

# 水声测量中的宽频技术应用方法

张宝华<sup>1</sup>, 吴本玉<sup>2,3</sup>, 莫喜平<sup>2</sup>, 崔政<sup>2</sup>

(1. 海军装备部电子部, 北京 100841; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100029)

**摘要:** 讨论一种基于宽频分析技术进行水声测量的方法——宽频噪声比较法。该方法从频域分析的角度出发, 根据水声测量的实际需要, 通过修改 Welch 法理论, 以噪声为信号源, 运用现代信号处理技术和数字化硬件系统, 实现了水听器的宽频噪声比较法校准系统在宽频范围内的快速高效测量, 是对单频脉冲比较法的一个重要补充。对于高  $Q$  值水声换能器的测量, 避免信号瞬态效应的影响, 采用宽频噪声技术更有优势。还对不同采样频率条件下的测量结果进行了比较, 结果表明宽频噪声比较法采用脉冲序列内多个脉冲处理结果累加取平均的方法, 可以降低对采样频率的要求, 或者在设备最高采样频率一定条件下可以实现更高频率范围的测试。

**关键词:** 水声; 测量; 宽频; 单频; 比较法; 频域; 校准; Welch

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-04-0519-05

## Applied method of broadband technique in underwater acoustic measurement

ZHANG Bao-hua<sup>1</sup>, WU Ben-yu<sup>2,3</sup>, MO Xi-ping<sup>2</sup>, CUI Zheng<sup>2</sup>

(1. PLA, Beijing 100841; 2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A method based upon broadband analysis technique to make the underwater acoustic measurement is named broadband noise comparison method. From the viewpoint of frequency domain analysis, according to the actual demand and by modifying Welch method, it uses the noise signal source and applies modern signal processing technique and digitalizer hardware system to achieve a rapid and efficient broadband measurement with a hydrophone in the broadband noise comparison calibration system. This is an important supplement to single-frequency pulse comparison method. For the measurement of high  $Q$ -factor underwater transducers, the broadband noise comparison method has a good advantage in preventing transient effect. Also by comparing with the measuring results in different sampling rate, a conclusion can be drawn that the broadband noise comparison method adopts the way to average the sum of pulse sequence processing results, and reduces the requirement of sampling rate. That is to say, the higher frequency measurement can be achieved under the certain condition of the fixed maximum sampling rate of the instrument.

**Key words:** underwater acoustic; measurement; broadband; single-frequency; comparison method; domain; calibration; Welch

## 1 引言

水声技术在海洋观测和水下目标探测中占有很重要的地位, 是实现水下目标遥测的主要手段, 随着技术的进步, 新型声纳设备纷纷涌现、层出不穷, 新型

声纳技术的发展不断对水声测量技术提出适应现代新技术发展的更高要求。水声测量技术是水声技术发展的重要支柱与保障, 它不但是校准、测试或鉴定水声换能器所必需的, 而且是人们间接的用水声换能器来产生和测量一个水下声信号所必需的。为了更好地适应目前水声设备类型的增多、频率范围的扩展、性能的提高与功能集成化的发展需求, 水声测量技术也需要顺应时代的发展, 不断应用现代电子、数字及其它科学技术, 实现自身的进步。目前, 在水声测量技术

收稿日期: 2007-04-30; 修回日期: 2007-08-01

作者简介: 张宝华 (1964-), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 莫喜平, E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

方面一直沿用传统声频测量技术,其中使用单频声脉冲测量技术来测量换能器的各项参数和指标是普遍被采用的技术手段。单频声脉冲在宽频范围内进行逐点扫描测试需要较长的时间,某些换能器频响特性的获取要求在相对短的时间内完成,避免其机电特性的漂移带来影响;另外谐振式换能器的暂态效应还会影响非消声水池中单频脉冲法的有效测试频率下限。如此看来,利用现代信号处理手段,研究宽带测试技术对解决传统测试条件下面临的技术问题和实现测试能力的提高具有重要意义。

本文针对水声测量中的宽频技术的应用开展研究工作,设计了水声换能器校准系统,运用现代信号处理技术实现了水听器的宽频噪声比较法校准系统,在该系统中同时可以进行单频脉冲比较法测量水声换能器,需要在测量频段内逐个频率点用扫频的方式测量响应曲线,测量速度较慢。宽频噪声比较法是一种使用一定带宽的噪声信号进行测量,通过频率分析技术提取各个频率点的数据计算响应曲线的水声计量校准方法,一次测量就可求得频段内的频响曲线,大大缩短了测量时间。

宽频噪声比较法测量系统由信号发生卡、数据采集卡、多通道示波器、双通道滤波器、功率放大器、计算机、发射换能器和标准水听器、待测水听器等组成。作为比较,在声学所水池用信号发生器、多通道示波器、双通道滤波器、功率放大器和计算机及一个发射换能器和两个水听器搭建了一个常规测试系统,用于脉冲比较法测量。两套系统都编制了相关的软件,控制仪器实现信号的自动采集和处理、分析计算和结果输出等项功能。

## 2 水声测量比较法原理<sup>[1]</sup>

水听器的比较法校准是将一个未知灵敏度的水听器即待测水听器和一个标准水听器,如图1所示放到发射换能器的远场区域,标准水听器S和待测水听器X置于两个不同距离上进行比较测量。由于它们处于同一发射器的远场中,按球面波的波面扩散规律,则有:

$$M_x = M_s \frac{e_x}{e_s} \cdot \frac{d_x}{d_s} \quad (1)$$

式中,  $e_s$  和  $e_x$  分别表示标准水听器和待测水听器的开路输出电压;  $M_s$  和  $M_x$  分别表示标准水听器和待校水听器的自由场电压灵敏度。  $d_x$  为待测水听器与发射换能器等效声中心之间的距离,  $d_s$  为标准

水听器与发射换能器的等效声中心之间的距离。

若用灵敏度级表示:

$$M_x = M_s + 20 \lg e_x - 20 \lg e_s + 20 \lg \frac{d_x}{d_s} \quad (2)$$

若采用置换法或替代法,待测水听器(X)与标准水听器(S)的等效声中心应重合在声场中同一点上,则有:  $d_x = d_s$ , 上式可以简化。

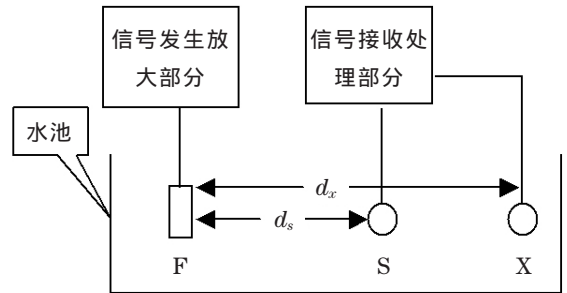


图1 比较法校准示意图

Fig.1 The sketch map of comparison method calibration

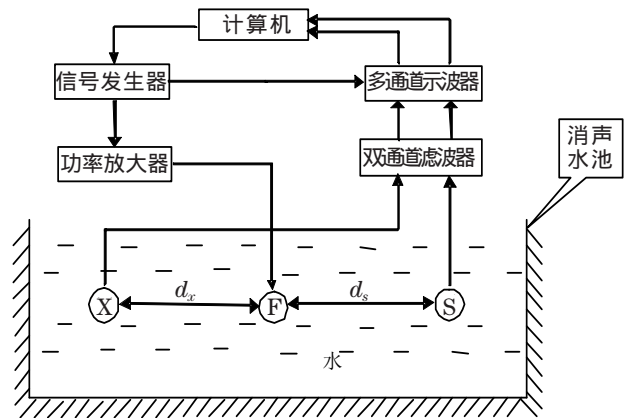


图2 脉冲比较法测量示意图

Fig.2 The sketch map of single-frequency pulse comparison method

如图2所示,脉冲比较法分为信号产生和信号采集处理两个部分。信号产生部分由计算机、信号发生器、功率放大器和发射换能器F组成。信号采集处理部分由计算机、双通道滤波器、多通道示波器和两个水听器X(待校)、S(标准)组成。多通道示波器的作用主要是检测信号和提取两水听器接收到的信号的幅值。系统采用球形发射换能器F,其指向性满足全向发射换能器要求,两侧分别放置待测水听器X和标准水听器S,间距各为1m,入水深度2m,三个换能器成一条直线。测量过程:计算机发出控制指令到信号发生器,产生出某个频率的正弦脉冲信号,调节合适的幅度、脉冲个数和脉冲周期,后经过功率放大器施加到球形发射换能器F,声信号在水中传播并被两个水听器X和S接收,经过双通道滤波器按照1/3倍频程滤波和放大后,输入多通道示波器,

计算机控制并调整示波器中的两个脉冲波形至稳态,提取此频率处的幅度值  $e_s$  或  $e_x$ ,按照公式(2)计算出  $M_x$  生成曲线。为了减小单次测量引入随机误差,一般采取多次测量取平均,后面测试曲线给出的脉冲比较法测试结果为两次测量平均后得到的。

### 3 宽频噪声比较法

#### 3.1 系统组成

宽频噪声法测量系统包括信号产生和信号接收处理两个部分。信号产生部分由计算机、信号发生卡、功率放大器和球形发射换能器 F 组成。信号接收处理部分由计算机、数据采集卡、双通道滤波器、多通道示波器和两个水听器(待测 X、标准 S)组成。多通道示波器用来观察信号波形,确保测量过程中各通道有足够的信号幅度且波形正常,系统组成框图见图 3。

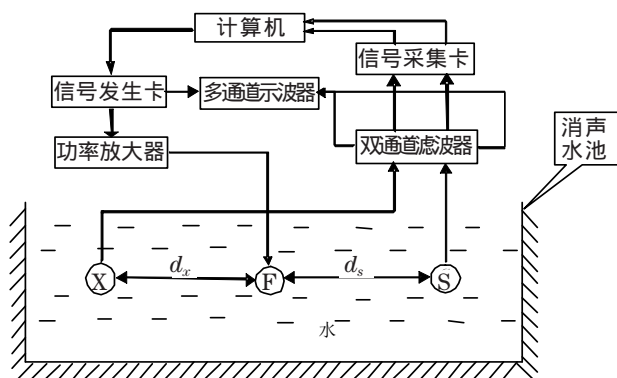


图 3 宽频噪声比较法测量系统组成示意图

Fig.3 The sketch map of broadband noise comparison method

#### 3.2 信号产生

宽频噪声法选择宽频带噪声信号,本文选择具有一定带宽的其功率谱密度不随频率变化的白噪声。实验在消声水池中进行,为了避免水池界面由于消声不彻底可能存在某些频率成分的反射波以及电串漏等因素造成的影响,实验中设计脉冲噪声信号。

计算机通过软件控制信号发生卡以 100kHz 的刷新频率产生出包含 0kHz~50kHz 的噪声信号,经过功率放大器施加到球形发射换能器 F 上。信号发生卡产生的噪声信号脉冲宽度为 0.01s,脉冲周期为 0.1s,幅度范围 -1V~1V,如图 4 所示:

#### 3.3 信号采集处理

如图 3 所示,两个水听器 X 和 S 把接收到球形

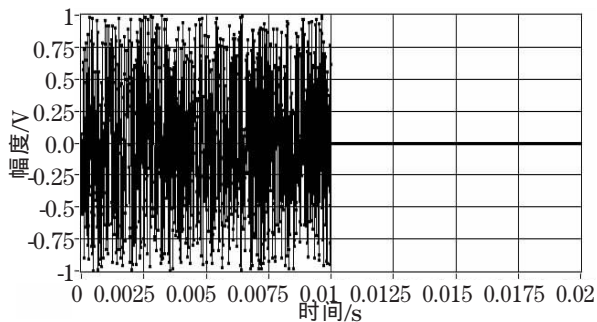


图 4 信号发生卡产生的噪声信号

Fig.4 The noise signal generated by signal generation card

换能器 F 发射直达声波产生的信号输入双通道滤波器,经滤波和一定增益的放大后,由数据采集卡 A/D 变换和发送到计算机进行处理。在这里,产生的原始信号为 0kHz~50kHz,所以数据采集卡采样频率必须大于 100kHz,以 100kHz 为例进行描述。由于计算机同时进行信号产生和信号采集及处理,如果采集完信号进行实时处理会影响测量过程进行,所以选择采集信号后存盘,然后再进行处理运算。

首先,存盘文件中包含有两个通道的信号,必须进行分离,分离后某个通道的信号如图 5 所示:

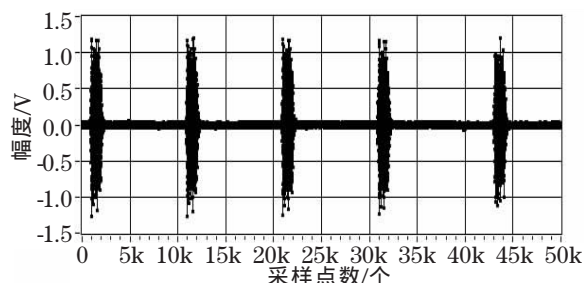


图 5 数据采集卡接收到的噪声信号脉冲序列

Fig.5 The noise pulse sequences received by data acquisition card

由于信号发生卡产生的脉冲噪声信号周期是 0.1s,而数据采集卡采样频率为 100kHz,所以采集到的信号周期为 10k 个采样点(samples)。

两通道信号分离后,分别将其中的脉冲噪声信号进行提取。对于任意一个通道的每个脉冲噪声信号,分别进行 FFT 运算。由于采样频率 100kHz,脉冲宽度 0.01s,所以脉冲中包含的采样点数为 1k 个,FFT 运算后的频率对应幅度的间隔为 100Hz,即频率分辨率  $df=100\text{Hz}$ 。之后,把双边 FFT 转换为单边 FFT,零频率幅度不变,正频率幅度加倍,但是此时并不影响分辨率  $df$ 。

若要测量的灵敏度频率范围是 4kHz~50kHz,令步长为 1kHz,所以必须按此提取其中某些频率的幅度值。在提取过程中,使用一种类似 Welch 法的

平均周期图的方法进行平滑处理。谈到 Welch 法需要先介绍一下 Bartlett 法<sup>[2]</sup>。

Bartlett 方法中,将  $x(n)$  ( $0 \leq n \leq N-1$ ) 分段求周期再平均。设将  $x(n)$  分成  $L$  段,每段有  $M$  个样本,第  $i$  段样本序列记为  $x^i(n)$ ,则第  $i$  段周期图为:

$$I_M^i(\omega) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x^i(n) e^{-j\omega n} \right|^2, 1 \leq i \leq L \quad (3)$$

谱估计定义为  $L$  段周期图的平均,即:

$$\hat{P}_{xx}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L I_M^i \quad (4)$$

Welch 法是对 Bartlett 法的修正,更适合于用 FFT 进行计算。它主要提出两方面的修正,其一是在周期图计算前,先加适当的窗函数  $\omega(n)$ ,这样可以得到每段的周期图为:

$$I_M^i(\omega) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x^i(n) \omega(n) e^{-j\omega n} \right|^2, 1 \leq i \leq L \quad (5)$$

其中,  $U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{m-1} \omega^2(n)$  为归一化因子,表示窗口函数的平均能量。其二是分段时可使各段有重叠,最大可以重叠 50%,此时其方差可以进一步减小到几乎原来的一半。将式(5)代入式(4)便得到 Welch 法的功率谱估计。

而所使用的方法在此基础上稍作修改,对于公式(1)中的  $e_s$  和  $e_x$  只是幅度而不是功率,所以用幅度值代替功率值。窗函数  $\omega(n)$  取以待提取的频率为中心频率,窗宽度为样本数  $M$  乘以分辨率  $df$ ,如果不做归一化则可得:

$$I_M^i(\omega) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x^i(n) \omega(n) e^{-j\omega n} \right|^2, 1 \leq i \leq L \quad (6)$$

按照上式求得的  $I_M^i(\omega)$  就是待提取的中心频率的  $e_s$  或  $e_x$  的估计值,而分的段数  $L$  则是根据要提取的频率划分的,每段划分提取出一个频率和对应的幅度估计值。

对于两个水听器(待测 X、标准 S)接收到的每个噪声脉冲都做如上提取,并且两个水听器接收到的发射换能器 F 发出的同一个噪声脉冲一一对应,根据公式(2)计算出  $M_x$  曲线。由于对噪声脉冲的整个处理过程中具有随机性,为了消除误差,将两两对应脉冲求得的  $M_x$  曲线累加取平均,才能得出最终的结果。如图 6 所示。

此时,信号发生卡和数据采集卡的刷新频率和采样频率均为 100kHz,宽频噪声比较法和脉冲比较

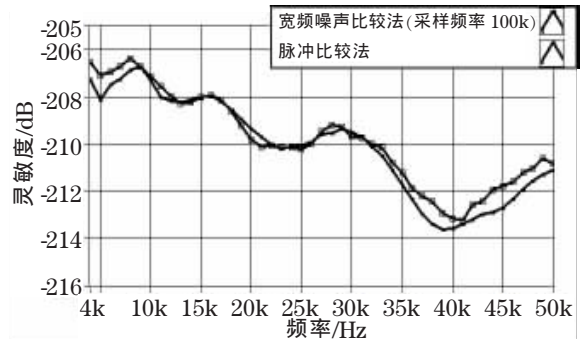


图 6 宽频噪声比较法与脉冲比较法测量结果比较  
Fig.6 The measuring result of broadband noise comparison method compared with that of single-frequency pulse comparison method.

法测出的灵敏度偏差在 4kHz~50kHz 频率范围内最大不超过 1dB。

### 3.4 处理结果分析

由以上实验的过程和结果可以看出,宽频噪声比较法和脉冲比较法测量的灵敏度值在 4kHz~50kHz 频率范围内偏差在 1dB 以内,证明宽频噪声法和脉冲比较法一样,是一种可靠稳定的测量方法,而且还具有快速高效的特点。

以上实验数据是在信号发生卡刷新频率为 100kHz 和数据采集卡采样频率为 100kHz 的情况下完成的,当分别或者同时提高两者的刷新频率或采样频率时,在其它条件不变的情况下,可一定程度上提高测量准确度。

当保持信号发生卡刷新频率 100kHz,而逐步提高数据采集卡的采样频率到 200kHz 和 400kHz 时,测量曲线如图 7 所示。

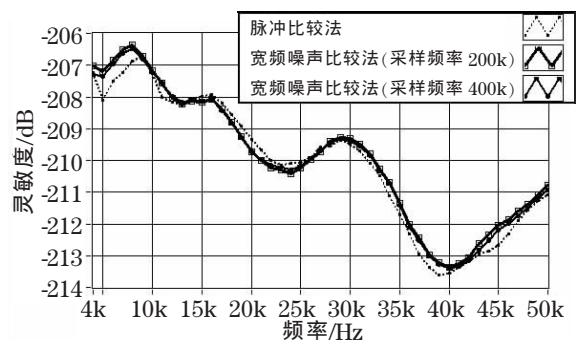


图 7 宽频噪声比较法(采样频率 200kHz、400kHz)与脉冲比较法测量结果比较  
Fig.7 The measuring result of broadband noise comparison method (sampling rate:200kHz,400kHz) compared with that of single-frequency pulse comparison method.

在图 7 中,数据采集卡采样频率为 200kHz 和 400kHz 时得到的测量结果曲线,与脉冲比较法测量的灵敏度值在 4kHz~50kHz 频率范围内偏差在 1dB

以内,除个别频率点外偏差小于 0.5dB,表明提高采样频率使测量值更为准确。就本文的实验结果看来,由于我们采用了脉冲序列内多个脉冲处理结果累加取平均的方法,使采样频率不必太高即可取得满意的测量结果,实验表明采样频率高于测量频率上限频率的 2 倍就能满足测量要求。

## 4 结论及展望

从以上实验结果可以看出,宽频噪声比较法在水声测量中是可行的,测量不确定度满足水声计量要求,采用脉冲序列内多个脉冲处理结果累加取平均的方法,可以降低对采样频率的要求,或者在设备最高采样频率一定条件下可以实现更高频率范围的测试。

宽频噪声比较法从频域分析的角度,实现宽频

范围内测量工作一次完成,利用现代信号处理技术和数字化硬件系统实现快速测量,是对脉冲比较法扫频测量技术的一个重要补充。对于高 Q 值水声换能器的测量,避免信号暂态效应的影响,采用宽频噪声技术更有优势。

### 参 考 文 献

- [1] 郑士杰,袁文俊,缪荣兴,等.水声计量测试技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995.  
ZHENG Shijie, YUAN Wenjun, LIAO Rongxing, et al. Underwater measurement technique[M]. Harbin: Harbin Engineering University Publisher, 1995.
- [2] A. V. 奥本海姆, R. W. 谢弗著,黄建国,刘树棠译[M].离散时间信号处理.北京:科学出版社,1998. 602-608.  
Oppenheim A V, Schafer R W. HUANG Jianguo, LIU shutang transl. Discrete-time Signal Processing[M]. Beijing: Science Press, 1998. 602-608.



## “水声技术学术讲座”在西安举行

水声科学技术的飞速发展,必须培养和造就一大批的水声科技工作者。由于水声行业各单位许多从学校走上工作岗位的青年科技工作者,因所学专业、学科和经历的限制,对当前声纳技术的前沿学科和关键技术以及发展动态缺乏系统的认识与了解。为使水声青年科技工作者更快成材,挑起水声领域中科学研究和水声设备研制的重任,中国造船工程学会船舶仪器仪表学术委员、中国声学学会水声学分会、声纳技术国防科技重点实验室、中国造船工程学会电子技术学术委员会等学术团体和技术机构,于 2008 年 9 月 6 日至 13 日在西安市联合举办“水声技术学术讲座”,聘请水声专家讲授有关水声专业领域的新技术。授课专家与内容:

1. 孙超教授(西北工业大学)讲授“水下多传感器阵列信号处理”
2. 莫喜平研究员(中国科学院声学研究所)讲授“借助 ANSYS 优化设计声学换能器”
3. 周士弘研究员(七一五研究所)讲授“海洋水声环境效应与声纳模基空——时处理技术”
4. 葛辉良研究员(七一五研究所)讲授“光纤水听器阵列技术”

此次学术讲座的举办,是 2008 年水声界一次重要的学术活动,必将对“十一五”期间水声设备的研制、水声科研任务的完成产生积极的促进作用。