

# 拖曳线列阵用光纤水听器的研究

罗洪<sup>†</sup> 熊水东 胡永明 倪明

(国防科技大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要** 报道了光纤水听器用于拖曳线列阵的研究结果。在保证光纤水听器声相位灵敏度的前提下,优化设计了光纤水听器的结构,降低了光纤水听器的加速度灵敏度 36dB。实验测得在 20~1600Hz 频段,该光纤水听器的相位灵敏度为 -162.7dB,频段内灵敏度的起伏为  $\pm 0.7$ dB,加速度灵敏度小于 -30dB。

**关键词** 光纤水听器, 加速度灵敏度, 相位灵敏度, 拖曳阵

## A fiber optic hydrophone to be used in towed line array

LUO Hong XIONG Shui-Dong HU Yong-Ming NI Ming

(College of Photo-electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** A type of fiber optic hydrophone to be used for towed line array is presented in this paper. The acoustic phase sensitivity being ensured, an optimum structural design of the fiber optic hydrophone is proposed to reduce by 36dB its acceleration sensitivity. Over the frequency range from 20Hz to 1600Hz, the acoustic sensitivity of the fiber optic hydrophone is -162.7dB with undulation of 1.4dB, while the acceleration sensitivity is not greater than -30dB.

**Key words** fiber optic hydrophone, acceleration sensitivity, acoustic sensitivity, towed array

### 1 引言

光纤水听器是一种建立在光纤、光电子技术基础上的水下声信号传感器。它通过高灵敏度的光纤相干检测,将水声信号转换成光信

号,通过光纤传至信号处理系统提取声信号信息。它具有灵敏度高,频响特性好等特点。由于采用光纤作信息载体,适宜远距离大范围监测<sup>[1-3]</sup>。

拖曳线列阵声呐不同于船载声呐和普通拖

2005-06-27 收稿; 2005-10-19 定稿

作者简介: 罗洪 (1977-), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术研究。

熊水东 (1974-), 男, 讲师, 博士。胡永明 (1960-), 男, 教授, 博士, 博士生导师。倪明 (1972-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。

<sup>†</sup> 通讯联系人 Email: luohongrong2000@163.com

体声呐,它是一种声阵段远离载体,基阵深度可变,拖速变化范围大,监测范围远的被动型声呐。拖曳线列阵的工作方式、环境条件和结构安装等特点对水听器的性能提出了许多特殊的要求,尤其是加速度灵敏度,它关系到拖曳细线阵声呐能否有效地抑制由拖缆抖动、涡流及拖曳力变化等引起的振动噪声的干扰。

国内外对降低光纤水听器的加速度灵敏度进行了大量的研究<sup>[4~6]</sup>。在已报导的低加速度灵敏度光纤水听器的研究中,多采用单模光纤干涉仪,这时系统的偏振稳定性是一个较难解决的问题。本文采用全保偏光纤干涉系统<sup>[7]</sup>,从根本上保证了系统相干性对偏振态的要求,同时用高相干可调谐激光器作光源,通过光频调制在非平衡干涉仪中产生相位载波(PGC, Phase Generated Carrier),通过相位载波调制解调<sup>[10]</sup>技术消除由相位随机漂移引起的信号衰落的影响,在保证光纤水听器足够声压灵敏度的前提下,优化了结构设计,有效地降低了光纤水听器的加速度灵敏度。

## 2 系统结构与原理

### 2.1 光纤水听器的工作原理

干涉型光纤水听器探测单元的核心是高性能的光纤干涉仪,我们研制的光纤水听器基于迈克尔逊光纤干涉仪,具体结构见图1。从激光器发出的光经保偏光纤偏振器起偏后,通过保偏光纤传到保偏光纤耦合器分为两束,分别进入干涉仪的两臂,经光纤端面的反射镜反射后,回到保偏光纤耦合器进行干涉,干涉信号经探测电路后,输入计算机进行处理。

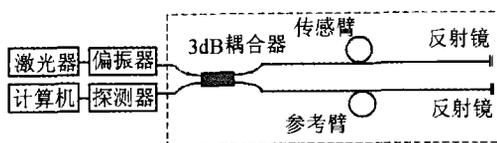


图1 迈克尔逊型光纤水听器结构示意图

### 2.2 消偏振衰落和信号检测方法

在干涉型光纤水听器中,要实现信号的稳定检测,必须解决由光偏振态变化引起的信号衰落和由环境温度和压力变化等导致的干涉仪的相位随机漂移而引起的信号衰落问题。在以往的研究中,大多采用单模光纤干涉系统,大多采用法拉第旋转镜消偏振衰落技术来抑制偏振不稳定的影响。但采用这种技术会使得光纤水听器基元中含有多个分离元件,会给降低加速度灵敏度带来很大的困难,同时也带来基元结构尺寸和工程可靠性方面的问题。在实验室多年研究保偏光纤器件研究的基础<sup>[7~9]</sup>上,我们在系统中采用保偏光纤偏振器、保偏光纤耦合器,两光纤臂也使用了保偏光纤,实现了全保偏光纤干涉仪结构,从根本上解决了偏振态变化引起的信号衰落问题。同时运用镀膜技术直接将反射膜镀在光纤端头上,简化了系统结构,减少了光纤水听器基元分离元件数目,提高了光纤水听器的可靠性,有利于降低加速度灵敏度和探头的小型化。

目前解决由外界温度和压力变化等导致的干涉仪的相位随机漂移而引起的信号衰落有许多技术方案,我们采用了相位载波内调制解调信号处理技术,其基本原理<sup>[10]</sup>为:通过对光源进行频率调制,在非平衡干涉仪中产生检测信号带宽外的某一频率的大幅度相位调制信号,使所检测信号成为这些大幅度载波的边带,用一系列的信号处理方法将干涉仪的交流传感信号和随机相位漂移分离,从而得到稳定的传感信号输出。我们将干涉信号经光电转换完后,采集进计算机,用软件来完成全部的信号处理,得到信号。采用PGC内调制解调技术消除了由相位随机漂移引起的信号衰落的影响,同时实现了光纤水听器全光纤湿端探测,这在实际应用中有重要意义。

### 2.3 降低加速度灵敏度的结构设计

加速度是矢量,作用于光纤水听器上的加速度可分解为轴向分量和径向分量。对于同轴型光纤水听器,由于其轴对称性,对于径向加

速度分量, 本身就有加速度抵消作用, 所以径向加速度灵敏度很低。因此, 在结构设计中主要考虑降低轴向加速度灵敏度。

光纤水听器的加速度灵敏度定义为由加速度信号引起的光纤水听器的干涉仪两臂的相位差  $\Delta\phi$  与光纤水听器所受加速度的比值。单位: rad/g (g 为重力加速度)

$$M_p = \frac{\Delta\phi}{a} \quad (\text{rad/g}) \quad (1)$$

光纤水听器加速度灵敏度级的定义为光纤水听器加速度灵敏度与其基准值之比值, 以 10 为底的对数乘以 20。单位: 分贝。

$$M = 20 \lg(M_p/M_r)(\text{dB}) \quad (2)$$

基准值:  $M_r = 1 \text{ rad/g}$ 。由于用加速度灵敏度级来表示往往更明了, 我们通常提到光纤水听器加速度灵敏度时均指加速度灵敏度级。

为了降低光纤水听器的加速度灵敏度, 我们在同一骨架上将声参考臂和声传感臂绕在相同结构、相同声增敏材料的圆柱体的外壁上, 然后将缠绕声参考臂的柱体部分, 用声屏蔽套筒来屏蔽声信号。在声信号的作用下, 由于安装在屏蔽套筒内的参考臂对声信号不敏感, 因而只有声传感臂对声信号敏感。在加速度的作用下, 声参考臂和声传感臂都对加速度信号敏感, 参考臂引起的相位变化与敏感臂引起的相位变化一致, 因而可以相互抵消, 使得光纤干涉仪的总相位差受加速度作用的影响变小, 来降低光纤水听器的加速度灵敏度。因而可以实现不影响光纤水听器声压灵敏度的前提下, 有效地降低了光纤水听器的加速度灵敏度。

### 3 实验结果

光源为可调谐的激光器, 输出光波长为 1310nm, 光纤为熊猫型保偏光纤, 偏振器采用磨抛型保偏光纤偏振器, 耦合器为熔融拉锥型保偏光纤耦合器, 参考臂光纤长度为 5.6m, 传感臂光纤为 6.6m。研制出的光纤水听器探头

(图 1 中虚框部分) 尺寸为  $\Phi 20\text{mm} \times 77\text{mm}$ , 其中声敏感部分的直径为  $\Phi 12\text{mm}$ 。

为了测试光纤水听器的实际性能, 在国防水声计量一级站对研制的低加速度灵敏度光纤水听器的声压相位灵敏度和加速度灵敏度进行了测试。在 20~1600Hz 频段, 声压相位灵敏度频率响应曲线如图 2 所示, 加速度相位灵敏度频率响应曲线如图 3 所示。

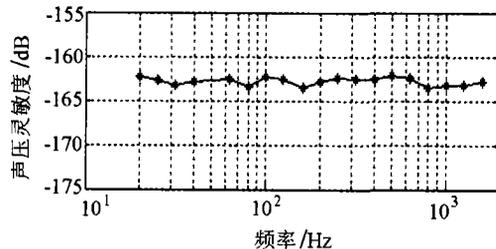


图 2 声压灵敏度随测试频率的变化曲线  
(0dB re 1 rad/uPa)

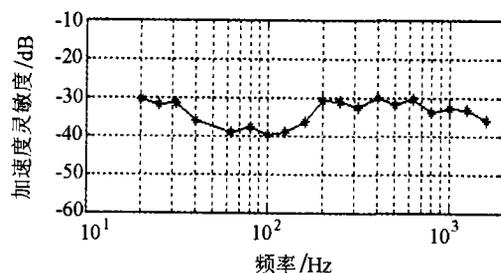


图 3 加速度相移灵敏度随测试频率的变化曲线  
(0dB re 1 rad/g)

实验测得在 20~1600Hz 频段, 没采取降低加速度灵敏度措施的同结构参数光纤水听器的声压灵敏度为  $-162.5\text{dB}$ , 起伏为  $\pm 0.6\text{dB}$ , 加速度灵敏度为  $6\text{dB}$ 。从图 2 可以看出, 在 20~1600Hz 频段, 光纤水听器的声压灵敏度为  $-162.7\text{dB}$ , 起伏为  $\pm 0.7\text{dB}$ , 与没采取降低加速度灵敏度措施光纤水听器的声压灵敏度措施基本一致。从图 3 可以看出, 光纤水听器的加速度灵敏度小于  $-30\text{dB}$ , 满足了拖曳线列阵用光纤水听器的加速度灵敏度要求。从上面的实验

### “三维超声成像的方法学和临床应用研究”项目简介

该项目自 1991 年起进行了三维超声成像研究, 立足国际前沿, 取得较好的成绩。(1) 1991 年自行开发三维成像装置, 国内最早重建静态薄壳型心脏三维图像; 1994 年率先研制出三维超声表面成像软件, 首次建立肝脏静脉系统的三维灰阶及血管树图像。(2) 1995 年引进 TomTec 三维工作站, 最先提出动态三维心脏多普勒血流灰阶成像方法; 1996 年研制了室壁运动三维定性和定量分析软件; 1999 年探讨三维彩色多普勒血流显像技术。(3) 在国

内率先对实时彩色三维超声成像在多种心脏病中的诊断价值进行了验证和评价。(4) 确立了三维超声成像的最佳技术参数和基准参考切面, 提出新的诊断标准。(5) 参与制定《三维超声心动图检查指南》, 使我国在该领域的研究始终与国外保持同步。

该项目由山东大学齐鲁医院等单位完成, 获得 2005 年度国家科学技术进步二等奖。

(甄彦 摘自 2005 年“国家科学技术奖励公报”)

结果可以看出, 采取的降低加速度灵敏度的方法, 在不影响光纤水听器声加速度压灵敏度的前提下, 有效地降低了光纤水听器加速度灵敏度 36dB。

#### 4 结论

本文介绍了光纤水听器的基本原理和降低光纤水听器加速度灵敏度的方法, 给出了国防水声计量站的测试结果。在 20~1600Hz 频段, 这种结构的光纤水听器的声压灵敏度为 -162.5dB, 起伏为 ±0.7dB, 加速度灵敏度小于 -30dB。实验结果表明该光纤水听器声压灵敏度高, 频率响应平坦, 加速度灵敏度低, 特别是实现了光纤水听器的全光纤化, 这对推动光纤水听器在拖曳线列阵的应用具有重要的意义。

#### 参 考 文 献

1 Lun K Cheng, Dick de Bruijn. SPIE Fiber Optic and

Laser Sensors XI, 1993, 2070:24~29.  
 2 Nash P. IEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1996, 143(3):204~208.  
 3 Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. J. Acoust. Soc. Am., 1997, 62(5):1302~1304.  
 4 Ole Henrik Waagaard, Geir Bjarte Havsgard, Gunnar Wang. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(7):994~1003.  
 5 Sanjay Uchil, phani Bhushan K, Naik G M et al. Journal of Optoelectronics, 1993, 8(4):419~424.  
 6 李丁山, 曹家年, 刘云涛. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22 (6):32~35.  
 7 胡永明, 陈哲, 孟洲等. 中国激光, 1997, A24(10): 891~894.  
 8 张学亮, 倪明, 胡永明. 光电子激光, 2005, 16(5): 538~540.  
 9 孟洲, 胡永明, 熊水东等. 中国激光, 2002, A29(5): 415~417.  
 10 Dandridge A, Tveten A B, Giallorenzi T G. IEEE J. Quantum Electronics, 1982, 18(10):1647~1653.