

基于多阵列数据融合的宽带多声源定位研究*

滕鹏晓[†] 杨亦春 李晓东 田 静

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要 研究多个传声器阵列数据融合和宽带多声源近场定位算法。该算法首先融合多个传声器阵列数据,然后对多声源进行定位。由于充分利用多个阵列的数据,降低了分辨门限,提高了定位的精度和稳健性。通过仿真计算,证明了算法的有效性。

关键词 多阵列,数据融合,宽带,多源定位

Localization of multiple wide-band acoustic sources based on data fusion of multiple arrays

TENG Peng-Xiao YANG Yi-Chun LI Xiao-Dong TIAN Jing

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

Abstract An algorithm of localization for multiple wideband sources by the use of data fusion of the multiple arrays is investigated in this paper. The covariance matrices of the multiple arrays are coherently fused into one of a reference array, and then locations of multiple sources are estimated. Multiple arrays are utilized to reduce the resolution threshold and error, and improve the localization accuracy and robustness. Simulations are carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words Multiple arrays, Data fusion, Wideband, Multiple sources localization

1 引言

阵列信号处理在最近几十年内取得迅速的发展^[1],已经被广泛地应用于雷达,声呐,地震探测,天文,医学领域。声源定位是阵列信号处理的核心问题之一。由于受外场环境的干扰,目标信号非平稳性的影响及

传声器阵列物理尺寸的限制,通常单一传声器阵列对近场声源定位^[2],不能得到较高的精度,而在空间分布的多个传声器阵列的联合处理则提供了一种精确定位的解决方案。多阵列联合处理的算法一直是研究的热点^[3-9],分数据级(DAF: data fusion)、特征级(FEF: feature fusion)、决策级(DEF: decision

2007-02-14 收稿; 2007-06-05 定稿

* 自然科学基金面上基金资助(10674151)和自然科学基金委主任基金资助(60654002)项目

作者简介:滕鹏晓(1979-),男,山东威海人,中科院声学研究所博士研究生,研究方向:阵列信号处理。

杨亦春(1966-),男,研究员。李晓东(1966-),男,研究员。田静(1960-),男,研究员,博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail: px_teng@mail.ioa.ac.cn

fusion)三级融合处理^[5,6]。决策级融合算法通过处理每个阵列数据得到目标声源方位估计结果,然后通过最小二乘准则,把每个阵列独立的估计结果融合起来,得出最终的定位结果。现有的融合算法主要是在决策级上融合^[3,4,7],一方面是因为决策级的融合算法具有数据传输量少的优点,另一方面是在这些应用背景下,各个阵列之间接收到的信号往往损失了相关性。

本文的应用背景是对房间或厂房空间的多声源进行定位,此时多个传声器阵列之间接收的信号有较强的相关性。决策级融合的算法由于每个子阵列独立估计,显然忽略了各子阵列之间的数据的相关信息^[8]。在文献[8]中,作者详细讨论了利用多个阵列接收信号的相关性,可以提高时延估计的精度,并且推导出针对时延估计的相干门限。基于此,本文提出一种阵列数据级的融合算法:同样是利用多个传声器阵列数据,把多个传声器阵列接收的数据协方差矩阵变换到同一个参考阵列上,然后再进行声源定位,这样充分利用了多个阵列的数据,抑制噪声,提高估计的精度和稳健性。仿真中,给出了由两个线阵构造的简单多阵列模型,仿真结果表明,提出的算法在分辨能力和稳健性方面得到增强。

2 多阵列数学模型

多阵列结构可以由多个任意几何形状的子阵列构成,假定多阵列模型是由 L 个子阵列构成,每个子阵由 M 元全指向性宽带阵元组成,有 N 个宽带信号源从不同方向传播到多阵;假定加性噪声与信号源具有相同的带宽,且与信号互不相关。

在频率域,线阵 l 的输出向量的数学表达式为:

$$\begin{aligned} X_l(f_j) &= A_l(f_j, \mathbf{r}_s) \mathbf{S}(f_j) + N_l(f_j) \\ l &= 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (1)$$

式中, J 是在频域上频率点数目, $X_l(f_j) = [X_{l,1}(f_j), X_{l,2}(f_j) \dots X_{l,M}(f_j)]^T$ 为线阵 l 的第 j 个频率点的接收信号向量, $\mathbf{S}(f_j)$ 表示源信号在第 j 个频率点的谱分量,并且, $N_l(f_j) = [N_{l,1}(f_j), N_{l,2}(f_j), \dots, N_{l,M}(f_j)]^T$ 表示线阵 l 在噪声频率 f_j 处的谱分量。 $A_l(f_j, \mathbf{r}_s)$ 是线阵 l 在频率 f_j 处的方向矩阵:

$$A_l(f_j, \mathbf{r}_s) = \begin{bmatrix} a_{11} e^{-j2\pi f_j \tau_{11}} \dots a_{1N} e^{-j2\pi f_j \tau_{1N}} \\ a_{21} e^{-j2\pi f_j \tau_{21}} \dots a_{2N} e^{-j2\pi f_j \tau_{2N}} \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ a_{M1} e^{-j2\pi f_j \tau_{M1}} \dots a_{MN} e^{-j2\pi f_j \tau_{MN}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{r}_s = [\mathbf{r}_{s1}, \dots, \mathbf{r}_{sN}]$ 为多个信号源的空间坐标,假定线阵 l 中第 m 传声器的位置矢量记为 $\mathbf{p}_m = (x_m, y_m, z_m)$,在此省略了下标 l ,则第 m 个传声器接收到第 n 个信号源发出的信号的相对时延记为 $\tau_{mn} = (\|\mathbf{p}_m - \mathbf{r}_{sN}\| - \|\mathbf{r}_{sN}\|)/c$; 相对幅度衰减因子为 $\alpha_{mn} = \|\mathbf{r}_{sN}\| / \|\mathbf{p}_m - \mathbf{r}_{sN}\|$, $m = 1, \dots, M$; $n = 1, \dots, N$ 。

由于噪声与信号不相关,线阵 l 在频率 f_j 处的协方差矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_l(f_j) &= E[\mathbf{X}_l(f_j) \mathbf{X}_l^H(f_j)] \\ &= A_l(f_j, \mathbf{r}_s) \mathbf{R}_s(f_j) A_l^H(f_j, \mathbf{r}_s) + \mathbf{R}_{Nl}(f_j) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, H 表示 Hermitian 转置, $\mathbf{R}_s(f_j)$ 和 $\mathbf{R}_{Nl}(f_j)$ 分别表示频率 f_j 处的信号协方差矩阵和线阵 l 的噪声协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_s(f_j) &= E[\mathbf{S}(f_j) \mathbf{S}^H(f_j)] \\ \mathbf{R}_{Nl}(f_j) &= E[N_l(f_j) N_l^H(f_j)] = \sigma_{lj} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, σ_{lj} 表示线阵 l 在频率 f_j 处的噪声方差。

考虑到实际接收数据是有限长的,线阵 l 的协方差矩阵通过最大似然估计得到:

$$\mathbf{R}_l(f_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}_{l,jk} \mathbf{X}_{l,jk}^H \quad (5)$$

其中, K 为把数据分成 K 段, 即平均次数, $X_{l,j,k}$ 表示线阵 l 的第 j 子带第 k 次观测值。由于阵列协方差矩阵包含了信号、噪声的有关信息, 所以信号源的位置估计也是围绕阵列协方差矩阵展开的。

3 多阵列数据融合算法理论推导

多阵列数据融合算法是把不同传声器阵列的协方差矩阵变换到同一个参考阵列上。不失一般性, 设定线阵 1 为参考阵列。 $R_l(f_j), A_l(f_j, r_s), R_s(f_j)$ 等分别简写为 $R_{lj}, A_{lj}(r_s), R_{sj}$ 。多阵列的协方差矩阵如下:

$$R_{lj} = A_{lj}(r_s) R_{sj} A_{lj}^H(r_s) + \sigma_{lj} I$$

$$l=1, 2, \dots, L; j=1, 2, \dots, J \quad (6)$$

为了将线阵 l 的方向矩阵变换到参考阵列线阵 1 上, 需满足:

$$F_{lj} A_{lj}(r_s) = A_{1j}(r_s) \quad (7)$$

其中, F_{lj} 是方向变换矩阵, 是把线阵 l 的第 j 频率的方向矩阵变换为参考阵列相应频率上的方向矩阵。由于存在误差, 使误差达到最小条件:

$$\min_{F_{lj}} \| F_{lj} A_{lj}(r_s) - A_{1j}(r_s) \|_F \quad (8)$$

同时, 将 F_{lj} 约束为酉阵,

$$F_{lj}^H F_{lj} = I \quad (9)$$

式(8)中, $\| \cdot \|_F$ 为 Frobenius 模, 式(8)在式(9)约束下的最优解为:

$$F_{lj} = V_j U_j^H \quad (10)$$

其中, U_j, V_j 的列向量分别是 $A_{lj}(r_s) \cdot A_{lj}(r_s)$ 的左右奇异矢量。

将线阵 l 的协方差矩阵变换到参考阵列线阵 1 上:

$$F_{lj} R_{lj} F_{lj}^H = F_{lj} A_{lj}(r_s) R_{sj} A_{lj}^H(r_s) F_{lj}^H + \sigma_{lj} F_{lj} \cdot F_{lj}^H \quad (11)$$

根据式(8)、(9)和(11)得:

$$F_{lj} R_{lj} F_{lj}^H = A_{1j}(r_s) R_{sj} A_{1j}^H(r_s) + \sigma'_{lj} I \quad (12)$$

将所有子阵列的协方差矩阵变换到参考阵

列后, 叠加得到的阵列协方差矩阵为:

$$R_j = \sum_{l=1}^L \alpha_l R_{lj} = \sum_{l=1}^L \alpha_l (A_{lj}(r_s) R_{sj} A_{lj}(r_s)^H + \sigma_{lj} I)$$

$$= A_{1j}(r_s) \left(\sum_{l=1}^L \alpha_l R_{sj} \right) A_{1j}(r_s)^H + \sigma'_j I \quad (13)$$

其中, $\sigma'_j = \sum_{l=1}^L \alpha_l \sigma_{lj}$ 是权向量。式(13)表明经过方向矩阵变换后, 所有子阵列接收数据的协方差矩阵可以加权相干叠加, 这样把多个阵列数据融合起来, 可以抑制噪声, 从而使声源位置估计更加稳健, 降低了信噪比门限和估计误差。

4 宽带源定位估计

TCT^[10] (two-sided correlation transformation) 是一种有效的宽带源方位估计算法, 子空间拟合误差小, 可以得到 DOA 的无偏估计。在本文中, 利用提出的算法融合了多个传声器阵列数据并形成了新的协方差矩阵, 然后再使用 TCT 算法来估计声源的位置, 为了在三维空间对声源定位, 文中把 TCT 算法推广到三维空间。由于融合的阵列协方差矩阵有抑制噪声的作用, 从而使声源位置估计的精度和稳健性得到了提高。

TCT 算法对不含噪声的阵列协方差矩阵进行双边变换:

$$\min_{T_j} \| P_0 - T_j P_j T_j^H \|_F \quad j=1, 2, \dots, J \quad (14)$$

其中, P_j 是阵列输出数据去噪后的协方差矩阵, 通过式(15)估计得到:

$$P_j = R_j - R_{n_j} = R_j - \sigma_{n_j}^2 I \quad (15)$$

根据式(13)、(15)得到去噪后的阵列协方差矩阵表达式为:

$$P_j = R_j - \sigma'_{lj} I = A_{1j}(r_s) \sum_{l=1}^L \alpha_l R_{sj} A_{1j}(r_s)^H \quad (16)$$

因此, 得到式(14)的解为:

$$T_j = U_0 U_j^H \quad (17)$$

其中, U_0, U_j 分别是 P_0 和 P_j 的特征矢量矩阵。则阵列协方差矩阵在聚焦变换后, 在频率域上平均结果为:

$$R_{foc} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J T_j P_j T_j^H = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J U_0 U_j^H P_j U_j U_0^H \quad (18)$$

设 Γ_j 是 P_j 的特征值组成的对角矩阵, 则式(18)可写为:

$$R_{foc} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J U_0 \Gamma_j U_0^H = U_0 \Gamma_0 U_0^H \quad (19)$$

其中, $\Gamma_0 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Gamma_j$, 是各个频率点的特征值矩阵平均的结果, 表明聚焦算法有效地将带宽内的信号能量聚焦到参考频率的子空间上。对于式(18), 在聚焦参考频点处应用 MUSIC 算法, 得到声源位置的估计结果。

5 仿真结果分析

本节对前面的理论分析进行仿真验证, 将多阵列数据级融合的方法(DAF)与多阵列决策级融合的方法(DEF)的估计性能做了对比。仿真中, 多阵列结构是由两个线阵子阵列构成, 每个子阵列阵元数为 8, 如图 1 所示。两个信号源为等功率平稳高斯随机信号, 位置分别为 (3m, 2m) 和 (2m, 5m), 频带范围为 400Hz~630Hz, 分数带宽为 40%,

快拍数为 40, 每次快拍所用样本长度为 1024 点, 信噪比为 -10dB。仿真得出两种算法的亮度图、空间谱峰、等值曲线图如图 2~6 所示。

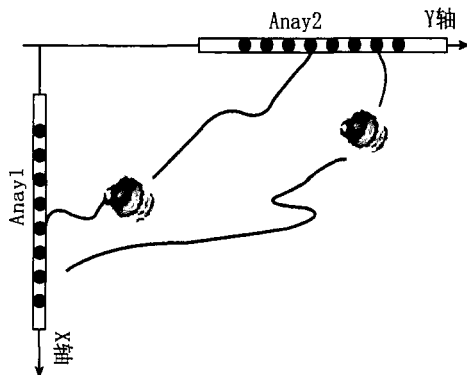


图 1 多阵列结构示意图

图 2 是单一阵列的声源定位结果的亮度图, 亮度的明暗显示了三维空间谱的高低, 空间谱峰极值点对应声源的位置。图 2(a) 是第一个子阵列的定位结果; 图 2(b) 是第二个子阵列的定位结果。从图 2 可以看到, 通过单一阵列不能很好地估计出声源的位置。图 3 是两个子阵列决策级的融合结果, 图 4 是本文提出的两个子阵列数据级的融合算法的定位结果。从图 3 与图 4 的对比可以看出, 数据级融合算法(DAF)的估计精度明显得到提高; 背景暗许多, 这说明谱峰比较高且尖锐, 稳健性好。图 5 是两种算法的三维空间谱图的比较, 也同样印证这一结论。

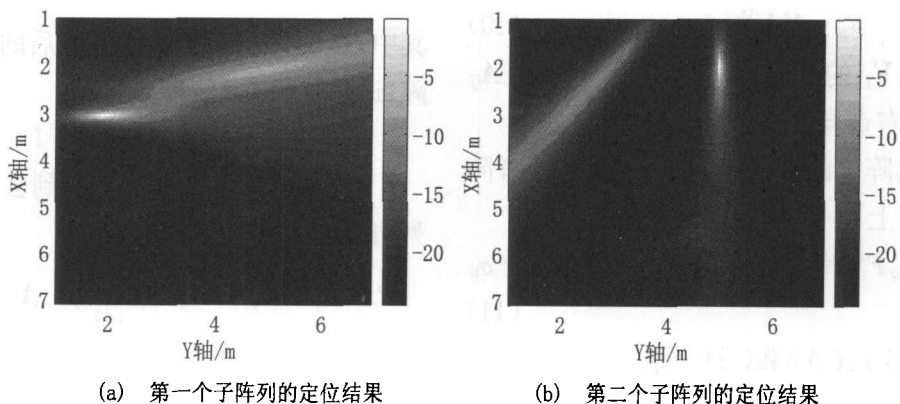


图 2 单一阵列定位结果图, 两个声源位置分别为 (3m, 2m) 和 (2m, 5m)

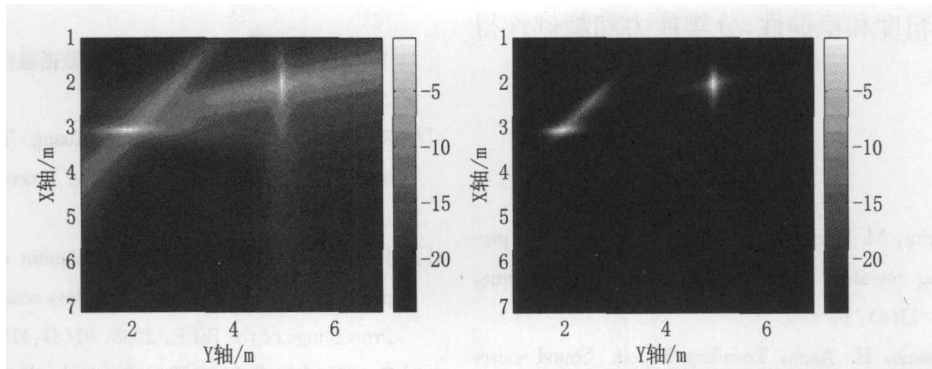


图 3 两子阵列决策级融合定位结果(DEF)

图 4 两子阵列数据级融合定位结果(DAF)

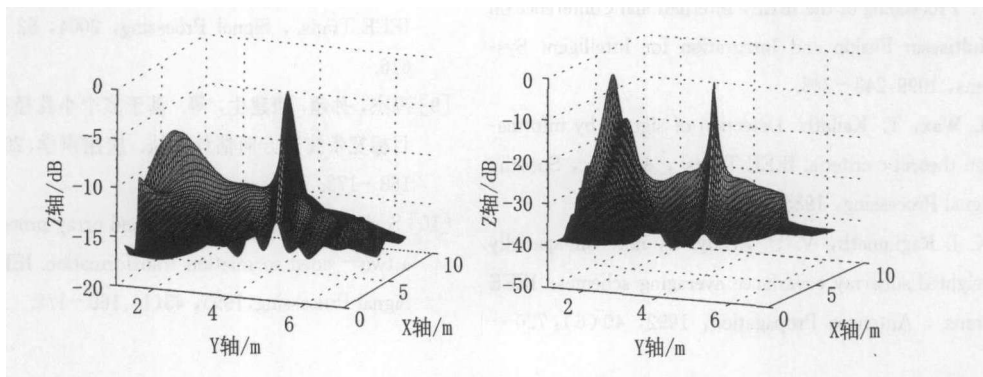


图 5 两种算法三维空间谱图对比

图 6 是两种算法空间谱的等值线图。图中对空间谱峰归一化处理,谱峰最大值为 0dB,等值线间隔为 5dB。图 6(b)中显示了两组同心封闭曲线,中心点是目标声源的

位置,从里向外,每一条曲线代表谱峰下降 5dB,与图 6(a)相比,可以看出数据级融合算法(DAF)清晰地估计出两个声源目标的位置,谱峰比较高,并且估计精度得到提高。

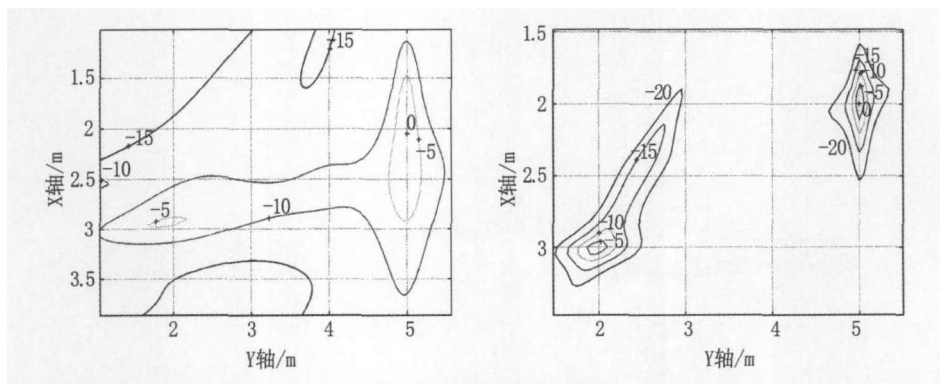


图 6 两种算法空间谱的等值线图,两个声源位置分别为(3m,2m)和(2m,5m)

本文提出的算法由于同时使用多个传声器阵列接收的数据协方差矩阵,本质上是利用不同阵列接收源信号具有较强的相关性,这样充分利用了多个阵列的数据,抑制了噪声,定位性能得以提高。

6 结论

本文提出一种多阵列数据级融合的算法,充分利用多个阵列的数据,抑制了噪声,仿真结果表明,提出的算法提高了对多声源

定位的精度和稳健性,分辨能力和稳健性得到增强。

参 考 文 献

- [1] H. Krim, M. Viberg. Two decades of array signal processing research. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(4): 67-95.
- [2] F. Asano, H. Asoh, Toshihiro Matsui. Sound source localization and signal separation for office robot "Jijo-2". *Proceeding of the IEEE, International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 1999:243-248.
- [3] M. Wax, T. Kailath. Detection of signals by information theoretic criteria. *IEEE Trans. , Acoustic, Speech, Signal Processing*, 1985, 33(4): 823-831.
- [4] K. J. Raghunath, V. U. Reddy. A note on spatially weighted subarray covariance averaging schemes. *IEEE Trans. , Antennas Propagation*, 1992, 40(6): 720-723.
- [5] 李启虎. 独立观测资料的最佳线性数据融合. *声学学报*, 2000, 25(5):385-388.
- [6] R. Sharma, V. I. Pavlovic, T. S. Huang. Toward multi-modal human-computer interface. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(5):853-869.
- [7] J. C. Chen, L. Yip, J. Elson. Coherent acoustic array processing and localization on wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(8):1154-1162.
- [8] R. J. Kozick, B. M. Sadler. Source localization with distributed sensor arrays and partial spatial coherence. *IEEE Trans. , Signal Processing*, 2004, 52(3): 601-616.
- [9] 冯杰, 孙超, 唐建生, 等. 基于多个小孔径基阵的水下目标宽带波达方向估计方法. *应用声学*, 2006, 25(3): 168-172.
- [10] S. Valaee, P. Kabal. Wideband array processing using a two-sided correlation transformation. *IEEE Trans. , Signal Processing*, 1995, 43(1):160-172.