

## 一种双基地声呐直达波干扰抑制的高分辨算法

徐景峰\* 韩树平 舒象兰 马鑫 董永峰  
(海军潜艇学院 青岛 266042)

**摘 要:** 针对双基地声呐系统中存在强直达波干扰掩蔽目标回波的问题, 该文在双基地配置已知的前提下, 提出一种直达波抑制的高分辨算法。该方法在约束条件下将  $N$  维空间划分为两个正交子空间, 将平滑最小方差无畸变响应(MVDR)算法的扫描权矩阵分解到各子空间, 在约束子空间使用输出功率最小化法则得到最优权。仿真结果表明, 在仅能提供直达波大致方位的情况下, 该方法在约束方向提供比常规波束零点更深的零陷, 并能对多个未知的相干信号进行无畸变输出。该算法在抑制强直达波干扰的同时具有对多个相干目标信号高分辨的能力。

**关键词:** 双基地声呐; 直达波干扰抑制; 零陷; 高分辨

中图分类号: U666.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)12-2929-06

DOI: 10.11999/JEIT150198

## A High Resolution Algorithm of Direct Path Interference Suppression for Bistatic Sonar

Xu Jing-feng Han Shu-ping Shu Xiang-lan Ma Xin Dong Yong-feng  
(Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** In view of the problem of target echoes interfered by strong direct path-wave in bistatic sonar, a high resolution algorithm of direct path interference suppression is proposed when the deployment is known. The method divides the space of  $N$  dimension into two orthogonal subspaces under the condition of constraint, the weight matrix of smoothing MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) algorithm is decomposed into these subspaces, and the optimal weight is obtained by output power minimization in the constraint subspace. The simulation results show that a deeper null appear at the constraint direction compared to conventional beam when the probable direction just is knew, and it yields distortionless response of multi-coherent unknown signals. The algorithm not only suppresses the direct path interference effectively, but also possesses the capability of high resolution for multi-coherent unknown signals.

**Key words:** Bistatic sonar; Direct path interference suppression; Null; High resolution

### 1 引言

近年来, 双基地系统已成为雷达和声呐探测领域的一个研究热点<sup>[1,2]</sup>。利用双基地声呐进行水下目标探测时, 接收基地会受到来自发射基地的强直达波干扰, 甚至完全掩蔽目标回波信号, 这给双基地声呐的时延估计、方位估计等带来很大的困难。因此, 直达波抑制是双基地系统在信号处理中的关键技术之一<sup>[3-6]</sup>。

由于直达波与目标回波具有很强的相关性, 因此常用的时域处理方法<sup>[7-11]</sup>在抑制直达波时难免会将部分回波信号过滤掉。一种广泛采用的有效方法是在空域中对直达波分离和抑制<sup>[12]</sup>, 通过波束形成的零陷除去干扰方向信号<sup>[13,14]</sup>, 从而使得处理后的

结果只保留期望信号。目前, 有多种方法可在干扰方向产生波束零陷, 如零点约束的常规波束形成方法、最小方差无畸变响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)、多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法和多重约束最小方差(Multiple Constrained Minimum Variance, MCMV)算法等, 这些方法均能在波束域抑制直达波干扰, 但仍存在诸多缺陷。其中, 零点约束的常规波束形成受瑞利限的制约, 波束分辨力不高<sup>[15]</sup>; 后述 3 种高分辨算法方法虽突破了瑞利限, 但均要求期望信号方位已知。特别需要说明的是, MVDR 算法和 MUSIC 算法将期望信号之外的其它信号都作为干扰自动抑制<sup>[16,17]</sup>, 故无法同时适应多目标的情况; MCMV 算法可对多个信号分别施加约束条件, 使直达波方向强制约束为零增益, 目标方向约束为单位增益, 但该方法仍然要确知所有约

收稿日期: 2015-02-03; 改回日期: 2015-07-27; 网络出版: 2015-10-13

\*通信作者: 徐景峰 shiftfeng\_120@163.com

束方向的先验信息<sup>[18]</sup>。

在双基地声呐系统配置一定时,直达波方位可大致确定,而目标回波信号(或其它干扰)往往是未知的。本文在零点约束的基础上,建立一种直达波抑制的高分辨算法,在抑制强直达波干扰的同时具有对多个相干目标信号高分辨的能力。仿真讨论了该算法的波束性能和有效性。

## 2 零点约束

为了使阵列的波束输出响应在固定方向上形成零点,在零点约束条件下对一个理想波束图进行最小二乘逼近。不失一般性,以理想的常规波束形成为例,其波束输出的响应可表示为

$$B_d(\theta) = \mathbf{w}_d^H \mathbf{a}(\theta) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{w}_d$  为理想权矢量,  $\mathbf{a}(\theta)$  为信号方向矢量,且  $\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j2\pi fd \sin \theta/c}, \dots, e^{-j2\pi f(N-1)d \sin \theta/c}]^T$ , 扫描角度  $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$ 。在约束条件下,用一个约束方向图来逼近这个理想方向图,该约束方向图可以表示为

$$B(\theta) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) \quad (2)$$

在一组约束条件下,定义一个  $N \times M$  的约束矩阵  $\mathbf{C}$ :

$$\mathbf{C} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)] \quad (3)$$

$\mathbf{C}$  的  $M$  个列矢量线性独立,一阶零点约束条件可写为

$$\mathbf{w}^H \mathbf{C} = 0 \quad (4)$$

为使理想方向图和约束方向图之间的最小二乘误差最小,利用 lagrange 乘子形式,优化式(5):

$$\mathbf{G} = (\mathbf{w}_d^H - \mathbf{w}^H)(\mathbf{w}_d - \mathbf{w}) + \mathbf{w}^H \mathbf{C} \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\lambda}^H \mathbf{C}^H \mathbf{w} \quad (5)$$

其中  $\boldsymbol{\lambda}$  是一个  $M \times 1$  的乘子矢量,对  $\mathbf{w}$  求梯度,得到:

$$-\mathbf{w}_d^H + \mathbf{w}_o^H + \boldsymbol{\lambda}^H \mathbf{C}^H = 0 \quad (6)$$

利用零点约束条件解出优化权值:

$$\mathbf{w}_o^H = \mathbf{w}_d^H (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_C) \quad (7)$$

其中,矩阵  $\mathbf{P}_C = \mathbf{C}[\mathbf{C}^H \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{C}^H$ , 称之为约束子空间的投影矩阵,  $\mathbf{w}_o^H$  是  $\mathbf{w}_d^H$  在和约束子空间相正交的子空间上的投影,所以,式(7)可以写成

$$\mathbf{w}_o^H = \mathbf{w}_d^H \mathbf{P}_C^\perp \quad \text{或者} \quad \mathbf{w}_o^H = \mathbf{w}_d^H - \mathbf{w}_c^H \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{w}_c^H$  为  $\mathbf{w}_d^H$  在约束子空间上的投影,即  $\mathbf{w}_c^H = \mathbf{w}_d^H \mathbf{P}_C$ 。对于常规波束形成,将理想权值  $\mathbf{w}_d^H$  取为  $\mathbf{C}^H$ , 那么可得约束方向施加的最优权值:

$$\mathbf{w}_o^H = \mathbf{C}^H (\mathbf{I}_N - \mathbf{P}_C) = (\mathbf{C}^H - \mathbf{C}^H) = \mathbf{O} \quad (9)$$

由此可见,约束方向的波束输出响应为零。常规波束形成的最优权值由约束条件唯一确定,可在

约束方向形成稳健的零点,但由于瑞利限的制约,导致信号和干扰的方位接近时,对多目标分辨的性能下降,若两目标均在波束宽度内则无法分辨。

## 3 算法原理说明

与常规波束形成方法相比,高分辨算法虽突破了瑞利限制,但却存在相干干扰下期信号相消的现象。通过空间平滑算法对协方差矩阵进行秩恢复,可以达到解相干的目的<sup>[19-21]</sup>。根据第1节所述关于零点约束的思想,下面在平滑 MVDR 算法的基础上实现约束方向的波束零陷。

在式(4)的约束条件下,将  $N$  维空间划分为约束子空间和正交子空间,其中约束子空间是一个由  $N \times 1$  的约束矢量  $\mathbf{C}$  定义的,那么,正交子空间可由一个  $N \times (N-1)$  的矩阵  $\mathbf{B}$  的列矢量定义,所以,有

$$\mathbf{C}^H \mathbf{B} = \mathbf{O} \quad (10)$$

其中  $\mathbf{O}$  是一个  $N \times (N-1)$  的零矩阵。

将平滑 MVDR 的扫描权矩阵  $\mathbf{w}_m^H$  分解到上述子空间内,权矩阵分解如图1所示。

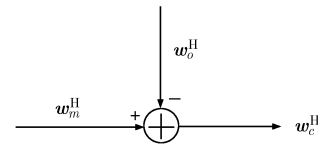


图1 权值分解示意图

图1中  $\mathbf{w}_c^H$ ,  $\mathbf{w}_o^H$  分别是  $\mathbf{w}_m^H$  在约束子空间和正交子空间的分量,其中

$$\mathbf{w}_c^H = \mathbf{w}_m^H - \mathbf{w}_o^H \quad (11)$$

为使正交子空间内的波束输出在约束方向形成稳健的零点,采取如下措施将权矩阵  $\mathbf{w}_o^H$  再次分解:

$$\mathbf{w}_o^H = \mathbf{B} \mathbf{w}_a^H \quad (12)$$

由此,在约束子空间内,输出功率为

$$P_{Y_c} = \mathbf{w}_c^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w}_c^H = [\mathbf{w}_m - \mathbf{B} \mathbf{w}_a]^H \mathbf{R}_{xx} [\mathbf{w}_m - \mathbf{B} \mathbf{w}_a] \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{R}_{xx}$  是前后向平滑的协方差矩阵<sup>[18]</sup>。为使输出功率最小,将式(13)对  $\mathbf{w}_a$  求梯度,并令结果为零,得到

$$[\mathbf{w}_m^H - \mathbf{w}_a^H \mathbf{B}^H] \mathbf{R}_{xx} \mathbf{B} = \mathbf{O} \quad (14)$$

解得

$$\mathbf{w}_a^H = \mathbf{w}_m^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{B} [\mathbf{B}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{B}]^{-1} \quad (15)$$

$\mathbf{B}$  是正交子空间  $\mathbf{P}_C^\perp$  内的列矢量,其中  $\mathbf{P}_C^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{C}[\mathbf{C}^H \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{C}^H$ , 将  $\mathbf{P}_C^\perp$  标准正交化,并选择前  $N-1$  个列矢量,即可得到  $\mathbf{B}$  矩阵,并且满足下面的性质:

$$B^H B = I \quad (16)$$

综上，由约束子空间的信号输出功率最小化条件，最终可由式(12)、式(15)得到正交子空间的最优权矩阵  $w_o^H$ ，该空间的输出就是约束条件下的平滑 MVDR 算法的最终输出结果。数据处理流程如图 2 所示，经过第 1 步处理后将信号变换至正交子空间内， $w_o^H$  根据数据进行自适应变化，经第 2 步处理后约束方向的信号被抑制，而非约束方向信号无畸变输出。



图 2 约束条件下的平滑 MVDR 算法处理流程

### 4 算法性能仿真分析及验证

仿真条件：等间隔 24 基元线阵，阵元间距为  $\lambda/2$ ，信号为单频信号，频率为 1000 Hz，直达波干扰的方位角为  $-35^\circ$ ，相干信号 1 的方位角为  $0^\circ$ ，相干信号 2 的方位角为  $20^\circ$ ，采样频率 6000 Hz，背景噪声为高斯白噪声，两个相干信号等强度，空间平滑的子阵个数为 12，波束角度范围为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

为了有效抑制直达波干扰波束的主瓣能量，提高算法在干扰方向扰动情况下的适应性，在干扰方向附近适当增加零点个数。假设波束零点左右各展宽  $\Delta\theta$ ，定义约束矩阵  $C = [a(\theta_0 - \Delta\theta), a(\theta_0), a(\theta_0 + \Delta\theta)]$ ，干信比为 20 dB，信噪比为 20 dB， $\Delta\theta=1^\circ$ ，

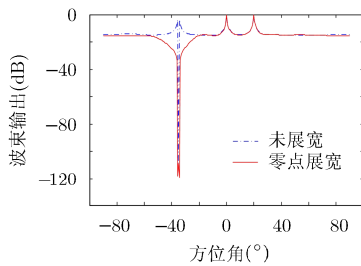


图 3 零点展宽波束图

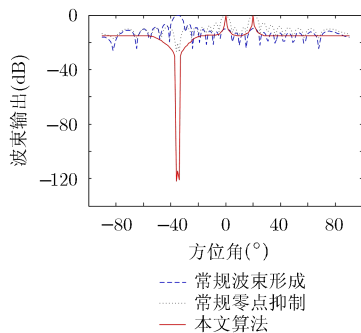


图 5 干信比为 20 dB 的波束图

零点展宽后的波束输出如图 3 所示，由图可见增加零点个数后零陷得到了展宽，有效抑制了直达波干扰波束的主瓣能量，而且并不影响非约束方向的波束性能，体现出了较好的稳健性。下面在此处定义的约束条件下仿真分析算法的性能。

#### 4.1 不同干扰强度的算法性能

信噪比为 20 dB 不变，图 4 和图 5 分别是干信比为 6 dB 和 20 dB 3 种算法的对比情况。由图 4 和图 5 可知，强直达波信号会对弱信号产生较大干扰，经常规的零点抑制后虽然可在直达波方向形成零陷，但是波束性能受瑞利限制，本文算法能在直达波方向形成更深、更宽的零陷，而且两个相干信号的主瓣更窄、旁瓣级更低，波束分辨能力得到了显著提高。

如图 5 所示，随着干信比增大至 20 dB，直达波干扰的旁瓣幅度几乎和信号主瓣幅度相等，常规零点抑制和本文算法对干扰的抑制能力均下降，但常规零点抑制的干扰第 1 旁瓣级升高了约 2 dB，而本文算法的干扰旁瓣级无明显变化，仍然保持在  $-15$  dB 的水平(图 6 所示)。这主要是因为干扰方向的能量总是占有一定的波束宽度，在相同的约束条件下，由于本文算法能形成更宽的波束零陷，所以对干扰旁瓣的抑制能力更强。

#### 4.2 不同信噪比的算法性能

干信比为 20 dB 不变，研究信噪比对算法性能的影响。图 7 所示为不同信噪比条件下的波束图。由图可知，在不同的信噪比条件下，本文算法均能

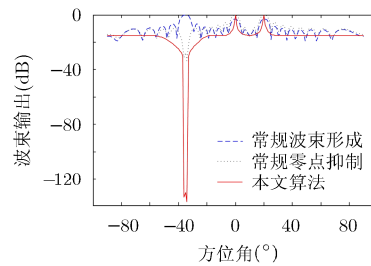


图 4 干信比为 6 dB 的波束图

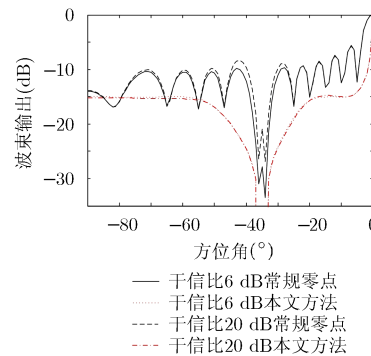


图 6 不同干信比干扰旁瓣级对比

在约束方向形成较宽的波束零陷，有效抑制了直达波干扰的能量。但是，信噪比条件对信号的波束性能影响较大，随着信噪比由 20 dB 降低至 0 dB，信号旁瓣级逐渐升高，主瓣宽度也越来越大，波束性能逐渐恶化。

为了与常规零点抑制方法的波束性能作对比，图 8 和图 9 分别给出了 0° 方向信号的第 1 旁瓣级和主瓣宽度随信噪比的变化情况。由图 8 可知，信噪比越高，信号的第 1 旁瓣级越低，反之亦然。随着信噪比由 20 dB 降低至 -5 dB，本文算法的信号第 1 旁瓣级甚至高于常规零点抑制的结果，而常规零点抑制的信号第 1 旁瓣级随信噪比变化相对较小。除了信号旁瓣外，信噪比对主瓣宽度也有同样的影响，如图 9 所示。

综上所述，本文算法在直达波抑制方面比常规零点抑制具有优势，但相比之下，算法在低信噪比条件下波束性能下降。显而易见，这是因为 MVDR 高分辨算法对噪声环境敏感<sup>[22]</sup>，与本文算法在约束方向形成波束零点并无关系。

### 4.3 仿真实例验证

假设双基地声呐的发射站位于 -35° 左右，接收阵为 24 基元线阵，发射信号为 10 kHz，脉冲宽度为 10 ms，两目标分别位于 0° 和 3°，回波信号与发射信号同频率，接收直达波干扰与目标回波信号的干信比为 20 dB，信噪比为 40 dB，采样率为 80 kHz。图 10~图 12 分别为常规波束形成、常规零点抑制方法和本文高分辨算法对仿真信号处理的结果。如图 10 所示的方位历程图中，由于目标回波信号强度较弱，已经被强直达波干扰所掩蔽。经常规零点抑制方法将直达波干扰去除后，如图 11 所示，目标回波信号可以被检测到，但是由于方位分辨率不高，无法辨别位于 0° 和 3° 的两个接近目标。而经过本文算法处理后，直达波干扰得到有效抑制(如图 12 所示)，两个临近目标的方位分辨率得到提高，相比于传统方法的波束处理结果，0° 和 3° 的两个目标的方位清晰可辨(如图 13 所示)。因此，本文算法具有对多个相干回波信号高分辨的能力，在双基地回波信号处理中具有明显的优势。

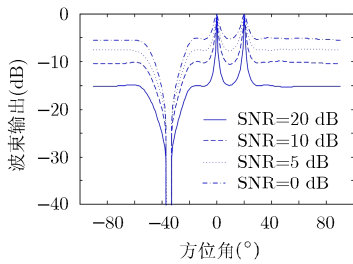


图 7 不同信噪比的波束图

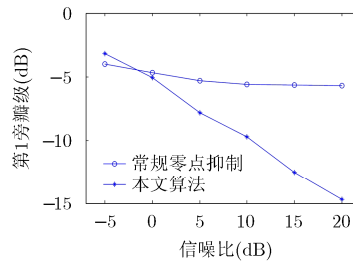


图 8 第 1 旁瓣级随信噪比的变化

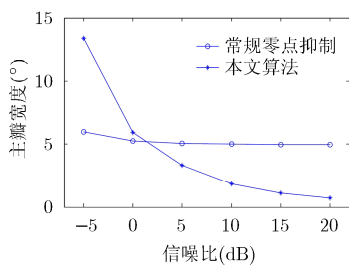


图 9 主瓣宽度 ( $\theta - 3$  dB) 随信噪比的变化

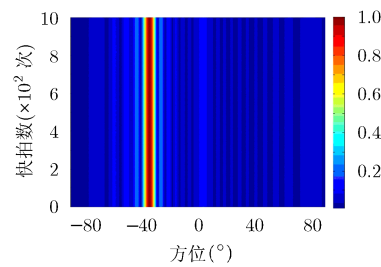


图 10 原始信号常规波束形成历程图

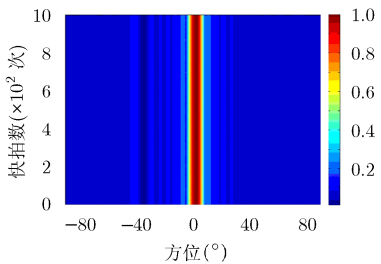


图 11 常规零点抑制后历程图

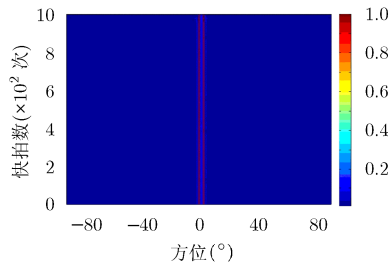


图 12 本文算法处理后历程图

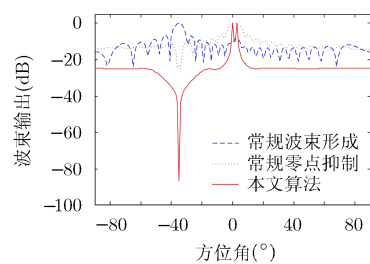


图 13 3 种方法的波束性能对比

## 5 结束语

本文在仅能提供双基地直达波干扰大致方位的前提下，提出了一种直达波抑制的高分辨算法，讨论了干扰强度和信噪比条件对算法性能的影响。仿真结果表明该方法在抑制强直达波干扰的同时具有对多个目标高分辨的能力。

本文算法只讨论了双基地系统发射信号为单频的情况。将宽带信号进行子带分解，对算法进行拓展应用，还可以实现宽带相干信号的强干扰抑制。因此，本文算法具有广泛的实际应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 吴迪. 双基地雷达系统中的若干问题研究[D]. [博士论文], 南京信息工程大学, 2013: 1-10.  
Wu Di. Study on a few issues in sounding with bistatic radar system[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Information Science & Technology, 2013: 1-10.
- [2] Wang Lu-lu, Wang Hong-qiang, Cheng Yong-qiang, *et al.* Joint adaptive waveform and baseline range design for bistatic radar[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(6): 2262-2272.
- [3] 赵艳, 缪善林. 基于外照射源的无源雷达系统直达波对消技术研究[J]. *通信对抗*, 2013, 32(4): 5-7.  
Zhao Yan and Miao Shan-lin. Research of direct signal cancellation for external illuminator based passive radar[J]. *Communication Countermeasures*, 2013, 32(4): 5-7.
- [4] 杨梅, 孙令讲. 共享谱多基地雷达直达波抑制算法[J]. *信号处理*, 2013, 29(3): 360-366.  
Yang Mei and Kong Ling-jiang. Direct-wave interference suppressing algorithm for shared-spectrum multistatic radar[J]. *Signal Processing*, 2013, 29(3): 360-366.
- [5] 李富强, 郑宝周, 张益维, 等. 强直达波干扰下目标特征快速提取方法研究[J]. *现代电子技术*, 2013, 36(17): 9-11.  
Li Fu-qiang, Zheng Bao-zhou, Zhang Yi-wei, *et al.* Fast extraction method of target characteristics in strong direct path wave interference[J]. *Modern Electronics Technique*, 2013, 36(17): 9-11.
- [6] 李辉, 何友, 周洪庆, 等. 基于非合作雷达辐射源的无源雷达目标检测方法[J]. *火力指挥与控制*, 2013, 38(4): 48-51.  
Li Hui, He You, Zhou Hong-qing, *et al.* A new method for passive radar target detection based on non-cooperation radar illuminator[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(4): 48-51.
- [7] Yao Shuai, Fang Shi-liang, and Wang Xiao-yang. Principal component inverse-recursive least-square algorithm for direct wave suppression in bistatic sonar[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2012, 48(5): 640-645.
- [8] 高守传, 黄春琳, 粟毅. 基于RLS横向滤波器自适应抵消法的直达波抑制[J]. *信号处理*, 2004, 20(6): 566-571.  
Gao Shou-chuan, Huang Chun-lin, and Su Yi. Direct wave suppression based on adaptive interference canceling method[J]. *Signal Processing*, 2004, 20(6): 566-571.
- [9] 郭晶, 王英明, 王成. 多基地主动声纳直达波抑制研究[J]. *电声基础*, 2009, 33(7): 38-40.  
Guo Jing, Wang Ying-ming, and Wang Cheng. Research on direct wave techniques of multistatic active sonar system interference elimination[J]. *Elementary Electroacoustics*, 2009, 33(7): 38-40.
- [10] 高守传, 粟毅, 黄春琳, 等. 用平均法实现瞬态信号接收中的直达波抑制[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(1): 21-25.  
Gao Shou-chuan, Su Yi, Huang Chun-lin, *et al.* Using of mean-subtraction method to suppress the direct wave in instantaneous signal receiving[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(1): 21-25.
- [11] 高洁, 李磊, 刘云涛, 等. 主动声纳直达波干扰抑制的盲分离算法[J]. *声学技术*, 2009, 28(4): 537-540.  
Gao Jie, Li Lei, Liu Yun-tao, *et al.* A blind source separation approach to active sonar's direct path interference suppression[J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28(4): 537-540.
- [12] 黄聪. 强相干干扰抑制技术研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2012: 19-21.  
Huang Cong. Study of strong coherent interference suppression[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2012: 19-21.
- [13] 范展, 梁国龙, 王逸林. 一种零陷展宽鲁棒自适应波束形成算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(11): 2764-2770.  
Fan Zhan, Liang Guo-long, and Wang Yi-lin. Robust adaptive beamforming with null widening[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2764-2770.
- [14] 李文兴, 毛晓军, 孙亚秀. 一种新的波束形成零陷展宽算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(12): 2882-2888.  
Li Wen-xing, Mao Xiao-jun, and Sun Ya-xiu. A new algorithm for null broadening beamforming[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 2882-2888.
- [15] 邹吉武. 多基地声纳关键技术研究[D]. [博士论文], 哈尔滨工程大学, 2012: 39-49.  
Zou Ji-wu. Study on multistatic sonar key technologies[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2012: 39-49.
- [16] 邹吉武, 孙大军. 线阵双基地声纳波束零点形成 MUSIC 算法[J]. *兵工学报*, 2010, 31(3): 364-368.  
Zou Ji-wu and Sun Da-jun. MUSIC algorithm of beam null forming online array of bistatic sonar[J]. *Acta*

- Armamentarii*, 2010, 31(3): 364-368.
- [17] 邹吉武, 孙大军, 黄新华. 圆阵双基地声纳直达波抑制技术研究[J]. 高技术通讯, 2010, 20(1): 106-110.  
Zou Ji-wu, Sun Da-jun, and Huang Xin-hua. Study on direct wave reducing technology based on circular array bistatic sonar[J]. *High Tech Communication*, 2010, 20(1): 106-110.
- [18] 姚瑶, 张明敏, 袁骏. 基于零陷展宽的双基地声纳直达波抑制算法[J]. 声学技术, 2012, 31(3): 310-313.  
Yao Yao, Zhang Ming-min, and Yuan Jun. A direct path interference suppression algorithm of bistatic sonar based on null broaden method[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(3): 310-313.
- [19] Lee Ta-sung and Lin Tsui-tsai. Adaptive beamforming with interpolated arrays for multiple coherent interferers[J]. *Signal Processing*, 1997, 57(2): 177-194.
- [20] 戴征坚, 李志舜. 基于空间平滑处理的稳健宽带高分辨方位估计算法[J]. 声学技术, 2005, 24(4): 250-253.  
Dai Zheng-jian and Li Zhi-shun. Robust wideband high-resolution direction of arrival estimation based on spatial smoothing[J]. *Technical Acoustics*, 2005, 24(4): 250-253.
- [21] 李会勇, 刘芳, 谢菊兰, 等. 一种改进的极化敏感阵列解相干算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2628-2632.  
Li Hui-yong, Liu Fang, Xie Ju-lan, et al. An improved decorrelation algorithm for polarization sensitive array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2628-2632.
- [22] 章新华, 范文涛, 康春玉, 等. 波束形成与独立分量分析融合的宽带高分辨方位估计方法[J]. 声学学报, 2009, 34(4): 303-310.  
Zhang Xin-hua, Fan Wen-tao, Kang Chun-yu, et al. Broadband high-resolution bearing estimation method combined with independent component analysis and beamforming[J]. *Acta Acoustics*, 2009, 34(4): 303-310.
- 徐景峰: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为水声技术应用研究.  
韩树平: 男, 1965年生, 教授, 主要研究方向为声呐信号处理和水声装备技术应用.  
舒象兰: 男, 1980年生, 讲师, 主要研究方向为声呐信号处理和水下目标探测.  
马 鑫: 男, 1977年生, 副教授, 主要研究方向为声呐信号处理和水声对抗.  
董永峰: 男, 1979年生, 讲师, 主要研究方向为声呐信号处理和水声对抗.