

文章编号: 0258-7025(2008)08-1214-06

# 薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器

康 崇<sup>1</sup> 张 敏<sup>2</sup> 陈洪娟<sup>3</sup> 庞 盟<sup>4</sup> 吕文磊<sup>1</sup> 秦艳芳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 清华大学电子工程系, 北京 100084  
<sup>3</sup> 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>4</sup> 香港理工大学电机工程学系, 香港 999077

**摘要** 分析了薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器的基本原理。用光纤迈克尔孙干涉法测量水声压差信号, 用琼斯矩阵理论分析了干涉系统的偏振衰落原因并用法拉第镜实现偏振补偿。分析了压差判向的声学原理, 仿真了余弦指向性曲线。用轴对称问题的准静态弹性力学原理分析了水听器背衬结构模型, 得出声压差相移灵敏度的解析式。实验设计并实现了薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器样机, 其测量的声压相移灵敏度与理论计算结果基本吻合, 其指向性测量与计算机仿真分析基本一致。在低频段灵敏度上取得了突破, 为低频水声环境应用压差式矢量水听器提供了依据, 为小尺寸高灵敏度光纤矢量水听器的研制提供了参考。

**关键词** 物理光学; 光纤; 矢量水听器; 琼斯矩阵

中图分类号 TN 253; TB 565<sup>+</sup>.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1214

## Pressure Optical Fiber Vector Hydrophone Made of Thin-Walled Cylindrical Shell

Kang Chong<sup>1</sup> Zhang Min<sup>2</sup> Chen Hongjuan<sup>3</sup> Pang Meng<sup>4</sup> Lü Wenlei<sup>1</sup> Qin Yanfang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>3</sup> College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001 China

<sup>4</sup> Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

**Abstract** The basic principle of pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell is described. The Michelson interferometer is used to measure the acoustic pressure signal. The Jones matrix theory is used to analyze the reasons for the decline of polarization of interference, and the decline of polarization is compensated by Faraday mirror. This optical fiber vector hydrophone adopts the basic acoustic theory of the pressure sentence direction, and other cosine point tropism curves are simulated by computer. The theory of axisymmetric problems of quasi-static mechanics have been used to analyze back-lining structure model of the fiber optic vector hydrophone, to calculate sensitivity of acoustic pressure differential phase shift, and to obtain analytical expression. The pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell is designed by experiment based on the fiber optic Michelson interferometer principle. The experimental measurement of the sensitivity of optical phase agrees well with the results for theoretical analysis. The point tropism measurement is basically consistent with the simulation analysis. This provides reference for the development of the high sensitivity for the small size of vector optical fiber hydrophone.

**Key words** physics optics; optical fiber; vector hydrophone; Jones matrix

## 1 引 言

水声技术中要完整地描述声场并充分利用声场信息, 不仅需要声场的标量信息如声压, 还需要声场

中的矢量信息, 如声压梯度、质点振速和加速度等。矢量水听器<sup>[1~4]</sup>可以实现这些物理量的测量, 单独的矢量水听器单元就具有指向能力。因此, 它一经

收稿日期: 2007-10-26; 收到修改稿日期: 2007-12-29

基金项目: 国家 863 计划(2001AA602011)和黑龙江省科技攻关计划(G202A330)资助项目。

作者简介: 康 崇(1970—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事光学技术、光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: kangchong@hrbeu.edu.cn

问世就引起了研究者的密切关注。

光纤干涉<sup>[5~9]</sup>水听器具有高的灵敏度和强的复用能力。将矢量水听器和光纤水听器结合而成的光纤矢量水听器是水声换能器的新概念。目前光纤矢量水听器的研制和应用还处于初始阶段。

双声压型矢量水听器在小尺度声场范围内探测声压差信号。由于自身结构上的特点,一般认为其工作频带较窄,低频灵敏度较低<sup>[1~3]</sup>,使用受到了限制。薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器采用光纤迈克耳孙(Michelson)干涉原理检测声场压差信号,解决了压差式矢量水听器低频灵敏度低的问题,保持了无密度匹配及布放简便的优点。

## 2 系统原理

### 2.1 压差式光纤矢量水听器的光学系统

如图 1,分布式反馈(DFB)激光<sup>[10,11]</sup>注入 3 dB 耦合器<sup>[12]</sup>的入射端,出纤 1,2 分别绕在两薄壁圆柱壳体侧壁,形成 Michelson 干涉仪的两臂,光纤 1,2 末端各连接一个法拉第反射镜 FM,以抵消偏振衰落。1,2 传感臂的声压差信号产生的光学相移经 3 dB 耦合器的光纤 3 输出至 PIN,再经电路解调输出。

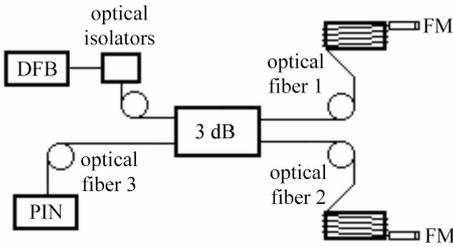


图 1 光纤矢量水听器光路

Fig.1 Light path of optical fiber vector hydrophone system

### 2.2 双光路的偏振态分析

双光路干涉的必要条件是两束光的偏振态保持一致。由于光纤受到水压、温度、震动等因素的干扰,偏振态很难保持一致,即产生偏振衰落,使干涉对比度下降。激光器入射线偏光经过耦合器、传感臂 1 或 2 时,由于线性双折射等原因会使  $HE_{11}^x$  和  $HE_{11}^y$  模产生相移,使偏振态衰落。

振幅归一化的入射线偏光的矩阵为

$$\mathbf{E}_{in}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

法拉第镜的光学矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/2) & -\sin(\pi/2) \\ \sin(\pi/2) & \cos(\pi/2) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

设 3 dB 耦合器中的线性双折射为  $\chi$ , 光纤 3 中双折射为  $\gamma$ , 其光学矩阵<sup>[6,7]</sup> 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\chi) = \begin{bmatrix} e^{-i\chi} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}(\gamma) = \begin{bmatrix} e^{-i\gamma} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

光纤 3 中来自传感臂 1 或 2 的反射回光的矩阵为  $\mathbf{E}_{out3} = \mathbf{F}(\chi) \cdot \mathbf{F}(\gamma) \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{F}(\gamma) \cdot \mathbf{F}(\chi) \cdot \mathbf{E}_{in}(\beta) =$

$$\begin{bmatrix} \cos\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} = \mathbf{E}_{in}\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4)$$

可见相对于入射线偏光  $\mathbf{E}_{in}(\beta)$ , 反射回光  $\mathbf{E}_{out3}$  偏振面仅是旋转了  $90^\circ$ , 与耦合器、光纤中的线性双折射无关。这样带有 FM 光路设计保证了两路传感臂光偏振态始终保持一致。

### 2.3 声压差判向原理

设水中一平面声波  $P(t) = A\sin(2\pi\nu \cdot t)$  沿着与水听器成  $\theta$  角方向传播, 在传感臂 1,2 处产生的声压分别为  $P_1, P_2$ , 如图 2 所示, 其波速、频率分别为  $v, \nu$ 。令  $\tau = \frac{d}{2v} \cos \theta - \frac{1}{4\nu}$ , 干涉仪两臂间距为  $d$ , 此平面波在水听器两端的声相位差  $\Delta\phi$  和声压差  $\Delta P$  为

$$\begin{cases} \Delta\phi = \frac{2d\pi\nu}{v} \cdot \cos \theta \\ \Delta P = P_2 - P_1 = \\ 2A\sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)\cos\left(2\pi\nu \cdot t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \approx \\ P(t + \tau) \cdot \frac{2d\pi\nu}{v} \cdot \cos \theta. \end{cases} \quad (5)$$

由图 3 可见, 以声压差检测的矢量水听器所具备的余弦指向性。

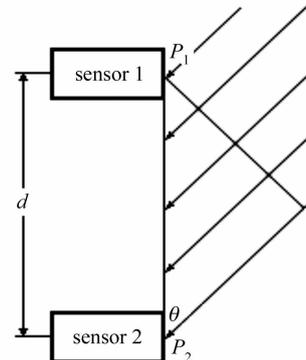


图 2 压差式矢量水听器判向原理

Fig.2 Principle of sentence direction of the pressure optical fiber vector hydrophone

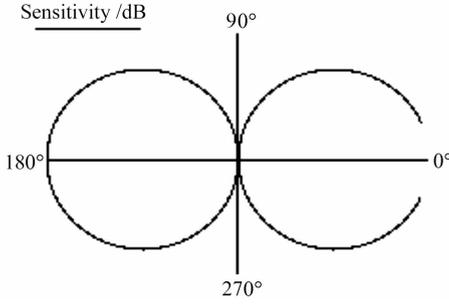


图 3 光纤矢量水听器指向性仿真

Fig. 3 Point tropism simulation of the optical fiber vector hydrophone

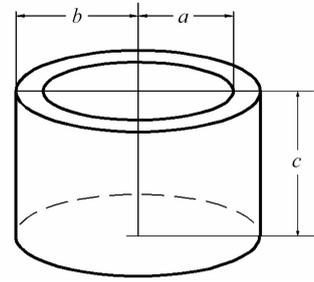


图 4 光纤矢量水听器背衬结构

Fig. 4 Back-lining structure of the optical fiber vector hydrophone

### 3 水听器背衬结构的准静态弹性理论

#### 3.1 薄壁圆柱壳体弹性力学计算

如图 4, 令绕制臂 1 光纤的弹性圆柱壳体的几何对称中心为柱坐标系原点, 设其内、外半径分别为  $a$  和  $b$ , 高为  $c$ , 两端有封闭盖。在声频范围内, 水听器最大尺度远小于声波波长, 故可按准静态理论来分析。此时, 应力分量  $T_i$  应同时满足平衡方程、相容条件及边界条件。将  $r, \theta, z$  分别用 1, 2, 3 来标示  $T_i$ , 则轴对称情况下的准静态平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial T_6}{\partial z} + \frac{T_1 - T_2}{r} = 0 \\ \frac{\partial T_3}{\partial z} + \frac{\partial T_6}{\partial r} + \frac{T_6}{r} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$T_6 = T_{rz}$ , 边界条件为圆柱内表面不受力, 外表面受声压  $P_1$ , 即

$$\begin{cases} T_1|_{r=a} = T_6|_{r=a, r=b} = 0 \\ T_1|_{r=b} = P_1 \\ T_3|_{z=\pm c/2} = P_1 \frac{b^2}{b^2 - a^2} \end{cases}, \quad (7)$$

由上述方程组解出

$$\begin{cases} T_1 = -P_1 \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{a^2} \right) \\ T_2 = -P_1 \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \left( -\frac{1}{r^2} - \frac{1}{a^2} \right), \\ T_3 = P_1 \frac{b^2}{b^2 - a^2} \\ T_6 = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

由轴对称问题的物理方程, 应变  $S_i$  为

$$\begin{cases} S_1 = \frac{P_1 b^2 a^2}{Y(b^2 - a^2)} \left( \frac{1 - 2\sigma}{a^2} - \frac{1 + \sigma}{r^2} \right) \\ S_2 = \frac{P_1 b^2 a^2}{Y(b^2 - a^2)} \left( \frac{1 + \sigma}{r^2} + \frac{1 - 2\sigma}{a^2} \right), \\ S_3 = \frac{P_1 b^2}{Y(b^2 - a^2)} (1 - 2\sigma) \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $\sigma = 0.186, Y = 392 \text{ MPa}$  分别为材料的泊松系数和杨氏模量。

#### 3.2 矢量水听器的声压相移灵敏度

当柱壳受到声波作用而产生弹性响应时, 会使缠绕其上的臂 1 光纤产生应变, 产生相应的光相位变化  $\Delta\varphi_1$ , 其中光相位  $\varphi_1$  为

$$\varphi_1 = kn \cdot l = \beta \cdot l, \quad (10)$$

式中  $k$  为自由空间光波数;  $n = 1.517$  为纤芯折射率,  $l$  为传感臂光纤长度。于是

$$\frac{\Delta\varphi_1}{\varphi_1} = \left( \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right), \quad (11)$$

式中  $\Delta n/n$  可从光弹效应关系式给出。令  $\epsilon_i$  为直角坐标中的光纤应变分量,  $p_{ij}$  为光弹系数, 实验中单模光纤的  $p_{11} = 0.121, p_{12} = 0.270$ 。  $\Delta l/l$  为光纤的轴向应变, 记成  $\epsilon_3$ , 且因轴对称性  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ , 所以

$$\frac{\Delta\varphi_1}{\varphi_1} = \epsilon_3 - \frac{n^2}{2} [(p_{11} + p_{12})\epsilon_1 + p_{12}\epsilon_3]. \quad (12)$$

设薄壁圆柱壳体上光纤缠绕的螺距为  $h$ , 一般要求水听器的外径尺寸  $2b$  较小, 为增加灵敏度, 缠绕光纤要求很长, 这样缠绕的圈数较多, 所以  $h$  一般远小于外径  $2b$ 。令光纤缠绕倾角为  $\vartheta$ , 如图 5 所示。

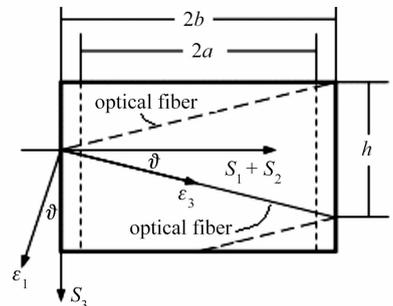


图 5 光纤缠绕示意图

Fig. 5 Sketch of fiber entanglement

如果光纤与背衬柱壳有良好的弹性传递, 则二者接触面上应变连续, 由图 5

$$\epsilon_3 = S_3|_{r=b} \sin \vartheta + (S_1 + S_2)|_{r=b} \cos \vartheta$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= S_3 |_{r=b} \cos \vartheta - (S_1 + S_2) |_{r=b} \sin \vartheta \\ \tan \vartheta &= h/4b, \end{aligned} \quad (13)$$

令

$$\eta = \frac{8b + h + (h - 2b)n^2 p_{11} + \left(\frac{h}{2} - 6b\right)n^2 p_{12}}{\sqrt{h^2 + 16b^2}}, \quad (14)$$

将(9)代入(13)式,再代入(12)式,得

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\eta \cdot \beta \cdot l \cdot P_1 \cdot (1 - 2\sigma)}{Y[1 - (a/b)^2]},$$

同理,光纤臂 2 受到声压  $P_2$  后,其光相位变化

$$\Delta\varphi_2 = \frac{\eta \cdot \beta \cdot l \cdot P_2 \cdot (1 - 2\sigma)}{Y[1 - (a/b)^2]},$$

在声压差  $\Delta P = P_2 - P_1$  的作用下,两臂光纤干涉的相位差  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1$ ,则该矢量水听器的声压差-相移灵敏度<sup>[13]</sup>为

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta P} = \frac{\eta \cdot \beta \cdot l \cdot (1 - 2\sigma)}{Y[1 - (a/b)^2]}. \quad (15)$$

测量灵敏度时,一般采用检测声压信号的标准水听器作为参考校准,为了比对,光纤矢量水听器的声压差灵敏度要转换成声压灵敏度。于是把(5)式代入(15)式,得光纤矢量水听器的声压灵敏度表达式

$$\frac{\Delta\varphi}{P} = 20 \lg \left\{ \frac{2\eta\beta \cdot l(1 - 2\sigma)d\pi\nu}{10^6 \cdot Y[1 - (a/b)^2]v} \cos \theta \right\}, \quad (16)$$

采用 dB 为单位(注:0 dB=1 rad/ $\mu$ Pa)。可见,其声压灵敏度与待测频率  $\nu$  成正比,且具有余弦指向性。

### 3.3 光纤缠绕螺距与灵敏度的关系仿真

为了解光纤缠绕螺距对矢量水听器声压相移灵敏度的影响,仿真(16)式中  $\Delta\varphi/P$  与螺距  $h$  的关系曲线,如图 6 所示。(16)式中  $h$  由(14)式引入。曲线显示,在实际水听器的各项参数条件下,当  $h = 0.0748$  m 时,灵敏度达到极大值 -122.84 dB。压差

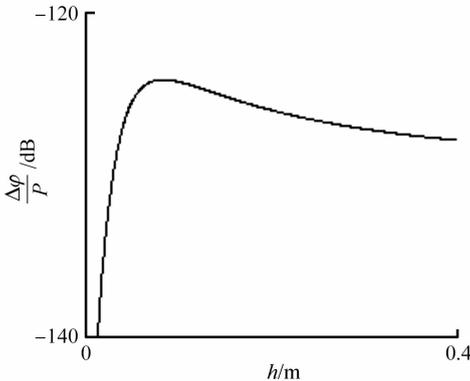


图 6 灵敏度与光纤螺距  $h$  的关系曲线

Fig. 6 Curve of sensitivity versus  $h$

式矢量水听器要求  $d$  远小于声波波长,对于 1 kHz 频率的声波,其波长约 1.5 m,选择  $d = 0.1$  m,  $c$  值更小,大约 5 mm。实际对光纤选择了紧密螺旋缠绕,  $\vartheta \approx 0.2^\circ$ ,由此声压相移灵敏度牺牲了约 20 dB,下降至 -140 dB 以下,但仍高于压电式矢量水听器 40~60 dB。

### 3.4 薄壁壳体厚度与灵敏度的关系仿真

令薄壁圆柱壳体壁厚  $s = b - a$ ,代入(16)式

$$\frac{\Delta\varphi}{P} = 20 \lg \left[ \frac{2\eta\beta^2 \cdot l(1 - 2\sigma)d\pi\nu}{10^6 \cdot Y(2bs - s^2)v} \cos \theta \right], \quad (17)$$

仿真(17)式中  $\frac{\Delta\varphi}{P}$  与薄壁厚  $s$  的关系,曲线如图 7 所示。

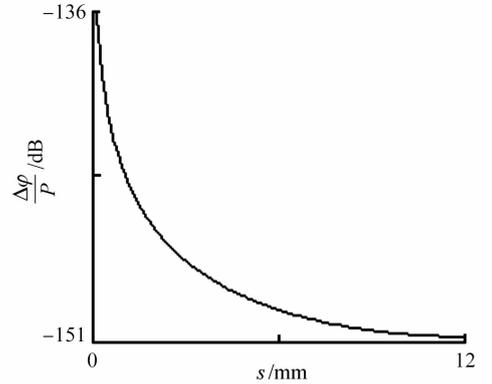


图 7 灵敏度与壳体壁厚  $s$  的关系曲线

Fig. 7 Curve of sensitivity versus  $s$

虽然  $s$  越小水听器灵敏度越高,但壁厚  $s$  还受水下静压力的制约不能无限趋 0,选取  $s = 0.5$  mm(水深 20 m 的条件下耐压极限厚度,与薄壁壳体材料性能有关),当声频为 1 kHz,  $\theta = 0$  时对应水听器理论灵敏度 -138 dB,与实测灵敏度值吻合。

## 4 灵敏度及指向性的测量

传感器在国家水声重点实验室的柱面波声场中进行测试。如图 8 所示,光纤矢量水听器与标准参考水听器置于测量液柱内同一高度,液柱频率范围 10~1000 Hz。完整的光纤矢量水听器系统还包括信号解调部分和算法<sup>[14,15]</sup>的设计。

测试光源采用 980 nm 的 DFB 激光器。背衬圆柱壳体内径  $2a = 23$  mm,外径  $2b = 24$  mm,光纤迈克耳孙干涉传感臂的长度  $l = 4.9$  m,两传感臂间距  $d = 100$  mm,  $\theta = 0$  时实验测出水听器频响特性如图 9。100 Hz 时相移灵敏度为 -155 dB,1 kHz 时相移灵敏度为 -140 dB。图中直线为理论计算的声压灵敏度。

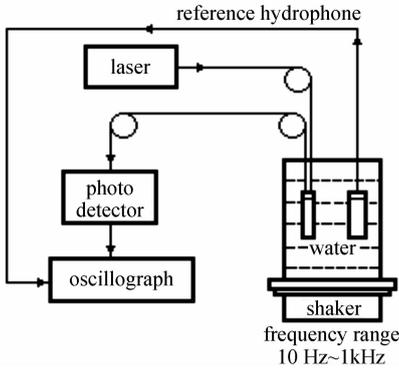


图 8 光纤矢量水听器的测试

Fig. 8 Testing of the optical fiber vector hydrophone

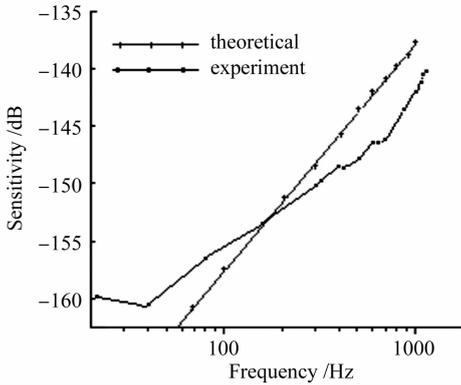


图 9 光纤矢量水听器的频响特性

Fig. 9 Frequency response characteristic of the optical fiber vector hydrophone

图 9 中理论与实际频响曲线在变化趋势上是吻合的,但偏差明显。在实际手工缠绕光纤时,不能保证缠绕螺距和施加拉力严格均匀,图 6 显示了螺距对灵敏度的影响;光纤固化和水听器灌封材料的杨氏模量等参数与理论值不符,也是产生偏差的部分原因。

受声发射源的带宽限制,低于和高于 100 Hz 的

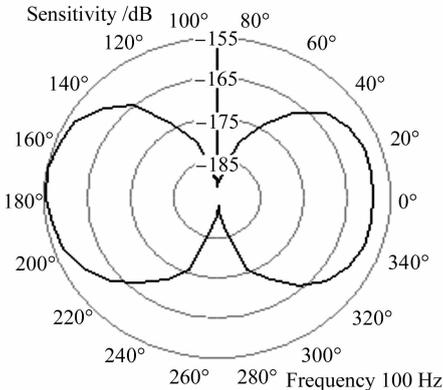


图 10 100 Hz 时光纤矢量水听器的方向图

Fig. 10 Direction map of optical fiber vector hydrophone at 100 Hz

两个频带内分别采用两套液柱,在 100 Hz 附近理论与实测曲线产生了交点。低频段测量曲线高于理论曲线的异常现象是由于参考水听器通带内不平坦,低频段灵敏度低造成的。

传感器在 100 Hz 和 1 kHz 时的方向图如图 10 和 11 所示,由图可见其余弦指向性。由于制作工艺方面的原因,两臂对称性和光纤缠绕的松紧程度可能有所偏差,于是产生了水平方向曲线不对称、垂直方向交叉串扰(灵敏度不为 0)的现象。峰谷比在 30 dB 以上。

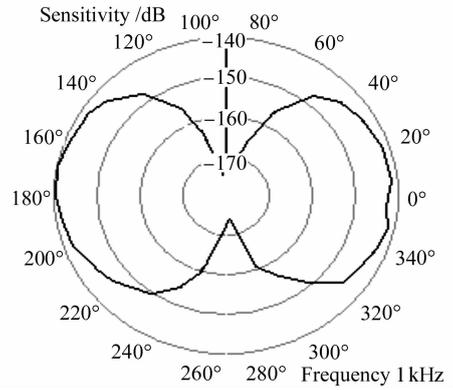


图 11 1 kHz 时光纤矢量水听器的方向图

Fig. 11 Direction map of optical fiber vector hydrophone at 1 kHz

### 5 结 论

设计用迈克尔孙干涉仪两臂实现水声压差信号的测量。用偏振光学矩阵理论分析了干涉系统的偏振衰落原因并用法拉第镜实现偏振衰落的补偿。分析了这种矢量水听器采用压差判向的声学基本理论,仿真了其余弦指向性曲线。用轴对称问题的准静态弹性力学原理分析了该矢量水听器背衬结构模型,计算了声压差相移灵敏度,仿真了光纤缠绕螺距、壳体壁厚对矢量水听器声压相移灵敏度的影响。实验设计了矢量水听器样机,测量的光学相位灵敏度与理论分析计算结果基本吻合,指向性测量与仿真分析基本一致。

### 参 考 文 献

- Chen Lijie, Zhang Peng, Xu Xingye et al. . Overview of vector hydrophone[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(6):5~8  
陈丽洁,张 鹏,徐兴烨等. 矢量水听器综述[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(6):5~8
- Sun Guiqing, Li Qihu, Yang Xiuting et al. . A novel fiber optic hydrophone and vector hydrophone [J]. *Physics*, 2006, **35**(8): 645~653  
孙贵青,李启虎,杨秀庭等. 新型光纤水听器和矢量水听器[J].

- 物理, 2006, **35**(8):645~653
- 3 Jia Zhifu. Design and characteristics of a resonant-sphere type three dimensional vector hydrophone [J]. *Applied Acoustics*, 2001, **20**(4):15~20  
贾志富. 三维同振球型矢量水听器的特性及其结构设计[J]. *应用声学*, 2001, **20**(4):15~20
  - 4 Yao Zhixiang, Hui Junying, Yin Jingwei *et al.*. Four approaches to DOA estimation based on a single vector hydrophone [J]. *The Ocean Engineering*, 2006, **24**(1):122~127, 131  
姚直象, 惠俊英, 殷敬伟 等. 基于单矢量水听器四种方位估计方法[J]. *海洋工程*, 2006, **24**(1):122~127, 131
  - 5 Jiang Yi, Liu Li. Fiber optical Fabry-Perot vibration sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1059~1062  
江毅, 刘莉. 光纤 Fabry-Perot 腔振动传感器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9):1059~1062
  - 6 Zhan Yuanling, Lu Mingzhe. Theoretical analysis of multimode fiber Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(9):803~809  
战元令, 路明哲. 多模光纤 Fabry-Perot 干涉仪的分析[J]. *光学学报*, 1989, **9**(9):803~809
  - 7 Ruan Chi, Gao Yingjun, Liu Zhilin *et al.*. Fiber optics Fabry-Perot level meter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10):1170~1174  
阮驰, 高应俊, 刘志麟 等. 光纤法布里-珀罗腔液位传感器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10):1170~1174
  - 8 Bo Linhou, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1324~1327  
柏林厚, 廖延彪, 张敏 等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1324~1327
  - 9 Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):85~87  
饶云江, 曾祥楷, 朱永 等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):85~87
  - 10 Yang Haijing, Wang Yanhua, Zhang Tiancai *et al.*. Modulation-free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):316~320  
杨海菁, 王彦华, 张天才 等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光频率锁定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3):316~320
  - 11 Chen Jianguo, Zhou Xiaohong. Effects of spectral width of frequency selecting element on tunable external cavity semiconductor lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10):1417~1421  
陈建国, 周小红. 选频元件谱线宽度对可调谐外腔半导体激光器的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10):1417~1421
  - 12 Zhang Saoxian, Zeng Xuefei, Liu Yongzhi. A kind of optical gyroscope structure based on ring resonator and Mach-Zehnder interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):117~120  
张少先, 曾雪飞, 刘永智. 调谐腔马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺螺[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):117~120
  - 13 Kang Chong, Wang Zhengping, Huang Zongjun *et al.*. Influence of the fineness of optical fiber Fabry-Perot resonant cavity on the phase sensitivity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):428~430  
康崇, 王政平, 黄宗军 等. 光纤 Fabry-Perot 谐振腔的精细度对相位灵敏度的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3):428~430
  - 14 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A  $J_0$ - $J_1$  method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):105~108  
王泽锋, 罗洪, 熊水东 等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的  $J_0$ - $J_1$  法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):105~108
  - 15 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. Phase compensating detection method of interferometric fiber-optic hydrophones based on tuning the frequency of the laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):654~658  
王泽锋, 罗洪, 熊水东 等. 基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):654~658