

强干扰背景下水中微弱信号的垂直 阵波束形成研究

陈韶华, 张恒, 秦银

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北宜昌 443003)

摘要 针对垂直阵在强干扰背景下采用常规波束形成方法难以估计目标俯仰角的问题, 研究了超波束与逆波束形成等方法在垂直阵中的应用。讨论了超波束与逆波束形成原理, 仿真分析了其波束图, 表明分辨率比常规波束形成有明显提高。实测数据分析表明: 超波束方法可以分辨目标与干扰的俯仰角轨迹, 对角加载逆波束 MVDR 方法可以获得目标的俯仰角轨迹。研究结果解决了强干扰背景下微弱目标信号俯仰角难以估计的问题, 为微弱目标定位提供了新的途径。

关键词 干扰抑制; 垂直阵; 超波束; 逆波束

中图分类号 TB566

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2020)06-0468-04

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.06.004

Underwater Weak Signal Beamforming with Vertical Array under Strong Interference

CHEN Shaohua, ZHANG Heng, QIN Yin

(No. 710 R & D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract It's difficult to estimate the pitch angle of a target under strong interference with a vertical array by using conventional beamforming (CBF) methods. Aiming at this problem, this paper studied the application of some new methods like hyper beamforming (HBF) and inverse beamforming (IBF). The theoretical basis of the two methods were discussed, and the simulated beam patterns showed that their resolutions were significantly improved compared to CBF. Field measured data showed that, the HBF distinguished the tracks of the target and interference, and the diagonal loading IBF MVDR method could obtain the target's pitch angle track. This research primitively resolved the problem of pitch angle estimation of weak signal under strong interference, and provided a new approach for underwater weak signal's localization.

Key words interference suppression; vertical array; hyper beamforming (HBF); inverse beamforming (IBF)

0 引言

水下目标定位是水声工程研究的一个重要方向。在球坐标系中, 目标定位需要距离、俯仰角与方位角信息。在各向同性噪声背景中, 可以通过平

面或立体小基阵时延估计法估计单个目标的俯仰角^[1-2]。在干扰背景下, 一般采用垂直阵估计目标的俯仰角。由于多径传播的影响, 垂直方向上信号的相干性下降, 阵列处理的分辨率与阵增益降低^[3-4], 引起俯仰角估计的困难或失效。提高空间

分辨率有增大阵列孔径与采用高分辨方法等途径, 而增大阵列孔径受到物理条件的限制。本文研究高分辨方法如超波束与逆波束方法在垂直阵俯仰角估计中的应用, 通过实测数据分析表明, 比常规波束形成方法性能有明显提高。

1 超波束与逆波束形成原理

1.1 超波束形成^[5-6]

常规波束形成是将各阵元接收到的信号进行相应的时间延迟之后, 使各路信号同相叠加, 提高信噪比, 输出最大的时延对应角度即为信号入射角度。

超波束形成 (hyper beamforming, HBF) 是阵列信号处理领域内能同时进行波束锐化和旁瓣抑制的新技术。超波束形成的原理就是在将传统波束形成的阵元分为左右 2 个子阵, 分别求出左波束和右波束, 再分别求得和波束和差波束, 通过和波束和差波束的线性组合得到超波束的输出。

假定阵元间隔为 d , 时间参考点选在阵列中心, 入射波为单频信号 $A \cos(2\pi ft)$, 入射方向为 θ , 则第 i 个阵元接收到的信号为

$$s_i(t) = A \cos\left[2\pi f\left(t + (M - i + \frac{1}{2})\frac{d \sin \theta}{c}\right)\right] \quad (1)$$

假设预成波束方向为 θ_0 , 并令

$$\phi_0 = 2\pi \frac{d \sin \theta_0}{\lambda}, \quad \phi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}$$

左边 M 个阵元构成的左子阵形成的左半波束 $s_L(t)$ 为

$$s_L(t) = \sum_{i=1}^M s_i(t) = \sum_{i=1}^M A \cos\left[2\pi f t - (M - i + \frac{1}{2})(\phi_0 - \phi)\right] \quad (2)$$

右边 M 个阵元构成的右子阵形成的右半波束 $s_R(t)$ 为

$$s_R(t) = \sum_{i=M+1}^{2M} s_i(t) = \sum_{i=1}^M A \cos\left[2\pi f t + (i - \frac{1}{2})(\phi_0 - \phi)\right] \quad (3)$$

则超波束为

$$s_{\text{Hyper}}(t) = |s_L(t)| + |s_R(t)| - |s_L(t) - s_R(t)| = |s_L(t)| + |s_R(t)| - |s_D(t)| \quad (4)$$

一般的超波束形成公式

$$s_{\text{Hyper}}(t) = [|s_L(t)| + |s_R(t)|]^n - |s_D(t)|^n \quad (5)$$

式中, n 取值范围为 0.1~2。

1.2 逆波束形成^[7-8]

逆波束形成 (inverse beamforming, IBF) 是将接收信号的协方差矩阵进行 Toeplitz 平均后, 再进行时延补偿, 信号叠加。

对阵元数为 M 的等间距线阵, 目标从 θ 方向辐射频率为 f 的窄带信号, 经水声信道传播后到达各阵元, 则各阵元接收信号可表示为

$$x_i(t) = P_i s(t) e^{j(i-1)dk \cos \theta} + n_i(t)$$

式中: $s(t) = e^{j2\pi ft}$ 为目标在 t 时刻辐射信号; P_i 为第 i 个阵元接收信号幅度。

则阵元间的协方差矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} x_1(t)x_1^*(t) & x_1(t)x_2^*(t) & \cdots & x_1(t)x_M^*(t) \\ x_2(t)x_1^*(t) & x_2(t)x_2^*(t) & \cdots & x_2(t)x_M^*(t) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_M(t)x_1^*(t) & x_M(t)x_2^*(t) & \cdots & x_M(t)x_M^*(t) \end{bmatrix}$$

该矩阵属于 Hermitian 阵。对 R 做 Toeplitz 平均, 将其转化为具有空间分布的一维分布数据:

$$D(n) = \frac{1}{M - |n|} \sum_{p=0}^{M-1-|n|} R(p, p+n)$$

式中: $|n| \leq M - 1$; $0 \leq p \leq M - 1 - |n|$ 。

对 $D(n)$ 做积分可得到 IBF 算法在 θ' 方向的逆波束

$$\text{IBF_FIM}(f, \theta') = \sum_{n=-M}^{M-1} D(n) e^{-jndk \cos \theta'}$$

对上式中的 θ' 做空间扫描就可完成 IBF, 得到空间谱。

逆波束形成的旁瓣比常规波束形成高。为了抑制旁瓣, 对 $D(n)$ 进行 MVDR 波束形成, 同时降低主瓣宽度与旁瓣高度^[8]。

2 计算机仿真

首先比较超波束形成的波束图, 如图 1 所示, 是 10 元阵超波束与常规波束形成的波束图, 阵元间距为半波长, 信噪比为 0, $n=0.5$ 。可见, 与常规波束相比, 超波束形成的主瓣更窄, 旁瓣更低。一般而言, n 取值在 0.1~2 之间, $n=2$ 时与常规波束

有相同的特性^[9], n 越小主瓣越窄旁瓣越低, 但太小时会出现性能不稳定的现象。

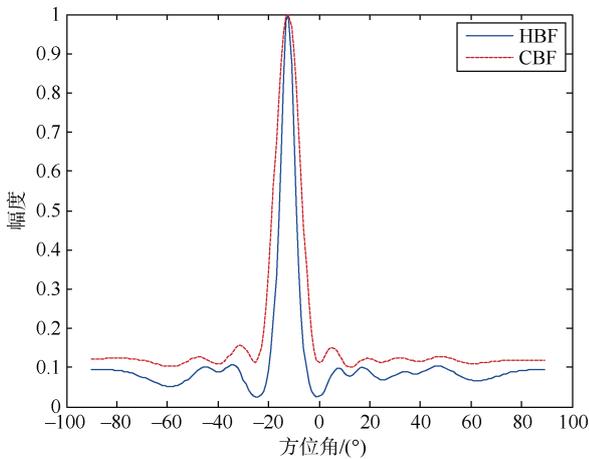


图 1 超波束与常规波束形成的波束图
Fig. 1 Beam patterns of HBF and CBF

图 2 比较了超波束形成与常规波束形成的分辨能力。10 元阵, 阵元间距半波长, 2 个信号幅度相近, 方位 -12.5° 和 0° , 信噪比为 0, 超波束的 $n=0.3$ 。可以看出, 超波束的分辨能力更高, 但要求 2 个信号幅度接近。如果信号幅度差别较大, 则较弱的一个将掩盖在较强的信号副瓣中。

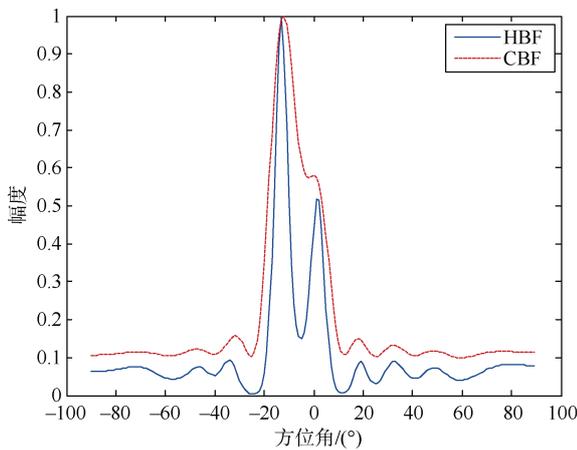


图 2 超波束与常规波束形成的分辨能力
Fig. 2 Resolution capability of HBF and CBF

图 3 是 10 元阵逆波束与常规波束的波束图, 阵元间距为半波长, 信噪比为 10 dB。可见, 逆波束形成的主瓣比常规波束的窄, 但旁瓣更高。信噪比较低如 0 时, 逆波束形成的旁瓣升高较慢, 与常规

波束的旁瓣差距缩小。如果采用对角加载 MVDR 逆波束形成, 则旁瓣大幅度降低, 干扰抑制能力增强。

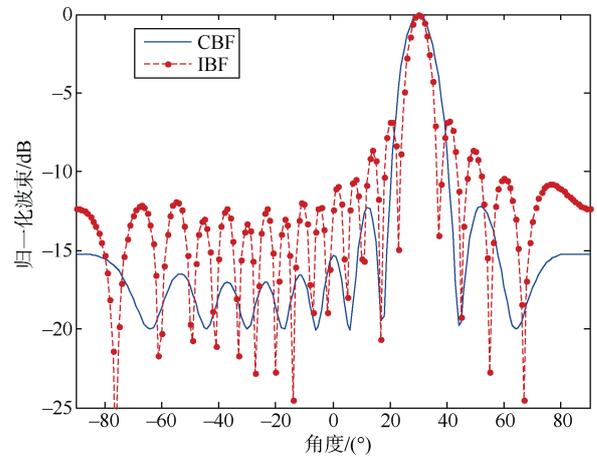


图 3 逆波束与常规波束形成的波束图
Fig. 3 Beam patterns of IBF and CBF

最后, 仿真垂直阵多径条件下 10 元阵的常规波束、超波束与对角加载 MVDR 逆波束形成结果, 如图 4 所示。仿真参数为海深 200 m, 声源深度 10 m, 接收深度 150 m, 水平距离 1 000 m。以正上方为 0° , 水平 90° , 直达波、海面与海底反射 3 条路径入射的俯仰角分别是 82.0° 、 80.9° 、 103.5° , 形成 82° 与 103° 附近 2 个峰值。信号与噪声均为宽带, 中心频率低于半波长对应的频率。可见, 超波束与逆波束形成均有较低旁瓣, 说明这 2 种方法抑制噪声能力优于常规波束。此外, 可以看出超波束有更高分辨率。

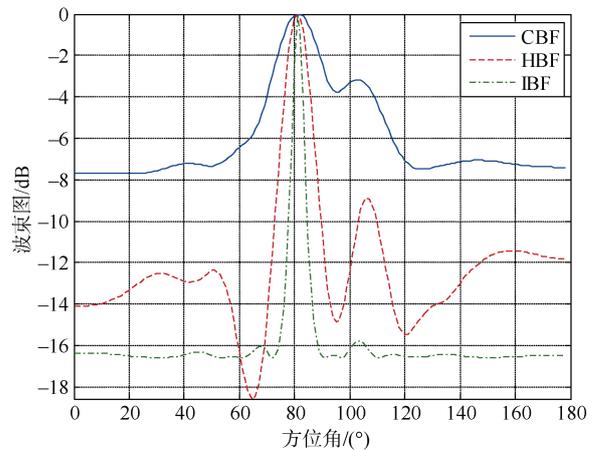


图 4 常规波束、超波束与逆波束形成比较
Fig. 4 Comparison of CBF, HBF and IBF

3 实测数据分析

在近海检测微弱水声信号, 不可避免面临附近港口工业干扰、渔船与其他船舶的干扰, 检测背景不再是理论上的各向同性高斯白噪声背景。一个显著的区别是, 对于各向同性高斯白噪声背景中的微弱信号, 常规方法只要增加积分时间, 总可以提高检测能力。但对于强干扰背景中的微弱信号, 提高积分时间, 信号与干扰都获得累积, 干扰不能被抑制。强干扰背景下的信号检测, 从波束形成的角度, 一方面可以通过窄主瓣设计转化为多目标分辨问题, 另一方面可以通过低旁瓣设计提高干扰抑制能力。

图5(a)是强干扰背景下微弱信号的垂直阵常规波束形成结果, 以正上方为 0° , 水平 90° 。远处传来的强干扰从接近水平方向入射, 微弱信号由远到近通过垂直阵, 期间还有偶发脉冲干扰。可见, 常规波束形成难以辨别微弱信号的俯仰角轨迹。图5(b)是超波束形成结果, 可以分辨出信号与干扰的俯仰角轨迹。图5(c)是对角加载MVDR逆波束形成结果, 信号的俯仰角轨迹非常清晰。比较可见, 强干扰背景下, 超波束与逆波束形成的性能优于常规波束形成方法。

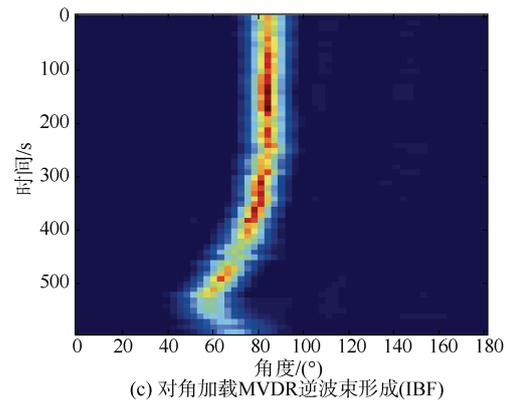
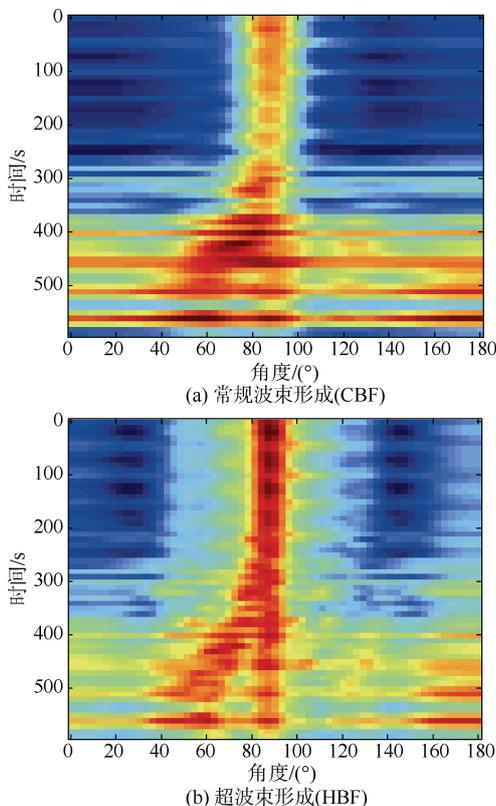


图5 强干扰背景下常规波束、超波束与逆波束形成
Fig. 5 CBF, HBF and IBF under strong interference

4 结束语

超波束与逆波束形成方法比常规波束形成具有更好的分辨能力和干扰抑制能力。讨论了超波束与逆波束形成原理, 仿真分析了其波束形成性能, 并应用于实测强干扰背景下微弱信号俯仰角估计中。仿真与试验结果表明: 超波束与逆波束方法均能在强干扰背景下估计微弱信号俯仰角轨迹, 与常规波束形成相比, 性能有显著改善。

参考文献

- [1] 陈韶华. 水下自主声探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [2] 陈韶华, 赵冬艳, 陈川[J]. 海洋声学环境下水中声源的时延估计法定位精度分析[J]. 声学学报, 2014, 39(5): 549-556.
- [3] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 杨坤德, 孙超. 浅海环境中垂直线列阵的空间增益分析[J]. 电声技术, 2007, 31(10): 4-7.
- [5] 王昭辉, 刘云涛, 蔡惠智. 基于修正超波束技术的精确定向算法探讨[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 651-654.
- [6] SCHLIETER H. Passive sonar detection improvement by hyper beam technique[J]. Proceedings of UDT Europe, 2006, 7A-2.
- [7] 郑恩明, 陈新华, 孙长瑜, 等. 一种改善逆波束形成显示效果的方法[J]. 应用声学, 2013, 32(5): 388-394.
- [8] 杨晴, 王良. 线性约束自适应逆波束形成研究[J]. 应用声学, 2017, 36(2): 168-174.
- [9] 周霖仪. 2D HyperBeam 在主动阵列信号检测中的应用[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(6): 112-114.

(责任编辑: 张曼莉)