

一个解决声纳系统同频干扰的新思路

刘贯领[†] 沈文苗

(杭州应用声学研究所 杭州 310012)

摘要 多平台联合作战将是未来海上作战的重要形式之一,多部主动声纳的同时存在使声兼容问题十分突出。由于友舰直达波经历的是单程传播,其强度往往比经历了双程传播的目标回波大的多。通过波形设计可以获得相关系数小的声纳波形,虽然可以从一定程度上缓解声兼容问题,但由于获得的增益有限,并不能从根本上解决这一问题。本文通过对常规检测器的修正,引入能量归一化的概念,有效地消除了能量对检测器的影响,从而解决了这一问题。同时本文还提出了与现有声纳信号处理体系相兼容的频域实现方法,使该算法在工程上的实现成为可能。计算机仿真证明,这一方法是正确有效的。

关键词 主动声纳, 声兼容, 直达波, 波形设计, 能量归一化

A Novel method to cope with the acoustic compatibility problem

LIU Guan-Ling SHEN Wen-Miao

(Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou 310012)

Abstract Joint operation of multiple platforms is an importance in naval warfare, which makes the acoustic compatibility a problem that must be seriously considered and carefully resolved. Due to the fact that the direct blast of the same frequency from friendly vessels undergoes one-way propagation transmission loss, its strength is much greater than that of the true target echoes which suffer from two-way propagation. Signals with relatively small correlations can be acquired through waveform design technique, but the obtained gains are limited, and cannot resolve the acoustic problems entirely. In this paper, an energy normalized new detector is proposed to eliminate the effect of the signal energy. At the same time, an implementation scheme compatible with the present sonar signal processing system is proposed, which facilitates the practical engineering realization of the algorithm. Computer simulation proves the validity of the proposed method.

Key words Active sonar, Acoustic compatibility, Direct blast, Waveform design, Energy normalization

2008-03-27 收稿; 2008-11-24 定稿

作者简介: 刘贯领(1978-), 男, 河南禹州人, 博士, 工程师, 研究方向: 声纳总体技术、波形设计和抗混响检测等。

沈文苗(1969-), 男, 研究员, 声纳系统总设计师。

[†] 通信联系人 E-mail: hnxclgl@163.com

1 引言

随着水声技术的发展和未来海战的需要,多平台联合反潜将成为未来海上作战的重要形式之一。这样,在同一水域将不可避免地存在多部主动声纳,而与此同时,由于水声信号的实际可用频率带宽非常有限,声兼容问题,即解决不同声纳设备之间的同频干扰问题是所有声纳系统设计人员必须要认真面对的问题。

友舰直达波与目标回波的最大不同在于传播路径的不同,即目标回波是双程,传播损失相应的是双程传播损失,而直达波则是单程传播损失,这一现象的直接后果是直达波的强度比目标回波大得多,它通过检测器的输出也将比目标回波强很多,可能淹没真实目标,从而导致漏报和友舰误伤。

我们认为,现在和在可以预见的未来,匹配滤波/相关处理是主动声纳最基本、最重要的处理方法,对声兼容问题的分析和研究,也必须以匹配滤波/相关处理为出发点和落脚点。

当信号经过匹配滤波器时,如果其输出能较大,主要原因是如下两个之一:

(1) 该信号与发射信号有比较强的相关性;

(2) 该段信号与发射信号相关性很小,但能量很大。

本文的主旨,就是从这两方面入手,研究声兼容问题。本文其它部分的安排如下:第二节回顾了基于互模糊度函数的波形设计,介绍了几类可以产生大量互相关系数很小的波形类型;在第三节,本文提出了一个可以有效消除能量因素影响的检测器;第四节是计算机仿真部分,通过仿真分析,验证本文提出方法的有效性;第五节是全文的总结。

2 基于互模糊度函数的波形设计与声兼容问题

信号的模糊度函数反映了信号的速度、距离分辨力、多普勒容限等重要信息,是传统单

平台主动声纳波形设计过程中最为重要的数学分析工具。对模糊度函数进行推广,可得到信号的互模糊度函数,对宽带信号,它的定义为:

$$\chi(\eta, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) s^*(\eta(t - \tau)) dt \right|^2 \quad (1)$$

其中, η 和 τ 分别是由目标相对运动引起的信号时间伸缩和时延。对于窄带信号,时间伸缩可以忽略不计,相对运动的影响主要体现在频移上,即:

$$\chi(\tau, f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) s^*(t - \tau) e^{-j2\pi f t} dt \right|^2 \quad (2)$$

信号的互模糊度函数,主要反映信号间的抗干扰能力,互模糊度函数越小,两个信号的相互干扰也越小。通过改变信号的调制或编码方式,可以获得抗干扰能力强的信号族。

下面是一些常用信号的抗干扰能力分析

2.1 线性和双曲调频信号

这是最为常见的调频信号,尤其是双曲调频信号,由于它的多普勒容限大在工程上得到了广泛的应用。它的一种表达形式为:

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi b \ln(1 + bt/P_1)) \quad 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

其中 $b = (f_1 - f_2)/(f_1 f_2 T)$, $P_1 = 1/f_1$;

对于同频带的线性(双曲)调频信号,只能产生两个抗干扰能力强的信号,即正调频信号和负调频信号。在频带一定时,脉宽每增大一倍,互相关系数下降约 3dB;而在脉宽一定时,带宽越大,互相关系数越小,但下降的幅度逐步降低。

2.2 Costas 信号

Costas 信号^[3]是一种由多个不同频率的单频信号构成的跳频信号,它的解析表达式为:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t - k\Delta T) \quad 0 \leq t \leq T$$

(4)

这些单频信号的频率由 Costas 序列确定,第 k 个单频信号的频率为:

$$f_k = (f_0 - \frac{B}{2}) + (c_k - 1) \frac{B}{N - 1}$$

(5)

其中, f_0 、 B 、 N 和 c_k 分别为信号的中心频率、带宽、子脉冲个数和 Costas 序列的第 k 个值。不同 Costas 序列产生的信号具有良好的互相关性能。

2.3 PRN 信号

伪随机 (PRN) 信号^[2] 是相位取值为 0 和 π 的单频信号构成的调相信号,具体的取值由 m 序列控制。由满足优选对的两个 m 序列,通过模 2 相加的方法可以产生 $2^p + 1$ (p 为移位寄存器的级数) 个互相关系数很小的序列,即 Gold 码序列。当需要的主动声纳波形很多时,Gold 码信号是不错的选择。

2.4 QCC 信号

二次同余 (QCC) 信号^[6] 同样是一种跳频信号,其单频子脉冲的频率由 QCC 序列控制,即:

$$f_k = f_0 + q_k \frac{B}{N}$$

$$q_k = [m \frac{k(k + 1)}{2}]_{\text{mod} N} \quad 0 \leq k \leq N - 1$$

(6)

其中 N 为奇数,整数 m 的取值范围为 $1 \leq m \leq N - 1$, mod 为取模运算。这样,就可以产生 $N - 1$ 个信号,它们之间的抗相互干扰能十分优越。

与 Costas 信号相比,QCC 信号的产生十分简单,且可以产生的信号个数也更多。比如长度为 $N = 11$ 的 Costas 序列只有 4 组^[3],而 $N = 11$ 的 QCC 序列则有 10 组。但 QCC 信号有一个很大的缺点,那就是它没有充分利用信号的带宽。比如,如果设计信号的带宽 $B = 500\text{Hz}$, $N = 5$,则由 $k = 1, 2, 3, 4$ 产生的 4 组

QCC 信号的实际带宽分别为 300Hz、200Hz、400Hz 和 400Hz,均小于设计带宽 500Hz。虽然对信号的声兼容性没有影响,但将导致信号的抗混响能力降低。表 1 是几种信号的实测互模糊度值。表中: HFM、SFM、Costas 和 PRN2 信号的带宽为 1000Hz,脉宽为 0.5s,中心频率为 3000Hz; Costas 信号的由五个单频信号构成,其频率依次分别为 3000Hz、2800Hz、3200Hz、3400Hz 以及 3600Hz,而 PRN1 信号的带宽则为 500Hz。

表 1 不同信号的互模糊度函数的最大值
(设信号自模糊度函数的最大值为 0dB)

	HFM ⁺	Costas	PRN1	PRN2
HFM ⁺	-0.2798	-18.8239	-18.5477	-19.4449
HFM ⁻	-24.5977	-20.1578	-17.9582	-17.5688
Costas	-19.1880	-1.5517	-16.1375	-18.7484
PRN1	-17.2593	-17.6546	-0.3401	-16.3460
PRN2	-17.8422	-19.4123	-14.6848	-1.5351

3 检测器与声兼容问题

3.1 问题说明

从上面讨论可知,通过合理选择信号的调制规律和编码方式,可以获得足够多满足要求的主动声纳发射信号。但由于友舰直达波的能量比目标回波能量大得多,仅仅通过波形设计并不能完全解决声兼容问题,下面通过一个简单的例子说明这个问题。假设除了发射信号外,本舰和友舰其它声纳参数完全相同,如果距离本舰 8km 的地方有一个目标,而友舰与本舰的距离为 20km。传播损失利用下面的经验公式进行估计^[4]:

$$TL = 60 + 18.6 \log_{10} R + \alpha R$$

(7)

其中 R 表示接收点与声源之间的距离,单位为 km, α 为 Thorp 吸收系数,即:

$$\alpha = \frac{0.102f^2}{1 + f^2} + \frac{40.7f^2}{4100 + f^2} + 3.06 \times 10^{-4} f^2$$

(8)

式中 f 为信号的中心频率, 单位为 kHz。如果发射信号的中心频率为 3000Hz, 代入公示 (8), 得到 Thorp 吸收系数为 0.1831dB/km, 则目标回波所经历的传播损失为:

$$TL_{\text{echo}} = 2(60 + 18.6 \times \log_{10}(8) + 0.3005 \times 8) = 156.52\text{dB}$$

友舰直达波的传播损失则为:

$$TL_{\text{direct}} = 60 + 18.6 \times \log_{10}(20) + 0.3005 \times 20 = 87.86\text{dB}$$

因此, 接收机段直达波的功率将比目标的功率高 68.66dB, 而波形设计的增益一般在十几、二十几分贝左右, 波形设计并不能从根本上解决问题。

3.2 能量归一化检测器及其实现算法

本文提出在获得波形设计声兼容增益的基础上, 剔除能量对检测器的影响, 即可突出直达波与目标回波的本质区别——与本舰发射信号的相关性差。对于与发射信号等长的接收信号 $\{x(k), k = 1, 2, \dots, N\}$, 本文提出如下的检验统计量的计算方法:

$$L_i(f_d) = \frac{\left\| \sum_{k=1}^N s_{f_d}^*(k) x(k) \right\| / \sum_{k=1}^N \|s_{f_d}(k)\|^2}{(1/2N) \sum_{k=1}^N \|x(k)\|^2} \quad (9)$$

其中, f_d 是由目标-接收机相对运动引起的多普勒频移, s_{f_d} 为频移为 f_d 的拷贝信号。该检测器与普通相关检测器的主要区别在于用接收信号的能量对相关结果进行了归一化处理, 从而消除能量的影响。

从 (9) 式看出, 该检测方法在时域上实现时需要逐点向前推进, 这必然导致计算量的急剧膨胀, 尤其是在信号多普勒容限小而需要多个拷贝信号的情况下问题将更为突出, 从而不利于其在工程上的实现。

为此, 本文提出对常规匹配滤波频域实现方法进行简单的修改, 从而实现在不改变现有声纳信号处理体系结构的情况下, 以很小的计

算量增加实现能量归一化检测。

假设 $x\{i\}$ 为经过降采样处理后的任一路波束域输出, 本文提出的实现方法步骤如下:

步骤 1: 对检测器的输入数据分段, 每块数据的长度至少为发射信号长度 L (降采样后) 的 2 倍, 且相邻两个数据段之间要有一定的重叠 (如 50%); 记为 $\{x(i), i = 1, 2, \dots, 2L\}$ 。

步骤 2: 对本段数据做如下处理:

(1) 做与本段数据长度相同的 FFT, 记为 $\{X(i), i = 1, 2, \dots, 2L\}$ 。

(2) 做发射信号的 FFT, 长度为 $2L$, 并求其共轭, 记为 $\{S(i), i = 1, 2, \dots, 2L\}$;

(3) X 与 S 点乘, 求 IFFT, 记为 R , 即:

$$R = \text{IFFT}(R \odot X) \quad (10)$$

取前半段, 记为 $\{R(i), i = 1, 2, \dots, L\}$;

(4) 求能量归一化系数, 方法如下:

$$C(1) = \sum_{m=1}^L |x_m|^2$$

For $k = 2 : L$

$$C(k) = C(k-1) - |x_{k-1}|^2 + |x_{k-1+L}|^2$$

End

步骤 3: 利用 C 的平方根对 R 进行归一化处理, 得到本段处理的最终输出, 即:

$$\text{Out}(k) = R(k) / \sqrt{C(k)} \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

对于因多发射信号多普勒容限小而采用多个拷贝信号的情况, 可比照上述实现方法处理。

4 仿真结果与分析

下面我们通过计算机仿真验证上面方法的正确性。这里仍然采用 3.1 中的参数设置, 本舰和友舰发射信号分别为 1s 的正、负调频 HFM 信号。假设背景噪声为均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声, 在此基础上以及 -20dB 的信噪比加入目标回波信号, 则回波信号的幅值为:

$$A_{echo} = \sqrt{2 * 10^{(snr/10)}}$$
$$= 0.1414$$

(12)

根据目标回波和直达波之间的传播损失差,可以计算得到直达波的幅值:

$$A_{direct} = A_{echo} * A^{(TL_{direct}-TL_{echo})/20}$$
$$= 241.9285$$

(13)

设模拟信号的长度为 20s,将目标回波和直达波干扰分别放在 14s 和 8s 处。则经过限波(假设范围为[-20,20])后的时域信号波形见图 1。

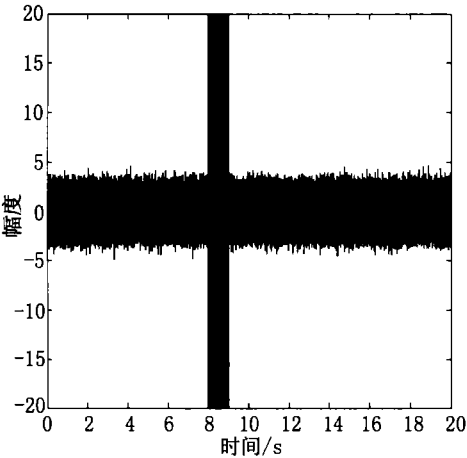


图 1 模拟接收信号的时域波形

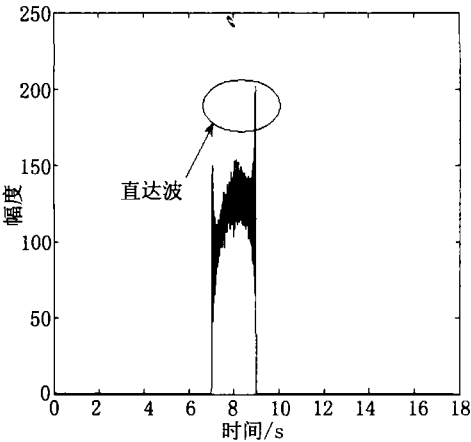


图 2 常规的相关检测器输出

图 2 为常规相关检测器的输出。可以看出,尽管受到限波的影响,直达波干扰由于能量过大,仍将掩埋目标回波。

图 3 为本文检测器的输出结果。从图 3 可以看出,本文提出的方法可以检测到回波信号,这是因为它有效地消除直达波能量对检测带来的不利影响,突出了本舰发射波形和直达波波形的本质差别。

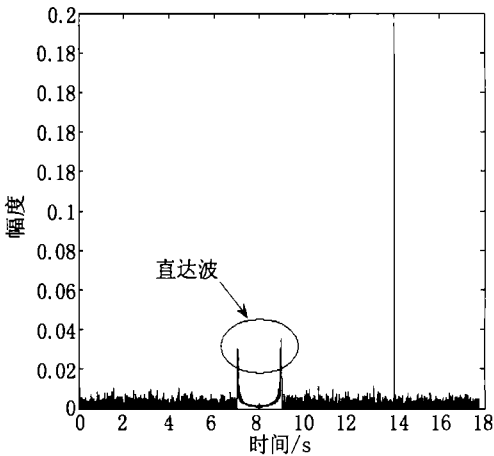


图 3 本文检测器输出

当然,直达波仍然在检测器的输出端有所反映,可以联合其它方法(如空间处理等)进行处理。本文仿真考虑的是非常不利的情况,即目标回波和直达波在同一方向,而在一般情况下,目标回波和直达波不会在同一方向出现,这样就可以利用 MVDR 波束形成技术,在直达波方向形成凹点;同时,由于直达波在检测器输出端成对出现,并且其出现位置与友舰的发射周期直接相关,从而导致其出现位置是飘忽的,这与目标回波出现位置相对固定有很大的不同,该特征可以作为判断某个亮点是直达波干扰还是目标回波依据。

5 结论

声兼容问题是多部主动声纳同时工作时必须要解决的问题,也是它们能够正常工作的

前提和基础。本文从波形设计和检测器设计两个方面出发,提出了一种解决该问题的技术途径。仿真表明该方法是正确有效的。

参 考 文 献

[1] 刘贯领. 浅海主动声纳波形设计和抗混响检测技术研究 [D]. 中国舰船研究院博士论文. 2007.
[2] 沈允春. 扩频技术. 北京:国防工业出版社,1995.
[3] Costas, J. P. A Study of a Class of Detection Waveforms Having Nearly Ideal Range-Doppler Ambiguity Properties',

Proc. IEEE, 1984, 72(8): 996 - 1009.
[4] Laurent Pelissaro, Christian Audoly. Bi-Static Detection Using USV - Influence of Propagation Conditions. UDT Europe. 2007. 11D.2.
[5] Arzellies P. Acoustic Compatibility between equipment aboard the new research vessel thalassa II[C]. Oceans Engineering for Today's Technology and Preservation Proceeding, 1994:344 - 349.
[6] Sean Pecknold. Ambiguity and Cross-ambiguity Properties of Some Reverberation Suppressing Waveforms. Technical Memorandum, 2002 - 129, Defence R&D Canada-Atlantic, 2002.