

关于光纤水听器灵敏度的讨论

倪 明^{1,2} 张仁和¹ 胡永明² 孟 洲²

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)

2001 年 9 月 14 日收到

摘要 本文先简略介绍了干涉型光纤水听器的基本原理与检测信号的基本方法, 由此给出了光纤水听器相位归一化灵敏度、相位灵敏度、电压灵敏度的定义。在分析它们的物理意义以及相互之间关系的基础上, 给出一组能反映它们对应关系的一组数据, 以及一光纤水听器探头频率响应曲线。

关键词 光纤水听器, 相位归一化灵敏度, 相位灵敏度, 电压灵敏度

A discuss on the sensitivity of fiber-optic hydrophone

NI Ming^{1,2} ZHANG Renhe¹ HU Yongming² MENG Zhou²

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

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

Abstract In this paper the fundamental principle and ways to detect signal are introduced simply. We are try to define the sensitivity of fiber-optic hydrophone by some kinds of forms, then we analysis their meanings in a practical fiber-optic hydrophone system, at last we give some suggestions.

Key words Fiber-optic hydrophone, Normalized phase sensitivity, Absolute phase sensitivity, Voltage sensitivity

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^[1-3]。光纤水听器主要用于海洋声学环境中的声传播、噪声、混响、海底声学特性、目

标声学特性等的监测, 它也是现代海军反潜作战及水下兵器试验的先进检测手段。

光纤水听器自提出 20 多年来, 由于其明显的军事用途及重要的民用价值, 已经获得了重要的发展。目前国外光纤水听器的研究已经过实验室研究, 海试, 向工程应用方向发展^[4]。

作为光纤水听器的重要参数之一, 光纤水听器的灵敏度, 人们主要采用过相位归一化灵敏度^[1,5,6]、电压灵敏度^[1,7,8]以及相位灵敏度^[2,9,10]来表示, 而关于它们的定义、物理涵

义以及它们之间关系的比较尚涉及较少。本文试图讨论这几个问题,以促进光纤水听器的测量与应用走向规范。

2 光纤水听器的信号检测

2.1 光纤水听器的基本工作原理

各种高灵敏度光纤水听器探测单元的核心是高性能的光纤干涉仪,图1为 Mach - Zehnder 型干涉仪的光学结构。从激光器 LD

发出的光通过光纤 F_1 经光纤耦合器 C_1 分为两束,在光纤 L_1 和 L_2 中传输,然后再由光纤耦合器 C_2 将两束光合在一起,发生光学干涉。一般将光纤 L_1 绕在声弹性体上,将 L_2 绕在刚性体上,在水中声波作用下, L_1 和 L_2 的相对长度将发生变化,进而导致两束光传播的相位差,通过光学干涉,相位差转换成光强变化。最后,干涉后的光通过光纤 F_2 传输到探测器 D 进行光强探测,便可得知水声波动信息。

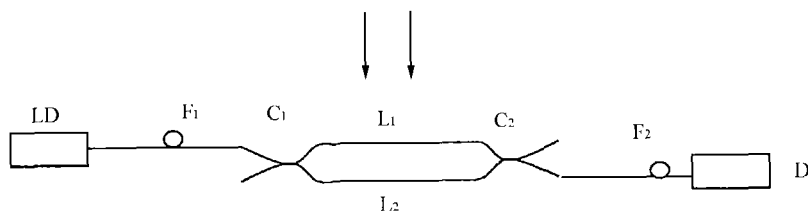


图1 Mach-Zehnder 型光纤水听器结构示意图

2.2 光纤水听器的信号检测

光纤水听器输出光强信号经光电转换后可以写成:

$$V_0 = A + B \cos(\Delta\phi_s + \Delta\phi_n + \phi_0) \quad (1)$$

其中, V_0 是输出的电压信号, A 、 B 是常量, $\Delta\phi_s$ 为由水声波引起的相差信号,即为要探测的水声信号, ϕ_0 为干涉仪的初始相位,是个常量, $\Delta\phi_n$ 为相位差的低频漂移,是一个不确定量,随温度和外界环境影响而变化。当 $\Delta\phi_n + \phi_0$ 在 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ 等附近区域时,光强对微小相位变化 $\Delta\phi_s$ 的响应有最高灵敏度;当 $\Delta\phi_n + \phi_0$ 在 0 、 π 等附近区域时,系统的响应灵敏度将大大降低;当 $\Delta\phi_n + \phi_0$ 无规则变化时,系统响应输出将表现出极大的不稳定性。为解决环境因素对光纤干涉仪检测灵敏度的影响,人们相继使用了多种信号检测方法。现在常用的主要有有源零差、外差、合成外差、主动相位补偿、无源零差技术和相位载波 PGC 调制解调^[3,7]。所有这些方法可以分成两大类:电路、数字。电路检测的输出结果

可以写成:

$$V = K \cdot \Delta\phi_s \quad (2)$$

其中, K 是解调系统总的增益。

由于 DSP 的高速发展,目前光纤水听器的信号检测向全数字化发展。采用数字化处理,即对(1)式进行数字化,经过处理得到。

3 光纤水听器灵敏度的定义

3.1 光纤水听器相位灵敏度的定义 (Absolute phase sensitivity)

光纤水听器的相位灵敏度又称绝对相位灵敏度,可定义为:由声信号引起的光纤水听器的干涉仪两臂的相位差 $\Delta\phi$ 与在声场中引入水听器前存在于水听器声中心位置处的自由场声压的比值。单位: rad/Pa(弧度/帕)。

$$M_p = \frac{\Delta\phi}{P} \quad (\text{rad/Pa}) \quad (3)$$

它的物理意义是:探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下,干涉仪两臂相位差变化 $\Delta\phi$ (单位:

rad)。

为提高光纤水听器的灵敏度,通常有改进结构、变化声弹性材料、增加干涉仪传感臂的光纤长度等。增加光纤的有效长度往往意味增大探头的体积,这样光纤水听器的灵敏度为一参数指标时,体积是它的另一制约指标,光纤水听器的灵敏度就不会无限制地增长。

该定义能确切反映光纤水听器对水声信号的响应能力,物理意义明确,应该为光纤水听器灵敏度的首选定义。

3.2 光纤水听器相位灵敏度级的定义

光纤水听器相位灵敏度与其基准值之比值的以 10 为底的对数乘以 20。单位: dB。

$$M = 20 \log(M_P/M_r) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

基准值: $M_r = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ 。由于用相位灵敏度级来表示往往更明了,我们通常提到光纤水听器相位灵敏度时均指相位灵敏度级。

3.3 光纤水听器相位归一化灵敏度的定义 (Normalized phase sensitivity)

由声信号引起的光纤水听器干涉仪两臂的相位差 $\Delta\phi$ 与干涉仪有效总相程 ϕ 的比值为归一化相位,归一化相位与在声场中引入水听器前存在于水听器声中心位置处的自由场声压的比值为光纤水听器相位归一化灵敏度。单位: $1/\text{Pa}$ 。

$$M_f = \frac{\Delta\phi}{\phi} \cdot \frac{1}{P} \quad (\text{Pa}^{-1}) \quad (5)$$

其中, ϕ 表示干涉仪的有效总相程,它可以写成: $\phi = 2\pi nl/\lambda$, n 是光纤纤芯的折射率, l 是有效光纤的长度, λ 是光源的光波长。

它的物理意义是: 探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下, 光纤水听器产生相对相移 $\Delta\phi/\phi$, 其中 ϕ 是光纤水听器干涉仪的有效总相程, 在水听器做好后是一给定值。

该定义能反映探头对声压的响应能力, 它与相位灵敏度定义 M_p 的区别是, 它扣除了探头缠绕光纤长度的不同对灵敏度的影响。该定义的灵敏度与探头的结构、声弹性体的材料等

因素有关, 而与有效光纤的长度无关。通过增加有效光纤的长度相位灵敏度会线性增加, 但相位归一化灵敏度会保持不变。由于探头最后检测的水声信号形式是 $\Delta\phi$, 而不是 ϕ , 故我们认为, 在衡量光纤水听器的灵敏度时, 相位归一化灵敏度与相位灵敏度相比并不占有优势。

3.4 光纤水听器自由场电压灵敏度 (voltage sensitivity)

光纤水听器输出端的开路电压与在声场中引入水听器前存在于水听器声中心位置处的自由场声压的比值。单位: V/Pa 。

$$M_V = V/P \quad (\text{V}/\text{Pa}) \quad (6)$$

它的物理意义是: 探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下, 水听器输出电压即 (2) 式中 V (单位: 伏)。

由 (2) 式, V 的大小不仅与 $\Delta\phi_s$ 有关, 而且与解调系统的总增益 K 有关。 K 的大小, 与到达光电探测器的光强、光电探头的灵敏度、信号解调的方法以及电信号的后端放大等因素有关, 因此该定义的灵敏度不仅与光纤水听器探头有关, 而且与所有影响 K 的因素有关, 复杂的关系往往导致不同的光纤水听器系统电压灵敏度的不可比较性。

当系统采用全数字化进行处理时 (它是将来的发展方向), 一般由 A/D 采集卡对 (1) 信号进行量化, 然后采用数字信号处理得到 $\Delta\phi_s$ 。这样, 水听器输出电压并不反映声信号大小, 该水听器的灵敏度难以用电压灵敏度来衡量。但是, 考虑到传统水听器是用电压灵敏度来衡量的, 而光纤水听器的出现, 不可避免需要与传统水听器进行比较, 因此下面给出一个比较方法供参考。考虑小信号, 不失一般性, (1) 可以近似成:

$$V \approx B \cdot \Delta\phi_s \quad (7)$$

即此时, $K = B$ 。

3.5 光纤水听器自由场电压灵敏度级

光纤水听器自由场电压灵敏度与其基准值

之比值的以 10 为底的对数乘以 20。单位：dB。

$$M = 20 \log(M_V/M_r) \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

基准值： $M_r = 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ 。一般提到光纤水听器的电压灵敏度均指电压灵敏度级。

4 相位灵敏度与电压灵敏度的关系

光纤水听器将水声信号由光纤送到处理系统，经光电转换后，如果采用硬件解调方法，得到的将是光纤水听器的电压灵敏度，如果能够确定电路的总增益系数，同时可以得到它的相位灵敏度。如果采用软件解调方法，得到的是光纤水听器的相位灵敏度，经过转换得到一定意义上的电压灵敏度。

由前面的分析，我们可以得到：

$$M_V = K \cdot M_p \quad (9)$$

这就是相位灵敏度与电压灵敏度的关系公式。下表给出光纤水听器的相位灵敏度与电压灵敏度对应关系。

表 1 相位灵敏度与电压灵敏度的对应关系
($K = 1.0$)

相位归一化 灵敏度 M_f (Pa^{-1})	相位灵敏 度级 $M(\text{dB})$ 0dB=1rad/ μPa	电压灵敏 度级 $M(\text{dB})$ 0dB=1V/ μPa
1 1×10^{-11}	-183	-183
2 1×10^{-10}	-163	-163
3 1×10^{-9}	-143	-143
4 1×10^{-8}	-123	-123

备注：光纤水听器参数： $l = 10\text{m}$, $\lambda = 1.3 \times 10^{-6}\text{m}$,
 $n = 1.456$

5 实验测试结果

国防科大光纤水听器研究组于 1999 年 1 月在中科院声学所对一光纤水听器探头进行了灵敏度测试。图 2(a) 是相位归一化灵敏度随测试频率的变化关系曲线，其中两种标记是两次测试的结果；图 2(b) 其相位灵敏度或电压灵敏度随测试频率的变化关系曲线。其中，在我们应用声学

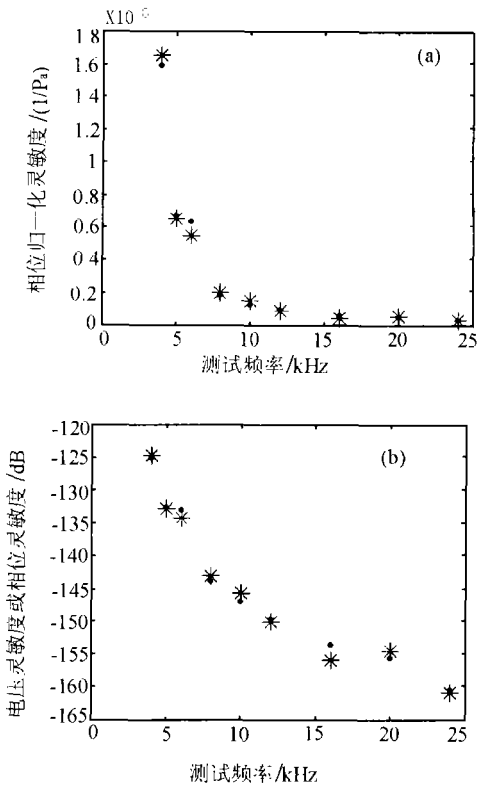


图 2 某一光纤水听器探头的频率响应曲线

- (a) 相位归一化灵敏度随测试频率的变化关系曲线
 - (b) 相位灵敏度或电压灵敏度随测试频率的变化关系曲线
- 其中两种标记是两次测试的结果

的系统中，为满足电压在 A/D 的采集范围内，使 $B \approx 1.0$ ，即 $K = B = 1.0$ 。

6 结束语

本文在讨论光纤水听器几种灵敏度定义的基础上，给出了它们的对应关系，并给出了我们的测试结果。

电压灵敏度对于光纤水听器来说，不能确切反映它的物理本质，而且对数字化处理的光纤水听器系统来说，用电压灵敏度来衡量出现困难。但是，对利用电路进行信号解调的光纤水听器系统来说，得到的是它的电压灵敏度，而得到相位灵敏度需要转换。这也许是目前出

(下转第 17 页)

表 4 观众厅 $C_{50}(3)$ 和 $C_{80}(3)$ 值

测点位置	1 排 25	8 排 47	11 排 29	平均值
$C_{50}(3)(\text{dB})$	-1.83	-1.12	-0.6	-1.18
$C_{80}(3)(\text{dB})$	0.5	2.07	3.59	2.17

4.3 明晰度 (声能比) $C_{50}(3)$ 和 $C_{80}(3)$

明晰度 C_{50} 和 C_{80} 是早期声能 (50ms 或 80ms 以前到达的反射声) 与后期反射声能 50ms 或 80ms 以后至 1000ms 之比, 见下式。C 值的负值大, 代表后期声能大, 因而声音丰满, C 值为正值, 且数值大, 表示清晰度高。早期反射声测定可通过下式求得 C_{50} 和 C_{80} 值, 再将 500Hz, 1000Hz 和 2000Hz 的 C_{50} 和 C_{80} 值平均, 求得 $C_{50}(3)$ 和 $C_{80}(3)$ 值:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} P^2(t) dt}{\int_{50}^{1000} P^2(t) dt}$$

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} P^2(t) dt}{\int_{80}^{1000} P^2(t) dt}$$

C_{50} 和 C_{80} 的测试采用脉冲法, 信号的接收

和数据的处理使用了中国科学院声学所李毅民教授开发研制的 ASAW 声学测量工作站^[5], $C_{50}(3)$ 和 $C_{80}(3)$ 值的测量和计算的结果见表 4 所示。

5 结语

大连广电中心广播电视剧场是国内广播系统中首次采用分布式计算机调控装置的剧场, 经声学测定和两年多的使用的效果表明, 它具有良好的音质和很大的适应性, 确保了每项功能均具有最佳的声学条件。实践将证明这种可调设施无疑是今后广播电视剧场声学设计的必然趋势。

参 考 文 献

- 1 Xiang Duanqi, Wang Zheng, Chen Jinjing. *Applied Acoustics*, 1992, **37**(1): 15-30.
- 2 项端祈, 王峥, 陈金京. 应用声学, 2001, **20**(4): 6-14.
- 3 项端祈, 王峥, 陈金京. 声学学报, 1996, **21**(4 增刊): 464-474.
- 4 项端祈. 近代声学建筑. 北京: 科学出版社, 2000. 97-106.
- 5 李毅民. 工程声学, 2000, **4**(1): 12-16.

(上接第 21 页)

现的光纤水听器的文献中给出的光纤水听器灵敏度这个参数比较混乱的根本原因。

另一方面, 光纤水听器作为一种新型的水下声传感器自进入水声界后, 难于被水声界接受和理解。特别是光纤水听器灵敏度的涵义难以接受。本文旨在通过对光纤水听器灵敏度的讨论, 让它尽早得到水声界更多的理解。

参 考 文 献

- 1 高学民. 光纤与电缆及其应用技术, 1996, (1): 48-53.
- 2 Nash P. *IEE Proc-Radar, Sonar Navig.*, 1996, **143**(3): 204-208.

- 3 曹家年, 包建新, 李绪友等. 光通信技术, 1997, **21**(2): 90-94.
- 4 Cranch G A, Nash P J. *IEEE, Journal of LightWave Technology*, 2001, **19**(5): 687-699.
- 5 Jarzynski J, Hughes R, Hickman T R, et al. *J.Acoust.Soc. Am.*, 1981, **69**(6): 1799-1808.
- 6 Lagakos N, Ehrenfeuchter P, Hickman T R, et al. *Optics Letters*, 1988, **13**(9): 788-790.
- 7 周效东, 汤伟中, 周文. 中国激光, 1998, **A25**(5): 411-414.
- 8 Hill D J, Nash P J, Jackson D A, et al. *SPIE*, 1999, **3860**: 55-66.
- 9 Cheng L K, Bruijn D D. *SPIE*, 1993, **2070**: 24-29.
- 10 Nash P, Cranch G, Cheng L K, et al. *SPIE*, 1998, **3483**: 238-242.