

Research on Cancelling Directional Strong Interference Combined Blind Source Separation with Spectrum Subtraction*

Chunyu Kang, Jun Li, Shanbin Zhang

Department of Information Operations, Dalian Navy Academy, Dalian
Email: dlkangcy@126.com

Received: Mar. 16th, 2013; revised: Jul. 15th, 2013; accepted: Aug. 16th, 2013

Copyright © 2013 Chunyu Kang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Strong target interference severely affects the detection of the towed linear array. In order to solve this problem, this paper presents a method which combines blind source separation (BSS) with spectrum subtraction. First, the interference response on the array is got by combining the BSS with the strong interference orientation. Then it is used as the reference channel of the spectrum subtraction and the main channel is the original array received signal. Finally, the target detection is completed by the beamforming. And it is tested by the simulation wideband data. Results show that this method can preferably cancel the directional strong interference. It obviously increases the spacial spectrum power of the faint target signal and improves the detection capability of the sonar system.

Keywords: Blind Source Separation; Spectrum Subtraction; Interference; Beamforming

盲源分离与谱减法结合抑制方向性强干扰研究*

康春玉, 李 军, 张善滨

海军大连舰艇学院信息作战系, 大连
Email: dlkangcy@126.com

收稿日期: 2013年3月16日; 修回日期: 2013年7月15日; 录用日期: 2013年8月16日

摘 要: 强目标干扰严重影响拖曳线列阵声纳的检测性能。本文提出了一种盲源分离与谱减法相结合的强目标干扰抑制方法。首先通过盲源分离和强目标干扰方位得到干扰在阵列上的响应, 将其作为谱减法中的参考信号, 主通道为阵列原始接收信号, 经谱减后得到抑制干扰后的阵列信号, 再采用波束形成方法完成目标的检测。仿真数据检验表明, 该方法可较好地抑制方向性强干扰, 明显提高了弱目标信号的空间谱能量, 增强了拖曳线列阵声纳检测弱目标信号的能力。

关键词: 盲源分离; 谱减法; 干扰; 波束形成

1. 引言

强目标干扰不仅严重影响被动拖曳线列阵声纳远程弱目标的探测, 也使拖曳线列阵声纳在强目标干扰方向形成较大的探测盲区。如何抑制强目标干扰对

*基金项目: 国家自然科学基金(61271443)。

被动拖曳线列阵声纳的影响, 增大声纳的探测距离和探测区域, 科研人员从不同角度提出了许多的方法^[1-3]。1989年 L. C. Godara 等人提出的先波束形成, 再采用自适应滤波器抵消干扰的方法是一种比较经典的强干扰抑制方法。曹涛^[4]等人将谱减法用于抑制方

向性强干扰, 仿真数据下取得了较好的抑制效果。

盲源分离(Blind Source Separation: BSS)是一种在不知道源信号和传输通道参数的情况下, 针对源信号的瞬时混叠和卷积混叠或它们的组合, 根据输入源信号的统计特性, 仅由观测信号恢复出源信号各个独立成分的方法^[5,6]。已经在电子信息、通信、生物医学、雷达、声纳等领域得到了成功的应用。基于盲源分离可较好地得到各独立成份, 为干扰信号的获得提供了途径, 谱减法又能较好的抑制干扰, 提出了一种盲源分离与谱减法相结合的强目标干扰抑制方法, 通过对弱目标附近强目标的抑制实验表明, 该方法可较好地抑制方向性强目标干扰, 有利于增强拖曳线列阵声纳的弱目标检测能力。

2. 阵列模型

考虑等距线阵(ULA: Uniform Linear Array)如下图 1 所示, 其 M 个阵元等间距排成一直线, 阵元间距为 d 。同时假定: 1) 目标源为宽带信号; 2) 阵列位于目标源的远场区, 且阵元之间无互耦; 3) 目标源的数目小于阵列的阵元数目。

图 1 所示模型下, 基阵第 m 阵元的接收信号可表示为

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t - \tau_{im}) + n_m(t) \quad (1)$$

式中 $x_m(t)$, $s_i(t)$, $n_m(t)$ 分别表示第 m 阵元的接收信号, 第 i 个目标源信号和第 m 阵元上的加性噪声, τ_{im} 表示第 m 阵元相对参考点接收到第 i 个信号的时间延迟, 对式(1)两边同时进行傅里叶变换, 则可得到基阵接收信号的频域形式, 如式(2)。

$$X_m(f) = \sum_{i=1}^N S_i(f) e^{-j2\pi f \tau_{im}} + N_m(f) \quad (2)$$

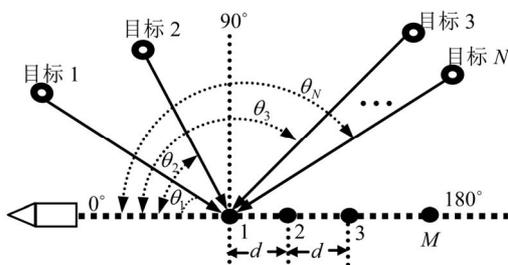


Figure 1. ULA and angle of incidence
图 1. 等距线阵与波入射角

式中 $X_m(f)$, $S_i(f)$, $N_m(f)$ 分别为 $x_m(t)$, $s_i(t)$, $n_m(t)$ 的傅里叶变换。式(2)写成矩阵形式如式(3)。

$$\mathbf{X}(f) = \mathbf{A}(f, \Theta) \mathbf{S}(f) + \mathbf{N}(f) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{X}(f) = [X_1(f), X_2(f), \dots, X_M(f)]^T$ 表示基阵接收信号的傅里叶变换,

$\mathbf{S}(f) = [S_1(f), S_2(f), \dots, S_N(f)]^T$ 表示目标源信号的傅里叶变换, $\mathbf{N}(f) = [N_1(f), N_2(f), \dots, N_M(f)]^T$ 表示加性噪声的傅里叶变换,

$\mathbf{A}(f, \Theta) = [\mathbf{a}(f, \theta_1), \mathbf{a}(f, \theta_2), \dots, \mathbf{a}(f, \theta_N)]$ 称为基阵的阵列流形, 其中 Θ 表示 θ_i 的集合, 向量 $\mathbf{a}(f, \theta_i)$ 称为基阵对 θ_i 方向入射频率为 f 的信号响应向量(或方向向量)表示为

$$\mathbf{a}(f, \theta_i) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta_i}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \cos \theta_i} \right]^T \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, N$)

由阵列观测信号的频域表达式(3)可看出, 如果将 $\mathbf{A}(f, \Theta)$ 视为盲源分离理论中混合矩阵, $\mathbf{S}(f)$ 视为信号源, $\mathbf{N}(f)$ 视为加性噪声, $\mathbf{X}(f)$ 视为混合后的信号, 则(3)式刚好与盲源分离中复数域的线性瞬态混合形式一致。因此利用某些盲源分离复数域算法^[7]或修改的实数域算法, 可完成阵列频域接收信号的分离, 得到各独立的目标源信号。

3. 谱减法的基本原理

谱减法是一种发展较早且应用比较成熟的语音增强算法。其原理是在假设噪声是统计平稳且与信号不相关的前提下, 在频域将带噪的功率谱减去噪声的功率谱, 得到信号功率谱估计, 开方后得到信号幅度估计, 并插入带噪信号的相位, 再采用反傅里叶变换, 就可在时域上得到增强后的信号。基本谱减算法的原理如图 2 所示^[4]。

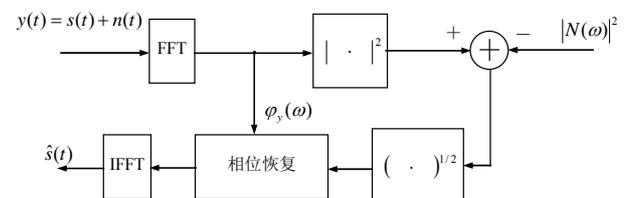


Figure 2. Spectrum subtraction principle
图 2. 谱减法基本原理

图 2 中 $y(t) = s(t) + n(t)$ 表示带噪信号，且假定信号 $s(t)$ 为平稳信号，而加性噪声 $n(t)$ 与信号 $s(t)$ 彼此不相关。 $N(\omega)$ 为加性噪声 $n(t)$ 的傅里叶变换， $\phi_y(\omega)$ 为带噪信号 $y(t)$ 的相位。

假设 $Y(\omega)$ 、 $S(\omega)$ 分别表示 $y(t)$ 、 $s(t)$ 的傅里叶变换，同时考虑信号是短时平稳的，因此可得

$$|Y(\omega)|^2 = |S(\omega)|^2 + |N(\omega)|^2 + 2\text{Re}[S(\omega)N^*(\omega)] \quad (5)$$

也即

$$E(|Y(\omega)|^2) = E(|S(\omega)|^2) + E(|N(\omega)|^2) + 2E\{\text{Re}[S(\omega)N^*(\omega)]\} \quad (2)$$

由于假设 $s(t)$ 和 $n(t)$ 不相关，则 $S(\omega)$ 和 $N(\omega)$ 也相互独立，而 $N(\omega)$ 为零均值的高斯分布，所有 $2E\{\text{Re}[S(\omega)N^*(\omega)]\} = 0$ 。因此可以得到

$$E(|S(\omega)|^2) = E(|Y(\omega)|^2) - E(|N(\omega)|^2)$$

即可得到信号幅度的估计值

$$|S(\omega)| = \left[|Y(\omega)|^2 - |N(\omega)|^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

在具体运算时，为防止出现负功率的情况，完整的谱减运算公式如式 (4)。

$$|S(\omega)| = \begin{cases} \left[|Y(\omega)|^2 - |N(\omega)|^2 \right]^{1/2} & |Y(\omega)| > |N(\omega)| \\ 0 & |Y(\omega)| \leq |N(\omega)| \end{cases} \quad (4)$$

4. 抑制方向性强干扰模型

从图 2 中可以看出，谱减法的关键是需要知道噪声信号，即需要知道减去的信号。盲源分离可在只知道阵列接收信号的情况下恢复出独立声源，甚至可分离方位几乎重叠的目标源信号，而且根据分离出的独立成份和解混矩阵，可得到对应独立源在阵列上的响应。因此通过对被动拖曳线列阵声纳的接收信号进行分离，可以得到强目标干扰源信号，根据该信号和解混矩阵则可重构干扰源在各阵元上的响应，即此时阵列上的响应仅仅是干扰的响应。因此，可将该响应作为谱减法中需要减去的信号(即噪声)，达到抑制干扰的目的，实现过程如图 3 所示。首先对接收信号进行分子带处理，对每个子带采用频域盲源分离方法进行分离^[7]，根据干扰方位与盲源分离估计的各路分离信号的方位进行聚类，选出其中的干扰目标信号，结合解混矩阵对干扰目标信号进行重构，则得到干扰在阵列上的响应，并将其作为谱减法中需要减去的信号，抑制强目标干扰的影响，此时滤波器的输出是除了干扰以外的目标在阵列上的响应，对其进行波束形成，得到子带的空间谱。最后将所有子带的空间谱求和，则得到总的空间谱，实现目标检测。

图 3 所示模型中比较关键的是复数域盲源分离、聚类分析和阵列信号的重构。复数域盲分离采用文献[7]的方法，聚类分析时首先采用文献[7]的方法对分离信号进行方位估计，然后根据强目标干扰方位对分离

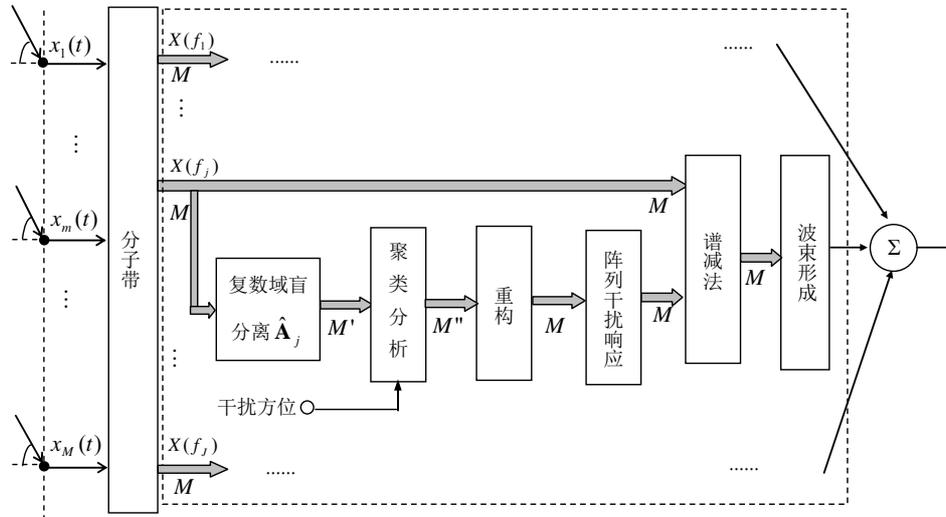


Figure 3. Cancel directional interference model combined blind source separation with spectrum subtraction
图 3. 盲源分离与谱减法结合抑制方向性强干扰模型

信号进行聚类,即选择干扰方位区域所对应的分离信号,并将其它方位对应的分离信号置零,再结合解混矩阵通过式(9)重构阵列信号,得到干扰所对应的阵列响应。

$$X_r = \hat{A}^+ Y_r \quad (5)$$

式中 \hat{A}^+ 表示解混矩阵 \hat{A}_j 的伪逆, $Y_r = [Y_r(1), Y_r(2), \dots, Y_r(M)]^T$ 是从分离信号 $\hat{S}(k)$ 中选择的感兴趣的独立成分(即干扰方位所对应的独立成份,其它方位对应的分离信号置零), $X_r = [X_r(1), X_r(2), \dots, X_r(M)]^T$ 为感兴趣成分(即强目标干扰) Y_r 对应的传感器阵列接收信号。

5. 仿真验证与分析

考虑 48 元均匀线列阵,阵元间隔 1 米,拖线阵拖曳距离 1 公里,拖曳深度 50 米,目标 A 与目标 B 距离拖线阵 20 公里,目标 A 的声源级为 148 dB,拖船与目标 B 的声源级为 138 dB,拖船与两目标均为海上实录舰船辐射噪声,声速为 1500 m/s,海深 200 米,考虑 3 条多途路径,海洋环境噪声级 75 dB。将目标 A 作为方向性强干扰,采用盲源分离与谱减法结合抑制目标 A,实验中波束形成方法采用了常规波束形成方法和最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response: MVDR)波束形成方法。

实验一:两目标方位差为 10 度,目标 A 的方位 85 度,目标 B 的方位 95 度。

图 4 是采用常规方法与 MVDR 方法抑制目标 A 前后得到的空间谱。从图中可以看出,强目标 A 得到了一定的抑制,但不能完全抑制干扰目标,仍然能同

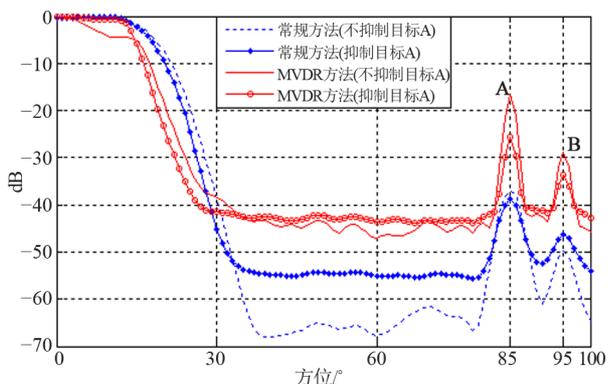


Figure 4. Spatial spectrum of classical method and MVDR method (10 degree orientation difference)
图 1. 常规方法与 MVDR 方法空间谱(方位差 10 度)

时检测到两目标。对于常规方法,抑制目标 A 后,背景级也增强。

实验二:两目标方位差为 5 度,目标 A 的方位 85 度,目标 B 的方位 90 度。

图 5 是采用常规方法与 MVDR 方法抑制目标 A 前后得到的空间谱。从图中可看出,如果不抑制目标 A,当方位差为 5 度时,常规方法不能对弱目标(目标 B)进行检测,而采用盲源分离和谱减法结合抑制目标 A 后,常规方法也基本能检测到弱目标 B。

实验三:两目标方位差为 3 度,目标 A 的方位 85 度,目标 B 的方位 88 度。

图 6 是采用常规方法与 MVDR 方法抑制目标 A 前后得到的空间谱。从图中可看出,如果不抑制目标 A,当方位差为 3 度时,常规和 MVDR 方法都无法检测到弱目标 B,而采用盲源分离和谱减法结合抑制目标 A 后,虽然常规方法也不能检测到弱目标 B,但 MVDR 方法则能正常检测到弱目标 B。

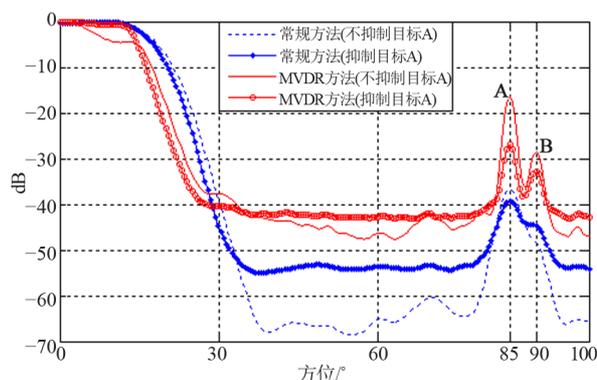


Figure 5. Spatial spectrum of classical method and MVDR method (5 degree orientation difference)
图 2. 常规方法与 MVDR 方法空间谱(方位差 5 度)

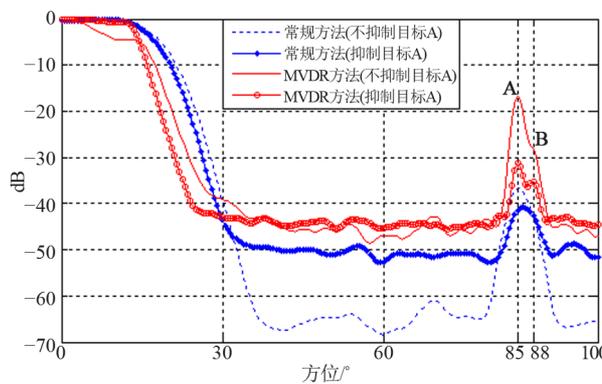


Figure 6. Spatial spectrum of classical method and MVDR method (3 degree orientation difference)
图 3. 常规方法与 MVDR 方法空间谱(方位差 3 度)

6. 结论

结合盲源分离与谱减法各自的特点与优势,提出了一种方向性强干扰抑制方法,并通过宽带仿真数据对方法进行了检验,结果表明,盲源分离与谱减法结合虽然不能对强干扰进行完全抑制,但用于抑制弱目标附近的强目标干扰时,效果比较明显,提高了相应常规与 MVDR 方法对弱目标的检测能力。

参考文献 (References)

- [1] 冯杰, 杨益新, 孙超. 自适应空域矩阵滤波器设计和目标方位估计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20): 4798-4802.
- [2] J. V. Candy, E. J. Sullivan. Cancelling Tow Ship Noise Using an Adaptive Model-based Approach. Proceedings of the IEEE/OES Eighth Working Conference on Current Measurement Technology, 2005: 14-18.
- [3] 李巍, 陈新华, 孙长瑜等. 声纳中具方向性宽带强干扰的实时抑制方法[J]. 应用声学, 2008, 27(4): 257-263.
- [4] 曹涛, 康春玉. 谱减法抑制方向性强目标干扰研究[J]. 声学技术, 2011, 30(6): 97-98.
- [5] S. Choi, A. Cichocki, H. M. Park, et al. Blind Source Separation and Independent Component Analysis: A Review. Neural Information Processing, 2005, 6(1): 1-57.
- [6] S. P. Michael, L. Jan, K. Ulrik, et al. A survey of convolutive blind source separation methods. Springer Handbook on Speech Processing and Speech Communication, Berlin: Springer, 2006: 1-34.
- [7] 康春玉, 章新华, 韩东. 一种基于盲源分离的 DOA 估计方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(10): 1324-1326.