

鱼雷声纳自噪声及环境噪声仿真及其应用

杨云川, 崔怀林, 李志舜

(西北工业大学航海工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要:环境噪声与航行噪声通过其强度对自噪声级的影响与方向性对基阵阵增益的影响,降低了鱼雷自导分辨率并增大估计误差,对鱼雷自导工作性能有着严重的影响。该文通过对鱼雷自导航行自噪声与环境噪声的仿真与试验研究,对半实物仿真航行自噪声与环境噪声的方案进行了论证与分析,讨论了各向同性噪声场与非各向同性噪声场的空间相关性,并对基阵波束相关性进行了相应的分析。

关键词:噪声场;仿真;自噪声;环境噪声;各向同性;非各向同性

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A

Simulation of Self - Noise and Ambient - Noise of Torpedo SONAR and Its Application

YANG Yun - chuan, CUI Huai - lin, LI Zhi - shun

(Marine Engineering College, Northwestern Polytechnic University, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: The performance of torpedo SONAR is effected by the self - noise and ambient - noise through their level and direction. This paper presents the methods and models of self - noise filed and ambient - noise filed simulation in hardware - in - the - loop simulation. The way of isotropic and non - isotropic noise filed simulation is discussed and the correlation of beam is analyzed in the paper.

KEYWORDS: Noise filed; Simulation; Self - noise; Ambient - noise; Isotropic; Non - isotropic

1 引言

鱼雷在海水中高速航行时,其自导声学基阵除了接收到海洋环境背景噪声外,还接收到由于鱼雷运动所产生航行噪声信号。

海洋环境背景噪声的来源较复杂,由于现有鱼雷声纳基阵工作频段多集中在 15 KHz ~ 40 KHz 的频段,这个频段上的海洋环境背景噪声主要来自海面波浪与热噪声。Knudsen 谱也表明,在这个频段的环境噪声级与当时的风速是相关的,这意味着环境噪声并不是各向同性的,其在垂直方向上是有指向性存在的,环境噪声的方向指向海面。

另一方面,航行噪声主要由机械振动、螺旋桨调制与空化噪声、流噪声产生,其传播途径主要由三种:机械耦合、噪声源辐射通过波导传输到声纳基阵和噪声源辐射声波经由海面海底的反射到基阵上。

在计算鱼雷自导声学基阵阵增益时,通常假设其所处声场为信号相关而噪声场为各向同性不相关。显然,在实际的海洋环境中声纳阵增益将会降低,由声纳方程知,噪声场通

过其强度对 NL 的影响与方向性对阵增益的影响,降低了鱼雷自导作用距离,对鱼雷自导工作性能有着严重的影响。

因此,研究各向同性噪声场与非各向同性噪声场的仿真与试验对鱼雷自导系统的设计与研究有着重要意义。

2 数学模型

2.1 各向同性均匀噪声场模型

空间中一点坐标位置为 (x, y, z) , 其声压为 $p(x, y, z, t)$, 当时间 t 固定时,对于空间中的不同的两点,有空间相关函数:

$$R(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t) = E(p(x_1, y_1, z_1, t) \cdot p(x_2, y_2, z_2, t))$$

在各向同性均匀噪声场中, $p(x, y, z, t)$ 为空间平稳的,从而空间相关函数与 t 无关,仅与 r 间距有关。由于噪声场是各向同性且均匀的,各向同性均匀噪声场中,时间相关与空间相关有如下关系:

$$R(r) = \frac{c}{2r} \int_{-r/c}^{+r/c} R(0, t) dt \quad (1)$$

式中 c 为海水中的声速; τ 为时间延迟。

以下仅关心空间相关,即 $\tau = 0$,对于各向同性均匀单频信号噪声场,其空间相关函数为:

$$R(r, 0) = \left| \frac{\sin(kr)}{kr} \right|$$

式中 k 为波数。

实际上,声纳自噪声与环绕噪声是一个限带随机过程,对于鱼雷自导系统接收的窄带信号,其自相关函数为:

$$R(f) = m_2(f) \cos(2\pi f \tau) \quad (3)$$

式中 $m_2(f)$ 为窄带信号复包络自相关函数; f_2, f_1 分别为窄带信号上下边带频率,则其噪声场空间相关函数为:

$$R(r, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{f_1}^{f_2} \left| \frac{\sin(kr)}{kr} \right| d\omega \quad (4)$$

对于绕射噪声、非常远处的噪声以及噪声在海水中的散射造成的噪声,均可以视为各向同性均匀噪声场,其相关性可以使用上述模型。当鱼雷航行在深海情况下,可以忽略一些界面噪声源的作用,视其噪声场为各向同性均匀噪声场。

2.2 典型非各向同性均匀噪声场模型

由海面波浪产生的环境噪声与航行噪声辐射声波经由海面、海底的反射后,噪声场带有明显的指向性,为非各向同性均匀噪声场。

对于类似海面、海底的噪声源而造成的在水平面内均匀分布的相对于测试点垂直角为 θ 的圆环带状噪声源,有:

$$R(r, 0) = J_0(kr \sin \theta) \quad (5)$$

式中 J_0 为 0 阶 1 类贝塞尔函数; θ 为测试水听器连线的垂直方向角。因此,均匀分布的海面噪声单频空间相关函数为:

$$R(r, 0) = \int_0^{2\pi} J_0(kr \sin \theta) g^2(\theta, \varphi) \exp(jkr \cos \theta \cos \varphi) d\varphi / \int_0^{2\pi} g^2(\theta, \varphi) d\varphi \quad (6)$$

式中 $g(\theta, \varphi)$ 为海面、海底的噪声源在频率 ω 的指向性函数。

工程中不妨取 $g^2(\theta, \varphi) = \cos^2 \theta$, 则同样有对于鱼雷自导系统接收的窄带信号,其水平空间相关函数为:

$$R(r, 0) = \frac{2J_1(kr) / kr}{2} \quad (7)$$

类似上述过程,也可得到垂直空间相关函数。

3 声场仿真方法

从上面对各向同性噪声场的分析可以看出,各向同性噪

声场的生成可以简单地以接收基阵为中心,在一个球面上布放多个无指向性噪声发射阵元,且噪声发射阵元的角间距小于接收基阵方位分辨率,同时每个噪声发射阵元发射带限随机信号。

则由式(4)近似得球面阵噪声场仿真的空间相关系数,但实际上,为此具有大量的噪声发射器的球形基阵的结构是非常复杂的,同时要求的电子系统部分也变得非常复杂。实际上,如果声纳信号处理不采用高分辨信号处理,空间相干性、强度均匀性就成为声场仿真的重要关注指标。

如果将噪声发射阵元以接收基阵为中心,在一个圆环上布放,可以建立一个单频空间相关系数类似于式(5)的简化方案。该简化方案并不是各向同性的,但在相干性、强度均匀性上可以满足要求。

在数学仿真试验中使用了 32 个噪声发射阵元,位于距仿真区域 0.5m 处的半径 1m 的圆环上,发射阵元为无指向性、频响一致的阵元,发射带宽为 18KHz ~ 30KHz。

发射信号 $s_i(t)$ 的采样为

$$s_i(n) = \sum_{j=0}^M b_j WHN_i(n-j) - \sum_{j=1}^N a_j s_i(n-j) \quad (8)$$

a_j, b_i 为构成期望频谱特性的 ARMA(M,N) 滤波器系数, WHN_i 为互不相关的高斯白噪声。

在仿真区域布放了一个 9×9 的格型阵列,阵元间距 0.0375m,则第 i 个基元接收到的信号为:

$$x_i = \sum_{k=1}^N \frac{1}{r_{ki}} s_k \left(t - \frac{r_{ki}}{c} \right) \quad (9)$$

式中 r_{ki} 为第 k 个噪声发射阵元到第 i 个接收基元的距离。基元接收到合成的一个信号如图 1 所示,各个接收基元间的相关性如图 2 所示。

由图中可以看出,合成声场的空间相关性在相邻基元上迅速衰减到小于 0.3,当间距大于基元间距,空间相关性衰减到某一个平台。同时其仿真噪声场强度波动小于 3dB。

利用基元接收信号对合成声场方向性进行分析,方向性图见图 3。由图中可以看出,方向性图周边明显凸起,构成

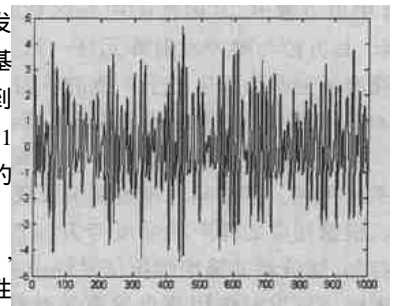


图 1 基元接收信号

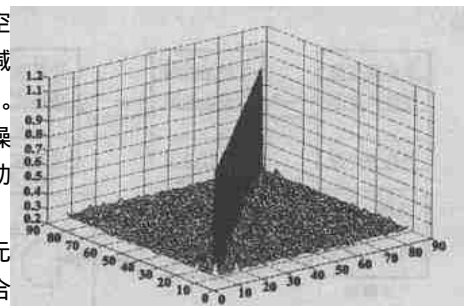


图 2 基元间的相关性

一个环状,其方位与噪声发射阵元环一致。在中部 $\pm 11^\circ$ 的范围内,噪声场强度较小,在 $\pm 23^\circ$ 之外,由于环状噪声发射阵元的作用,方向性图迅速隆起。这是一个典型的非各向同性噪声场。

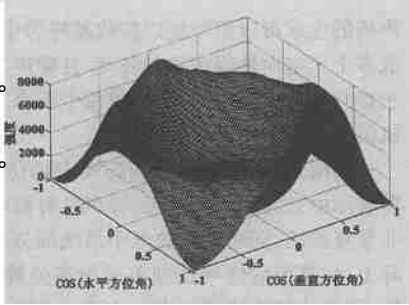


图3 合成声场方向性

另一种方式在数学仿真试验中使用了 36 个噪声发射阵元,位于距仿真区域 1m 处的半径 1m 的圆球球冠上,覆盖角度为水平 60° 与垂直 60° ,发射阵元为无指向性、频响一致的阵元,发射带宽为 18KHz ~ 30KHz,其他条件同上。

利用基元接收信号对合成声场方向性进行分析,信号产生方法同上,空间相关性与前者类似,同时其仿真噪声场强度波动小于 3dB,其方向性图见图 4。由图

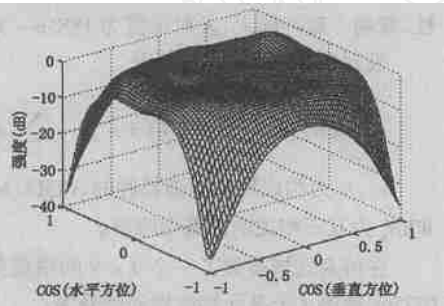


图4 合成声场方向性 3 维视图

4 中可以看出,方向性图中心区域明显凸起,构成一个平台状,其方位与噪声发射阵元环一致。在中部 $\pm 60^\circ$ 的范围内,噪声场近似为强度近乎一致的各向同性噪声场,在 $\pm 60^\circ$ 到 $\pm 90^\circ$ 的范围内,方向性强度迅速下降。

在实验室实现环境噪声与自噪声仿真时,采用如图 5 的系统构建。多路噪声源实现多通道的不相干的白噪声,计算机根据相应的噪声场强度与方向性模型对程控滤波器进行控制,滤波器的输出模拟信号经由功率放大器与环形或球形噪声阵发射作用到自导声学基阵上。该系统可以用于自导系统的静态开环检测,也可用于自导系统的闭环跟踪试验。

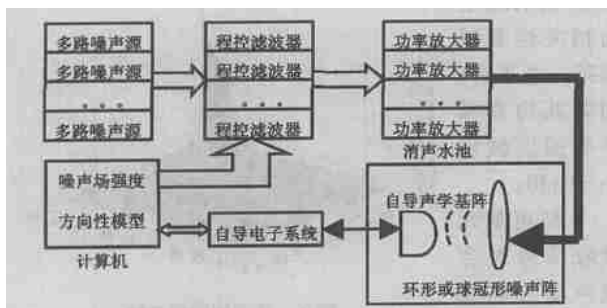


图5 环境噪声与自噪声仿真系统框图

4 噪声场中自导波束相关性分析

在半实物仿真试验中,往往不能够直接测量噪声场中任意两个接收基阵阵元的相关性,而只能测量基阵阵元加权相加后形成的波束输出,为了对噪声场的仿真性能进行分析,对自导波束的相关性有必要进行分析。

设基阵有 N 个阵元,编号分别从 1 到 N ,其中接收的两个波束分别使用了该阵列 N 个阵元的一部分构成了两个子阵。其中子阵 1 使用了 L_1 到 L_2 号阵元,而子阵 2 使用了 L_3 到 L_4 号阵元,且有 $1 \leq L_1 < L_2 \leq N, 1 \leq L_3 < L_4 \leq N$,则输出信号为:

子阵 1 的输出信号与子阵 2 的输出信号为:

$$S_1 = \sum_{i=L_1}^{L_2} k_{1i} x_i = k_1^T x_1, S_2 = \sum_{i=L_3}^{L_4} k_{2i} x_i = k_2^T x_2$$

式中 k_{1i}, k_{2i} 为子阵 1 与子阵 2 中各阵元的复加权重; x_i 为子阵 1 与子阵 2 中各阵元的接收信号;若将子阵 1 与子阵 2 中未使用到的阵元复加权重视为 0,则可以得到类似上述表达的推广表达式。

$$S_1 = \tilde{k}_1^T x \quad S_2 = \tilde{k}_2^T x \quad (10)$$

式中: $\tilde{k}_1 = [0, 0, \dots, k_{1L_1}, k_{1L_1+1}, \dots, k_{1L_2}, 0, \dots, 0]^T$;

$\tilde{k}_2 = [0, 0, \dots, k_{2L_3}, k_{2L_3+1}, \dots, k_{2L_4}, 0, \dots, 0]^T$;

$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 。

则子阵 1 与子阵 2 输出信号的自相关与互相关系数如下:

$$R_1 = E[S_1 S_1^*] = \tilde{k}_1^T Q \tilde{k}_1 \\ R_2 = E[S_2 S_2^*] = \tilde{k}_2^T Q \tilde{k}_2 \quad (11)$$

$$\rho_{12} = \frac{E[S_1 S_2^*]}{\sqrt{R_1 R_2}} = \frac{\tilde{k}_1^T Q \tilde{k}_2}{\sqrt{\tilde{k}_1^T Q \tilde{k}_1 \tilde{k}_2^T Q \tilde{k}_2}}$$

式中: $Q = E \begin{bmatrix} 11 & 12 & \dots & 1N \\ 21 & \ddots & & \dots \\ \dots & & \ddots & \dots \\ N1 & \dots & \dots & NN \end{bmatrix}$, 其中 q_{ij} 为第 i 号基元与

第 j 号基元的相关函数。

对该式有如下分析讨论:

1) 若辐射声场为不相关的各向同性声场,则 $q_{ij} = \delta_{ij}$, Q 为单位阵,则有

$$\rho_{12} = \frac{\tilde{k}_1^T \tilde{k}_2}{\sqrt{\tilde{k}_1^T \tilde{k}_1 \tilde{k}_2^T \tilde{k}_2}} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N k_{1i}^* k_{2i} \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N k_{1i}^2 \sum_{i=1}^N k_{2i}^2}} \quad (12)$$

这说明其相关系数等于两个子阵重叠部分的权系数积比上子阵权系数平方和之积的平方根,如果:

$$k_{1L_1} = k_{1L_1+1} = \dots = k_{1L_2} = k_{2L_3} = k_{2L_3+1} = \dots = k_{2L_4}$$

且 $L_2 - L_1 = L_4 - L_3$,则其相关系数等于两个子阵重叠部分的基元个数比上子阵的基元个数。

2) 若辐射声场为相关的各向同性声场, $\rho_{ij} = 0, i = j$, $\rho_{12} = 0$ 。

3) 如果 S_1, S_2 输出后, 受到不相干的加性噪声污染 (电路热噪声或其他), 有

$$\begin{aligned} S_1 &= S_1 + WHN_1 \\ S_2 &= S_2 + WHN_2, WHN_1, WHN_2 \text{ 不相关} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{12} &= \frac{|E[S_1 S_2^*]|}{\sqrt{E[S_1 S_1^*] E[S_2 S_2^*]}} \\ &= \frac{|E[S_1 S_2^*]|}{\sqrt{(E[S_1 S_1^*] + \frac{2}{WHN_1})(E[S_2 S_2^*] + \frac{2}{WHN_2})}} \end{aligned}$$

可以有 $\rho_{12} < \rho_{12}$ 。

4) 如果 S_1, S_2 输出后, 受到某种与其输出信号不相干的噪声污染, 但噪声是相关同源的 (电路地线噪声或电源噪声等其他), 有 ρ_{12} 上升幅度由噪声功率与信号功率比决定。

5) 生成的噪声声场空间相关性较低时 ($\rho_{12} < 0.3$), 可以认为当 i, j 两基元间距 d_{ij} 与 ρ_{12} 有如下关系:

$$\begin{cases} \rho_{12} = 1 & d_{ij} = 0 \\ \rho_{12} = \frac{d_{ij}}{2} & \\ \rho_{12} = 0 & d_{ij} > \frac{2}{\rho_{12}} \end{cases} \quad (13)$$

也即任一基元仅与周围相邻的基元相关, 而与其他基元不相关。利用上式可以重构一个稀疏矩阵 Q , 利用 (11) 式, 在辐射噪声场空间相关性较小的情况下 ($\rho_{12} < 0.3$), 可以有如下结论: 子阵 1 与子阵 2 输出信号的相关性受该辐射噪声场空间相关性影响较小, 其相关型的主要贡献来自于阵元的复

用; 而在噪声场空间相关性较大的情况下, 子阵 1 与子阵 2 输出信号的相关性将严重的受到影响。

5 结论

本文讨论了各向同性噪声场与非各向同性噪声场的空间相关性与仿真生成的方法, 提出了航行自噪声与环境噪声的模型与仿真方案和试验中波束相关性能分析模型, 该方案经过数学仿真与仿真系统试验验证取得了较好的效果。

参考文献:

[1] William S Burdic. Underwater Acoustic System Analysis 2nd [M]. Prentice Hall, 1991.
[2] 顾金海, 叶学千. 水声学基础 [M]. 国防工业出版社, 1981.
[3] R J Urick. 水声原理 [M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
[4] 沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. 信号统计分析与处理 [M]. 中国科学技术大学出版社, 2002.



[作者简介]

杨云川 (1972.7 -), 男 (汉族), 云南人, 硕士, 西北工业大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事水下信号与信息处理与水下航行体声纳自导仿真的研究工作。获国防科学技术奖一等奖 1 项, 船舶科学技术进步一等奖 1 项, 发表论文 7 篇;

崔怀林 (1963.10 -), 男 (汉族), 陕西人, 硕士, 教研室主任, 副教授, 主要从事信号与信息处理及模式识别的研究工作, 发表论文 12 篇;
李志舜 (1945.12 -), 男 (汉族), 辽宁人, 本科, 博士生导师, 教授, 主要从事水下信号与信息处理和电子导引技术的教学和科学研究工作。获国家科技进步一等奖 1 项, 部级科技进步奖多项, 发表论文多篇。

(上接第 188 页)

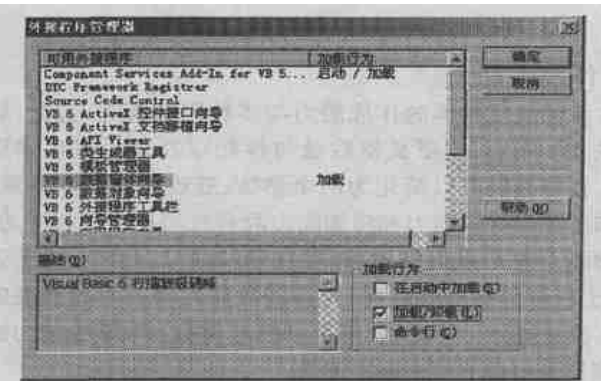


图 2 外接程序管理器

具有一定的实用价值。希望能给仿真工作者提供参考和帮助。

参考文献:

[1] 东方人华. SQL Server 2000 与 Visual Basic.NET 数据库入门与提高 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
[2] 谭浩强, 薛淑斌, 袁枚. Visual Basic 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
[3] 李玉东, 李雷, 李雷. Visual Basic 6.0/NET 控件大全 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
[4] 史宝惠. Visual Basic 基础教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.



[作者简介]

徐红勤 (1970.8 -), 女 (汉族), 浙江绍兴人, 硕士, 北京轻工职业技术学院, 讲师, 主要研究方向: 监控软件和数据库。