

被动声呐盲分离自适应-自适应波束形成算法研究

钱宇宁* 曹欣荣 陈亚伟 孙俊 张翔宇

(南京电子技术研究所 南京 210039)

(中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室 南京 210039)

摘要: 基于自适应-自适应方法在大规模被动声呐阵列降维处理上的应用需求, 该文提出一种基于盲分离的自适应-自适应波束形成降维算法。该算法将独立成分分析方法与自适应-自适应降维方法有机结合, 通过独立成分分析在不预知干扰来向的条件下自适应地估计干扰源的导向矢量, 并进一步采用自适应-自适应方法对阵列信号进行波束空间降维, 最后采用稳健自适应方法进行波束形成处理。仿真实验验证了该算法能够有效降低大规模阵列自适应处理的计算量, 其波束形成效果以及对误差的稳健性与全阵自适应方法相近。

关键词: 大规模声呐阵列; 降维; 独立成分分析; 自适应-自适应

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)10-2390-07

DOI: 10.11999/JEIT170099

Research on Adaptive-adaptive Beamforming Algorithm Based on Blind Separation for Passive Sonar

QIAN Yuning CAO Xinrong CHEN Yawei SUN Jun ZHANG Xiangyu

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

(Key Laboratory of IntelliSense Technology, CETC, Nanjing 210039, China)

Abstract: Due to the application requirement of adaptive-adaptive dimension reduction method in large-scale passive sonar array, a blind separation adaptive-adaptive beamforming algorithm is presented, which combines the Independent Component Analysis (ICA) with the traditional adaptive-adaptive approach. The ICA approach is firstly used to obtain the steering vectors of signal sources without prior information of signal direction. Then, the adaptive-adaptive approach is utilized to reduce signal dimension in beam space and robust adaptive approach is finally used for beamforming. The simulation studies verify the effectiveness of the proposed algorithm for computation burden reduction of large-scale array adaptive processing. Furthermore, the beamforming results and robustness of the proposed algorithm is similar to that of full-array adaptive method.

Key words: Large-scale sonar array; Dimension reduction; Independent Component Analysis (ICA); Adaptive-adaptive

1 引言

当前, 在水声探测研究当中, 由于水声环境噪声强而水声目标辐射声小, 对微弱目标的探测极为困难。针对该问题, 在探测手段方面, 大孔径、大规模声呐阵列由于具有高增益、高分辨的优点, 是解决水声目标远程探测与微弱目标探测的重要途径^[1,2]。此外, 在信号处理技术方面, 相比常规波束形成信号处理技术, 自适应波束形成技术具有更强的干扰抑制和高方位分辨能力, 是解决水声阵列弱目标探测的有效技术手段^[3]。然而, 大规模声呐阵列阵元数多, 涉及频段范围宽, 因此针对大规模阵列的自适应信号处理技术面临大运算量、低速率的问

题^[4,5], 方法实时性较差, 工程应用困难。因此, 对高维多阵元阵列数据进行降维是解决大孔径阵列自适应处理大运算量问题的重要手段^[6,7]。目前, 阵列信号处理的降维方法主要包括子阵空间降维和波束空间降维两种^[8]。子阵降维方法是将整个阵列划分为多个子阵, 利用子阵输出进行自适应处理, 该方法需要对子阵划分方式进行合理选择, 否则极易产生栅瓣; 波束空间降维是首先利用全部阵元形成若干个常规波束, 在波束间进行自适应处理, 有相邻波束法和自适应-自适应法两种实现方法。其中, 由Brookner等人^[9]提出的自适应-自适应方法通过构建主波束和指向干扰方向的辅助波束进行自适应处理, 与全阵自适应处理相比大大降低了计算量及自适应处理所需的快拍数, 且自适应-自适应方法的实质是利用辅助波束主瓣与主波束旁瓣进行自适应干

扰抵消,其自适应波束形成性能稳健,优于相邻波束法^[8]。由于自适应-自适应方法的优良性能,目前该方法已经广泛应用于大型阵列雷达的降维自适应波束形成^[10]、自适应干扰抑制^[11,12]等。但是,在声呐阵列的降维方面,自适应-自适应方法还应用较少。这是因为自适应-自适应方法的应用需要提前估计干扰所在方位,对于无法主动发射波束只能接收目标辐射噪声的被动声呐阵列而言,预估干扰方位就需要先进行常规波束形成(CBF)并进行目标方位检测,这大大增加了降维处理的成本,且会将CBF及目标检测的误差带入后续自适应-自适应降维处理当中,不符合实际工程应用的需要。

基于自适应-自适应方法在大规模被动声呐阵列降维处理上的应用需求,本文提出了一种基于盲分离的自适应-自适应波束形成算法。首先,利用独立成分分析(ICA)对阵列信号进行分解,得到干扰所在方位的导向矢量,接着以此作为输入对阵列信号进行波束空间的自适应-自适应降维,最后对形成的若干波束进行稳健自适应处理获得目标方位的波束形成输出结果。本文第2节介绍自适应-自适应方法、ICA方法基本原理,提出了基于ICA的自适应-自适应波束形成降维方法框架;第3节通过仿真及实测数据实验验证了该方法的有效性,最后给出结论。

2 方法原理

2.1 自适应-自适应波束形成方法

自适应-自适应方法是一种在波束空间利用主波束和指向干扰方位的辅助波束进行自适应处理的降维波束形成方法。其具体处理方法如下文所示。

对于阵元数为 N 、间距为 d 的1维线阵列,假设空间存在 k 个互不相关的窄带干扰源,自适应-自适应方法步骤如下:

(1)确定干扰所在方向 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$;

(2)设当前期望波束指向方向为 θ_0 ,分别求得期望波束指向方向导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 和干扰方向的导向矢量: $\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_k)$,均为 $N \times 1$ 维列向量;

(3)利用期望波束指向和干扰指向导向矢量构造降维变换矩阵 $\mathbf{T} = [\mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_k)]$;

(4)对于阵元数为 N 的阵列,设采集到 t 个快拍的数据 \mathbf{X} , \mathbf{X} 为 $N \times t$ 维矩阵,那么通过变换矩阵降维后的输入数据为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{T}^H \mathbf{X} = [\mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_k)] \quad (1)$$

其中, \mathbf{Z} 为 $k \times t$ 维矩阵, $\mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_0)$ 为指向期望方向的主波束, $\mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_k)$ 分别为指向各个干扰方向的辅助波束;降维后期望方向的导向矢量 $\mathbf{b}(\theta_0) = \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_0)$,为 $k \times 1$ 维向量;降维后的协方

差矩阵 $\mathbf{R}_z = E(\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H)$,为 $k \times k$ 维矩阵;降维后的自适应权值 $\mathbf{W}_z = \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{b}(\theta_0) / \mathbf{b}^H(\theta_0) \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{b}(\theta_0)$,期望方向的自适应波束形成输出 $\mathbf{Y} = \mathbf{W}_z^H \mathbf{Z}$ 。

从上述算法步骤中可以看出,自适应-自适应方法首先通过常规波束形成方法在期望方向以及各个干扰方向形成 $k+1$ 个波束,之后的协方差矩阵计算,求逆以及自适应权值计算等均是在 $k+1$ 个波束间进行,阵列数据由 N 维变为 k 维。在实际大规模阵列探测当中,空间干扰的数目远小于阵列阵元数,因此自适应-自适应方法可以大幅减小大阵列自适应运算的计算量,且对于快拍数的要求也大大降低。

然而,自适应-自适应降维算法的应用需要一个重要前提,即预先知道干扰所在方位。对于被动声呐而言,其无法主动发射探测波束,只能被动接收目标辐射噪声,预估干扰方位就需要先对各个空间方位进行常规波束形成并进行目标方位检测,这样的预处理方法会大大增加降维处理的运算量,且方位估计精度不高。因此,研究干扰方位预估方法是被动声呐阵列应用自适应-自适应方法的重要一环。

2.2 独立成分分析方法

独立成分分析(ICA)作为盲信号分离中一种重要的解决方法,在不需要先验信息的基础上利用不同信号间的独立性将各个信号源从原始信号中分离出来,在水声目标特征提取^[13,14]、波达方向估计^[15]、水声目标识别^[16,17]、目标定位^[18]等水声信号处理领域得到了广泛应用。

假定空间存在 k 个独立信号源 $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_k]^T$, N 个阵元上接收到的信号为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N]^T$,则 \mathbf{X} 可以表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k] \in R^{N \times k}$ 为混合矩阵,将式(2)展开得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{S}_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

ICA方法目标为获得一个分离矩阵 \mathbf{P} ,从 \mathbf{X} 中将各个独立信号源分离出来。

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{P}^{-1} \quad (5)$$

从式(2)、式(3)中可以看出,若将混合矩阵中各个分量作为各个信号源投影到线阵各阵元上的导向矢量,则ICA方法可以在不预知干扰来向的条件下根据信号自身独立性特点求得各个干扰信号源的导

向矢量^[15]。这种盲源条件下求导向矢量的方法刚好满足自适应-自适应方法(2.1 节中步骤(3))获取干扰方向导向矢量的要求。因此,本文利用 ICA 方法在不预知干扰信号来向的基础上获取其导向矢量,并进一步与自适应-自适应降维方法相结合构建基于 ICA 的自适应-自适应波束形成方法框架。

2.3 基于 ICA 的自适应-自适应波束形成方法框架

2.3.1 独立成分个数确定方法 应用 ICA 方法进行信号分离时,需要首先确定信号源个数。若选择的信号源个数小于实际干扰数目,则分离出的某个信号将是多个源信号的混叠,其对应导向矢量也和实际不符;若选择的信号源个数太大,又存在计算量过大影响算法效率的问题^[19]。因此,需要采用合适的算法在 ICA 分解前确定阵列信号中独立成分个数。Akaike 信息论(AIC)准则是一种常用的估计独立成分个数的方法,其准则公式如式(6):

$$\text{AIC}(k) = -2(N-k)L \ln \left(\frac{\prod_{i=k+1}^N \lambda_i^{N-k}}{\frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N \lambda_i} \right) + 2k(N-k) \quad (6)$$

其中, N 为阵元数, L 为快拍数, λ_i 为信号协方差矩阵特征值,求得的 AIC 序列的第 1 个极小值点对应的 k 值为估计独立成分个数。然而,该准则公式加号左侧的似然函数与快拍数有关,而加号右侧的罚函数与快拍数无关,一旦快拍数较大该准则失效。因此,本文采用改进 AIC 准则方法^[20]进行独立成分估计,改进后的准则公式为

$$\text{AIC}(k) = f_{(0,1)} \left(-2(N-k)L \ln \left(\frac{\prod_{i=k+1}^N \lambda_i^{N-k}}{\frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N \lambda_i} \right) \right) + f_{(0,1)}(2k(N-k)) \quad (7)$$

其中, $f_{(0,1)}$ 为归一化函数。改进后的 AIC 准则公式通过对似然函数和罚函数进行归一化后再求和,降低了快拍数对准则公式的影响,较好地解决了传统 AIC 方法应对大快拍数时的不足。

2.3.2 算法框架 结合上述独立成分估计方法、ICA 方法以及自适应-自适应波束形成降维方法,本文提出了一种基于 ICA 的自适应-自适应波束形成方法框架,如图 1 所示。

算法共分为 4 个步骤:

(1)利用改进 AIC 方法计算 AIC 序列,通过极小值点估计干扰信源个数;

(2)根据估计干扰源个数对阵列信号进行 ICA 分

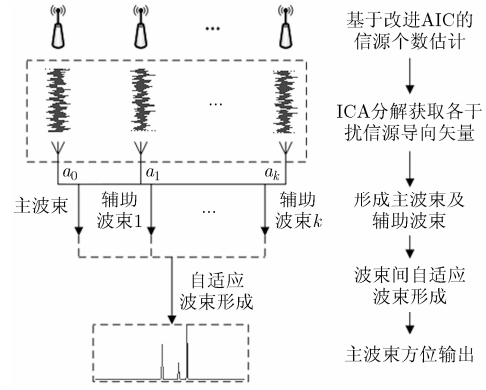


图 1 基于 ICA 的自适应-自适应波束形成方法框架

解,将求得的混合矩阵 \mathbf{A} 的各个分量作为各干扰信号来向的导向矢量 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$;

(3)将当前主波束导向矢量与干扰来向导向矢量根据 2.1 节步骤(3)结合,构建降维变换矩阵 \mathbf{T} ,并进行矩阵白化处理防止主波束导向与辅助波束导向重合,利用变换矩阵根据式(1)对原阵列信号进行降维变换,形成主波束及各个辅助波束,从而将原 N 维阵列信号降至 k 维;

(4)在波束间进行自适应鲁棒 Capon 波束形成(RCB 方法)^[21],输出当前期望方向的波束形成结果。

3 仿真实验分析

为验证上述算法的有效性,利用仿真数据进行实验验证。设定 1 维线阵阵元数 $N = 64$,阵元间距 $d = 0.75 \text{ m}$,阵列探测截止频率为 1000 Hz 。空间共设置 3 路中心频率为 1 kHz 的窄带、远场平面波信号:信号 1 方向为 10° ,信噪比 0 dB ;信号 2 方向为 -10° ,信噪比 20 dB ;信号 3 方向为 20° ,信噪比 40 dB 。信号采样频率为 10 kHz ,声速为 1500 m/s 。

3.1 理想情况

在无导向误差、幅相误差,快拍数足够($L = 1000$)条件下,分别采用常规波束形成、RCB 自适应波束形成以及基于 ICA 的自适应-自适应 RCB 方法,得到指向信号 1 方向的天线方向图,此时信号 2、信号 3 为干扰信号,如图 2 所示。从图 2 可以看出,ICA 自适应-自适应 RCB 方法和全阵 RCB 方法在两个干扰方向形成凹口深度相同,二者性能基本一致。

进一步在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的全空间方位进行扫描,得到基于常规波束形成、常规 MVDR 自适应波束形成、RCB 自适应波束形成以及 ICA 自适应-自适应 RCB 方法的结果,如图 3 所示。从图 3 可以看出,3 种自适应方法在 3 个目标处均有基本相同的

DOA(目标来向)输出,由此可以得出在理想条件下,常规 MVDR、全阵 RCB 以及 ICA 自适应-自适应 RCB 3 种方法效果基本相同。

3.2 导向误差与幅相起伏影响

改变信号 1 来向为 10.5°,即在信号 1 处引入 0.5° 导向误差,分别利用 3.1 节中 4 种方法得出全方位的波束形成结果,如图 4 所示(为显示清晰,在 -60° ~ 60° 范围内显示)。从 DOA 结果中可以看出, MVDR 方法在信号 1 处性能急剧下降,而全阵 RCB 方法与 ICA 自适应-自适应 RCB 方法依然稳健,效果相近。

恢复信号 1 指向为 10°,在各个通道信号中加入 20%幅度误差和 1° 相位误差,再次验证 4 种方法 DOA 性能,如图 5 所示。从 DOA 结果中可以看出, MVDR 方法在 3 个信号处 DOA 性能均下降,而全阵 RCB 方法与 ICA 自适应-自适应 RCB 方法依然稳健,效果相近。

3.3 快拍数影响

快拍数需求是自适应算法重要的衡量标准,一般自适应方法要求快拍数大于 1.5 倍阵元数。本实验分别进行 $L = 96 = 1.5N$ 以及 $L = 64 = N$ 条件下的几种算法比较实验,如图 6、图 7 所示。从两图结果中可以看出,在快拍数为 1.5 倍阵元数条件下,3 种自适应方法均能保持性能;然而在快拍数降至与阵元数相等时,全阵 RCB 方法与 MVDR 方法在噪声基底上出现较大波动,极易检测出多个虚假目标,而 ICA 自适应-自适应 RCB 方法和常规方法依

然能够保持稳健。实际上,由于 ICA 自适应-自适应方法的实际处理波束数和可观测目标数有关,而某一阵列可观测到的目标数一定小于阵元数,因此 ICA 自适应-自适应方法在快拍数等于阵元数甚至略小于阵元数的条件下依然能够保持稳健性。

3.4 信噪比影响

前面几个实验在较弱信号 1 信噪比为 0 dB 条件下,基于 AIC 准则的独立成分估计方法依然能够估计干扰数目为 3,因而 ICA 自适应-自适应方法效果良好。下面进一步验证存在更弱目标导致独立成分估计方法无法准确估计干扰数目时 ICA 自适应-自适应方法的性能。

在与 3.1 节相同的理想实验条件下,改变信号 1 的信噪比为 -20 dB,改变信号 2 信噪比为 0 dB,此时 AIC 独立成分估计方法得到的干扰源数目为 2,信号 1 被忽略,进一步利用 4 种波束形成方法进行 DOA 估计,结果如图 8 所示。从图中可以看出,虽然信号 1 没有被估计为一个独立成分,但并没有影响最后的波束形成结果,ICA 自适应-自适应 RCB 方法依然能够准确得到 3 个目标的方位,且信噪比与全阵 RCB 方法相比没有下降。这是因为波束空间降维方法主要针对较强干扰进行抑制,而弱干扰信号空间旁瓣较小,不会对主波束产生太大影响。因此,当空间存在极弱目标不易被 AIC 方法估计时,ICA 自适应-自适应 RCB 方法 DOA 性能不会受到太大影响。

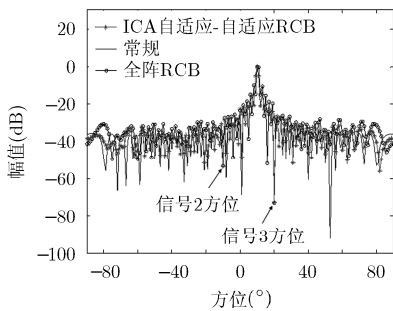


图 2 理想情况下 3 种方法天线方向图

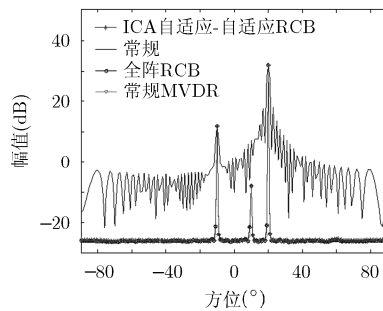


图 3 理想情况下 4 种方法波束形成结果

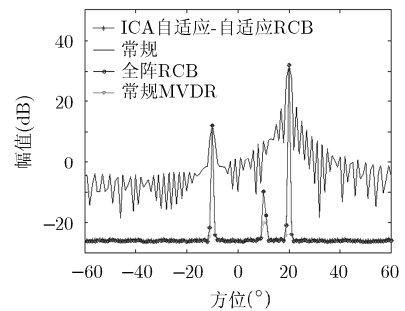


图 4 导向误差条件下 4 种方法波束形成结果

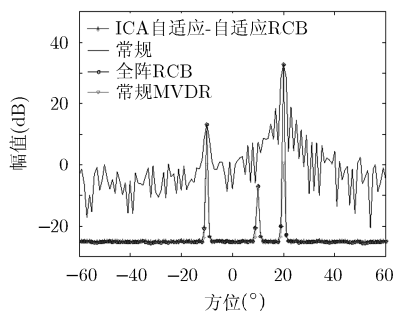


图 5 幅相起伏条件下 4 种方法波束形成结果

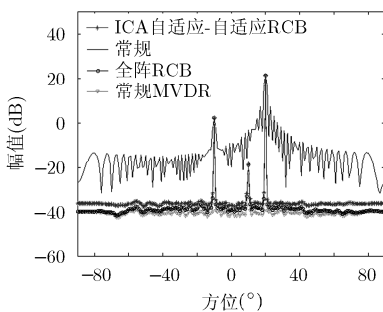


图 6 96 快拍下 4 种方法波束形成结果

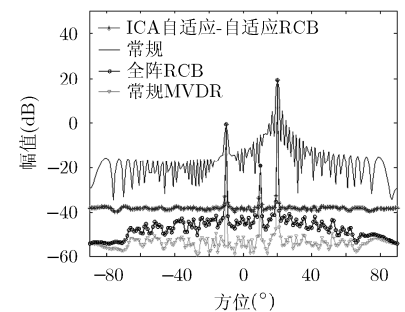


图 7 64 快拍下 4 种方法波束形成结果

3.5 宽带性能对比

对于声呐阵列而言,其接收到的目标辐射信号相对带宽一般较大,因此,宽带性能也是声呐信号处理算法的一个重要的衡量标准。下面,进一步对基于 ICA 的自适应-自适应降维方法在宽带条件下的性能进行仿真验证。

宽带仿真条件:阵列规模、阵元间距、探测截止频率等条件不变,空间共设置 3 路频率范围为 500~1000 Hz 的宽带、远场平面波信号:信号 1 方向为 10° ,信噪比 0 dB;信号 2 方向为 -10° ,信噪比 14 dB;信号 3 方向为 20° ,信噪比 20 dB。声速

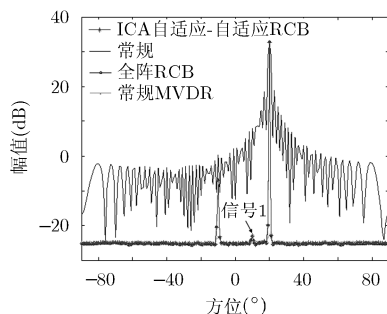


图 8 低信噪比条件下 4 种方法波束形成结果

3.6 计算时间对比

降低计算时间是 ICA 自适应-自适应方法的主要目的。下面,对全阵 RCB 方法和 ICA 自适应-自适应 RCB 方法(下面简称 ICA-RCB)的计算时间进行比较。在阵元数为 64, 128, 256 的条件下,分别统计两种方法的计算时间,其中对 ICA-RCB 方法分别针对信号中含 3 个干扰源和 9 个干扰源的情况进行计算,结果如表 1 所示。从表中可以看出,在干扰源数较少的情况下,ICA-RCB 方法计算时间远小于全阵 RCB 方法;而当干扰源数增加,ICA-RCB 方法的计算时间上升,对 64 元阵列的计算时间与全阵 RCB 接近,但对于大规模阵列 ICA-RCB 方法计算时间依然远小于全阵 RCB 方法。实际上需要构建辅助波束进行对消的强干扰信号源个数是有限的,因此,阵列阵元数越多,ICA-RCB 方法的计算效率优势越明显。

表 1 ICA-RCB 与全阵 RCB 计算时间比较(s)

阵元数	全阵 RCB	ICA-RCB (3 个干扰源)	ICA-RCB (9 个干扰源)
64	0.43	0.12	0.21
128	2.31	0.18	0.30
256	14.26	0.44	0.60

为 1500 m/s,信号采样频率为 10 kHz,处理数据长度 $L = 10000$,处理频段范围为 500~1000 Hz。首先采用常用聚焦算法^[22]完成阵列信号的宽窄带变换,接着分别采用常规波束形成、全阵 RCB 方法以及基于 ICA 的自适应-自适应 RCB 方法进行目标 DOA 估计,结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,对于宽带信号,通过 ICA 自适应-自适应方法降维的 RCB 方法与全阵 RCB 方法 DOA 性能基本相同,其方位分辨能力、弱目标信噪比均优于常规方法。由此可见,基于 ICA 的自适应-自适应降维波束形成方法对于宽带声呐阵列信号依然有效。

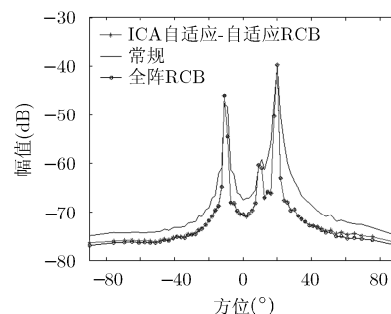


图 9 宽带信号条件下 3 种方法波束形成结果

4 结束语

本文将盲分离方法与传统自适应-自适应降维方法相结合,提出了一种无需预知干扰来向的基于 ICA 的自适应-自适应波束形成降维方法,并通过仿真实验进行了算法验证,得出结论如下:(1)基于 ICA 的自适应-自适应方法有效解决了干扰导向粗估计的问题,其波束形成效果与全阵自适应波束形成基本相同;(2)基于 ICA 的自适应-自适应方法对于导向误差、幅相起伏误差的稳健性以及对于宽带阵列信号的 DOA 估计效果与全阵自适应方法基本相同;在低快拍条件下,ICA 自适应-自适应方法的稳健性强于全阵自适应方法;(3)基于 ICA 的自适应-自适应方法可以显著降低自适应波束形成的计算量,阵列规模越大,阵元数越多,ICA 的自适应-自适应方法的计算效率优势越明显。

未来,将进一步把基于 ICA 的自适应-自适应波束形成方法推广至宽带信号,完成实测宽带数据的算法验证。

参考文献

- [1] 高守勇,邱秀分,申和平,等.大孔径光纤拖曳阵阵形畸变对波束零陷的影响[J].舰船电子工程,2016,36(8):165-169. doi:10.3696/j.issn.1672-9730.2016.08.041.
GAO Shouyong, QIU Xiufen, SHEN Heping, et al. Influence

- of shape distortion of large-aperture optical fiber towed array on null-forming[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(8): 165-169. doi: 10.3696/j.issn.1672-9730.2016.08.041.
- [2] 李建, 高明生, 解恺. 线阵阵形畸变对目标方位估计性能影响及校正分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2015, 51(6): 1195-1202. doi: 10.13232/j.cnki.jnju.2015.06.015.
- LI Jian, GAO Mingsheng, and XIE Kai. Research on impact of shape distortion on the target azimuth estimation for soft linear array[J]. *Journal of Nanjing University (National Sciences)*, 2015, 51(6): 1195-1202. doi: 10.13232/j.cnki.jnju.2015.06.015.
- [3] 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. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02018.
- LI Wenxing, MAO Xiaojun, and SUN Yaxiu. A new algorithm for null broadening beamforming[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 2882-2888. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02018.
- [4] SOMASUNDARAM S D, BUTT N R, JAKOBSSON A, *et al.* Low-complexity uncertainty-set-based robust adaptive beamforming for passive sonar[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, PP(99): 1-17. doi: 10.1109/JOE.2015.2474495.
- [5] 谢建平, 王瑞, 何熊熊, 等. 利用导向向量旋转和联合迭代优化的自适应波束形成算法研究[J]. *声学学报*, 2016, 41(3): 343-352. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2016.03.009.
- XIE Jianping, WANG Rui, HE Xiongxiang, *et al.* Adaptive beamforming algorithm based on direction vector rotation and joint iterative optimization[J]. *Acta Acustica*, 2016, 41(3): 343-352. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2016.03.009.
- [6] SOMASUNDARAM S D. Reduced dimension robust capon beamforming for large aperture passive sonar arrays[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(7): 707-715. doi: 10.1049/iet-rsn.2010.0351.
- [7] SOMASUNDARAM S D, PARSONS N H, LI P, *et al.* Reduced-dimension robust capon beamforming using Krylov-subspace techniques[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2015, 51(1): 270-289. doi: 10.1109/TAES.2014.130485.
- [8] 王永良, 丁前军, 李荣锋. 自适应阵列处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 86-104.
- WANG Yongliang, DING Qianjun, and LI Rongfeng. Adaptive Array Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 86-104.
- [9] BROOKER E and HOWELL J M. Adaptive-adaptive array processing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1986, 74(4): 602-604.
- [10] 朱德智, 代月花. 自适应-自适应波束形成的零陷加深技术[J]. *雷达与对抗*, 2012, 32(4): 35-38.
- ZHU Dezhi and DAI Yuehua. The technology of null depth of adaptive-adaptive beamforming[J]. *Radar and ECM*, 2012, 32(4): 35-38.
- [11] LI R, ZHAO S, and DAI L. An adaptive-adaptive beamforming algorithm with nulls widening[C]. *IEEE International Congress on Image and Signal Processing*, Tianjin, China, 2009: 1-5. doi: 10.1109/CISP.2009.5304735.
- [12] 邱炜, 朱德智, 范明意. 基于 AA 的多通道雷达自适应抗干扰方法[J]. *舰船电子对抗*, 2016, 39(2): 21-25. doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2016.02.006.
- QIU Wei, ZHU Dezhi, and FAN Mingyi. Adaptive anti-jamming method for multi-channel radar based on AA[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2016, 39(2): 21-25. doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2016.02.006.
- [13] JEONG D, SON K, LEE Y, *et al.* Echo energy estimation in active sonar using fast independent component analysis[C]. *International Conference on Neural Information Processing*, Berlin, Germany, 2009: 381-388. doi: 10.1007/978-3-642-10677-4_43.
- [14] 李秀坤, 夏峙. 水下目标回波盲分离性能的瞬时频率特征评价方法[J]. *声学学报*, 2015, 40(5): 655-664. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2015.05.006.
- LI Xiukun and XIA Zhi. A performance evaluation methods based on instantaneous frequency feature of underwater target echo blind separation[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(5): 655-664. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2015.05.006.
- [15] 陈晋央, 吴瑛. 基于独立成分分析的波束空间波达方向估计算法[J]. *声学技术*, 2012, 31(2): 227-231. doi: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.022.
- CHEN Jingyang and WU Ying. Beam-space Direction of Arrival (DOA) algorithm based on independent component analysis[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(2): 227-231. doi: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.022.
- [16] BOYA C, RUIZ L M, POSADA J, *et al.* Identification of multiple partial discharge sources using acoustic emission technique and blind source separation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2015, 22(3): 1663-1673. doi: 10.1109/TDEI.2015.7116363.
- [17] TU S and CHEN H. Blind source separation of underwater acoustic signal by use of negentropy-based fast ICA algorithm [C]. *IEEE International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology*, Ghaziabad, India, 2015: 608-611. doi: 10.1109/CICT.2015.115.
- [18] 许策, 章新华, 张有志. 一种基于盲分离技术的声呐浮标场多目标定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 350-352.
- XU Ce, ZHANG Xinhua, and ZHANG Youzhi. A BSS-based algorithm for multi-target location of sonobuoys field[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 350-352.
- [19] 侯云山, 黄建国, 史文涛. 一种低信噪比下的信号源数检测新

- 方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1390-1394. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.01077.
- HOU Yunshan, HUANG Jianguo, and SHI Wentao. A novel method for the detection of the number of signals at low signal-to-noise ratios[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1390-1394. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.01077.
- [20] 成玮, 张周锁, 何正嘉. 采用信息理论准则的信号源数估计方法及性能对比[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(8): 38-44. doi: 10.7652/xjtub201508007.
- CHENG Wei, ZHANG Zhousuo, and HE Zhengjia. Information criterion-based source number estimation methods with comparison[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(8): 38-44. doi: 10.7652/xjtub201508007.
- [21] SOMASUNDARAM S D. Wideband robust capon beamforming for passive sonar[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(2): 308-322. doi: 10.1109/JOE.2012.2223560.
- [22] 薄连坤, 熊瑾煜, 罗来源. 应用稀疏表示的宽带相干超分辨方位估计方法[J]. 声学学报, 2015, 40(6): 772-778. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2015.06.002.
- BO Liankun, XIONG Jinyu, and LUO Laiyuan. Wideband super-resolution bearing estimation method utilizing sparse representation solver after focusing transformation[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(6): 772-778. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2015.06.002.
- 钱宇宁: 男, 1988 年生, 工程师, 研究方向为水声信号处理.
- 曹欣荣: 男, 1988 年生, 工程师, 研究方向为水声信号处理.
- 陈亚伟: 男, 1985 年生, 工程师, 研究方向为水声信号处理.
- 孙俊: 男, 1975 年生, 高级工程师, 研究方向为信号与信息处理.
- 张翔宇: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为水声信号处理.