

# 匹配场反演阵形估计算法的试验研究

巩玉振, 刘 焱, 张秋生, 蔡惠智

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 传统的阵形估计算法都基于这样一个假设, 即声传播为平面波或球面波模型, 在浅海应用条件下, 多途效应显著, 该假设失效, 造成此类算法的性能下降。提出了一种基于匹配场反演的阵形估计算法, 采用简正波模型对声场建模, 将多途建模为不同号数的简正波, 从而消除了多途效应的影响; 并且通过合理地选择目标函数, 使算法对环境参数的扰动具有一定的宽容性; 利用柔性阵的线性约束, 将阵形畸变用弧线建模, 使问题简化, 在缺少声源精确位置等先验知识的前提下, 仍能实现阵形的准确估计。理论仿真和试验结果表明, 该算法是有效的。

**关键词:** 阵形估计; 匹配场反演; 简正波模型

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0463-03

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.003

## Array shape estimation based on matched field inversion

GONG Yu-zhen, LIU Yao, ZHANG Qiu-sheng, CAI Hui-zhi

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Planar or sphere model is often used in traditional array shape estimation methods. Due to suffering from multipath effect in shallow water applications, the performance of these methods is degraded seriously. An algorithm based on Matched Field Inversion (MFI) is introduced in this paper. This algorithm applies Normal Mode assumption so that the multipath effect can be eliminated. Given a reasonable choice of the target function this algorithm has excellent tolerance of environmental perturbations. And the complexity is reduced by modeling the perturbed array shape with a piece of arc. Theoretical simulation and experimental results show the efficient of the algorithm.

**Key words:** array shape estimation; Matched Field Inversion; normal mode

## 0 引言

柔性长阵广泛应用于岸基声纳、拖曳声纳等系统, 为提高处理增益, 其孔径有不断增大的趋势, 孔径的增大导致阵形的维持变得更加困难, 在这种情况下, 阵形测量成为必须面对的课题。

常规的阵形测量方法包括非声学测量方法和声学测量方法。非声学测量需要在声阵中加装深度传感器、航向传感器, 通过插值或解方程的方法求得阵形<sup>[1]</sup>; 声学测量的方法通过估计各阵元接收信号的时延, 反推阵元位置, 比如基于时延估计的双源阵形估计算法等<sup>[2]</sup>。这类基于时延估计的算法假设声传播为平面波或球面波模型, 在浅海环境下, 算法将受多途效应的影响, 造成性能下降。

匹配场处理(Matched Field Processing, MFP)技术兴起于上世纪 70 年代, 是信号处理技术和水声物理的交叉学科, 它最大限度地利用了水声信道信

息, 与传统的信号处理方法相比, 有明显的性能优势, 得到了广泛研究。匹配场处理技术摒弃了平面波模型, 采用简正波模型或射线模型对声场建模, 多途在模型中对应于不同模态号的简正波或不同的射线路径, 从而消除了多途在信号处理中的影响。

有学者已经进行了基于 MFP 的阵形估计的研究, 得到了很好的效果。Hodgkiss 等对垂直阵做了基于 MFP 的阵形估计, 测量结果与非声学测量方法、高频声学测量方法的结果一致<sup>[3]</sup>; Dosso 等采用射线模型, 求得爆破声源信号相对于各阵元的时延, 再利用局部线性化技术和规整化技术, 对水平长线阵实现了阵形估计<sup>[4]</sup>; Morley 等采用的也是射线模型<sup>[5]</sup>, 利用船噪声对垂直阵实现了阵形估计。

本文尝试用匹配场反演(Matched Field Inversion, MFI)的思想估计阵形, 匹配场处理对声源与阵列的几何参数、环境参数都很敏感, 相对而言, 算法对几何参数的敏感度更高。文中通过设计合适的目标函数, 使算法对几何参数的扰动宽容, 并且该方法仅需要知道大致的声源距离和深度即可, 对方位信息也没有要求, 另外, 算法采取简正波建模的方法, 消除了多途效应的影响, 提高了估计精度。

收稿日期: 2011-09-07; 修回日期: 2011-12-11

作者简介: 巩玉振(1984—), 男, 山东新泰人, 博士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 巩玉振, E-mail: gongyuzhen@gmail.com

## 1 基于 MFI 的阵形估计算法

### 1.1 算法原理

以  $N$  元直线阵为例, 第  $n$  号阵元的理想坐标为  $(x_n, 0)$ , 假设阵列仅发生在水平面的阵形畸变, 而且畸变后的阵形可以建模为一段圆弧。试验处理结果表明, 在阵列布放海区不存在强烈水流的情况下, 这种近似是合适的, 并且将使问题简化。畸变前后的阵列如图 1 所示。

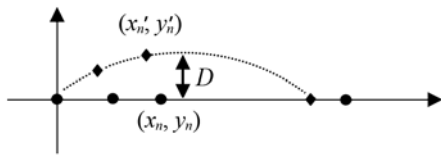


图 1 线阵畸变示意图  
Fig.1 Schematic diagram of array perturbation

图 1 中圆点表示理想情况下的阵元位置, 菱形点表示弯曲畸变后的阵元位置,  $D$  为阵列最大的弯曲量, 根据图 1, 经几何运算得到畸变后的坐标为

$$\begin{aligned} x'_n &= \sqrt{R^2 - (R-D)^2} - R \sin\left(\frac{L}{2R} - \frac{x_n}{R}\right) \\ y'_n &= R \cos\left(\frac{L}{2R} - \frac{x_n}{R}\right) - R + D \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $L$  为阵列的长度,  $R$  为弯曲后阵列的半径, 由方程(2)求得。

$$\cos\left(\frac{L}{2R}\right) - \frac{(R-D)}{R} = 0 \quad (2)$$

由式(1)、(2)知, 将畸变阵形建模为一段圆弧, 再结合阵列的线性约束, 畸变后的各阵元坐标  $(x'_n, y'_n)$  将直接由最大弯曲量  $D$  决定。

定义  $r_n$  为第  $n$  个阵元到声源的距离, 则  $r_n$  是阵列弯曲量  $D$ 、声源到坐标原点的距离  $r$  和方位  $\theta$  的函数, 即  $r_n = r_n(D, \theta, r)$ 。

根据简正波理论, 第  $n$  个阵元接收到的信号可以表示为<sup>[6]</sup>

$$P_n(r_n, z) = P_n(D, \theta, r, z) = \frac{\sqrt{8\pi}}{\sqrt{r_n}} \sum_{m=1}^M \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) \sqrt{k_m} e^{-ik_m r_n - \beta_m r_n + i\pi/4} \quad (3)$$

其中,  $M$  为简正波号数,  $k_m$ 、 $\Psi_m$ 、 $\beta_m$  为第  $m$  号简正波的本征值、本征函数和衰减系数,  $z$  为声源深度。

若已知声源的大致距离  $r_0$  和深度  $z_0$ , 根据匹配场反演原理, 定义关于声源方位  $\theta$  和阵列弯曲量  $D$  的宽带目标函数为

$$\begin{aligned} g(D, \theta) &= \max_{r, z} \sum_f \mathbf{P}_f^H(D, \theta, r, z) \mathbf{R}_f \mathbf{P}_f(D, \theta, r, z) \\ &|r - r_0| < \xi, \quad |z - z_0| < \zeta \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{R}_f$  为接收信号的互谱密度矩阵,  $\xi$ 、 $\zeta$  为声源距离和深度的不确定区间。

按照式(4), 算法在设定的声源距离和深度的区间内, 计算声场匹配的最大值; 穷举阵列弯曲量  $D$  和声源方位  $\theta$  的所有组合, 得到关于这两个参数的模糊曲面, 其峰值的位置即对应实际的参数值。

### 1.2 算法的参数宽容性能分析

众所周知, 匹配场方法对几何参数和环境参数敏感, 几何参数包括声源方位、距离、深度、海深、阵形畸变; 环境参数包括声速剖面、海底声速、海底衰减、海底密度等。

研究表明<sup>[7]</sup>, 匹配场处理算法对几何参数的敏感度远大于环境参数, 另外, 由于式(4)中的目标函数采用了 MFP 中 bartlett 处理器的形式, 本身具有一定的环境参数宽容性, 故本算法不再对环境参数做反演处理, 而是选用各参数的测量值或经验值。

对于几何参数, 式(4)除声源方位和阵形畸变量外, 分别对声源距离和深度设置了不确定区间, 使其对这两个参数宽容; 海深的失配反映为距离误差<sup>[8]</sup>, 故距离不确定区间的设置也使其对海深失配宽容。

为研究目标函数对环境参数和海深失配的宽容性, 设置如图 2 所示的试验环境。

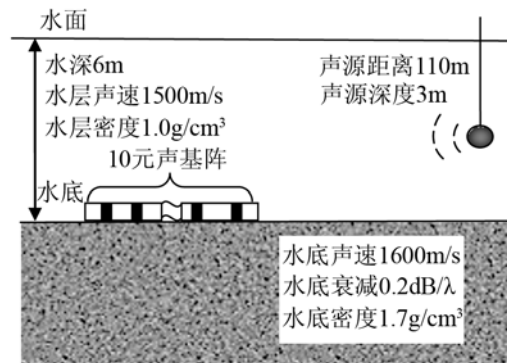


图 2 试验环境设置  
Fig.2 Experimental configuration

图 2 中基阵为阵元间距 2m 的 10 元均匀直线阵, 仿真设置中, 最大弯曲量设为 3 m, 声源频带为 900~1000 Hz, 声源距离为 110m, 深度为 3m, 声源位于声阵的  $10^\circ$  方向, 信噪比设为 10dB。

仿真数据处理中, 对环境参数和水深分别做了 5% 的扰动, 声源距离和深度的不确定区间  $\xi$ 、 $\zeta$  分别设为 20m 和 1m, 得到扰动前后的声源方位和阵列弯曲量的估计结果如图 3、图 4 所示。

图中的灰度值表示目标函数值, 可见受环境参数和海深的扰动的影响, 图 4 的旁瓣比图 3 高, 然而在弯曲量为 3m、声源方位为  $10^\circ$  的位置, 两幅图一致取得最大值, 表明式(4)对参数扰动的宽容性。

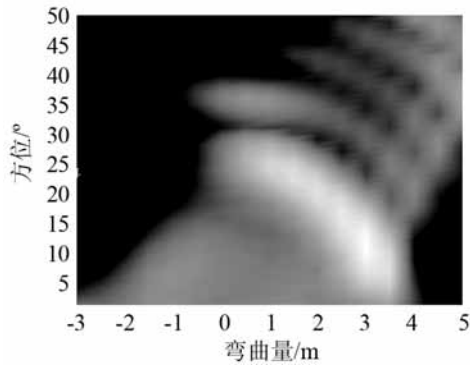


图 3 环境参数无扰动的估计结果  
Fig.3 Estimation without environmental perturbation

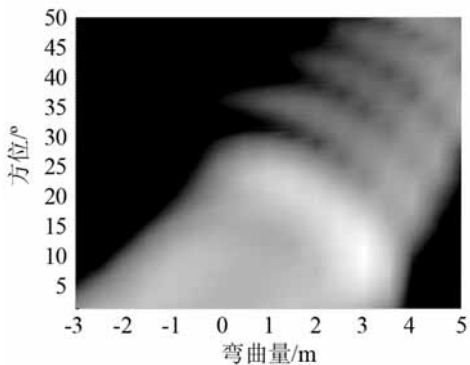


图 4 环境参数做扰动后的估计结果  
Fig.4 Estimation with environmental perturbation

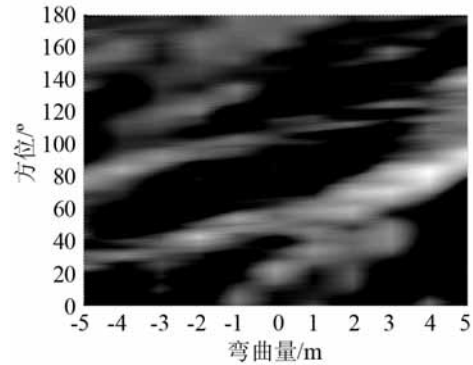


图 5 沙河试验数据处理结果  
Fig.5 Experimental result at Shahe reservoir

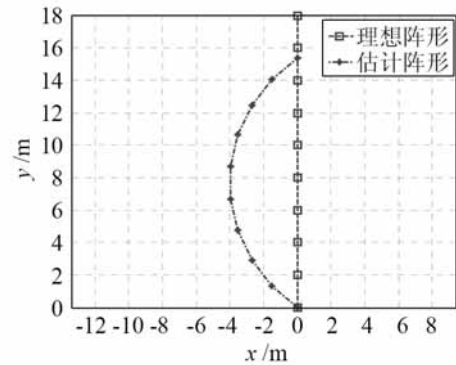


图 6 理想阵形和估计的阵形  
Fig.6 Ideal array shape and estimated array shape

## 2 试验介绍及结果分析

试验是在沙河水库进行的, 试验参数和整体布置如图 2 所示, 发射的宽带声源为 940~1060 Hz 的梳状多频信号, 距离约为 110m, 深度约为 3m。

试验中同步测量了声速剖面, 结果表明当时声速基本是一个弱负梯度的趋势, 数据建模时采用多次测量的平均值。

阵列弯曲量搜索区间取-5~5m, 声源方位搜索区间为 1~360°, 得到如图 5 所示的模糊曲面。从图 5 可见, 声源方位为 80° 左右, 阵列弯曲量为 4m, 阵列弯曲前后的阵形示于图 6。

图 6 中给出的阵形估计趋势与现场水文分析一致, 声源方位的估计值也与试验预设相符, 说明采用的阵形估计方法是可行的。

## 3 结论

本文将匹配场反演的思想用于水平柔性阵的阵形估计, 采用简正波模型对声场建模, 在抑制多途干扰方面取得了比较好的效果, 并且该方法对环境扰动宽容, 适于工程应用。

另外, 本文将畸变阵形建模为圆弧, 使问题简

化, 该假设仅在水流平缓的情况下有效, 对复杂阵型的反演, 将是下一步工作的重点。

### 参 考 文 献

- [1] Hee-Young Park, Dae-Hee Youn. Evaluation of the calibration method using iterative spline interpolation for array shape estimation[C]// OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04, 2004, 2: 593-597.
- [2] 汪俊, 吴立新, Jim Lynch, 等. 一种基于时延估计的双辅助声源阵形校准方法[J]. 声学学报, 2007, 32(2): 165-170. WANG Jun, WU Lixin, Jim Lynch, et al. A method of array shape calibration based on time delay estimation using two auxiliary sources[J]. Acta Acustica, 2007, 32(2): 165-170.
- [3] Hodgkiss W S, Ensberg D E, Murray J J, et al. Direct measurement and matched field inversion approaches to array shape estimation[J]. IEEE Journal Of Oceanic Engineering, 1996, 21(4): 393-400.
- [4] Dosso S E, Fallat M R, Sotirin B J, et al. Array element localization for horizontal arrays via Occam's inversion[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1998, 104(2): 846-859.
- [5] Morley M G, Dosso S E, Chapman N R. Array element localization using ship noise[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2009, 125(3): 1403-1409.
- [6] 张仁和, 何怡. 水平不变海洋声道中的 WKBZ 简正波方法[J]. 声学学报, 1994, 19(1): 1-12. ZHANG Renhe, HE Yi. The WKBZ mode approach to sound propagation in range-independent ocean channels[J]. Acta Acustica, 1994, 19(1): 1-12.
- [7] YANG Kunde, MA Yuanliang, SUN Chao, et al, Multistep Matched-Field Inversion for Broad-Band Data From ASIAEX2001[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 964-972.
- [8] Shang E C, Wang Y Y. Environmental mismatching effects on source localization processing in mode space[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1991, 89(5): 2285-2290.