

基于光纤碟型加速度传感单元的三维柱形矢量水听器

金梦群 张自丽 吴国军 葛辉良

杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 光纤矢量水听器(FOVH)以其低频灵敏度高,动态范围大,抗电磁干扰,易轻型化等诸多优势,成为新型矢量水听器的一个发展热点。针对线阵列应用,开展了光纤干涉碟型矢量水听器的仿真分析和研制工作。有限元分析采用光纤等效层方法(FLEM)和光纤细化结构方法(FLDM)分别对系统的性能进行预报,研制出了光纤碟型矢量水听器样品,并进行了全面的测试。实验结果表明,所研制的矢量水听器样品在100~1000 Hz的工作频带内,矢量通道的等效声压相移灵敏度为-182 dB@100 Hz~-158.5 dB@1000 Hz (ref.1 rad/ μ Pa),串扰小于-30 dB,有良好的矢量性。

关键词 光纤光学; 光纤矢量水听器; 有限元分析; 光纤等效层方法; 光纤细化结构方法; 声压相移灵敏度

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0305004

A Three-Dimensional Vector Hydrophone Based on Fiber-Optic Flexural Disk Accelerometer

Jin Mengqun Zhang Zili Wu Guojun Ge Huiliang

Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract Fiber-optic vector hydrophone (FOVH), with many advantages including high sensitivity, large dynamic range, intrinsic immunity to electromagnetic interference and light weight, is becoming a hotspot of new-style vector sensors. For array applications, finite element methods and experimental results of the fiber-optical flexural disk vector hydrophone are discussed (FOVH). Two finite element analysis methods are presented to forecast the performance, fiber-layer equivalent method (FLEM) and fiber-layer division method (FLDM), then a fiber-optic flexural disk vector hydrophone is developed and related metrology aspects of measurement is demonstrated. The experimental results are presented that pressure phase sensitivity of the hydrophone is -182 dB@100 Hz~-158.5 dB@1000 Hz (ref.1 rad/ μ Pa) at the range from 100 Hz to 1000 Hz. The cross-sensitivity is less than -30 dB. It possesses a good directional performance.

Key words fiber optics; fiber optic vector hydrophone; finite element analysis; fiber-layer equivalent method; fiber-layer division method; pressure phase sensitivity

OCIS codes 060.2370; 060.5060; 120.7280; 130.0250

1 引言

光纤矢量水听器(FOVH)包含三维的矢量传感单元和声压传感单元,是一种新型的低频高灵敏度水听器,国外已经将其应用于海底固定布放阵列中^[1-2]。加速度传感单元作为光纤矢量水听器的核心部件,对水听器性能起决定作用。加速度传感单元的类型主要有芯轴型^[3-7]和碟型。其中基于碟型加速度传感单元的矢量水听器设计更为灵活,多采用三轴分立式结构。本文针对线阵列应用需求,开展了基于碟型加速度传感单元的三维矢量水听器的仿真分析和实验研究工作。水听器的解调方法采用相位载波(PGC)解调法^[8],在100~1000 Hz的工作频带内,声压灵敏度在-182 dB@100 Hz~-158.5 dB@1000 Hz (ref.1 rad/ μ Pa),串扰小于-30 dB。

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-10-30

作者简介: 金梦群(1987—),男,博士研究生,助理工程师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: jinmq715@163.com

导师简介: 葛辉良(1972—),男,博士,研究员,主要从事水声换能器、信号处理及光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: sklghl@yahoo.com.cn

2 光纤碟型矢量水听器的基本理论

同振柱形矢量水听器在水中声波作用下,当水听器外壳为刚性,几何尺寸远小于波长,即 $ka \ll 1$, k 为波数, a 为水听器尺寸,整体平均密度 ρ 接近水介质密度 ρ_0 时,矢量水听器的振速幅值将和水听器几何中心处水质点的振速幅值相同,且相位差趋于零:

$$\left| \frac{v}{v_0} \right| = \frac{2\rho_0}{\rho + \rho_0} \approx 1, \quad \phi \rightarrow 0. \quad (1)$$

作为核心部件的矢量传感单元可以获取声场中三维的矢量信息(加速度、速度、位移等)。内部矢量传感单元采用碟形结构,光纤干涉仪两臂分别缠绕在弹性片的上下表面,一端连接耦合器,另一端连接法拉第旋转镜(FRM),如图 1 所示。

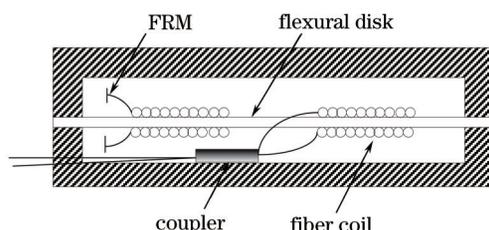


图 1 碟型加速度传感单元的简化模型

Fig.1 Simplified model of flexural disk accelerometer

由于采用推挽式结构和迈克耳孙干涉仪,干涉后两臂的总相位差为:

$$\phi = 4nkL, \quad (2)$$

式中 n 为纤芯折射率, k 为纤芯波数, L 为缠绕光纤长度。在加速度作用下,圆片发生弯曲,引起表面的光纤产生形变,从而使光相位差发生变化,相位差的变化量主要有两部分影响因素,一部分是光纤长度的变化,另一部分是光纤折射率的变化:

$$\Delta\phi = 4nkL \left[\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right]. \quad (3)$$

加速度作用引起的光纤折射率的变化与光纤长度的变化有如下关系:

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} [(1 - \sigma_f) p_{12} - \sigma_f p_{11}] \frac{\Delta L}{L}, \quad (4)$$

式中 σ_f 为光纤的泊松比, p_{12} 和 p_{11} 为普克尔系数,石英光纤的性能参数如表 1 所示。故光相位差的变化与光纤长度 L 和平均径向应变 $\bar{\epsilon}_r$ 的关系为

$$\Delta\phi = \frac{8\pi n}{\lambda} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [(1 - \sigma_f) p_{12} - \sigma_f p_{11}] \right\} L \bar{\epsilon}_r. \quad (5)$$

表 1 石英光纤的性能参数表

Table 1 Parameters of silica fiber

Parameter	Symbol	Value
Pockels coefficient of fibre	p_{11}	0.121
Pockels coefficient of fibre	p_{12}	0.270
Poisson ratio of fibre	σ_f	0.17
Wavelength of light	λ	1550 nm
Refractive index of fiber	n	1.456

对于加速度型光纤矢量水听器,加速度相移灵敏度 M_a 定义为光纤相位差 $\Delta\phi$ 与加速度 a 的比值:

$$M_a = \frac{\Delta\phi}{a} \quad (\text{rad/g}). \quad (6)$$

由于测得的加速度 a 是声压波动 P 引起的,且声场中的加速度矢量与声压存在这样的关系:

$$\mathbf{a} = j\omega \frac{1}{\rho_0 c_0} P \mathbf{n}. \quad (7)$$

因此,在满足 $ka \ll 1$, 整体平均密度 ρ 接近水介质密度 ρ_0 的条件下,可推导出光纤矢量水听器的等效声压相移灵敏度 M_p 为

$$M_p = \frac{\omega}{\rho_0 c_0} M_a \quad (\text{rad}/\mu\text{Pa}). \quad (8)$$

由(8)式可知,光纤矢量水听器的等效声压灵敏度与频率有关,且每倍频程增加 6 dB。

3 加速度传感单元的有限元分析

利用 ANSYS 有限元软件对加速度传感单元进行建模。主要的方法是光纤等效层法(FLEM)和光纤结构细化法(FLDM)。两种方法都考虑了光纤对敏感元件弹性碟片的约束作用,只是对光纤层的处理方法不同。光纤等效层法将光纤层看作各向同性、密度均匀的结构体,将光纤的纤芯、内覆层、外覆层和胶层的材料参数按照体积比加权相加作为等效光纤层的材料参数(弹性模量、泊松比、密度等)^[8-9]。文献[9]中的光纤层等效的杨氏模量 E 为 1.956×10^{10} Pa,泊松比 σ 为 0.34,密度为 $1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。光纤等效层法建模以后,通过模态分析提取传感器的谐振频率和振动模态,光纤层的前两阶振动模态如图 2 所示。

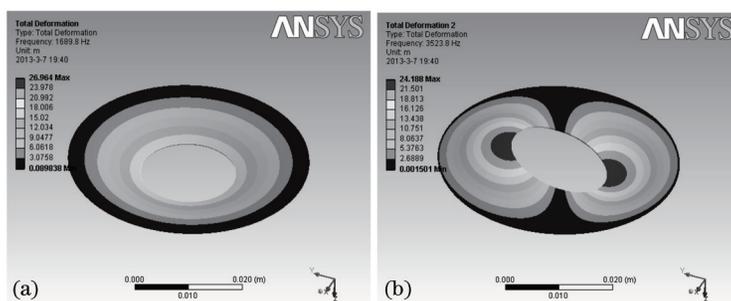


图 2 光纤等效层的振动模态图。(a) 一阶振动模态; (b) 二阶振动模态

Fig.2 Vibration modes of fiber coil. (a) First vibration mode; (b) second vibration mode

通过谐响应分析提取光纤层在 100~1000 Hz 的工作频带内,加速度作用下的平均径向应变, (5)、(6)、(8)式计算其声压相移灵敏度。

光纤结构细化法对光纤层部分进行结构细化建模,保留了光纤内外三层结构及材料、圈数、层数的复杂性,光纤层各层的材料参数如表 2 所示。

表 2 光纤各层的材料参数表

Table 2 Material parameters of each fiber layer

	Young's modulus /Pa	Poisson ration	Density /(kg/m ³)
Fiber core layer	7.2×10^{10}	0.17	2202
Inner coating layer	5.0×10^6	0.50	970
Outer coating layer	2.1×10^8	0.49	1190
Glue layer	8.0×10^7	0.245	1080

为了简化计算量,采用二维轴对称模型,并使用具有三维自由度的 PLANE25 单元划分网格。采用三维自由度的主要原因是认为光纤折射率的变化与各向异性的应变有关:

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2}(p_{11}\epsilon_r + p_{12}\epsilon_r + p_{12}\epsilon_z). \quad (9)$$

由(3)、(9)式,可得光相位差 $\Delta\phi$ 与平均径向应变 ϵ_r 和平均轴向应变 ϵ_z 的关系为

$$\Delta\phi = \frac{8\pi n}{\lambda} L \left[n \left(1 - \frac{n^2}{2} p_{12} \right) \bar{\epsilon}_z - \frac{n^3}{2} (p_{11} + p_{12}) \bar{\epsilon}_r \right]. \quad (10)$$

由表 2 可知光纤层纤芯、内覆层、外覆层以及光纤周围胶层的材料参数差异很大,所以分成四层建模,弹性碟片的材料和尺寸以及光纤的绕线区域与光纤等效层法相同。选用具有三维自由度的平面 PLANE25 单元划分网格,如图 3 所示。

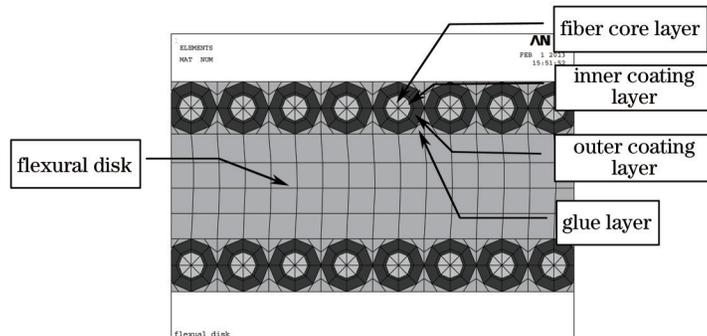


图3 光纤结构细化法的有限元网格模型

Fig.3 Finite element gridding model of the fiber-layer division method

同样通过模态分析,计算得到其谐振频率。谐响应分析的频率范围为0~1000 Hz。提取光纤纤芯层的平均轴向和径向应变。在加速度作用下,光纤纤芯层的轴向应变如图4所示。根据(10)式计算其加速度灵敏度。

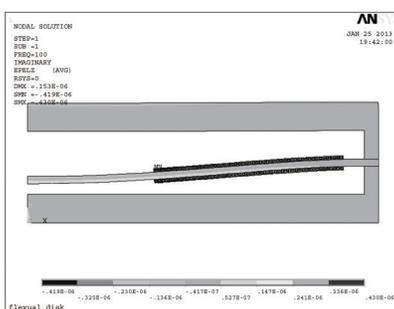


图4 加速度传感单元的平均轴向应变

Fig.4 Average axial strain of the accelerometer

4 样品验证

针对这一模型,设计并制作了光纤加速度传感单元样品,该碟型加速度传感单元样品外壳结构为铝,增敏结构为铜,尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 光纤绕制一层,与仿真结果一致。

光纤水听器的解调方法主要有相位载波(PGC)解调法^[3]、3×3解调法^[10-11]和外差解调法^[12]等,采用PGC解调方法。相位载波(PGC)解调法将待测信号调制在载波信号的边带上,将一组经过低通滤波器后的正交信号用微分交叉相乘(DCM)等方法进行信号处理,再经高通滤波得到稳定的解调信号。采用PGC解调方法的输入光信号和解调信号的时频域谱如图5所示。

对该样品进行了加速度灵敏度测试,以验证有限元建模的准确性。样品测试结果与两种仿真方法的结果比较如图6所示。由图可见,在单层光纤情况下,光纤等效层法和光纤结构细化法的预报结果非常接近,

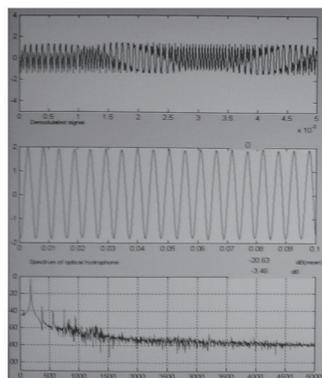


图5 输入光信号和解调信号时频域谱图

Fig.5 Input optical signal and spectrum of demodulation signal

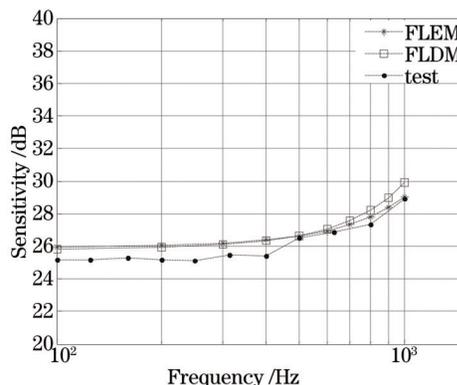


图6 两种有限元方法对加速度传感单元灵敏度仿真比较图

Fig.6 Comparison of sensitivity emulation of accelerometer using two finite element methods

与实际测试结果相吻合(差异在 1 dB 以内)。

为了进一步比较两种仿真方法的性能,试制了单层和双层光纤绕制的两种声压传感单元样品,并测试了灵敏度。两种建模方法有限元分析结果和实际测试结果的对比见表 3。

表 3 两种有限元方法对声压传感单元的灵敏度仿真结果比较表

Table 3 Comparison of sensitivity of pressure hydrophone using two finite element methods

Fiber coil layer	Test(ref. 1 rad/ μ Pa)	FLEM	FLDM
1	-139 dB	-141.2 dB/-2.2 dB	-138.8 dB/+0.2 dB
2	-136 dB	-139.1 dB/-3.1 dB	-135.8 dB/+0.2 dB

由表 3 可知,对绕制单层光纤的光纤声压传感单元,光纤等效层法仿真结果比实际测试结果小 2.2 dB;对于绕制双层光纤,光纤等效层法仿真结果比实际测试结果小 3.1 dB。而光纤结构细化建模方法计算的光纤声压传感单元灵敏度与实际测试结果只差 0.2 dB。结果表明,光纤结构细化的灵敏度仿真结果比光纤等效层法在多层光纤建模方面更为接近实际测试值。

在此基础上,研制了基于单层光纤加速度传感单元的三维矢量水听器样品,尺寸为 $\phi 80 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$,中性浮力,各加速度传感单元之间通过支撑结构保持各维正交性。该三维矢量水听器样品由光纤盘^[13]、弹性碟片、加速度传感单元外壳、支撑结构及外封装壳组成。

样品在水声计量一级站的矢量水听器校准实验室进行了灵敏度和指向性的测试。一维加速度传感单元和矢量水听器的样品如图 7 所示。

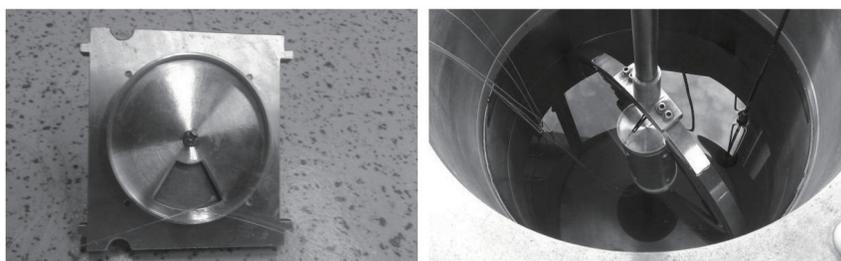


图 7 光纤加速度传感单元及矢量水听器样品

Fig.7 Fiber optic accelerometer and vector hydrophone sample

水听器的灵敏度测试结果表明,在 100~1000 Hz 的工作频带内,等效声压灵敏度为 -182 dB@100 Hz~ -158.5 dB@1000 Hz(ref.1 rad/ μ Pa)。进行了串扰的测试,主轴灵敏度较其他非主轴大 30 dB 左右。如图 8 所示,两种有限元建模方法对单层光纤绕制水听器的灵敏度预报结果均与实际测试的结果接近,证明了有限元建模方法有很好的预报效果。其中,光纤结构细化法在 500~1000 Hz 的频段更接近实际测试的结果。

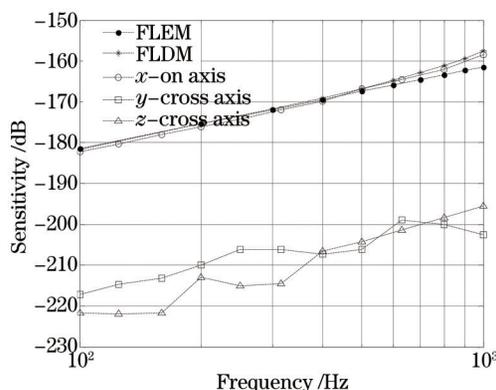


图 8 声压灵敏度测试结果

Fig.8 Pressure sensitivity test result

指向性测试结果表明,各方向在 1 kHz 时均有良好的八字形指向性,最大值不均匀性小于 1.2 dB,如图 9 所示,光纤矢量水听器样品在 1 kHz 表现出良好的矢量性。

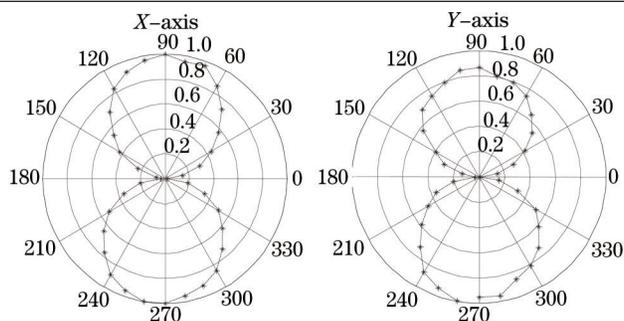


图9 1 kHz的指向性测试结果

Fig.9 Directional test result at 1 kHz

5 结 论

提出一种基于光纤碟型加速度传感单元的三维柱形矢量水听器方案。采用光纤等效层法和光纤结构细化法两种有限元建模方法,对水听器的谐振频率和灵敏度进行预报。在此基础上,开展碟型加速度传感单元和矢量水听器的样品研制,并对样品进行了全面的计量测试。实验结果表明,水听器在100~1000 Hz的工作频带内,声压灵敏度在 $-182 \text{ dB}@100 \text{ Hz} \sim -158.5 \text{ dB}@1000 \text{ Hz}$ (ref 1 rad/ μPa)。串扰小于 -30 dB 。通过指向性测试可知在1 kHz时有良好的八字形指向性,最大值不均匀性小于1.2 dB。认为在单层光纤的加速度传感单元灵敏度预报方面,光纤等效层法和光纤结构细化法均表现出良好的预报性能。根据声压传感单元的测试结果,光纤结构细化法在多层光纤水听器建模预报方面更有优势。下一步的工作主要是突破多层碟型光纤绕制工艺,比较两种方法对多层碟型加速度传感单元的预报性能。

参 考 文 献

- 1 P Nash, A Strudley, R Crickmore, *et al.*. High efficiency TDM-WDM architectures for seismic reservoir monitoring[C]. SPIE, 2009, 7503: 75037T.
- 2 J Freitas. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks[J]. Meas Sci Technol, 2011, 22(5): 1-26.
- 3 Xiong Shuidong. Study of Fiber Optic Vector Hydrophone[D]. Changsha: National Defense University of Technology, 2003.
熊水东. 光纤矢量水听器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- 4 Zeng Nan, Shi Chunzheng, Zhang Min, *et al.*. A 3-component fiber-optic accelerometer for well logging[J]. Opt Commun, 2004, 234: 153-162.
- 5 Rao Wei, Zhang Nan, Niu Siliang, *et al.*. Seafloor exploration using a 4-element towed fiber optic hydrophone array[C]. ICEOE, 2011, 2: 359-361.
- 6 Wu Yanqun. Study on Key Technology of Fiber Optic Vector Hydrophone in Towed Line Array[D]. Changsha: National Defense University of Technology, 2011.
吴艳群. 拖线阵用光纤矢量水听器关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 7 Wu Yanqun, Luo Hong, Hu Zhengliang, *et al.*. Adaptive cancellation of background noise of fiber optic vector sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305004.
吴艳群, 罗洪, 胡正良, 等. 光纤矢量水听器系统本底噪声的自适应抵消[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0305004.
- 8 Jong-In Im, Yong-rae Roh, A finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone[J]. J Acoust Soc Am, 1998, 103(5): 2425-2431.
- 9 Jong-In Im, Yong-rae Roh, A finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone with a concentric composite mandrel including a foaming layer[J]. J Acoust Soc Am, 1999, 106(3): 1363-1368.
- 10 Zhang Huayang, Wang Liwei, Shi Qingping, *et al.*. A new demodulation method for time division multiplexing system of fiber-optic hydrophone using a 3x3 coupler[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505011.
张华勇, 王利威, 施清平, 等. 光纤水听器时分复用系统通过3x3耦合器信号解调的一种新算法[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505011.

- 11 Zhang Huayong, Wang Dongning, Shi Qingping, *et al.*. Optical intensity compensating method for time division multiplexing of fiber-optic hydrophone using a 3×3 coupler[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1105006.
张华勇, 王东宁, 施清平, 等. 基于 3×3 耦合器的光纤水听器时分复用系统的光强补偿方法[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1105006.
- 12 Zhang Nan. Study on Several Key Technologies of Interferometric Fiber Optic Hydrophone Array System Based on Heterodyne Detection Scheme[D]. Changsha: National Defense University of Technology, 2013.
张楠. 基于外差检测的干涉型光纤水听器阵列系统若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- 13 S T Vohra, B Danver, A Tveten, *et al.*. Fiber optic accelerometer sensor and a method of constructing same: US 6328837[P]. 2001.

栏目编辑: 韩峰