

# 光纤水听器的原理与应用<sup>\*</sup>

张仁和<sup>1,†</sup> 倪明<sup>2</sup>

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100080)

(2 国防科技大学理学院光电工程系 长沙 410073)

**摘要** 为适应水声学应用特别是水下反潜战的需要,在光纤技术不断发展的基础上,光纤水听器应运而生。光纤水听器是一种基于光纤、光电子技术上的新型水下声传感器,因其在军事、民用各领域应用广泛,目前光纤水听器在国内外发展迅速,已经达到实用状态。全光光纤水听器系统的湿端采用全光实现,信号传感与传输皆基于光纤技术。具有抗电磁干扰、重量轻和造价低等优点。文章简述了光纤水听器的发展历史、现状,论述了光纤水听器的原理及其应用前景。

**关键词** 光纤水听器 原理 应用

## Principle and applications of the fiber optic hydrophone

ZHANG Ren-He<sup>1,†</sup> NI Ming<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

**Abstract** The fiber optic hydrophone was developed to satisfy the urgent demands of underwater acoustics applications, especially for anti-submarine purposes. This new underwater acoustic sensor based on optical fiber and optoelectronics technology is now well developed and widely used in military and civil applications. The optical fiber hydrophone system including the wet end signal sensing and transfer is all fiber based, and thus has the merits of light weight, low cost and immunity to electromagnetic interference. The history and development of the fiber optic hydrophone are reviewed, with a detailed discussion of the principle and applications.

**Key words** fiber optic hydrophone, principle, application

## 1 引言

众所周知,电磁波和光波能在空间有效地传播,是空中信息传递的有效载体。但它们在水中的传播损耗比声波约大3个数量级,因而不能成为水中远距离信息传递的有效形式。迄今为止,声波仍然是能在海洋中远距离传输信息的最有效的载体。水听器是通过接收声波对水下目标进行探测、定位与识别的传感器。

光纤水听器是基于光纤、光电子技术的一种新型水听器,具有灵敏度高、频带响应宽、抗电磁干扰、耐恶劣环境、结构轻巧、易于遥测和构成大规模阵列

等特点。光纤水听器研究始于冷战时期反潜战的需要。20世纪70年代中期,美国海军研究室开始了光纤水听器研究。1977年,Bucaro等人发表首篇论文<sup>[1]</sup>,演示了一套基于光纤技术的水声传感系统。光纤水听器的第一次海上试验是美国为海军流动噪声驳船系统的噪声监测装置开发的塑料芯轴光纤水听器,并于1983年7月部署在巴哈马群岛,从此,各军事强国纷纷投入大量人力和财力进行有关光纤水听器的研究和试验。早在20世纪90年代初,美国的

\* 国家自然科学基金(批准号10234050)资助项目

2003-09-23收到初稿 2004-02-03修回

† 通讯联系人。E-mail: zrh@farad.ioa.ac.cn

光纤水听器研究就已经到达实用阶段. 目前, 美国在该领域仍处于领先地位. 2000 年, 美国利通资源勘探仪器公司研制成功 96 基元全光光纤水听器系统, 应用于海洋、陆地石油、天然气勘探. 2001 年, 美国海军与利通公司签订基于光纤水听器的远程供电全光固定分布式系统 (RP FDS-C) 开发合同. 光纤水听器已经由实验室走向应用.

## 2 光纤水听器原理

光纤水听器按原理可分为干涉型、强度型、光栅型等. 干涉型光纤水听器关键技术已经逐步发展成熟, 在部分领域已经形成产品, 而光纤光栅水听器则是当前光纤水听器研究的热点.

### 2.1 干涉型光纤水听器原理

干涉型光纤水听器是基于光学干涉仪的原理构造的. 图 1 是基于几种典型光学干涉仪的光纤水听器的原理示意图. 图 1(a) 是基于 Michelson 光纤干涉仪光纤水听器的原理示意图. 由激光器发出的激光经 3dB 光纤耦合器分为两路: 一路构成光纤干涉仪的传感臂, 接受声波的调制, 另一路则构成参考臂, 提供参考相位. 两束波经后端反射膜反射后返回光纤耦合器, 发生干涉, 干涉的光信号经光电探测器转换为电信号, 经过信号处理就可以拾取声波的信息. 图 1(b) 是基于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪光纤水听器的原理示意图. 激光经 3dB 光纤耦合器分为两路, 分别经过传感臂与参考臂, 由另一个耦合器合束发生干涉, 经光电探测器转换后拾取声信号. 图 1(c) 是基于 Fabry-Perot 光纤干涉仪光纤水听器的原理示意图. 由两个反射镜或一个光纤布拉格光栅等形式构成一个 Fabry-Perot 干涉仪, 激光经该干涉仪时形成多光束干涉, 通过解调干涉的信号得到声信号. 图 1(d) 是基于 Sagnac 光纤干涉仪光纤水听器的原理示意图. 该型光纤水听器的核心是由一个 3×3 光纤耦合器构成的 Sagnac 光纤环, 顺时针或逆时针传播的激光经信号臂时对称性被破坏, 形成相位差, 返回耦合器时干涉, 解调干涉信号得到声信号.

我们以双光束干涉为例, 干涉后的光信号经光电转换后可以写成:

$$V_0 = [1 + k \cos(\varphi_s + \varphi_n)] + V_n, \quad (1)$$

其中  $V_0$  是输出的电压信号,  $V$  是信号幅度  $k$  是干涉仪的可视度,  $V_n$  是电路附加噪声,  $\varphi_s$  为水中声波引起的干涉仪两臂相位差,  $\varphi_n$  为外界环境变化引起的

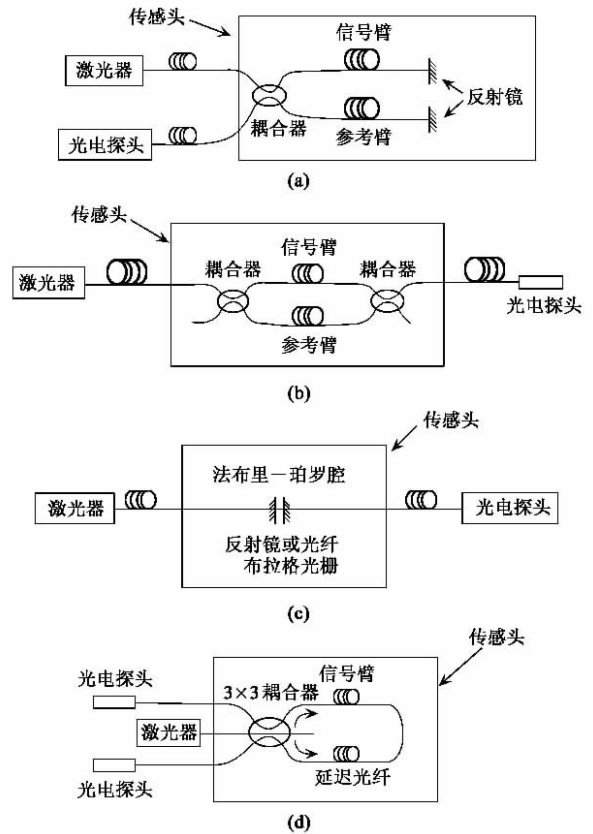


图 1 基于光纤干涉仪的光纤水听器原理示意图  
 (a) Michelson 干涉仪 (b) Mach-Zehnder 干涉仪 (c) Fabry-Perot 干涉仪 (d) Sagnac 干涉仪

相位差.

光纤干涉仪输出光波相位差为

$$\varphi = \frac{2\pi n l \nu}{c}, \quad (2)$$

其中  $c$  是真空中光速,  $n$  是光纤纤芯的有效折射率,  $l$  是光纤轴向长度,  $\nu$  是光频. 若光源相干长度为  $L$ , 相干理论要求  $L \geq nl$ . 由 (2) 式可得, 各种因素引起的相位差变化为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n l \nu}{c} \left( \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \nu}{\nu} \right). \quad (3)$$

由上式看出, 相位差的变化包括三部分: (1) 由光弹效应产生有效折射率改变引起的光相位变化; (2) 光纤轴向长度的变化导致的光相位变化; (3) 光频的抖动引起的光相位变化. 其中前两种变化可以由声压调制因素产生, 第三部分则构成系统的光相位噪声.

一般光纤水听器探头都经过增敏处理. 最简单的增敏方法是将干涉仪的传感臂缠绕在一个声压弹性体上, 这样声压变化时, 弹性体随声压受迫振动, 传感光纤长度被调制, 这样声压对光纤水听器的调

制主要表现为光纤轴向长度的调制. 经过理论分析, 这种光纤轴向长度的变化与声压的变化成正比, 于是有:

$$\Delta\varphi_s \approx \frac{2\pi n l \nu}{c} \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot p, \quad (4)$$

其中  $k$  是比例系数. (4) 式说明干涉仪由水声引起的相位差变化与声压变化成正比, 该式是干涉型光纤水听器拾取声信号的理论基础.

### 2.2 强度型光纤水听器原理

强度型光纤水听器基于光纤中传输光强被声波调制的原理, 该型光纤水听器研究开发较早, 主要调制形式有光纤微弯式、光纤绞合式、受抑全内反射式及光栅式等<sup>[2]</sup>.

微弯光纤水听器是根据光纤微弯损耗导致光功率变化的原理而制成的光纤水听器. 其原理如图 2 所示, 两个活塞式构件受声压调制, 它们的顶端是一带凹凸条纹的圆盘, 受活塞推动而压迫光纤, 光纤由于弯曲而损耗变化, 这样输出光纤的光强受到调制, 转换为电信号即可得到声场的声压信号.

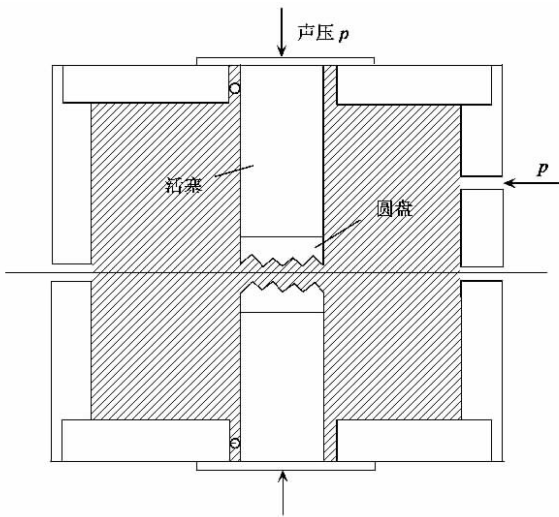


图 2 微弯光纤水听器原理示意图

### 2.3 光纤光栅水听器原理

光纤光栅水听器是以光栅的谐振耦合波长随外界参量变化而移动为原理. 目前光纤光栅水听器一般基于光纤布拉格(Bragg)光栅构造, 如图 3 所示, 当宽带光源(BBS)的输出光波经过一个光纤布拉格光栅(FBG)时, 根据模式耦合理论可知, 波长满足布拉格条件

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

的光波将被反射回来, 其余波长的光波则透射. 式中  $\lambda_B$  为 FBG 的谐振耦合波长, 也即中心反射波长,  $n_{\text{eff}}$

为纤芯有效折射率,  $\Lambda$  为光栅栅距. 当传感光栅周围的应力随水中声压变化时, 将导致  $n_{\text{eff}}$  或  $\Lambda$  的变化, 从而产生传感光栅相应的中心反射波长偏移, 偏移量由

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda$$

确定, 这样就实现了水声声压对反射信号光的波长调制. 所以, 通过实时检测中心反射波长偏移情况, 再根据  $\Delta n_{\text{eff}}$ 、 $\Delta\Lambda$  与声压之间的线性关系, 即可获得声压变化的信息.

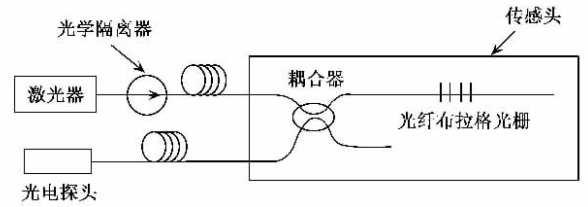


图 3 光纤光栅水听器原理示意图

## 3 光纤水听器特点及其应用

由光纤水听器构成的声纳系统是现代海军反潜作战及水下兵器试验的先进探测手段, 光纤水听器也可以应用于海洋石油、天然气勘探, 还可以应用于水声物理研究以及海洋渔业等领域, 高频光纤水听器则可以用来测量水中超声场, 用于医学测量. 下面就光纤水听器的一些主要特点及其应用作一简略介绍.

### 3.1 光纤水听器特点

(1) 低噪声特性. 光纤水听器采用光学原理构成, 灵敏度高, 由于其自噪声低的特性决定了其可检测的最小信号比传统压电水听器要高 2—3 个数量级, 这使弱信号探测成为可能.

(2) 动态范围大. 压电水听器的动态范围一般在 80—90dB, 而光纤水听器的动态范围可以到 120—140dB.

(3) 抗电磁干扰与信号串扰能力强. 全光光纤水听器信号传感与传输均以光为载体, 几百兆赫以下的电磁干扰影响非常小, 各通道信号串扰也十分小.

(4) 适于远距离传输与组阵. 光纤传输损耗小, 适于远距离传输. 光纤水听器采用频分、波分及时分等技术进行多路复用, 适于水下阵列的大规模组阵.

(5) 信号传感与传输一体化, 提高系统可靠性. 激光由光源发出, 经光纤传输至光纤水听器, 并在拾取声信号后再经光纤传回到岸上或船上的信号处理

设备,水下无电子设备.另外,光纤对水密性要求低,耐高温、抗腐蚀,这些都将大大提高系统的可靠性.

(6)工程应用条件降低.采用全光光纤水听器的声纳系统,探测缆及传输缆皆为光缆,重量轻体积小,系统容易收放,使过去无法实现的方案成为可能,特别对拖曳阵列,由于工程应用条件的降低而使许多问题简单化.

### 3.2 军事上的应用

由于光纤水听器的上述优点和特点,使得由光纤水听器构成的声纳系统可以应用于岸基警戒系统,也可以应用于潜艇或水面舰艇的拖曳系统.

### 3.3 资源勘探

光纤水听器在石油、天然气等资源勘探中的应用前景不亚于军事应用.用光纤水听器采集地震波信号,经过信号处理可以得到待测区域的资源分布信息.用于海洋勘探时,光纤水听器可以布放在海底;用于陆地勘探时,光纤水听器可以吊放到高温高



图6 我国首次光纤水听器阵列海上实验现场



图4 研制的光纤水听器单元

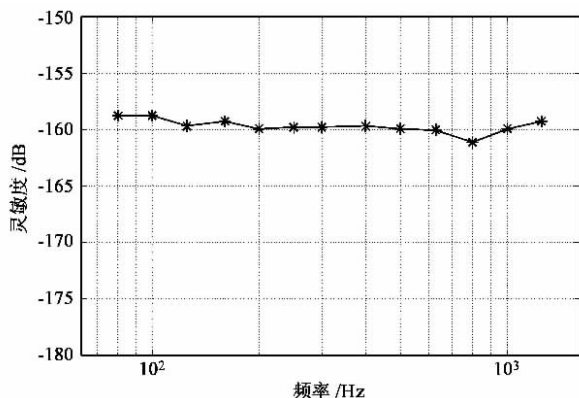


图5 光纤水听器单元在频带80—1250Hz内灵敏度测试的结果(平均值为 $-159.7$  dB,最小值为 $-161.1$  dB,最大值为 $-158.8$  dB,最小值、最大值与平均值的差值分别为 $-1.4$  dB,  $0.9$  dB)

压的勘测井中,光纤水听器还可以埋到沙漠中的沙子底下.例如美国利通公司生产的基于光纤水听器的钻孔成像系统,可以用于勘探地下石油或天然气储备,该系统可以用于陆地或海洋.

### 3.4 水声物理研究等其他应用

光纤水听器用于水声物理研究,以研究海洋环境中的声传播、海洋噪声、混响、海底声学特性以及目标声学特性等.由光纤水听器也可以制作鱼探仪,用于海洋捕捞等作业.由光纤水听器构成的水下声系统,还可以通过记录海洋生物发出的声音,以研究海洋生物以及实现对海洋环境的监测等.

## 4 国内研究进展

我国在“七五”计划期间开始了光纤水听器研究,并在“八五”、“九五”计划期间列入研究计划,从实验室原理性研究到现场水域试验,也取得一定的进展.光纤水听器研究在“十五”计划期间继续在国

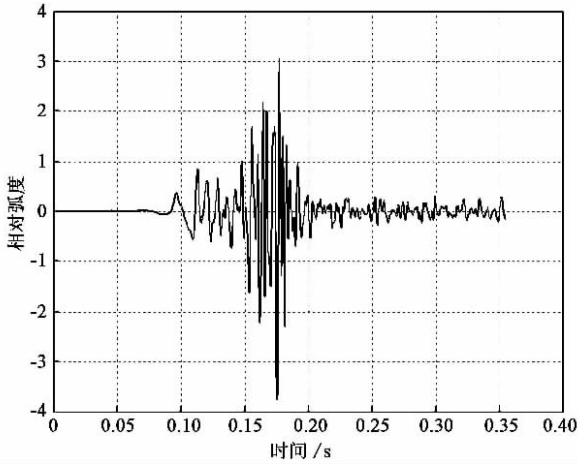


图7 光纤水听器检测到的气枪信号波形

内多个单位开展,并在关键性技术上取得了突破性进展.

我们研制的光纤水听器基元如图4所示,基元在频带80—1250Hz内灵敏度测试的结果如图5所示,单位为dB,基准值为1rad/ $\mu$ Pa.研制的光纤水听器在所测带宽内响应平坦,满足设计指标 $\pm 2.0$ dB的要求.

我们在完成光纤水听器实验室测试、湖试以后,于2002年8月进行了我国首次光纤水听器阵列的海上试验<sup>[3]</sup>,试验参加单位有中国科学院声学研究所、国防科技大学、西安石油勘探仪器总厂以及天津大港油田集团地球物探公司,试验主要目的是验证光纤水听器应用于海洋石油勘探及水声物理研究的可行性,并获得了极大的成功.图6所示为海上实验现场.图7给出其中一个通道记录的经远距离传播后的气枪信号.

经过20多年的发展,光纤水听器技术已经逐渐发展成熟,在一些领域已经获得应用,应用前景十分广阔.

参 考 文 献

[ 1 ] Bucaro J A , Dardly H D , Carome E. J. Acoust. Soc. Am. , 1977 , 62( 5 ) : 1302  
 [ 2 ] 王惠文等. 光纤传感技术与应用. 北京 : 国防工业出版社 , 2001 [ Wang H W *et al.* The Technologies and Applications of Optical Fiber Sensing. Beijing : National Defense Industry Press , 2001 ( in Chinese ) ]  
 [ 3 ] 倪明 李秀林 张仁和等. 全光纤水听器系统海上试验 , 声学学报 , 待发表 Ni M , Li X L , Zhang R H *et al.* to be published in ACTA ACUSTICA ( in Chinese ) ]



· 信息服务 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

June , 2004

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics and photonics , Nano-Particles Physics , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

E-mail : [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)