一种新的被动水声探测盲自适应波束形成器

范文涛[1]，章新华[2]，叶琼龙[2]，康春玉[2]
（1. 海军大连舰艇学院研究生一队，大连 116018；2. 海军大连舰艇学院信号与信息技术研究中心，大连 116018）

摘要：提出了一种适合拖曳线列阵鱼雷自导系统的新的被动水声探测盲自适应波束形成器。介绍了该方法的设计思路和推导原理，然后通过计算机仿真验证了该方法的收敛性，并在不同信噪比、快拍数条件下与单独使用自适应 MVDR 波束形成器在角度估计方面做了对比，与单独使用盲源分离算法在源信号估计方面作了比较。最后证明该方法是一种稳健的、对信噪比变化不敏感的适合被动水声探测的新方法。

关键词：独立分量分析；盲源分离；盲波束形成器；被动声纳
中图法分类号：TN911.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2008)-05-0662-05

A new blind adaptive beamformer applied to underwater passive acoustic detection

FAN Wen-tao[1], ZHANG Xin-hua[2], YE Qiong-long[2], KANG Chun-yu[2]
(1. *The First Unit of Post Graduated Management Unit, Dalian Naval Academy, Dalian* 116018, *Liaoning, China*;
2. *Research Center of Signal Information, Dalian Naval Academy, Dalian* 116018, *Liaoning, China*)

Abstract: A new algorithm named blind adaptive beamformer, which is used in towed linear array of torpedo, is proposed. In this paper, the theory of the new algorithm is introduced firstly. Then by using computer simulation the convergent time of the algorithm under different SNR and snaps is checked, and a contrast between the proposed algorithm and the MVDR beamformer in the aspect of target arriving angle is made. In addition a contrast between the proposed algorithm and the blind source separation algorithm in the aspect of estimated source is given. Computer simulation results demonstrate the good effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: independent component analysis; blind source separation; blind beamformer; passive sonar

1 引 言

拖曳线列阵鱼雷自导系统是近期发展起来的一种新的鱼雷自导方式。它能够克服传统鱼雷声自导系统由于孔径的限制，造成检测低频小目标能力弱和容易受到雷体自噪声干扰的缺点[1]。拖曳线列阵自导系统的自导环境相对安静，利于远程目标跟踪，由于工作方式为被动，利于自身隐蔽。但是在实际应用中，水下被动声学环境非常复杂，有用信号中经常混杂着干扰与噪声，传统的信号处理方式已无法对安静型小目标、几乎同一方位的多目标进行检测与估计，大大影响了自导系统的性能。这就迫切需要一种实时性好、稳健、适合水下被动声学的信号处理方式。

90年代初，一种被称为独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)的盲信号处理的方法[2]，给被动声信号探测带来了新思路。ICA 方法又被称为一种盲源分离方法[3]。ICA 方法基于源信号统计独立的假设，在没有源信号和接收阵列任何先验知识的情况下，能够从经过阵列混合后的观测信号中辨识出阵列流型和恢复出源信号。然而，大部分基于 ICA 的盲信号分离算法在水声情况中不适用，问题在于这些算法对信噪比变化比较敏感，同时由于混响和多途的影响，盲分离得到的解混矩阵存在模糊性，这对波达方向估计存在较大影响。

本文提出一种新的融合 ICA 技术的盲自适应波束形成器。首先利用时延求和波束形成器产生在二阶上统计独立的混合源波束，输出给盲分离器进

收稿日期：2007-11-01；修回日期：2008-02-20
作者简介：范文涛(1981-)，男，江苏吴江人，硕士，研究方向为水声信号处理。
通讯作者：范文涛，E-mail：fwt5138@yahoo.com.cn

一步在高阶上去相关，然后盲分离器输出结果与波束输出按照功率最大化准则修正波束形成器时延值，最后用修正后的时延值重新调整波束指向。利用波束输出提供给盲源分离器，能够满足盲源分离对独立源的假设，盲源分离输出净化的源信号能使自适应波束形成收敛速度加快，同时提高低信噪比下角度估计的精度。通过计算机仿真，将本文方法与单独使用其它盲源分离算法相比，得出本文的方法在源信号恢复、收敛速度、信噪比敏感度方面效果更好。同时还与单独使用自适应 MVDR 波束形成器相比较，得出在低信噪比条件下，本文的算法角度估计性能更好。

2　盲自适应波束形成器

本文提出的方法分为三个步骤：(1) 自适应延迟求和波束形成产生初始波束，(2) 盲分离器根据得到的波束恢复源信号，(3) 自适应算法利用实时波束输出和盲分离结果更新波束形成器时延值，重新调整波束输出。整个算法结构如图 1 所示。

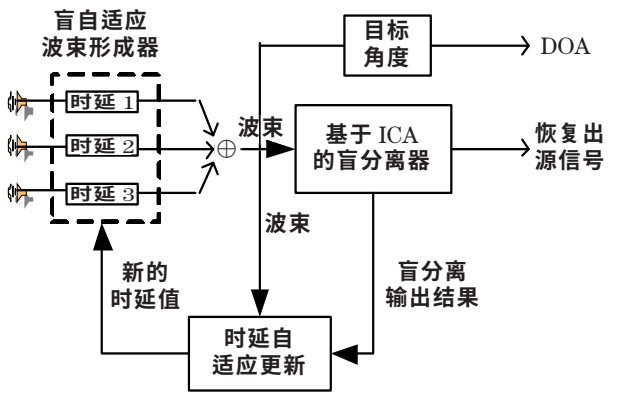


图 1　盲自适应波束形成器结构框图

Fig.1　The configuration of the paper′s method

2.1　阵列数据模型

本文仿真所用的水听器阵列是均匀线列阵。相同规格的各个水听器按照 $d_k(k=1,\cdots,K)$ 的距离均匀分布在一条直线上。定义远场声源到达阵列的方位角为 $\theta_l(l=1,\cdots,L)$。K 表示水听器的个数，L 表示声源的个数。图 2 绘出了基本阵列模型。

通常情况下，选取阵列中心为参考点[2]，每个阵元所接收到的数据是到达阵列的远场 L 个源的混合，可表示为：

$$x_l(n)=\sum_{j=1}^{K}s_j(n-\tau_{lj})+n_l(n) \tag{1}$$

其中 $n_l(n)$ 为与源信号统计独立的加在每个阵元上的加性噪声。τ_{lj} 为声源到达各个阵元的声程差[3]。

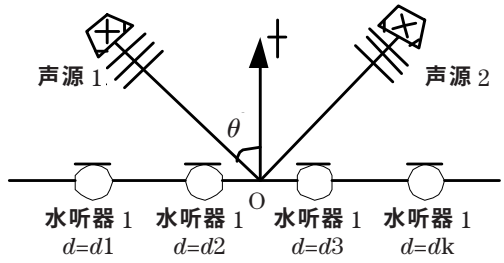


图 2　均匀线阵列模型

Fig.2　The model of the uniform linear array

2.2　独立分量分析技术

1986 年，Herault 和 Jutten 基于神经网络的原理提出一种新的自适应学习算法，验证该算法能够分离混合在一起的独立源信号[3]。Comon[4]系统地分析了瞬时混叠信号盲源分离的问题，并明确了独立分量分析(ICA)的概念。ICA 的定义是通过寻找一个 $m\times n$ 阶的满秩线性变换(或分离)矩阵 $\boldsymbol{w}$，以便由 $y=\boldsymbol{w}x$ 定义的输出矢量 $\boldsymbol{y}=(y_1,y_2,\cdots,y_n)^T$ 的各分量尽可能地独立。图 3 形象地说明了盲源分离的一般过程。

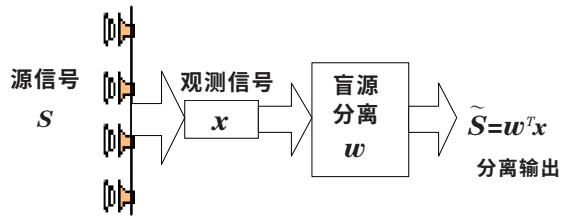


图 3　基于独立分量分析的盲源分离框架

Fig.3　ICA-Based BSS diagram

2.3　本文算法

在本文提出的算法中，将在盲波束形成器中引入一个基于 ICA 的独立准则[4]，使得该算法既能实现源分离又能找到源方位。算法采用 Tsang[5]提出的功率最大化自适应波束形成器，唯一的区别在于这里的波束形成器对源数目个数无限制。之所以在波束形成器中使用独立分量分析技术，其目的是想将该算法的两个输出(这里假设两个源信号)量之间的相关或者非线性相关最小化。与 Tsang 的功率最大化波束形成器类似，该算法也将使用最速梯度下降法[5]。所有的计算过程将采用实数。

第一步：算法使用一个线性处理，这将使两个波束输出的互相关最小。两路波束的互相关的绝对值可以表示为，

$$J(t)=|E\{\hat{s}_1(t)\tilde{s}_2(t)\}| \tag{2}$$

其中 $\hat{s}_1(t)$ 是某一路输出波束值，$\tilde{s}_2(t)$ 是另一路

输出波束值。由于互相关极有可能是负数,所以在公式里放入绝对值。如果一个源位于奇数旁瓣中,那么被波束形成器接收到后,算法将有一个符号变化,这也是导致互相关出现负数的原因。形成的某一路波束可表示为,

$$\hat{s}_k(t)=x_1(t+\frac{(N-1)}{2}d_k)+\cdots x_c(t)+\cdots x_N(t-\frac{(N-1)}{2}d_k)$$
$$=y_1(t)+\cdots y_c(t)+\cdots y_N(t) \quad (3)$$

在这里 k 表示波束号,N 表示阵元个数,取阵列中间阵元为参考点。

第二步:与 LMS 算法类似,需要对公式(2)中代价函数 $J(t)$ 求取梯度值,这样就可以实现自适应过程了。

$$\nabla J(t)=\nabla|E\{\hat{s}_1(t)\tilde{s}_2(t)\}|$$
$$=\mathrm{sgn}[E\{\hat{s}_1(t)\tilde{s}_2(t)\}]\nabla E\{\hat{s}_1(t)\tilde{s}_2(t)\} \quad (4)$$

上面所给出的公式都是将波束间的互相关最小化。这仅仅只是最小化了波束间二阶统计量,其余高阶统计量仍然没有最小化。为了真正意义上的统计独立性,所有的高阶统计分量都应该为零。将高阶统计量变为零的一个办法就是在算法中使用非线性函数 $f(\cdot)$,就像在 ICA 技术中使用一样[4]。如果代价函数 $J(t)$ 变为 $J(t)=|E\{\hat{s}_1(t)f(\tilde{s}_2(t))\}|$,那么所有的偶数高阶互分量将被考虑进去。如果源信号的分布函数服从对称性,且均值为零,那么奇数高阶互分量将变为零。通常考虑的非线性函数是tanh,其泰勒展开式为

$$\tanh(x)=x-\frac{1}{3}x^3+\frac{2}{15}x^5+\cdots \quad (5)$$

第三步:由公式(4)对代价函数中时延值的梯度运算,同时引入公式(5)的非线性函数,可以得到该算法自适应时延修正公式为

$$d_p(n+1)=d_p(n)-\mu(\frac{(N-1)}{2}\dot{y}_{p1}(n)+\cdots-$$
$$\frac{(N-1)}{2}\dot{y}_{pN}(n))\cdot\sum_{i=1(i\neq p)}^{M}\mathrm{sgn}[\tilde{s}_p(t)f(\hat{s}_i(t))]\cdot f(\hat{s}_i(t)) \quad (6)$$

上面的公式将感兴趣的源与其他源之间的偶数高阶统计分量最小化。在公式(6)中 p 代表某路波束号,μ 为自适应步长控制参数,M 为目标源的个数。

第四步:与基于自然梯度的盲源分离算法[2]融合。设盲源分离器输出为 u,使 $E\{f(u_k(t))\hat{s}_k(t)\}$ 最大的同时也使得 $E\{f(u_k(t))\hat{s}_j(t)\}$ 非线性相关最小。即在使波束输出与待估信号之间的非线性互相关最大同时,使得波束输出与别的待估信号之间的非线性互相关最小。所以新的融合算法的时延更新公式为

$$d_p(n+1)=d_p(n)-\beta\cdot f(u_p(n))(\frac{(N-1)}{2}\dot{y}_{p1}(n)+\cdots-$$
$$\frac{(N-1)}{2}\dot{y}_{pN}(n))-\mu(\frac{(N-1)}{2}\dot{y}_{p1}(n)+\cdots-$$
$$\frac{(N-1)}{2}\dot{y}_{pN}(n))\cdot\sum_{i=1(i\neq p)}^{M}\mathrm{sgn}[\tilde{s}_p(t)f(u_i(t))]\cdot f(u_i(n)) \quad (7)$$

在公式(7)中 β 为自适应步长控制参数。

3 仿真分析

3.1 计算机仿真

仿真信号源采用两个服从均匀分布的高斯白噪声源,通过带宽为 3250Hz~3750Hz 的带通滤波器,变成两个有色窄带噪声源,分别以-15°和 15°的入射角被 3 个阵元的均匀线列垂直阵接收。阵元间距为 0.2m,满足中心频率为 3750Hz 的半波长条件。图 4 表示了指向 0°时的固定波束图。

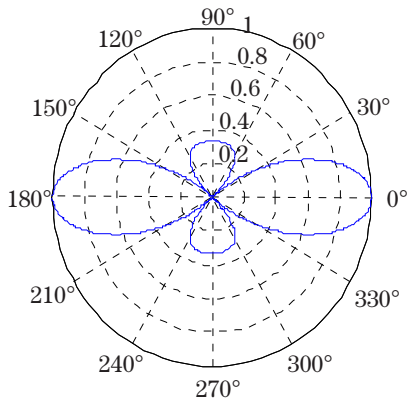
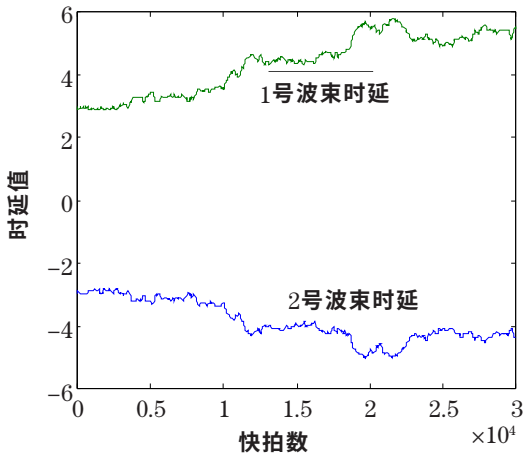


图 4 三元阵 0°波束图

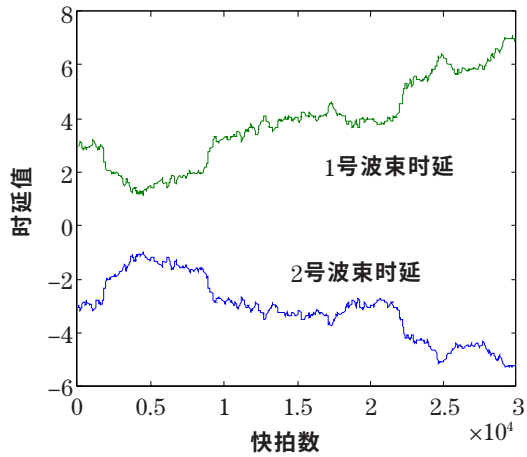
Fig.4 Fixed beam pattern for a three-element array

自适应步长控制参数 μ=0.01,β=0.01,进行 50 次独立的 Monte-Carlos 仿真,当叠加信噪比为-5dB 的高斯白噪声时,自适应时延学习曲线如图 5(a)所示。当叠加信噪比为-10dB 的高斯白噪声时,自适应时延学习曲线如图 5(b)所示。图 5(c)表示信噪比为-5dB 时的角度估计。5(c)中 1 号波束最大值出现在 26°,最小值出现在-61°和-14.06°;2 号波束最大值出现在-26°,最小值出现在 60°和 14.52°。利用峰谷逻辑[5],判断出目标源的方位应该出现在离两个波束最大值最近的谷值处。所以估计出的方位角为-14.06°与 14.52°。同理,图 5(e)表示信噪比为-10dB 时估计的角度值为-9.83°与 9.54°。图 5(d)表示在信噪比为-5dB 情况下,单独使用 MVDR 自适应波束形成方法对双源的角度估计图,最后估计的角度为-10°与 11.3°。同理,图 5(f)表示在信噪比

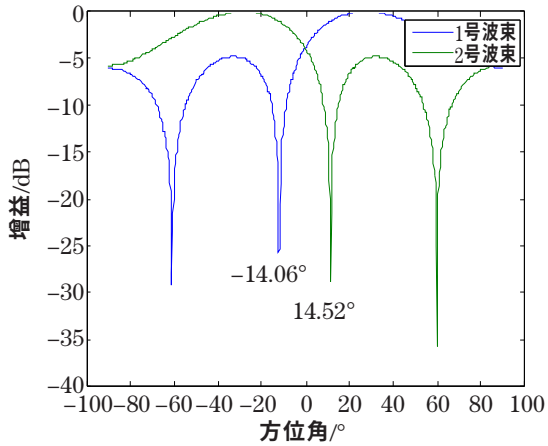
为−10dB 情况下，所估计出的角度值为−8.21°与8.4°。由此看出本文的方法对低信噪比并不敏感。传统自适应方法在低信噪比、小阵元条件下，会出现许多虚假目标，这对鱼雷的目标判别很不利。图 6 表示信噪比为−5dB 时的盲源分离输出结果和实际源信号波形。



（a）自适应学习曲线，双源，信噪比=5dB

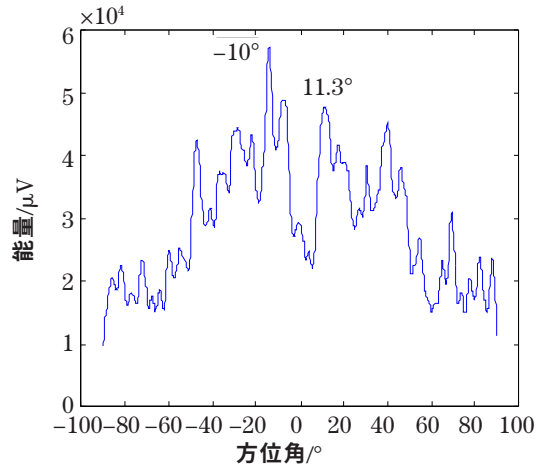


（b）自适应学习曲线，双源，信噪比=−10dB

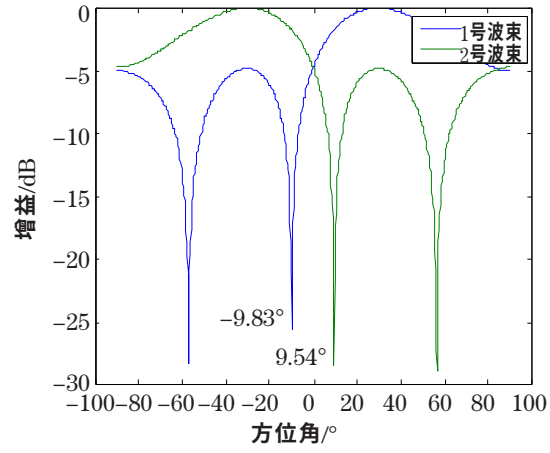


（c）波束图（双源，信噪比=−5dB）

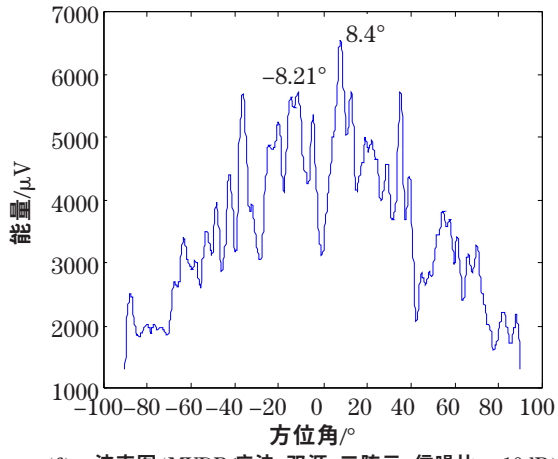
在恢复源信号性能测试方面，表 1 给出了本文算法与单独使用基于 ICA 的盲源分离算法（FastICA）[4]在不同信噪比下，与实际信号的相关性[3]。由表 1 看出，本文算法比传统盲源分离算法在低信噪比情况下能更好恢复源信号。



（d）方位估计图（MVDR 疗法，双源，阵元数=3，信噪比=−5dB）



（e）波束图（双源，信噪比=−10dB）



（f）波束图（MVDR 疗法，双源，三阵元，信噪比=−10dB）

图 5　信噪比分别为-5dB、-10dB 时，自适应学习曲线与双源方位估计

Fig.5　Learning curves and DOA under *SNR*=-5dB，-10dB for the two-source

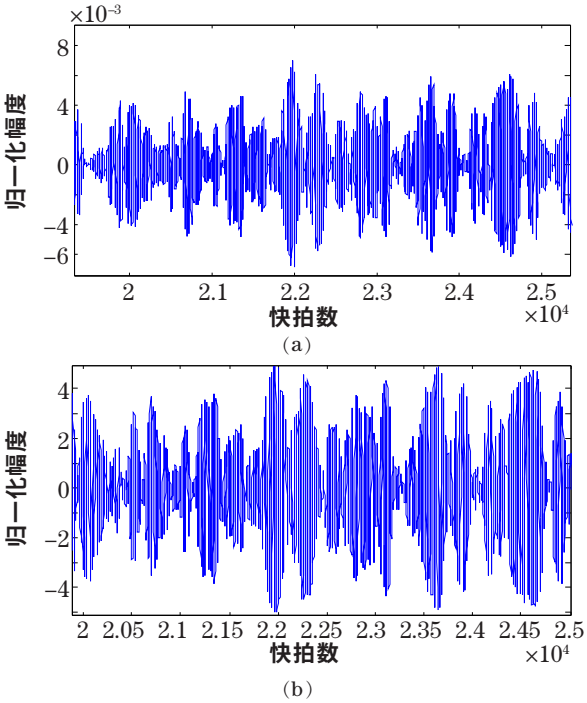


图 6 信噪比分别为-5dB 时,(a)估计的源信号 (b)实际源信号

Fig.6 *SNR*=-5dB,(a) Estimated source (b) Actual source

表 1 两种算法分离性能比较

Table 1 The performance of the two algorithms

算法	*SNR*=5dB	*SNR*=0dB	*SNR*=−5dB	*SNR*=−10dB
本文算法	0.998	0.921	0.821	0.803
FastICA	0.893	0.705	0.588	0.377

4 结 论

通过计算机仿真比较,本文算法在信噪比敏感度、角度估计方面均优于单独使用波束形成或者盲源分离方法。而且本文算法采用在线处理方式,适合实际工程运用。

参 考 文 献

[1] 刘朝晖, 马国强. 水下声自导武器目标识别综述[J]. 声学与电子工程, 2004, **75**(3): 25-30.
LIU Zhaohui, MA Guoqiang. The introduction of underwater acoustic auto-navigation weapon target detection[J]. Acoustics and electronics engineering, 2004, **75**(3): 25-30.

[2] Cichocki A, Unbehauen R, Rummert E. Robust learning algorithm for blind separation of signals[J]. Electronics Letters, 1994, **17**(30): 1386-1387.

[3] Amari and Cichocki. Adaptive blind signal processing-neural network approaches[J]. Proceeding of The IEEE, 1998, **10**(86): 2026-2048.

[4] Comon P. Independence analysis: A new concept[J]. Signal Processing, 1994, **11**(36): 287-314.

[5] Chit-Sang Tsang, Compton R T. A time delay algorithm for adaptive arrays[J]. Proceeding of The IEEE, 1996, **13**(33): 457-468.