

舰船辐射噪声模拟技术研究*

杜选民 姜亚浩

(上海船舶电子设备研究所, 上海·200025)

摘要 本文对舰船辐射噪声的模拟技术进行了研究, 给出了线谱、连续谱噪声、噪声调制的模拟方法, 进行了计算机模拟, 研制了可编程硬件模拟器。通过对模拟器输出信号的处理和分析, 结果表明该模拟器能很好地再现舰船辐射噪声的典型声学特征。

关键词 辐射噪声, 声学特征, 模拟, 可编程模拟器

Research on simulation of radiating noise from vessels

DU Xuanmin JIANG Yahao

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai, 200025)

Abstract The technology to simulate radiating noise from vessels is studied in this paper. The models to simulate noise with linear spectrum, continuous spectrum and amplitude modulation are provided, and computer simulations are provided too. The hardware structure of a programmable simulator is also proposed. By signal processing to the output of the simulator, the results show that the simulator can reconstitute typical acoustic signatures of radiating noise from vessels.

Key words radiating noise, acoustic signature, simulation, programmable simulator

引言

鱼雷自 19 世纪中期间世以来, 在过去的历次海战中发挥过巨大威力, 一直是海战尤其是潜艇战中的主要武器。随着智能化声自导鱼雷、线导鱼雷以及尾流自导鱼雷的出现和发展, 特别是空中多层次防御大大削弱了导弹对水面舰艇的攻击力, 世界各主要海军强国认识到鱼雷也已成为水面舰艇的主要威胁。因此, 发展水声对抗技术成为各国海军的重要研究课题。舰船(包括水面舰艇和潜艇)声特征逼真模拟技术是最重要的水声软对抗技术之一, 是声诱饵的关键技术。舰船声特征逼真模拟主要是研究和分析舰船的声学特征, 并能够高逼真地将这些特征模拟出来, 达到诱骗鱼雷和声纳的目的。

舰船声学特征主要表现在辐射噪声和声散射两个方面, 本文主要研究舰船辐射噪声的逼真模拟技术, 其过程是在分析不同舰船辐射噪声的基础上, 提取共性的声学特征, 建立相应的数理模型, 利用计算机技术进行可程序设计, 根据不同的作战需要进行参数设置。这种方法尽管难以非常逼真地模拟出某一特定舰船的辐射噪声, 但由于能逼真模拟舰船辐射噪声的一般声学特性, 因而能够达到诱骗鱼雷和声纳的效果, 并且具有很大的柔韧性和灵活性, 因此这种方法是舰船噪声逼真模拟技术的主要研究方向。

本文着重研究了舰船辐射噪声主要声学特征的模拟技术, 包括噪声调制、线谱和连续谱等特征, 并且介绍了我们研制的基于高速

* 第一作者: 杜选民, 1970 年 9 月生, 高级工程师

收稿日期: 1998-03; 修回日期: 1998-02-29

2 舰船主要噪声源分析^[1]

舰船的主要噪声,可分为推进系统噪声、螺旋桨噪声、辅机噪声和水动力噪声,这些噪声在舰船的不同航行状态下,对辐射噪声有不同的影响。辐射噪声谱包含宽带连续谱分量和窄带线谱分量,各种谱分量,根据其噪声源,可以是航速、深度、或与舰船操作有关的其它因素的函数。

连续谱噪声主要是水动力噪声、机械噪声和螺旋桨噪声组成的,特别是螺旋桨发生空泡时,噪声级增加,使得低频线谱相对幅度减小,甚至被连续谱噪声所掩盖。

线谱部分与推进系统、螺旋桨及辅机有关。辅机产生的线谱分量一般相当稳定,与舰船航速无关,这种线谱的带宽一般与频率成正比,其带宽的范围是中心频率的 0.3% ~ 0.03%。对于推进系统和螺旋桨产生的线谱,其幅度与频率随舰船的速度而变化,这些线谱的带宽一般比辅机线谱要宽,而且是有周期变化的频率分量。螺旋桨未发生空泡时,舰船噪声的线谱是相当强的,当舰船航速增加而产生空泡时,宽带噪声的强度会掩盖某些频率分量,与推进系统有关的线谱会向高频移动,幅度会增加,但辅机线谱保持不变。

3 舰船辐射噪声典型特征模拟

用于舰船辐射噪声特征分析的方法有傅里叶谱分析、时频分析、小波分析、高阶谱分析等。对舰船辐射噪声进行功率谱分析,提取谱特征(功率谱、高阶谱等)是经典而有效的目标分类技术,也是噪声逼真模拟技术所要解决的主要问题,可以这样说,目前用于目标分类的各种特征分析和提取技术,都最终归结于谱特征的获得,逼真模拟也是再现辐射噪声信号的谱特征。

3.1 线谱的模拟

线谱检测、跟踪和识别在声纳使用中具

有重要意义,人们对此已作了深入研究,包括线谱的标准和判定准则、线谱的产生机理、线谱的特征提取等^[2],其原因一是线谱特有的集中而稳定的能量可用来提高检测性能;二是线谱本身所携带的频率信息,对目标参数估计和类型识别具有意义。故线谱特征的模拟是舰船辐射噪声模拟技术的重要方面。

对于线谱模拟的工程实现,我们直接把一些谐波信号的集合叠加于连续谱噪声上,这些谐波均以一组特殊的参数设置来选定,第 i 阶谐波组的形式为:

$$s_i(t) = \sum_{n=1}^{n_i} a_{in} \sin \left[n \left(2\pi \frac{f_i}{T} t + \varphi_i(t) \right) + r_{in} \right] \quad (1)$$

n_i 为第 i 阶谐波组所包含的谐波分量数, r_{in} 是 $[0, 2\pi]$ 上的均匀随机量, T 值由谱分析参数给出,每一组谐波有独立的随机漂移相位 $\varphi_i(t)$, f_i 和 a_{in} 是能够根据具体舰船进行设置的参数^[3]。

3.2 连续谱噪声的模拟

连续谱噪声可以用宽带平稳随机过程来拟合,一般先建立宽带连续谱的噪声发生器,产生作为线谱信号背景噪声的信号,通常是将高斯白噪声信号通过一个滤波器,如单极低通滤波器或频谱结构可任意设定的 IIR 滤波器。低通滤波器的脉冲响应函数具有如下形式^[3]:

$$h(t) = \sqrt{2a} e^{-at} u(t) \quad (2)$$

$u(t)$ 是在 $t=0$ 和 $t=a$ 的单位阶跃响应函数,该函数的频率响应大约具有 6dB/oct ~ 8dB/oct 的衰减速率。

由于辐射噪声中的宽带连续谱是具有特殊结构的,而每一种类型舰船辐射噪声的连续谱结构又不尽相同,为了尽可能逼真地反映某舰船的连续谱噪声,要求在产生这种信号时,其谱结构应是允许改变的,较为简单方法是利用频率抽样法来设计 FIR 滤波器。

基于上面讨论的模型,利用数字方法实时产生足够真实的长周期白噪声是我们必须解决的。我们采用基于贝斯-德拉姆洗牌技

术的平均分布随机数产生器, 然后利用基于 BOX-MULLER 算法的正态分布随机数产生器, 可以产生周期足够长(10^6 个输出周期)的高斯白噪声^[4]。

3.3 舰船噪声调制的模拟

众知, 舰船辐射噪声具有鲜明的节奏感, 这是噪声的一种调幅特性, 这种幅度调制携带着舰船的某些信息, 因此得到了人们的重视。在舰艇声纳中的 DEMON 谱分析是一种经典的信号处理手段, 在舰船噪声逼真模拟技术中, 噪声的调制特性是一个重要方面。

一般听觉上的噪声调制是指噪声强度随时间有规律的起伏, 但舰船辐射噪声的调制方式并不是单一的, 在频域上不均匀, 在宽带中各种节奏混在一起。一些研究人员根据舰船辐射噪声调制包络的特点, 将其作为具有随机幅度、相同形状、相同重复周期的脉冲性随机过程来处理, 将单个脉冲的形状取为高斯型:

$$f_{\xi}(t) = (\xi / \sqrt{2\pi}) e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (3)$$

相邻脉冲之间的间隔 L 决定于调制的特性, 如当轴频周期为 T 时, 对于轴频调制, $L = T$; 对叶片数为 B 的叶片频率调制, $L = T/B$; 对轻重节奏调制, $L = T/2$ 。不同脉冲的幅度 ξ 是互相独立的随机变量, 各自服从一定的概率分布。

对于舰船辐射噪声调制的模拟, 通常都对这一模型进行了简化, 仅考虑“螺旋桨拍”现象, 即调制周期对应于螺旋桨转速或螺旋桨叶片频率(轴频率乘以叶片数目), 并且与连续谱噪声模型结合起来考虑。

设平稳过程连续谱为 $G(\omega)$, 谱形状用 $H(\omega)$ 来调整, 这是连续谱噪声模型。设节奏调制函数为 $m(t)$, 则得到的时变连续谱为:

$$G_{CS}(t, \omega) = [1 + m(t)]H(\omega)G(\omega) \quad (4)$$

对于 $m(t)$ 采用的是上述模型, 即随机幅度、重复周期一定的高斯形状脉冲串。设叶片数 n , 轴频周期 T , 则脉冲重复周期为 T/n , n 个脉冲构成一个循环; 若每个叶片的

调制包络平均值为 $\bar{\xi}_i (i = 1, \dots, n)$, 则不同脉冲幅度 ξ 的概率分布为 $(\bar{\xi}_i/2, 3\bar{\xi}_i/2)$ 的均匀分布; 单个脉冲的宽度是可调的, 以调整调制线谱主要存在的范围^[5]。

3.4 计算机模拟

我们对上面讨论的噪声调制模型进行了计算机模拟和分析, 模拟结果如图 1、2 所示。

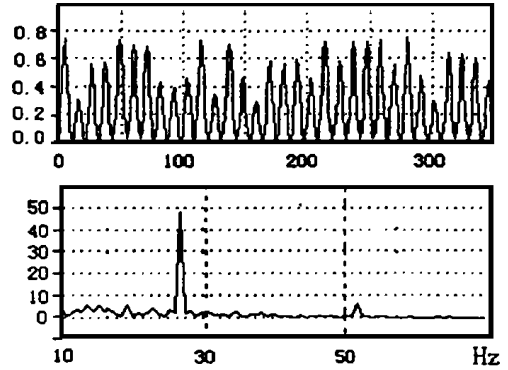


图 1 均匀模式调制包络模拟结果

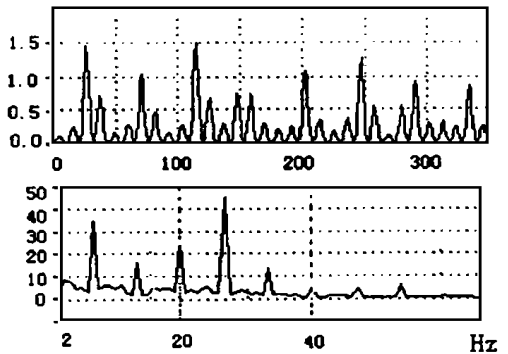


图 2 非均匀模式调制包络模拟结果

图 1 中 $\bar{\xi}_1 = \bar{\xi}_2 = \bar{\xi}_3 = \bar{\xi}_4 = 0.5$, 叶片数为 4, 轴频为 6.5 Hz。上图为 $m(t)$ 的波形, 共 352 点, 间隔约为 3.5 ms; 下图为谱分析结果, 可见, 只有叶片频率及其谐频, 其它调制线谱没出现。

图 2 中 $\bar{\xi}_1 = 0.25, \bar{\xi}_2 = 0.5, \bar{\xi}_3 = 0.0, \bar{\xi}_4 = 0.5$, 叶片数为 4, 可以看出, 除了叶片频率及其谐频外, 在轴频谐频上也出现了调制线谱。

4 舰船辐射噪声模拟器的硬件设计^[6]

对舰船辐射噪声进行逼真模拟,一方面可以通过计算机仿真来研究数学模型的正确性和普适性,特别是与实际舰船辐射噪声分析的结果相对照,这种方法模拟出来的噪声信号可以用于某些信号处理算法的仿真上,不需要实时性;另一方面是通过硬件电路加以实现,实时产生所需的模拟信号,供声纳测试或驱动换能器将模拟信号发射出去,典型的应用就是各种声诱饵的舰船辐射噪声模拟。我们以上面讨论的模型为基础,研制了基于高性能数字信号处理芯片的可编程舰船辐射噪声信号模拟器。

在硬件设计之前,需要确定技术指标,主要从以下几个方面考虑:

- (1) 模拟舰船辐射噪声的宽带连续谱结构和线谱特征;
- (2) 连续谱结构可变,线谱具有时变特性;
- (3) 模拟舰船辐射噪声的节奏调制,调制谱可变;
- (4) 连续谱频率范围 $Hz \sim 40kHz$,线谱频率低于 $500Hz$,线谱根数不少于 5。

根据上述指导思想,舰船辐射噪声模拟器硬件主要有键盘输入、液晶显示、主处理板、信号产生板、计算机接口模块 5 部分组成,其中计算机接口模块是为了利用计算机来设置参数。

主处理板是由两片 TMS320C30 构成的通用并行处理模块,两个处理器之间的通讯采用由两组双端口 RAM 构成的乒乓式存储体。一方面实时产生长周期、频谱结构可调的连续谱噪声信号以及多根频率时变的线谱特征噪声信号,同时完成调制函数 $m(t)$ 的实时产生,并把这些信号实时送给信号产生板;另一方面,实时控制辐射噪声信号的幅度,接收并处理键盘输入信息并送液晶显示屏进行显示。如果工作在实录信号转发状态,对输入信号可以进行实时采样。

信号产生板是将主处理板送出的数字信号通过 D/A 转换成模拟信号,经过滤波、增

益控制、合成,经驱动送到面板上的输出口,其结构如图 3。液晶显示屏主要用于输入参数以及一些输出参数的显示,采用 40×4 字符型,可改为图形型。键盘提供了输入参数和功能设定的能力,并采用薄膜面板按键,与面板成为一体。

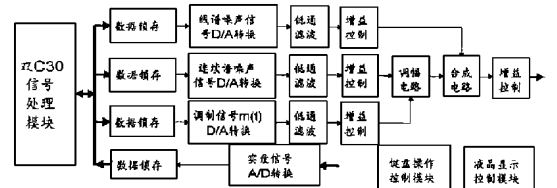


图 3 舰船辐射噪声模拟器结构图

由图 3 可见,所有信号都是数字产生,经 D/A 转换后得到模拟信号,然后进行数字增益控制,得到具有一定逼真度的舰船辐射噪声。这种全数字合成的方法具有很强的可编程性,在硬件资源允许的情况下,可以将任何特征模型的信号模拟出来。我们将产生的信号直接送给 PENTTEK40 信号处理机进行处理,得到的结果如图 4。图 4 为截取的时间波形,采样频率为 $100kHz$;图 4-2 为线性噪声谱级,采用周期图法,处理时间为 $4s$;图 4-3 为低频谱图,包含 $200Hz$ 和 $275Hz$ 两根线谱,采用 ZOOM FFT 方法,处理时间为 $4s$;图 4-4 为调制谱图,均匀模式调制,叶片频率为 $26Hz$,采用平方率检波,高通滤波器为 $H(z) = (z - a)/(z - a)$, a 为小于 1 的实数,累积时间为 $4s$ 。

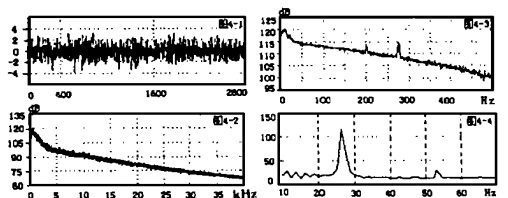


图 4 噪声模拟器输出波形及分析结果

5 结束语

舰船辐射噪声的逼真模拟是水声及水声对抗研究人员所关心问题,也是一个复杂而困难的问题,究其根本原因,是对舰船辐射噪声的特征模型目前还缺乏完整的精确描述,

大多数研究还限于针对这个问题的某个侧面, 所得结果的普遍性有待进一步验证。本文在吸收人们多年对舰船噪声研究成果的基础上, 结合我们对一些舰船噪声和鱼雷噪声的分析, 对舰船辐射噪声典型特征的模拟方法进行了讨论, 并研制了基于这些模型的可编程硬件模拟器, 可以根据不同的特征模型模拟出具有相应特征的辐射噪声。

参考文献

R. J. 尤立克. 洪申译. 工程水声原理. 哈尔

滨船舶工程学院出版社, 990

2 吴国清等. 舰船噪声识别(I) — 总体框架、线谱分析和提取. 声学学报, 998; 23(5)

3 杨德森、汤渭霖. 水声对抗中被动声纳信号的模拟. 水声对抗(内部刊物), 996

4 杨华中, 汪惠. 数值计算方法与 C 语言工程函数库. 科学出版社, 996

5 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(I) — 数学模型及功率谱密度. 声学学报, 983; 8(2)

6 杜选民, 许学尧. 通用鱼雷信号模拟器的研制. 997 年全国水声学术交流会, 997

简 讯

中国科学院东海研究站简介

中国科学院东海研究站(又名: 中国科学院上海声学实验室)地处上海市, 始建于 1960 年。目前, 全站共 5 个研究室和 1 个高技术开发部。在全站 100 余名职工中, 科技人员占有 80 余人, 拥有 10 名研究员(含中国科学院院士 1 名, 国家级有突出贡献中青年专家两名), 副研究员和高级工程师 30 名, 中级研究人员 30 名。每年可招收博士生、硕士生 10 余名。

中国科学院东海研究站主要从事水声物理、水声工程、非线性声学、海底声学、声信号处理(DSP P&D)、医用超声、功率超声、声学换能器和计算机控制及应用等。站内建有两个高等级的实验水池, 拥有千吨级海洋科学考察船两艘, 配备有双体实验船的水库试验场一个。《声学技术》杂志编辑部设立在东海站内, 东海站为主办单位之一。

东海站出色地完成过许多国家级重大的军工工程项目和高技术产品开发项目。自 1978 年来, 共获得省、部级以上科技成果 70 余项。其中获国家级成果进步奖 5 项, 获中国科学院及省部级一、二等科技成果进步奖 30 余项, 获 1988 年第 37 届布鲁塞尔国际发明博览会尤里卡金奖 1 项。经上海市统计, 东海研究站曾被列为上海地区所有科研院、所中人均成果获奖率最高的单位。

历年来, 中国科学院东海研究站研制的军、民用高技术产品主要有:

水声工程: “水声侦察站”, “浅/深地层剖面声呐”, “大口径竖井参数测量系统”, “彩色图像声呐”, “多波束彩色水平渔探仪”, “声场预报仪”, “有缆/无缆式声线轨迹仪”, “短基线/超短基线定位声呐”, “多功能测深测潜仪”, “参量阵声纳”, “高分辨谐波图像声纳”, “目标距离估算仪”, “双频测深仪”, “声学悬浮泥沙监测仪”, “三维地质声呐”, “水下立体声音响”, “智能导游仪”等。

声信号处理: “保密通讯系统”, “时域/频域自适应噪声处理系统”, “自适应声干扰抵消系统”, “声纹鉴别系统”, “相控阵微声接收系统”, “高速数字信号处理工作站”等。

工业超声及控制: “大力神超声清洗系统”系列产品, “模式识别优化控制”, “自适应闭环控制系统”, “DCS 工业控制系统”等。

医疗超声: “数字化 B 型超声诊断仪”, “TCD 经颅多普勒超声医疗诊断仪”, “高频电刀”等。

以上产品绝大多数都填补了当时的国内空白, 并达到了国际同类产品的先进水平。

东海研究站具有雄厚的科学研究的实力及具有发展、开发高科技新产品的生产能力。愿意承接国内外各单位、各公司、各系统提出的各类任务; 并竭诚愿与他们进行广泛的多种形式的合作。

地址: 上海市徐汇区小木桥路 456 号 邮编: 200032 电话: (02) 64048 59 Fax: (02) 64 74 06

东海研究站科研科