法中干涉仪两臂臂长可完全相等, 而内调制的 PGC 方法, 要求使用非平衡式干涉仪结构^[7,8], 两臂臂长有一定差异, 因而相位噪声较前者大。

对全保偏光纤水听器基元干涉信号长时间测试

表明, 相干度 $K = \frac{I_{p-p}}{2 \times I_0} \times 100\%$, 波动一般在 1% 左右, 最大不超过 5%。因此, 采用全保偏光纤结构和主动相位补偿法检测有效地抑制了干涉仪偏振噪声和相位噪声的影响。

为使基元易于构阵, 对水听器基元的结构进行了工程设计, 研制出的传感头(图 1 中虚线框内所示)尺寸仅为 $\phi 18 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

2 全保偏光纤水听器阵列

保偏光纤水听器传感头结构的小型化、各基元幅度和相位响应的高度稳定性为构成阵列奠定了基础。我们用全保偏光纤水听器构成了 4 基元阵列, 阵列结构上采用了光源复用、信号并行处理的方案, 如图 3 所示。保偏光纤耦合器 C_1, C_2 和 C_3 分别将偏振光一分为二, 最后成 4 束并行光输出到 4 个并行水听器传感头中, 然后经 4 路并行探测电路到计算机。水听器阵列波束形成要求各基元对信号响应的幅度和相位一致, 因此系统设有各基元自动均衡的功能。

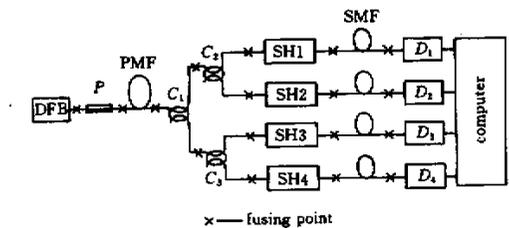


图 3 4 基元阵列结构简图

Fig. 3 Schematic diagram of four element array

一般从 DFB 输出的激光经 P 起偏后功率约 2 mW, 各保偏光纤耦合器的分束比为 1:1, 损耗为 0.5~1 dB, 各熔接点损耗约为 0.5 dB, 到达各基元光电探测器的功率 $\sim 100 \mu\text{W}$ 。根据目前光电探测能力, 要保证对微弱声信号的探测, 每个水听器基元到达光电探测器的功率必须大于 $1 \mu\text{W}$, 因此用一个光源最多可以带动 32 元阵列。

这种复用方法较时分复用、频分复用^[8]而言, 系统结构和信号处理大为简化, 信号功率大大增强, 易

于阵列进一步扩展。

3 全保偏光纤水听器测量结果

4 基元全保偏光纤水听器阵列在国家水声计量一级站进行了基元相对接收灵敏度频率响应和阵列指向性测量。测量是在标准吸声水池中进行的,4 个光纤水听器探头固定在一根刚体上,间距 0.2 m,排成线阵列,刚体(阵列)的中心固定在行车旋转轴上,标准声源离光纤水听器探头距离约 4 m。进行基元频响测量时,仅改变声源频率,分别得到各基元的相对响应值;进行阵列指向性测量时,在精确控制行车旋转轴旋转的同时,准确测量 4 个基元对应不同旋

转角度的响应之和。测量结果如图 4 所示,每个基元的接收灵敏度在 3~10 kHz 范围内频率响应波动小于 3 dB,在 3~8 kHz 范围内频率响应波动小于 1.58 dB;阵列指向性测量中,当信号频率 $f = 4$ kHz 时,实测主瓣 3 dB 宽度 $2\theta_{-3dB} = 24.0^\circ$,理论值 $2\theta_{-3dB} = 24.7^\circ$;当 $f = 5$ kHz 时,实测主瓣 3 dB 宽度 $2\theta_{-3dB} = 21.0^\circ$,理论值 $2\theta_{-3dB} = 19.7^\circ$ 。多次测量稳定性和重复性很好,理论值与实际值之差主要源于水听器系统内部的多种因素,在实际应用中,这种偏差可以通过增加基元数和补偿得到抑制。

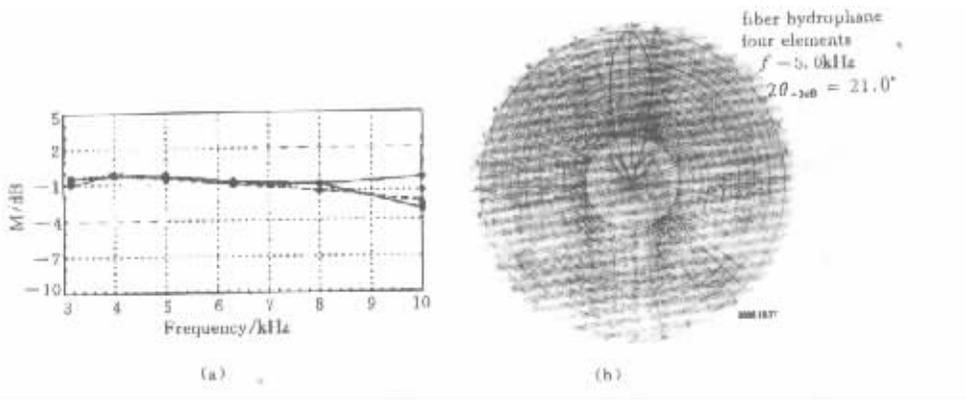


图 4 (a) 四基元的相对接收灵敏度频率响应;(b) $f = 5$ kHz 四基元阵列指向性

●: 0[#]基元; ■: 1[#]基元; ▲: 2[#]基元; ◆: 3[#]基元

Fig. 4 (a) Frequency responses of relative receiving sensitivity of four elements;

(b) Directional responses of four element array at $f = 5$ kHz

●: 0[#] element; ■: 1[#] element; ▲: 2[#] element; ◆: 3[#] element

4 结 论

主动相位补偿型全保偏光纤水听器有效地抑制了偏振噪声和相位噪声影响,使系统稳定性较单模非保偏光纤水听器大为改善,相干度波动小于 5%,基元的相对接收灵敏度在 3~8 kHz 范围内响应波动小于 1.58 dB。水听器阵列采用光源复用、信号并行处理的方案,简化了系统结构和信号处理,增强了信号功率,易于阵列扩展。指向性测量表明阵列主瓣 3 dB 宽度的实测值非常接近理论值,稳定性和重复性很好。

致谢 对在水听器测试实验中给予支持和帮助的 715 所的同志们深表感谢。

参 考 文 献

- Cao Jianian, Zhang Likun. Research on phase modulation and demodulation of interometric fiber-optic hydrophone using phase generated carrier techniques [J]. *Optical Fiber & Electric Cable* (光纤与电缆及其应用技术), 1998, (6):3~7 (in Chinese)
- Gao Xueming. Evolution of fiber optic hydrophones and

- hydrophone arrays [J]. *Optical Fiber & Electric Cable* (光纤与电缆及其应用技术), 1996, (1):48~53 (in Chinese)
- T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4):626~665
- P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology [J]. *IEE Proc-Radar, Sonar Navig.*, 1996, **143**(3):204~209
- Chen Zhe, Hu Ming, Zeng Chun *et al.*. A study on PANDA optical fiber used for polarization maintaining fiber coupler [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1996, **25**(Z1):401~403 (in Chinese)
- Chen Zhe, Liao Yanbiao, Hu Yongming *et al.*. Performance of polarizers and coupler in an all polarization maintaining fiber interferometer [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **B9**(2):148~154 (in English)
- A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10):1647~1653
- A. Dandridge, A. B. Tveten, A. D. Kersey *et al.*. Multiplexing of interferometric sensors using phase carrier techniques [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(7):947~952