

基于目标噪声的声纳信号仿真系统设计

孙荣光 马鑫 王易川

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 岸上模拟训练是声纳训练的重要环节, 但岸上训练由于缺乏声纳工作必需的海洋环境而接收不到目标信号, 必须通过一定的手段生成模拟基阵信号以驱动声纳正常工作。本文介绍了一种基于 WAV 噪声文件的声纳基阵信号仿真系统。该系统基于海上实录的水声信号, 结合特定的战术背景及声场环境, 通过态势推演、声场计算、逆波束形成、插值等处理, 实时产生符合精度要求的仿真声纳基阵信号以驱动声纳装备, 实现在不同战术背景下的声纳岸上训练功能。实践表明, 该系统产生的信号具有高度的视觉和听觉逼真度。

关键词: 噪声文件 基阵信号 仿真

中图分类号: TN911 **文献标识码:** B

Design of Sonar Signal Simulation System Based on Target Noise

SUN Rong-guang MA Xin WANG Yi-chuan

(The Navy Submarine Academy, Qingdao Shandong, 266071, China)

Abstract: Simulation training on shore is an important way of sonar training. To make the sonar working in order, the array signals are need to be generated by some certain methods. In this paper, a sonar array signal simulation system is designed based on the WAV noise file. The system based on the real noise recorded on the sea, by considering of special tactic background and sound field, through a series of processing such as deducing manoeuvre, inverse beamforming, sound field calculation, interpolation and so on, the sonar array signal needed for sonar equipment is generated, which achieve the on shore training in different tactic backgrounds. The training practice shows that the signal generated by this system is of good fidelity both in vision and hearing.

Key words: Noise File; Array Signal; Simulation

1 引言

声纳是潜艇重要的观察器材, 是潜艇在水下航行时目标信息获取的主要来源, 正确熟练的使用声纳对保障潜艇安全及完成各种战斗任务具有重要的意义。岸上模拟操作训练是声纳员培养的重要手段, 但是由于岸上训练缺乏声纳工作的必要声纳基阵工作环境, 不能为声纳装备提供必要的输入信号, 岸上训练不得不依靠基于软件模拟的模拟器进行, 训练的内容范围和有效性都大打折扣。因此, 在实验室条件下, 根据训练的具体背景, 模拟产生声纳基阵信号, 驱动声纳实装工作, 为声纳员岸上训练提供更逼真的训练条件是声纳模拟训练技术研究的重要内容之一。

本文介绍了一种实用的声纳基阵信号仿真系统。该系统利用海上实录的水声信号, 根据给定的战术背景及声场环境, 通过态势推演、声场计算、反波束形成、插值等处理, 实时产生符合时延精度要求的仿真声纳多路基阵信号, 驱动声纳装备, 实现在不同战术背景下的声纳岸上训练功能。

2 系统组成

2.1 原理框图

本信号仿真系统组成框图如图1所示。系统主要由战术设定推演模块、声场计算模块、信号生成模块、环境数据库

和目标噪声数据库组成。其中战术设定推演模块用于设定训练的战术背景、环境参数, 并且根据目标的初始参数及运动要素计算目标相对本艇的实时要素, 声场计算模块用于计算目标信号的传播损失, 信号生成模块用于产生符合声纳工作需要的基阵信号, 环境数据库和目标噪声数据库用于存储水文环境数据和目标噪声文件数据。

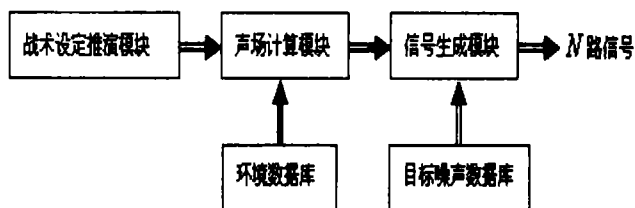


图1 系统组成框图

2.2 硬件组成

系统的硬件主要由一台 MIC-3041A CPCI 总线工控计算机、三块 CPCI-ADI60-DA 信号处理板及一块信号驱动板组成。工控计算机主要完成人机交互、设定训练战术背景及推演、声场计算、存储环境数据和目标噪声数据、信号时延及插值计算等功能。CPCI-ADI60-DA 信号处理板是本系统的核心部件, 该板具有 1×ADSP-21060 SHARC 处理器, 120MFLOPS

峰值运算能力、32路100KHZ同时转换,精度16位、32路低通重构滤波器、1M×32位全局静态存储器,支持零等待访问,用于对插值后的目标噪声数字信息转换为声纳设备工作需要的模拟信号并进行滤波处理,每块DA板能实时处理输出32路信号,3块并行处理可以满足声纳对输入信号路数的需要。声纳驱动板对DA信号处理板产生的信号进行调理,以满足声纳要求的阻抗特性及变压器浮地传输要求。

2.3 软件流程

系统软件采用Windows操作系统下的VC++和VisualDSP编程实现,其流程如图2所示。

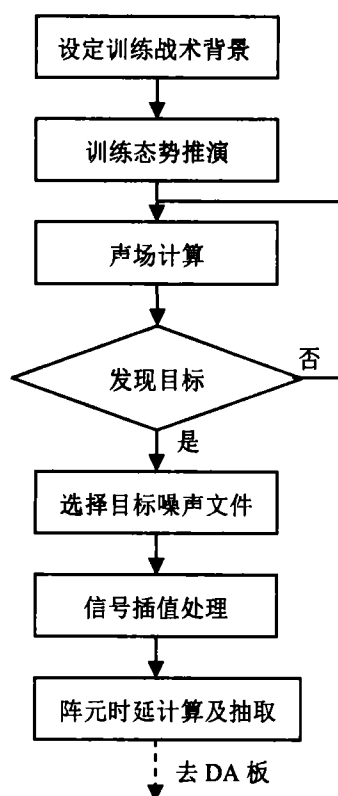


图2 系统软件流程图

系统工作时,首先由教练员通过控制台设定训练的科目、训练环境如海区、季节、水文条件等;本艇参数如航向、航速、深度等;目标参数如数量、类型、声源级、深度、方位、距离、航向、航速等信息。态势推演模块根据上述的各参数实时解算各目标相对于本艇的距离、方位等要素。声场计算模块根据水文条件选择相应的传播模型计算各目标信号传播到本艇声纳接收阵的传播损失。目标发现判决模块根据声纳方程判断目标是否能够被本艇声纳发现并计算声纳接收信号强度,若发现目标,则根据目标的类型从数据库中选择对应的目标噪声文件。信号插值模块对信号进行加密(变采样)。时延计算模块根据声纳接收阵元的空间分布计算信号到达各阵元的时间延迟,从目标信号抽取适当的输出送DA板进行数/模转换、阻抗匹配等信号调理。

3 主要技术

3.1 声场计算

声场计算的主要目的是为信号生成模块提供目标信号强度,其实现方法是根据具体的水文环境计算目标信号的传播损失。

传播损失是度量声源到接收机之间声强衰减大小的一个物理量,其表达式为:

$$TL = 10 \lg \left(\frac{I_0}{I_r} \right) \quad (1)$$

其中, I_0 表示离声源中心1米远处的声强, I_r 是接收机处的声强。

传播损失的影响因素众多,如海区深度、声速剖面、海况、海底底质、声源及接收点深度等。声场计算的方法和模型也很多,目前所发展的声场数值预报方法主要有:射线算法、简正波算法(NM)、抛物方程近似算法(PE)、FFP算法、水平射线—垂直简正波算法等^[1]。每一种算法自然各有其特点,在使用时要针对具体问题的性质选择合适的算法,以便使得到的声场能够最大限度地符合实际情况。

(1) 浅海传播损失

浅海平滑平均场理论是计算浅海声场传播的有效工具,浅海平均声强表达式为:

$$I(z_1, z_2, r) = \frac{8\pi}{r} \sum_{l=0}^L \phi_l^2(z_1) \phi_l^2(z_2) v_l \quad (2)$$

上式表达的声强在深度上再进行包络平滑,即得到浅海平滑平均声场。以浅海负梯度条件为例,平滑平均声强的表达式为^[2]:

$$I(z_1, z_2, r) = \frac{4}{r} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \exp[-2\beta(\alpha_1)r] d\alpha}{S(\alpha_1)[D(z_1) + \sin^2 \alpha_1]^{1/2} [D(z_2) + \sin^2 \alpha_2]^{1/2}} \quad (3)$$

其中, α_1 、 α_2 是本征射线在发射和接收深度的掠角, $S(\alpha_1)$

为跨度, $\beta(\alpha_1)$ 为指数衰减系数, $D(z) = 0.875 \left| \frac{2}{\omega} \frac{dc(z)}{dz} \right|^{2/3}$ 。

公式(3)表达的平滑平均声强不但形式简单,克服了经典的WKBZ近似在反转点发散的缺点,而且计算速度快,实现了浅海声场数值预报实时性的要求。

(2) 深海传播损失

深海传播损失利用广义相积分方法(WKBZ近似)计算,在远场条件下,简正波场的表达式为:

$$P = \sqrt{\frac{8\pi}{r}} e^{i\pi/4} \sum_{l=0}^L \phi_l(z) \phi_l(z_0) \sqrt{v_l} \exp(i v_l r) \quad (4)$$

在简正波声场计算中,主要问题是求解振幅函数 $\phi_l(z)$ 和本征方程的根 v_l (本征值)。

WKBZ 利用艾里函数近似对振幅函数进行简化, 给出双参数的振幅函数表达式^[3]:

$$\phi_i = \sqrt{\frac{2}{s_i}} \begin{cases} \frac{\exp(-\int_{\eta_i}^z \sqrt{v_i^2 - k^2(y)} dy)}{\sqrt{2} \left\{ Bb^{\frac{4}{3}} - Db^{\frac{2}{3}} [k^2(z) - v_i^2] + 16[k^2(z) - v_i^2]^2 \right\}^{\frac{1}{8}}} & z < \eta_i \\ \frac{\sin(-\int_{\eta_i}^z \sqrt{k^2(y) - v_i^2} dy + \frac{\pi}{4})}{\left\{ Bb^{\frac{4}{3}} - Db^{\frac{2}{3}} [k^2(z) - v_i^2] + [k^2(z) - v_i^2]^2 \right\}^{\frac{1}{8}}} & \eta_i \leq z \leq \zeta_i \\ \frac{(-1)^i \exp(-\int_{\eta_i}^z \sqrt{v_i^2 - k^2(y)} dy)}{\sqrt{2} \left\{ Bb^{\frac{4}{3}} - Db^{\frac{2}{3}} [k^2(z) - v_i^2] + 16[k^2(z) - v_i^2]^2 \right\}^{\frac{1}{8}}} & \zeta_i < z \end{cases} \quad (5)$$

其中 s_i 为声线跨度, η_i 和 ζ_i 分别是位于声道轴之上和之下的反转深度, $B=2.152$, $D=1.619$ 。

WBK 近似的本征值方程为

$$2 \int_{\eta_i}^{\zeta_i} \sqrt{k^2(y) - v_i^2} dy - \varphi_s - \varphi_b = 2l\pi \quad (6)$$

其中 φ_b 和 φ_s 分别是本征函数在反转 (或反射) 点的海底和海面相移。

由上述各式可以计算简正波声场 P , 声场强度 I 的表达式为:

$$I(r) = |p|^2 = \frac{8\pi}{r} \times \left\{ \left| \sum_i \phi_i(z_1) \phi_i(z_2) \sqrt{v_i} \cos(v_i r) \right|^2 + \left| \sum_i \phi_i(z_1) \phi_i(z_2) \sqrt{v_i} \sin(v_i r) \right|^2 \right\} \quad (7)$$

由公式 (1)、(3)、(7) 可求得目标噪声信号由声源点到声纳接收阵的传播损失。

3.2 信号时延计算

声纳基阵在工作时, 由于组成基阵的各阵元在空间上的位置不同, 因此信号到达各阵元的时刻不同, 即不同阵元接收到的目标信号有一定的时延或相移。在声纳信号处理中, 为提高输出信噪比, 一般采取将不同阵元信号进行时延或相位补偿的方法以实现各阵元信号同相叠加, 即波束形成技术。

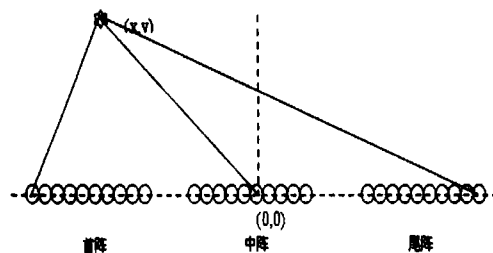


图3 反波束形成的原理示意图

本系统中的信号生成过程恰好与上述波束形成的过程相反, 需要将噪声数据库中存放的与目标对应的单个信号变换为具有与阵元空间位置相对应的多路延时信号, 该过程我们称之为反波束形成。其原理如图3所示。

图为某声纳基阵的示意图, 该声纳接收阵由首、中、尾三个子阵组成, 每个子阵有多个水听器。

要计算各路阵元信号的时延, 以基阵中阵中间水听器为坐标原点建立坐标系, 其余各子阵水听器距离中阵中基元的距离为 $d(k)$, 设目标坐标为 (x, y) , 参考水听器的信号为 $x(t)$, 各水听器的信号相对于 $x(t)$ 的时差为 $\tau(k)$, 则:

$$\tau(k) = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x - d(k))^2 + y^2}}{c} \quad (8)$$

3.3 目标噪声信号插值

本仿真系统采用的原始目标噪声文件来自噪声数据库, 该数据库中存储的噪声文件为 WAV 格式, 具体文件形式为单声道、16bit、采样率为 22.05KHz, 信号的采样间隔即最高延时精度为 $45.4 \mu s$, 该精度不能满足声纳装备的要求。

为提高输出信号的时延精度, 需要对原始信号进行加密处理, 信号加密的算法很多, 本系统采用了二次曲线内插的方法, 其基本原理如图4所示:

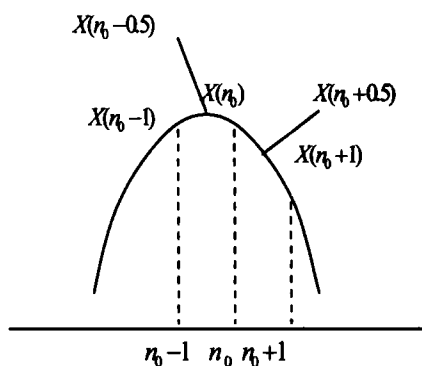


图4 信号内插

假设离散的输入信号为 $X(n)$, 选取任意相邻的三个值 $X(n_0-1)$ 、 $X(n_0)$ 、 $X(n_0+1)$, 若要对信号加密一倍, 则只须计算 $X(n_0-0.5)$ 和 $X(n_0+0.5)$ 两个信号值, 其计算公式为^[4]:

$$X(n_0-0.5) = \frac{3X(n_0-1) - X(n_0+1) + 6X(n_0)}{8} \quad (9)$$

$$X(n_0+0.5) = \frac{3X(n_0+1) - X(n_0-1) + 6X(n_0)}{8} \quad (10)$$

依此类推, 经过 N 次插值可将信号加密 2^N 倍, 即信号相邻两离散值的时延精度增加了 2^N 倍。本系统中 N 取 6, 将信号的时延精度提高为 $45.4/64 = 0.71 \mu s$, 满足了声纳装备的信号输入要求。

3.4 多目标信号合成

以上给出的是单目标信号仿真原理，实际声纳在工作时，经常遇到多目标同时被接收的情况，因此，声纳基阵输出的信号是多个目标的合成结果。

本训练系统设计最多有 8 个目标，加上背景噪声，共 9 个噪声源，信号的合成在 D/A 部分完成，其总输出为：

$$S_a = \sum_{i=1}^N a_i s_i \quad N \leq 9 \tag{11}$$

其中 s_i 是第 i 个目标（含背景噪声）在基阵端的信号响应， a_i 是幅度加权系数，由目标信号到达声纳基阵时的强度确定，设目标信号声源级为 SL ，信号传播损失为 TL ，则基阵接收到的信号强度为 $SL - TL$ 。

3.5 环境数据库

水声环境数据库采用 Microsoft Access 数据库，该数据由两部分组成，其基本样式如表 1 和表 2 所示。

表 1

序号	梯度代码	海区	时间	海区内编号	海深
1	N01001	北海	01	1	70
2	S01002	南海	02	2	200

续表 1

海表声速	最大声速	最小声速	测量海深	测量组数
1490.5	1510.3	1490.1	70	10
1520.3	1520.4	1500.7	200	20

表 2

序号	层深	声速
1	0	1490.5
2	5	1492.8
...

表 1 描述的是声速梯度的基本情况，表 2 描述对应某一种声速梯度各层深的声速值，两个表的联系是结梯度代码来连接的。

水声环境数据库有三个维护模块：添加、修改、删除。添加模块用于向水声环境库添加出海获得的或从其它途径获得的声速梯度数据，修改模块用于修改声速梯度值，删除模块用于删除声速梯度值。

3.6 目标噪声数据库

目标噪声数据库用来存储信号生成模块所需的目标噪声信号。所有的声源均采用 wav 文件结构，录音标准为单声道、16bit、采样率为 22.05KHz，录音长度任意设定。数据库采用 Access 数据库，其基本格式如表 3 所示。

表 3

序号	文件名	目标类型	目标航速	目标螺旋桨转速	文件长度
1	驱逐舰 001.WAV	驱逐舰	18	102	2 分 12 秒
2	航母 001.WAV	航母	14	77	2 分 30 秒
...

数据库的操作既可以用 Access 来操作，也可以用目标噪声数据库管理模块来操作。数据库维护内容包括噪声数据检索、噪声数据维护、光盘资料浏览等三个部分。

4 结论

采用上述技术的声纳信号发生系统已经研制成功并应用于院校教学。大量的教学训练实践表明，利用海上实录目标噪声作为信号源，综合运用声场计算、信号插值、延时等多种处理手段产生多路阵元信号，能够满足声纳装备正常工作需要，且具有很高的视觉和听觉逼真度，该方法具有较高的军事应用推广价值。

该仿真系统需要完备的目标噪声数据库支持，数据收集、整理和存储的难度和工作量不小。另外，由于数据的采集一般是目标在单一工况下进行的，当在训练中对目标实施变速、变向机动干预时，声纳噪声的听觉变化规律有待进一步研究和解决。

参考文献：

[1]汪德昭, 尚尔昌.水声学 [M], 科学出版社, 1981.
[2] 张仁和. 浅海中的平滑平均声场[J]. 声学学报, 1981; Vol. 3. No. 4. pp:535-544.
[3] 宋志杰, 等. 潜艇水声对抗原理及应用[M]. 兵器工业出版社, 2002.
[4] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 安徽教育出版社, 2002.

作者简介：

孙荣光（1975-），男（汉族），山东海阳人，讲师，硕士，研究方向：声纳信号处理技术、声纳战斗使用。