

主动声纳直达波干扰抑制的盲分离算法

高 洁^{1,2}, 李 磊^{1,2}, 刘云涛¹, 蔡惠智¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对舰艇编队作战中主动声纳之间存在的强直达波干扰, 提出了一种基于信号统计二阶矩的直达波干扰抑制算法, 实现了强干扰背景下的微弱目标回波检测。这种方法将盲分离理论和匹配相关技术相结合, 首先对接收数据进行直达波干扰抑制, 再利用已知发射信号副本进行匹配相关, 最后提取目标回波信号。相比其它强干扰抑制算法, 特别是高阶累计量法, 该算法具有计算复杂度低的优点。通过数值仿真实验表明: 该算法能够对直达波干扰进行有效抑制, 对目标回波的检测性能优于直接匹配相关方法。

关键词: 主动声纳; 舰艇编队; 直达波干扰; 盲源分离; 二阶盲辨识

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-04-0537-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.022

A blind source separation approach to active sonar's direct path interference suppression

GAO Jie^{1,2}, LI Lei^{1,2}, LIU Yun-tao¹, CAI Hui-zhi¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The suppression of direct path interference (DPI) between active sonars in fleet formation is considered. An approach based on second order cumulate statistics is proposed to detecting weak targets' echoes in presence of strong jamming. The method combines blind source separation and matched filter processing technology. First, the blind source separation is applied to the received signal. Secondly, the output of DPI suppression is correlated with a replica of the transmitted pulse. Finally, the target echo is extracted and DPI is eliminated. Compared with other strong jamming algorithms, especially the high-order cumulate method, the proposed method significantly reduces computational complexity. Numerical experiments prove that the proposed algorithm greatly outperforms the conventional method of replica correlator in the presence of strong DPI.

Key words: active sonar; fleet formation; direct path interference(DPI) suppression; blind source separation; second order blind identification

1 引言

21 世纪, 海上对抗正在从单舰平台为主的作战模式向舰艇联合编队的作战模式转变, 逐步形成了编队范围内的协同作战能力^[1,2]。虽然我国水面舰艇已经走上编队化的道路, 但目前国内的现役舰壳主动声纳存在诸多难题需要解决^[3], 如舰载主动声纳发射信号形式单一, 不利于编队作战; 直达波信号和目标回波信号之间存在严重的互干扰等, 这些问题对主动声纳信号波形设计和接收端信号处理技术提出了更高的要求。舰船编队作战中存在的直达波干扰问题如图 1 所示, 舰艇 A 和舰艇 B 构成最简单的编队模式, 前者装备的主动声纳在进行主动探

测过程中, 接收端基阵不仅收到水下目标的反射回波, 同时还会收到舰艇 B 主动声纳发射的直达波干扰信号; 而且由于上述直达波干扰信号只经历了单程传播, 其能量远大于水下目标的反射回波, 两者之间的能量差可以达到 40dB 以上。因此, 舰船编队作战中存在的相互直达波干扰严重影响了各自主动声纳的目标检测性能, 必须采取措施对其进行有效抑制, 才能提高舰船编队的整体作战实力。

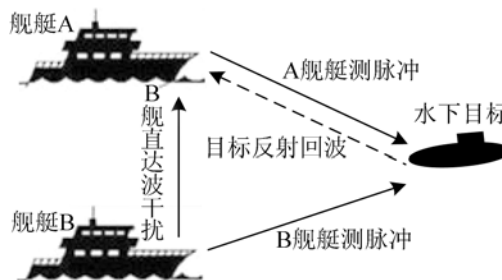


图 1 编队作战直达波干扰示意图

Fig.1 Diagram of direct pulse interference between active sonar

收稿日期: 2008-07-10; 修回日期: 2008-11-14

作者简介: 高洁(1979-), 女, 天津人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 高洁, E-mail: gaojie1979@gmail.com

针对强直达波干扰抑制问题的研究较多,大部分的算法与信号分离有关^[4-8]。目前关于信号分离算法有陈辉和苏海军提出的干扰阻塞(JJM)^[9]算法, J Li 和 P Stoica 提出的松弛(Relax)^[10]算法以及 H Cox 提出的多级自适应波束形成(MRABF)^[11]算法等。JJM 算法利用无源阵列环境中存在几个固定方位的强多径干扰信号的先验知识构造矩阵阻塞抑制已知方位的强干扰,从而实现特定区域内低信噪比信号的方位估计。但 JJM 算法的本质是利用强干扰入射角度已知的先验信息对阵列流型矩阵进行降秩处理,即其对消固定方位干扰是以牺牲阵列孔径为代价的,因此,随着干扰源数目的增加, JJM 算法在低信噪比时的检测性能明显变差。Relax 算法可以同时估计信号源方位和信号波形,其计算过程与轮换投影(AP)算法实现最大似然估计的过程相似,但其每一步的估计都涉及迭代运算,因此 Relax 算法的运算量大得惊人,在实际应用中难以实时实现。MRABF 算法从信号特征空间的角度出发,运用正交投影的方法,对强干扰信号和目标回波分别采用两种速率来处理:用较少的快照数对强干扰进行估计并抑制,然后对干扰抑制后的数据进行长时间的积累以检测弱目标。但在主动声呐探测过程中,为了提高隐蔽性和抗截获性,发射信号的长度有限,这就产生了有限长度数据的快拍数问题。当快拍数小时,信号与噪声没有足够的时间解相关,噪声协方差矩阵也无法收敛,这将严重影响其对微弱目标的检测性能。此外,利用信号波形特征进行时域信号分离也有大量的算法涌现,但这类算法都需要计算信号的高阶统计量或信号的循环谱信息,因而其相应的算法计算量也远远大于基于信号二阶统计量的方法。

本文尝试利用基于接收信号二阶统计量的盲辨识方法,首先对编队作战舰艇接收端的强直达波信号进行分离、抑制,然后通过匹配滤波的方法对剔除直达波干扰的目标回波信号进行主动检测。

2 有噪盲分离基本模型

噪声存在情况下盲源分离原理框图如图 2 所示。假设信号源是窄带,可以得到如下的数学模型:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \boldsymbol{\Theta}(t) \quad (1)$$

式(1)中 $\mathbf{X}(t)$ 为阵列的 $M \times 1$ 维快拍数据矢量, $\boldsymbol{\Theta}(t)$ 为阵列的 $M \times 1$ 维噪声数据矢量, $\mathbf{S}(t)$ 为空间信号的 $N \times 1$ 维矢量,其分量 s_i ($i=1, \dots, N$) 分别对应各个发射信号源, \mathbf{A} 为 $M \times N$ 维的混合矩阵,也称为通道参数矩阵,其元素的物理意义是通道的混

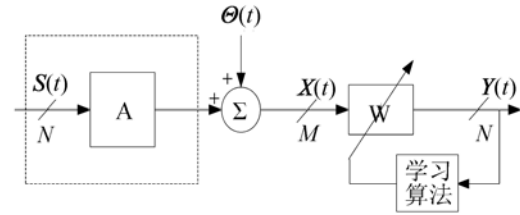


图 2 有噪盲源分离的原理框图
Fig.2 Diagram of blind source separation

合系数。

盲信号分离的主要目的是设计分离滤波器 \mathbf{W} , 在原始输入信号矢量 $\mathbf{S}(t)$ 和混合矩阵 \mathbf{A} 未知的条件下,利用输出混合信号矢量 $\mathbf{X}(t)$ 辨识出 $\mathbf{S}(t)$ 和混合矩阵 \mathbf{A} 。分离过程可由式(2)表示:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{S} = \mathbf{C}\mathbf{S} \quad (2)$$

式(2)中 \mathbf{Y} 为 $N \times 1$ 维盲分离输出数据矢量,其元素表示为 y_i ($i=1, \dots, N$); 同时,为了书写简便下文中将忽略时间变量 t , 不再进行说明。

如果可以找到某一分离矩阵 \mathbf{W} , 使得式(2)中的矩阵 \mathbf{C} 成为单位对角阵, 则有

$$y_i = s_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

更一般地,如果矩阵 \mathbf{C} 可以表示为广义置换矩阵(每行每列只有一个非零元素)和一个单位矩阵的乘积形式,那么得到的 y_i ($i=1, \dots, N$) 与 s_i ($i=1, \dots, N$) 之间只是排列次序和幅值大小不一样,这种现象称为盲源分离的模糊性。在实际应用中,这种次序和幅值的差异并不会影响 s_i ($i=1, \dots, N$) 中包含的有用信息,表示为式(4)的形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{S} \quad (4)$$

式(4)中 \mathbf{P} 为置换矩阵, \mathbf{A} 为非奇异对角阵。

由式(2)、(4)可知:

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^{-1} \quad (5)$$

图 2 中的学习算法没有任何的参考目标,因此该学习过程只能是自组织的。学习过程的第一步是建立以 \mathbf{W} 为变元的目标函数 $L(\mathbf{W})$, 如果某个 $\hat{\mathbf{W}}$ 能使 $L(\mathbf{W})$ 达到极值,该 $\hat{\mathbf{W}}$ 即为所需的分离矩阵解。第二步是采取一种有效的算法求解 $\hat{\mathbf{W}}$ 。

3 SOBI 直达波抑制算法

利用直达波和目标回波各自的时间结构(主要是时域二阶相关性)来获得基于信号二阶统计量的盲分离算法,称为 SOBI 直达波抑制算法^[12], 即:利用特征值分解(EVD)和奇异值分解(SVD)对式(1)的混合模型,仅用有限观测数据快拍数来估计信道混合矩阵 \mathbf{A} 或其伪逆矩阵 $\mathbf{A}^+ = \mathbf{W}$ (分离矩阵或解混合矩阵)。

基于二阶统计量的盲辨识(SOBI)算法步骤如下:

(1) 估计传感器阵列输出信号的协方差矩阵

$$\hat{\mathbf{R}}_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{x}(k) \mathbf{x}^T(k) \quad (6)$$

(2) 计算 $\hat{\mathbf{R}}_x(0)$ 的 EVD(或 SVD), 即:

$$\hat{\mathbf{R}}_x(0) = \mathbf{U}_x \Sigma_x \mathbf{V}_x^T = \mathbf{V}_x \Lambda_x \mathbf{V}_x^T = \mathbf{V}_S \Lambda_S \mathbf{V}_S^T + \mathbf{V}_N \Lambda_N \mathbf{V}_N^T \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{V}_S = [v_1, v_2, \dots, v_n] \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 包含与 $\Lambda_S = \text{diag}\{\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n\}$ 的 n 个主特征值相对应的特征向量。同理, 矩阵 $\mathbf{V}_N \in \mathbf{R}^{m \times (m-n)}$ 包含 $(m-n)$ 个与噪声特征值 $\Lambda_N = \text{diag}\{\lambda_{n+1} \geq \lambda_{n+2} \geq \dots \geq \lambda_m\}$ 相对应的噪声特征向量。这意味着最后 $(m-n)$ 个次要特征值对应于噪声子空间, 而主特征值对应于信号子空间。因此, 可以由最主要的特征值个数估计待分离的源信号的个数。

(3) 将 $(m-n)$ 个次要特征值作为白噪声方差 σ_n^2 的估计;

(4) 进行稳健预白化处理, 即:

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \hat{\Lambda}_S^{-1/2} \mathbf{V}_S^T \mathbf{x}(k) = \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) \quad (8)$$

其中 $\hat{\Lambda}_S = \text{diag}\{\lambda_1 - \hat{\sigma}_n^2, \lambda_2 - \hat{\sigma}_n^2, \dots, \lambda_n - \hat{\sigma}_n^2\}$

(5) 指定时延 $p \neq 0$ (一般对于被噪声污染信号取 $p=1$ 效果较好), 估计向量 $\bar{\mathbf{x}}(k)$ 的协方差矩阵, 并对其进行奇异值分解, 有:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\bar{\mathbf{x}}}(p) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{\mathbf{x}}(k) \bar{\mathbf{x}}^T(k-p) = \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{x}}} \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}} \mathbf{V}_{\bar{\mathbf{x}}}^T \quad (9)$$

(6) 检查给定延 p 的对角矩阵 $\Sigma_{\bar{\mathbf{x}}}$ 的所有奇异值是否有明显差异。若无明显差异, 选择不同的延 p , 跳转至第(5)步; 若各奇异值有明显差异且相互之间距离足够远, 则估计混合矩阵为:

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{Q}^+ \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{V}_S \hat{\Lambda}_S^{1/2} \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{x}}} \quad (10)$$

(7) 估计出的源信号

$$\mathbf{y}(k) = \hat{\mathbf{s}}(k) = \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{x}}}^T \mathbf{x}(k) = \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{x}}}^T \hat{\Lambda}_S^{-1/2} \mathbf{V}_S^T \mathbf{x}(k) \quad (11)$$

4 数值仿真模型

本节利用经典的水下信道模型, 并以基于该模型的实测信道参数作为仿真条件, 对于 SOBI 直达波抑制算法的检测性能进行了仿真研究, 验证了 SOBI 算法对于实际水下环境中的强干扰抑制优越性能。

图 3 给出了基于本征射线理论的经典水声信道多径模型。其中, 接收端收到的信号包括: 强干扰信号源信号直接到达接收机的主径 P0 和强干扰信号经过水底和水面若干次反射后到达接收机的其它路径。理论上除主径外有无穷多条其它路径, 但由

于声波在水下的传播损耗以及水面和水底的反射损失, 所以直达波主径能量远强于其它路径的能量, 其它路径的能量随着界面反射次数的增多迅速衰减。

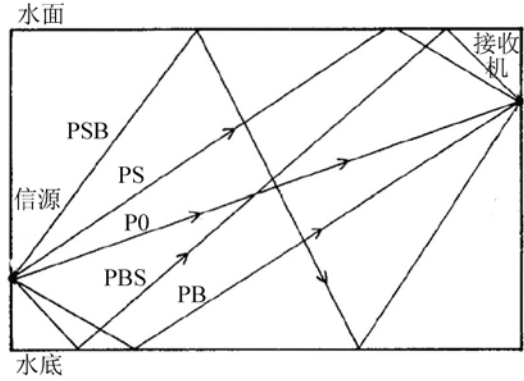


图 3 多径水声信道模型
Fig.3 Model of underwater multi-path channel

文献[13]对于某真实水下信道进行试验测量, 其结果验证了图 3 所示模型的有效性并证明了水声多径信道传输能量主要集中在图 3 给出的 5 条路径: P0(直达波主径)、PS(经过水面单次反射到达接收机)、PB(经过水底单次反射到达接收机)、PSB(先经过水面反射再经过水底反射到达接收机)、PBS(先经过水底反射再经过水面反射到达接收机)。

5 算法仿真和性能分析

应用数值仿真模型^[13]给出的信源 5 条路径的衰落幅度以及延时长度模拟强干扰信号及其多径, 采用 8 元水平均匀线阵进行仿真实验。水中声速 1500m/s, 阵元间距 $\lambda/2$, λ 为水下声波波长。强直达波信号和目标回波信号分别由 7 阶 m 序列的两个不同生成多项式产生, 采样频率 96kHz, 中心频率 7350Hz, 信号带宽 250Hz。仿真采用 Monte-Carlo 方法, 针对每个目标回波信噪比, 进行 1000 次独立试验, 统计成功检测目标回波概率。

图 4 给出了仿真结果, 横坐标为目标回波相对于强直达波的信干比, 纵坐标为对目标回波的成功检测概率。从图 4 可以看出, 随着目标回波信噪比的增加, SOBI 直达波抑制算法的检测性能相应提高; SOBI 算法在信干比 $SIR > -30\text{dB}$ 、不同目标回波信噪比的情况下, 检测性能比较接近。当目标回波信噪比 $SNR = 0\text{dB}$ 时, 要达到检测概率 0.8, SOBI 算法可以工作在最低信干比 $SIR = -66\text{dB}$ 的情况下; 即使目标回波信噪比降低到 $SNR = -15\text{dB}$, SOBI 算法仍然可以在信干比 $SIR = -55\text{dB}$ 时达到 0.8 的检测概率。

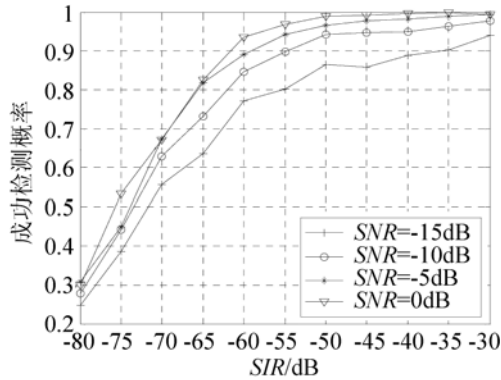


图4 基于实测水声多径信道的SOBI检测性能

Fig.4 Detection Probability of SOBI based on tested underwater multi-path channel

在实际应用中,考虑到平台和待检测目标之间的相对移动会带来目标回波的多普勒频偏,而 m 序列的模糊度函数图呈图钉状,即是一种多普勒敏感信号,因此需要在接收端对回波信号的多普勒频偏进行必要的补偿。

图5给出了采用多普勒频偏补偿的SOBI直达波抑制算法的仿真结果。仿真中,目标回波信号和接收平台之间存在相对运动产生的20Hz多普勒频偏,其它条件与图4的仿真环境相同。从图5中可以看出,如果不采取多普勒补偿措施,SOBI算法对于运动目标回波检测近乎失效;而采取多普勒补偿之后,SOBI算法的检测性能与图4所示的无多普勒频偏时的检测性能非常接近。

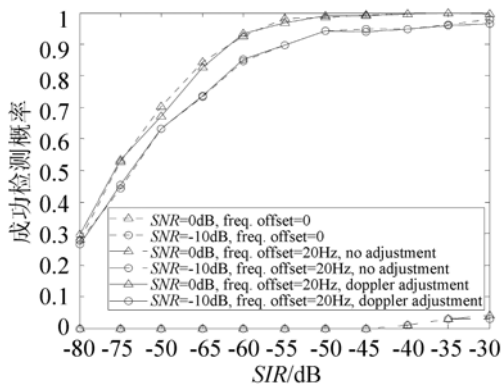


图5 多普勒补偿后的基于实测水声多径信道的SOBI检测性能

Fig.5 Detection Probability of SOBI based on tested underwater multi-path channel after Doppler adjustment

6 结论

本文针对舰艇编队作战中存在的强直达波干扰,提出了一种基于接收信号二阶统计量的强干扰抑制方法(SOBI算法)。相比其它强干扰抑制方法,该算法具有计算简单、适应性广、效率高的优点,同时克服了其他高阶盲分离算法带来的庞大计算量的缺点。仿真结果表明,相比直接匹配相关检测

法,SOBI直达波抑制算法可以对编队作战中的强直达波干扰进行有效抑制,从而提高了编队作战互干扰情况下对微弱目标回波的检测能力。

参 考 文 献

- [1] 闵绍荣,黎洪生. 未来舰艇作战系统总体设计模式研究[J]. 舰船电子工程, 2004, **24**(1): 5-8.
MIN Shaorong, LI Hongsheng. Future toplevel design pattern research of shipboard combat system[J]. Ship Electronic Engineering, 2004; **24**(1): 5-8.
- [2] 刘雄,康凤举. 编队协同反潜概念模型研究[J]. 系统仿真学报, 2006, **18**(pt2): 31-37.
LIU Xing, KANG Fengju. Research on conceptual models of fleet cooperative engagement[J]. Journal of System Simulation, 2006, **18**(pt2): 31-37.
- [3] 胡波,程千流,沈文苗. 水面舰壳壳声呐发展方向探讨[J]. 声学及电子工程, 2007, (85): 1-3.
HU Bo, CHENG Qianliu, SHEN Wenmiao. Discussion about development of shipboard hull sonar[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2007, (85): 1-3.
- [4] 杨云川,崔怀林. Robust 统计在主动声纳分裂波束目标方位走向估计中的应用[J]. 声学技术, 2004, **23**(4): 201-204.
YANG Yunchuan, CUI Huailin. Application of Robust statistics to target bearing estimation for split arrays in active SONAR[J]. Technical Acoustics, 2004, **23**(4), 201-204.
- [5] 姜可宇,蔡志明. 主动声呐中目标回波的一种非线性提取方法[J]. 声学技术, 2006, **25**(3): 192-196.
JIANG Keyu, CAI Zhiming. A nonlinear method for echo extraction from targets in active sonar[J]. Technical Acoustics, 2006, **25**(3), 192-196.
- [6] 倪晋平,马远良. 一种强干扰下超弱水声信号自适应盲分离的快速算法[J]. 声学技术, 2002, **21**(3): 141-144.
NI Jinping, MA Yuanliang. An adaptive fast algorithm for blind sources separation with super weak signals in the stronger jammer[J]. Technical Acoustics, 2002, **21**(3), 141-144.
- [7] 王震,丛丰裕. 粒子滤波和独立分量分析的含噪信号盲分离算法研究[J]. 声学技术, 2008, **27**(3): 423-427.
WANG Zhen, CONG Fengyu. Research on particle filtering and independent component analysis based noisy blind source separation[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(3), 423-427.
- [8] 朱坚坚,王惠刚. 基于阵元接收信号幅度信息的频域盲分离排序算法[J]. 声学技术, 2008, **27**(4): 593-596.
ZHU Jianjian, WANG Huigang. An algorithm for solving permutation problem based on the magnitude information received by microphones in the frequency-domain BSS[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(4): 593-596.
- [9] 陈辉,苏海军. 强干扰/信号背景下的DOA估计新方法[J]. 电子学报, 2006, **34**(3): 530-534.
CHEN Hui, SU Haijun. A new approach to estimate DOA in presence of strong jamming/Signal suppression[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2006, **34**(3): 530-534.
- [10] LI J, LIU G Q, JIA N Z, P Stoica. Airborne phased array radar: clutter and jamming suppression and moving target detection and feature extraction[A]. IEEE 2000 Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop[C]. Cambridge, MA, 2000. 240-244.
- [11] H. Cox. Multi-rate adaptive beamforming (MRABF)[A]. IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop[C]. Cambridge, MA, 2000. 306-309.
- [12] Belouchrani A, Meriam K A, Cardoso J F, Moulines E. A blind source separation technique using second-order statistics[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1997, **SP-45**(2): 434-444.
- [13] CHANG S H, WENG C H, CHEN J Y. Application of quasi-orthogonal sequence in underwater acoustic DSSS communication system[J]. IEEE International Symposium on Underwater Technology[C]. 2004, 4: 145-150.