

声纳输出的弱目标信息提取方法仿真分析

唐建生, 江向东, 潘悦, 皇甫立

(船舶工业集团公司船舶系统工程部, 北京 100036)

摘要: 针对存在艇外平台强干扰的情况, 对波束域 MVDR(b-MVDR)和后置波束形成干扰抵消器(PIC)的弱目标提取能力进行了仿真分析。考虑到艇外平台与目标往往处于同一波束的实际情况, 提出首先采用密集波束形成, 再进行弱目标提取的方法。仿真结果表明: 对艇外平台与目标处于同一波束的情况, PIC 的目标分辨能力更强; 在干扰较强时, PIC 方法表现出更强的弱目标提取能力, 但随信干比的增加其能力不断降低; 而 b-MVDR 方法则在各种信干比下均具有良好的性能。

关键词: 弱目标提取; 仿真分析; 声纳输出

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-01-0037-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.01.008

Simulative analysis of extracting weak target information from sonar outputs

TANG Jian-sheng, JIANG Xiang-dong, PAN Yue, HUANG Fu-li

(Systems Engineering Research Institute, Beijing 100036, China)

Abstract: In many cases the outside-ship-platform becomes strongly jammed, which makes the ship's sonar hard to detect weak targets. Two methods for extracting weak target information from sonar outputs, the beamspace MVDR (b-MVDR) and the post-beamformer interference canceller (PIC), are analyzed through computer simulations. And simulation results show that the PIC has the improved resolution performance over the b-MVDR, but the PIC's capability to extract weak target decreases as the signal-to-interference ratio (SIR) increases. However the b-MVDR has better performance in all situations.

Key words: extracting weak target; simulation analysis; sonar outputs

1 引言

在实际中, 距离舰艇较近的其它平台(如友艇、商船等)往往成为舰艇声纳探测的强干扰。考虑舰艇探测远距离目标, 假定目标与艇外平台声源级相同, 目标距舰艇 30km, 艇外平台距舰艇 5km, 仅考虑球面扩展损失, 此时舰艇声纳处的目标与艇外平台的信号能量比高达-15dB。显然如此强的干扰信号将遮蔽远距离目标, 严重影响声纳的探测性能。

研究利用现有声纳的输出信息抵消强干扰、提取弱目标, 将是在保持现有声纳体制的前提下消除艇外平台干扰的简单易行的手段。本文的研究主要针对存在单个艇外强干扰的情况, 对波束域 MVDR (b-MVDR)^[1,2]和后置波束形成干扰抵消器(PIC)^[3]的性能进行了仿真分析。从对弱目标的分辨能力、航迹提取能力、频谱特征提取能力等方面进行了仿真

对比。仿真结果表明: 在干扰较强时, PIC 方法表现出更强的弱目标提取能力, 而随着信干比的增加, 弱目标提取能力则不断降低, 而 b-MVDR 方法则在各种信干比下均具有良好的性能。在实际中, 由于弱目标距离较远, 艇外平台往往与目标处于同一波束或者相邻波束, 为了提高对弱目标的分辨能力, 本文提出了首先采用密集波束形成, 再进行弱目标提取的方法。仿真结果表明, PIC 较 b-MVDR 具有更强的目标分辨能力, 对与强干扰处于同一波束内的弱目标具有一定的分辨能力。

2 问题的描述

对于舰艇声纳, 距离舰艇较近的其它平台的辐射噪声将成为强干扰。强干扰对舰艇声纳探测的影响与声纳接收端的输入信号干扰比(SIR)有关。令目标和艇外平台的声源级相同, 目标距舰艇 30km, 艇外平台距舰艇 0~30km 变化时, 声纳接收端的 SIR 如图 1 所示(仅考虑球面扩展损失)。由图 1 可知,

收稿日期: 2008-12-22; 修回日期: 2009-03-11

作者简介: 唐建生(1978-), 男, 陕西岐山人, 博士, 工程师, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 唐建生, E-mail: tangjs.npu@gmail.com

艇外平台距舰艇 10km 内其 SIR 均小于 -10dB 。

图 2 给出了强干扰对声纳探测的影响情况。令目标从 -20° 以 $0.5^\circ/\text{s}$ 的速度运动, 信噪比设为 0dB 。艇外平台从 20s 开始出现, 为了模拟艇外平台运动引起的声纳输入 SIR 的变化, 令在 20~30s 内 $SIR=-30\text{dB}$; 在 30-40s 内 $SIR=-20\text{dB}$; 在 40~60s 内 $SIR=-15\text{dB}$; 在 60-80 内 $SIR=-10\text{dB}$ 。由图可知, 艇外平台的使用将使声纳失去对远程弱目标的跟踪。

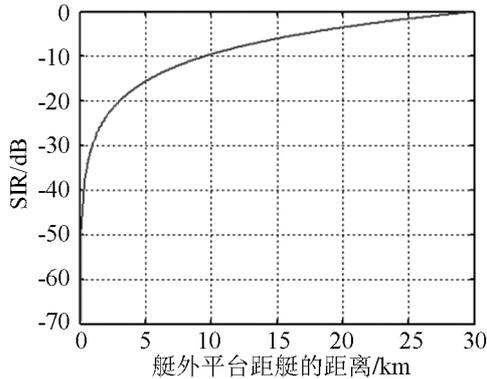


图 1 SIR 随艇外平台距艇距离变化情况

Fig.1 SIR as a function of the outside-ship-platform position

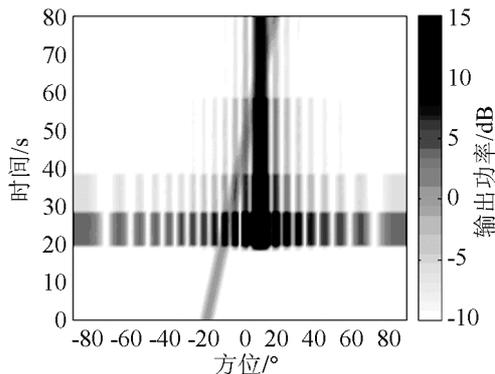


图 2 存在强干扰时声纳输出的时间-方位历程图

Fig.2 Sonar bearing time recorder under existence of strong jamming

3 弱目标提取方法

利用声纳输出的波束域信息实现弱目标提取, 能够保持现有声纳体制不变, 通过局部改变后置信号处理方法便能实现, 因此简单易行。本文仅考虑窄带情况, 对于宽带信号可以通过划分子带的方法将其转化为窄带情况。

考虑为覆盖某一空间区域预形成了 B 个波束, B 个波束的波束输出可以用式(1)表示:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{x}(t) \quad (1)$$

式中, \mathbf{W} 为 B 个波束形成向量构成的矩阵, $\mathbf{x}(t)$ 为阵列输出。

3.1 波束域 MVDR (b-MVDR)

波束域 MVDR 方法的输入是波束输出 $\mathbf{y}(t)$, 其

输出可以表示为:

$$p(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{y}(t) \quad (2)$$

其中, \mathbf{w} 是 MVDR 方法的最优权向量^[1]:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_j^{-1} \mathbf{v}(\theta)}{\mathbf{v}^H(\theta) \mathbf{R}_j^{-1} \mathbf{v}(\theta)} \quad (3)$$

其中, \mathbf{R}_j 表示干扰的协方差矩阵, $\mathbf{v}(\theta)$ 是波束域的阵列响应向量^[2]:

$$\mathbf{v}(\theta) = \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{a}(\theta)$ 是阵列的响应向量。

由于艇外平台是合作目标且距离本艇较近, 其方位往往可以通过本艇声纳或其它方式获取, 因此干扰协方差矩阵 \mathbf{R}_j 可用其理想值, 即:

$$\mathbf{R}_j = \sigma_j \mathbf{v}(\theta_j) \mathbf{v}^H(\theta_j) \quad (5)$$

式中, σ_j 为干扰的功率, 可以用干扰波束的输出估计。

利用式(3)确定波束域 MVDR 的最优加权, 通过式(2)就可得到波束域 MVDR 的输出。

3.2 后置波束形成干扰抵消器(PIC)

后置波束形成干扰抵消器的基本思路是利用强干扰波束的输出作为参考信号, 抵消其余波束的强干扰泄露, 其处理过程如图 3 所示。

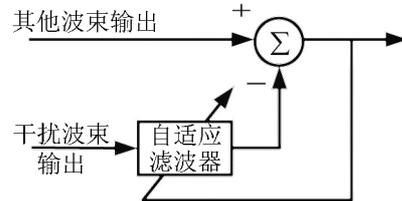


图 3 后置波束形成干扰抵消器的处理框图

Fig.3 Block diagram of the postbeamformer interference canceller

对于窄带信号, 图 3 中的自适应滤波器退化为一个复数加权。以 PIC 输出的平均功率最小为准则, 可得最优权为^[3]:

$$\mathbf{w} = \mathbf{V}^H \mathbf{R} \mathbf{U} / \mathbf{U}^H \mathbf{R} \mathbf{U} \quad (6)$$

式中 \mathbf{U} 表示干扰波束加权向量, \mathbf{V} 表示某一其它波束的加权向量, \mathbf{R} 表示阵列输出的协方差矩阵。

通常, 在声纳系统中以波束宽度为间隔确定预形成波束的指向。这样, 当目标与干扰位于同一波束时, 就无法区分干扰波束和存在信号的其它波束, 因此无法使用 PIC 方法提取目标。以小于波束宽度的间隔确定预形成波束, 即采用密集波束形成, 使同一波束宽度内存在多个波束输出, 当干扰和目标存在方位差异时, 就可以借助图 3 的结构抵消强干扰, 提取弱目标。

将强干扰所在的波束输出依次与其它波束输出作为 PIC 的输入, 即可得到干扰抵消后的多波束输出。

4 仿真分析

考虑 21 元均匀线列阵, 阵元间距为 2000Hz 对应波长的一半, 信号和干扰均是中心频率为 2000Hz、带宽 400Hz 的窄带信号。此阵列指向 0° 的常规波束宽度为 5°。

4.1 目标分辨能力

令目标为 0dB, 干扰为 15dB, 此时 SIR=-15dB, 信噪比设为-5dB, 干扰方位设为 0°, 弱目标的方位依次为 8°、5°、4°和 2°。下面的仿真中使用了密集预波束形成, 即在-30~30°区间内, 每间隔 1°预形成一个波束。图 4 给出采用常规波束形成、b-MVDR、PIC 方法得到的不同方位波束输出的功率。

由图 4 知, 常规波束形成方法在所有情况下均不能正确分辨两个目标; 当强干扰和弱目标的方位相差大于一个波束宽度时, b-MVDR 和 PIC 方法的性能相当, 均能正确分辨两个目标; 当处于同一个波束且不断接近时, PIC 方法表现出更好的目标分辨能力。同时, 随着强干扰与弱目标方位的接近, 目标功率的估计值越来越小(越来越偏离真值 0dB), 这是自适应信号处理中的信号对消现象引起的。

4.2 弱目标航迹提取

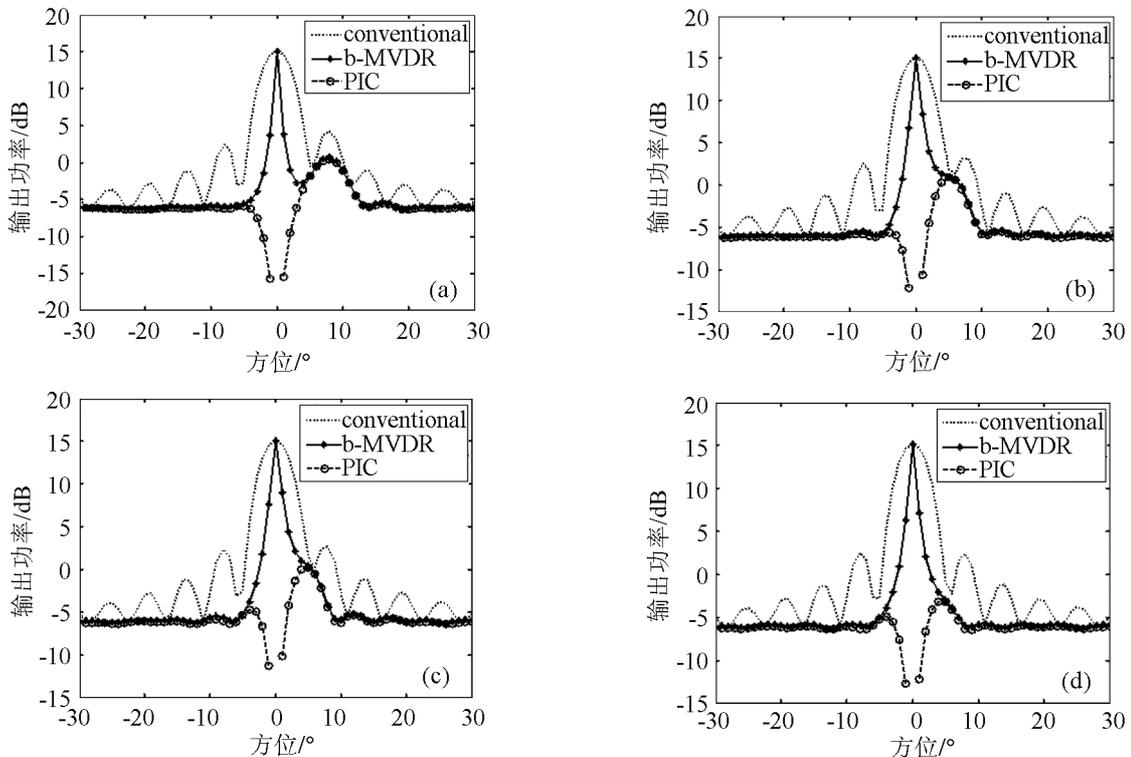


图 4 干扰方位为 0°, 弱目标的方位依次为 8°、5°、4°和 2°, SIR 为-15dB, 信噪比为-5dB 时, 采用常规波束形成、b-MVDR、PIC 方法得到的不同方位波束输出的功率
 Fig.4 Outputs of different beams using conventional, b-MVDR and PIC methods, where strong jamming at 0°, SIR=-15dB, weak target at (a) 8°, (b) 5° (c) 4°and (d) 2°

采用与图 2 相同的仿真条件, 利用 b-MVDR 和 PIC 方法提取弱目标的航迹, 其结果如图 5 所示。与图 2 比较可知, b-MVDR 和 PIC 方法的弱目标提取能力强于常规波束形成, 在弱目标与强干扰方位接近时, PIC 方法有更强的弱目标提取能力。

4.3 弱目标谱特征提取

为了便于观测弱目标的谱特征提取能力, 令目标和干扰分别由 1800Hz 和 2100Hz、900Hz 和 2200Hz 两个单频信号组成, 干扰的线谱高度较信号高 15dB(SIR=-15dB)。设目标方位为 8°, 干扰为 0°。

由于 SIR 为-15dB 时, 两种方法的弱目标提取能力相当, 这里只给出 PIC 的处理结果, 如图 6 所示, 图中标注 S 的为目标谱线。

由图 6 可知, 常规波束形成对干扰有一定抑制能力, 但不足以完全消除干扰的影响, 因此不能得到正确的目标谱特征, 而通过 PIC 可以得到正确的目标谱特征。

4.4 性能的统计分析

对常规波束形成、PIC 和 b-MVDR 三种方法的性能随输入 SIR 的变化情况进行统计分析, 结果如图 7 所示, 图中的每一点均是 200 次仿真的统计值。仿真中设定目标为 0dB, 通过改变干扰功率改变输入 SIR, 并设目标方位为 8°, 干扰为 0°。由图 7 知。

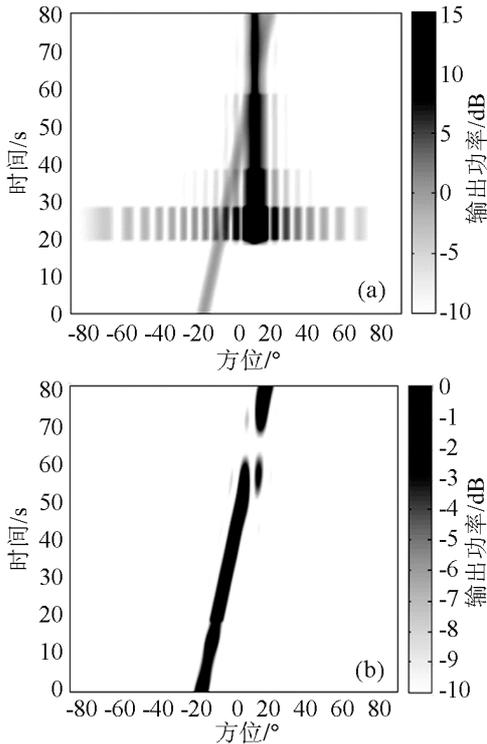


图 5 弱目标航迹提取的仿真结果

Fig.5 Simulation results of extracting weak target's track (a) using b-MVDR method, (b) using PIC method

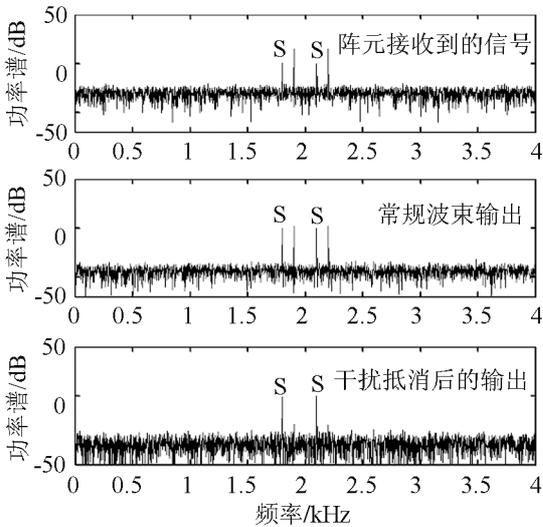
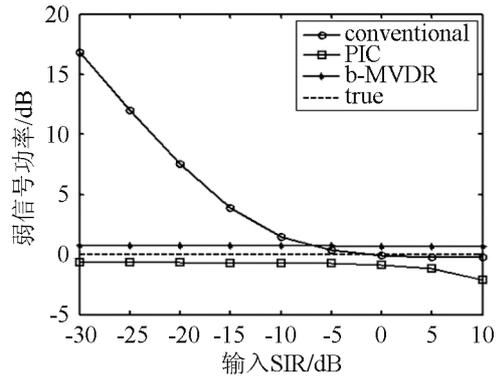


图 6 弱目标特征提取的仿真结果

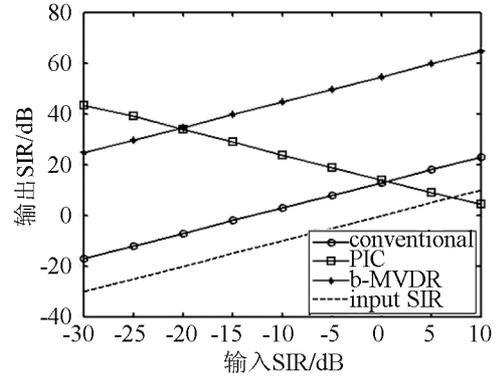
Fig.6 Simulation results of extracting weak target's spectra

(1) 在 SIR 小于 -5dB 时, 由于强干扰在信号波束的能量泄露, 通过常规波束形成的波束输出不能正确估计目标功率(如图 7(a)所示), 而 b-MVDR 和 PIC 方法具有较强的干扰抑制能力(如图 7(b)所示), 因此可正确估计目标功率, 但存在很小的估计偏差。

(2) 在 SIR 小于 -20dB 时, 即干扰很强时, PIC 的干扰抑制能力强于 b-MVDR 方法; 随着 SIR 的增加, PIC 方法的干扰抑制能力不断减小, 直到小于常规波束形成方法的干扰抑制能力; SIR 大于 0dB 时, PIC 方法出现信号抵消现象, 估计的信号功率



(a) 弱目标功率估计随输入 SIR 的统计分析结果



(b) 输出 SIR 随输入 SIR 的统计分析结果

图 7 常规波束形成、b-MVDR 和 PIC 方法随输入 SIR 的统计性能分析
Fig.7 Statistical analysis for conventional, b-MVDR and PIC methods

逐渐变小偏离真值(如图 7(a)所示)。

5 结 论

本文针对存在单个艇外平台强干扰的情况, 对常规波束形成方法、b-MVDR、PIC 三种方法进行了仿真分析。分析结果表明: SIR 小于 -20dB 时, PIC 方法具有更好的弱目标提取能力, 随着 SIR 的增加, PIC 方法性能不断降低; 而 b-MVDR 方法在各种 SIR 下均具有较好的性能; 对艇外平台与目标处于同一波束的情况, PIC 的目标分辨能力更强。

本文给出的仿真结果表明, 在不改变现有声纳体制的情况下, 通过改进声纳信号处理方法, 有望实现抵消艇外平台强干扰, 提取弱目标, 实现对远程弱目标的连续跟踪。

参 考 文 献

[1] Johnson D H, Dudgeon D E. Array signal processing-concepts and techniques[M]. Englewood Cliffs, NJ: Printice-Hall, 1993.
 [2] 杨益新. 声纳波束形成与波束域高分辨方位估计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 2002.
 YANG Yixin. Beamforming and beamspace high resolution bearing estimation techniques in sonar systems[D]. Xi'an: PhD dissertation of Northwestern Polytechnical University, 2002.
 [3] Godara L C. Postbeamformer interference canceller with improved performance[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 85(1): 202-213.