

引用格式:周焯,李启飞,李沛宗,等.主动声呐信号建模及仿真[J].电光与控制,2020,27(2):14-17. ZHOU Y, LI Q F, LI P Z, et al. Active sonar signal modeling and simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):14-17.

主动声呐信号建模及仿真

周焯, 李启飞, 李沛宗, 巩健文, 杨日杰
(海军航空大学, 山东烟台 264001)

摘要: 结合以往主动声呐信号仿真对于目标构建较为简单、仿真回波与真实回波拟合度较低且数值积分计算量庞大、不利于复杂目标的实时预报的缺点,在构建海洋环境噪声、海洋混响模型的基础上整合亮点模型进行了舰船主动声呐回波信号仿真。经水池实验验证,与实验回波数据相比达到了预期效果,为声呐设备的测试改良提供了良好的借鉴和思路。

关键词: 信号仿真; 海洋环境噪声; 海洋混响; 亮点模型

中图分类号: U66 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.004

Active Sonar Signal Modeling and Simulation

ZHOU Ye, LI Qifei, LI Peizong, GONG Jianwen, YANG Rijie
(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Underwater target detection is one of the key technologies in navigation. The previous active sonar signal simulation has the shortcomings of relatively simple target model, low degree-of-fitting of the simulated echo with the real echo, and large computation burden, which is not suitable for real-time prediction of complex target. Based on building up the models of the ocean ambient noise and the ocean reverberation, we made active sonar echo signal simulation for the ship by using highlight model. The result of pool experiment showed that, the echo reached the expected effect in comparison with the echo in experiment, which supplied a reference for test improvement of the sonar set.

Key words: signal simulation; ocean ambient noise; ocean reverberation; highlight model

0 引言

利用主动声呐浮标可以实现对水下目标及地形的精确探测,以及针对水下目标的精确跟踪、识别和信号检测^[1]。航船主动声呐研究自20世纪50年代开始已历经半个世纪,目前仍然有很多难以解决的问题,包括背景噪声处理、目标识别等^[2-3]。伴随着各国海洋战略的出台,和电子技术以及信号处理技术的发展,各国均将建立完善的水下目标特征资料库作为主动声呐发展的重点,因此,构建主动声呐信号仿真模型对于航船声呐设备发展以及现代海上远航都具有重要意义^[4]。

1 主动声呐回波模型构建

主动声呐是通过水下换能器发射具有特定信号特

征的声波,在经历水下目标的作用后由水听器接收回声信号来获取水下环境以及水下目标特征。在这个过程中,水听器接收的回波信号并不完全是有效信息。在海洋环境中存在多种噪声干扰,包括在海区普遍存在的海洋环境噪声干扰和混响干扰^[5]。为了能真实仿真主动声呐回波信号的各类信息,对海洋环境噪声和海洋混响建模也成为声呐回波模型不可或缺的一部分^[6-7]。

主动声呐回波模型的构建主要包括对主动声呐发射信号的生成,海洋环境噪声的模拟,海洋混响场模拟以及目标强度特性模拟和最后的主动声呐回波仿真。

1.1 海洋环境噪声模型

真实的海洋环境噪声具有时变性,这使得很难用一个确定的数学模型对它进行建模仿真。从20世纪30年代开始,人们对于海洋环境噪声已经开展了全方位研究,特别是对海洋环境噪声的谱级测量,在大量实测数据的支撑下,形成了基于实测数据的近似经验公式进行海洋环境噪声预报工作。在实际仿真中,通常以海况来描述所处海区情况,有一种浅海环境噪声经验公式来近似描述海况与环境噪声谱级的关系^[8],即

收稿日期:2019-03-21 修回日期:2019-12-04

基金项目:山东省重点研发计划(2016CYJS02A01)

作者简介:周焯(1995—),男,河北沧州人,硕士生,研究方向为水声工程。

$$N_L(f) = 10 \lg f^{-1.7} + 6S + 55 \quad (1)$$

式中： f 为声信号频率； S 为当时海况等级； N_L 表示海洋环境噪声谱级。在一定深度上，环境噪声的振幅分布满足高斯分布，因此当计算出海洋环境噪声谱之后，可以利用高斯噪声近似模拟时域信号，产生 $N(a, b)$ 的随机噪声序列，并进行傅里叶变换取其频域信息，得到随机噪声的频域函数 $R(w)$ 。最后令 $N_L(f)$ 和 $R(w)$ 相乘，得到

$$N(f) = N_L(f) \times R(f) \quad (2)$$

对其进行傅里叶反变换，可得到时域海洋环境噪声序列 $N(t)$ ，即具有特定振幅分布和谱级曲线要求的仿真海洋环境噪声序列^[9]。在设定3级海况的模拟环境中，仿真结果如图1、图2所示。

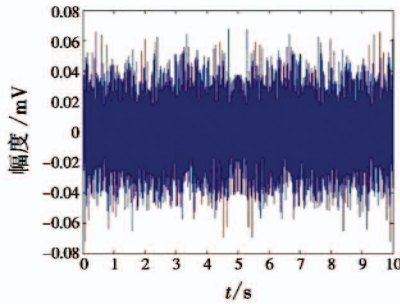


图1 海洋环境噪声时域仿真

Fig.1 Time domain simulation of marine ambient noise

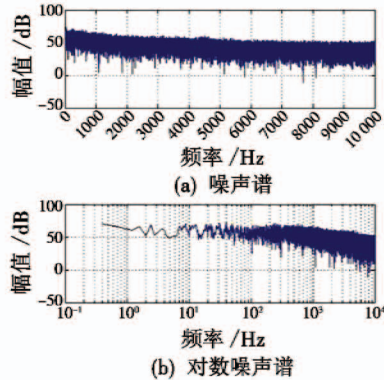


图2 海洋环境噪声频域仿真

Fig.2 Frequency domain simulation of marine ambient noise

1.2 混响模拟

海洋中的混响由体积混响、界面混响和海底混响组成，本文设定为在浅海环境中进行主动声呐回波仿真，因此暂不考虑体积混响。由于存在着多途影响，再加上射线声学有着诸多的局限性，可以采用简正波模型进行描述^[10-11]。本文基于射线—简正波类比，采用了简正波方法来模拟浅海中的混响场。其中，构建的混响模型表示为

$$R(t) = I_0 \iint_{A(t)} \sum_m \sum_n H(r_{mn}) S_{mn} dA_{mn} \quad (3)$$

式中： R 为时间 t 的混响级； I_0 为 t 持续时间内的声源

的强度； H_m 为沿着路径 m 从声源至散射元的传播函数； H_n 表示沿着路径 n 从散射元到接收水听器的传播函数； $S_{mn} = S(\theta_m, \theta_n, \phi)$ 表示散射函数，具体表示从入射 m 到出射 n 的每一个单位面积 dA_{mn} 的散射； r 为声源与目标的声程；求和是对于所有散射波进行计算，而积分只是在时间 t 内对混响有贡献的散射面积内进行；对于简正波方法，声能量通过每一号简正波传播，其中的双求和是指对模进行的；两个 H 是不同散射体激发散射波的传播损失； S_{mn} 也描述为模态耦合函数。简正波理论认为混响的形成由3个过程组成，声能量在经过前向传播之后到达散射点，经过散射点的散射之后再经过传播到达接收点形成混响^[12]。因此在入射波激励下的海底散射声场可以表示为

$$P_{rec}(r) = \frac{2\pi i}{r} \sum_{m=1}^M Z_m(z_s) A_m(z_b) \frac{e^{-\delta_r}}{\sqrt{k_m}} e^{i[kr - \varphi_m(z_s)]} \times \sum_{n=1}^M Z_n(z_s) A_n(z_b) \frac{e^{-\delta_r}}{\sqrt{k_n}} e^{i[kr - \varphi_n(z_s)]} \times |g_{mn}| e^{i\phi_{mn}} \quad (4)$$

式中： φ_m, φ_n 代表不同简正波号数， ϕ_{mn} 表示传播项；对 Z_m 和 Z_n 的求解是关键，基于 Kraken 简正波海洋模型，可以求解出每一号简正波的本征函数和本征值，则混响强度可以表示为

$$R_{ray}(t) = \int_0^{\tau_0} I_0(\tau) \sum_n H_n(r_{mn}) S(\theta_m, \theta_n) dA_{mn} \quad (5)$$

利用射线—简正波类比方法，每一号简正波都有各自的传播时间，其海洋混响仿真结果如图3、图4所示。

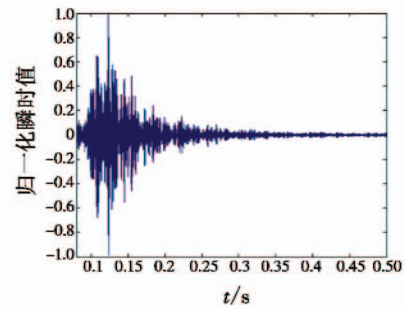


图3 混响模拟(线性调频信号激励)

Fig.3 Reverberation simulation(LFM signal excitation)

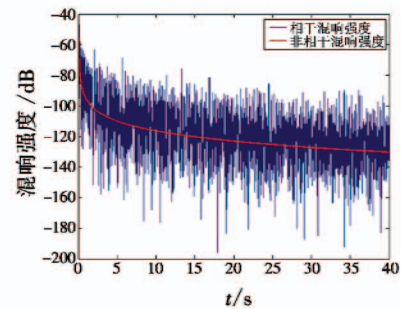


图4 混响强度

Fig.4 Reverberation intensity

1.3 回波亮点模型

以往对于主动声呐目标回波信号仿真中大多采用直接将信号进行时延处理,对于运动目标的处理则会采用人为加入相移来仿真回波信号,这种方法得到的回波仿真只能粗略模拟目标回波的基本特性以及大致实现定向功能,回波信号的仿真有效程度不高^[13]。对此,本文采用亮点模型来模拟水下目标的散射特性。在对水下目标建模中,在声散射情况下镜反射点的反射波强度是最大的。在入射声波为高频的条件下,目标亮点主要由几何亮点和弹性亮点组成。在仿真设计中,特别是远场情况下,可以把水下目标看作刚性材料,由此弹性回波不予考虑。在亮点模型中,一般将水下目标看作是一个网络系统,主动声呐的入射声波是激励,回波则被看作系统在激励下的响应。亮点的传输函数表达为

$$H(r, \omega) = \sum_{m=1}^N A_m(r, \omega) e^{j\omega t} e^{j\phi} \quad (6)$$

对于传输函数,解出其中不同的幅度散射因子、时延和相移即可,以往的文献对于时延和相移讨论的很多,而对于幅度散射因子,因为环境和目标物的差异导致其很难给出确定的表达形式,其可近似为

$$A_i = 10^{T_{s,i}/20} \quad (7)$$

式中, $T_{s,i}$ 为单个亮点目标的目标强度。这样,求解亮点的目标强度就可以求出 A_i 。

在讨论实际任意形状目标的几何声散射中,已经有相对成熟的 Kirchhoff 近似法对简单形状目标进行讨论。一般来说,水下目标的散射声场可以表示为

$$I = \int_S e^{ik_2 \Delta r} \cos \theta dS \quad (8)$$

式中: Δr 为入射声线到表面与目标声中心的声程差; S 为目标受声线照射部分面积; θ 为入射声线与接触点法向量夹角。目标强度 T_s 可以表示为

$$T_s = 10 \lg \left(\frac{|I|^2}{\lambda^2} \right) \quad (9)$$

因此,对于目标强度的求解可以转化为对于 Kirchhoff 的积分求解。一个复杂的声呐目标可以分解为类似球、圆柱、椭球、椎体等目标。对于球体和圆柱体,可以直接将 Kirchhoff 积分求解。

有限长圆柱体的目标强度可以表示为

$$T_s = 10 \lg \left[\frac{R_1 L^2}{2\lambda(1+R_1/r)} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \theta \right] \quad (10)$$

式中: θ 为声波入射角; R_1 为底边半径; $\beta = kL \sin \theta$, k 为 $2\pi/\lambda$ 。

任意凸形物体的目标强度可表示为

$$T_s = 10 \lg \frac{R_1 R_2}{4(1+R_1/r)(1+R_2/r)} \quad (11)$$

依据此式可进行椭球体计算,设椭球体的长轴为 a ,短轴为 b ,在短轴方向入射时,其曲率半径为 $R_1 = b^2/a$, $R_2 = a$; 当在长轴方向入射时,曲率半径均为 a^2/b ,计算时将其代入式(11)求目标强度。

对于椎体的计算,可以按照椎顶的目标强度计算,即

$$T_s = 10 \lg \left[\left(\frac{\lambda^2}{8\pi} \right) \tan^4 \psi \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \psi} \right)^{-3} \right] \quad (12)$$

式中: ψ 是椎体的开角,为方便计算,取值为 45° 。

2 水下目标建模分析

本文用简单潜艇模型作为水下目标,将潜艇目标等效为3亮点模型,如图5所示,亮点位置分别位于艇艏、艇体和艇艉。用椭球体来仿真艇艏亮点,用椎体仿真艇艉亮点,有限长圆柱体模拟艇体亮点^[13]。

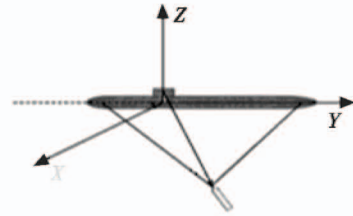


图5 潜艇3亮点模型

Fig. 5 The 3-highlight model of submarine

在以线性调频(LFM)信号为探测信号的前提下,目标散射特性仿真结果如图6所示。

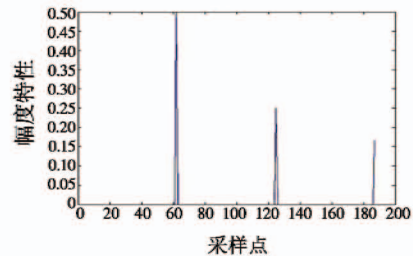


图6 目标散射特性

Fig. 6 Scattering characteristics of the target

根据目标散射特性,结合入射波,即可得到目标回波信号,外加之之前仿真得到的噪声信号,可得到主动声呐探测模拟信号,如图7所示。

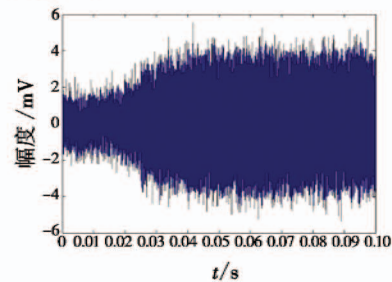


图7 声呐仿真信号

Fig. 7 Simulation signal of the sonar

3 实验验证

为进一步验证仿真模型相较于传统仿真更能真实地反映水下目标回波模拟结果,采用水池实验,在水池中放置潜艇等比例仿真模型,通过换能器相对于目标物 45° 发射 LFM 信号。其实验测试结果如图 8 所示。

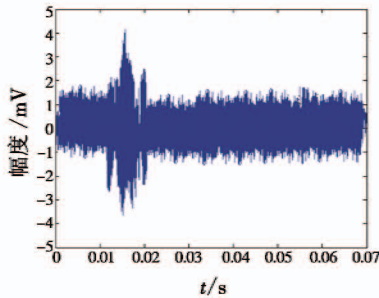


图 8 实验回波信号

Fig. 8 Test echo signal

由于水池实验中已经进行了降噪处理,可以看作自由场,直接进行声呐目标亮点模型的对比。仿真结果见图 9。

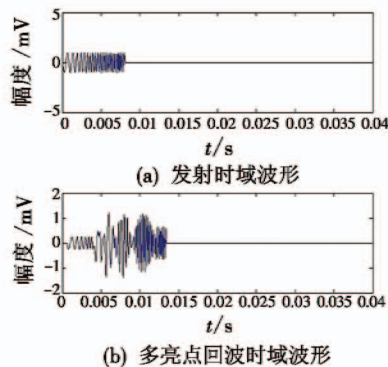


图 9 仿真回波信号

Fig. 9 Simulated echo signal

由结果可知,仿真信号与水池实验中的模型回波信号在回波特性上基本相符,在计算后的同时间节点出现散射波,求取其相关频谱,结果如图 10 所示。

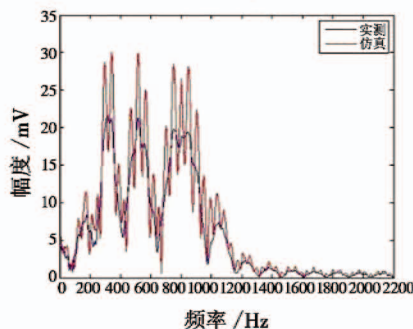


图 10 多亮点回波信号对比

Fig. 10 Multi-highlight echo signal contrast

由图 10 可得,在 300 Hz, 500 Hz 和 800 Hz 时达到了频响峰值,在变化趋势和峰值位置上,仿真信号和实测信号基本一致,从而说明所建立的回波仿真达到了预期效果。

4 结语

本文构建了水下目标回波信号仿真模型,结合仿真后的海洋环境噪声和海洋混响,得出了水下目标的回波仿真,极大缩短了计算时间,经实验验证,与实际回波数据相比,达到了预期效果。不足之处是仿真仅模拟了水下目标的几何亮点回波,由实验回波可知,在几何回波后仍有不可忽略的弹性回波成分,如何对目标的弹性回波进行建模仿真,是后续工作的重点。

参考文献

- [1] 柴鹏. 主动声呐水下探测实时并行仿真系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [2] 张志彬. 声呐平台水声信号处理研究与实现[D]. 石家庄:河北科技大学,2014.
- [3] 姜姝. 水下目标回波几何亮点结构的形态学研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [4] 徐天杨,李秀坤,吴蔚,等. 水下目标声散射角特征建模[J]. 指挥信息系统与技术,2016,7(5):55-61.
- [5] 李整林. 水平缓变浅海的绝热简正波相干混响理论[C]//中国声学学会 2008 年全国声学学术会议论文集,2008:120-121.
- [6] 杨伏洲,范若楠,赵罡,等. 基于大尺度目标强亮点散射的时反特性[J]. 计算机仿真,2016,33(7):40-44.
- [7] 刘大勇. 海底混响信号仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [8] 刘媛昕,吴艳群,马树青,等. 海洋环境对海面源噪声场的影响分析[J]. 南京大学学报:自然科学版,2017,53(4):638-645.
- [9] 汤渭霖,范军,马忠成,等.《水中目标声散射》[J]. 声学学报,2018,43(5):873.
- [10] 吕艳梅,王洪锋,孙江生. 一种多传感器数据融合仿真平台的设计[J]. 电光与控制,2004,11(1):22-24.
- [11] 郭业才,赵俊渭. 海洋环境噪声预报建模与算法研究[J]. 舰船科学技术,2004(4):26-30.
- [12] ELLIS D D. A shallow-water normal-mode reverberation model[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(5):2804-2814.
- [13] 向小梅,蒋楚鸥. 潜艇与多亮点靶标回波展宽和亮点起伏特性研究[J]. 舰船电子工程,2016,36(2):129-132.