

探测高速小目标的声纳信号波形设计*

杨崇林 姚 蓝

(上海船舶电子设备研究所, 上海 200025)

摘要: 针对用主动声纳探测水下高速运动的小目标存在的主要干扰: 海面、海底混响和接收信号的起伏, 讨论宜采用的声纳信号形式。在混响信道中, 对高多普勒目标采用加窗的长CW脉冲是合适的; 而根据多途信道中回波存在起伏的特点, 需要采用多频脉冲。最后给出了用于探测高速小目标的声纳最佳发射信号形式和频率编码方案。

关键词: 主动声纳; 波形设计; 混响; 多途

中图分类号: TB56 文献标识码: A

Sonar signal waveform design to detect a high speed small target

YANG Chong-lin, YAO Lan

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 200025)

Abstract: Because of the main interference while detecting a high-speed small target using an active sonar, the appropriate sonar signal waveform is discussed in this paper. It is proper to use windowed long CW pulses to restrain the reverberation from sea interfaces, and multi-frequency pulses must be adopted for there exists transmission fluctuation of sound signal in a multi-path channel. At last, a suitable sonar signal waveform and the frequency coding scheme are presented.

Key words: active sonar; waveform design; reverberation; multipath

1 引言

用主动声纳探测水下高速航行的小目标, 存在的主要难点在于目标尺度小而干扰背景很强。干扰背景主要包括界面混响和回波的起伏等。目标尺度小, 不仅使其反射本领小, 而且要求声纳采用高的工作频率以保证窄脉冲达到高的分辨率, 这同时限制了探测作用距离。存在的干扰中, 海面和海底的混响将目标回波淹没而难以检测到; 而由声波的多径传播、传播中介质的不均匀性、目标的高速运动以及虚源的干涉等引起的回波的起伏效应, 更使目标的检测变得困难。理论和经验

证明, 根据信道的特点合理选择发射信号的形式, 使之与信道相适配, 可抑制混响, 减小回波起伏的干扰, 提高对目标的检测能力。特别是对于这里讨论的高多普勒目标, 可以充分利用它的这个特点, 进行有效的信号设计, 达到从干扰背景中检测到回波的目的。

2 混响背景的信号选择

2.1 基本考虑

进行信号选择的最终目的是为了对信号进行有效检测, 我们从检测性能的分析入手。考虑检测指数 d , 对混响背景可表示为:^[1]

* 收稿日期: 98-12-04; 修订日期: 99-01-12

作者简介: 杨崇林(1971~), 男, 工程师

$$d^2 = \frac{E_r}{E_t \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{hh}(\omega, \tau) c(\tau - \tau_0) \frac{1}{2\pi} d\omega d\tau} \quad (1)$$

其中 E_r 表示接收信号的能量; E_t 表示发射信号的能量; $Q_{hh}(\omega, \tau)$ 是混响信道的散射函数; $c(\omega, \tau)$ 是信号的归一化模糊度函数。

从式(1)看出, 在混响信道中, 如果增大发射信号的能量, 尽管回波信号能量增加, 但混响背景也增强了, 目标检测性能并未提高。这时, 改善信号混响比的唯一措施是进行有效的信号设计, 使得信号的模糊度函数与混响信道的散射函数重叠部分越少, 对目标的检测性能越高。

2.2 常用的两种信号抗混响性能分析

考虑声纳中常用的两种信号 CW 和 LFM, 其模糊度函数分别为:

$$\Psi(\omega, \tau) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right)^2 \left\{ \text{sinc} \left[\frac{\omega T}{2} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \right] \right\}^2 \quad (2)$$

$$\Psi(\omega, \tau) = \left\{ \left(1 - \frac{\tau}{T}\right)^2 \text{sinc} \left[\left(\frac{\omega}{2} + \pi m \tau\right) (T - \tau) \right] \right\}^2 \quad (3)$$

式 2, 式 3 中的 sinc 函数(称抽样函数), $\text{sinc}(x) = (\sin x)/x$ 。

通常, 两种信号的模糊度函数与混响散射函数的重叠情况见图 1(a)。可见, LFM 信号的模糊度函数与混响信号的散射函数重叠较少, 适应于混响信道的信号形式。

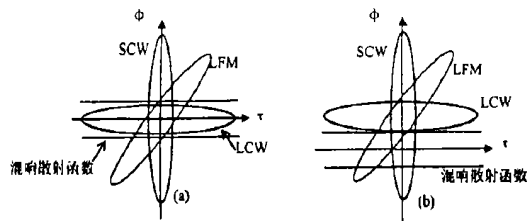


图 1 CW 和 LFM 信号的模糊度函数与混响散射函数的重叠

对于目标与声纳平台存在相对运动的情况, 两种信号的回波存在多普勒频移, 因此其模糊度函数中存在一个频移分量, 与混响信

道散射函数的重叠情况见图 1(b)。由图可见, 在这种情况下, LFM 信号和短 CW 信号的模糊度函数与混响信道散射函数的重叠还会保持一部分, 而若目标的回波的多普勒频移越高, 或 CW 信号的脉宽越长, 其模糊度函数与混响散射函数的重叠将几乎不存在。因此, 对探测高速运动目标的情况, 长 CW 脉冲是最合适的信号形式。

事实上, 窄带信号产生的混响的相关时间与信号脉宽相当, 宽带信号产生的混响的时间相关半径小, 因而容易将信号与混响分开。由于长 CW 信号的窄带特性, 可以通过窄带滤波将高多普勒目标的回波信号从混响背景中检测出来, 因此 CW 信号波形与检测高速目标相适应。LFM 信号的主要优点是产生的混响相关半径小, 信号与混响的模糊度函数的重叠少, 因此 LFM 信号与检测低速目标相适应。

2.3 对混响旁瓣的抑制

以上分析可知, 长 CW 信号的回波可以从频域上避开混响, 但还存在一个问题, 即高多普勒目标可能处在混响功率谱的高旁瓣区, 这时检测性能的提高并不明显。因为混响功率谱的旁瓣是由发射信号的功率谱决定的, 我们可以通过对发射信号加权(加窗), 即采用所谓钟形包络 CW 信号, 来抑制混响功率谱的旁瓣, 从而进一步提高检测性能。抑制旁瓣较好的窗函数有 Hanning 窗、Hamming 窗以及 Blackman 窗等。抑制旁瓣的代价是可能带来主瓣的展宽, 这将影响到对中等多普勒目标的检测, 但对高多普勒目标的检测还是有利。

3 声信号起伏的干扰

声信号起伏对目标的检测有很大影响, 它使得接收的回波信号时强时弱, 可能使声纳某时刻能看到目标, 另一时刻又丢失了目标。回波信号的起伏包括其振幅、相位和强度的起伏。引起信号起伏的原因主要有海水介

质的不均匀性、海面海底的不平整性以及多径传播引起的虚源干涉效应等, 这些因素决定了声信号传播的起伏有确定成分和随机成分。从干扰抑制的角度来讲, 可对其中的确定性部分的规律进行分析, 找到抑制起伏的有效办法。声波的镜象干涉起伏是引起回波起伏的主要因素之一, 特别是这里讨论的动目标具有很快的距离变化率, 声波干涉随距离的相长相消, 给回波检测带来了很大的不稳定性。这里我们主要讨论虚源干涉的影响。

3.1 声信号起伏的分析

理论分析表明, 在只考虑一次虚源的情况下, 直达声和反射声在接收点形成的总声强 $I^{[2]}$ 为:

$$I = \frac{A^2}{2\rho c r_1^2} (1 + V^2 - 2V \cos \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}) \quad (4)$$

式中 V 为海面反射系数, h_1 和 h_2 分别为接收换能器深度和声源深度, r 为声源和接收点之间的距离, r_1 为直达声线长度(也近似等于反射声线长度)。

由式(4)可见, 接收声信号的起伏与工作频率有很大关系, 也与换能器和声源布放的深度、距离有关。当换能器和声源的深度、距离一定时, 接收声强随工作频率的不同而变化, 见图 2。这里我们给出的是上式中 \cos 值的变化情况。其中, 取 $b = 4\pi h_1 h_2 / r$ 。

当取了某一个固定的频率, 接收声强随距离的起伏见图 3。其中, 图 3(a) 和(b) 分别表示在频率为 10.5kHz 和 15kHz 时的情况。

总之, 由于虚源的干涉, 声信号沿传播的距离上存在着起伏; 在某一固定的距离上, 又随着频率的变化成正弦规律起伏。所以, 就抗

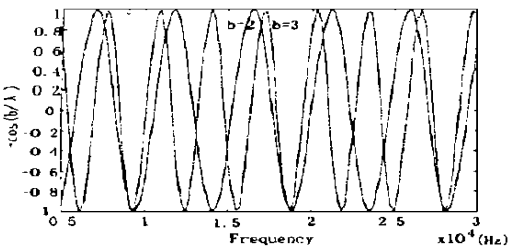
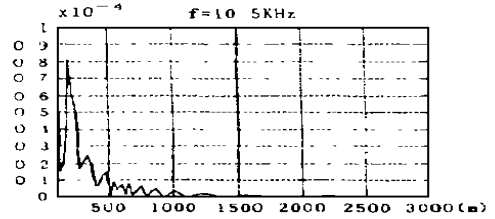
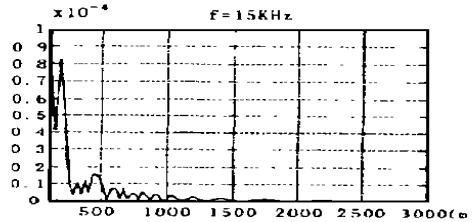


图 2 声信号起伏随工作频率的变化

回波起伏而言, 采用多频编码信号是有用的。不同频率信号的回波起伏不同, 从而目标的检测概率大大增加。



(a)



(b)

图 3 声信号起伏随距离的变化

3.2 抗声信号起伏的多频编码方案

对于固定目标或距离变化率较小的目标, 其回波的起伏随频率成正弦规律变化, 其周期基本不变, 因此我们在采取多频发射时, 取一个峰点频率, 一个谷点频率和一个零点频率, 接收端用三个通道, 经比较后去掉幅值最大和最小的两个, 保留中间值作为接收信号, 能有效抑制回波起伏的干扰。在鱼雷声自导系统中就有采用这种方法的。

对于目标距离变化率较快的目标, 情况变得复杂。因为随着距离的改变, 回波起伏随频率变化的周期也在改变, 无法像前一种情况准确地取到一个峰点、一个谷点和一个零点频率。这时我们不妨多取几个频率, 频率选取应遵循的第一个原则是, 这些频率所覆盖的频段应不小于对应最大作用距离的最大起伏周期的 $1/4$ 。这样才能保证所取的这些频率不会全部落在正弦周期的某一谷点附近, 造成所取频率的回波信号都很弱。

根据式(4)可以推算, 声信号起伏随频率变化的周期是:

$$T_f = \frac{c}{2h_1 h_2} r \quad (5)$$

如果取 N 个不同频率的脉冲, 频率的最大、最小值分别为 f_{max} 、 f_{min} , 则应该满足:

$$f_{max} - f_{min} = \frac{c}{2h_1 h_2} r_{max} \quad (6)$$

式中 r_{max} 对应最大探测作用距离。

频率选取应遵循的第二个原则^[3]是, 各脉冲经多普勒频移后的回波信号的频率应在其它脉冲引起的混响的频带之外(由于本舰运动, 也会有频移)。根据这个原则, 可按如下方法确定各脉冲频率:

设基阵以 V_A 速度运动, 目标运动速度为 V_C , 目标相对本舰的径向运动速度范围为 $-V_{min} \sim +V_{max}$, 根据下式确定发射脉冲的最低频率 f_{min} :

$$V_{min} = 2\lambda_0 / T \quad (7)$$

其中 λ_0 对应最低频率的波长, T 为脉冲宽度。 V_{min} 是声纳与目标相对运动速度绝对值的最小值。

通过式(8)、(9)以及声纳的工作频率范围来确定其它各脉冲频率 f_i :

$$(1 - 2V_{min}/c)(1 - 2V_A/c)f_{i+1} \\ (1 + 2V_A/c)(f_i + b/2) \quad (8)$$

$$(1 + 2V_{max}/c)(1 + 2V_A/c)f_i \\ (1 - 2V_A/c)(f_{i+1} - b/2) \quad (9)$$

式中 b 为各脉冲信号的带宽, c 为水中声速。

接收时对这些不同频率回波的处理, 需要采用多通道带通滤波, 各通道经过不同的延迟之后可以取中间值或累积。因这里讨论的是小尺度目标, 回波信号较弱, 宜采用累积后检波的处理方法。

3.3 一种声纳信号波形设计

通过以上分析, 我们得出结论, 适用于探测水下高速运动小目标的信号形式是多频发射加窗的长 CW 脉冲串。脉冲串中各频率的选择根据以上两个原则由式(6)~(9)确定。

比如, 我们试图在约 30m 的作用距离上探测一个高速运动的小目标, 声纳平台的运

动速度为 20 节, 目标运动速度为 50 节, 这样两者相对运动速度范围为 -70 节 $\sim +70$ 节。声纳的工作频率在 150kHz 附近。根据式(6)~(9)确定的原则, 我们取满足条件的 3 个频率: 135kHz、150kHz 和 165kHz。

声纳发射信号是一个由几个脉冲段组成的长脉冲, 每一脉冲段有 3 个子脉冲, 每个子脉冲对应以上 3 个频率中选取的一个频率。如每个子脉冲的脉宽取 3ms, 每个脉冲段长度 9ms, 如信号包含 5 个脉冲段, 则信号总长度为 45ms。这种设计的一种信号见图 4。

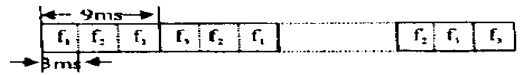


图 4 一种声纳信号波形设计

4 结 论

(1) 通过以上内容, 完成了对检测高速小目标的声纳信号形式的选择, 认为较合适的信号形式是多频发射加权的长 CW 脉冲串, 并给出了采用多频脉冲的频率编码方案。

(2) 对应的接收机应该是多通道带通滤波器, 每通道分别延迟后进行累积, 然后检波, 接收机通道数对应发射的不同频率的脉冲数。

(3) 对水下小尺度目标的探测一直是个难点, 对高多普勒目标, 采用本文提出的信号波形设计方法, 将使检测性能有很大提高。但它要求换能器有足够的带宽。

参考文献:

- [1] 肖国有, 屠庆平. 声信号处理及其应用[M]. 西北工业大学出版社, 1994.
- [2] 苑秉成. 抗声信号起伏的有效方法[J]. 鱼雷技术, 1998(3).
- [3] Y. Doisy. Process for frequency diversity detection of an underwater target [P]. France Patent, WO93/16398.