一种稳健的柔性阵波束形成方法

刘贯领† 汪素萍 余小琴
（杭州应用声学研究所 杭州 310012）

摘要 由于航向、航速的改变以及水流、风浪等因素的影响，柔性线列阵在实际应用过程中阵型畸变是不可避免的。一方面，这种畸变使得许多假设阵型无畸变的波束形成方法的性能受到严重的影响；另一方面，目前很多的阵型估计方法仍不是很成熟，很难准确估计阵元的实际位置。本文提出将柔性阵列分为一段阵元位置已知的子阵和若干段阵元未知的子阵，利用不同子阵接收信号的互相关即可获得所需要的波束形成加权系数，从而在不需要知道阵元确切位置信息的情况下实现目标方法的估计。

关键词 柔性阵，阵型畸变，子阵，互相关，波束形成

A robust beamforming technique for flexible arrays

LIU Guanling WANG Suping YU Xiaoqin
(*Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou* 310012)

Abstract Due to the course and speed change induced by ship maneuvering and the unpredictable underwater turbulence, wind and other factors, the shape distortion of flexible arrays are inevitable. On the one hand, this leads to severe performance degradation of most of the present beamforming techniques that either assumes the array shape is undistorted or neglects the distortion; On the other hand, robust array shape estimation method is yet unavailable. In this paper, a robust technique is proposed to estimate the direction of arrival of targets without any a priori knowledge of the exact array element positions. The array is divided into a small segments with known shape and several other segment with unknown shapes. Only the cross-correlation relationships among these sub-arrays are used to obtain the weight vector.

Key words Flexible array，Shape distortion，Sub-array，Cross correlation，Beamforming

1 引言

柔性的拖曳线列阵由于可以远离安装平台，从而减少了平台噪声的影响，在主动、被动、以及主被动声纳方面得到了越来越广泛的应用。和刚性安装的声纳基阵不同，柔性的拖曳线阵在航速、航向改变时，很容易变形；同时海水中湍流、内波以及风浪等因

2010-04-06 收稿; 2010-09-08 定稿

作者简介: 刘贯领 (1978-), 男, 河南禹州人, 博士,高级工程师, 研究方向: 声纳总体技术, 波形设计、声纳信号处理等。
汪素萍 (1980-), 女, 硕士, 工程师。
余小琴 (1980-), 女, 硕士, 工程师。
†通讯作者: 刘贯领, E-mail:edward202@163.com

(C)1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

素均可能导致阵型的改变，从而偏离接收阵的线性假设条件，从而严重影响到波束形成的性能[1]。

阵型估计是克服阵型畸变带来问题的重要手段之一。在准确估计阵型的前提下，可以在波束形成时对算法进行适当的补偿，从而达到提高性能的目的。现有的阵型估计方法大致可以分为两大类：一是利用航向和深度传感器信息估计阵型[2,3]；实际数据表明，这类方法阵元个数较多时并不适用，尤其是在航向、航速剧烈改变的情况下，航向、深度传感器提供的信息严重不足。二是利用位置已知或未知的参考声源估计阵型[4,5]；这类方法不适于被动声纳，同时在应用中将会遇到下面两大类问题[6]：

(1) 由于声源多为低频声源，而接收阵距离声源较近，不满足远场条件；

(2) 已知位置的声源个数有限。声源个数与阵型估计精度关系密切，而基于MUSIC的阵型估计方法则需要至少3个声源才能准确估计阵型[5]。

其它阵型估计方法如基于混响数据的阵型估计[7]也不是很成熟。本文提出将柔性阵列分为一段阵元位置已知（或近似无畸变）的子阵和若干段阵元未知的子阵的方法，利用不同子阵接收信号的互相关获得所需要的波束形成加权系数，该方法可以在不需要知道阵元确切位置信息的情况下实现目标方法的估计。

2　方法原理和实现

2.1 方法推导

虽然就整体而言，柔性线列阵在运动过程中，尤其是在安装平台机动时存在（严重的）阵型畸变，但就其中的某一小段子阵而言，这种畸变是可以忽略的，因此可以做没有任何补偿的波束形成运算。

从这一思想出发，可以将整个阵列至少分为2段，即可以认为是理想线阵的一个小段子阵1#，和其它阵型未知的子阵2#、3#等。假设子阵1#和子阵2#、3#，……的阵元个数分别为N_1、N_2、N_3，…（整个阵列的阵元个数为$N=N_1+N_2+N_3+\ldots$）。下面以子阵2#为例，研究波束形成权系数的计算方法。

假设在一段时间内两子阵接收到的信号分别为 $A=[\bar{x}_1,\bar{x}_2,\cdots,\bar{x}_{N1}]$ 和 $B=[\bar{x}_{N1+1},\bar{x}_{N1+2},\cdots,\bar{x}_N]$，其中 $\bar{x}_k=[x_{k1},x_{k2},\cdots,x_{kM}]^{\mathrm{T}}$，$k$=1，2，…，$N$。记子阵1#和子阵2#对应的加权系数分别为 $\bar{\omega}_a$ 和 $\bar{\omega}_b$。由于子阵1#可以认为是理想的线列阵，其波束形成加权系数 $\bar{\omega}_a$ 可通过常规的自适应波束形成算法（如MVDR）获得。下面讨论通过变换从 $\bar{\omega}_a$ 获得 $\bar{\omega}_b$ 的原理和方法。

子阵1#和子阵2#的波束形成后的输出分为为 $A\bar{\omega}_a$ 和 $B\bar{\omega}_b$，要保证两者观察的是同一方向的目标，可通过调整 $\bar{\omega}_b$，使两子阵的波束输出之差最小，即通过$\min\{\|A\bar{\omega}_a-B\bar{\omega}_b\|\}$可以获得 $\bar{\omega}_b$，其中$\|\cdot\|$表示求向量的2-范数运算。令：

$$J=\|A\bar{\omega}_a-B\bar{\omega}_b\|^2 \tag{1}$$

将（1）展开：

$$\begin{aligned}J(\bar{\omega}_b)&=(A\bar{\omega}_a-B\bar{\omega}_b)^{\mathrm{H}}(A\bar{\omega}_a-B\bar{\omega}_b)\\&=\bar{\omega}_a^{\mathrm{H}}A^{\mathrm{H}}A\bar{\omega}_a-\bar{\omega}_a^{\mathrm{H}}A^{\mathrm{H}}B\bar{\omega}_b-\bar{\omega}_b^{\mathrm{H}}B^{\mathrm{H}}A\bar{\omega}_a\\&\quad+\bar{\omega}_b^{\mathrm{H}}B^{\mathrm{H}}B\bar{\omega}_b\end{aligned} \tag{2}$$

可以证明：$B^{\mathrm{H}}B$ 是正定阵，所以二次方程 $J(\bar{\omega}_b)$ 有唯一的极小值点，且该点满足 $\partial J/\partial\bar{\omega}_b=0$。由于[8]：

$$\frac{\partial(\bar{\omega}_a^{\mathrm{H}}A^{\mathrm{H}}A\bar{\omega}_a)}{\bar{\omega}_b}=0 \tag{3}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

$$\frac{\partial(\bar{\omega}_a^{\mathrm{H}} A^{\mathrm{H}} B\bar{\omega}_b)}{\bar{\omega}_b} = (\bar{\omega}_a^{\mathrm{H}} A^{\mathrm{H}} B)^{\mathrm{H}} = B^{\mathrm{H}} A\bar{\omega}_a \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{\omega}_b^{\mathrm{H}} B^{\mathrm{H}} A\bar{\omega}_a)}{\bar{\omega}_b} = B^{\mathrm{H}} A\bar{\omega}_a \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\omega}_b^{\mathrm{H}} B^{\mathrm{H}} B\bar{\omega}_b)}{\bar{\omega}_b} = (\bar{\omega}_b^{\mathrm{H}} B^{\mathrm{H}} B)^{\mathrm{H}} + B^{\mathrm{H}} B\bar{\omega}_b = 2B^{\mathrm{H}} B\bar{\omega}_b \quad (6)$$

令 $\frac{\partial J}{\bar{\omega}_b} = 0$，并将（3）~（6）式代入，得：

$$-2B^{\mathrm{H}} A\bar{\omega}_a + 2B^{\mathrm{H}} B\bar{\omega}_b = 0 \quad (7)$$

可得到得子阵2#最优的加权系数：

$$\bar{\omega}_b = (B^{\mathrm{H}} B)^{-1}(B^{\mathrm{H}} A)\bar{\omega}_a \quad (8)$$

由上面的推导过程可以看出，子阵2#波束形成的加权系数完全由子阵1#的加权系数确定，也就是整条阵最终的方位分辨力由子阵1#确定。与原阵相比，子阵1#的孔径要小得多，因此，为了将孔径减小带来的不利影响降到最低，子阵1#须用采用诸如MVDR[9]之类的高分辨率波束形成方法。从（8）式还可以看出，不同子阵波束形成加权系数的求解互不影响，可以独立获得。

本文在下面的仿真实验中子阵1#采用这样MVDR算法。

2.2 实现步骤

从上一节的分析和推导过程可以看出，本文提出的波束形成算法的实现步骤如下：

(1) 求子阵 1 #的MVDR波束形成系数：

$$\bar{\omega}_a = \frac{(A^{\mathrm{H}} A)^{-1} v(\phi_s)}{v^{\mathrm{H}}(\phi_s)(A^{\mathrm{H}} A)^{-1} v(\phi_s)} \quad (9)$$

其中 $v(\phi_s)$ 为子阵1#的常规波束形成加权系数；

(2) 通过（8）式获得子阵2#的波束形成加权系数；

(3) 子阵2#的波束输出为：

$$y_2(\phi_s) = B\bar{\omega}_b \quad (10)$$

(4) 按照同样的方法获得子阵3#、4#、……，K#的波束输出 $y_3(\phi_s)$、$y_4(\phi_s)$、……，$y_K(\phi_s)$；将各子阵的波束输出累加，得到最终的波束输出：

$$y = \sum_{k=2}^{K} y_k(\phi_s) \quad (11)$$

最终的波束形成没有用到子阵1#的阵元数据，虽然如此，从下一部分的仿真分析中可以看出，这样做并不会导致波束形成处理增益的下降。除直接求逆外，矩阵求逆的还可以通过下面的迭代方法获得[9]。

若令$R = A^{\mathrm{H}} A$，则R可以近似为：

$$R_{k+1} = \alpha R_k + (1-\alpha)\bar{x}_k \bar{x}_k^{\mathrm{H}} \quad (12)$$

则R矩阵的求逆操作可以通过下面的递推共公式获得：

$$R_{k+1}^{-1} = \frac{1}{\alpha} R_k^{-1} + \frac{1-\alpha}{\alpha}\left[\frac{R_i^{-1}\bar{x}_{k+1}\bar{x}_{k+1}^{\mathrm{H}}}{\alpha + (1-\alpha)\bar{x}_{k+1}^{\mathrm{H}} R_k^{-1}\bar{x}_{k+1}}\right] \quad (13)$$

式中 α 为遗忘因子，在快变环境中，α 的取值应该大些，而在慢变环境中，其取值应该小些；为了防止在迭代过程中发散，R_0^{-1} 可以初始化为$1/\varepsilon I$，其中I为单位方阵，ε为小于1的非负数。

3 计算机仿真和讨论

在本节的仿真实验中，假设在45°和70°方向上同时存在强弱两个目标，其强度分别为5 dB和−10 dB。下面研究两种阵型畸变情况下本文所提出的方法的性能。

3.1 圆弧形畸变

假设按半波长布阵、阵元个数为150的柔性阵阵型畸变前后的比较如图1所示。假定前

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

20个阵元所在子阵的阵型可以认为没有畸变，后面的阵元分为2、4、7个子阵，结果如图2所示。

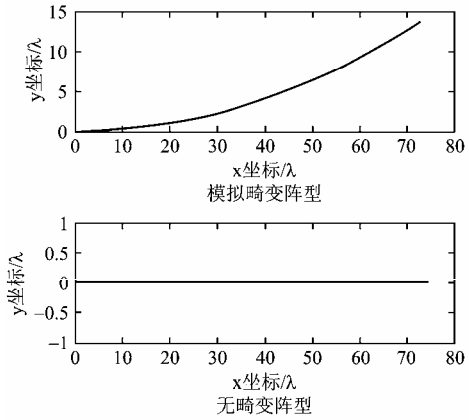

图1　圆弧形阵型畸变前后比较

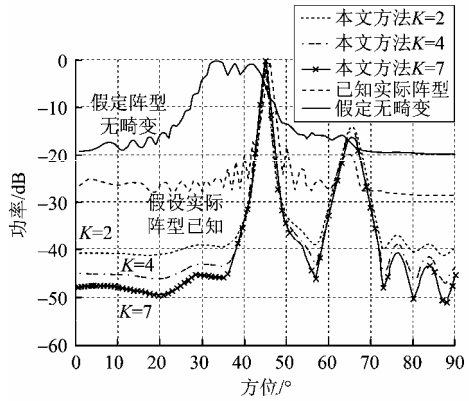

图2　不同方法波束形成输出

从图2可以看出，在整阵发生畸变的情况下，如果仍按照均匀线列阵进行波束形成，虽然可以发现强目标的存在，但几乎无法准确定位，但发现不了弱目标；如果准确知道阵元位置，利用常规的波束形成方法，可以找到强弱两个目标，强目标可以准确定位，弱目标定位精度有一定的偏差；本文提出的方法的定位精度与阵元位置已知时波束形成的江都相当，但信噪比有明显提高。

3.2 正弦畸变

假设按半波长布阵、阵元个数为150的柔性阵阵型畸变前后的比较如图3所示。其余参数设置同3.1节，结果如图4所示。

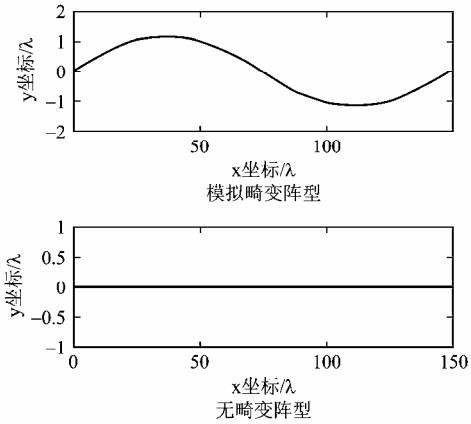

图3　正弦形阵型畸变前后比较

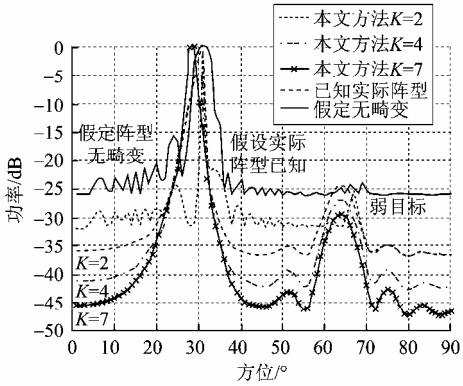

图4　不同方法波束形成输出

从图4可以看出，在发生这种种的畸变时，如果仍然忽略畸变，会发生目标分裂现象，从而导致假目标的出现，而弱目标同样无法检测；已知阵元位置的常规波束形成方法和本文提出的方法可以实现目标检测，但定位精度下降，需要进行修正。

3.3 分析与讨论

从图2和图4可以看出，本文提出的方法在最终的波束形成输出中，虽然没有用到所有的阵元，但输出信噪比不降反升，这主要

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

因为子阵加权系数求解的过程中的互相关运算消除了部分非相关噪声（式8），从而降低了噪声输出功率。

对于阵型无畸变的情况，本文提出的波束形成方法同样适合，如图5所示。同时，由于常规的波束形成方法假定各阵元接收到的信号强度是一样的，通常采用均匀的加权系数（不考虑幅度加权），因此当阵列中的某个或某些阵元失效时，常规波束形成方法由于引入了无效阵元信号而导致性能下降；而本文提出的方法则可以根据接收到的阵元信号自适应地调节加权系数以适应新的情况，从而保证性能不受影响。图6是3个阵元失效时常规方法和本文方法的性能比较。

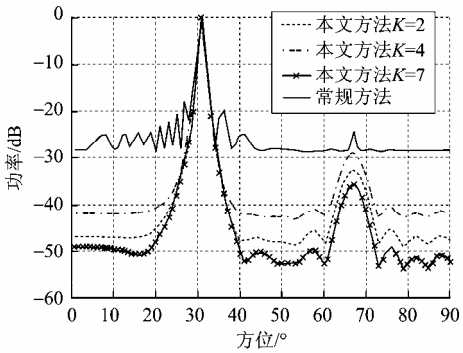

图5　阵型无畸变时各波束形成方法输出

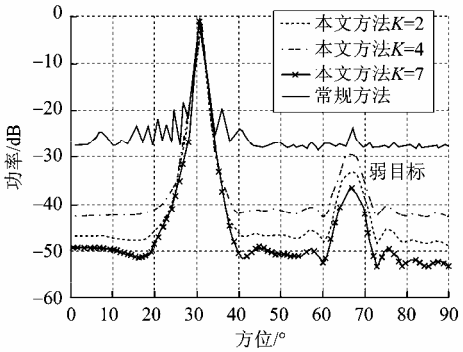

图6　存在失效阵元时各波束形成方法输出

从图6可以看出，当有实效阵元存在时，常规波束形成很难分辨出弱目标，而本文提出的方法则基本不受实效阵元的影响。

4　小结

柔性线列阵在实际应用过程中，航速、航向以及水流等因素均可导致阵型的畸变，从而引起常规波束形成算法性能的下降。针对这一情况，本文提出的波束形成方法可以不需要准确知道阵型信息的情况下提高波束形成的方法估计性能和输出信噪比。计算机仿真表明，该方法是正确有效的。

参　考　文　献

[1] FELISBERTO P, JESUS S M. Towed array beamforming during ship's maneuvering [J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(3): 210-215.

[2] GRAY D A, ANDERSON B D O, BITMEAD R R. Towed array shape estimation using Kalman filters—Theoretical models [J]. IEEE J. Ocean.Engineering, 1993, 18(4): 543-556.

[3] HOWARD B E, SYCK J M. Calculation of the shape of a towed underwater acoustic array [J]. IEEE J. Ocean. Engineering, 1992, 17(2): 193-203.

[4] WEISS A J, FRIEDLANDER B. Array shape calibration using sources in unknown locations—A maximum likelihood approach [J]. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing, 1989, 37(12): 1958-1966.

[5] ZhANG M, Zhu Z D. Array shape calibration using sources in known directions [J]. Proc. IEEE Aerosp. Electron. Conference, 1993, 1: 70-73.

[6] Hee Young Park, Won Tchon Oh, Dae-Hee. Youn. Generalization of the subspace-based array shape estimations [J]. IEEE Journal Of Oceanic Engineering, 2004, 29(3): 847-856.

[7] Vijay Varadarajan, Jeffrey Krolik. Array shape estimation and tracking using active sonar reverberation [J]. IEEE Trans. On Aerospace & Electronic System, 2004, 40(3): 1073-1086.

[8] FREDIC M H, Ivica Kostanic. Principles of neurocomputing for science & engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 594-595.

[9] DIMITRIS G, MANOLAKIS V K. INGLE S M. Kogon. Statistical and adaptive signal processing [M]. Boston: Artech House, 2005: 758-765.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n