

运动目标的主动声探测脉冲回波信号波形重构

聂宜召, 罗建, 刘亚萍, 张海涛, 赵亚磊, 黄仁可
(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘要 水下主动声探测是水下目标探测的主要技术之一,其目标回波信号的模拟技术对水下作战防御、声呐和水中兵器以及水下目标探测系统的研制、实战操作训练等多项国防及民用领域具有十分重要的作用。针对常见的 CW 和 LFM 主动声探测信号,开展了运动目标回波信号波形的重构技术研究。在捕获得到主动声探测脉冲的条件下,利用“波形存储重发”的基本方法,根据运动目标相对运动速度,重新设置回波信号采样频率,从而实现宽带回波信号(LFM 信号)及窄带回波信号(CW 信号)的多普勒频移模拟。根据目标回波时延信息,给出了目标回波时延重构模拟方法,并根据不同目标类型和入射方位给出了目标强度参数设置的参考。

关键词 主动声探测;回波模拟;CW 信号;LFM 信号;波形重构

中图分类号 TN911.7 **文献标识码** A

Waveform Reconstruction of Active Acoustic Detection Pulse Echo Signal of Moving Target

NIE Yizhao, LUO Jian, LIU Yaping, ZHANG Haitao, ZHAO Yalei, HUANG Renke
(Navigation College of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Underwater active acoustic detection is one of the main techniques for underwater target detection. Its target echo signal simulation technology plays an important role in the defense and civil fields of development, combat operation and training of underwater combat defense, sonar, underwater weapon, and underwater target detection system. Aiming at common CW and LFM active acoustic detection signals, the reconstruction technology of moving target's echo signal waveforms is studied. Under the condition that the active acoustic detection pulse is captured, the basic method of "waveform storage retransmission" is used to reset the echo signal sampling frequency according to the relative motion speed of the moving target, thereby the Doppler shift simulation of broadband echo signal (LFM signal) and narrowband echo signal (CW signal) is realized. According to the target echo delay information, the simulation method of target echo delay reconstruction is given. The reference of target intensity parameter setting is given according to different target types and incident orientations.

Key words active acoustic detection; echo simulation; CW signal; LFM signal; waveform reconstruction

0 引言

随着电子技术的发展、水下目标探测技术的提高、以及复杂多变的海洋环境的影响,使得水下目标回波模拟系统对海洋中舰船目标、潜艇目标等回波进行精确模拟的要求越来越高^[1],如何准确地重构和模拟运动目标主动声探测信号所包含的相

关信息就成为了当务之急^[2]。本文给出了一种主动声探测脉冲回波信号波形重构方案,利用捕获得到的主动声探测脉冲信号,根据预设的目标相对运动速度、目标类型和入射方位,重构包含目标相关信息的回波信号波形。通过该技术不仅可以保护舰艇、潜艇等水中目标的安全通过,还可以代替潜艇出海,完成探测系统的水池及外场性能参数测

收稿日期:2018-10-12

作者简介:聂宜召(1993-),男,硕士生,主要从事水下声场建模仿真、水声通信研究。

定,利于快速开展科学研究,加快了科研速度^[3]。

1 主动声探测回波信号重构技术方案

为了精确实现主动声探测脉冲回波信号波形重构,需在获得主动声探测脉冲信号的基础上,综合考虑目标强度、多普勒频移、时延信息等参数的影响,探讨不同特征参量的重构算法。论文先对获得的主动声探测信号进行多普勒频移模拟,再加入脉冲的时延信息,最后加入目标强度特征。主动声探测脉冲回波信号波形重构方案如图 1 所示。

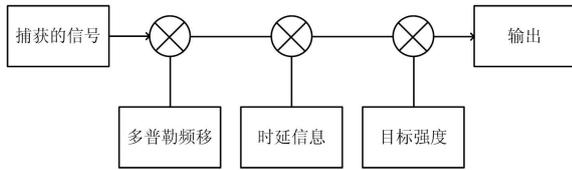


图 1 主动声探测回波信号重构方案

Fig. 1 Reconstruction scheme of active acoustic detection echo signal

2 目标回波多普勒频移模拟

水下目标一般情况下是非静止的,目标相对运动时会产生多普勒效应,由于多普勒效应,目标回波信号相对于主动声探测脉冲信号会产生多普勒频移^[4]。

常见的主动声探测信号有单频脉冲信号(CW 信号)、线性调频脉冲信号(LFM 信号)、双曲调频信号(HFM)等。论文分别对目标回波的宽带模型与窄带模型展开讨论。当主动声探测系统与目标距离较远时,可将目标视作点目标。运动点目标的回波信号取决于主动声探测信号的形式,以及点目标的运动相关参量。

假设非静止的点目标相对于主动声探测系统做匀速运动,那么就可以得到不考虑传播损失的目标回波模型,如式(1)所示。

$$u(t) = s\left(\frac{c-v}{c+v}(t-\tau_0)\right) = \sqrt{\Delta} s(\Delta * (t-\tau)) \quad (1)$$

式中 $\Delta = \frac{c-v}{c+v}$ 为多普勒伸缩因子。

由式(1)可以看出,在不考虑传播损失时,模拟目标回波信息需要在重构的信号中加入 Δ 与 τ 。

主动声探测信号的频率与主动声探测回波信号的频率关系可以表示为^[5]

$$f' = f \left(\frac{c \pm v_0}{c \mp v_s} \right) \quad (2)$$

式中: c 为声波在水中传播的速度; f 为主动声探测信号的频率; f' 为主动声探测信号遇到目标后产生的回波信号的频率; v_0 为目标的移动速度; v_s 为主动声探测信号发射源的移动速度。在计算回波信号的频率变化 ΔF 时,由于信号经过来回双程传播,因此回波信号的频率变化为

$$\Delta F = 2\Delta f = \pm 2f \left(\frac{v_0 + v_s}{c} \right) = \pm 2 \frac{v}{c} f \quad (3)$$

式中 v 为目标与主动声探测系统发射声源的相对移动速度, $v = v_0 + v_s$, 化简可得:

$$\Delta F = \pm 0.00067vf \quad (4)$$

式中: v 的单位为 kn ; ΔF 的单位为 Hz 。当主动声探测系统与目标相互靠近时, $\Delta F = +0.00067vf$; 当主动声探测系统与目标相互远离时, $\Delta F = -0.00067vf$ 。

论文采用“波形存储重发法”来实现多普勒频移的重构,其基本思路是回波模拟系统对主动声探测系统发射的主动声探测信号用采样频率 F_s 进行采样,并将该信号存储于回波模拟系统中,根据所需模拟目标的相对运动速度,设置重采样频率 F'_s ^[6]。

根据采样定理的定义,在工程上为了保留原始信号的全部信息,一般至少取采样频率为原始信号最高频率的 n 倍 ($n \geq 2.56$), 可表示为

$$F_s = nf \quad (5)$$

式中: F_s 为采样频率; f 为原始主动声探测信号的频率。可以得出每个采样周期内的采样点数为 $n = F_s/f$, 总采样点数为 $N = tF_s$, 式中: N 为总采样点数, t 为主动声探测信号的脉宽。

在对主动声探测信号的回波进行模拟时,根据上面的推导可以计算出重发回波信号在 1 个周期内的点数为 $n' = F'_s/f$, 式中 f' 为重发回波信号的频率。由于主动探测信号与模拟回波信号在 1 个周期内的样本点数是一样的 $n = n'$, 则可以推导出:

$$\frac{F_s}{f} = \frac{F'_s}{f'} \Rightarrow f' = \frac{F'_s}{F_s} f \quad (6)$$

模拟回波的多普勒频移为

$$\Delta F = f' - f = \frac{F'_s}{F_s} f - f = \frac{F'_s - F_s}{F_s} f \quad (7)$$

代入公式(4)可得:

$$v \approx \pm 1492.5 \left(\frac{F'_s}{F_s} - 1 \right) \quad (8)$$

式中: v 为目标与主动声探测系统发射声源的相对移动速度, kn。可以看出, 通过设定存储的主动声探测信号的采样频率可以模拟目标的运动速度。

同理, 对于一定带宽下的宽带信号 $s(t)$, 根据采样定理可以表示为

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(nT_s) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi t}{T_s} - n\pi\right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s\left(n \frac{1}{F_s}\right) \operatorname{sinc}(\pi F_s t - n\pi) \quad (9)$$

式中: T_s 为采样时间间隔; F_s 为采样频率。该信号可以展开成 sinc 函数的无穷级数, 展开后的 sinc 函数的无穷级数系数恰好为采样值 $s(nT_s)$ 。

为了用同一组采样值来模拟回波信号的多普勒频移, 即 $u(t) = s(\Delta * t)$ 。式中 Δ 为多普勒伸缩因子。可以假设回波使用采样频率 $\Delta * F_s$ 对回波信号 $u(t)$ 进行采样后得到的采样值为 $s(nT_s)$ 。根据式(9)得到 $u(t)$, 即

$$u(t) = s(\Delta * t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(nT_s) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta * t\pi}{T_s} - n\pi\right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s\left(n \frac{1}{F_s}\right) \operatorname{sinc}(\pi F_s * \Delta * t - n\pi) \quad (10)$$

令回波信号 $u(t)$ 的采样频率为 $\Delta * F_s$, 则采样的时间间隔为 $\frac{1}{\Delta * F_s} = \frac{T_s}{\Delta}$, $u(t)$ 采样值为

$$u(t) \Big|_{t=n\frac{T_s}{\Delta}} = S(\Delta * t) \Big|_{t=n\frac{T_s}{\Delta}} = S\left(\Delta * n \frac{T_s}{\Delta}\right) = s(nT_s) \quad (11)$$

通过分析发现, 在满足采样定理的条件下, 无论是宽带信号还是窄带信号, 均可以采用“波形存储重发法”来实现回波信号的多普勒频移。

3 目标回波时延模拟

主动声探测系统在探测目标的过程中, 由于声波在海洋中传播, 主动声探测系统发射出主动声探测信号的时刻与接收的遇到目标后产生的回波之

间存在一个时延 τ 。对时延 τ 的模拟可以通过主动声探测系统与目标之间的距离来计算产生^[7]。

假设有一个主动声探测信号为 $s(t) = A \cos 2\pi f t$, 则可得到所接收到的信号为

$$s_r(t) = A \cos 2\pi f(t - \tau) \quad (12)$$

式中 τ 为信号传输的时延。

时延 τ 取决于主动声探测系统与目标之间的距离 R 、以及声波在水中的传播速度 c 。因此, 时延 τ 可以表示为

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (13)$$

在目标回波模拟器模拟目标的回波时, 可先将捕获的主动声探测信号的波形存储下来, 延时所需的时延 τ 再重发, 即可模拟目标回波的传播时延。

4 目标回波强度模拟

接收到的回波信号强度的大小是由 3 个方面的因素决定的: 发射信号的声源级、传播损失、目标强度。目标强度 TS 描述了目标物体截取信号并将它重新辐射出去的能力大小, 可以表示为^[8]

$$TS = 10 \lg \frac{I_r}{I_i} \Big|_{r=1} \quad (14)$$

式中: I_i 为入射信号(主动声探测信号)的声强; I_r 为目标物体声学中心 1 m 处的回波声强度。

不同的目标类型和入射方向具有不同的目标强度。对于潜艇目标来说, 在不同频率下对不同潜艇做测量后发现: 在潜艇左右两侧的正横方向上, 目标强度值最大, 可达 25 dB, 它是由艇壳的镜反射引起的; 在艇首和艇尾方向, 目标强度取极小值, 约 10~15 dB, 这是由艇壳和尾流的遮蔽效应引起的; 在艇首和艇尾 20° 附近, 比相邻区高出 1~3 dB, 这是由潜艇的舱室结构的内反射产生的。对于鱼雷和水雷目标来讲, 鱼雷和水雷的几何形状基本上都是带有平头或圆头的圆柱体, 长度为 1 至数米, 直径为 0.3~1 m。鱼雷的尾部安装有推进器, 水雷的雷体上安装有翼且有凹凸不平处。对于这样的物体, 其正横方位上或头部会有较强的目标强度值, 因为这些方位上有较强的镜反射。至于尾部和雷体上小的不规则部分, 目标强度值较小。当

然,如果声波入射到雷体上的某些不太小的平面上,由于镜反射较强,也会有较强的目标强度值。因此在模拟不同目标的回波时,需要根据实际情况设定具体的目标强度参数。表 1 给出了一些常见的水下目标的目标强度参考标准值。在模拟目标回波强度的幅值大小时,可根据表 1 确定需要模拟目标的目标强度标准值 TS' ,计算出传播损失 TL' ,就可以得出目标回波应发射的声级:

$$EL = SL + TS' - TL' \quad (15)$$

表 1 常见的水下目标的目标强度参考值^[9]

Table 1 Reference values of target intensity of common underwater targets^[9]

目标	入射方位	目标强度/dB
潜艇	正横	+25
	艇首—尾	+10
	正横与首尾	+15
水面舰艇	正横	+25
	非正横	+15
水雷	正横	+10
	非正横	+10~-25
鱼雷	头	-20
鱼	背向	-54+19lgL

5 目标回波重构模拟

基于前面的算法分析,我们分别对表 2 中常见的两类主动声探测信号^[10]在指定条件下进行目标回波信号波形的重构模拟。

表 2 常见主动声探测信号参数

Table 2 Signal parameters of common active acoustic detection

信号	SPL/dB	F /kHz	F_s /kHz	K_0 /(MHz/s)	T /s
CW 信号	180	30	200	0	0.005
LFM 信号	180	25~30	200	1	0.005

假设某主动声探测系统发射的主动声探测信号为表 2 中的 CW 信号,在距离该主动声探测系统 100 m 处有一潜艇目标,入射方向为正横与首尾之间,两者之间的相对移动速度为 20 kn,对该主动声探测系统的目标回波信号进行重构模拟。

首先,已知该主动声探测系统与目标之间的相对移动速度为 20 kn,可以计算出重采样频率为 198.7 kHz,多普勒频移量为-0.2 kHz。

从表 1 中可以查出潜艇目标在入射角为正横与首尾之间的目标强度参考标准值为+15 dB。根

据经验公式可以计算出 30 kHz 的主动声探测信号在 100 m 传播距离下回波信号的传播损失约为 40.4 dB。表 2 中 CW 信号的声级为 180 dB,经过 100 m 的传播衰减后的声级为 139.6 dB,代入公式(15)可得回波信号的声级为 154.6 dB。CW 信号经过主动声探测系统发出后,在距离主动声探测系统 100 m 处被回波模拟系统接收到的信号,脉宽为 0.005 s。CW 信号在多普勒频移量为-0.2 kHz 条件下的重构回波信号,脉宽展宽为 0.006 s。多普勒频移仿真验证结果如图 2 所示。

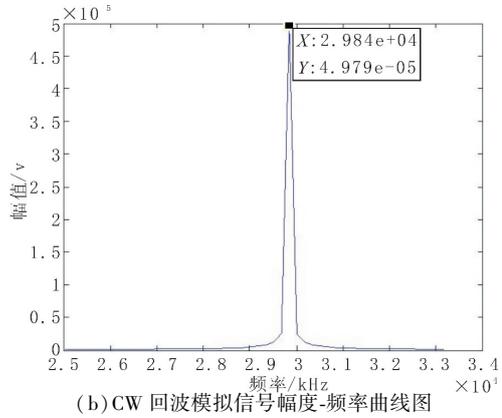
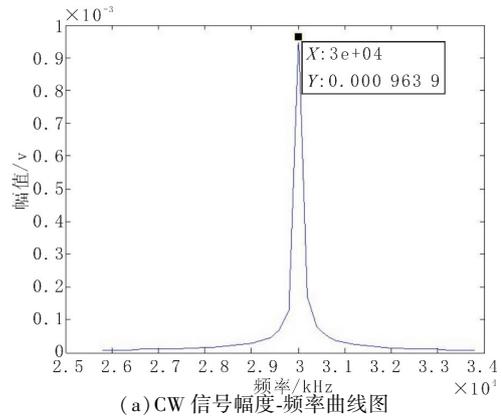


图 2 CW 信号目标回波重构模拟

Fig. 2 Reconstruction simulation of target echo of CW signal

图 2 分别为 2 种信噪比下接收信号与发射信号的信号幅度-频率曲线图,从图中可以看出接收到的 CW 信号的中心频率为 30 kHz,回波模拟信号经过频移后的中心频率约为 29.8 kHz,多普勒频移量约为-0.2 kHz,与计算结果相符。

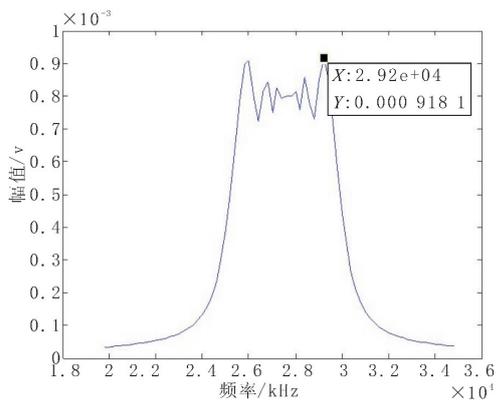
假设某主动声探测系统发射的主动声探测信号为表 2 中的 LFM 信号^[10],在距离该主动声探测

系统 50 m 处有一潜艇目标,入射角为正横,两者之间的相对移动速度为 10 kn,对该主动声探测系统的目标回波进行重构模拟。

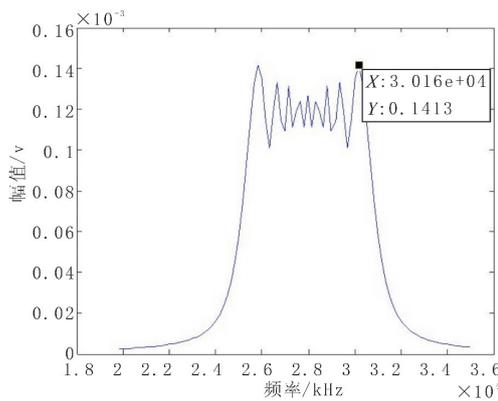
首先,已知该主动声探测系统与目标之间的相对移动速度为 10 kn,可以计算出重采样频率为 199.3 kHz,多普勒频移量为-0.09 kHz。

从表 1 中可以查出潜艇目标在入射角为正横时的目标强度参考标准值为+25 dB。根据经验公式可以计算出 30 kHz 的主动声探测信号在 100 m

传播距离下回波信号的传播损失约为 34 dB。表 2 中 LFM 信号的声级为 180 dB,经过 50 m 的传播衰减后的声级为 146 dB,代入公式(15)可得回波信号的声级为 171 dB。LFM 信号经过主动声探测系统发出后,在距离主动声探测系统 50 m 处被回波模拟系统接收到的信号,脉宽为 0.005 s。LFM 信号在多普勒频移量为-0.09 kHz 条件下的重构回波信号,脉宽为 0.006 s。多普勒频移仿真验证结果如图 3 所示。



(a) LFM 信号幅度-频率曲线图



(b) LFM 回波模拟信号幅度-频率曲线图

图 3 LFM 信号目标回波重构模拟

Fig. 3 Reconstruction simulation of target echo of LFM signal

图 3 分别为 2 种信噪比下接收信号与发射信号的信号幅度-频率曲线图,从图中可以看出接收到的 LFM 信号的频率移为 25~30 kHz,回波模拟信号经过频移后的中心频率约为 24.91~29.91 kHz,多普勒频移量约为-0.09 kHz,与计算结果相符。

6 结束语

论文在主动声探测回波信号重构方案基础上对主动声探测回波信号重构技术展开验证。首先介绍了回波模型的建立,并验证了利用“波形存储重发法”可以实现对主动声探测回波信号进行多普勒频移模拟。其次,给出了重构回波的过程中时延的模拟方法,介绍了不同水下目标的目标强度参考值。最后通过对不同预设条件下主动声探测信号回波重构仿真,验证了该算法的可行性。

参考文献

[1] 刘威. 宽频带水下目标回波模拟技术研究[D]. 西

安:西北工业大学,2000.

[2] 王峰,赵俊渭,王澜. 高精度水下目标模拟与应答技术的研究[J]. 仪器仪表学报,2002,23(5):464-466.

[3] 王雅芬. 通用多功能水声信号处理系统及其应用[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[4] 马文翰. 移动水声 OFDM 通信系统多普勒效应估计补偿算法研究[D]. 厦门:厦门大学,2013.

[5] 张翔. 水声通信中多普勒频移补偿的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(5):1172-1174.

[6] 李金明. 声诱饵信号处理的研究与工程实现[D]. 西安:西北工业大学,2003.

[7] 明星,苑秉成,朱若寒. 一种水下目标回波模拟器的设计研究[J]. 舰船科学技术,2008,30(2):165-168.

[8] 郭继杰. 水声通信数字系统的仿真[J]. 海洋技术,2001,20(4):57-59.

[9] 刘伯胜,雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006.

[10] 王东霞,严胜利,许鹏. 宽频鱼雷自导目标回波模拟仿真[J]. 计算机仿真,2006,23(8):17-22.