

阵间模基处理被动定位技术研究

李 建^{1,2,3}, 孙贵青¹, 张春华¹, 韩庆邦²

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 河海大学计算机与信息工程学院, 江苏常州 213022; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 随着目标声源级不断减小、环境噪声级不断增大, 常规的基于单节点的被动定位方式已经不能满足声纳探测的需求, 因此提出一种新的将网络化探测系统和模基处理技术相结合的被动定位方法, 可以从空间不同角度对目标进行观察并充分利用环境声场的复杂性对目标进行定位。模基处理方法主要有匹配场处理、匹配模处理等, 以匹配场处理为例进行分析, 将常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF)、自适应波束形成(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)两种匹配场处理器和阵间相干、非相干信号处理方法相结合进行仿真, 对单阵和多阵、MVDR 和 CBF、相干处理和非相干处理、宽带和窄带之间的定位性能进行了对比。仿真结果显示, 基于多节点的阵间模基相干处理方式在定位性能上明显优于单节点的模基处理结果。

关键词: 模基处理; 网络化探测; 匹配场处理; 被动定位

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-02-0086-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.003

Passive location using inter-array model-based processing

LI Jian^{1,2,3}, SUN Gui-qing¹, ZHANG Chun-hua¹, HAN Qing-bang²

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

2. College of Computer & Information Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A new passive localization method using multi-node network detection system combined with model-based processing technology is proposed, which can observe the target from different angles and take advantage of the complexity of the environment. The common methods of model-based processing are matched field processing (MFP) and matching mode processing (MMP). MFP is used here. Combined with the CBF, MVDR matching processors, the inter-array coherent and incoherent signal processing method are studied. Through simulation, the performances between single array and multi-array, MVDR and CBF, coherent and incoherent processing, broadband and narrowband have been compared. The simulations show that the performance of inter-array model-based processing method based on multi-array is superior to single-array model-based processing method.

Key words: model-based processing; networked detection; Matched Field Processing(MFP); passive location

0 引言

水下目标定位一直是水声领域研究的重点和难点问题之一, 基于隐蔽性考虑, 定位声纳多使用被动方式。被动定位的主要方法包括: (1) 基于球面波或柱面波波前的三子阵法^[1], 其测距精度依赖于时延估计精度, 与目标距离、方位、基阵孔径、基阵安装精度等因素有关; (2) 基于目标方位历程的目标运动分析(Target Motion Analysis, TMA)方法, 包括纯方位 TMA、频率-方位 TMA、多途 TMA 等

多种方法^[2]; (3) 基于三角测量原理^[3]的被动多途测距方法, 其定位精度受到多途结构预测的影响; (4) 基于球面波假设的聚焦波束形成方式^[4], 这是一种近场定位方式; (5) 基于声场模型的模基定位方法, 如匹配场(Matched Field Processing, MFP)、匹配模(Matched-mode Processing, MMP)以及被动时间反转(Passive Time Reversal Mirror, PTRM)方法^[2,5], 需要根据实际环境参数建立信道模型来计算拷贝声场。上述各方法的性能对比见表 1。

表 1 中方法 1 到 4 基于平面波、球面波假设, 没有利用声速剖面等水声信道环境信息; 方法 5 利用环境信息, 基于声场建模来实现被动定位, 但限于只使用一个声纳基阵(单点)对目标进行探测, 仅有一个视角, 而方位分辨率又有限, 所以无法分辨同一方向附近不同距离的目标。

可见, 随着环境噪声级和目标噪声级之间差距

收稿日期: 2012-03-08; 修回日期: 2012-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(10904160; 11274091)、河海大学中央高校基金(2011B11014)、国家 863 计划(2012AA091004)资助项目。

作者简介: 李建(1977-), 男, 山东诸城人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理技术。

通讯作者: 李建, E-mail: jian263@sina.com

表 1 被动定位方法性能对比
Table 1 Performance comparisons of different passive location methods

序号	方法	作用距离	定位精度
1	三子阵法	近程	与目标距离、方位、基阵孔径、基阵安装精度、时延估计等测量值有关；
2	TMA 法	中远程	与方位、频率等测量值有关；
3	被动多途测距	中近程	与多途结构、信号带宽有关；
4	聚焦波束形成	近程	与阵元位置、信噪比有关；
5	MFP&PTRM	中远程	依赖于环境参数，对失配敏感；

的不断增大，常规的基于单节点探测定位方法的固有局限性，已经不能满足声纳探测的需求，迫切需要新的被动探测方法。

近年来备受关注的传感器网络技术，给水下被动探测系统提供了一种新的解决方案，可以通过空间分布的多个节点，实现对某一水域的协同探测；而模基处理方法^[6-9]由于充分利用了模态间(或多径间)的相干性，其探测性能可以突破 Rayleigh 限和 Fresnel 限两个数量级^[10,11]。本文提出的基于网络化多节点的阵间模基处理被动定位技术，将网络化探测技术和阵间模基处理技术加以结合。使用多个声纳基阵按照一定规则分布在目标海域，从不同位置以多个不同的视角去观察目标，配合阵间模基处理技术，充分利用海洋环境的复杂性来提高探测能力，必然可以提高对目标的空间分辨能力。

本文将对阵间模基处理被动定位技术进行详细阐述，通过数值仿真对阵间模基处理技术进行性能分析，并对 MVDR 和 CBF、阵间相干和非相干处理、宽带和窄带之间的性能优劣进行对比。

1 阵间模基处理技术

1.1 模基处理技术

模基处理技术基于声场波动方程的简正波模型描述。声场的特征可以使用媒质的声压、质点振速以及密度来表征，联系这三个量的数学表示就是波动方程^[12]。按照相应的边界条件以及所使用的数学方法，波动方程有多种数值解法，一般常用的有以下几种^[13]：射线理论模型、简正波模型、多路径展开模型、快速声场模型和抛物线方程模型等。对于我们所考虑的低频浅海环境下的声传播特性，使用简正波模型来描述比较合适。在声场的简正波方式描述中，海洋波导中点源激发的声场可以表示为若干简正波的模式之和，模式数目的多少随海深和

工作频率等因素的变化而不同。

模基处理的基本思路就是基于这种模式分解理论，将阵列接收的声场数据(声压或者质点振速)与声场计算输出的拷贝声场(Replica Field)数据做匹配处理，最终得到目标的位置估计模糊面。

模基处理具体实现方法主要有匹配模处理^[6,7]、匹配场处理^[8,9]等。匹配场处理在阵元域(水听器域)进行，处理方法是阵元上接收的声场数据和拷贝场数据进行匹配，寻找真实声源位置；匹配模处理在模式域进行，对阵列接收数据进行模式滤波，得到模式幅度，将其和计算的模式幅度进行匹配，在真实的声源距离、深度上输出最大值。目前关于模基处理的研究均是基于单节点(单基阵)的，尚未见有多节点网络化处理方面的文献和报导。

本文研究适用于多节点网络化探测系统的阵间匹配场处理技术，实现阵间相干、非相干的匹配场处理。应用阵间匹配场处理技术的网络化探测系统的实现方式是：在目标区域按照一定规则布放多个声纳基阵构成网络化声纳传感器基阵；通过声场建模^[14]及其快速计算技术对目标海区进行快速声场计算，得到拷贝场；对各个节点的基阵数据按照统一的时间基准^[15]进行数据采集，并将采集得到的数据通过无线或者有线方式传送给声纳信息处理中心，声纳信息处理中心将实测数据和拷贝场数据进行阵间相干或者非相干的匹配(相关)处理，实现对目标的网络化匹配场处理被动探测。

1.2 单阵匹配场处理器

单阵匹配场处理是把常规低维平面波波束形成器推广到三维的一种处理方法^[14]，其处理器对应常规波束形成处理器(CBF)和自适应波束形成处理器(MVDR)，分别为^[11]

$$\mathbf{B}_{\text{CBF}} = \mathbf{p}_c' \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_c \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_{\text{MVDR}} = \mathbf{w}' \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{w} \quad (2)$$

其中： $\mathbf{R} = \mathbf{p}_m \cdot \mathbf{p}_m'$ ， $\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{p}_c}{\mathbf{p}_c' \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{p}_c}$

式中： \mathbf{p}_c 为计算所得的归一化拷贝场， \mathbf{p}_m 为水听器阵的测量值，均为 $N \times 1$ 矩阵， N 为阵元数。上标“'”表示共轭转置。

1.3 多阵匹配场处理器

多阵的阵间匹配场处理涉及到阵间数据的数据融合问题。数据融合技术分为三个层次^[16]：数据级融合、特征级融合、决策级融合。这里提出的多节点匹配场处理方法有两种：阵间非相干信号处理方法和阵间相干信号处理方法，其中前者属于数据

级融合方法，后者属于特征级融合方法。

类似单阵匹配场处理，多阵的阵间匹配场处理方法的 CBF 和 MVDR 处理器分别为

$$B_{CBF} = p_c' \cdot R \cdot p_c \quad (3)$$

$$B_{MVDR} = w' \cdot R \cdot w \quad (4)$$

其中： $p_c = [p_{c1}; p_{c2}; \dots; p_{cM}]$ ， $R = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1} & \dots & R_{MM} \end{bmatrix}$ ，

$$R_{ij} = p_{mi} \cdot p_{mj}'$$

$$w_i = \frac{R_{ii}^{-1} \cdot p_{ci}}{p_{ci}' \cdot R_{ii}^{-1} \cdot p_{ci}}$$

式中： M 为垂直阵个数， N 为阵元数(假设各阵阵元数相等)。 p_{ci} 是每个阵计算所得的归一化拷贝场，为 $N \times 1$ 矩阵， p_c 为 $MN \times 1$ 矩阵。 w_i 为 $N \times 1$ 矩阵， w 为 $MN \times 1$ 矩阵。

接收数据协方差矩阵可以拆成两部分：

$R = R_{ii} + R_{ij}$ ， R_{ii} 是主对角线上的元素，是各阵的自协方差矩阵； R_{ij} 是其余的元素，为阵间的互协方差矩阵，其相应的处理器也可以分解成两部分：

$$B_{CBF} = p_c' \cdot R \cdot p_c = \sum_{i=1}^M p_{ci}' \cdot R_{ii} \cdot p_{ci} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M p_{ci}' \cdot R_{ij} \cdot p_{cj} \quad (5)$$

$$B_{MVDR} = w' \cdot R \cdot w = \sum_{i=1}^M w_i' \cdot R_{ii} \cdot w_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M w_i' \cdot R_{ij} \cdot w_j \quad (6)$$

式(5)、(6)中第一部分对应阵间非相干处理，第二部分对应阵间相干处理。

2 数值仿真分析

对上面提出的阵间相干、非相干处理方式，分别使用 CBF、MVDR 处理器进行仿真实现。仿真时使用如下规则：计算拷贝场时，简正波各模式间采用相干处理方式进行叠加；对于每个节点，阵元间采用相干方式得到协方差矩阵；宽带处理时，各频点之间采用相干平均的方式处理。

2.1 仿真条件

拷贝场计算采用 Kraken 简正波计算程序^[17]，环境模型采用 Pekeris 距离无关模型，参数设置为：弱负梯度(1500~1480 m·s⁻¹)剖面，水深 100m，海水密度为 1000 kg·m⁻³，海底声速 2000 m·s⁻¹，密度 2000 kg·m⁻³。上部为半无限真空，下部为半无限均匀粘弹海底，如图 1 所示。

收发节点配置如下：单节点仿真时，使用一条位于坐标中心原点的垂直阵，每阵 6 个阵元，均匀分布在 10~90m 的深度上。使用宽带声源，位于 X

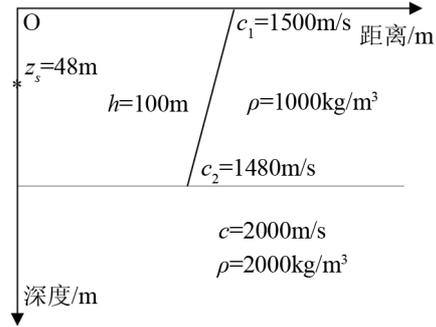


图 1 仿真环境示意图
Fig.1 Simulated environment

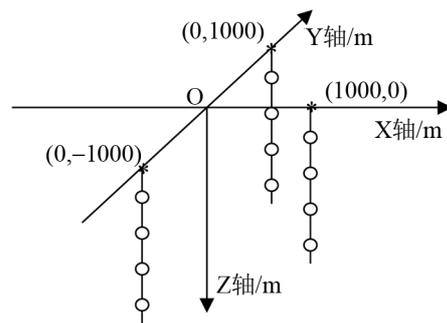


图 2 节点配置示意图
Fig.2 Nodes' configuration

方向 2000m，Y 方向 3000m，Z 方向 48m，搜索半径为 5km，信噪比为 10dB。多阵仿真时，3 条阵分布位置如图 2 所示，每阵 6 个阵元，均匀分布在 10~90 m 的深度上。使用单频或宽带声源，位置 X 方向 2000m，Y 方向 3000m，Z 方向 48m，搜索半径为 5km，信噪比为 10dB。

2.2 仿真结果分析

在上述仿真条件下，仿真得到的结果如图 3~12 所示。其中，X-Y 平面结果图采用 360°极坐标方式显示，圆心为坐标原点，白色圆点标示出阵的位置，箭头指出声源真实位置，规定 Y 轴正方向为正北。X-D、Y-D 图(其中 X、Y、D 分别表示 X 轴、Y 轴距离以及深度)则采用等高线图表示。所有结果均归一化后使用分贝表示，使匹配最大值输出为 0dB(在没有失配的情况下，对应声源位置)，在结果图中，右侧色棒给出 dB 显示范围。

2.2.1 单阵情况

进行 MVDR 方式 MFP 的仿真，定位结果：X-Y 平面如图 3 所示，Y-D、X-D 平面如图 4、5 所示。

从单阵匹配场定位结果图可以看出，单阵时，X-Y 平面上只能得到目标的距离信息，而不能确定方位信息，如图 3 所示；在 X-D 和 Y-D 平面上，深度信息是正确的，而由于方位信息不能获得，X 和 Y 方向的距离信息则不正确，并且明显在 -X 和 -Y

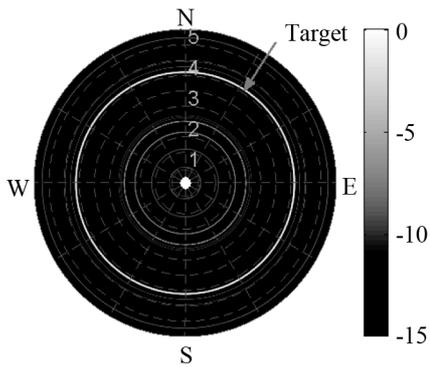
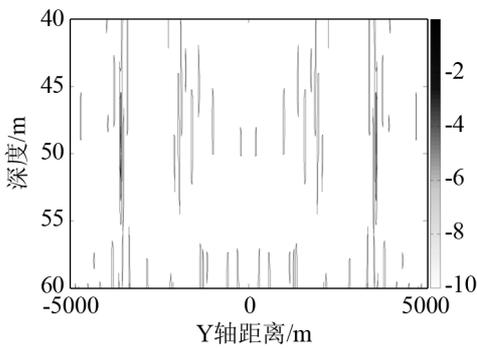
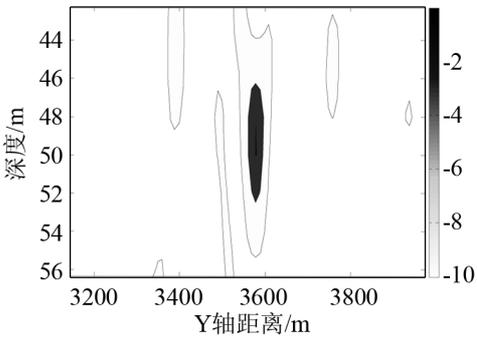


图 3 单阵 MVDR-MFP 定位结果 X-Y 平面
Fig.3 Single array MVDR-MFP results in X-Y plane



(a) 单阵MVDR, Y-D平面



(b) 单阵MVDR, Y-D平面 局部放大

图 4 单阵 MVDR-MFP 定位结果 Y-D 平面
Fig.4 Single array MVDR-MFP results in Y-D plane

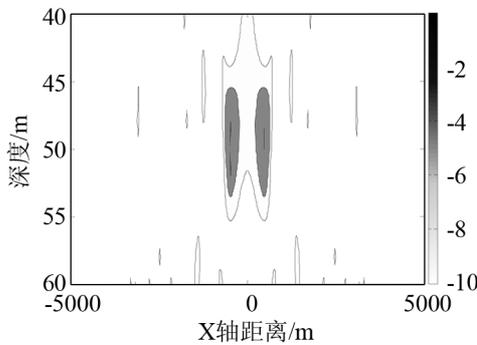


图 5 单阵 MVDR-MFP 定位结果 X-D 平面
Fig.5 Single array MVDR-MFP results in X-D plane

位置上有镜像目标。因此，单阵匹配场处理只能得出目标的距离和深度信息，方位信息不能确定。

2.2.2 多阵情况

使用单频点声源分别进行了基于 CBF 和 MVDR 处理器的 MFP 仿真，使用宽带声源进行了 MVDR 方式仿真，定位结果如下：图 6 为单频声源的 CBF-MFP 非相干处理 X-Y 平面结果，图 7 为相干结果，图 8 为单频声源的 MVDR-MFP 非相干处理 X-Y 平面结果，图 9 为相干结果；图 10~12 是宽带声源的 MVDR-MFP 处理结果，其中，图 10 为相干和非相干处理 X-Y 平面定位结果，图 11、12 为相

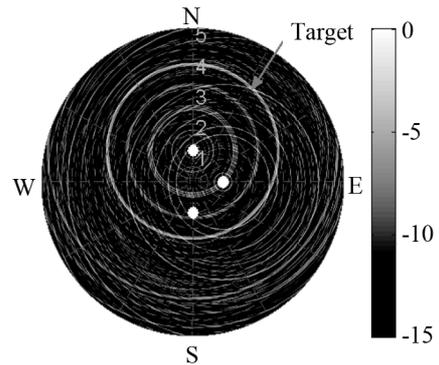


图 6 多阵 CBF-MFP 非相干处理结果(单频声源)
Fig.6 Results of multi-array CBF-MFP incoherent processing for narrow band source

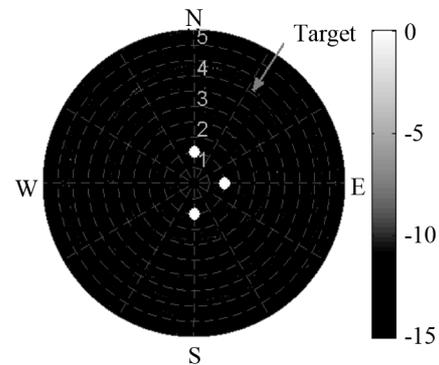


图 7 多阵 CBF-MFP 相干处理结果(单频声源)
Fig.7 Results of multi-array CBF-MFP coherent processing for narrow band source

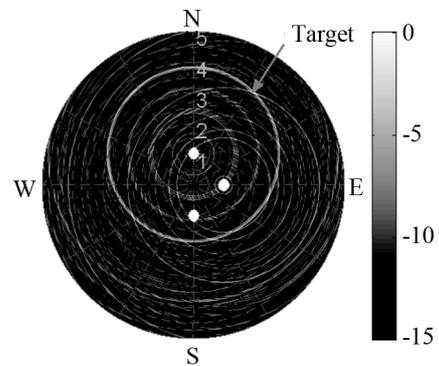


图 8 多阵 MVDR-MFP 非相干处理结果(单频声源)
Fig.8 Results of multi-array MVDR-MFP incoherent processing for narrow band source

干处理的 X-D、Y-D 平面定位结果。

从多阵匹配场处理结果各图看出，多节点网络化匹配场处理能对目标实现空间三维准确定位。通过分析图 6~9 可以看出，CBF 与 MVDR 两种处理器下的匹配场处理仿真结果相比较，MVDR 方式比 CBF 方式具有更好的旁瓣抑制能力；还可以看出，在阵间相干处理和阵间非相干处理方式之间，相干方式的模糊度平面具有更少的模糊性，定位更精确，这主要是因为其充分利用了各节点接收信号间的相干性。当然，在实际情况下，阵间数据不一定能良好相关，而且其阵间数据的时间对齐精度问题

也尚需解决。比较单频、宽带定位结果可以看出，通过增加带宽获得的更多声场信息使处理结果的

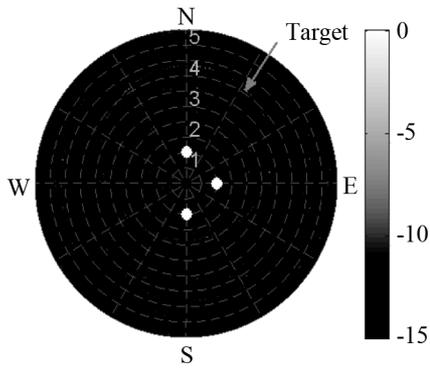


图 9 多阵 MVDR-MFP 相干处理结果(单频声源)
Fig.9 Results of multi-array MVDR-MFP coherent processing for narrow band source

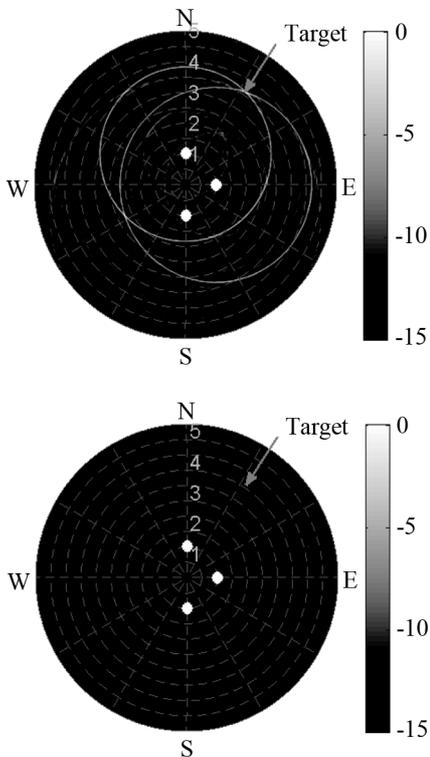


图 10 多阵 MVDR-MFP 非相干(上图)和相干(下图)处理结果(宽带声源)
Fig.10 Results of multi-array MVDR-MFP incoherent (upper) and coherent (lower) processing for broad band source

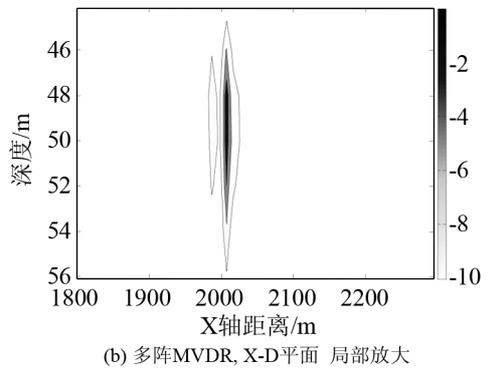
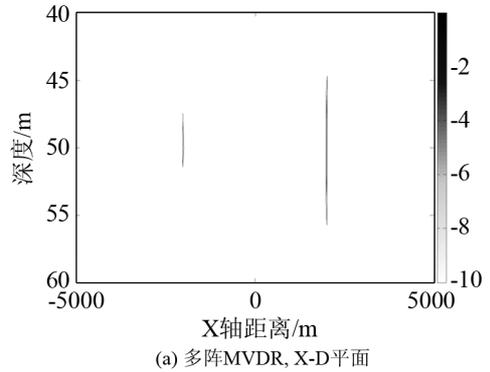


图 11 宽带 MVDR 阵间相干处理结果(X-D 平面)
Fig.11 Results of broadband MVDR inter-array processing in X-D plane

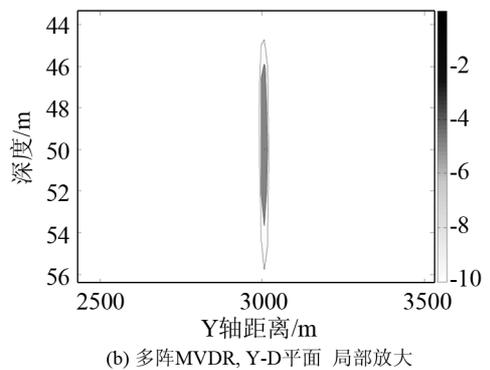
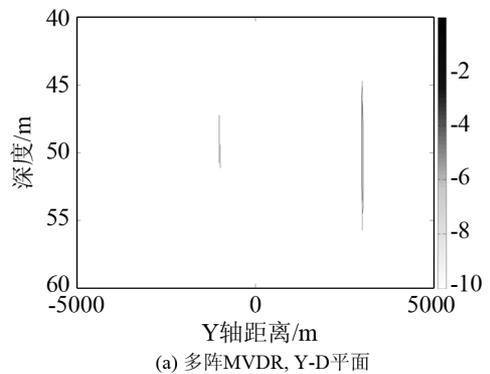


图 12 宽带 MVDR 阵间相干处理结果(Y-D 平面)
Fig.12 Results of broadband MVDR inter-array processing in Y-D plane

旁瓣进一步得到抑制, 定位结果更为清晰。再比较图 11、12 和图 4、5, 可见, 相对单节点匹配场处理, 多节点网络化匹配场处理可以在 X、Y 方向上无模糊地精确定位。

3 结论

本文给出了多阵网络化模基处理的基本原理, 提出了阵间相干和非相干两种处理方式, 在此基础上进行了单节点匹配场处理和多节点协同匹配场处理的仿真实验, 仿真结果表明在定位性能上, (1) MVDR 方式优于 CBF 方式; (2) 多节点协同匹配场处理性能优于单节点匹配场处理; (3) 阵间相干处理优于阵间非相干处理; (4) 宽带处理优于窄带处理。

基于网络化探测的阵间模基处理技术尚有许多有待研究的问题, 如基于 MMP 方法的阵间处理方法、引入矢量场后的 MFP 和 MMP 阵间处理方法, 以及模基匹配优化技术等方面, 这些将是下一步工作的重点。

参 考 文 献

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 安徽: 安徽教育出版社, 2002: 350-353.
LI Qihu. Principle of digital sonar design[M]. Anhui Education Press. 2002: 350-353.
- [2] 毛卫宁. 水下被动定位方法回顾与展望[J]. 东南大学学报, 2001, 31(6): 1-4.
MAO Weining. An overview of passive localization for underwater acoustics[J]. Journal of Southeast University, 2001, 31(6): 1-4.
- [3] Burdic, W. S. 著. 方良嗣, 阎福旺, 等译. 水声系统分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 274-277.
Burdic, W. S. Underwater acoustic system analysis[M]. Prentice Hall: Englewood Cliffs, N. J. 1991.
- [4] 薛山花, 叶清华. 利用近场 MVDR 双聚焦波束成形方法实现被动测距[J]. 应用声学, 2005, 24(3): 177-181.
XUE Shanhu, YE Qinghua. Passive-range estimation using near-field MVDR dual focused beamformers[J]. Applied Acoustics, 2005, 24(3): 177-181.
- [5] SHANG E C, CLAY C S, WANG Y Y. Passive harmonic source ranging in waveguides by using mode filter[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 78(1): 172-175.
- [6] YANG T C. Effectiveness of mode filtering: A comparison of MFP and MMP[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 87(5):2072-2084.
- [7] YANG T C. A method of range and depth estimation by modal decomposition[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 82(5): 1736-1745.
- [8] HINICH M J. Maximum likelihood estimation of the position of a radiating source in a waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1979, 66(2): 480-483.
- [9] BUCKER H P. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1976, 59(2): 368-373.
- [10] TRACEY B H. Matched field range and depth resolution in range-dependent waveguides[J]. J. Acoust. Soc. Am. Acoustics Research Letters Online, 2005: 274-279.
- [11] ARTHUR B. BAGGEROER, W.A.K., PETER N. MIKHALEVSKY, An Overview of Matched Field Methods in Ocean Acoustics[J]. IEEE J. Oceanic Engineering, 1993, 18(4): 401-424.
- [12] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社. 2001: 168-173.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Fundamental of Acoustic[M]. Nanjing, Nanjing University Press. 2001: 168-173.
- [13] PAUL C. ETTER. Underwater Acoustic Modeling and Simulation[M]. 3rd. London, Spon Press. 2003: 102-103.
- [14] FINN B JENSEN, Computational ocean acoustics[M]. New York: Springer-Verlag, 2000: 299-304.
- [15] SHEN C, YU H. Time-delay alignment technique for a randomly distributed sensor array[J]. IET Commun, 2011, 5(8): 1068-1072.
- [16] 李启虎. 独立观测资料的最佳线性数据融合[J]. 声学学报. 2000, 25(5): 385-388.
LI Qihu. Optimum linear data fusion for independent observation data[J]. Acta Acoustica, 2000, 25(5): 385-388.
- [17] PORTER M B. The KRAKEN normal mode program[Z]. SAC-LANT undersea research center. 2001: 69-159.