

# 一种海洋宽带噪声场数值模拟方法

鄢社锋, 马远良, 倪晋平, 杨坤德

(西北工业大学声学工程研究所, 西安 710072)

**摘要:** 本文研究了在水声基阵设计中用数值模拟产生海洋宽带环境噪声场的方法。通过设计宽带特殊频率响应滤波器和精确时延滤波器来构造海洋宽带空间均匀噪声场中的阵列信号(噪声), 并给出了圆环形阵的计算机模拟。计算机模拟结果验证了该方法的实用性和有效性, 该方法能够较真实地模拟出海洋宽带环境噪声中任意基阵接收的阵列数据。

**关键词:** 宽带噪声场; 数值模拟; 特定频率响应; 水声基阵

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A

## A numerical method for simulating broadband undersea noise field for hydrophone array

YAN She-feng, MA Yuan-liang, NI Jin-ping, YANG Kun-de

(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A numerical method for simulating broadband undersea noise field is proposed in this paper. The key points are the creation of broadband digital filter with specific frequency response to match the required spectrum of undersea noise, and the design of precise time-delay filters on which broadband outputs of a hydrophone array in undersea isotropic noise field can be generated. Computer simulation for a circular array is performed. It is shown that the method is effective and practical for application.

**Key words:** broadband noise field; numerical simulation; specific frequency response; hydrophone array

### 1 引言

在进行宽带波束形成器的设计时, 需要用到海洋环境噪声场的信息, 以便使基阵能获得更好的处理性能; 在阵列信号处理方法的设计中, 也需要用一定的模拟噪声场来检验其有效性<sup>[1]</sup>。虽然已经建立了各向同性空间均匀噪声场的理论模型<sup>[2]</sup>、平面噪声场模型<sup>[2]</sup>、WI 噪声场模型<sup>[3]</sup>等, 但在实际应用中需要根据理论模型产生相应的数值模拟。现有的数值模拟方法, 大都是产生相互独立的噪声数据, 而实际上当阵元间距小于半波长时, 再不能简单假设基阵各阵元之间的噪声相互独立。文献[4]中给出了一种空间均匀噪声场窄带数值模拟方法, 但该方法不能直接用于产生宽带噪声。在已有的海洋噪声模拟器中, 往往是假设基阵各通道噪声不相关, 这样很难真正体现出背景噪声的真正特性, 尤其是当阵元间距相对于信号半波长较小时, 问题显得尤为突

出。本文提出一种任意频响 FIR 滤波器进行精确延时的方法, 产生各向同性海洋环境宽带噪声场的数值模拟, 该方法产生的海洋环境噪声能够满足空间相关性的要求, 其空间相关性与理论模型一致。

### 2 海洋宽带噪声场特性及数值模拟方法

#### 2.1 海洋环境噪声特性

海洋环境噪声不包括平面波干扰, 它是由空间中呈一定分布的、大量的随机过程迭加形成的, 噪声模型是统计意义上的概念。按噪声源的分布不同, 可将环境噪声模型分为各向同性均匀噪声场(例如深海噪声)、各向异性噪声场(例如浅海交通噪声)、表面均匀分布噪声场(例如风成噪声)等。

海噪声级一般用噪声声强级或声压级来表示。也可以将其折算到一赫兹带宽声强谱级或声压谱级来表示。海噪声级不能由理论推算, 而只能靠海上实际测量来获得。前人通过深入的研究, 给出了很多海洋噪声谱级曲线, 其中 Wenz 所总结的谱级曲线具有代表性<sup>[5]</sup>。其谱级曲线大体上可以分成互相覆盖的 3 段, 简单解释如下: (1) 在低频段 1Hz~

收稿日期: 2001-12-17; 修回日期: 2002-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助课题

作者简介: 鄢社锋(1978), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 主要从事阵列信号处理方面的研究工作。

100Hz, 每倍频程- 8dB~ - 10dB 衰减, 主要来源于潮、涌、浪的压力脉动, 大尺度湍流以及远处的风暴、地震, 其噪声级与风速关系不大。(2) 中频段 (100Hz~ 400Hz 或 500Hz) 有一段与风无关, 并经常有存在极值的谱, 极值的位置变动较大, 总的说来, 这一段谱较为平缓。主要来源于远处的航船, 这一段谱级的强弱与航运的频繁程度有关。(3) 在高频段 (400Hz 或 500Hz 以上) 存在一个与风速、海况相关的谱级, 每倍频程按- 5dB~ - 6 dB 衰减。这主要来源于海面风浪。

## 2.2 数值模拟方法

本文以各向同性噪声场的模拟为例, 说明所建立的方法。各向同性均匀噪声场的模型认为基阵各阵元所接收到的噪声是由来自空间中各不同方向的平面波的迭加; 这些噪声源在空间均匀分布且互不相关, 是平稳的随机噪声。由于现阶段声呐的工作频段逐渐向低频方向发展, 因此进行宽带海洋噪声场数值模拟时, 只考虑 3000Hz 以下的海洋环境噪声场模拟, 假设在 400Hz 以下频段海噪声谱级是平坦的, 而在 400Hz~ 3000Hz 频段海噪声谱级按- 6dB/ 倍频程衰减。

为了产生空间均匀噪声场, 假设一个球心在  $O(0, 0, 0)$ 、半径为  $R$  的球面, 以等立体角将该球面分为  $M$  个小曲面, 并且在每个小曲面的中心点处放置一个宽带噪声源。声基阵位于球坐标中心, 球半径远大于基阵的尺度, 则对于球中心来说, 球面上的这些噪声源构成了空间噪声场。

空间均匀噪声场的具体数字模拟方法如下: 在空间均匀分布  $M$  个噪声源 (本文模拟中设定为 60 个), 先使这  $M$  个噪声源产生相互独立的高斯宽带白噪声, 然后分别通过低通滤波器 (例如低通滤波器的截止频率为 3000Hz), 再将各低通滤波器的输出分别通过一个满足噪声频谱特性要求的特定频率响

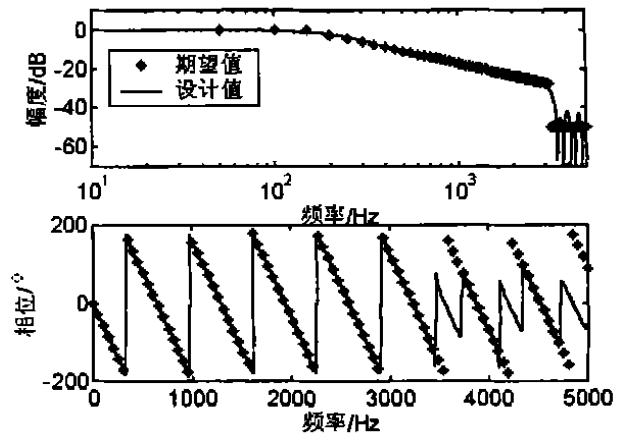


图 2 衰减滤波器频率响应

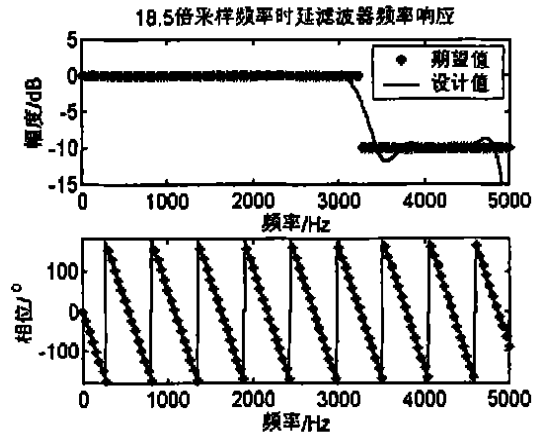


图 3 时延滤波器频率响应

应的滤波器。接下来, 对于每一个噪声源, 可以认为按平面波传播, 首先计算出该噪声源在某一个阵元上的响应, 再通过计算其它各阵元相对于此阵元的位置, 求出相对时延, 将噪声信号通过相应的时延以得到该噪声源在其它各阵元上的响应。最后将各阵元接收到的所有噪声信号叠加, 即得到了各个阵元在空间均匀噪声场中的响应。模拟流程图如图 1 所示。

## 2.3 数值模拟具体实现方法

从图 1 可以看出, 宽带海洋噪声的模拟重点是要设计特定频率响应滤波器和实现信号时延。对于特定频率响应滤波器, 可以采用自适应逼近法进行设计, 具体方法见于参考文献 [6]。

先根据设计要求确定期望的滤波器幅频响应和相频响应, 然后采用自适应方法, 使设计出的滤波器幅频和相频响应趋近于期望滤波器。该期望

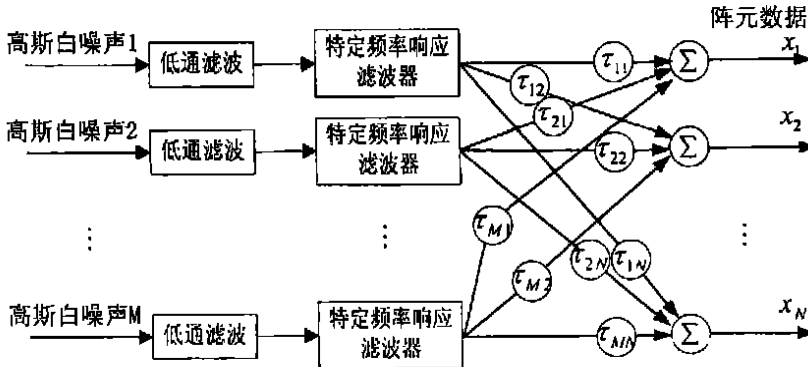


图 1 宽带海洋噪声数值模拟框图

滤波器的幅频响应为: 400Hz 以下是平坦的, 即增益均为 0dB。而 400Hz 以上按 -6dB/倍频程衰减, 其相频响应可以采用线性相移。期望滤波器的频率响应如图 2 中“\*”所示, 设计出的滤波器的频率响应如图 2 中实线所示。从图中可见, 所设计的滤波器的频率响应在 3000Hz 以下与期望响应几乎吻合, 可以达到设计要求。

对于信号时延, 一般各阵元信号的延迟量不是采样间隔的整数倍, 此时如果对阵元信号使用整数倍采样间隔的延迟, 就会引入较大的误差。为了减小延迟误差, 以前的系统中往往是将信号进行过采样, 即采样频率远大于信号的最高频率, 或采用时域内插的方法<sup>[7]</sup>, 这样随之带来的问题是使系统的计算量大大增加。本文提出设计精确时延滤波器的方法, 即在每个阵元后跟随一个精确时延滤波器, 以使该阵元信号达到精确时延, 该时延可以是采样间隔的小数倍。这样就可以降低采样频率, 只要保证采样频率稍大于奈奎斯特采样率即可。

精确时延滤波器也是一种特定频率响应滤波器。在要求频段范围内, 滤波器的期望幅度响应为 0dB, 并且具有线性相位。例如要进行数值模拟的噪声频段范围为 0Hz~3000Hz, 假设采样频率为 10kHz, 要实现一个 18.5 个采样间隔的时间延迟滤波器, 滤波器的阶数选为 32 阶。根据设计要求, 可以确定如下的期望幅频响应和相频响应。期望设计的滤波器通带在 0Hz~3200Hz 内, 增益为 0dB, 在 3200Hz~5000Hz 为 -10dB。滤波器的相移, 为  $Q = 2\pi f\tau$  其中  $f$  为频率,  $\tau$  为时延, 在此设定时延为  $18.5/10000 = 0.00185s$ 。期望滤波器的期望频率响应如图 3 中“\*”所示。设计出的滤波器频率响应如图 3 中实线所示。从图中可以看出设计出的时延滤波器与期望响应非常吻合。利用自相关方法可以估计出实际的时延为 18.5026 个采样间隔, 与设计指标非常接近。

### 3 噪声模拟效果

为了考察产生的噪声场的空间特性, 下面以一半径为 1.5m, 圆周上均匀分布 24 个阵元的圆环形阵为例, 运用上面介绍的方法产生空间均匀噪声场。并从噪声场的空间均匀性和空间相关性对产生的噪声场进行分析。

#### 3.1 噪声空间方位谱

采用宽带常规波束对水平 360° 空间进行扫描, 得出所模拟的噪声场的空间方位谱, 如图 4 所示。从噪声的空间方位谱可以看出, 其空间不均匀性在

±1dB 以内, 模拟噪声基本上是各向同性的。

#### 3.2 噪声空间相关性

Cron<sup>[3]</sup> 在建立各向同性空间均匀噪声场模型时, 给出了窄带情况下空间中任意两点间的噪声信号相关系数,

$$\rho(d) = \frac{\sin(kd)}{kd}$$

式中  $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  为噪声信号波长);  $d$  为两点间的距离。相关系数是噪声信号频率  $f$  和两点间距离  $d$  的函数。

将 24 个阵元接收的宽带信号通过 128 点 DFT (信号重叠率为 50%), 将其分为许多窄带。窄带的中心频率为 DFT 变换的各频率。对各阵元的各窄带分量求互相关, 得出相关系数。图 5 中给出了其中 3 个窄带的模拟信号的互相关曲线, 3 窄带的中心频率分别为 312.5Hz (“\*”号所示)、1250Hz (“◇”号所示) 和 2500Hz (“+”号所示)。横坐标表示阵元间距, 纵坐标表示相关系数。图中的实线为对应频率的理论值。从图中可见, 在阵元间距相比于半波长较小时, 模拟出的噪声场信号的空间相关性与理论值非常接近, 这说明模拟出的噪声场信号是有效的。

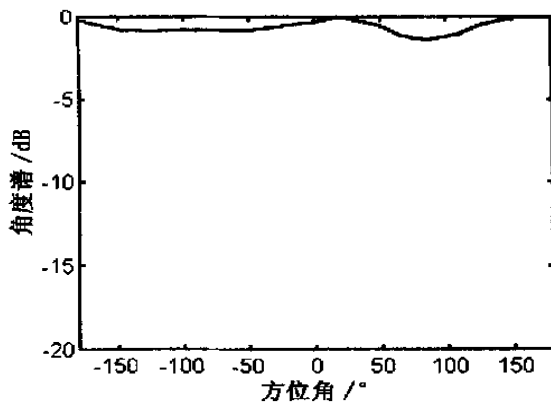


图 4 噪声空间方位谱

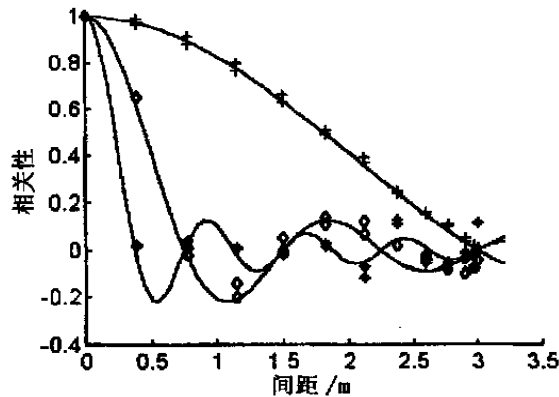


图 5 噪声空间相关性

(下转第 64 页)

- [ 6 ] Suslick K S, Doktycz S J, Flint E B, On the origin of sonoluminescence and sonochemistry [ J ]. Ultrasonics, 1990, 28(5): 280-290.
- [ 7 ] J. L. Huang, R. Feng, C. P. Zhu. Low MHz Frequency Effect on a Sonochemical Reaction Determined by an Electrical Method [ J ]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 20( 5 ): 93-96.
- [ 8 ] Feng Ruo, Zhao Yiyun, Bao Ciguang, Sonochemistry in China [ J ]. Ultrasonics Sonochemistry 1997, 27(4): 183-187.
- [ 9 ] 冯若, 朱昌平, 赵逸云等. 双频正交辐照的声化学效应研究 [ J ]. 科学通报, 1997, 42( 9 ): 925-928.
- [ 10 ] 陈兆华, 朱昌频, 赵逸云等. 用碘释放法研究低频超声的声化学产额 [ J ]. 声学技术, 1997, 16(4): 192-193, 197.
- [ 11 ] 朱昌平, 冯若, 陈兆华等. 双频辐照的声化学产额及其

频率效应的研究 [ J ]. 南京大学学报, 1998, 34( 1 ): 93-96.

- [ 12 ] 朱昌平, 冉勇, 冯若. 非同频水平正交超声束的声化学效应 [ J ]. 声学技术, 2000, 19(2): 86, 89.
- [ 13 ] 尹业高, 朱昌平, 李良学. 双低 MHz 超声束水平正交辐照的声化学产率及其效应 [ J ]. 荆州师专学报 ( 自然科学版 ), 1998, 21( 5 ): 50-51.
- [ 14 ] 昌平, 李林, 徐勇. 用碘释放法研究三维正交超声辐照的空化产率的增强效应 [ J ]. 荆州师范学院学报 ( 自然科学版 ), 1999, 22( 5 ): 70-71.
- [ 15 ] Huang J, Feng R, Zhu C, et al. Low MHz Frequency Effect on a Sonochemical Reaction Determined by an Electrical Method [ J ]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 2( 2 ): 93-98.
- [ 16 ] 王双维, 莫喜平, 冯若等. 混响场中超声化学效应的研究 [ J ]. 声学学报, 1993, 18(2): 122-129.

( 上接第 32 页 )

## 4 结 语

本文提出了一种海洋宽带环境噪声场的数值模拟方法。在直径为 1.5m 的 24 元均匀圆环阵上, 对提出的方法产生的均匀噪声场数据进行了空间方位谱及噪声的空间相关性的验证, 其方位谱的逼真度较佳, 不均匀性在  $\pm 1\text{dB}$  以内, 空间相关性与理论模型一致, 本文提出的环境噪声场模拟方法是有效的。基于该方法产生的空间均匀噪声场设计的最优波束, 其处理结果已经得到了千岛湖湖上试验的验证。

参考文献:

- [ 1 ] 鄢社锋, 马远良. 圆环形声基阵低频超增益性能研究 [ J ]. 西北工业大学学报, 2002, 20( 1 ): 79-82.
- [ 2 ] W. A. Kuperman, F. Ingenito. Spatial correlation of sur-

face generated noise in a stratified ocean [ J ]. J. Acoust. Soc. Am. , 1980, 67(6): 1988-1996.

- [ 3 ] B. F. Cron, C. H. Sherman. Spatial correlation functions for various noise models [ J ]. J. Acoust. Soc. Am. , 1962, 34( 11 ), 1732-1736.
- [ 4 ] 张忠兵, 童立, 倪晋平等. 水声基阵设计中的噪声场数值模拟及其应用 [ J ]. 系统仿真学报, 2001, 13( 5 ): 602-604.
- [ 5 ] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1981. 216-224.
- [ 6 ] 王永德, 龙宪惠译. 自适应信号处理 [ M ]. 成都: 四川大学出版社, 1991. 165-175.
- [ 7 ] D. C. M. Horvat, J. S. Bird, M. M. Grouding. True time-delay bandpass beamforming [ J ], IEEE J. Oceanic Eng. , 1992, 17( 2 ): 185-192.

( 上接第 60 页 )

烧、无电磁干扰等优点, 所以将在很多方面取代传统的电磁式变压器, 其应用前景一片光明。

参考文献:

- [ 1 ] C. A. Rosen. Ceramic transformers and filter [ C ]. Proc. Electronic Component Symposium, 1956. 205-211.
- [ 2 ] K. Sakurial, S. Shindou, etc. Piezoelectric ceramic transformer Using radial vibration mode disks [ C ]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1998. 939-944.
- [ 3 ] Burhanett in KOC, Sedat ALKOY, etc. A circular piezoelectric transformer with crescent shape input electrodes [ C ]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1999. 931-934.

[ 4 ] Toshiyuki Zaitzu, Takeshi Inoue, etc. 2MHz Power converter with piezoelectric Ceramic Transformer [ C ]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1992. 430-437.

- [ 5 ] C. Y. Lin, F. C. Lee Design of a piezoelectric transformer converter and Its Matching Networks [ C ]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1994. 604-612.
- [ 6 ] Anita M. Flynn Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformer [ C ]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1998. 1463-1471.
- [ 7 ] Masahito Shoyama, Koosuke Harada. Zero-voltage-switched push-pull DG-DC converter [ C ]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1991. 223-229.