

基于 FOCUSS 的水中目标回波亮点高分辨提取方法

李国良¹, 范威², 郭燕子¹

(1. 中国人民解放军 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108)

摘要: 水中目标回波亮点空间分布是估计目标尺度、确定目标要害部位、目标识别分类的主要目标特性依据。分析了水中目标回波亮点提取的主要方法及其优缺点, 针对提高水中目标回波亮点方位估计分辨率的问题, 采用欠定系统局域解法(Focal Undetermined System Solver, FOCUSS)压缩感知信号处理方法估计目标回波亮点的方位分布, 并与时域常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF)方法、子阵最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)波束形成方法进行了比较。试验数据处理结果表明, FOCUSS 压缩感知方法的回波亮点方位输出主瓣是“针形”的且无明显旁瓣, 分辨率高于子阵 MVDR、CBF 波束形成处理结果。另一方面, FOCUSS 压缩感知方法对信噪比的要求高, 适用于良好信噪比条件下的回波亮点提取。

关键词: 高分辨; 回波亮点; 欠定系统局域解法; 子阵最小方差无失真响应; 常规波束形成

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-04-0388-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.04.016

A high resolution method of echo highlight extraction based on FOCUSS algorithm

LI Guo-liang¹, FAN Wei², GUO Yan-zi¹

(1. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Shanghai 201108, China)

Abstract: The spatial distribution of echo highlights is the main characteristics of underwater target for target length estimation, vital parts location, target recognition and classification in active sonar application. The advantages and disadvantages of various methods for echo highlight extraction are discussed in this paper. In order to improve the resolution of highlights in the aspect domain, the compressive sensing algorithm of FOCal Undetermined System Solver (FOCUSS) is applied to aspect angle estimation in echo highlights extraction processing. Meanwhile the proposed method is compared with Conventional Beamformer (CBF) and sub-array Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) algorithm. Through measured data processing, the results show that the output of the FOCUSS algorithm has a needle shaped main-lobe with unobvious side-lobes and its resolution is higher than that of CBF and sub-array MVDR processing. On the other hand, a higher signal-to-noise ratio is demanded in the FOCUSS algorithm for highlight extraction application.

Key words: high-resolution; echo highlights; Focal Undetermined System Solver(FOCUSS); sub-array Minimum Variance Distortionless Response(MVDR); Conventional Beamforming(CBF)

0 引言

水中目标回波亮点空间分布特征是主动声呐估计目标尺度、确定目标部位、目标识别分类的主要依据^[1]。回波亮点特征一般采用声呐阵列测量和提取, 如猎雷声呐、反蛙人声呐、前视避碰声呐、

多波束测深声呐、鱼雷自导声呐等主动声呐通过直线阵列或面阵列测量目标回波信号并通过波束形成分辨回波亮点。

高分辨测向是通过阵列回波信号数据提取目标回波亮点参数的关键技术。常规方法是采用时延-求和时域常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF)波束形成实现水中目标水平亮点、垂直亮点空间参数提取^[2-4]。由于主瓣宽度及旁瓣的限制, CBF 的提取结果往往是“细节模糊”的回波亮点声图像。

子阵最小方差无失真响应(Minimum Variance

收稿日期: 2018-03-04; 修回日期: 2018-05-26

作者简介: 李国良(1981—), 男, 陕西渭南人, 工程师, 研究方向为水声装备试验研究。

通讯作者: 李国良, E-mail: gyz0411@163.com

Distortionless Response, MVDR)波束形成方法^[5]是被动声呐信号处理常用的高分辨方位估计方法,通过估计阵列信号协方差矩阵,构造随时间快拍变化的自适应权矢量,使目标方位信号无失真输出、波束输出噪声方差最小,实现高分辨测向。对于主动声呐应用,常规 MVDR 提取目标回波亮点信号面临以下问题^[5]: (1) 不同目标或目标散射体不同亮点部位的回波信号是高度相关的,导致信号相消; (2) 目标回波信号占有的时间长度小,导致用于信号协方差矩阵估计的时间快拍不足,进而信号协方差矩阵估计不准确。(3) 主动声呐与被动声呐应用 MVDR 都面临算法固有的稳健性问题。

子阵 MVDR 处理^[6-8]通过重叠子阵空间平滑解相关克服了信号相消问题,同时划分子阵、降维,减小了协方差矩阵估计的积分长度。另一方面,通过时间平滑、空间平滑和对角加载正则化等手段提高了 MVDR 算法的稳健性。

近年来,许多研究工作^[9-11]把压缩感知稀疏重建方法应用于被动声呐目标方位估计,其原理是利用稀疏先验条件,即目标噪声源在空间方位上的分布是稀疏的,把方位估计问题转化为 1-范数优化问题,具有比 CBF 波束形成、MVDR 更高的方位分辨性能。本文针对主动声呐回波亮点提取应用,采用欠定系统局域解法(Focal Undetermined System Solver, FOCUSS)压缩感知方法^[12]提取外形缩比 Benchmark 潜艇模型目标的回波亮点,并与时域 CBF、时域子阵 MVDR 方法的处理结果进行比较。

1 水中目标主动回波亮点提取方法

本节针对直线阵列成像系统,分别介绍时延 CBF 波束形成、时域子阵 MVDR 波束形成和 FOCUSS 压缩感知信号处理技术的目标回波亮点提取的实现过程。

1.1 时域 CBF 波束形成处理

设 M 元直线水听器阵列接收的回波信号为 $\mathbf{x}(u)=[x_1(u), x_2(u), \dots, x_M(u)]^T$, 时间采样点为 $u=1, 2, \dots, U$, 其中, 符号 T 代表矢量的转置。时延-求和 CBF 波束形成输出为

$$\mathbf{z}(\theta, u) = \sum_{m=0}^M \mathbf{w}(\theta)^H \cdot \mathbf{x}[u - \Delta(\theta)] \quad (1)$$

其中, 符号 H 代表矢量共轭转置, 时间延迟矢量为 $\Delta(\theta) = \mathbf{r} \sin \theta / c_0$, $\mathbf{r} = [0, d, 2d, \dots, (M-1)d]^T$ 为阵元位置矢量, d 为阵元间距, $\mathbf{w}(\theta)$ 为固定的权矢量或窗函数, 它不随时间采样点变化。

1.2 时域子阵 MVDR 波束形成处理

子阵 MVDR 处理把通道数 M 的阵列信号 $\mathbf{x}(u)$ 按长度 L 划分子阵, $\mathbf{x}_l(u)=[x_l(u), x_{l+1}(u), \dots, x_{l+L-1}(u)]^T$, $l=0, 1, \dots, M-L$, 时域子阵 MVDR 波束形成输出为^[8]

$$\mathbf{z}(\theta, u) = \sum_{l=0}^{M-L} \mathbf{w}(\theta, u)^H \cdot \mathbf{x}_l(u) \quad (2a)$$

其中, 成像点 (θ, u) 的权矢量 $\mathbf{w}(\theta, u)$ 为

$$\mathbf{w}(\theta, u) = \frac{\mathbf{R}_L^{-1}(u) \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{R}_L^{-1}(u) \mathbf{a}(\theta)} \quad (2b)$$

其中, 阵列方位导向矢量为

$$\mathbf{a}(\theta) = \exp[-i2\pi f_0 \sin(\theta/c_0) \mathbf{r}] \quad (2c)$$

子阵协方差矩阵 $\mathbf{R}_L(u)$ 为

$$\mathbf{R}_L(u) = \frac{1}{N_K N_L} \sum_{l=0}^{M-L} \sum_{n=u-K}^{u+K} \mathbf{x}_l(n) \mathbf{x}_l^H(n) + \varepsilon \mathbf{I} \quad (2d)$$

其中, $N_L = M - L + 1$ 为参与空间平滑的子阵数, $N_K = 2K + 1$ 为时间平滑的窗口长度, ε 为对角加载正则化参数。

1.3 FOCUSS 压缩感知处理

首先将 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间的空间方位等间隔划分为 N 个离散的方位角, 定义方位角矢量为 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$, 目标回波亮点空间分布是离散方位角 θ_n 与时刻 u 的函数, 表示为 $s_n(u)$, 定义目标回波亮点方位分布矢量为 $\mathbf{s}(u) = [s_1(u), s_2(u), \dots, s_N(u)]^T$, 它与阵列回波信号 $\mathbf{x}(u)$ 满足离散形式的线阵信号声场模型^[13], 即:

$$\mathbf{x}(u)_{M \times 1} = \mathbf{A}(u)_{M \times N} \mathbf{s}(u)_{N \times 1} \quad (3a)$$

其中, 阵列响应矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A}(u)_{M \times N} = \begin{bmatrix} e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_1 \sin \theta_1} & e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_1 \sin \theta_2} & \dots & e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_1 \sin \theta_N} \\ e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_2 \sin \theta_1} & e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_2 \sin \theta_2} & \dots & e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_2 \sin \theta_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_M \sin \theta_1} & e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_M \sin \theta_2} & \dots & e^{-i\frac{2\pi f_0}{c_0} r_M \sin \theta_N} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

线性方程组(3a)的解是目标回波亮点方位分布 $\mathbf{s}(u)$, 一般地, $M \ll N$, 方程组(3a)是欠定的线性方程组, 需要增加正则化条件以满足线性方程组的解唯一性要求。考虑到水下目标回波亮点的空间分布是稀疏的, 即仅少数有限的方位角存在回波亮点信号, 方程(3a)可以通过 1-范数实现正则化^[9], 即方程(3a)可以转化为优化问题:

$$\min \|\mathbf{s}\|_1, \quad \text{st. } \mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (4)$$

其中, $\|\mathbf{s}\|_1 = |s_1| + |s_2| + \dots + |s_N|$ 。

FOCUSS 方法是求解欠定线性方程组稀疏解的迭代重加权最小二乘计算技术^[12], 其原理是通过迭

代求解 2-范数($\|s\|_2 = [|s_1|^2 + |s_2|^2 + \dots + |s_N|^2]^{1/2}$)最优解来逼近 1-范数稀疏解,实现过程为首先构造仿射变换权重矩阵:

$$W_k = \text{diag}[|s_{nk}|^p], \quad k=1,2,\dots \quad (5)$$

其中, p 是幂参数^[12], s_{nk} 是第 k 次迭代运算后的解,对 s 进行仿射变换 $s = Ws'$, 将该变换式代入方程(4), 计算方程组 $AW_{k-1}s' = x$ 的正则化加权最小二乘解为^[14]:

$$s'_k = W_k^H A^H (AW_k W_k^H A^H + \gamma I)^{-1} x \quad (6)$$

其中, γ 为加权最小二乘正则化参数, 当 $\|s_{k+1} - s_k\| < \delta$ (δ 为一小量)时, 迭代过程结束, 方程(3)的解为 $s = Ws'$ 。

2 试验数据处理与分析

2.1 目标回波试验数据

本节分别采用时域 CBF 波束形成、时域子阵 MVDR 波束形成、FOCUSS 压缩感知方法, 从线阵列多通道回波数据中提取水中目标回波亮点。图 1 是水中目标回波信号的测量原理。

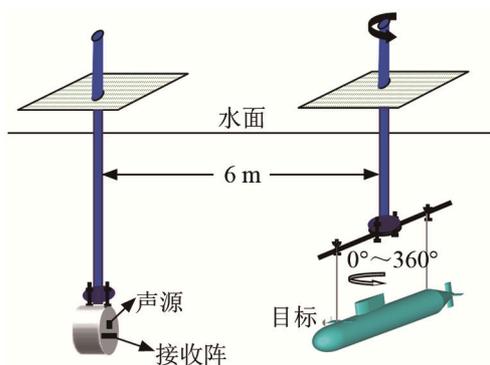


图 1 目标回波测试原理

Fig.1 Schematic diagram of experimental arrangements

被测水中目标是由外壳和加肋内壳组成的复杂外形缩比 Benchmark 潜艇模型目标, 其长度为 1.55 m, 主体圆柱壳的直径为 18.75 cm。试验采用声源的中心频率为 160 kHz、L 形接收阵列^[3]的有效阵元数为 $M=28$, 阵元间距为 5 mm。主动发射信号采用 160 kHz 的 CW 脉冲信号, 脉宽为 0.02 ms。

图 2 是目标在各个方位姿态的单通道回波信号, 本文对目标正横附近 -10° 和 10° 处的数据进行处理, 如图中红色虚线所示。从图 2 中可以看出目标正横附近的回波信号受内部加肋结构的影响较小, 信号表现为典型的“3 亮点”特征。

2.2 目标回波亮点提取结果分析

试验数据处理参数为: 空间方位角离散划分间

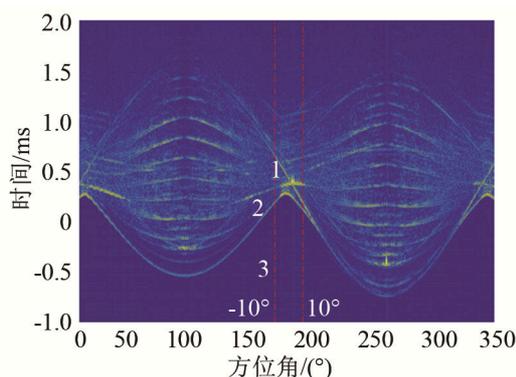


图 2 不同目标姿态角条件下的目标回波信号

Fig.2 Echo measurement results at different target's aspects angles

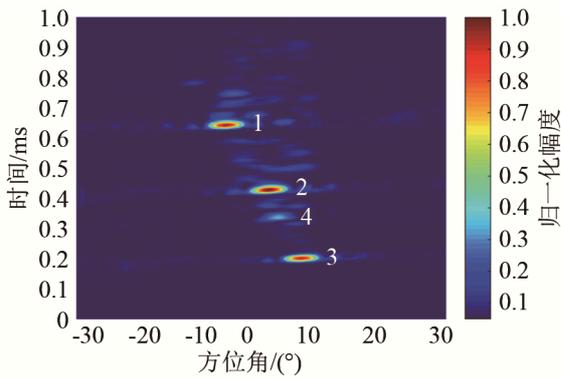
隔为 0.5° 、水中声速为 $1486.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在子阵 MVDR 处理中, 参数取值为 $L=14$ 、 $K=1$ 、 $\varepsilon=0.01 \cdot \text{tr}(R_L)/L$; 其中, $\text{tr}(R_L)$ 表示子阵协方差矩阵 R_L 的迹^[7], 在 FOCUSS 压缩感知处理中, 参数取值为 $p=0.6$ 、 $\delta=0.001$ 、 $\gamma=0.001$ 。

图 3(a)、3(b)、3(c)分别是目标艏部朝向主动声呐(-10° 目标姿态角)条件下时域 CBF 波束形成、时域子阵 MVDR、FOCUSS 压缩感知方法的目标回波亮点提取结果, 横坐标为方位角, 纵坐标为回波到达时间。对于姿态角 -10° 的情况, 不同回波亮点在方位-时间上的位置差异大, 3 种方法都能分离全部回波亮点, 其中 1[#]~3[#]回波亮点分别对应单层壳目标的艏部、围壳、艉部“3 亮点”特征, 其对应的回波信号参见图 2 中的标注。

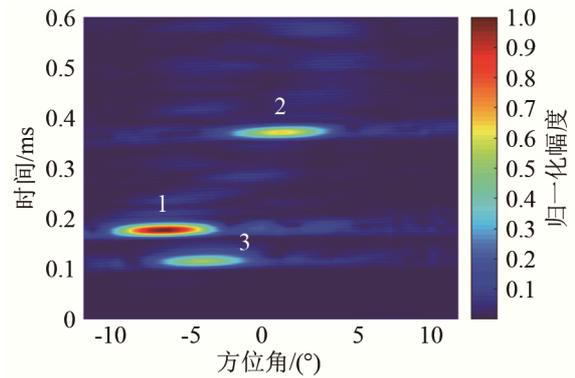
除了目标“3 亮点”特征外, 图 3 还提取到了 4[#]回波亮点, 其信噪比小于 1[#]~3[#]回波亮点, FOCUSS 压缩感知方法提取的 4[#]回波亮点在方位-时间上最不明显, 说明 FOCUSS 压缩感知方法依赖于回波信号的信噪比。

图 4 是 2[#]回波亮点的方位分布输出, 纵坐标为输出幅度(dB), 并按最大值进行了归一化。通过对 3 种方法输出主瓣宽度的比较可以分析, 子阵 MVDR 方法与 FOCUSS 压缩感知方法的分辨率高于时域 CBF 波束形成的分辨率, FOCUSS 压缩感知处理结果的主瓣呈“针形”, 并且其方位输出无明显旁瓣, 这是 FOCUSS 压缩感知方法稀疏解特性的体现。

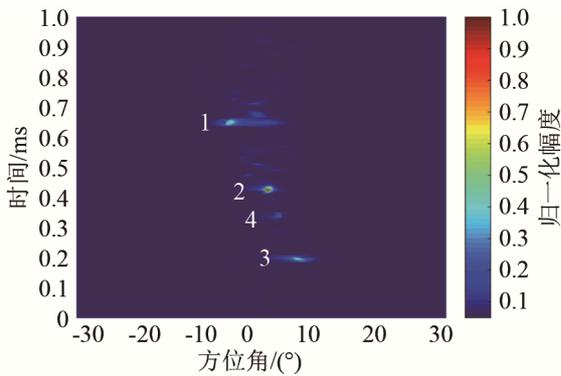
图 5(a)、5(b)、5(c)分别是目标艏部朝向主动声呐(10° 目标姿态角)条件下时域 CBF 波束形成、时域子阵 MVDR、FOCUSS 压缩感知方法的目标回波亮点提取结果。CBF 波束形成处理方法与子阵 MVDR 都实现了对 1[#]回波亮点、2[#]回波亮点和 3[#]回波亮点在方位-时间上的分离。FOCUSS 压缩感知方法在 1[#]回波亮点附近还提取到另一回波亮



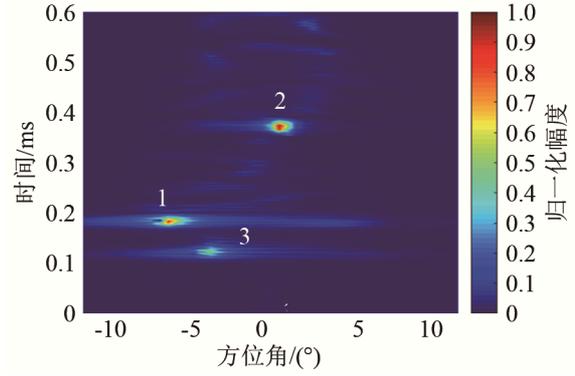
(a) CBF 方法提取结果



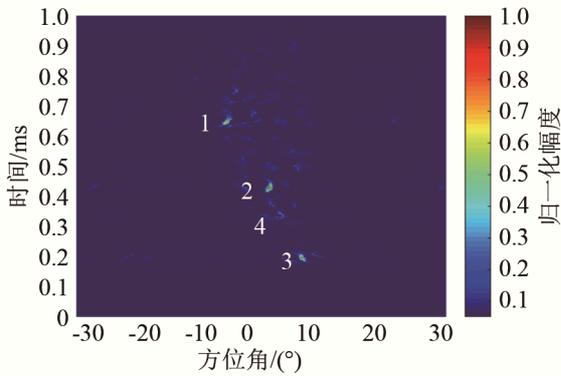
(a) CBF 处理方法提取结果



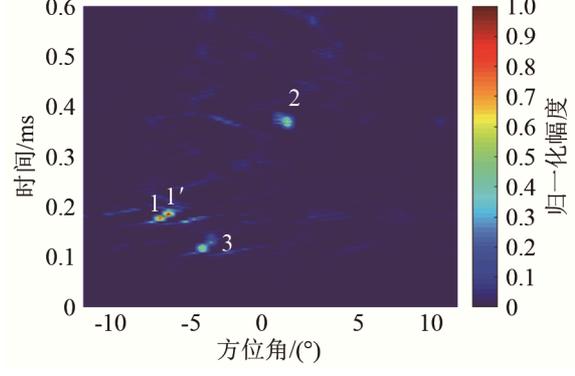
(b) 子阵 MVDR 方法提取结果



(b) 子阵 MVDR 处理方法提取结果



(c) FOCUSS 压缩感知方法提取结果



(c) FOCUSS 处理方法提取结果

图 3 姿态角为-10°条件下目标回波亮点提取结果

Fig.3 Highlight extraction results at target's aspect angle of -10°

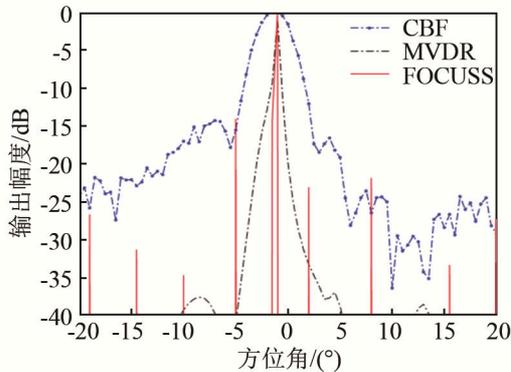


图 4 姿态角为-10°条件下回波亮点 2 的方位分布输出分辨率比较
Fig.4 Resolution comparison between CBF, sub-array MVDR and FOCUSS processing in echo highlight extraction application

图 5 姿态角为+10°条件下目标回波亮点提取结果

Fig.5 Highlight extraction results at target's aspect angle of +10°

点 1[#], 前文提到, 1[#]回波亮点是缩比 Benchmark 潜艇模型目标艏部的回波产生的, 目标艏部“十字舵”结构复杂, 不同舵体的空间位置比较接近(参见图 1 被测目标几何外形结构), 1[#]和 1[#]回波亮点是目标在 10°姿态角下不同舵体部位产生的。CBF 波束形成和子阵 MVDR 处理结果的旁瓣明显, 不能分辨 1[#]和 1[#]回波亮点。

3 结论

本文的试验数据处理结果表明, FOCUSS 压缩感知方法的输出主瓣为“针形”且无明显旁瓣;

FOCUSS 压缩感知方法的分辨率高于子阵 MVDR 波束形成、CBF 波束形成处理结果; FOCUSS 压缩感知方法对回波信噪比的要求高, 在高信噪比良好的条件下才能实现高分辨回波亮点提取。

致谢 本文试验数据处理与分析所采用的多通道缩比 Benchmark 潜艇模型目标阵列回波数据由上海交通大学水声工程课题组提供, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 汤渭霖, 范军, 马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
TANG Weilin, FAN Jun, MA Zhongcheng. Acoustic scattering of underwater targets[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] 卜考英, 范军. 基于多波束系统的水下目标近程回波亮点声图像[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 570-573.
BU Kaoying, FAN Jun. Acoustic image of bright spots of near-field underwater targets based on multi-beam system[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 570-573.
- [3] 孙昕, 范威, 范军. 单层壳体潜艇回波亮点声图像仿真和试验验证[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(6): 26-31.
SUN Xin, FAN Wei, FAN Jun. Simulation and experimental verification of acoustic image of echo bright spots for single hull submarine targets[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(6): 26-31.
- [4] 邓伟, 王斌, 童韞哲. 目标亮点回波精细特征在鱼雷自导中的应用[J]. 声学技术, 2014, 33(5): 17-20.
DENG Wei, WANG Bin, TONG Yunzhe. Application of acoustic highlights fine echo characteristics of target in torpedo homing[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(5): 17-20.
- [5] 许光, 周胜增. MVDR 自适应波束形成技术在水声中的研究进展[J]. 声学技术, 2014, 33(6): 554-558.
XU Guang, ZHOU Shengzeng. Development and application of MVDR adaptive beamforming technique in underwater acoustic[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(6): 554-558.
- [6] BEZANSON L, LEPAGE K D, BEEN R. The subarray MVDR beamformer for active littoral sonar system[J]. OCEANS, 2013, 155(1): 1-7.
- [7] BUSKENES J I, ÅSEN J P, NILSEN C C, et al. An optimized GPU implementation of the MVDR beamformer for active sonar imaging[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 2015, 40(2): 441-451.
- [8] BUSKENES J I, HANSEN R E, AUSTENG A. Low-Complexity adaptive sonar imaging[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 2017, 42(1): 87-96.
- [9] EDELMANN G F, GAUMOND C F. Beamforming using compressivesensing[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2011, 130(4): 232-237.
- [10] GAUMOND C F, EDELMANN G F. Sparse array design using statistical restricted isometry property[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2013, 134(2): 191-197.
- [11] XENAKI A, GERSTOFT P, MOSEGAARD K. Compressive beamforming[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2014, 136(1): 260-271.
- [12] GORODNITSKY I F, RAO B D. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: a re-weighted minimum norm algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 2(3): 600-616.
- [13] 杜选民, 周胜增, 高源. 声呐阵列信号处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
DU Xuanmin, ZHOU Shengzeng, GAO Yuan. Sonar array signal processing technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2018.
- [14] 魏木生. 广义最小二乘问题的理论和计算[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
WEI Musheng. Theory and calculation of generalized least squares problem[M]. Beijing: Science Press, 2006.