

评价光纤水听器探头的性能参数

陈 毅

(杭州应用声学研究所, 杭州 310012)

摘要: 光纤水听器声学性能的准确评价一直是人们非常关心的问题。简要叙述了相位干涉型光纤水听器的工作原理, 指出了光纤水听器探头和光纤水听器系统的区别。作为光纤水听器的关键技术之一, 光纤水听器探头声学性能的测试还没有明确的规范或标准。为此, 提出了有关评价光纤水听器探头声学性能的参数, 如相移灵敏度、加速度相移灵敏度、相对加速度相移灵敏度、指向性、相移灵敏度随静水压的变化、相移灵敏度随温度的变化等的定义, 并给出了相关的表达式, 对准确测量和评价光纤水听器探头的声学性能有一定的借鉴意义。并希望通过这样的讨论, 促进光纤水听器探头性能测试的规范和相关标准的制定。

关键词: 性能参数; 评价; 光纤水听器探头; 相位干涉; 相移灵敏度

中图分类号: TB565; TN247

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-01-0102-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.01.018

Performance parameters for appraising the head of fiber optic hydrophone

CHEN Yi

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Accurately evaluating the acoustic performances of optic fiber hydrophone had been highly concerned. This paper briefly described the principle of interferometric fiber optic hydrophone, and pointed out the differences between the head and the system of optic fiber hydrophone. As one of the key technologies of optic fiber hydrophone, there is no clear norm or standard for testing the head of optic fiber hydrophone. So, some definitions and related expressions of basic parameters for appraising the acoustic performances of the head of fiber optic hydrophone were presented here, including phase-shifted sensitivity, acceleration phase-shifted sensitivity, relative acceleration phase-shifted sensitivity, directivity, phase-shifted sensitivity with the changing of hydrostatic pressure, phase-shifted sensitivity with the changing of temperature, etc. This helps to rightly measure and appraise the acoustic performances of the head of fiber optic hydrophone, and we hopes that by such discussion, promotes the drawing up of the testing norm or standard of the head of optic fiber hydrophone.

Key words: performance parameter; appraise; the head of fiber optic hydrophone; interferometric; phase-shifted sensitivity

0 引言

光纤水听器是一种建立在光纤、光电子技术基础上的新型传感器, 它通过高灵敏度的光纤相干检测, 将水下声信号转换成光信号, 并通过光纤传递至信号处理系统进行声信号提取。由于光纤水听器具有探测灵敏度高、抗电磁干扰和易于大规模成阵等特点, 所以自 1977 年美国海军研究室的 Bucaro 等人^[1]发表第一篇有关光纤水听器的论文后, 各军事强国纷纷投入大量人力、物力进行光纤水听器及

其阵列的研究和试验工作^[2-3], 其中以美国的研究最具代表性。

国内已有众多单位纷纷开展光纤水听器及其阵列的研究^[2,4-7], 现已基本解决光纤水听器关键技术, 并在工程实用化上取得一定进展。对目前最具应用前景的相位干涉型光纤水听器, 如何全面、准确地评价它的声学性能, 是人们非常关心的问题。国内已有不少专家学者^[8-11]对光纤水听器灵敏度的测量和评价问题进行研究和讨论, 但还不够明确和全面。本文提出了一些评价干涉型光纤水听器探头的性能参数, 供开展进一步的研究和讨论, 并希望通过这样的讨论, 进一步规范我国光纤水听器的测试和评价。

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-06-10

作者简介: 陈毅(1973—), 男, 浙江嵊州人, 高级工程师, 研究方向为水声计量测试技术研究。

通讯作者: 陈毅, E-mail: y.chen@163.com

1 干涉型光纤水听器工作原理

根据采用的干涉仪结构不同, 光纤水听器主要有 Mach-Zehnder 干涉仪、Michelson 干涉仪、Fabry-Perot 干涉仪和 Sagnac 干涉仪四种类型^[12]。Fabry-Perot 型光纤水听器由于多次腔内反射灵敏度较高, 但对激光光源的相干长度要求很高, 且动态范围较小; Sagnac 型光纤水听器是互易的零差干涉仪, 可以采用宽带光源, 且光源的相位噪声不会转化为系统噪声, 不需要采取措施消除初相位受环境影响产生的随机漂移。但其灵敏度随声波频率降低而降低, 不适用于低频水声信号的测量, 而且不适合复用组成阵列。因此, 常用的干涉型光纤水听器结构是 Mach-Zehnder 型和 Michelson 型干涉仪结构。这里以 Mach-Zehnder 型干涉仪为例说明干涉型光纤水听器的工作原理。

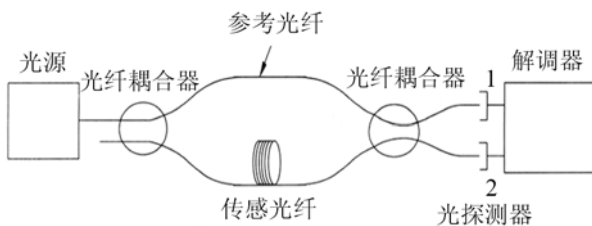


图 1 光纤 Mach-Zehnder 型干涉仪工作原理
Fig.1 The principle of interferometer of Mach-Zehnder

Mach-Zehnder 型干涉仪属于双光束干涉类型, 其典型结构如图 1 所示。光源发出的光经过耦合器后分成两束, 分别进入干涉仪的两臂, 其中一臂为参考臂, 而另一臂则受到传感量(声场、压力等)的影响, 称为信号臂。两臂间存在一个随被测量调制的相位差 $\Delta\phi$ 。两束光经过第二个耦合器时发生干涉, 干涉信号经过传输光纤被探测器接收后转化为电信号, 再通过解调电路得到相位差 $\Delta\phi$, 最终得出被测量的信息。

2 评价光纤水听器探头的性能参数

现在人们常说的光纤水听器, 其所指的对象还不够明确。有时候指光纤水听器探头, 包括探头本身和光缆部分; 有时候指光纤水听器系统, 包括探头、光源、解调电路和光电转换模块等。光纤水听器系统的性能跟光源、解调电路等的性能密切相关, 但它的性能评价可参考普通压电水听器的测量标准或规范进行。光纤水听器探头技术是光纤水听

器及其阵列的关键技术之一, 对它的测试和评价还没有明确的测量标准或规范可供参照。为此, 我们在多年从事光纤水听器测量技术研究和性能测试的基础上, 参考了有关文献资料^[5,11,13,14], 提出了如下用于评价光纤水听器探头的性能参数。

2.1 相移灵敏度

相移灵敏度 M_ϕ 是由声信号引起的光纤水听器探头的相移(即光纤水听器干涉仪两臂的相位差) $\Delta\phi$ 与在声场中引入光纤水听器前存在于光纤水听器声中心位置处的自由场声压 p 的比值, 单位为 rad/Pa。

$$M_\phi = \frac{\Delta\phi}{p} \quad (1)$$

相移灵敏度一般以对数形式表示, 称为相移灵敏度[级], 即光纤水听器探头的相移灵敏度与其基准值的比值, 取以 10 为底的对数再乘上 20, 单位为 dB。

$$M_\phi = 20 \lg \left(\frac{M_\phi}{M_{\phi_0}} \right) \quad (2)$$

式(2)中, 基准值 M_{ϕ_0} 为 1 rad/ μ Pa。测得光纤水听器的探头在一定频率范围内不同频率下的相移灵敏度级, 即可得到它的相移灵敏度级频率响应。通常用该频率范围内相移灵敏度级的起伏对它进行评价。如果测得的相移灵敏度级频率响应足够宽(包含光纤水听器探头的谐振峰), 则通过计算, 可得到光纤水听器探头的频率响应带宽和谐振频率等性能参数。

相移灵敏度反映了光纤水听器探头(包括光纤和探头复合结构)对声压的响应能力, 具有明确的物理意义, 是评价干涉型光纤水听器探头最基本的性能参数。要提高探头的相移灵敏度, 可采用改变探头结构、改进声弹性体的材料、增加干涉仪传感臂的光纤长度等方法, 但光纤长度的增加往往会增大光纤水听器探头的体积和光纤水听器的相位噪声。因此, 相移灵敏度不能无限制地增长。

如果将光纤长度归一化到 1m, 则相移灵敏度就变为归一化相移灵敏度 M_{ϕ_0} , 它是相移灵敏度 M_ϕ 与干涉仪有效总相程 ϕ 的比值, 单位为 1/Pa。

$$M_{\phi_0} = \frac{M_\phi}{\phi} = \frac{\Delta\phi}{\phi} \cdot \frac{1}{p} \quad (3)$$

式中: $\phi = 2\pi n l / \lambda$, n 是光纤纤芯的折射率, l 是干涉仪传感臂的光纤长度, λ 是光源的光波长。

归一化相移灵敏度一般以对数形式表示, 称为归一化相移灵敏度[级], 即光纤水听器探头的归一化相移灵敏度与其基准值的比值, 取以 10 为底的

对数再乘上 20。单位为 dB。

$$M_{\phi 0} = 20 \lg \left(\frac{M_{\phi 0}}{M_{\phi 0r}} \right) \quad (4)$$

式中, 基准值 $M_{\phi 0r}$ 为 $1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ 。

归一化相移灵敏度反映了光纤水听器探头中单位长度光纤对声压的响应能力, 它扣除了有效光纤长度对相移灵敏度的影响, 可用于评价探头的声-光转换效率, 是衡量光纤水听器探头设计水平的重要指标。但由于光纤水听器探头检测的是反映水声信号大小的 $\Delta\phi$, 因此, 实际测试时往往测量的是相移灵敏度[级]。

2.2 加速度相移灵敏度

光纤水听器及阵列在拖曳时, 由于加减速的影响往往会产生加速度, 叠加在被测声信号上对测量产生干扰。因此, 要研究消除或降低加速度的影响, 通常要测量光纤水听器的加速度相移灵敏度 $M_{\phi a}$ 。它是由加速度引起的光纤水听器探头的相移 $\Delta\phi$ 与作用在光纤水听器上的加速度 a 的比值, 单位为 $\text{rad}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ 。

$$M_{\phi a} = \frac{\Delta\phi}{a} \quad (5)$$

出于工程使用的方便, 常用重力加速度 g 来代替加速度 a 表示加速度相移灵敏度。加速度相移灵敏度一般以对数形式表示, 称为加速度相移灵敏度[级], 即光纤水听器的加速度相移灵敏度与其基准值的比值, 取以 10 为底的对数再乘上 20。单位为 dB。

$$M_{\phi a} = 20 \lg \left(\frac{M_{\phi a}}{M_{\phi ar}} \right) \quad (6)$$

式中, 基准值 $M_{\phi ar}$ 为 $1 \text{ rad}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ 。

加速度相移灵敏度反映了光纤水听器探头(包括光纤和探头复合结构)对加速度的响应能力, 具有明确的物理意义, 是评价芯轴型光纤水听器探头性能最为常用的参数。它主要由光纤水听器探头的不对称性引起, 与测量夹具的设计和固定也有一定的关系。

2.3 相对加速度相移灵敏度

由于加速度相移灵敏度和声压相移灵敏度是光纤水听器不可分割的两个参数。通常, 相移灵敏度高, 加速度相移灵敏度也高。因此, 单纯给出加速度相移灵敏度的实际意义不大。

通过降低相移灵敏度来降低加速度相移灵敏度的方法, 本质上并不能提高光纤水听器的检测能力。芯轴型光纤水听器探头设计的关键是在提高声压相移灵敏度的同时, 降低加速度相移灵敏度。因

此, 评价参数可采用相对加速度相移灵敏度, 即单位加速度作用下产生的等效声压, 单位为 $1\mu\text{Pa}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ 。

$$M_{\phi ap} = \frac{M_{\phi a}}{M_{\phi}} = \frac{\Delta\phi/a}{\Delta\phi/p} = \frac{p}{a} \quad (7)$$

相对加速度相移灵敏度综合反映了光纤水听器探头(包括光纤和探头复合结构)对加速度和声压的响应能力。需要注意的是, 它不是一个直接测量的物理量, 而是一个计算量。

2.4 指向性

光纤水听器探头的指向性, 指的是该探头的相移灵敏度随入射声波方向变化而发生变化的特性, 通常用指向性图案表示, 也就是在某指定频率下、在某指定测量面内对光纤水听器探头的接收相移灵敏度进行测量, 用相移灵敏度级随方向的变化或起伏 $\Delta M_{\phi\theta}$ 进行评价, 即同一测量面内的最大相移灵敏度级 $M_{\phi M}$ 减去最小相移灵敏度级 $M_{\phi N}$ 。

$$\Delta M_{\phi\theta} = M_{\phi M} - M_{\phi N} \quad (8)$$

光纤水听器探头的指向性主要由光纤水听器探头的形状和结构所决定, 如目前最常见的芯轴型光纤水听器的水平指向性图案通常是圆形。

2.5 相移灵敏度随静水压的变化

相移灵敏度随静水压的变化包括两个参数: 相移灵敏度级频率响应和相移灵敏度级压力响应。

相移灵敏度级频率响应是在给定静水压力下, 光纤水听器探头相移灵敏度级随频率的变化。通常用该频率范围内相移灵敏度级的变化或起伏 $\Delta M_{\phi f}$ 进行评价, 即该指定静水压力下, 某频率范围内最大的相移灵敏度级 $M_{\phi fM}$ 减去最小的相移灵敏度级 $M_{\phi fN}$ 。

$$\Delta M_{\phi f} = M_{\phi fM} - M_{\phi fN} \quad (9)$$

相移灵敏度级压力响应是在给定频率下, 光纤水听器探头相移灵敏度级随静水压的变化。通常用该静水压范围内相移灵敏度级的变化或起伏 $\Delta M_{\phi p}$ 进行评价, 即该指定频率下, 某静水压范围内最大的相移灵敏度级 $M_{\phi pM}$ 减去最小的相移灵敏度级 $M_{\phi pN}$ 。

$$\Delta M_{\phi p} = M_{\phi pM} - M_{\phi pN} \quad (10)$$

由于静水压力的作用, 构成光纤水听器探头的探头结构、声弹性体、光纤等的性能可能发生一定的变化, 最终使得光纤水听器探头的性能发生变化。因此, 对工作在不同深度下的光纤水听器探头, 有必要对其相移灵敏度随静水压变化的大小进行检测。

2.6 相移灵敏度随温度的变化

相移灵敏度随温度的变化也包括两个参数:相移灵敏度级频率响应和相移灵敏度级温度响应。

相移灵敏度级频率响应是在给定温度下,光纤水听器探头相移灵敏度级随频率的变化。通常用该频率范围内相移灵敏度级的变化或起伏 $\Delta M_{\phi fT}$ 进行评价,即该指定温度下,某频率范围内最大的相移灵敏度级 $M_{\phi fTM}$ 减去最小的相移灵敏度级 $M_{\phi fTN}$ 。

$$\Delta M_{\phi fT} = M_{\phi fTM} - M_{\phi fTN} \quad (11)$$

相移灵敏度级温度响应是在给定频率下,光纤水听器探头相移灵敏度级随温度的变化。通常用该温度范围内相移灵敏度级的变化或起伏 $\Delta M_{\phi fT}$ 进行评价,即该指定频率下,某温度范围内最大的相移灵敏度级 $M_{\phi fTM}$ 减去最小的相移灵敏度级 $M_{\phi fTN}$ 。

$$\Delta M_{\phi fT} = M_{\phi fTM} - M_{\phi fTN} \quad (12)$$

由于温度对光纤水听器探头的声弹性体、光纤等材料性能有一定的影响,因此,当光纤水听器工作的温度发生变化时,其探头的性能可能发生变化。因此,有必要对需要在不同温度条件下工作的光纤水听器探头性能进行检测,给出相移灵敏度随温度的变化情况。

3 结束语

准确地评价相位干涉型光纤水听器探头的声学性能对光纤水听器及其阵列的发展十分重要,本文提出了若干评价光纤水听器探头的性能参数,对准确测量和评价光纤水听器探头的声学性能有一定的借鉴意义。另外,也希望通过作者的讨论,抛砖引玉,引起大家对准确评价干涉型光纤水听器探头性能的重视,早日确定评价光纤水听器探头的性能参数。

致谢:与清华大学电子工程系张敏和周宏朴教授的讨论,让作者受益匪浅,对本文的写作有直接的帮助。与中电科技 23 所陈小宝研究员、国防科技大学光电工程系罗洪博士的讨论,也对本文有所裨益。在此,作者一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E. Fiber-optic hydrophone[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1977, 62(5): 1302-1304.
- [2] 高学民. 光纤水听器及阵列的发展概况[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 1996, 15(1): 48-53.
GAO Xuemin. Evolution of fiber optic hydrophones and hydrophone arrays[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 1996, 15(1): 48-53.
- [3] 曹家年, 包建新, 李绪友, 等. 光纤水听器[J]. 光通信技术, 1997, 21(2): 90-94.
CAO Jianian, BAO Jianxin, LI Xuyou, et al. Optical fiber hydrophone[J]. The Technology of Optical Communications, 1997, 21(2): 90-94.
- [4] 崔三烈, 周福洪, 徐彦德. 单模光纤水听器声压灵敏度的研究[J]. 光子学报, 1995, 24(1): 72-77.
CUI Sanlie, ZHOU Fuhong, XU Yande. Investigation on the acoustomotive pressure sensitivity of a single mode fiber hydrophone[J]. Acta Photonica Sinica, 1995, 24(1): 72-77.
- [5] 张仁和, 倪明. 光纤水听器的原理与应用[J]. 物理, 2004, 33(7): 503-507.
ZHANG Renhe, NI Ming. Principle and applications of the fiber optic hydrophone[J]. Physics, 2004, 33(7): 503-507.
- [6] 周江涛, 倪明, 孟洲. 光纤矢量水听器指向性锐化技术研究[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 1000-1001.
ZHOU Jiangtao, NI Ming, MENG Zhou. Study on directivity sharpening of optical fiber acoustic-vector sensor[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 1000-1001.
- [7] 彭博栋, 罗洪, 倪明. 成组光纤水听器特性研究[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 459-463.
PENG Bodong, LUO Hong, NI Ming. A study of the characteristics of extended optic fiber hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3): 459-463.
- [8] 薛耀泉, 赵涵. 干涉型光纤水听器灵敏度校准方法研究[J]. 航空计测技术, 1999, 19(4): 3-6.
XUE Yaoquan, ZHAO Han. Investigation on the method of calibrating the sensitivity of interference type optical fiber hydrophone[J]. Journal of Aeronautic Metrology and Measurement, 1999, 19(4): 3-6.
- [9] 陈毅. 贝塞尔函数比值法求定干涉型光纤水听器相移幅值的模拟试验和精度分析[J]. 声学及电子工程, 2004, 76(4): 6-9.
CHEN Yi. Simulation experiment and precision analysis of evaluation of phase-shifted amplitude of interferometric fiber optic hydrophone using Bessel function method[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2004, 76(4): 6-9.
- [10] 彭保进, 廖茂, 廖延彪, 等. 光纤水听器灵敏度测试研究[J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1633-1638.
PENG Baojin, LIAO Mao, LIAO Yanbiao, et al. Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11): 1633-1638.
- [11] 倪明, 张仁和, 胡永明, 等. 关于光纤水听器灵敏度的讨论[J]. 应用声学, 2002, 21(6): 18-21.
NI Ming, ZHANG Renhe, HU Yongming, et al. A discuss on the sensitivity of fiber-optic hydrophone[J]. Applied Acoustics, 2006, 21(6): 18-21.
- [12] 廖延彪, 黎敏, 张敏等编著. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009 年.
LIAO Yanbiao, LI Min, ZHANG Min, et al. Optical fiber sensing techniques and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [13] 周炜. 拖曳线列阵用光纤水听器抗加速度能力的研究[D]. 北京: 清华大学, 2010 年.
ZHOU Wei. Investigation on the anti-acceleration capability of fiber optic hydrophones using in the towed linear array[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [14] 郑士杰, 袁文俊, 缪荣兴等编著. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995 年.
ZHENG Shijie, YUAN Wenjun, MIAO Rongxing, et al. Metrology and test Techniques of underwater acoustics[M]. Harbin: Harbin University Press, 1995.