

混响背景下基于 MTI 技术的目标检测

许江湖, 张明敏

(海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 研究了一种基于 MTI 技术的水下目标检测方法。该方法无需混响干扰的先验知识, 利用 MTI 技术在线性估计并及时跟踪混响功率谱的变化, 通过归一化匹配滤波器检测水下目标的回波。仿真数据和实验数据的处理结果验证了本方法的有效性, 在信混比较低的情况下检测器仍具有很好的检测性能。

关键词: 运动目标显示技术; 水下目标检测; 归一化匹配滤波器

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630-(2005)03-0157-03

Target detection in the presence of reverberation based on MTI technique

XU Jiang-hu, ZHANG Ming-min

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: An underwater target detection method is studied based on the MTI technique. With this method, changes in reverberation spectrum can be tracked in real time and estimated online without any prior knowledge. Validity of the method is tested with both simulation results and real data.

Key words: MTI technique; underwater target detection; normalized matched filter

1 引 言

对主动声纳而言, 混响是一种严重而又特殊的干扰。这主要是由于混响和目标回波具有很强的相关性。用常规方法设计的固定滤波器不能有效地用于混响抵消。而自适应滤波技术由于可以根据输入数据的统计特征的变化调整其参数, 能够比较好地用于混响抵消。文献[1]提出使用自适应抵消器来抵消混响, 该抵消器的基本输入由波束的主瓣接收到的信号构成, 而参考输入由旁瓣接收到的信号构成。但如果参考输入中含有目标回波成分, 自适应抵消器的性能将大大降低。其他的方法还有预测误差自适应滤波器^[2], 然而当自适应滤波器采用比较大的收敛参数时, 有可能在去掉混响信号的同时, 也去掉了目标回波; 当自适应滤波器采用较小的收敛参数

时, 则有可能跟踪不上混响信号功率谱的变化。

本文研究了在混响背景下利用 MTI(moving target indicator, 运动目标显示)技术对水下目标的检测方法。研究表明, 利用 MTI 技术能在线估计并及时跟踪混响功率谱的变化, 实现对混响的抑制, 通过归一化匹配滤波器可完成对水下目标回波的检测。对仿真数据和实验数据的处理验证了该方法的有效性。

2 MTI 技术

MTI技术的核心是寻求线性滤波器(一般是 FIR, 这里设冲激响应长度为 N)的权值的最优解 \hat{W} , 用以实现对干扰的抑制以及有可能实现的目标回波加强。根据不同的目标模型假设, 它有不同的解决方法^[2]。

当具有目标回波的幅值和多卜勒频移的先验知识时, 权值的最优解为:

$$\hat{W} = M^{-1} \cdot S^* \quad (1)$$

这里, S 为目标回波的 N 维向量, $*$ 表示复共轭, M

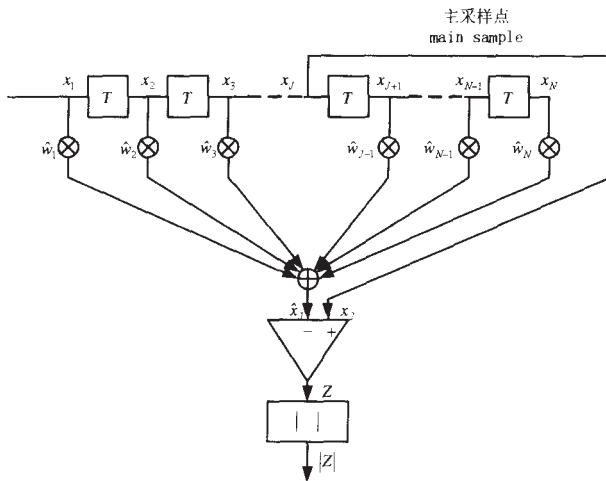


图1 基于线性预测理论的MTI处理器

Fig.1 MTI processor based on linear prediction theory

为干扰的 $N \times N$ 相关矩阵。

当假设当前接收信号中没有目标回波时,MTI技术利用线性预测理论实现对干扰的抑制。在这个框架下,将 N 维权值向量 \mathbf{W}_N 中一个分量(记为 w_j)设为1,而剩下的 $N-1$ 个分量(即 $w_i, i=1, 2, \dots, J-1, J+1, \dots, N$)通过最小化式(2)的干扰残差的均方值得到:

$$P_z = E\{|Z|^2\} = E\{|x_J - \hat{x}_J|^2\} = E\left\{ \left| x_J - \sum_{i=1}^N \hat{w}_i x_i \right|^2 \right\} \quad (2)$$

图1是作用在 N 个采样点 x_1, x_2, \dots, x_N 的MTI处理器的方框图。该处理器通过合适的权值 $\mathbf{W}_{N-1} = (w_1, w_2, \dots, w_{j-1}, w_{j+1}, \dots, w_N)'$ 得到 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{j-1}, x_{j+2}, \dots, x_N)'$ 的线性组合,并把其结果作为 x_j 的线性估计值 \hat{x}_j 。再通过从 x_j 中减去 \hat{x}_j 实现对干扰的抑制。 x_j 称为主采样点,通常令 $J=N$,当然也可以将 x_j 设在中间,即令 $J \neq N$ 。文献[2]已经验证,主采样点的位置对MTI的性能影响不大。权值 \mathbf{W}_{N-1} 按如下公式计算:

$$\hat{\mathbf{W}}_{N-1} = \mathbf{M}_d^{-1} \cdot \mathbf{R} \quad (3)$$

其中, \mathbf{M}_d 为 \mathbf{X} 的 $((N-1) \times (N-1))$ 相关矩阵,也是 $N \times N$ 相关矩阵 \mathbf{M} 抽掉第 J 行和第 R 列后的简约形式,为主采样点 x_j 和向量 \mathbf{X} 的互相关向量。

3 基于MTI的目标检测方法

水声中的目标检测问题可以描述为需判决的两种假设:

$$\begin{cases} H_0 : x(t) = n(t) + b(t) \\ H_1 : x(t) = s(t) + n(t) + b(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中 H_0 表示没有目标回波, H_1 表示存在目标回波, n 为混响, b 为环境白噪声, s 是目标回波。已知发射信

号为 e , 其脉长为 T 。目标回波相对于发射信号有一个延时 τ , 一个多卜勒频移 f_D 和一个幅度衰减 A , 则:

$$s(t; A, \tau, f_D) = Ae(t-\tau) \exp(2i\pi f_D t) \quad (5)$$

由于对混响和目标回波的多卜勒频移一般都是事先未知的, 因此不能使用式(1)对目标进行检测, 同样也不能直接使用式(3)。我们只能寻求一种次优的方法, 用有限的实时数据估计 \mathbf{M}_d 。为此, 先作一假设: 混响是局部平稳的, 即混响在某个比较短的时间间隔内是平稳的, 同时混响的功率谱变化是缓慢的。该假设的合理性已在文献[3]中得到了验证。

在这一假设下, 最简单的检测方法是将接收信号分割成等长度的数据块, 其长度为发射信号的长度。在每个数据块内, 混响是平稳的, 而且紧邻的前后两个数据块内的混响的功率谱变化不大, 因此可以把在前一数据块(假定在该数据块内没检测出目标回波)内估计的 \mathbf{M}_d 和 \mathbf{R} 用于后一数据块, 根据式(3)来计算权值向量 $\hat{\mathbf{W}}_{N-1}$, 再利用此权值向量 $\hat{\mathbf{W}}_{N-1}$ 对该数据块进行滤波, 滤波结果为 $x_j - \hat{\mathbf{W}}_{N-1}^H \mathbf{X}$, 最后经过一个归一化匹配滤波器处理后, 进行有无目标的判决, 依次递推。然而, 当目标回波没有正好包括在一个数据块内, 而是横跨两个数据块时, 位于前一块的目标回波将会抵消掉后一块的目标回波, 从而降低目标检测性能。

为解决这一问题, 可以采用一个移动窗口, 该窗口的长度为两倍发射信号长度。在窗口内, 数据平分两部分, 前一部分用于 \mathbf{M}_d 和 \mathbf{R} 的估计并计算权值向量 $\hat{\mathbf{W}}_{N-1}$, 再对后一部分进行滤波。最后将滤波后的数据通过归一化匹配滤波器。需要注意的是, 由于后半部分的数据长度和归一化匹配滤波器的冲激响应的长度都是发射信号长度, 因此这时归一化匹配滤波器的输出只有一个值。一个窗口内的数据处理完后, 将窗口向前滑动 d 个采样点 (d 根据具体情况事先设定), 由此也可看出, 归一化匹配滤波器每隔 $d-1$ 个采样点输出一个结果进行判决。

4 归一化匹配滤波器(normalized matched filter, NMF)

考虑到混响的非平稳性, 它的功率是时变的, 这里使用归一化匹配滤波器(NMF)^[4]来实现目标回波检测功能。NMF在 $t(t \geq K)$ 时刻的输出为:

$$L(t, f_D) = \frac{\left| \sum_{k=1}^K s^*(k, f_D) x(t - K + k) \right|^2}{(1/2K) \sum_{k=1}^K |x(t - K + k)|^2} \quad (6)$$

这里 K 为发射信号的长度, $s(k, f_D)$ 为 k 时刻、多普勒频移为 f_D 的目标回波, $x(t)$ 为接收信号。在每个 t 时刻, 根据不同的多卜勒频移 $f_D = n \Delta f$ (Δf 为估计 f_D 的采样率), 计算不同的 $L(t, f_D)$, 取其中的最大值作为

该时刻的输出。

5 处理结果

为了验证本文提出的检测方法的有效性, 我们对两组数据进行了处理。首先将一段假设的目标回波加入到一组水池池底混响实验数据中, 作为仿真的接收信号, 图 2 是其时间波形图。实验水池的深度为

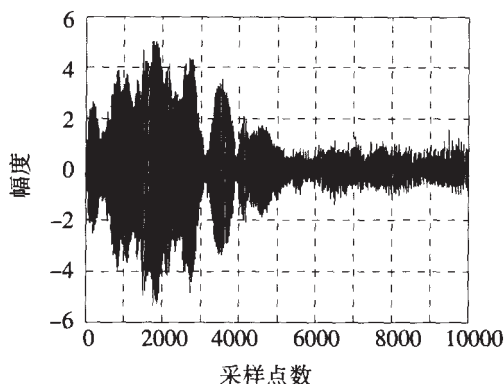


图 2 混响加目标回波波形图
Fig.2 Waveforms of reverberation plus target echo

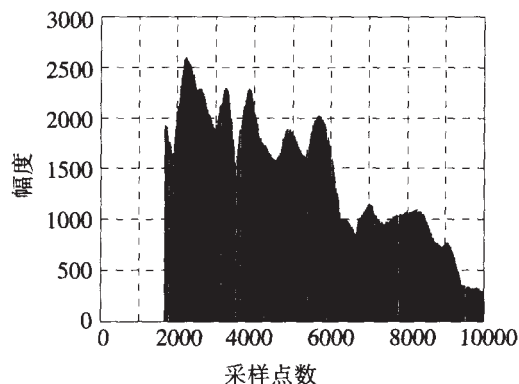


图 3 未经 MTI 处理时 NMF 的输出
Fig.3 Output of NMF without processing of MTI

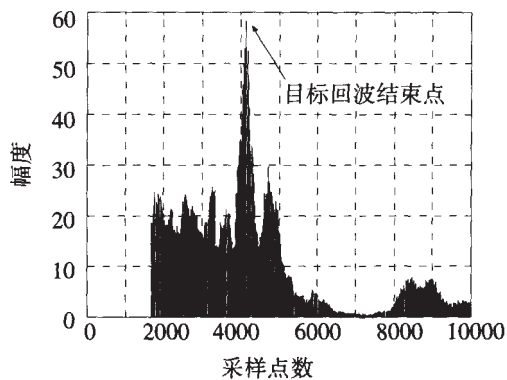


图 4 MTI 处理后 NMF 的输出
Fig.4 Output of NMF after processing of MTI

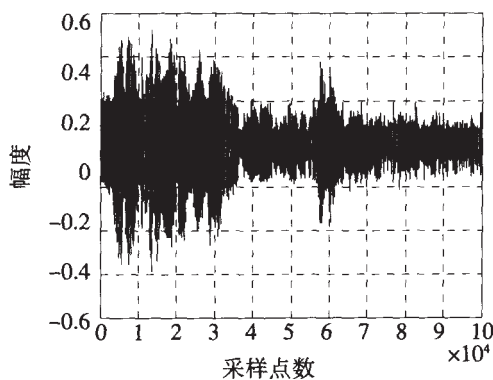


图 5 包含目标回波时的实验数据
Fig.5 Real reverberation including target echo

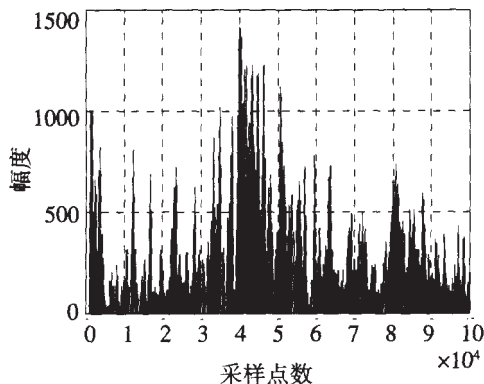


图 6 未经 MTI 处理时 NMF 的输出
Fig.6 Output of NMF without processing of MTI

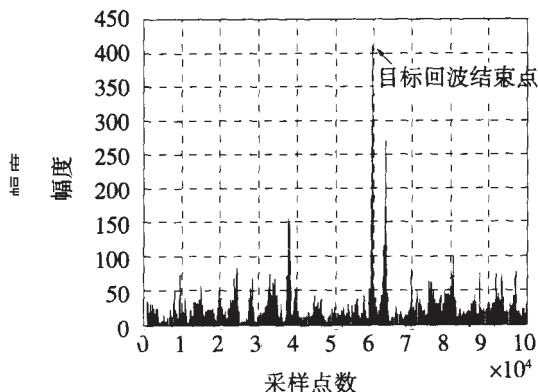


图 7 MTI 处理后 NMF 的输出
Fig.7 Output of NMF after processing of MTI

表1 深度15m处的潜艇自噪声(相对值)

Table 1 Self-noise of submarine at 15 (relative value)

潜艇速度 / kn	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	15.0	20.0
自噪声 / dB	0	1.2	2.1	3.3	5.6	8.4	11.5	14.0

传播损失变化量分别为:

$$\Delta E = -2.0 - (5.0) = 3.0 \text{ dB}$$

$$\Delta TL = 81.0 - 77.6 = 3.4 \text{ dB}$$

由式(7)可知,声纳得以继续跟踪该目标的条件应为:

$$3.0 \geq 3.4 + [NL(V) - 1.8]$$

求解该式得:

$$NL(V) \leq 1.4 \text{ dB}$$

查上表而得 $V \leq 4.4 \text{ (kn)}$ 。

可见,深度变化后的潜艇若将航速保持为小于或等于 4.4kn,就可以继续跟踪原目标。

6 讨 论

(1)预报方法所需的信噪比和自噪声参数均可实时或预先在本艇上测得,而与目标的声特性无关。因此,跟踪条件的预报精度,将主要取决于声传播预

(上接第 159 页)

0.7m,宽度为 2.5m,长度为 25m。沙底质,厚度为 0.4m。产生该混响数据的信号为正弦填充脉冲,频率为 $6 \times 10^5 \text{ Hz}$,脉宽为 0.6667ms,发射波束的垂直束宽为 30° ,水平束宽为 3° ,接收数据的采样率为 $2.5 \times 10^6 \text{ Hz}$ 。仿真的目标回波信号共有 1668 个采样点,加入的目标回波具有 3000Hz 的多卜勒频移,相当于 3.75m/s 的运动速度。仿真的目标回波加在混响信号第 2504 和 4172 采样点之间,信混比为 -2.4dB。计算中, $N=15$,滑动步长 $d=10$ 。图 3 是未经 MTI 处理时,NMF 的输出,从图上可以看出,目标回波的峰值没有突显出来,检测器不可能检测出目标。而图 4 是经过 MTI 处理后 NMF 的输出,从图上可以看出,目标回波的峰值已经突显出来,检测器可以很容易地检测出目标信号。

图 5 是某声纳海上实际接收的一段含有目标回波的听音信号,发射信号的频率为 25KHz,脉宽 25ms。和图 2 情况相似,混响在接收信号中占有主要的地位,目标回波大约出现在第 57000 到 59000 个样本点之间。图 6 是未经 MTI 处理时,NMF 的输出,从图上可以看出,目标回波的峰值完全被掩盖了,无法检测。图 7 是经过 MTI 处理后 NMF 的输出,可以看出同图 4 一样,目标回波的峰值已经突显出来,检测器可以很容易检测出目标。

报模型的精度。

(2)当距离为未知时,由于传播损失的深度分布和距离有关,所以,对距离的估计误差将直接影响跟踪条件的预报精度。有鉴于此,为了确保潜艇变深后能继续跟踪,应将目标距离估算得稍远些。

参 考 文 献

- [1] 尤立克.水声原理[M].哈尔滨船舶工程学院出版社,1990. Urick. Principle of underwater sound[M]. Ha'erbin Ship Engineering Academy Press, 1990.
- [2] 汪德昭.水声学[M].科学出版社,1981. Wang Dezha. Underwater Acoustics[M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [3] 宋志杰.潜艇最高跟踪速度的估算[J].潜艇学术研究, 1997, 1(2):13-16. SONG Zhijie. The estimation of highest submarine speed to track[J]. Submarine Academic Research, 1997, 1(2):13-16.
- [4] 张仁和.浅海中的平滑平均声场[J].声学学报,1981, 3(4):535-544. ZHANG Renghe. Smooth-averaged sound field[J]. ACTA ACOUSTIA, 1981, 3(4):535-544.

6 结 束 语

本文研究的基于 MTI 技术的水下目标回波检测方法,属于一种次优方法,不需要混响干扰的先验知识,利用混响局部平稳的假设进行实时估计。计算机处理结果显示,在信混比较低的情况下检测器仍具有很好的检测性能。

参 考 文 献

- [1] Manuel Aineto, Stuart Lawson, Narrowband signal detection in a reverberation-limited environment [A]. Oceans '97[C]. MTS/IEEE Proceedings, 1997: 27-32.
- [2] Farina A, Protopapa A. New result on linear prediction for clutter cancellation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(3): 275-285.
- [3] Carmillet V, Amblard P-O, Jourdain G. Detection of phase- or frequency-modulated signals in reverberation noise [J]. J Acoust Soc Amer, 1999, 105(6):3375-3389.
- [4] Ginolhac G, Jourdain G. Principal Component Inverse algorithm for detection in the presence of reverberation [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2):310-321.